

ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**NANO ÖLÇEKLİ ÇUBUKLARIN RİJİT OLMAYAN SINIR
ŞARTLARINDA YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE
TEORİSİNE GÖRE TİTREŞİM ANALİZLERİ**

**Fatma YANIK
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Mustafa Özgür YAYLI**

BİLECİK, 2015

Ref.No: 10083036



ANADOLU ÜNİVERSİTESİ



**BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ**

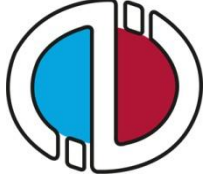
**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

**NANO ÖLÇEKLİ ÇUBUKLARIN RİJİT OLMAYAN SINIR
ŞARTLARINDA YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE
TEORİSİNE GÖRE TİTREŞİM ANALİZLERİ**

**Fatma YANIK
Yüksek Lisans**

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Mustafa Özgür YAYLI**

BİLECİK, 2015



ANADOLU UNIVERSITY



**BILECIK SEYH EDEBALI
UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Civil Engineering**

**VIBRATION ANALYSIS OF NANOBARS WITH
DEFORMABLE BOUNDARY CONDITIONS IN
NONLOCAL ELASTICITY**

**Fatma YANIK
Master's**

**Thesis Advisor
Yrd. Doç. Dr. Mustafa Özgür YAYLI**

BILECIK, 2015



BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK LİSANS
JÜRİ ONAY FORMU**

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 30/06/2015 tarih ve 24..... sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 15.07.2015 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Fatma YANIK'ın "Nano ölçekli çubukların rijit olmayan sınır şartlarında yerel olmayan elastisite teorisine göre titreşim analizleri " başlıklı tez çalışması İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak oy birliği/ ~~oy çokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) :

Yrd.Doç.Dr.Mustafa Özgür YAYLI

ÜYE :

Yrd.Doç.Dr.Kıvanç TAŞKIN

ÜYE :

Yrd.Doç.Dr.Mehmet CANBAZ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANI:

Yrd.Doç.Dr.Cenk KARAKURT

ONAY

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
.../.../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/ MÜHÜR

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım esnasın da, bilgi birikimini ve yardımlarını hiç bir zaman esirgemeyen saygı değer hocam Yrd. Doç. Dr. Mustafa Özgür YAYLI'ya, lisansüstü eğitimim boyunca bana mesleki eğitim veren tüm Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Anadolu Üniversitesi hocalarıma ve Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü personeline teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Lisansüstü eğitimim sırasında bana destek ve yardımcı olan tüm çalışma arkadaşlarıma ve Őube Müdürüme çok teşekkür ederim.

Ayrıca daima benim yanımda olan, desteğini ve yardımını esirgemeyen sevgili eőime de sonsuz Őükranlarımı sunar ve çok teşekkür ederim.

Fatma YANIK

Haziran-2015

ÖZET

Bu çalışmada nanoçubukların herhangi bir sınır koşulunda serbest titreşim davranışı yerel olmayan elastisite teorisine göre incelenmiştir. Çalışmanın ilk bölümünde; yerel olmayan elastisite teorisi, Fourier sinüs serileri ve Stokes' dönüşümü kısaca anlatılmıştır. Nanoçubuklar iki ucunda yaylar olacak şekilde modellenmiştir. Fourier sinüs serisi ve Stokes' dönüşümü birlikte kullanılarak serbest titreşim davranışı belirlenmiştir. Çalışma, yapılmış birçok çalışma ile karşılaştırılmıştır. Eğer Fourier sinüs seri açılımında yeterli terim kullanılırsa; çok güzel uyumun yakalandığı gösterilmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında hasarlı nanoçubuklar incelenmiştir. Çubuktaki hasar bir yay olarak tanımlanmıştır. Eksenel yer değiştirme fonksiyonu iki Fourier sinüs serisi şeklinde verilmiştir. Genel frekans determinantı Stokes' dönüşümünün sınır koşullarına uygulanması vasıtasıyla elde edilmiştir. Bu determinant aynı zamanda klasik sınır koşullarına sahip hasarlı nanoçubukların serbest titreşim frekanslarının bulunması içinde kullanılabilir. Çeşitli parametrelerin serbest titreşim davranışına etkisi birçok sayısal örnekte gösterilmiştir. Hesaplanan değerler, önerilen yöntemin diğer analitik çözüm yöntemlerine göre daha basit çözümler yapılabildiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler

Nanoçubuk; yerel olmayan elastisite; sınır koşulları; serbest eksenel titreşim; Fourier sinüs serisi; Stokes' dönüşümü.

ABSTRACT

The free axial vibration response of nanorods with arbitrary boundary conditions is presented based on the nonlocal elasticity theory. First part of study, nonlocal elasticity theory, Fourier sine series and Stokes' transformation are briefly reviewed. Nanorods are modelled with attached springs at both ends. Fourier sine series and Stokes' transformation are used to determine the vibrational response. Several comparisons are made between the results of the presented method and previous works in the literature. Very good agreement is derived when enough terms are included in the Fourier sine series expansion.

The second part of study, cracked nanorods are investigated. Crack is modelled by an attached spring. Axial deflection function is represented by two Fourier sine series. The general frequency determinant is constructed by applying Stokes' transformation to the boundary conditions. This determinant can also be used to determine the free vibration frequencies of a cracked nanorod with classical supporting conditions. The influence of the several parametres on the free vibration response is examined in some numerical examples. The calculated results indicate that the present analytic procedure provides a more straightforward than the other analytical methods.

Keywords: Nanorods; nonlocal elasticity; boundary conditions; free axial vibration; Fourier sine series; Stokes' transformation.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

| | |
|---|-------------|
| JÜRİ ONAY SAYFASI | |
| TEŞEKKÜR | |
| ÖZET..... | I |
| ABSTRACT | II |
| İÇİNDEKİLER | III |
| SİMGELER VE KISALTMALAR | V |
| ÇİZELGELER | VII |
| ŞEKİLLER | VIII |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. ÇALIŞMANIN AMACI | 3 |
| 2.1. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar | 3 |
| 2.2. Nanoteknoloji | 10 |
| 2.3. Karbon Nanotüpler | 12 |
| 2.3.1. Tek duvarlı karbon nanotüpler(TDKNT) | 16 |
| 2.3.2. Çok duvarlı karbon nanotüpler(ÇDKNT) | 18 |
| 2.4. Fourier Serisi | 19 |
| 2.5. Stokes' Dönüşümü | 21 |
| 2.6. Elastik Zemine Oturan Kirişler | 22 |
| 3. KLASİK ELASTİSİTE TEORİSİ..... | 24 |
| 3.1. Klasik Elastisite Teorisi ile Elastik Zemine Oturan Nanoçubuğun Eksenel Titreşim Analizleri | 24 |
| 3.1.1. Klasik elastisite de modal titreşim fonksiyonu | 25 |
| 3.1.2. Klasik elastisite de Stokes' dönüşümü | 26 |
| 3.1.3. Klasik elastisite de sınır koşulları..... | 27 |
| 3.1.4. Klasik elastisite de analitik çözümler ve değerlendirmeler..... | 28 |
| 3.1.4.1. Klasik elastisite de kurulan formülasyonun doğruluğunun tespiti | 28 |
| 3.1.4.2. Sayısal sonuçlar ve değerlendirmeler | 29 |
| 4. YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ | 43 |
| 4.1. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi ile Elastik Zemine Oturan Nanoçubukların Eksenel Titreşim Analizleri | 43 |
| 4.1.1. Yerel olmayan elastisite formülasyonları..... | 44 |
| 4.1.2. Yerel olmayan elastisite teorisinde Stokes' dönüşümleri | 45 |
| 4.1.3. Yerel olmayan elastisite teorisine göre genel frekanslar..... | 47 |
| 4.1.4. Yerel olmayan elastisite de analitik çözümler ve değerlendirmeler | 48 |
| 4.1.4.1. Yerel olmayan elastisite de kurulan formülasyonun doğruluğunun tespiti..... | 48 |
| 4.1.4.2. Yerel olmayan elastisite de sayısal sonuçlar ve değerlendirmeler | 50 |
| 5. HASARLI NANOÇUBUKLAR..... | 63 |
| 5.1. Hasarlı Nanoçubukların Eksenel Titreşim Analizleri | 63 |
| 5.1.1. Hasarlı nanoçubuğun formülasyonları | 63 |
| 5.1.2. Hasarlı nanoçubuğun Stoke's dönüşümleri | 65 |
| 5.1.3. Yerel olmayan sınır ve süreksizlik koşulları | 67 |
| 5.1.4. Hasarlı nanoçubuğun analitik çözümleri ve değerlendirmeleri..... | 70 |
| 5.1.4.1. Hasarlı nanoçubuk için kurulan formülasyonun doğruluğunun tespiti..... | 70 |

| | |
|--|-----------|
| 5.1.4.2. Hasarlı nanoçubuğun sayısal sonuçlar ve değerlendirmeler..... | 71 |
| 6. SONUÇ..... | 80 |
| KAYNAKLAR | 82 |
| ÖZGEÇMİŞ | |

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

| | |
|---|--|
| A | : En Kesit Alanı |
| A_n, A_j, A_i, B_i | : Fourier Katsayıları |
| a | : Bir İç Karakteristik Uzunluk |
| $a_0, a_n, a_i, b_0, b_n, b_j, b_i, f_0, f_n$ | : Fourier Sabitleri |
| C | : Kapalı Yol |
| d | : Karbon Nanotüpün çapı |
| E | : Elastisite Modülü |
| e_0 | : Sabit Bir Sayı |
| \vec{F} | : Vektör |
| $f(x)$ | : Fonksiyon |
| $f(t)$ | : Periyodik Fonksiyon |
| G | : Birim Uzunluk Kütlesi |
| K | : Zemin Yatak Katsayısı |
| k_w | : Elastik Zemin İçin Winkler Katsayısı |
| L, L_1, L_2 | : Çubuk Boyu |
| N | : Kuvvet |
| nm | : Nanometre |
| n, m | : Tamsayılar |
| S | : Alan |
| s_0, s_L | : Elastik Yay Sabitleri |
| S_0, S_L | : Elastik Yay Parametreleri |
| sp | : Doğrusal Bağlanma |
| sp^2 | : Üçgensel Bağlanma |
| sp^3 | : Piramit Şeklinde Bağlanma |
| t | : Zaman |
| u, V, V_1, V_2 | : Eksenel Yer Değiştirmeler |
| $u(x, t), V_1(x, t), V_2(x, t)$ | : Eksenel Yer Değiştirme Fonksiyonları |
| $\varphi(x), \varphi_1(x)$ ve $\varphi_2(x)$ | : Modal Yer Değiştirme Fonksiyonları |

Simgeler

| | |
|-----------------------|---|
| ω | : Açısal Frekans |
| $\vec{\nabla}$ | : Nabla Operatörü |
| x | : Bağımsız Değişken |
| $\delta_1, \delta_2,$ | : Hasarlı Nanoçubuğun, Hasarlı Bölgesinin Ayırdığı Uzunlukların, Hasarsız Nanoçubuğun Uzunluğuna Oranları |
| λ | : Eksenel Titreşim Frekansı |
| β, γ | : Yerel Olmayan Elastisite Parametreleri |
| Ψ | : Hasarın Boyutunu Temsil Eden Bir Katsayı |

Not: Bu listede verilmeyen bazı semboller metin içerisinde ilgili oldukları yerlerde tanımlanmışlardır.

Kısaltmalar

| | |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| AKM | : Atomik Kuvvet Mikroskobu |
| C | : Karbon Atomu |
| Cos | : Kosinüs |
| C ₂ H ₂ | : Asetilen Molekülü |
| ÇDKNT | : Çok Duvarlı Karbon Nanotüp |
| H | : Hidrojen Atomu |
| KNT | : Karbon Nanotüp |
| SEM | : Taramalı Elektron Mikroskobu |
| Sin | : Sinüs |
| STS | : Taramalı Tünelleme Spektroskopi |
| TDKNT | : Tek Duvarlı Karbon Nanotüp |
| TEM | : Geçirmeli Elektron Mikroskobu |
| TTM | : Taramalı Tünelleme Mikroskobu |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa No |
|--|----------|
| Çizelge 2.1: Karbon nanotüplerin karşılaştırmalı özellikleri | 18 |
| Çizelge 3.1: İki tarafı ankastre olan çubuk için karşılaştırma..... | 29 |
| Çizelge 3.2: Konsol olan olan çubuk için karşılaştırma..... | 29 |
| Çizelge 3.3: $K=9$ ve $S_0 = S_L$ için farklı değerler verilerek bulunan eksenel titreşim frekansları..... | 34 |
| Çizelge 3.4: $K=8$ ve $S_0 = S_L$ için farklı değerler verilerek bulunan eksenel titreşim frekansları..... | 34 |
| Çizelge 3.5: Zemin yatak katsayısı ve yay parametresinin eşit olması durumu..... | 37 |
| Çizelge 4.1: İki ucu ankastre olan nanoçubuk için karşılaştırma..... | 49 |
| Çizelge 4.2: Konsol gibi davranan nanoçubuk için karşılaştırma..... | 50 |
| Çizelge 4.3: $\beta = 0,05$ ve $S_0 = S_L = 0$ olan nanoçubuk için analiz sonuçları..... | 52 |
| Çizelge 4.4: $\beta = 0,03$ ve $S_0 = S_L = 1$ olan nanoçubuk için analiz sonuçları..... | 54 |
| Çizelge 4.5: $\beta = 0,09$ ve $S_0 = S_L = 1$ olan nanoçubuk için analiz sonuçları..... | 56 |
| Çizelge 5.1: Konsol gibi davranan hasarlı nanoçubuk için karşılaştırma..... | 71 |
| Çizelge 5.2: $\Psi = 0,1144$, $\delta_1 = 0,2002$, $\delta_2 = 0,7998$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1000$ olan hasarlı nanoçubuğun eksenel titreşim frekansları..... | 72 |
| Çizelge 5.3: $\Psi = 0,1144$, $\delta_1 = 0,3$, $\delta_2 = 0,7$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1000$ olan hasarlı nanoçubuğun eksenel titreşim frekansları..... | 73 |
| Çizelge 5.4: $\Psi = 0,1144$, $\delta_1 = 0,4$, $\delta_2 = 0,6$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1000$ olan hasarlı nanoçubuğun eksenel titreşim frekansları..... | 74 |
| Çizelge 5.5: $\Psi = 0,1144$, $\delta_1 = 0,2$, $\delta_2 = 0,8$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1,2,3,\dots,10$ ve $S_L = 0,1,2,3,\dots,10$ olan hasarlı nanoçubuğun eksenel titreşim frekansları..... | 76 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | Sayfa No |
|---|----------|
| Şekil 2.1: Karbon atomların bağlanma şekilleri..... | 13 |
| Şekil 2.2: Asetilen molekülünün bağlanma şekli..... | 13 |
| Şekil 2.3: Karbon atom(C)'larından meydana gelen bir grafitte levhası..... | 14 |
| Şekil 2.4: Karbon atom(C)'larından meydana gelen bir fullerene molekülü..... | 15 |
| Şekil 2.5: TDKNT modeli..... | 16 |
| Şekil 2.6: KNT modelleri..... | 17 |
| Şekil 2.7: ÇDKNT modeli..... | 19 |
| Şekil 2.8: Bir karenin kenarları boyunca, çizgi integrali..... | 21 |
| Şekil 2.9: Stokes' dönüşümü, çizgisel kapalı alan ve ilgili yüzey integrali..... | 22 |
| Şekil 3.1: Elastik zemine oturan bir çubuk kesiti..... | 25 |
| Şekil 3.2: $S_0 = S_L = 1$ olan değişik zemin yatak katsayıları ile aksenal titreşim frekansı..... | 30 |
| Şekil 3.3: $S_0 = S_L = 2$ olan değişik zemin yatak katsayıları ile aksenal titreşim frekansı..... | 30 |
| Şekil 3.4: $S_0 = S_L = 3$ olan değişik zemin yatak katsayıları ile aksenal titreşim frekansı..... | 31 |
| Şekil 3.5: $S_0 = S_L = 4$ olan değişik zemin yatak katsayıları ile aksenal titreşim frekansı..... | 32 |
| Şekil 3.6: $S_0 = S_L = 5$ olan değişik zemin yatak katsayıları ile aksenal titreşim frekansı..... | 32 |
| Şekil 3.7: Sınır koşulları ile aksenal titreşim frekansı alakası..... | 33 |
| Şekil 3.8: $K=5$ ve $S_0 = S_L = 1,2,\dots,5$ kadar olan λ aksenal titreşim frekansları... | 35 |
| Şekil 3.9: Farklı yatak kat sayıları için iki λ aksenal titreşim frekansları..... | 36 |
| Şekil 3.10: Klasik Elastisite teorisine göre 50 terimde λ aksenal titreşim frekansları..... | 37 |
| Şekil 3.11: Klasik Elastisite teorisine göre 25 terimde λ aksenal titreşim frekansları..... | 38 |
| Şekil 3.12: Klasik Elastisite teorisine göre 10 terimde λ aksenal titreşim frekansları..... | 38 |

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam ediyor)

| | Sayfa No |
|--|-----------------|
| Şekil 3.13: Belli oranlarda arttırılan terim sayılarında λ_1 aksenal titreşim frekansları..... | 39 |
| Şekil 3.14: Belli oranlarda arttırılan terim sayılarında λ_2 aksenal titreşim frekansları..... | 39 |
| Şekil 3.15: Belli oranlarda arttırılan terim sayılarında λ_3 aksenal titreşim frekansları..... | 40 |
| Şekil 3.16: Belli oranlarda arttırılan yay parametreleri ile λ_4 aksenal titreşim frekansları arasındaki bağıntı..... | 41 |
| Şekil 3.17: Belli oranlarda arttırılan yay parametreleri ile λ_5 aksenal titreşim frekansları arasındaki bağıntı..... | 41 |
| Şekil 3.18: Belli oranlarda arttırılan yay parametreleri ile λ_6 aksenal titreşim frekansları arasındaki bağıntı..... | 42 |
| Şekil 4.1: Elastik zemine oturan nanoçubuğun şekli..... | 44 |
| Şekil 4.2: Elastik zemine oturan nanoçubuğun kurulan fiziksel modeli..... | 44 |
| Şekil 4.3: $\beta = S_0 = S_L = 0$ olan nanoçubuk için λ aksenal titreşim frekansları..... | 51 |
| Şekil 4.4: $\beta = 0,03$ ve $S_0 = S_L = 0$ olan nanoçubuk için λ aksenal titreşim frekansları..... | 52 |
| Şekil 4.5: $\beta = 0$ ve $S_0 = S_L = 1$ olan nanoçubuk için λ aksenal titreşim frekansları..... | 53 |
| Şekil 4.6: $\beta = 0,05$ ve $S_0 = S_L = 1$ olan nanoçubuk için λ aksenal titreşim frekansları..... | 54 |
| Şekil 4.7: $\beta = 0,07$ ve $S_0 = S_L = 1$ olan nanoçubuk için λ aksenal titreşim frekansları..... | 55 |
| Şekil 4.8: $\beta = 0$, $K=1$ olan nanoçubuk için λ_1 aksenal titreşim frekansları..... | 57 |
| Şekil 4.9: $\beta = 0$, $K=1$ olan nanoçubuk için λ_2 aksenal titreşim frekansları..... | 57 |
| Şekil 4.10: $\beta = 0$, $K=1$ olan nanoçubuk için λ_3 aksenal titreşim frekansları..... | 58 |
| Şekil 4.11: $\beta = 0$, $K=1$ olan nanoçubuk için 50 terimde bulunan λ aksenal titreşim frekansları..... | 59 |

ŞEKİLLER DİZİNİ(Devam ediyor)

Sayfa No

| | |
|--|----|
| Şekil 4.12: $\beta = 0, K=1$ olan nanoçubuk için 25 terimde bulunan λ aksenal titreşim frekansları..... | 59 |
| Şekil 4.13: $\beta = 0, K=1$ olan nanoçubuk için 10 terimde bulunan λ aksenal titreşim frekansları..... | 60 |
| Şekil 4.14: $\beta = 0, K=1, S_0=S_L = 1, 10, 100, 1000$ olan nanoçubuğun λ_4 aksenal titreşim frekansları..... | 61 |
| Şekil 4.15: $\beta = 0, K=1, S_0=S_L = 1, 10, 100, 1000$ olan nanoçubuğun λ_5 aksenal titreşim frekansları..... | 61 |
| Şekil 4.16: $\beta = 0, K=1, S_0=S_L = 1, 10, 100, 1000$ olan nanoçubuğun λ_6 aksenal titreşim frekansları..... | 62 |
| Şekil 5.1: Hasarlı bir nanoçubuğun şekli ve kurulan fiziksel modeli..... | 63 |
| Şekil 5.2: $\Psi = 0, 1144, \delta_1 = 0, 1, \delta_2 = 0, 9, \gamma = 0, S_0 = 1000$ olan hasarlı nanoçubuğun λ aksenal titreşim frekansları..... | 75 |
| Şekil 5.3: $\Psi = 0, 1144, \delta_1 = 0, 3, \delta_2 = 0, 8, \gamma = 0, S_0 = 1, 2, 3, \dots, 10$ ve $S_L = 0, 1, 2, 3, \dots, 10$ olan hasarlı nanoçubuğun λ aksenal titreşim frekansları..... | 77 |
| Şekil 5.4: $\Psi = 0, 1144, \delta_1 = 0, 4, \delta_2 = 0, 6, \gamma = 0, S_0 = 1, 2, 3, \dots, 10$ ve $S_L = 0, 1, 2, 3, \dots, 10$ olan hasarlı nanoçubuğun λ aksenal titreşim frekansları..... | 78 |
| Şekil 5.5: $\Psi = 0, 1144, \delta_1 = 0, 4, \delta_2 = 0, 6, \gamma = 0, S_0 = 1, 2, 3, \dots, 10$ ve $S_L = 0, 1, 2, 3, \dots, 10$ olan hasarlı nanoçubuğun λ aksenal titreşim frekansları..... | 79 |

1.GİRİŞ

İnsanların hayatlarını sürdürebilmeleri için en temel ihtiyaçları; gıda ve barınmadır. Artan dünya nüfusunun, ihtiyaçlarının karşılanabilmesi için bir takım çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birisi de nanoteknolojidir.

Nanoteknoloji, maddeleri nanometrik boyutlarında incelemektedir. Bir metrenin milyarda biri ölçeği nanometre olarak tanımlanmaktadır. Maddelerde, nanometre boyutlarına inildiğinde, makroskopik boyutlarındaki özelliklerinden çok farklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikler gösterirler.

Canlıların temel taşı olan karbon(C) elementi, geliştirilerek, karbon nanotüpler elde edilmektedirler. Makroskopik boyuttaki karbon tüpler çok kırılğan bir yapıya sahipken, nanometre boyutundaki karbon nanotüpler, daha esnek ve dayanıklı olmaktadırlar (Sirmen,2010).

Karbon nanotüplerin özellikleri, farklı yöntemlerle araştırılmaktadır. Bu yöntemlerden birisi de klasik elastisite teorisidir. Klasik elastisite teorisinde, belli bir noktadaki gerilmeler, komşu noktalardaki şekil değişikliğinden meydana gelen gerilmeler ve çubuğun boyutu dikkate alınmadan hesap yapılmaktadır. Ancak, yerel olmayan elastisite teorisinde, belli bir noktadaki gerilmeler, komşu noktalardaki şekil değişikliğinden meydana gelen gerilmeler ve çubuğun boyutu dikkate alınarak hesap yapılmaktadır. Bu nedenle karbon nanotüplerin incelenmesinde, yerel olmayan elastisite teorisi kullanılmaktadır.

Makroskopik boyutlu maddeler, belli bir yüke kadar şekil değiştirmedeği ve rijit olduğu kabul edilmesinden dolayı, rijit sınır koşulları ile titreşim frekansları hesaplanabilmektedir. Rijit sınır koşullarında, maddelerin uzaması ve şekil değiştirmesi dikkate alınmamaktadır. Ancak nano boyutlu maddelerde, belli bir yük altında uzama ve şekil değiştirme meydana gelmesinden dolayı, rijitliklerini kaybederler. Bu nedenle karbon nanotüplerin titreşim frekanslarının incelenmesinde, rijit olmayan sınır koşulları kullanılmalıdır. Rijit olmayan sınır koşulları, hesaba dâhil edebilebilmesi için matematiksel bir dönüşüm olan Stokes' dönüşümü yapılmalıdır.

Stokes' dönüşümünden sonra, seçilen modal fonksiyonları, Fourier sinüs serilerinden faydalanılarak, sonsuz serilerden oluşan, doğrusal denklem sistemi elde edilmektedir. Elde edilen denklem sistemlerinin katsayılarından, katsayılar matrisi oluşturulur. Oluşturulan katsayılar matrisinin, öz değerlerinin bulunması ile titreşim

frekansları bulunur. Bulunan sonuçlar, literatürdeki diğer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak yapılan çalışmanın doğruluğu ispatlanmaktadır. Bu çalışmada çözüm analizleri, Wolfram Mathematica matematiksel analiz programı kullanılarak yapılmıştır. Bu çözüm analizlerin sonuçları, çizelgeler ve şekiller ile sunulmuştur.

2.ÇALIŞMANIN AMACI

Günümüzde, nanoteknoloji önemini giderek artırmaktadır. Nanoteknoloji ile maddeler, nano boyutta incelenebildiğinden, daha sağlam ve daha hafif hale dönüşebilirler. İnşaat sektöründe, önemli bir yere sahip olan nano ölçekli çubuklar için çeşitli araştırmaların yapılması gerekmektedir. Karbon nanotüp(KNT)ler, nano teknoloji ile üç farklı yöntemde incelenebilmektedirler. Bu yöntemlerden, "Simülasyon" ve "Sentez" yöntemlerinde, çok pahalı deneyler yapılması gerektiğinden, bu çalışmada üçüncü yöntem olan "Teorik" yöntem tercih edilecektir.

İlk önce nano ölçekteki bir çubuk ele alınacaktır. Nano ölçekli çubuk, çok küçük boyutlarda olması nedeniyle, rijitliğini kaybedeceği varsayılarak rijit olmayan sınır koşullarında incelenecektir. Boyuta bağlı olmayan klasik elastisite teorisi ve boyuta bağlı yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak, bazı yükler altında titreşim analizleri yapılacaktır. Ayrıca, hasarlı nano ölçekli bir çubuğunda titreşim analizi yapılacaktır.

Yapılan araştırmalar sonucunda, bu konuda yeterince çalışmaların yapılmadığı tespit edildiğinden, bu alandaki eksikliğin giderilmesi için nano ölçekli çubukların rijit olmayan sınır şartlarında yerel olmayan elastisite teorisine göre titreşim frekanslarının bulunması amaçlanmaktadır. Bulunan sonuçlar karbon nanotüplerin tasarımı için kullanılabilir olacaktır.

Bu çalışmada, ilk önce nanoteknoloji ve karbon nanotüp(KNT)'ler hakkında bilgi verilecektir. Klasik elastisite ve yerel olmayan elastisite teorileri kullanılarak nano ölçekli çubukların titreşim analizleri yapılacaktır. Hasarlı nano ölçekli çubuğun titreşim analizi yapılacaktır. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki çalışmalarda bulunan sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Yapılan analizlerin sonuçları, çizelge ve grafiklerle gösterilecektir.

2.1. Konuyla İlgili Yapılan Çalışmalar

Winkler(1867), yaylardan oluşan bir modelleme ile elastik zemini modellemiştir. Timoshenko(1937), titreşim teorisi üzerine güçlü ve modern hesaplama tekniklerini tanıtmıştır.

Hetenyi(1946), elastik zemine oturan kiriş teorisini araştırmıştır. Chung(1953), elastik zemine oturan kısıtlı dairesel kirişin eğilmesini incelemiştir. Elastik zemine oturan kirişler üzerinde bazı ikincil etkilerin etkisini ve kirişlerin titreşimleri üzerine Frederick(1954), bir çalışma yapmıştır.

Berg(1958), elastik zemine oturan kirişlerin rijitlik katsayıları için bir yöntem araştırmıştır. Tanyi(1962), elastik zemin tarafından kısmen kısıtlanmış kirişleri araştırmıştır. Bald(1964), elastik zemine oturan kirişler teorisine giriş çalışmasını gerçekleştirmiştir.

Elastik zemine oturan sürekli kirişlerin farklı yükler altındaki davranışını Badr(1964), incelemiştir. Chang(1965), elastik zemine oturan sonsuz kirişleri incelemiştir. Vlasov ve vd.(1966), elastik zemine oturan kiriş, plaka ve kabukları incelemiştir. Ray(1966), Orkov ve Saxenhofer(1967), ve Meshgin(1974), elastik zemine oturan kirişleri araştırmışlardır. Carroll(1969), elastik zemine oturan sürekli kirişleri araştırmıştır.

Kao(1968), doğrusal olmayan elastik zemine oturan kirişleri araştırmıştır. Weberg(1969), elastik zemine oturan bir eğrisel kirişin frekans analizini yapmıştır. Tuma ve Alberti(1970), elastik zemine oturan kirişlerin statik parametrelerini araştırmışlardır.

Elastik zemine oturan kısıtlı dairesel kirişin eğilmesini Lin(1970a), araştırmıştır. Lin(1970b), ve Hsu(1970), tek yönlü elastik zemine oturan kirişleri araştırmışlardır. Graza(1970), elastik zemine oturan kirişlerin matris analizini incelemiştir. Elastik zemine oturan bir kirişin birbirini izleyen kuvvetlerin etkisi altındaki stabilitesini Smith ve Herrmann(1972), incelemiştir. Elastik zemine oturan bir kiriş elemanı için rijitlik katsayılarını Broekhuizen(1972), araştırmıştır.

Elastik zemine oturan kiriş modeli için bazı temas problemlerini Chez(1974), incelemiştir. Nugent(1975), elastik zemine oturan kirişleri ve dairesel plakaları incelemiştir. Hayes(1976), elastik zemine oturan kirişlerin burkulmasını araştırmıştır. Nakamoto(1976), elastik zemine oturan bir kirişin deplasmanlarını araştırmıştır. Doshi(1976), elastik zemine oturan düzgün olmayan kesitli kirişleri incelemiştir.

Selvadurai(1979), elastik zemin-temel etkileşim analizini yapmıştır. Grigoriu ve Khater(1985), rastgele elastik zemine oturan kirişlerin sonlu farklar analizini araştırmışlardır. Değişken elastik zemine oturan kirişleri Clastornik(1986), araştırmıştır. Liu(1988), bir elastik zemine oturan kiriş modeli üzerine genelleştirilmiş kırılma çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Lai(1990), elastik zemine oturan kirişlerin dinamik tepkisini incelemiştir.

Oruçoğlu(1991), yerel olmayan elastisitede çatlak problemini incelemiştir. Emma(1992), elastik zemine oturan kirişlerin, değişik yükler altındaki parametrik çalışmasını yapmıştır. Stekel(1992), elastik zemine oturan dairesel kesitli kirişlerin analizini yapmıştır. Doğan(1993), elastik zemin üzerine oturan kirişleri araştırmıştır. Eisenberger(1994), değişken tek parametrelili ve iki parametrelili elastik zemine oturan kirişler için titreşim frekanslarını incelemiştir.

Kumar ve Sujith(1997), üniform olmayan çubukların aksenal titreşimleri için kesin çözümlerini araştırmışlardır. Aköz ve Kadıoğlu(1997), elastik zemine oturan doğru ve daire eksenli kirişlerin karışık sonlu eleman çözümünü gerçekleştirmişlerdir. Jones ve Jones(1997), elastik zemine oturan kirişin analizini yapmışlar, daha sonra Jones(1997), sonlu farklar teorisi kullanılarak elastik zemine oturan kirişlerin analizini yapmıştır.

Civalek(1998), (2004a), (2004b), (2005), elastik zemine oturan kirişlerin noro-fuzzy tekniği ile analizini, elastik zemine oturan yapıların hesap yöntemlerine genel bir bakışını ve elastik zemine oturan plakların doğrusal olmayan analizini, Winkler elastik zemine oturan dairesel plakaların geometrik bakımdan doğrusal olmayan dinamik analizini araştırmıştır.

Elastik zemine oturan kirişlerin, dairesel plakalar ve silindirik tankların tasarım analizini Melerski(2000), araştırmıştır. Coşkun(2000), bir gerilimsiz Winkler zemin üzerine oturan bir kirişin doğrusal olmayan titreşimleri araştırmıştır.

Düzgün(2001), elastik zemine oturan sürekli temellerin kuvvet yöntemi ile analizini yapmış ve sayısal hesabı için çeşitli bilgisayar programı algoritmalarını oluşturmuştur. Elastik kirişlerin analizi ve tasarımı için hesaplama yöntemlerini Pilkey(2002), incelemiştir.

Ayvaz ve Oguzgan(2002), elastik zemine oturan kirişlerin değiştirilmiş Vlasov modelinin uygulanması ile serbest titreşim analizini yapmışlardır. Yeşilce(2004), yatak katsayısı değişken elastik zemine kısmi gömülü kazıkların serbest titreşim analizlerini incelemiştir.

Bahçıvan ve Karadağ(2005), elastik zemin üzerindeki çubuk uygulamalarının serbest ve nondoğrusal titreşim analizlerini incelemiştir. Civalek ve Ülker(2006), polinom diferansiyel quadrature(PDQ) ve sonlu farklar(SF) metod çifti ile elastik

zemine oturan dikdörtgen plakların geometrik bakımdan doğrusal olmayan analizini incelemişlerdir.

Akbaba(2006), elastik zemine oturan çelik lif donatılı ve çelik hasır donatılı beton plakların sayısal analizini incelemiştir. Donatı tipi, tel içeriği ve zemin yatak katsayısı değişiminin, tekil yük altındaki çelik tel ve çelik hasır donatılı beton plakların davranışına etkisini Kişin(2006), incelemiştir.

Kılıç(2006), homojen, izotrop ve doğrusal elastik Winkler ve Vlasov zemini üzerine oturan dikdörtgen bir plağın harmonik yük altındaki davranışını incelemiştir. Tsudik(2006;2012), elastik zemine oturan kiriş ve çerçevelerin analizini ve elastik zemin üzerine oturan yapılarının analizini incelemiştir.

Karaşin ve Gülkan(2008), elastik zeminlere oturan plakların sonlu ızgara yöntemi ile yaklaşık çözümünü incelemişlerdir. Civalek ve Demir(2009), elastik zemine oturan kirişlerin analizlerini ayırık tekil konvolüsyon ve harmonik diferansiyel quadrature yöntemlerini kullanarak gerçekleştirmişlerdir.

Aydoğdu(2009), (2012), yerel olmayan sürekli çubuk modeli ile nanoçubukların aksenal titreşimini ve yerel olmayan elastisite teorisi kullanarak elastik zemine gömülü nanoçubukların (karbon nanaotüpler) aksenal titreşim analizini incelemiştir. Özgan ve Daloğlu(2011), (2005), elastik zemine oturan kalın plaklar için kayma kilitlenmesiz bir sonlu eleman modelini ve elastik zemine oturan plaklar için etkili zemin derinliğini incelemişlerdir.

Kutlu(2007), elastik zemine oturan çelik lif donatılı beton plakların deneysel analizini ve genel bir değerlendirmesini yapmıştır. Beton sınıfı ve tel içeriği aynı, yatak katsayıları farklı üç ayrı beton plağın tekil yük etkisi altındaki davranışlarını Güler(2007), incelemiştir.

Seçkin(2007), yalnız basınca çalışan elastik zemine oturan sonlu bir kirişin, simetrik olmayan tekil yükleme altındaki davranışını incelemiştir. Duman(2008), elastik zemine oturan radye temellerin hesabını incelemiştir. Aluç(2007), elastik zemine oturan iki yapıya sh dalgası etkimesi durumunda yapı-zemin-yapı etkileşim problemini incelemiştir.

Sönmezateş(2007), tarafından elastik bir zemin üzerine oturan daire eksenli yayılı yüklü çubuk için kesit tesirlerini başlangıç değerleri metodunu kullanılarak elde

etmiştir. Bilgin(2007), elastik bir zemin üzerine oturan daire eksenli çubuk için kesit tesirlerini başlangıç değerleri ve taşıma matrisi metodu kullanılarak elde etmiştir.

Avcar(2007), elastik zemin üzerinde bulunan homojen olmayan elastik kirişin stabilitesini ve titreşimini incelemiştir. Akyol(2007), elastik zemin üzerine oturan kirişlerin yönetici denklem ve sap2000 analiz programı ile karşılaştırılmasını araştırmıştır.

Develi(2007), elastik zemin üzerine oturan timoshenko kirişinde titreşim problemini araştırmıştır. (Rao,2007; Leissa ve Qatu,2011), sürekli sistemlerin titreşimini incelemiştir.

Avcar(2007;2010;2014), elastik zemin üzerinde bulunan homojen olmayan elastik kirişin stabilitesini ve titreşimini, elastik zemin üzerinde bulunan her iki ucu ankastre mesnetli rastgele ve sürekli homojen olmayan kirişin serbest titreşimini ve farklı geometrik özellikleri ve sınır koşulları göz önüne alınarak kirişlerin serbest titreşim analizini incelemiştir. Yazıcı(2009), elastik zemine oturan timoshenko kirişinin sonlu elemanlar yöntemiyle elastoplastik analizini incelemiştir.

Özdemir(2009), Winkler elastik zemini üzerine oturan sonlu uzunluktaki kirişin dinamik tekil yük etkisi altında sonlu titreşimini incelemiştir. Sofiyev ve vd.(2009), bir Winkler zeminde homojen olmayan kesik konik kabukların serbest titreşimini araştırmışlardır.

Attarnejad ve vd.(2010), elastik zemine oturan kirişlerin iki parametrelili farklı uygulama dönüşümü ile Timoshenko'nun serbest titreşim analizini yapmışlardır. Sofiyev(2010), Pasternak zemin eksenel yükü etkisinde bir FGM katmanına içerdiği silindirik kabukların stabilitesini araştırmıştır. Kösegil(2010), Açı ve Ritz Yöntemleri, yerel olmayan elastisite çerçevesinde incelemiştir.

Yaylı(2010;2011a;2011b;2014a;2014b;2014c) yerel olmayan elastisite teorisine göre ikinci mertebe teorisini, yerel olmayan kirişler için ek sınır koşulları kullanılarak sonlu elemanlar metodu zayıf formülasyonu, gradyan elastik kirişin sonlu elemanlar yöntemi ile stabilite analizini, farklı sınır şartları ile karbon nanotüpler eksenel titreşimini, değişen kesitli bir gradyan elastik kirişin serbest titreşim davranışını ve ölçülü sınır şartları ile tek duvarlı karbon nanotüplerin titreşim analizi için kompakt analitik yöntemini incelemiştir.

Aksencer(2010), yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak nano plakların statik ve dinamik analizini teorik olarak incelemiştir. Akgöz(2010), yüksek mertebeden elastisite teorilerinden değiştirilmiş gerilme çifti ve değiştirilmiş şekil değiştirme değişimi elastisite teorileri kullanılarak bir mikro kirişin eğilme ve burkulma analizlerini yapmıştır.

Şık(2010), değişken derinlikli iki parametrelili elastik zemine oturan plakların hesabını incelemiştir. Şahinkaya(2010), elastik zemine oturan düzgün yayılı yük etkisindeki kalın plakların parametrik olarak incelemiştir. Mindlin kalın plak teorisi kullanılarak elastik zemine oturan deprem etkisindeki plakların parametrik dinamik analizini Seyis(2010), araştırmıştır.

Akkurt(2011), elastik zemine oturan doğru ve daire eksenli çubukların dinamik davranışı Laplace uzayında teorik olarak incelemiştir. Kuyumcu(2011), değişerek yayılan yer hareketine maruz kablolu köprülerde zemin-yapı etkileşiminin stokastik davranışlar üzerindeki etkilerini araştırmıştır.

Turan(2012), elastik zemine oturan sonsuz kirişin hareketli yük altında dinamik analizini analitik olarak incelemiştir. Hızal(2012), elastik zemin üzerine oturan kirişlerin zorlanmış titreşimini incelemiştir. Torbacki ve Buczkowski(2014), elastik zemine oturan kiriş ve plakaların sonlu eleman analizini yapmışlardır. Yanık ve Yaylı(2015), rijit olmayan sınır koşullarında elastik zemine oturan bir çubuğun eksenel titreşim analizini yapmışlardır.

Benoit(1996), mikro kiriş ve nano kirişlerin analizini yapmıştır. Endo ve Iijima(1996), karbon nanotüpleri incelemiştir. (Timp,1999; Vajtai,2003; Maddox,2005; Mohammad,2011), nanoteknoloji'yi araştırmışlardır.

Ebbesen(1997), karbon nanotüplerin hazırlık ve özelliklerini incelemiştir. Saito(1998), karbon nanotüplerin fiziksel özelliklerini araştırmıştır. Erkoç(2001), karbon nanoyapıları incelemiştir. Scientific American Dergisi Editörleri(2002), nanoteknolojiyi anlamak için çalışmalar yapmışlardır.

Koç(2003), nanotüpleri araştırmıştır. Jr.Poole ve Owens(2003), nanoteknolojiye giriş için çalışmalar yapmışlardır. Karbon nanotüplerin bilimi ve uygulamalarını Meyyappan(2004), araştırmıştır.

Çıracı(2005), metrenin bir milyarda biri ile ilgili araştırmalar yapmıştır. Karbon nanotüplerin özelliklerini ve uygulamalarını O'Connell(2006), incelemiştir.

Sevi(2006), nanoteknolojide karbon nanotüplerin dayanıklılık simülasyonları araştırmıştır.

Nanoteknolojide nano ölçekteki yapıların yerel olmayan elastisite çerçevesinde incelenmesini Tepe(2007), yapmıştır. Pradeep(2007), nano'nun temel konularını araştırmıştır.

King(2007), nanoteknoloji ile ilgili araştırma ve gelişmelerini incelemiştir. Karkare(2008), nanoteknolojinin, esaslarını ve uygulamalarını araştırmıştır. Menceloğlu ve Kırca(2008), uluslararası rekabet stratejilerinden, nanoteknoloji ve Türkiye'yi araştırmışlardır.

Tchoul(2008), karbon nanotüpleri ve kompozitlerini incelemiştir. D'Souza(2008), Fullerenleri, nanotüpleri ve karbon nanoyapıları araştırmıştır. Pentaras(2009), karbon nanotüpler de, titreşim ve burkulma etkisini incelemiştir.

Contreras(2009), farklı konfigürasyonlu bilgisayarların nanotüplerle üretim için bir algoritma çalışmasını yapmıştır. (Chattopadhyay ve Banerjee,2009; Hornyak ve vd.,2009; Binns,2010), nanobilim ve nanoteknolojiye giriş için çalışmalar yapmışlardır.

Singh(2009), hasar parametre tahminlerinde aşkınsal ters öz değer problemlerini incelemiştir. Schodek ve Ferreira(2009), mühendis ve mimarlar için nanomalzemelere, nanoteknolojiye ve tasarımına bir giriş yapmışlardır.

Ramsden(2009;2011), nanoteknolojinin esaslarını ve nanoteknolojiye bir giriş ile araştırmalar yapmıştır. Seyman(2010), çift duvarlı karbon nanotüplerin incelemesini yapmıştır. Kutucu(2010), nanoteknoloji ve çift duvarlı karbon nanotüplerin incelemesini yapmıştır.

Varadan(2010), nanobilim ve nanoteknoloji mühendisliği alanında çalışmalar yapmıştır. Fulekar(2010), nanoteknolojinin önemini ve uygulamalarını araştırmıştır. Karbon nanotüplerin burkulma yüklerinin hesabı için yaklaşık yöntemini Şahin(2010), araştırmıştır.

Sirmen(2010), tek ve çift duvarlı karbon nanotüpte eğilmeyi incelemiştir. Işık(2011), nano ve mikro yapıların yerel olmayan elastisite teorisi ile eğilme ve titreşim hesabını yapmıştır. (Bartul ve Trenor,2011; Kapoor,2012), nanoteknoloji'nin gelişmelerini incelemişlerdir.

Mahler ve Seiler(2011), karbon nanotüpleri ve nanokompozitleri araştırmışlardır. Çelebi(2012), homojen olmayan çubuğun zorlanmış titreşimi için kapalı-form

çözümlerini elde etmiştir. Zhang(2012), karbon nanotüpleri ve uygulamalarını incelemiştir. Kurt ve vd.(2012), molekülleri ve nano-tüpleri araştırmışlardır.

Elishakoff(2012), karbon nanotüpleri ve nanosensörlerin titreşimini, burkulması ve balistik etkisini incelemiştir. Varma(2012), nanoteknolojinin kullanımları ve uygulamaları ile çalışmalar yapmıştır.

Arı(2012), karbon nanotüp malzeme ile tasarlanan heliks antenlerin performans parametrelerini araştırmıştır. Tetik(2012), karbon nanotüplerin fiziksel özellikleri üzerine katkılamanın etkilerini incelemiştir. Küçüyıldırım(2012), karbon nanotüpleri, sentezleme yöntemlerini ve kullanım alanlarını araştırmıştır.

Işık(2013), çift duvarlı karbon nanotüplerin bir ucu ankastre diğer ucu yaylı durumunda çözümünü incelemiştir. Morris ve Iniewski(2013), grafeni, karbon nanotüpleri ve nanoyapıların tekniğini ve uygulamalarını araştırmışlardır. Karbon nanotüpler, grafen ve kompozitlerin modellenmesini Tserpes ve vd.(2014), incelemiştir. Tanaka(2014), karbon nanotüpleri ve grafeni incelemiştir.

Hsu ve vd.(2011), yerel olmayan elastisite teorisini kullanılarak çatlamış nano kirişin aksel titreşimini incelemiştir. Karlıcı ve vd.(2015), elastik zemine gömülü bir çatlak nano kirişin titreşimi üzerinde ki termik ve manyetik etkilerini araştırmışlardır. Loya ve vd.(2009), yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak çatlamış nano kirişin serbest enine titreşimlerini incelemiştir. Beni ve vd.(2015), çift gerilme kuramı kullanılarak çatlak nano kirişin serbest enine titreşiminin boyuta etkisini araştırmışlardır.

2.2.Nanoteknoloji

Nanoteknoloji, ilk olarak 1959 yılında fizikçi Richard Feynman'ın, ünlü konuşmasında ortaya çıkmıştır.

Maddelerin atomik boyutlarında incelemeler yapan teknoloji dalına, nanoteknoloji denilmektedir. Nanoteknoloji ile maddelerin bir ölçü birimi olan nanometre(metrenin milyarda biri) ölçeğinde ki boyutlarında ölçüm, modelleme, işlem ve düzenleme gibi çalışmalar yapılmaktadır(Sirmen,2010).

Nano ölçekteki maddeleri incelemek zor olduğundan, 1980'lerde Taramalı Tünelleme Mikroskobu(TTM) ve nanotüpün konumunu, şeklini ve yönünü değiştirebilmek içinde Atomik Kuvvet Mikroskobu(AKM) icat edilmiştir.

Nanoteknoloji, atomlarla oynayan bir teknolojidir ve atom ve moleküllerini tek tek değiştirerek, istenilen yapının oluşturulması ilkesine dayanır. Yaklaşık 100-1000 atomun bir araya gelmesi ile nano ölçeklerde bir nesneyi oluşturmaktadırlar (Kutucu,2010).

Sanayi devrimi olarak nitelendirilen nanoteknoloji, bakterisiz ortamlar oluşturmada, birçok hastalığın tedavisinde, birçok eşya veya kaplamasında kullanılması ile kir, sıvı tutmamasında ve çizilmemesinde etkili olmaktadır.

Nanoteknoloji hayatın neredeyse her alanında kullanılabilir, daha iyi, daha dayanıklı, daha temiz, daha güvenli ve daha akıllı ürünler geliştirilebilecek bir teknolojidir. Nanoteknoloji hayatın her alanında, düşük maliyete yüksek kaliteli ürünlerin üretilmesini sağlamakla kalmayacak, üretim devamlılığını da sağlayabilecektir. Nanoteknoloji; tıp, çevre, enerji, bilgi ve iletişim, malzeme ve imalat, nano elektronik ve bilgisayar teknolojileri, havacılık ve uzay araştırmaları, savunma sektörü ve ağır sanayi alanlarında kullanılmaktadır.

Nanometre ölçekli yapıların analizi, nanometre boyutundaki yapıların fiziksel özelliklerinin araştırılması, nanometre ölçekli yapıların imalatı, nano hassasiyetli ve nano ölçekli cihazların geliştirilmesi, uygun yöntemlerle nanoskopik ve makroskopik dünya arasındaki bağın kurulması gibi çalışmalar, nanoteknolojinin amaçları arasındadır (Tepe, 2007;Kutucu,2011).

Nanobilim, nanometre ölçütlerinde ortaya çıkan bu yeni davranışları, kuantum kuramı ile araştırılmasını sağlarken, nanoteknoloji, yeni nanoyapılar tasarlayıp sentezlemeyi ya da nanoyapılara yeni olağanüstü özellikler kazandırmayı ve bu özellikleri yeni işlevlerde kullanılmasını amaçlar(Çıracı, 2005).

Nanoteknoloji malzeme, elektronik, bilgisayar, eczacılık, tıp, biyoloji, kimya, fizik, matematik, mühendislik, malzeme bilimlerinin geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Malzeme ve imalat sektörü, nano elektronik ve bilgisayar teknolojileri, bilgi ve iletişim (veri depolama, yenilikçi yarı iletken aygıtlar, yenilikçi optoelektronik aygıtlar, ekranlar, kuantum bilgisayar), tıp (teşhis, ilaç tedariki, doku mühendisliği, kriyonik) ve sağlık sektörü, havacılık ve uzay araştırmaları, çevre (süzme) ve enerji,

biyoteknoloji ve tarım, savunma sektörü, ağır sanayi(havacılık, kataliz, inşaat(çelik, cam, kaplamalar), araç üreticileri), tüketici ürünleri(yiyecekler, ev araç ve gereçleri, optik, tekstil, kozmetik, spor) alanlarında büyük gelişmeler sağlanmaktadır.

İnşaat sektöründe, taşıyıcı sistemle ilgili nano-işlenmiş beton, daha dayanıklı, hafif ve paslanmaz nanokompozit çelik, alçı duvar gibi uygulamaların yanı sıra kendi kendini temizleyen, kir ve su tutmayan, yangına karşı koruyan ve ışık, ısı, ses yalıtım malzemeleri alanlarında, nanoteknoloji, önemli yer kaplamaktadır. Nanoteknoloji ile inşaat malzemeleri daha dayanıklı, daha emniyetli ve daha sağlıklı olarak üretilmektedir.

2.3.Karbon Nanotüpler(KNT)

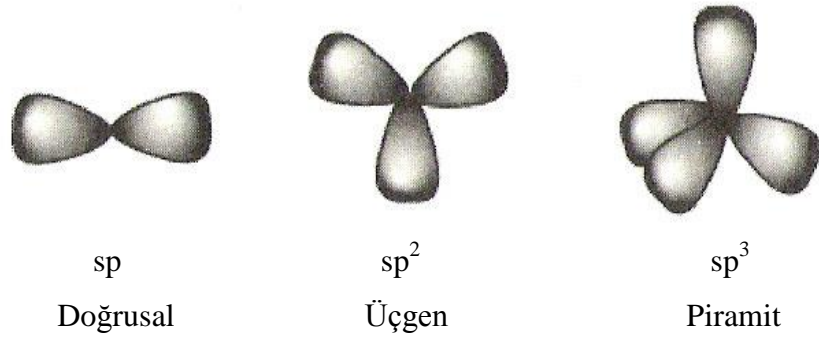
Karbon nanotüpler(KNT), kendilerine özgü yapıları ve üstün özelliklerinden dolayı araştırmacıların dikkatini çeken, nano yapılardandır.

Uygun malzeme ve bu malzemeyi işleyebilecek teknik düzenek, nanoteknolojide, iki önemli unsurdur. Günümüzde, bu iki önemli unsuru sağlayabilen en uygun element, karbondur(Işık,2011).

Nanotüplerde, karbon elementi önemli bir yere sahiptir. Canlıların temel taşı olan karbon elementinde, karbon atom(C)'ları, karmaşık, uzun zincirli moleküller oluşturacak biçimde birbirlerine bağlanabilirler. Bunu yaparken, her bir karbon atomu(C)'nun, kendisine başka atomlarında bağlanmasına izin verecek şekilde boş yeri kalmaktadır(Kutucu,2010). Böylece başka atomlarla etkileşimi, incelenilmektedir.

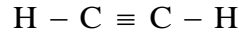
Karbon atomu(C), altı elektrona sahiptir. Karbon atomu(C)'nun elektronlarının, ilk ikisinin, bağlanmaya hiç etkisi yoktur. Ayrıca ilk iki elektron ile geri kalan elektronların enerjileri arasındaki farkın da büyük olması, karbonun farklı yapılar oluşturmasına imkân sağlar. Bu özelliklerde başka bir elementin olmayışı, karbon atomu(C)'nu rakipsiz kılmaktadır(Tepe,2007).

Karbon atom(C)'ları kendi aralarında sp , sp^2 ve sp^3 şeklinde bağlanabilirler. Karbon elementi, her üç bağlanma geometrisini gösterebilen tek element olması bakımından, istisnai bir özelliğe sahiptir. Bu özelliği, karbonun sıfır boyuttan üç boyutlu hale kadar, farklı yapılarda olabilmesine olanak sağlamaktadır(Tetik,2012).



Şekil 2.1. Karbon atomların bağlanma şekilleri (Tepe'den,2007).

C_2H_2 asetilen molekülü, iki adet karbon atomu(C)'nun, iki adet hidrojen atom(H)'ları ile sp doğrusal bağlanması ile meydana gelir ve her karbon atomu(C)'nun, iki adet komşusu bulunur. Atomlar arasında, 180^0 'lik açı meydana gelir.



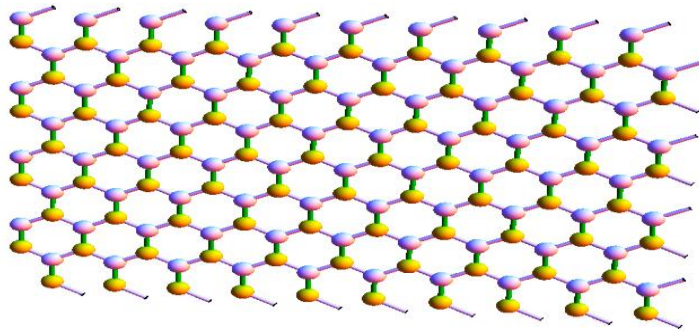
Şekil 2.2. Asetilen molekülünün bağlanma şekli.

Karbon atom(C)'ları ile yapılan çalışmalar neticesinde, düzgün karbon atom(C)'larının birbirleriyle bağlanması ile oluşan levhaya grafen denilmektedir.

Grafen, altı tane karbon atomun arasında sp^2 üçgen bağlantısı ile oluşan ve bal peteği şeklindeki örgülerden meydana gelmektedir.

Grafen, grafit yapısının tek bir katmanı olup, iki boyutlu ve iletkenidir. Karbon atom(C)'ları, sadece altıgen geometri oluşturması ile her bir atomun sadece üç komşusu olmaktadır. Atomlar arasında, 120^0 'lik açı meydana gelir. Grafen levhalardan, transistor, pil, sensörler, hidrojen depolama, spintronik ile bilgi depolama alanlarında faydalanılmaktadır.

Şekil 2.3'de karbon atom(C)'larından meydana gelen bir grafen levhası gösterilmektedir.



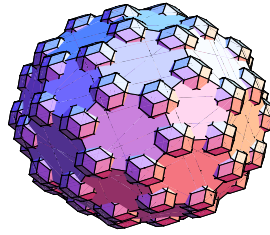
Şekil 2.3. Karbon atom(C)'larından meydana gelen bir grafen levhası.

1990'lı yılların başında, Rice Üniversitesinde, Richard Smalley'in liderliğinde, yapılan çalışmalar sonucunda, 60 adet karbon atom(C)'un, düzgün beşgen biçiminde sıralanması ile, kafes halinde ve içi boş küre şeklinde fullerene molekülü geliştirilmiştir. Nanometre büyüklüğündeki bu molekül, plastikten daha hafif, çelikten daha dayanıklı olup, elektrik ve ısıyı ileten bir yapıdadır.

Malzemeleri aşırı ışıktan koruma özelliğinden dolayı optik sınırlayıcı; fotoiletkenlik özelliğinden dolayı foto diyot, transistor, güneş pillerinde; oksitlenmeye karşı iyi bir koruyucu olduğundan yüzey kaplama malzemesi ve yüksek sıcaklığa dayanıklı olması nedeniyle elektronik ve mikro mekanik sistemlerde kullanılabilir.

Düzdün ve pürüzsüz yüzeyleri sebebi ile kaplama malzemesi olarak kullanıldığında, herhangi bir cisim tutunamamaktadır. Ayrıca, sağlam olmasından dolayı da çizilmemektedir. 1 nm. çapında, futbol topuna benzeyen fullerenler, buckyball olarak da bilinirler.

Şekil 2.4'te karbon atom(C)'larından meydana gelen bir fullerene molekülü gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Karbon atom(C)'larından meydana gelen bir fullerene molekülü.

Sumio Iijima, 1991 yılında, fullerene molekülünü esneterek, çelikten yüz kat daha dayanıklı ve ağırlığı çeliğin ağırlığının altıda biri kadar olan karbon nanotüpü(KNT) keşfeder. KNT'ler, karbon elementinin uzunluğu, çapının 28×10^6 katı olan bir allotropudur.

KNT'ler, 10^{-9} metrelik kalınlıklarıyla bir saç telinden daha ince ve uzunlukları bir milimetreden daha kısadır. Fakat bu inceliklerine rağmen çok dayanıklı ve serttirler. Grafen levhasının, belli bir açı ve yarıçap oluşturacak şekilde yuvarlanması ile nanotüpler meydana gelmektedirler. Yuvarlanma açısı ve yarıçapı nanotüpün özelliklerini belirler (Işık,2013).

Nano ölçekteki KNT'ler; önemli ölçüde termal iletkenliğe, yapısal, elektriksel, mekanik, fiziksel, kimyasal, elastik ve optik özelliklere sahip olan en sağlam malzemelerdir. Kendi ağırlığının, 3×10^8 katına kadar dayanabilirler. Böylece KNT'ler, çok hafif, dayanıklı, rijit, sünek ve yüksek erime sıcaklığına sahiptirler. Bu nedenle, nano ölçekli karbon tüp, eksenî yönünde çekmeye karşı direnç gösterebilirler.

Karbon nanotüpler(KNT); otomasyonda, uzayda, tıpta, elektronikte, yapı malzemelerinde, sensörlerde, çevre temizlemede ve depolamada kullanılmaktadırlar. KNT'ler, bucky tüpler olarak da bilinirler. KNT'lerin betonda kullanılması ile gerilme kuvvetinin artırılması ve çatlakların oluşması engellenebilir.

KNT'lerin, Taramalı Tünelleme Spektroskopisi (STS) ile yapılan durum yoğunluğu ölçümleri, elektronik yapıları hakkında önemli bilgiler vermektedir(Tetik, 2012).

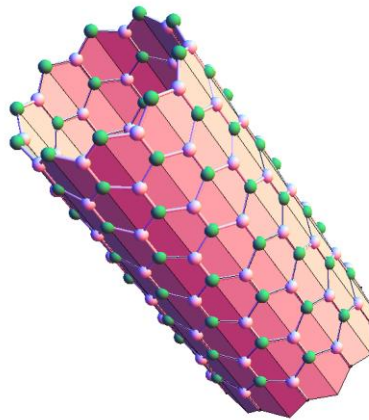
Karbon nanotüpler, tek duvarlı ve çok duvarlı olmak üzere iki çeşidi vardır.

2.3.1. Tek Duvarlı Karbon Nanotüpler(TDKNT)

Karbon nanotüplerin, tek ve uçları açık ya da kapalı, silindir biçimde, değişik çaplı olanlarına denir. İlginç mekanik ve elektro özelliklere sahip olup, temel silindirik yapıları sayesinde çok duvarlı karbon nanotüplerin, temel yapıtaşını oluşturmaktadırlar. Elektrik iletkenliği açısından, metal ya da yarı iletken malzemelere benzemektedirler.

Geçirmeli Elektron Mikroskobu(TEM) sayesinde, TDKNT'ler elde edilebilmektedirler. Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) ile üretilen nanotüpler, hangi yöntemle üretilmiş olursa olsun karbon iplerden oluşmuş bir yaygı gibi görünürler(Seyman,2010). Bu iplerin eni:10-20 nm ve boyu: 100 nm uzunluğundadır(Koç,2003). Nanotüplerin, çap ve kiriş açıları ölçümü, SEM ve TEM ile yapılmaktadır.

TDKNT'ler yaklaşık olarak 0,7-10 nm çapındadırlar(Tetik,2012). TDKNT'ler tıp alanında, kanserli hücreyi yok etmede, kemik üretilmesinde veya düzeltilmesinde kullanılacaklardır.



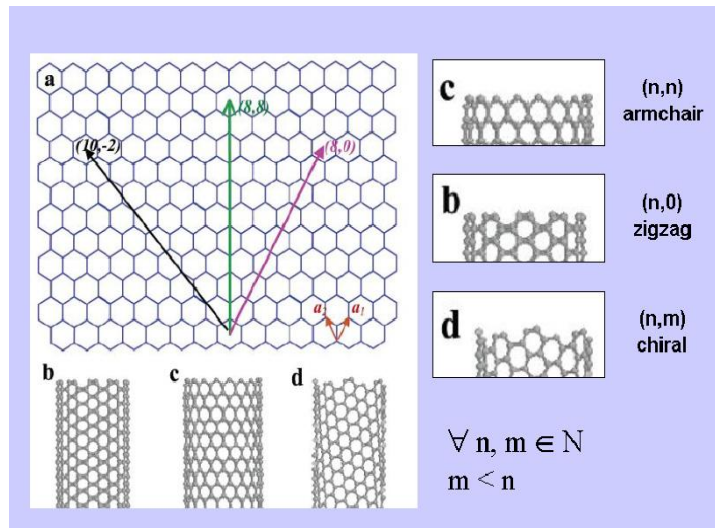
Şekil 2.5. TDKNT modeli.

"n" ve "m" tamsayıları, grafitte levhasındaki, petek kristal kafesin iki yönü boyunca, birim vektörlerinin miktarını göstermektedir. "m" tamsayısı ve kiriş açısı sıfır olarak oluşturulan nanotüplere, zigzag karbon nanotüpler denilir. "n" ve "m" tamsayıları eşit ve kiriş açısı 30^0 olarak üretilen nanotüpler ise koltuk karbon nanotüpler olarak adlandırılır. Bunların dışında "n" ve "m" tamsayıları "0"dan farklı ve eşit

olmadığı durumlarda kiriş açısında 0^0 ila 30^0 arasında üretilen nano karbon tüplere de asimetrik karbon nanotüpler olarak ifade edilirler. İdeal bir karbon nanotüpün çapı aşağıdaki formülle hesaplanabilir(Arı v.d.,2012).

$$d = \frac{e}{\pi} \sqrt{(n^2 + nm + m^2)} \quad e=0.246 \text{ nm} \quad (2.1)$$

Yukarıda bahsedilen üç adet karbon nanotüp(KNT) aşağıda ki Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6. KNT modelleri(Contreras v.d.'den, 2009).

Çizelge 2.1'de tek duvarlı karbon nanotüplerin özellikleri ile başka malzemelerinin özellikleri ile yapılan karşılaştırması gösterilmektedir.

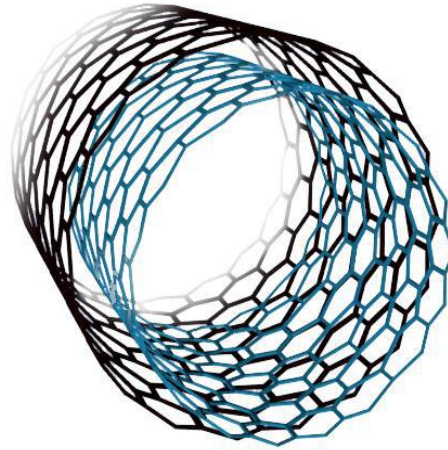
Çizelge 2.1. Karbon nanotüplerin karşılaştırmalı özellikleri(Erkoç'tan,2001).

| Özellik | Tek duvarlı Karbon Nanotüp | Başka Malzemeler |
|--------------------------------------|---|--|
| Ebadı | 0,6-1,8 nm çapında | Elektron demeti ile 50 nm x 5 nm ebatında çizgiler oluşturulabilir |
| Yoğunluk | 1,33-1,40 gr/cm ³ | Alüminyum: 2,7 gr/cm ³ |
| Gerilme Mukavemeti | 45 Gigapascal | En sağlam çelik alaşımları 2 megapascal'da kopar |
| Esneklik | Düğüm yapabilecek kadar esnek | Metaller ve karbon fiberler kırılır |
| Akım Taşıma | Kapasitesi 1 gigaamper/cm ² | Bakır teller 1 megaamper/cm ² de yanar |
| Alan Yayma | 1 mikro metre uzaklıkta fosfor atomlarını 1-3 Volt civarında uyarabilir | Molibdenum uç 50-100 Volt/mikrometre (kısa ömürlü) |
| Isı İletimi | Oda sıcaklığında 6000 W/mK | Saf elmas 3320W/mK |
| Sıcaklığa Karşı Dayanıklılığı | Havada 750 °C'ye kadar vakumda 2800 °C'ye kadar | Mikroçiplerdeki metal teller 600-1000°C'de erir. |
| Maliyet | 1500 \$/gr | Altın: 10\$/gr |

2.3.2. Çok Duvarlı Karbon Nanotüpler(ÇDKNT)

Karbon nanotüplerin bir biri içine geçmiş, uçları açık ya da kapalı, silindir biçimde, değişik çaplı olanlarına da çok duvarlı karbon nanotüp denilmektedir. Çok duvarlı karbon nanotüpler(ÇDKNT) de iki tüp arasındaki uzaklık, karbon atomlarının bağ yapmalarına olanak verecek kadar azsa (0,15 nm), karbon atomları birbirleriyle sp³ pramit şeklinde bağlanarak meydana gelirler. Her karbon atomuna bağlı dört adet karbon atomu ve her atomun arasında 109,5⁰ açı bulunmaktadır. Bu şartlarda oluşan çok duvarlı tüp yapısına karbon nanoçubuk denir.(Kutucu,2010).

İki farklı çok duvarlı karbon nanotüp(ÇDKNT) elde edilebilir. Birincisi, aynı merkezli, çapları farklı tek duvarlı karbon nanotüp(TDKNT)lerin iç içe geçmesi ile ikincisi ise bir grafen levhasının kendi etrafında, sarmal şeklinde bir kaç defa dönmesi ile meydana gelmektedir. Şekil 2.7'de çok duvarlı karbon nanotüp modeli gösterilmektedir. Şekil 2.7'de çok duvarlı karbon nanotüp modeli gösterilmektedir.



Şekil 2.7. ÇDKNT modeli(Işık'tan,2013).

ÇDKNT'ler iç ve dış çapları, 5 ile 100 nm arasında değişmekte olup, iç içe geçen TDKNT'lerin arasında ki mesafe yaklaşık 0,35 nm civarındadır. Bu grafit katmanları arasında ki mesafeye yakın bir değer olmasından dolayı, ÇDKNT'ler grafitle ile aynı özellikleri gösterirler(Tetik,2012).

ÇDKNT 'ler, TDKNT'lere göre esnekliği daha az olmasına rağmen, farklı mekanik ve elektronik özellikler gösterirler. Dış yüzeyleri metal ya da yarı iletken olabilir.

Radar ve dalga emilimi özellikleri ile ÇDKNT'lerin, hava araçlarının boya malzemesinde kullanılması ile gizlenmesi hakkında önemli sonuçlar elde edilmiş olup, ışığı yansıtmadığı ve soğurduğu ortaya çıkmıştır.

2.4. Fourier Serileri

1768-1830 yılları arasında yaşayan Joseph Fourier tarafından, bir metal çubuk veya levhadaki ısı denklemlerin çözümü için Fourier serileri kullanılmıştır. Isı denklemleri diferansiyel bir denklem olup, çözümü zordur. Fourier, bu denklemi basitleştirerek, sinüs ve kosinüsleri katsayılarla birbirine ilave ederek, karmaşık bir ısı kaynağı oluşturmuştur. Fourier Serisi, denklemlerin belli katsayılar ile sonsuz toplamı olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntem, her ne kadar ilk önce ısı problemlerin çözümünde kullanılsa da, daha sonra geniş periyodik fonksiyonların çözümünde de aynı yöntem uygulanmaya başlanmıştır.

Elastisite problemlerinin çözümlerindeki en büyük sorun, sınır şartlarının sağlatılmasıdır. Bu sınır şartlarının sağlatılması için Fourier serilerinden yararlanılabilir. Çözüm yapılırken izlenilecek yol, Fourier serilerinin her bir terimine karşı gelen sonuçlar bulunur ve bu sonuçlar toplanarak ana sonuca ulaşılır.

Bir fonksiyonun Fourier serisinde açılabilmesi için öncelikle periyodik bir fonksiyon olması gerekmektedir. Fonksiyon, belli periyodlar ile tekrarlamalıdır. Bu özelliğe ilave olarak, sonlu sayıda süreksizliğe, maksimum ile minimum noktalara ve ortalama değeri de sonlu değere sahip olmalıdır. Kısacası Fourier serileri, herhangi bir periyodik fonksiyonun, kosinüs ve sinüs fonksiyonları toplamı şeklinde ifade edilmesidir.

Fourier serileri ile herhangi bir periyodik fonksiyon aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (2.2)$$

Burada $f(t)$ periyodik fonksiyonu, a_n , a_0 , b_n Fourier sabitlerini, $\omega = \frac{2\pi}{t}$ açısal frekansı, $n=1,2,3,\dots,\infty$ tam sayıları ifade etmektedir.

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (2.3)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad (2.4)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx \quad (2.5)$$

Fonksiyonlar, tek ve çift olmak üzere ikiye ayrılırlar. $f(-x) = f(x)$ ise çift fonksiyon, $f(-x) = -f(x)$ ise tek fonksiyondur. Çift fonksiyonların Fourier serisi açılımlarında, sadece kosinüslü terimler bulunduğundan kosinüs serisi olarak adlandırılır. Tek fonksiyonların açılımlarında ise sadece sinüslü terimler bulunduğundan sinüs serisi olarak adlandırılırlar.

Fourier serileri, elektrik ve elektronik mühendisliğinde, bilgisayar mühendisliğinde, makine mühendisliğinde, tıpta, haberleşme alanında, akustiklerde, fizikte, kuantum mekaniğinde ve titreşim analizlerindeki gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmada da Fourier serisi titreşim analizlerde kullanılacaktır.

2.5. Stokes' Dönüşümleri

Stokes' dönüşümü ismini her ne kadar Gabriel Stokes'(1819-1903) tan olsa da, William Thomson(1824-1907) tarafından bulunmuştur.

Stokes' dönüşümleri, genel bir teoremdir. Yüzey tiplerine ve yüzey sınırlarına bağlıdır. Stokes' dönüşümü yapılabilmesi için parçalı ve düzgün yüzeyler bulunması gerekir. Düzgün demek, sadece türevlerin sürekli olması demektir. Parçalı olması ise Stokes' dönüşümlerinin birden fazla yüzeylerde kullanılabilmesi anlamına gelir. Stokes' dönüşümünün uygulanabilmesi için, yüzey sınırı kendini kesmeyen, kapalı-parçalı, düzgün bir eğri olması gerekmektedir.

Stokes' dönüşümleri, karmaşık yüzey integrallerini, basit eğrisel integrallere dönüştürmede kullanılmaktadır.

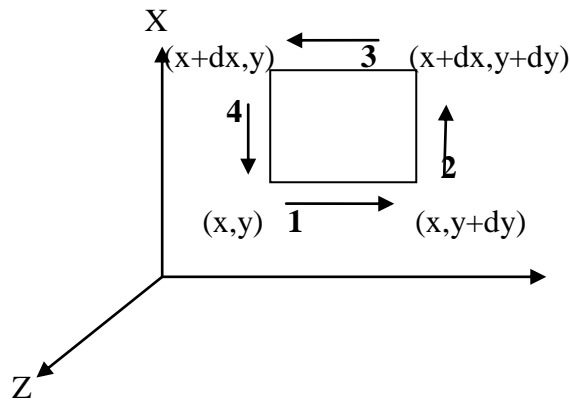
Başka bir tanımda, açık bir yüzey üzerinden bir vektör alanının rotasyonelinin yüzey integrali, aynı yüzeyi çevreleyen kapalı çevre üzerinden alınan vektör alanının çizgisel integraline eşit olduğu ifade edilmektedir.

Bir \vec{F} vektörünün rotasyonelinin bir S alanı üzerinde yüzey integrali, \vec{F} 'nin bu alanı sınırlayan $C=\partial S$ kapalı yolu üzerinden çizgisel integraline eşittir.

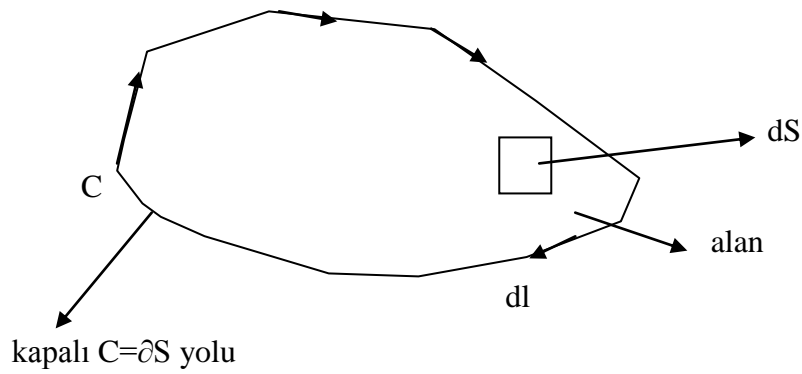
$$\iint_S (\vec{\nabla} \times \vec{F}) d\vec{S} = \oint_C \vec{F} d\vec{\ell} \quad (2.6)$$

burada, \vec{F} vektör, S alan, C kapalı yol, $\vec{\nabla}$ nabla operatörü, $\vec{\nabla} \times \vec{F}$: \vec{F} vektör alanının rotasyoneli, nabla operatörü ile \vec{F} vektör alanı arasındaki vektörel çarpımı işlemidir.

Bir karenin kenarları boyunca, çizgi integrali Şekil 2.8'de, Stokes' dönüşümü, çizgisel kapalı alan ve ilgili yüzey modeli Şekil 2.9'da gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Bir karenin kenarları boyunca, çizgi integrali.



Şekil 2.9. Stokes' dönüşümü, çizgisel kapalı alan ve ilgili yüzey modeli.

Stokes' dönüşümleri, fizikte ve özellikle elektromanyetizma da çok sık kullanılmaktadırlar.

2.6. Elastik Zemine Oturan Kirişler

İnşaat Mühendisliğinde, statik proje hazırlanırken temel hesaplamaları önemli yer tutmaktadır. Temel sistemlerinin daha güvenli ve ekonomik olabilmesi için, temelin altındaki zeminin fiziksel özelliklerini ve temel ile birlikte üst yapının rijitliğini dikkate alan hesap yöntemleri kullanılmalıdır.

Elastik zemine oturan betonarme binaların, havaalanı yapılarında yumuşak filamentlerin kullanımının, soğuk bölgelerde yapılan bina çalışmalarının, yatay yük etkisindeki düşey kazık ve palpaş uygulamaların, elastik ve viskoelastik zemine oturan kiriş, plak ve kabuk problemlerinin uygulama alanlarının artması elastik zemine oturan kiriş tipinin incelenmesi gerekliliğini ortaya çıkartmaktadır(Develi,2007).

Zeminin davranışını, kiriş boyunca sıralanan, birbirinden bağımsız elastik yaylarla temsil eden modele Winkler zemin modeli denir. Elastik zemine oturan kirişlere ait araştırmalarda en çok Winkler zemin modeli(1867) kullanılmaktadır. Bu model ile sadece zemin-temel arasındaki etkileşimi dikkate alan, elastik yaylar üzerine gelen yük miktarı kadar, yayların bir boyutta sıkıştığı hipotezine dayanan Winkler Yöntemi geliştirilmiştir.

Winkler hipotezine göre kirişin yer değiştirme sırasında zeminden gördüğü tepki, yer değiştirme ile doğru orantılı olmasına rağmen, yakın noktaları etkilenmemektedir.

Zemin, birbirinden bağımsız ve birbirine sonsuz yakın elastik yaylardan oluşan bir fiziksel model olarak kabul edilir. Bu yaylar, zemin yatak katsayısı ile karakterize edilir.

Bu katsayı, düşey yer değiştirme ile birim alana gelen tepkiyi ifade eder. Ayrıca zeminin, belli bir gerilme altındaki deformasyonudur. Zemin yatak katsayısı, zeminin elastik özelliklerine bağlıdır.

Elastik zemine oturan kirişler, özellikle füze ve roket rampalarında, uçak-uzay sanayisinde, temel ve zemin mühendisliğinde ve demiryolu uygulamaları gibi pek çok sektörde kullanılmaktadır(Avcar,2007).

3. KLASİK ELASTİSİTE TEORİSİ

Bir cismin, dış yükler altında herhangi iki noktası arasındaki uzaklığın değişmemesi, o cismin rijit olduğunu göstermektedir. Her malzeme, belirli bir yüke kadar dayanır. Bu yük kaldırıldığında, şekil değiştirme meydana gelmeyip, eski haline geri dönüyorsa, bu durum malzemenin elastikliğini gösterir. Elastisite teorisi, elastik cisimlerin mekaniği ile ilgilenmektedir.

İki boyutu, üçüncü boyutun yanında küçük olan cisimlere çubuk denilmektedir. Çubuğun uzun boyunun tam orta noktasından geçtiği kabul edilen çubuk eksenini, bu çubuk eksenini dik kesilerek alınan alanlara da dik kesit denilmektedir.

Çubuklar eksenine göre:

a) Doğru Eksenli Çubuklar: Ekseni, bir doğru olan çubuklardır. Örneğin kiriş, kolon v.b. gibi.

b) Eğri Eksenli Çubuklar: Ekseni, eğri olan çubuklardır. Örneğin kemer v.b. olmak üzere ikiye ayrılır.

Çubuklar en kesitlerine göre:

a) Sabit Kesitli Çubuklar: Uzun kenarı boyunca, kesit alanı değişmeyen çubuklar,

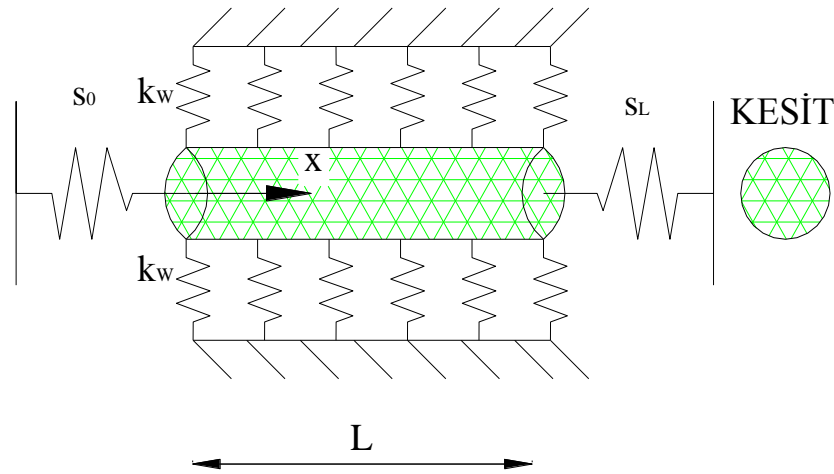
b) Değişken Kesitli Çubuklar: Uzun kenarı boyunca, kesit alanı değişen çubuklar olmak üzere ikiye ayrılmaktadırlar.

Mühendislikte kullanılan malzemelerden doğabilecek hataların tespit edilmesinde; gerilme, şekil değiştirme ve aralarındaki bağı iyi çözümlenmesi gerekir.

Cisme etkileyen dış kuvvetlerin bileşkesinin, etkidiği toplam alana oranı gerilmeyi, belirli bir yük altında, cisim ilk halindeki boyutlarından farklı boyutlara geçmesi de şekil değiştirmeyi vermektedir.

3.1. Klasik Elastisite Teorisi ile Elastik Zemine Oturan Çubukların Eksenel Titreşim Analizleri

Elastik zemine oturan çubuklar, mühendislik hesaplamalarında önemli bir yere sahiptirler. Bu sebepten dolayı, çalışma kapsamında, elastik zemine oturan bir çubuğun rijit olmayan sınır şartlarında klasik elastisite teorisine göre eksenel titreşim analizleri incelenmiştir. Şekil 3.1'de elastik zemine oturan bir çubuğun kesiti gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Elastik zemine oturan bir çubuğun kesiti.

3.1.1. Klasik elastisitede modal titreşim fonksiyonu

Şekil 3.1'de şematik olarak gösterilen elastik zemine oturan bir çubuğun, aksenal titreşim yapan diferansiyel denklemini aşağıda verilmıştır.

$$EA \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - k_w u = G \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (3.1)$$

(3.1) denkleminde E elastisite modülü, A en kesit alanı, k_w elastik zemin için Winkler katsayısı, u yer değiştirmeyi temsil eden bir fonksiyon, x bağımsız değişken, t zamanı ve G kütleyi ifade etmiştir. Çubuğun, harmonik titreşim yaptığı kabul edilerek (3.2) modal titreşim fonksiyonu seçilmiştir.

$$u(x) = \varphi(x) \cos(\omega t) \quad (3.2)$$

$\varphi(x)$ modal yer değiştirme fonksiyonu, ω açısal frekansı ifade edilmiştir. $\varphi(x)$ modal yer değiştirme fonksiyonu, iki tanesi rijit olmayan sınır koşullarını da ele alarak üç değişik formda verilmiştir.

$$\varphi(x) = \varphi_0 \quad x=0 \quad (3.3)$$

$$\varphi(x) = \varphi_L \quad x=L \quad (3.4)$$

$$\varphi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin \left[\frac{nx\pi}{L} \right] \quad 0 < x < L \quad (3.5)$$

Yukarıda ki denklemde;

$$\alpha_n = \frac{n\pi}{L} \quad (3.6)$$

olarak ifade edilmiştir.

3.1.2.Klasik elastisitede Stokes' dönüşümü

Kurulan modelden görüleceği üzere rijit olmayan sınır koşullarını, problemin çözümüne dâhil edilebilmesi için matematiksel bir dönüşüm yapılması gerekmekte olup; bu bölümde Fourier sinüs serisi, Stokes' dönüşümü ile birlikte kullanılması ile hareketli sınır koşulları da probleme dâhil edilmiştir. (3.5) denklemdeki Fourier katsayısı A_n aşağıda ki gibi ifade edilmiştir.

$$A_n = \frac{2}{L} \int_0^L \varphi(x) \sin(\alpha_n x) dx \quad (3.7)$$

Yukarıdaki (3.5) denkleminin türevi alınarak, (3.8) denklemi elde edilmiştir.

$$\varphi'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n A_n \cos(\alpha_n x) \quad (3.8)$$

(3.8) denklemi, Fourier kosinüs serileriyle birlikte, (3.9) denklemde gösterilmiştir.

$$\varphi'(x) = \frac{f_0}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} f_n \cos(\alpha_n x) \quad (3.9)$$

(3.9) denklemdeki, (f_0, f_n) fourier sabitleri, aşağıdaki formda verilmiştir.

$$f_0 = \frac{2}{L} \int_0^L \varphi'(x) dx = \frac{2}{L} (\varphi(L) - \varphi(0)) \quad (3.10)$$

$$f_n = \frac{2}{L} \int_0^L \varphi'(x) \cos(\alpha_n x) dx \quad n=1,2,\dots \quad (3.11)$$

(3.11) denklemine, kısmi integrasyon uygulanarak, (3.12) ve (3.13) denklemleri elde edilmiştir.

$$f_n = \frac{2}{L} [\varphi(x) \cos(\alpha_n x)]_0^L + \frac{2}{L} \left[\alpha_n \int_0^L \varphi(x) \sin(\alpha_n x) dx \right] \quad (3.12)$$

$$f_n = \frac{2}{L} [(-1)^n \varphi(L) - \varphi(0)] + \alpha_n A_n \quad (3.13)$$

Yukarıda Stokes' dönüşümü olarak gerçekleştirilen işlemler ile daha yüksek mertebeli türevler bulunabilir. $\varphi(x)$ modal yer değiştirme fonksiyonunun, (3.14) denkleminde birinci türevi ve (3.15) denkleminde ikinci türevi verilmiştir.

$$\frac{d\varphi(x)}{dx} = \frac{\varphi_L - \varphi_0}{L} + \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\alpha_n x) \left(\frac{2((-1)^n \varphi_L - \varphi_0)}{L} + \alpha_n A_n \right) \quad (3.14)$$

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = -\sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \sin(\alpha_n x) \left(\frac{2((-1)^n \varphi_L - \varphi_0)}{L} + \alpha_n A_n \right) \quad (3.15)$$

(3.2), (3.3), (3.4), (3.5) ve (3.15) denklemleri, (3.1) denkleminde yerine yazılarak, Fourier katsayısı A_n , (3.16) denkleminde ki gibi bulunmuştur.

$$A_n = \frac{2EA_n\pi(\varphi_0 - (-1)^n \varphi_L)}{kL^2 + EA_n^2\pi^2 - GL^2\omega^2} \quad (3.16)$$

3.1.3. Klasik elastisite de sınır koşulları

Çubuğun uçlarında bulunan s_0 , s_L elastik yay sabitleri, problemin sınır koşullarında yerlerine yazılarak, (3.17) ve (3.18) denklemleri bulunmuştur.

$$EA \frac{\partial u}{\partial x} = s_0 \varphi_0 \quad x=0 \quad (3.17)$$

$$EA \frac{\partial u}{\partial x} = -s_L \varphi_L \quad x=L \quad (3.18)$$

(3.2), (3.14) ve (3.16) denklemleri, (3.17) ve (3.18) denklemlerinde yerlerine yazılırsa; $x=0$ ve $x=L$ çubuğun uç noktaları için (3.19) ve (3.20) denklemleri ile sonsuz serilerden oluşan doğrusal denklem sistemi elde edilmiştir.

$$\left[(-1 - S_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-K + \lambda^2)}{n^2\pi^2 + K - \lambda^2} \right] \varphi_0 + \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n(-K + \lambda^2)}{n^2\pi^2 + K} \right] \varphi_L = 0 \quad (3.19)$$

$$\left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n(-K + \lambda^2)}{n^2\pi^2 + K} \right] \varphi_0 + \left[(-1 - S_L) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-K + \lambda^2)}{n^2\pi^2 + K - \lambda^2} \right] \varphi_L = 0 \quad (3.20)$$

Yukarıdaki denklemlerde,

$$\lambda^2 = \frac{GL^2\omega^2}{EA} \quad (3.21)$$

$$K = \frac{k_w L^2}{EA} \quad (3.22)$$

$$S_0 = \frac{s_0 L}{EA} \quad (3.23)$$

$$S_L = \frac{s_L L}{EA} \quad (3.24)$$

olarak tanımlanmıştır. (3.19) ve (3.20) denklemlerinin katsayıları, (3.25) denklemindeki matris formunda gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_0 \\ \phi_L \end{bmatrix} = 0 \quad (3.25)$$

Yukarıda ki matris formundan,

$$\Phi_{11} = \left[(-1 - S_0) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-K + \lambda^2)}{n^2 \pi^2 + K - \lambda^2} \right] \quad (3.26)$$

$$\Phi_{12} = \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n (-K + \lambda^2)}{n^2 \pi^2 + K} \right] \quad (3.27)$$

$$\Phi_{21} = \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^n (-K + \lambda^2)}{n^2 \pi^2 + K} \right] \quad (3.28)$$

$$\Phi_{22} = \left[(-1 - S_L) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-K + \lambda^2)}{n^2 \pi^2 + K - \lambda^2} \right] \quad (3.29)$$

denklemleri elde edilmiştir. (3.25) denklemi bir öz değer problemi olup, λ öz değerleri (3.30) denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\det \begin{vmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{vmatrix} = 0 \quad (3.30)$$

(3.30) denklemi, aksenal titreşim yapan elastik zemine oturan çubukların aksenal titreşim frekanslarını veren en genel bir denklemdir.

3.1.4. Klasik elastisite de analitik çözümler ve değerlendirmeler

3.1.4.1. Klasik elastisite de kurulan formülasyonun doğruluğunun tespiti

(3.30) denkleminde bulunan katsayılar matrisinin doğruluğunun incelemesinde, ilk önce çubuğun uçlarında bulunan yay parametrelerine sonsuz büyük veya sıfır değerler verilerek bulunan sonuçlar ile rijit sınır koşulları için yapılan çözümlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. (3.25) denklemi sonucunda bulunan S_0 ve S_L parametrelerine sonsuz büyük değerler verildiğinde, çubuğun her iki ucu ankastre gibi

davrandığı gözlenmiştir. (3.25) denkleminde, S_0 parametresine sonsuz büyük değerin verilmesi ve S_L parametresine sıfır değerinin verilmesi ile çubuk konsol gibi davranmıştır. Bu çalışmada, sonsuz serinin ilk 50 terimi kullanılmıştır. Çizelge 3.1'de, $S_0 = S_L = 1000$ ve $K=0$ alınması ile elde edilen sonuçlar verilmiştir. Çizelge 3.2'de, $S_0 = 1000$ ve $S_L = 0$, $K=0$ alınması ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 3.1. İki tarafı ankastre olan çubuk için karşılaştırma.

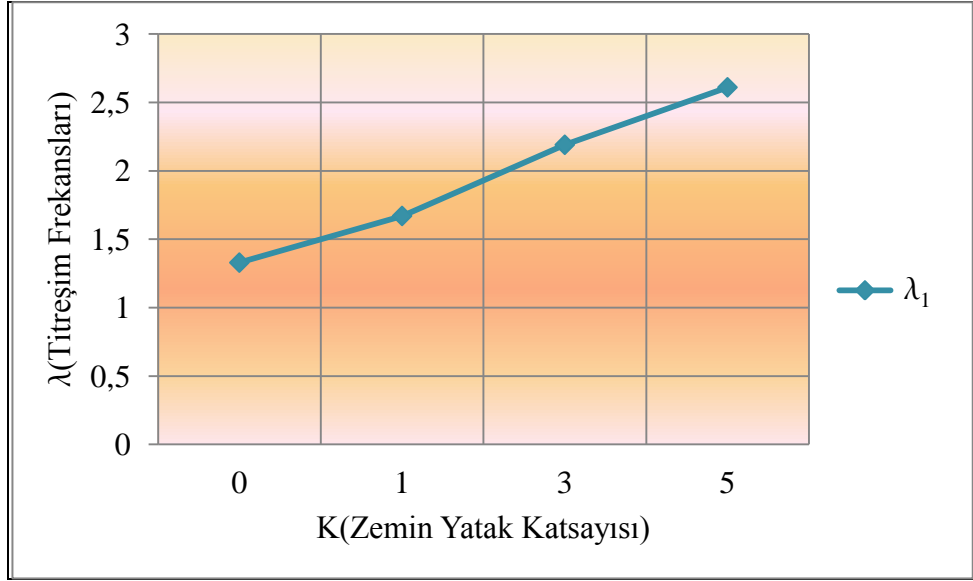
| λ_1 | Kumar ve Sujith (1997) | Aydoğdu (2012) | Bu Çalışmada |
|-------------|------------------------|----------------|--------------|
| 1 | 3.141 | 3.141 | 3.138 |
| 2 | 6.283 | 6.284 | 6.277 |
| 3 | 9.424 | 9.425 | 9.414 |

Çizelge 3.2. Konsol olan çubuk için karşılaştırma.

| λ_2 | Kumar ve Sujith (1997) | Aydoğdu (2012) | Bu Çalışmada |
|-------------|------------------------|----------------|--------------|
| 1 | 1.570 | 1.571 | 1.572 |
| 2 | 4.712 | 4.712 | 4.726 |
| 3 | 7.853 | 7.854 | 7.858 |

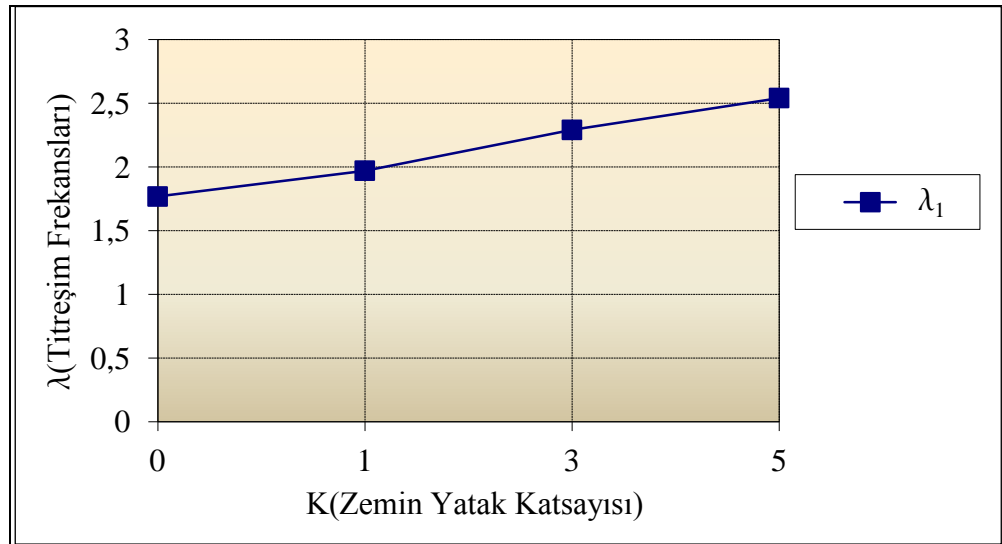
3.1.4.2. Sayısal Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Bu bölümde çeşitli sayısal problemler çözülerek, zemin yatak katsayısı ve çubuğun uçlarında bulunan yay parametrelerinin aksel titreşim frekanslarına etkisi araştırılmıştır. İlk önce çubuğun her iki ucunda bulunan yay parametrelerinin eşit olduğu kabulü yapılmıştır. Birinci örnekte, $S_0 = S_L = 1$ ve değişik zemin yatak katsayıları(K) için aksel titreşim frekansları bulunmuştur. Bulunan aksel titreşim frekansları Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



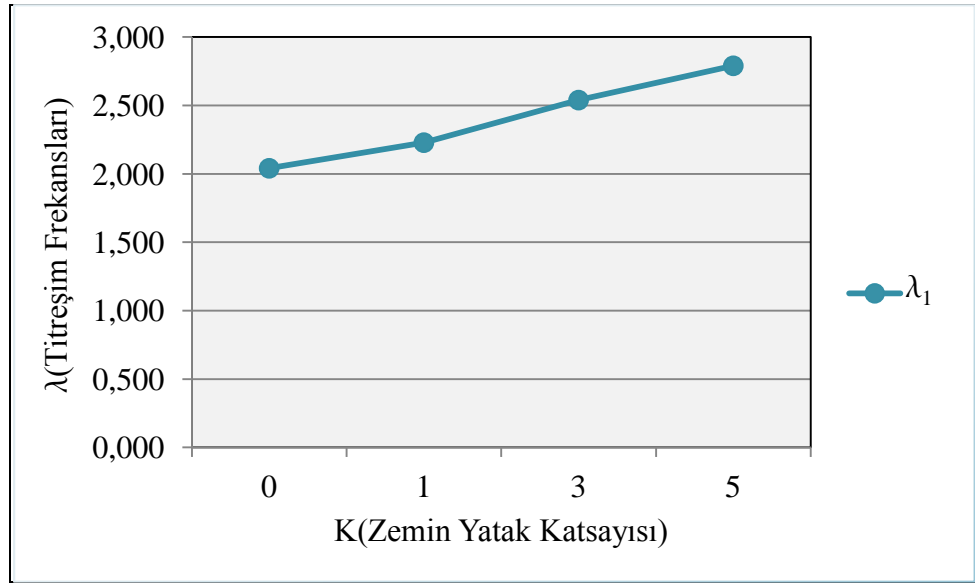
Şekil 3.2. $S_0 = S_L = 1$ olan değişik zemin yatak katsayıları ile eksenel titreşim frekansı.

İkinci örnekte ise, yine çubuğun her iki ucunda ki yay parametrelerin eşit ve $S_0 = S_L = 2$ olarak ele alınmıştır. Daha sonra zemin yatak katsayısına değişik değerler verilmesi ile eksenel titreşim frekanslarının bulunması amaçlanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



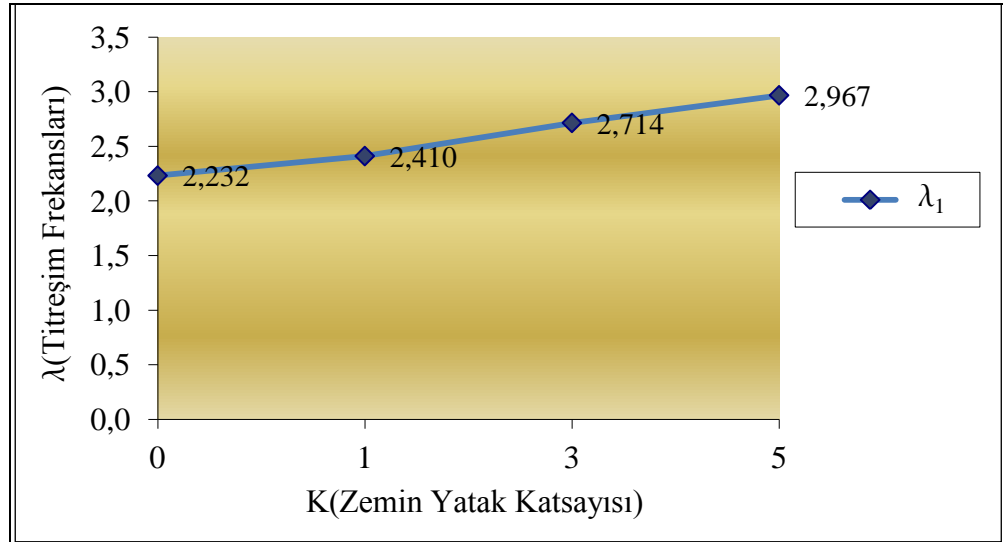
Şekil 3.3. $S_0 = S_L = 2$ değişik zemin yatak katsayısı ile eksenel titreşim frekansı.

Üçüncü örnekte, değişik zemin yatak katsayıları ile yay parametreleri $S_0 = S_L = 3$ olan çubuğun aksenal titreşim frekansları araştırılmıştır. Bulunan sonuçlar Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



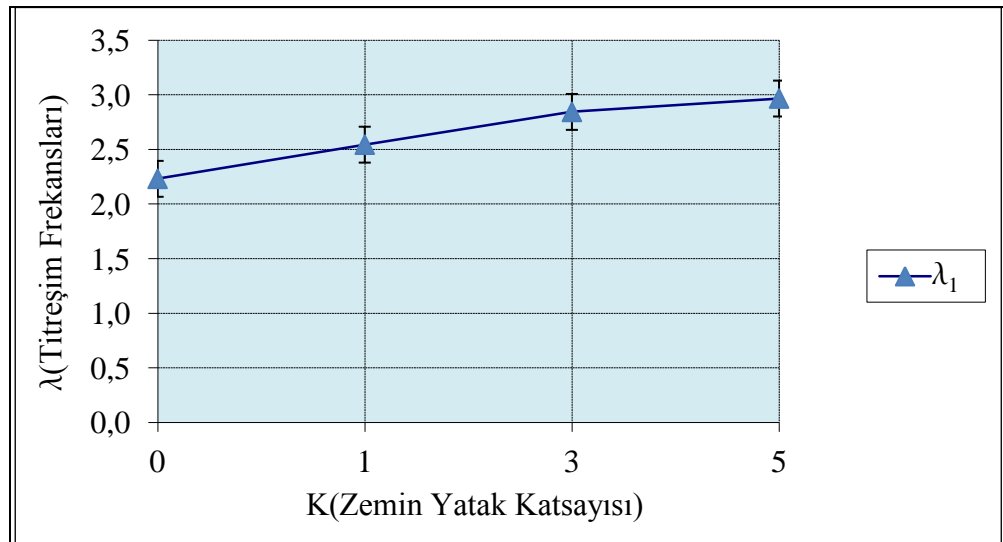
Şekil 3.4. $S_0 = S_L = 3$ değişik zemin yatak katsayısı ile aksenal titreşim frekansı.

Dördüncü örnekte, yay parametreleri $S_0 = S_L = 4$ olan çubukta, zemin yatak katsayısına değişik değerlerin verilmesi ile yapılan aksenal titreşim analizi sonucunda elde edilen sonuçlar, Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. $S_0 = S_L = 4$ değişik zemin yatak katsayısı ile aksel titreşim frekansı.

Beşinci örnekte, sabit olan yay parametrelerine sabit bir değer olan "5" rakamının ve zemin yatak katsayısına değişik değerlerin verilmesi ile yapılan analizin sonucunda, bulunan aksel titreşim frekansları Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

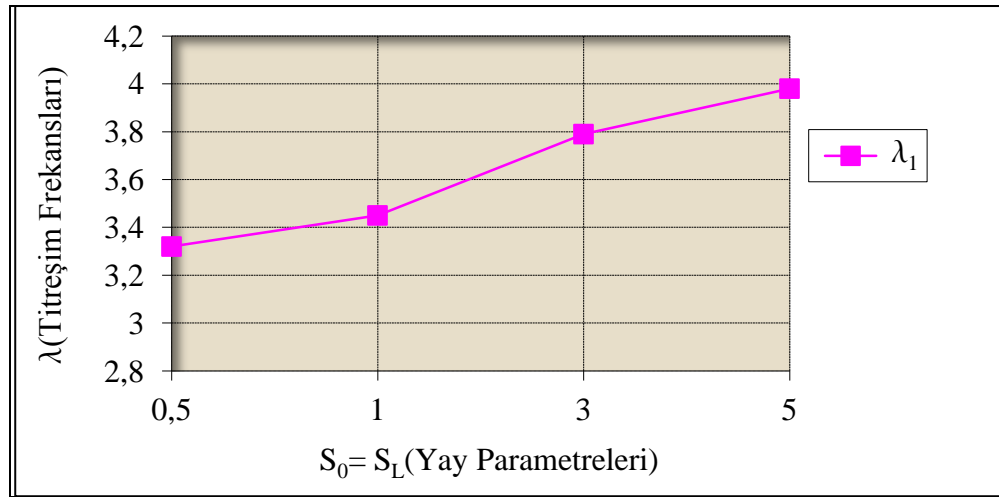


Şekil 3.6. $S_0 = S_L = 5$ değişik zemin yatak katsayısı ile aksel titreşim frekansı.

Yukarıdaki Şekil 3.2, Şekil 3.3, Şekil 3.4., Şekil 3.5. ve Şekil 3.6'da, yay parametrelerine sabit bir değer verilmesi, zemin yatak katsayısına artan değerlerin verilmesi sonucunda bulunmuş olan aksel titreşim frekansları gösterilmiştir. Böylece,

zemin yatak katsayısı ile aksel titreşim frekansları arasındaki bağlantı da ortaya çıkmıştır. Zemin yatak katsayısı arttıkça, aksel titreşim frekanslarının da doğrusal olmayarak arttığı gözlenmiştir.

İkinci olarak da, zemin yatak katsayısına sabit bir değer vererek yay parametrelerinin farklı değerler alması ile elde edilen aksel titreşim frekansları araştırılmıştır. Altıncı örnekte ise, çubuğun, zemin yatak katsayısı $K=10$ ve yay parametreleri $S_0=S_L$ ve farklı değerler verilerek λ_1 aksel titreşim frekansları bulunmuştur. S_0 ve S_L parametreleri eşit olarak artması durumunda, aksel titreşim frekansları da doğrusal olmayarak arttığı Şekil 3.7'de gözlenmiştir.



Şekil 3.7. Sınır koşulları ile aksel titreşim frekansı alakası.

Yedinci örnekte ise, zemin yatak katsayısı bir değer azaltılarak $K=9$ olsun, yay parametreleri de $S_0 = S_L$ ve aynı oranda artırılması durumundaki çubuğun aksel titreşim frekansları araştırılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, aksel titreşim frekansları Çizelge 3.3'te ki gibi elde edilmiştir.

Çizelge 3.3. $K=9$ ve $S_0 = S_L$ için farklı değerler verilerek bulunan eksenel titreşim frekansları.

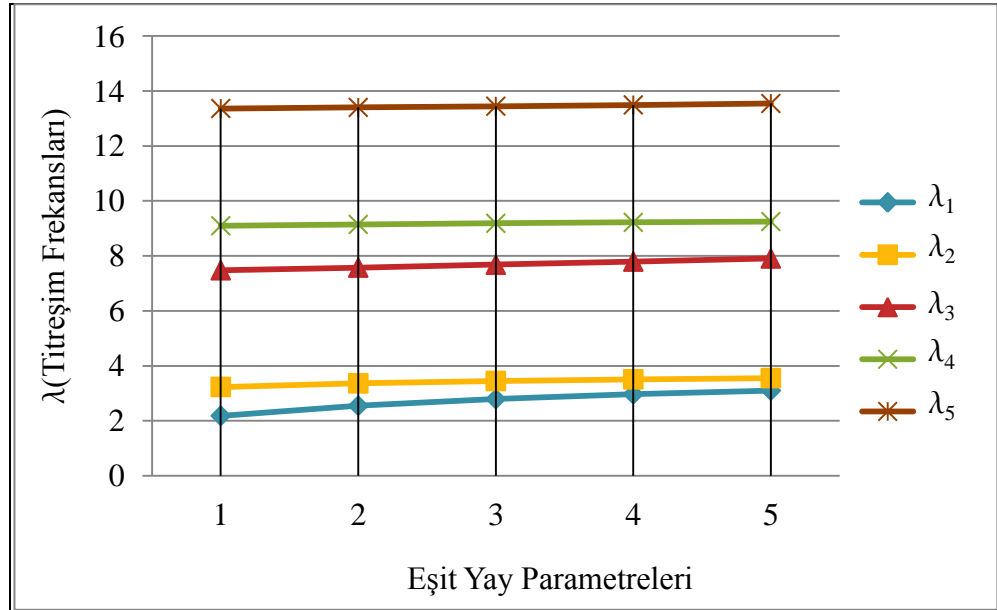
| | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $S_0 = S_L = 1$ | 2.5216 | 3.7347 | 7.8233 | 9.2165 | 13.6052 |
| $S_0 = S_L = 2$ | 2.9137 | 3.8621 | 7.9197 | 9.2173 | 13.6497 |
| $S_0 = S_L = 3$ | 3.1808 | 3.9468 | 8.0225 | 9.3207 | 13,6982 |
| $S_0 = S_L = 4$ | 3.3729 | 4.0066 | 8.1286 | 9.3622 | 13.7507 |
| $S_0 = S_L = 5$ | 3.5164 | 4.0508 | 8.2349 | 9.3983 | 13.8070 |

Sekizinci örnekte, zemin yatak katsayısı bir önceki örnekten bir değer azaltılması ile $K= 8$ alınması ve yay parametreleri $S_0 = S_L$ olarak farklı değerler verilmesi ile çubuğun eksenel titreşim frekansları için analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, elde edilen eksenel titreşim frekansları Çizelge 3.4'te gibi gözlenmiştir.

Çizelge 3.4. $K=8$ ve $S_0 = S_L$ için farklı değerler verilerek bulunan eksenel titreşim frekansları.

| | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $S_0 = S_L = 1$ | 2.4499 | 3.6111 | 7.7387 | 9.1826 | 13.5441 |
| $S_0 = S_L = 2$ | 2.8329 | 3.7403 | 7.8354 | 9.2371 | 13.5871 |
| $S_0 = S_L = 3$ | 3.0935 | 3.8258 | 7.9389 | 9.2838 | 13,6342 |
| $S_0 = S_L = 4$ | 3.2807 | 3.8860 | 8.0463 | 9.3240 | 13.6853 |
| $S_0 = S_L = 5$ | 3.4204 | 3.9306 | 8.1542 | 9.3590 | 13.7404 |

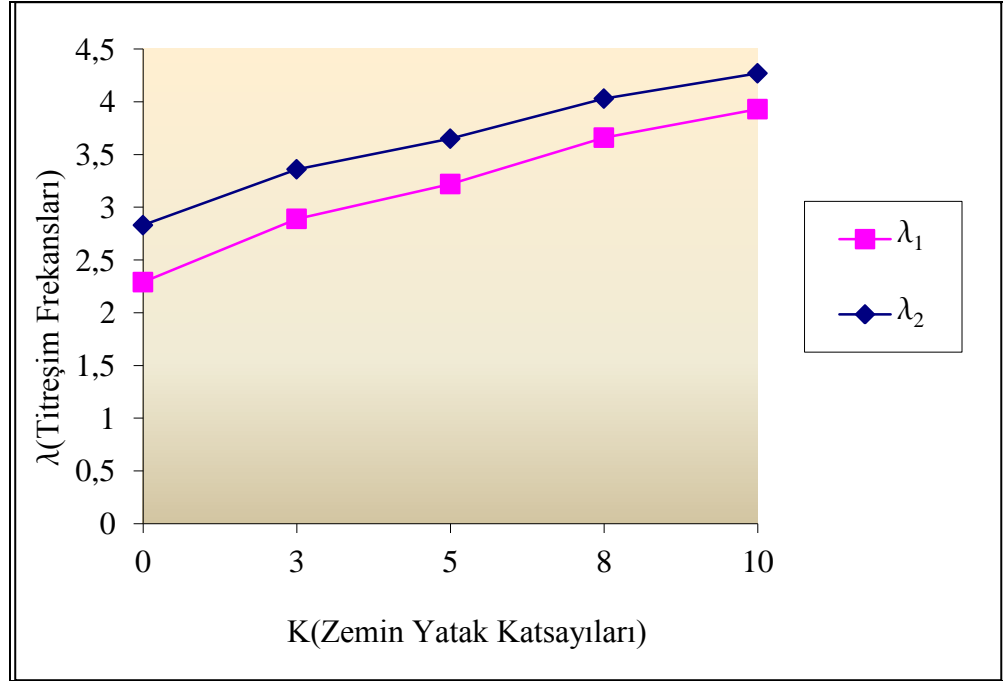
Dokuzuncu örnekte, zemin yatak katsayısı $K = 5$ ve çubuğun uçlarında bulunan yay parametrelerine, $S_0 = S_L = 1,2,\dots,5$ değerler verilmesi ile eksenel titreşim frekansları araştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda, λ eksenel titreşim frekansları, Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. $K = 5$ ve $S_0 = S_L = 1,2,\dots,5$ kadar olan λ aksel titreşim frekansları.

Yukarıdaki, Şekil 3.7., Şekil 3.8., Çizelge 3.3. ve Çizelge 3.4.'te zemin yatak katsayısına sabit bir değer verilmesi, yay parametrelerinin eşit ve sabit bir değer olması durumdaki çubuğun aksel titreşim frekansları gösterilmiştir. Altıncı, yedinci ve sekizinci örnekler ile yay parametreleri ve aksel titreşim frekansları arasındaki ilişki görülmüştür. Çubuğun uçlarında bulunan yay parametrelerine artan değerlerin verilmesi ile aksel titreşim frekanslarında doğrusal olmayarak arttığı ortaya çıkmıştır.

Onuncu örnekte, çubuğun ucunda bulunan yay parametrelerine ve zemin yatak katsayısına farklı sabit değerler verilmesi sonucunda aksel titreşim frekansları araştırılmıştır. Yay parametreleri $S_0 = 3$, $S_L = 8$ alınması ve zemin yatak katsayısına farklı değerler verilmesi sonucunda elde edilen birinci ve ikinci λ aksel titreşim frekansları incelenmiş ve Şekil 3.9'de gösterilmiştir. Şekil 3.9.'da da görüleceği üzere farklı zemin yatak katsayısı ve yay parametrelerini alan çubuk için zemin yatak katsayısı arttıkça aksel titreşim frekanslarında doğrusal olmayarak arttığı gözlenmiştir.



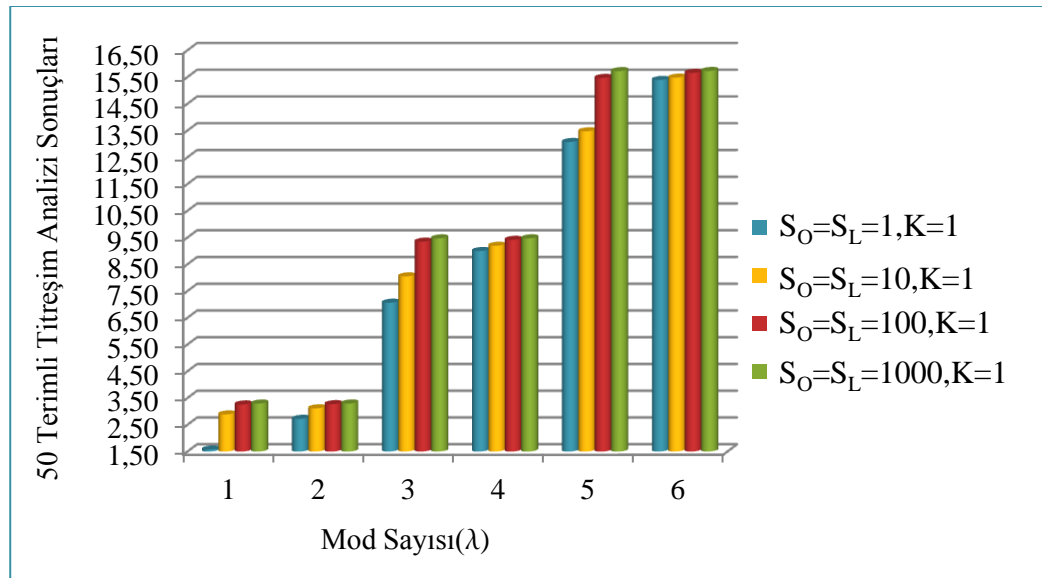
Şekil 3.9. Farklı yatak kat sayıları için iki λ eksenel titreşim frekansları.

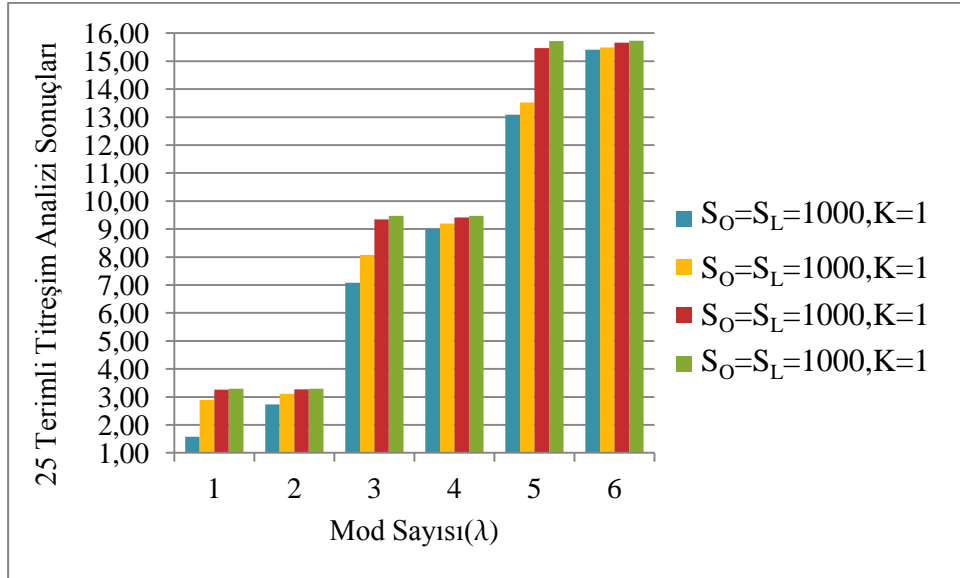
Onbirinci örnekte, zemin yatak katsayısı ve yay parametreleri $K = S_0 = S_L = 1, 2, \dots, 10$ olarak artan değerler verilmesi sonucunda çubukta meydana gelen eksenel titreşim frekansları incelenmiştir. Yapılan analizler sonucunda bulunan λ eksenel titreşim frekansları ve Çizelge 3.5'de gösterilmiştir. Çizelge 3.5.'te görüleceği üzere zemin yatak katsayısı ve yay parametrelerinin artırılması ile eksenel titreşim frekanslarında doğrusal olmayarak arttığı tespit edilmiştir.

Çizelge 3.5. Zemin yatak katsayısı ve yay parametresinin eşit olması durumu.

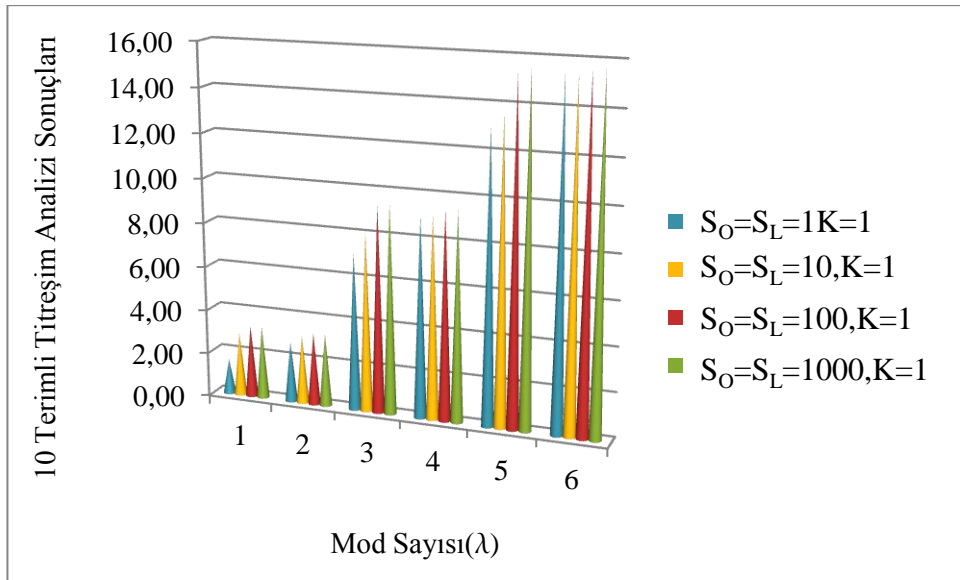
| λ | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $K = S_0 = S_L$ | | | | | |
| $K = S_0 = S_L = 1$ | 1.5750 | 2.7228 | 7.0625 | 8.9948 | 13.0719 |
| $K = S_0 = S_L = 2$ | 2.1465 | 2.9719 | 7.2668 | 9.0564 | 13.1789 |
| $K = S_0 = S_L = 3$ | 2.5420 | 3.1862 | 7.4804 | 9.1200 | 13.2933 |
| $K = S_0 = S_L = 4$ | 2.8481 | 3.3779 | 7.6961 | 9.1847 | 13.4151 |
| $K = S_0 = S_L = 5$ | 3.1002 | 3.5535 | 7.9066 | 9.2498 | 13.5437 |

Onikinci örnekte, bazı terim sayılarında, yay parametrelerine 1, 10, 100, 1000 gibi değerleri ve zemin yatak katsayısı $K=1$ olarak alan çubuğun titreşim frekansları analizi yapılmıştır. 50 terimli yapılan analiz sonucu bulunan değerler, Şekil 3.10'da, 25 terimli yapılan analiz sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 3.11'de ve 10 terimli analiz sonuçları Şekil 3.12'de gösterilmiştir. 10 terimli analiz sonuçları, çok terimli analiz sonuçlarına çok yakın değerler olarak bulunmuştur. Eksenel titreşim analizinde, 10 terim kullanılması halinde bile % 2 hata oranının altında sonuçlar elde edilmiştir.

**Şekil 3.10.** Klasik Elastisite teorisine göre 50 terimde λ eksenel titreşim frekansları.



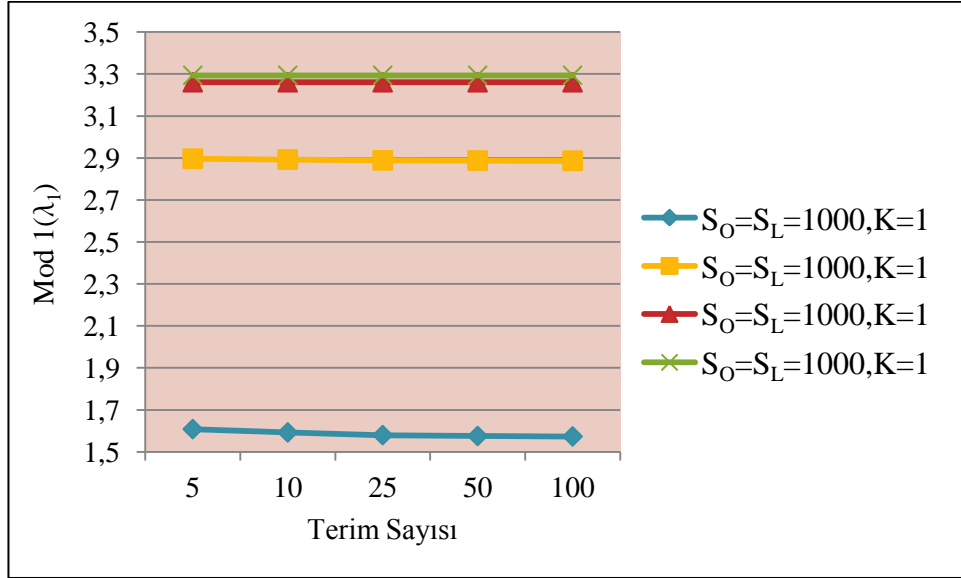
Şekil 3.11. Klasik Elastisite teorisine göre 25 terimde λ aksenal titreşim frekansları.



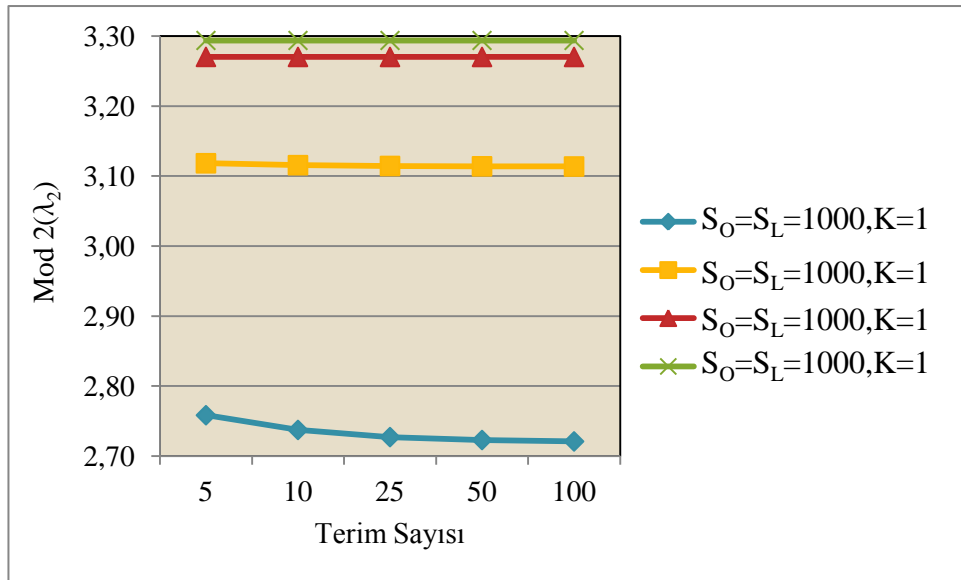
Şekil 3.12. Klasik Elastisite teorisine göre 10 terimde λ aksenal titreşim frekansları.

Onüçüncü örnekte, yay parametrelerinin eşit ve 1, 10, 100, 1000 gibi değerler verilmesi, zemin yatak katsayısının da 1 değerini alınması ile 1, 10, 100, 1000 terimli, çubuğun aksenal titreşim analizleri incelenmiştir. Yapılan bu analizlerin sonucunda bulunan, mod 1(λ_1) birinci aksenal titreşim frekansları ve terim sayılarından meydana gelen Şekil 3.13. aşağıdaki gibi gösterilmiştir. Ayrıca bu analizler sonucunda bulunan, Mod 2(λ_2) ikinci aksenal titreşim frekansları Şekil 3.14'de ve Mod 3(λ_3) üçüncü aksenal

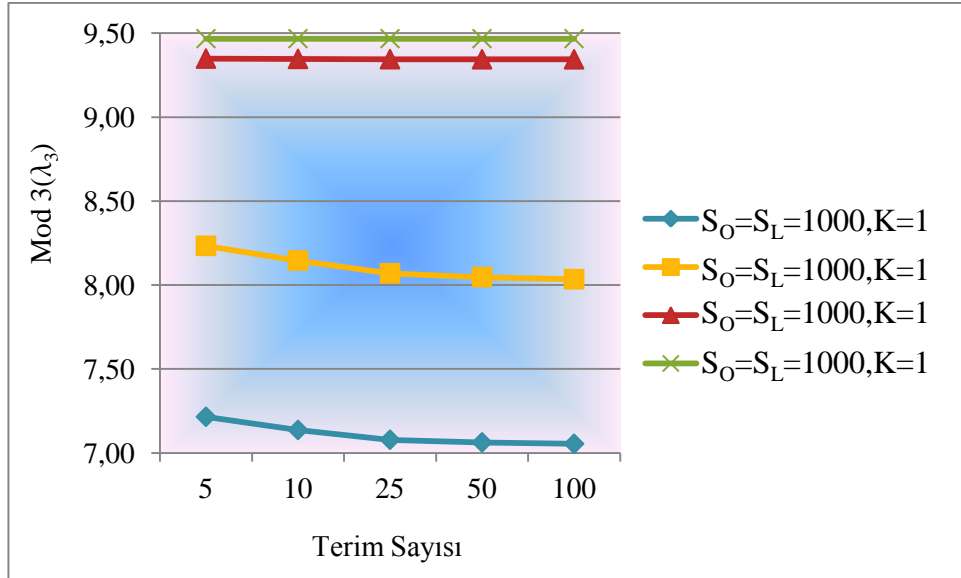
titreşim frekansları da Şekil 3.15'de ve gösterilmiştir. Şekil 3.13., Şekil 3.14. ve Şekil 3.15'den görüleceği üzere, yapılan analizlerde terim sayılarının belli oranlarda artması ile eksenel titreşim frekansları da birbirine çok yakın değerler almıştır.



Şekil 3.13. Belli oranlarda arttırılan terim sayılarında λ_1 eksenel titreşim frekansları.

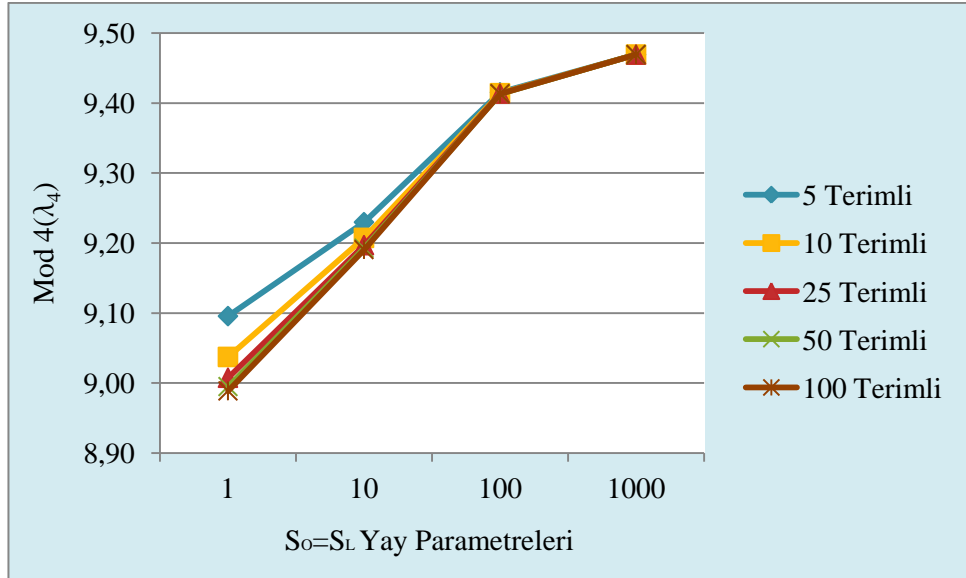


Şekil 3.14. Belli oranlarda arttırılan terim sayılarında λ_2 eksenel titreşim frekansları.

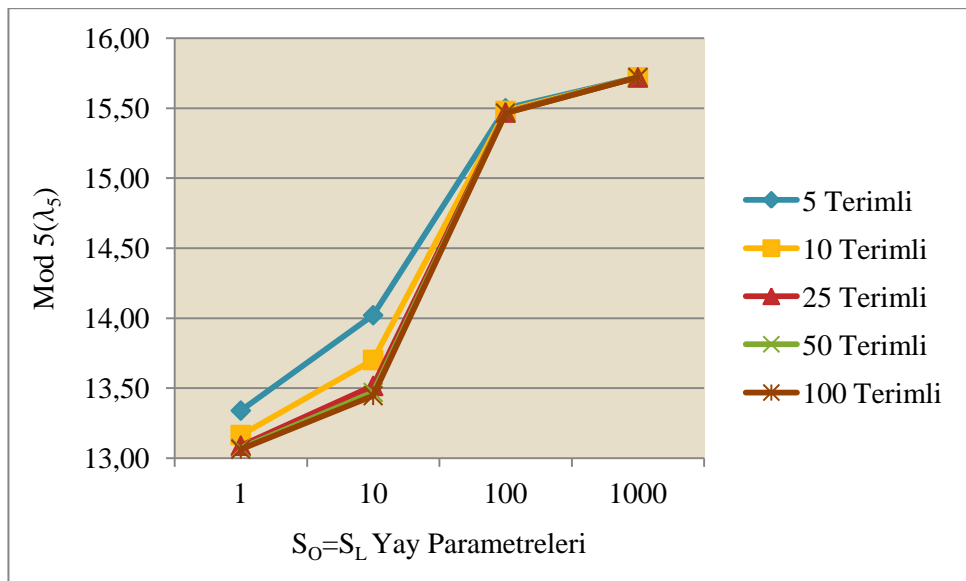


Şekil 3.15. Belli oranlarda arttırılan terim sayılarında λ_3 eksenel titreşim frekansları.

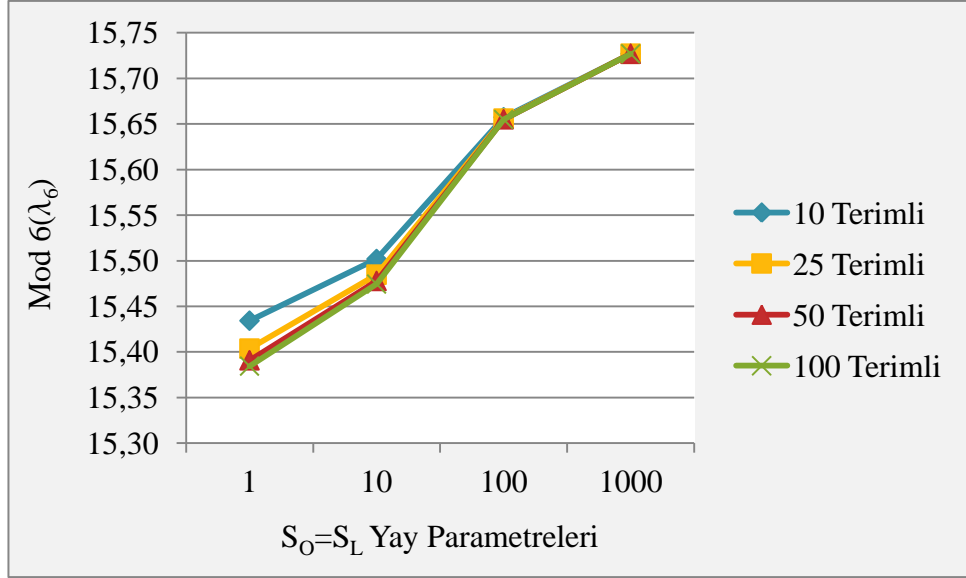
Ondördüncü örnekte, klasik elastisite teorisine göre eksenel titreşim frekansları analizi yapılan çubuğa, zemin yatak katsayısı $K = 1$ ve yay parametreleri eşit ve $S_0 = S_L = 1, 10, 100, 1000$ değerleri verilerek incelenmiştir. Bulunan sonuçlardan, Mod $4(\lambda_4)$ dördüncü eksenel titreşim frekansları ile yay parametreleri arasındaki bağlantı Şekil 3.16'de, Mod $5(\lambda_5)$ beşinci eksenel titreşim frekansları ile yay parametreleri arasındaki ilişki Şekil 3.17'de ve Mod $6(\lambda_6)$ altıncı eksenel titreşim frekansları ile yay parametreleri arasında meydana gelen bağlantı Şekil 3.18'da gösterilmiştir. Bu aşağıda verilen Şekil 3.16., Şekil 3.17. ve Şekil 3.18'de görüleceği üzere, yay parametreleri ile titreşim frekansları arasında doğrusal olmayarak arttığı gözlenmiştir. Terim sayısı arttıkça eksenel titreşim frekansları bir birine çok yakınlaşmıştır. Böylece, az terimler bile daha hızlı eksenel titreşim frekans analizleri yapılabilecektir.



Şekil 3.16. Belli oranlarda arttırılan yay parametreleri ile λ_4 aksenal titreşim frekansları arasındaki bağıntı.



Şekil 3.17. Belli oranlarda arttırılan yay parametreleri ile λ_5 aksenal titreşim frekansları arasındaki bağıntı.



Şekil 3.18. Belli oranlarda arttırılan yay parametreleri ile λ_6 eksenel titreşim frekansları arasındaki bağıntı.

4.YEREL OLMAYAN ELASTİSİTE TEORİSİ

Yerel olmayan elastisite teorisi, klasik elastisite teorisinin boyut etkisinin hesaba katılmamasından dolayı yeteriz olduğu durumları ortadan kaldırmak için geliştirilmiştir. Malzeme iç karakteristik uzunluğunun da hesaba katılmasından dolayı araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir.

Bu teori sayesinde, küçük boyutlu yapıları ve parçaları da modelleme imkânı doğmuştur. Nanoteknolojik çalışmaların artması, yerel olmayan elastisite teorisinin önemini ortaya çıkarmakta ve uygulama alanları gün geçtikçe artmaktadır. Klasik elastisite teorisinde maddenin her bir noktası için denge denklemleri aynı kabul edilir. Büyük ölçekli maddeler için bu durum geçerli olmasına rağmen küçük ölçekli maddelerde farklılıklar gözlenmektedir. Maddenin boyutu küçüldükçe iç yapısında dikkate alınması ve bir noktada gerilme hesaplanırken sadece o noktadaki şekil değişimleri hesaba katmayan diğer tüm noktadaki şekil değiştirmelerin de bir fonksiyona bağlanarak hesaba katan yerel olmayan elastisite teorisi nano ölçekli çubukların analizinde kullanılmaktadır.

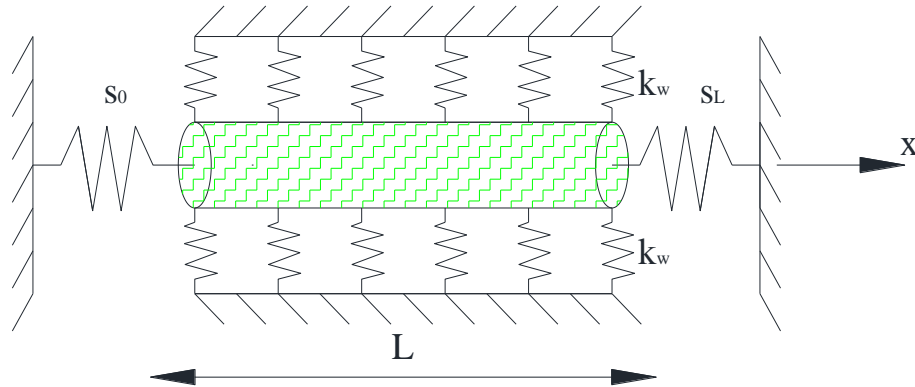
Maddeler herhangi bir işleme tabi tutulduklarında, maddelerde oluşan düzensizliklerden dolayı gerilmeler ve şekil değiştirmeler meydana gelmektedir. Bazı maddelerde, şekil değişikliğinden dolayı meydana gelen iç gerilmeler ve enerjiler sonsuza gitmektedir. Yerel olmayan elastisite teorisinde, bu sorun ortadan kaldırılmaktadır.

Yerel olmayan elastisite teorisi formülasyonunda, yerel olmayan denklemlere geçildiğinde, çözüm uzayı genişler ve bu uzay içinde seçim yapabilmek için problemin tipine ve özelliklerine göre kabul edilebilir sınır koşulları belirlenmesi gerekmektedir(Tepe,2007).

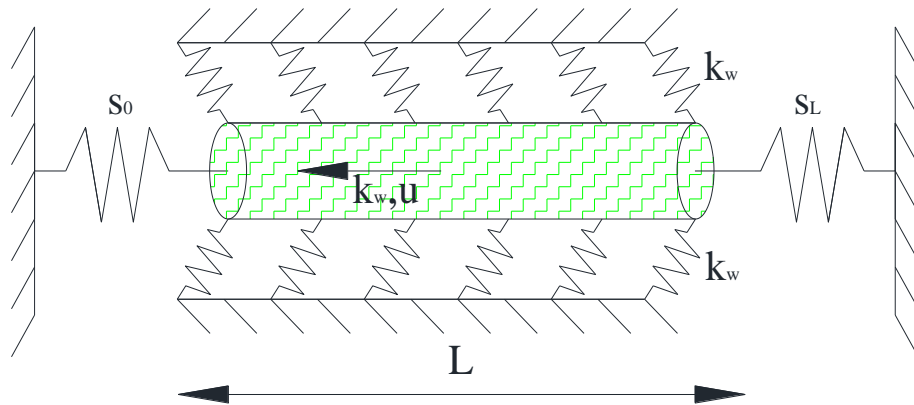
4.1. Yerel Olmayan Elastisite Teorisi ile Elastik Zemine Oturan Nanoçubukların Eksenel Titreşim Analizleri

Bu bölümde, elastik zemine oturan bir nanoçubuğun rijit olmayan sınır şartlarında yerel olmayan elastisite teorisine göre eksenel titreşim analizleri araştırılmıştır. Fourier sinüs serisi ve Stokes' dönüşümü kullanılarak katsayılar matrisi oluşturulmuştur. Hesaplanan nanoçubuğun eksenel titreşim frekansları, literatür de bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

4.1.1. Yerel olmayan elastisite teorisi formülasyonları



Şekil 4.1. Elastik zemine oturan nanoçubuğun şekli.



Şekil 4.2. Elastik zemine oturan nanoçubuğun kurulan fiziksel modeli.

Elastik zemine oturan bir nanoçubuğun şekli Şekil 4.1'de ve elastik zemine oturan nanoçubuğun kurulan fiziksel modeli de Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Elastik zemine oturan nanoçubuğun, yerel olmayan elastisite teorisine göre diferansiyel denklemi aşağıda verilmiştir (Aydoğdu, 2012).

$$EA \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - \left\{ 1 - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right\} G \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} - k_w u(x,t) + k_w (e_0 a)^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (4.1)$$

(4.1) denkleminde E elastisite modülü, A nanoçubuğun en kesit alanı, $u(x, t)$ aksenal yer değiştirme, k_w elastik zemin için Winkler katsayısı ve G birim uzunluk kütlesi, a bir iç karakteristik uzunluk, e_0 sabit bir sayıyı ifade etmiştir. Nanoçubuğun, harmonik titreşim yaptığı kabul edilerek, (4.2) modal titreşim fonksiyonu seçilmiştir.

$$u(x,t)=\varphi(x)\cos(\omega t) \quad (4.2)$$

Burada, ω açısal frekansı, $\varphi(x)$ modal yer değiştirme fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. $\varphi(x)$ modal yer değiştirme fonksiyonu, rijit sınır koşulları ile beraber olmak üzere 3 ayrı şekilde aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$\varphi(x) = \varphi_0 \quad x=0 \quad (4.3)$$

$$\varphi(x) = \varphi_L \quad x=L \quad (4.4)$$

$$\varphi(x) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \sin\left[\frac{\pi x j}{L}\right] \quad 0 < x < L \quad (4.5)$$

4.1.2. Yerel olmayan elastisite teorisinde Stokes' dönüşümleri

Bu bölümde Fourier sinüs serisi, Stokes' dönüşümü ile birlikte kullanılması ile hareketli sınır koşullarında probleme dâhil edilmesi amaçlanmıştır. (4.5) denklemindeki Fourier katsayısı A_j aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$A_j = \frac{2}{L} \int_0^L \varphi(x) \sin\left[\frac{\pi x j}{L}\right] dx \quad (4.6)$$

(4.5) denklemin türevi alınması ile aşağıda ki (4.7) denklemi elde edilmiştir.

$$\varphi'(x) = \sum_{j=1}^{\infty} A_j \frac{j\pi}{L} \cos\left(\frac{j\pi x}{L}\right) \quad (4.7)$$

(4.7) denklemi Fourier cosinüs serileriyle birlikte (4.8) denklemin de gösterilmiştir.

$$\varphi'(x) = \frac{b_0}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} b_j \cos\left(\frac{j\pi x}{L}\right) \quad (4.8)$$

(4.8) denkleminde ki (b_0, b_j) Fourier sabitleri aşağıda ki (4.9) ve (4.10) formlarında gösterilmiştir.

$$b_0 = \frac{2}{L} \int_0^L \varphi'(x) dx = \frac{2}{L} (\varphi(L) - \varphi(0)) \quad (4.9)$$

$$b_j = \frac{2}{L} \int_0^L \varphi'(x) \cos\left(\frac{j\pi x}{L}\right) dx \quad j=1,2,\dots \quad (4.10)$$

(4.10) denkleminde kısmi integrasyon uygulanması ile aşağıdaki (4.11) ve (4.12) denklemleri elde edilmiştir.

$$b_j = \frac{2}{L} \left[\varphi(x) \cos\left(\frac{j\pi x}{L}\right) \right]_0^L + \frac{2}{L} \left[\frac{j\pi}{L} \int_0^L \varphi(x) \sin\left(\frac{j\pi x}{L}\right) dx \right] \quad (4.11)$$

$$b_j = \frac{2}{L} \left[(-1)^j \varphi(L) - \varphi(0) \right] + \frac{j\pi}{L} A_j \quad (4.12)$$

Stokes' dönüşümü kullanılarak $\varphi(x)$ modal yer değiştirme fonksiyonunun daha yüksek dereceden türevleri alınması ile (4.13) ve (4.14) denklemleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\frac{d\varphi(x)}{dx} = \frac{\varphi_L - \varphi_0}{L} + \sum_{j=1}^{\infty} \cos(\beta_j x) \left(\frac{2((-1)^j \varphi_L - \varphi_0)}{L} + \beta_j A_j \right) \quad (4.13)$$

$$\frac{d^2\varphi(x)}{dx^2} = - \sum_{j=1}^{\infty} \beta_j \sin(\beta_j x) \left(\frac{2((-1)^j \varphi_L - \varphi_0)}{L} + \beta_j A_j \right) \quad (4.14)$$

$$\beta_j = \frac{j\pi}{L} \quad (4.15)$$

(4.2),(4.3),(4.4),(4.5) ve (4.14) denklemleri, (4.1) denkleminde yerine yazılarak Fourier katsayısı A_j , φ_0 ve φ_L modal yer değiştirme fonksiyonları açılımlarından (4.16) denklemindeki gibi bulunmuştur.

$$A_j = \frac{2\pi j (\gamma^2 (-\lambda^2) + \gamma^2 K + 1)(\varphi_0 - (-1)^j \varphi_L)}{(-\lambda^2) + K^2 + \pi^2 \gamma^2 j^2 K - \pi^2 \gamma^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \quad (4.16)$$

$$\gamma = \frac{(e_0 a)}{L} \quad (4.17)$$

$$K = \frac{k_w L^2}{EA} \quad (4.18)$$

$$\lambda^2 = \frac{GL^2 \omega^2}{EA} \quad (4.19)$$

Elastik zemine oturan, eksenel titreşim yapan nanoçubuğun yer değiştirmesini ifade eden (4.20) denklemi aşağıda ki gibi bulunmuştur.

$$u(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2\pi j (\gamma^2 (-\lambda^2) + \gamma^2 K + 1)(\phi_0 - (-1)^j \phi_L)}{(-\lambda^2) + K + \pi^2 \gamma^2 j^2 K - \pi^2 \gamma^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \sin(\beta_j x) \cos(\omega t) \quad (4.20)$$

4.1.3. Yerel olmayan elastisite teorisine göre genel frekanslar

Bu bölümde, nanoçubuğun belli bir yük altında şekil değiştirebileceği kabulü sonucu, rijit olmayan sınır koşulları kullanılacaktır. Yerel olmayan elastisite teorisine göre sınır koşulları aşağıda verilmiştir (Aydoğdu, 2012).

$$EA \frac{\partial u}{\partial x} + (e_0 a)^2 G \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} = N \quad x=0 \quad (4.21)$$

$$EA \frac{\partial u}{\partial x} + (e_0 a)^2 G \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} = -N \quad x=L \quad (4.22)$$

Yukarıdaki denklemler elastik yay sabitlerine göre yeniden yazılması ile aşağıdaki iki denklem elde edilmiştir.

$$EA \frac{\partial u}{\partial x} + (e_0 a)^2 G \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} = s_0 \phi_0 \quad x=0 \quad (4.23)$$

$$EA \frac{\partial u}{\partial x} + (e_0 a)^2 G \frac{\partial^3 u}{\partial x \partial t^2} = -s_L \phi_L \quad x=L \quad (4.24)$$

Burada s_0 ve s_L aksenal titreşim yapan nanoçubuğun her iki ucunda bulunan yay sabitlerini temsil etmiştir.

Yukarıda hesaplanmış olan (4.13) ve (4.16) denklemleri, (4.23) ve (4.24) denklemlerinde yerine yazılırsa:

$$\left[\beta^2 \lambda^2 - 1 - S_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-\beta^2 \lambda^4 + \beta^2 \lambda^2 K - K + \lambda^2)}{(-\lambda^2) + K + \pi^2 \beta^2 j^2 K - \pi^2 \beta^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \right] \phi_0 + \left[1 - \beta^2 \lambda^2 - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-1)^j (-\beta^2 \lambda^4 + \beta^2 \lambda^2 K - K + \lambda^2)}{(-\lambda^2) + K + \pi^2 \beta^2 j^2 K - \pi^2 \beta^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \right] \phi_L = 0 \quad (4.25)$$

$$\left[1 - \beta^2 \lambda^2 - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-1)^j (-\beta^2 \lambda^4 + \beta^2 \lambda^2 K - K + \lambda^2)}{(-\lambda^2) + K + \pi^2 \beta^2 j^2 K - \pi^2 \beta^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \right] \phi_0 + \left[\beta^2 \lambda^2 - 1 - S_L + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-\beta^2 \lambda^4 + \beta^2 \lambda^2 K - K + \lambda^2)}{(-\lambda^2) + K + \pi^2 \beta^2 j^2 K - \pi^2 \beta^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \right] \phi_L = 0 \quad (4.26)$$

elde edilmiştir. Burada,

$$S_0 = \frac{s_0 L}{EA} \quad (4.27)$$

$$S_L = \frac{s_L L}{EA} \quad (4.28)$$

bulunmuştur. (4.25) ve (4.26) denklemlerinin katsayıları, aşağıda ki gibi matris formunda gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ \varphi_L \end{bmatrix} = 0 \quad (4.29)$$

(4.29) denklemini bir öz değer problemidir ve katsayılar matrisinin determinantının alınması suretiyle, karakteristik denklemlere ulaşılmıştır. (4.29) denkleminde elemanlar,

$$\Phi_{11} = \left[\beta^2 \lambda^2 - 1 - S_0 + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-\beta^2 \lambda^4 + \beta^2 \lambda^2 K - K + \lambda^2)}{(-\lambda^2) + K + \pi^2 \beta^2 j^2 K - \pi^2 \beta^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \right] \quad (4.30)$$

$$\Phi_{12} = \left[1 - \beta^2 \lambda^2 - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-1)^j (-\beta^2 \lambda^4 + \beta^2 \lambda^2 K - K + \lambda^2)}{(-\lambda^2) + K + \pi^2 \beta^2 j^2 K - \pi^2 \beta^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \right] \quad (4.31)$$

$$\Phi_{21} = \left[1 - \beta^2 \lambda^2 - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-1)^j (-\beta^2 \lambda^4 + \beta^2 \lambda^2 K - K + \lambda^2)}{(-\lambda^2) + K + \pi^2 \beta^2 j^2 K - \pi^2 \beta^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \right] \quad (4.32)$$

$$\Phi_{22} = \left[\beta^2 \lambda^2 - 1 - S_L + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2(-\beta^2 \lambda^4 + \beta^2 \lambda^2 K - K + \lambda^2)}{(-\lambda^2) + K + \pi^2 \beta^2 j^2 K - \pi^2 \beta^2 j^2 \lambda^2 + j^2 \pi^2} \right] \quad (4.33)$$

şeklinde verilmiştir. Eksenel titreşim frekansları, (4.29) denkleminde ki katsayılar matrisi kullanılarak bulunmuştur.

$$\det |\Phi_{\tau\nu}| = 0 \quad (\tau, \nu = 1, 2) \quad (4.34)$$

Yukarıda verilmiş olan (4.34) determinantı, bütün sınır koşulları için çözüm yapabilecek özelliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Elastik yay parametrelerine, çeşitli değerler verilmesi suretiyle, değişik sınır koşulları için eksenel titreşim frekans değerleri hesaplanmıştır.

4.1.4. Yerel olmayan elastisite de analitik çözümler ve değerlendirmeler

4.1.4.1. Yerel olmayan elastisite de kurulan formülasyonun doğruluğunun tespiti

Bu bölümde, ilk olarak iki farklı rijit sınır koşulu için çözümler yapılarak, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kurulan formülasyonun doğruluğunu tespit

etmek açısından yay parametrelerine rijit sınır koşullarına ulaşacak özel değerler verilmiştir.

Aşağıda çözülen problemlerde görüldüğü üzere, yay parametreleri arttıkça aksenal titreşim frekansları da doğrusal olmayan bir şekilde arttığı gözlemlenmiştir.

Birinci karşılaştırma elastik zemin yatak katsayısı $K=0$ ve yerel olmayan elastisite parametresi $\beta = 0$ alınarak yay parametrelerine çok büyük değerler verilmesi ile (örneğin $S_0=1000$ ve $S_L=1000$ gibi) nanoçubuğun her iki ucu ankastre özellik göstermiştir. Analiz sonucunda çıkan sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1.İki ucu ankastre olan nanoçubuk için karşılaştırma.

| λ_1 | Kumar ve Sujith (1997) | Aydoğdu (2012) | Bu Çalışmada |
|-------------|------------------------|----------------|--------------|
| 1 | 3.141 | 3.141 | 3.141 |
| 2 | 6.283 | 6.284 | 6.282 |
| 3 | 9.424 | 9.425 | 9.423 |

İkinci karşılaştırma, nanoçubuğun bir ucunda ki yay parametresine $S_0=0$ ve diğer uçtaki yay parametresine $S_L = 1000$ verildiğinde, nanoçubuk konsol gibi davranış göstermiştir. Bu konsol nanoçubuk için yerel olmayan elastisite parametresi $\beta = 0$ ve elastik zemin yatak katsayısı $K=0$ olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, sonsuz serinin ilk 50 terimi kullanılmıştır. Çizelge 4.2'de bu önerilen yöntemde hesaplanan sonuçlar ile daha önce literatürde yapılan çalışmaların sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki çizelgede de, önerilen yöntemin değerleri, diğer iki yöntemin değerlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Bu nedenle, önerilen yöntemin doğruluğu ispatlanmıştır.

Çizelge 4.2. Konsol gibi davranan nanoçubuk için karşılaştırma.

| λ_2 | Kumar ve Sujith (1997) | Aydoğdu (2012) | Bu Çalışmada |
|-------------|------------------------|----------------|--------------|
| 1 | 1.570 | 1.571 | 1.577 |
| 2 | 4.712 | 4.712 | 4.7231 |
| 3 | 7.853 | 7.854 | 7.885 |

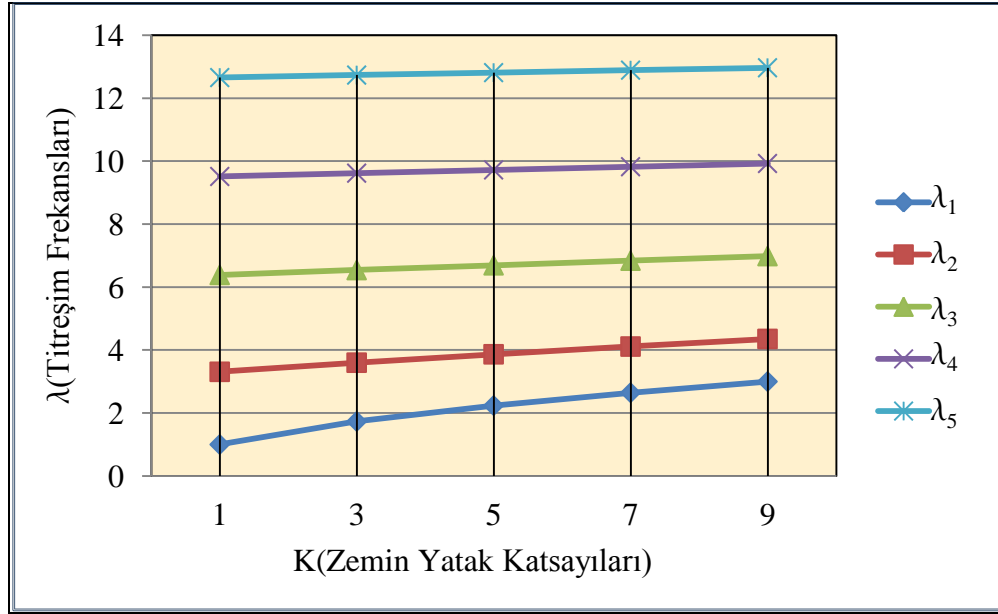
4.1.4.2.Yerel olmayan elastisite de sayısal sonuçlar ve değerlendirmeler

Bu bölümde çeşitli örnekler çözümlenerek, elastik zemin yatak katsayısı ve nanoçubuğun uçlarında bulunan yay parametrelerinin aksel titreşim frekanslarına etkisi araştırılmıştır.

Aşağıda çözümlenen örnekler ile zemin yatak katsayısının artırılması ile aksel titreşim frekansları da doğrusal olmayarak arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca yay parametrelerinin artırılması ile aksel titreşim frekanslarının da doğrusal olmayan bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

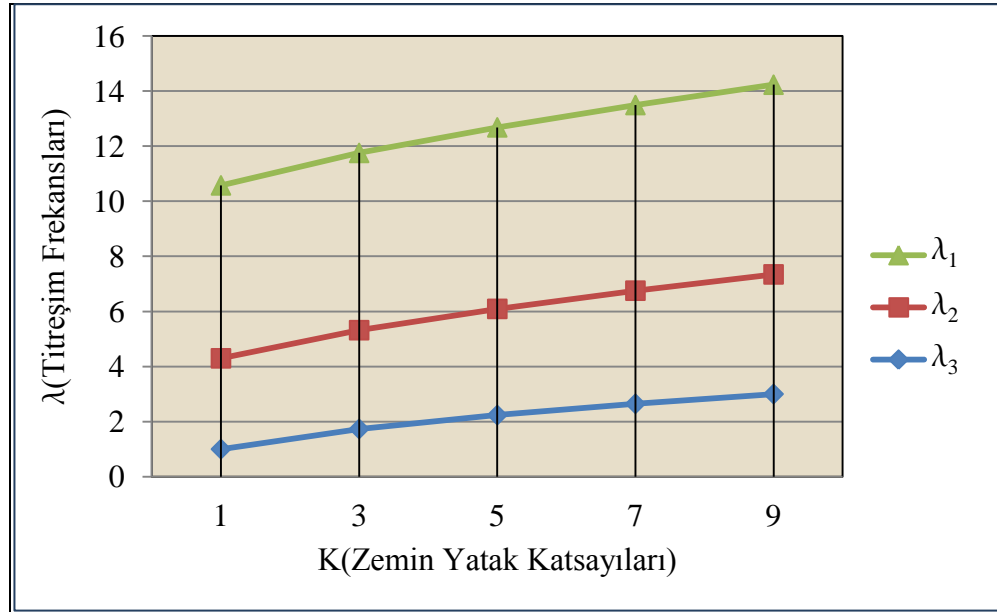
İlk üç problemde, yerel olmayan elastisite parametresinin sıfırdan farklı değeri alması, yay parametrelerinin eşit ve sıfır olması durumdaki nano çubuğun farklı zemin yatak katsayılarındaki aksel titreşim frekansları araştırılmıştır.

Birinci örnekte, yerel olmayan elastisite parametresinin, nanoçubuğun uçlarındaki yay parametrelerinin sıfır olduğu kabulü ($\beta=0$, $S_0=S_L=0$) ve zemin yatak katsayısına farklı değerler verilmesi ile aksel titreşim frekansları bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. $\beta = S_0 = S_L = 0$ olan nanoçubuk için λ aksel titreşim frekansları.

İkinci örnekte, yerel olmayan elastisite parametresine $\beta = 0,03$ ve yay parametrelerin eşit ve sıfır ($S_0 = S_L = 0$) olması durumundaki nanoçubuğun farklı zemin yatak katsayıları kullanılması ile aksel titreşim frekansları hesaplanmıştır. Bulunan sonuçlar aşağıda ki Şekil 4.4'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. $\beta=0,03$ ve $S_0=S_L=0$ olan nanoçubuk için λ aksenal titreşim frekansları.

Üçüncü örnekte, nanoçubuğun ucundaki yay parametreleri $S_0=S_L=0$, yerel olmayan elastisite parametresinin $\beta=0,05$ olan nanoçubuğun, değişik zemin yatak katsayılarında bulunan aksenal titreşim frekansları Çizelge 4.3'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.3. $\beta=0,05$ ve $S_0=S_L=0$ olan nanoçubuk için analiz sonuçları.

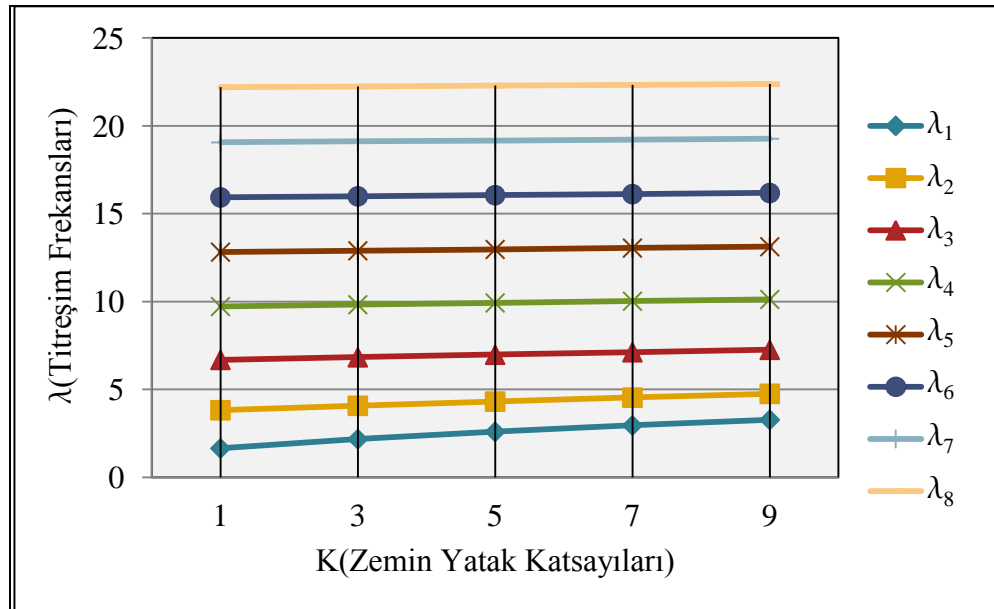
| | K=1 | K=3 | K=5 | K=7 | K=9 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| λ_1 | 1,000 | 1,732 | 2,236 | 2,646 | 3,000 |
| λ_2 | 3,272 | 3,565 | 3,835 | 4,088 | 4,325 |
| λ_3 | 6,099 | 6,261 | 6,419 | 6,573 | 6,723 |
| λ_4 | 8,612 | 8,727 | 8,841 | 8,954 | 9,064 |
| λ_5 | 10,718 | 10,811 | 10,903 | 10,994 | 11,085 |
| λ_6 | 12,424 | 12,505 | 12,584 | 12,664 | 12,742 |
| λ_7 | 13,783 | 13,856 | 13,928 | 13,999 | 14,070 |
| λ_8 | 14,857 | 14,924 | 14,991 | 15,057 | 15,124 |

İlk üç örnekte görülebileceği üzere, yay parametrelerin sıfır ve yerel olmayan elastisite parametresinin farklı değerlerde olması durumdaki nanoçubuklarda, zemin

yatak katsayısı değerinin artması ile eksenel titreşim frekanslarında doğrusal olmayan şekilde arttığı tespit edilmiştir.

Bundan sonraki problemlerde, nanoçubuğun ucunda ki yay parametrelerinin bir ve eşit olması durundaki, yerel olmayan elastisite parametresi ve zemin yatak katsayısına farklı değerler verilmesi ile nanoçubuğun eksenel titreşim frekansları araştırılmıştır.

Dördüncü örnekte, nanoçubuğun yay parametrelerinin eşit ve bir ($S_0=S_L=1$), yerel olmayan elastisite parametresinin ilk önce sıfır ($\beta=0$) olması durumdaki, farklı zemin yatak katsayılarında ki eksenel titreşim frekansları araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda bulunan eksenel titreşim frekansları, aşağıdaki Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



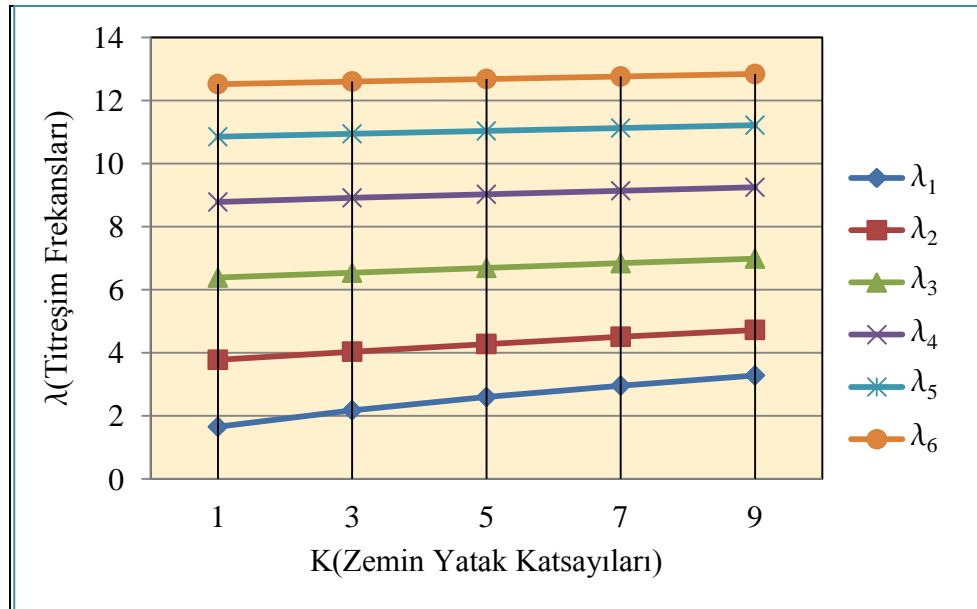
Şekil 4.5. $\beta=0$ ve $S_0=S_L=1$ olan nanoçubuk için λ eksenel titreşim frekansları.

Beşinci örnekte ise yerel olmayan elastisite parametresinin $\beta=0,03$, yay parametreleri $S_0=S_L=1$ olan nanoçubuğun, zemin yatak katsayıları değişik değerler alması halindeki eksenel titreşim frekansları analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda, hesaplanan eksenel titreşim frekansları Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. $\beta = 0,03$ ve $S_0 = S_L = 1$ olan nanoçubuk için analiz sonuçları.

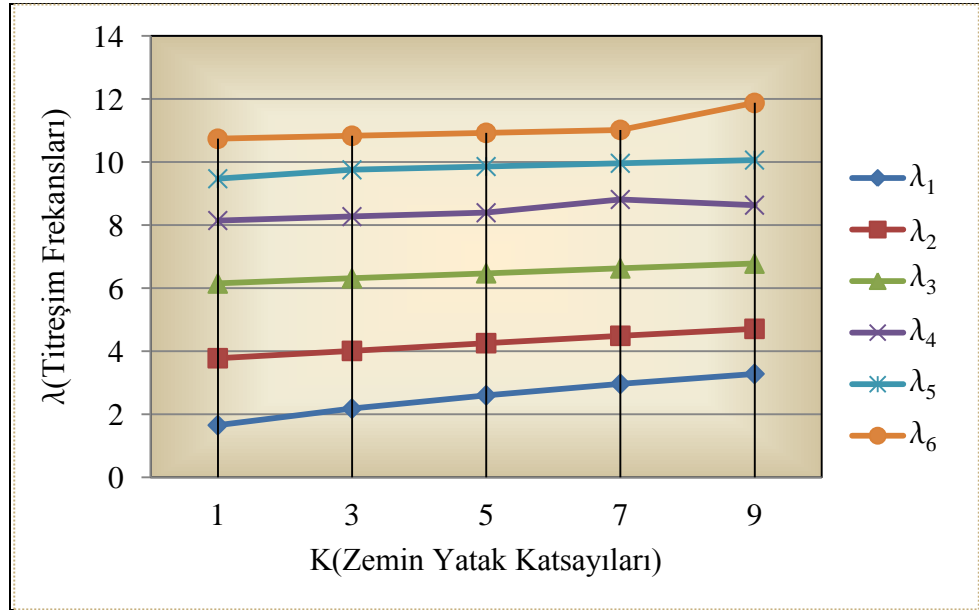
| | K=1 | K=3 | K=5 | K=7 | K=9 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| λ_1 | 1,647 | 2,172 | 2,592 | 2,953 | 3,275 |
| λ_2 | 3,803 | 4,058 | 4,298 | 4,525 | 4,742 |
| λ_3 | 6,571 | 6,722 | 6,869 | 7,014 | 7,156 |
| λ_4 | 9,355 | 9,462 | 9,567 | 9,672 | 9,775 |
| λ_5 | 11,988 | 12,072 | 12,155 | 12,237 | 12,319 |
| λ_6 | 14,404 | 14,474 | 14,543 | 14,612 | 14,681 |
| λ_7 | 16,580 | 16,640 | 16,700 | 16,760 | 16,820 |

Altıncı örnekte, yerel olmayan elastisite parametresi biraz daha artırılarak $\beta = 0,05$ ve yay parametrelerinde yine $S_0 = S_L = 1$ alınması ve değişik zemin yatak katsayıları kullanılması ile elastik zemine oturan nanoçubuğun aksenal titreşim frekansları incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıdaki Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. $\beta = 0,05$ ve $S_0 = S_L = 1$ olan nanoçubuk için λ aksenal titreşim frekansları.

Yedinci örnekte, elastik zemine oturan nanoçubuğun, yerel olmayan elastisite parametresinin 0,02 değerinde arttırılarak $\beta = 0,07$, yay parametrelerinin de $S_0 = S_L = 1$ ve farklı zemin yatak katsayıları alınması ile aksel titreşim frekansları araştırılmıştır. Araştırma sonucunda bulunan aksel titreşim frekansları aşağıdaki Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. $\beta = 0,07$ ve $S_0 = S_L = 1$ olan nanoçubuk için λ aksel titreşim frekansları.

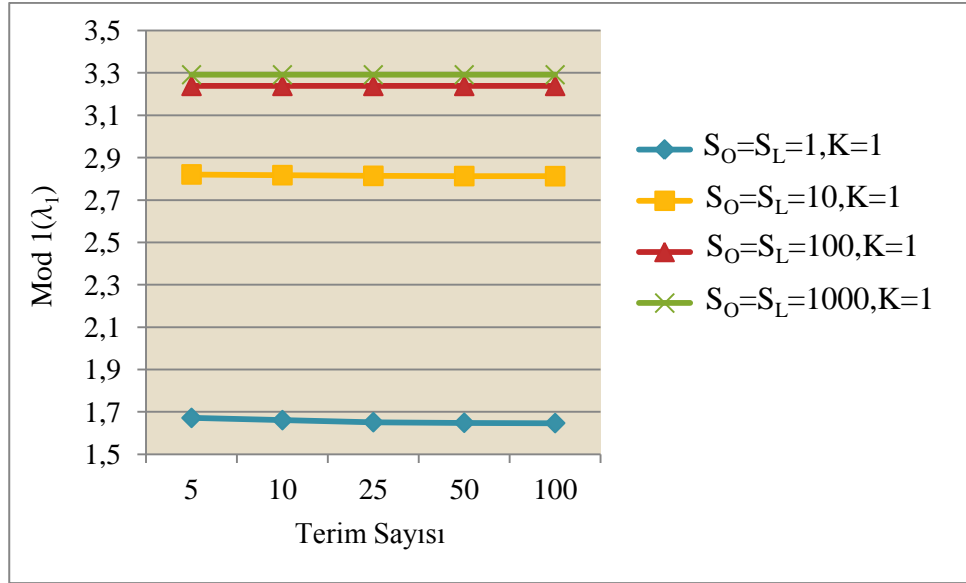
Sekizinci örnekte, bir önceki örnekteki yerel olmayan elastisite parametresi 0,02 oranında arttırılması $\beta = 0,09$ ve yay parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapılmayarak $S_0 = S_L = 1$ olan elastik zemine oturan nanoçubuğun değişik zemin yatak katsayılarındaki aksel titreşim frekansları incelenmiştir. İncelemelerin sonuçları aşağıdaki Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. $\beta = 0,09$ ve $S_0 = S_L = 1$ olan nanoçubuk için analiz sonuçları.

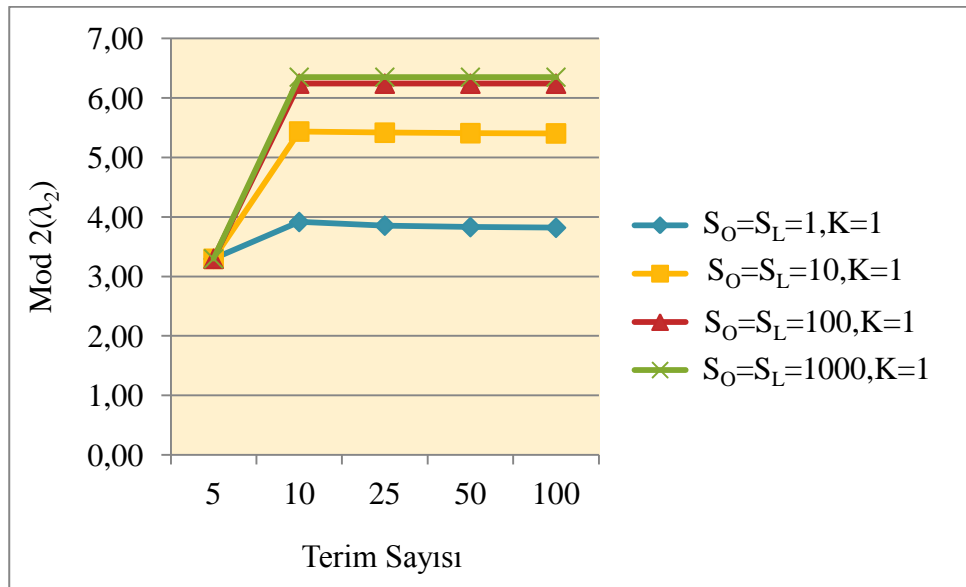
| | K=1 | K=3 | K=5 | K=7 | K=9 |
|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| λ_1 | 1,6509 | 3.6921 | 5.849 | 7.444 | 8.5149 |
| λ_2 | 1.9333 | 3.8287 | 5.9364 | 7.5130 | 8.5754 |
| λ_3 | 2.1794 | 3.9606 | 6.0227 | 7.5815 | 8.6355 |
| λ_4 | 2.4005 | 4.0884 | 6.1078 | 7.6494 | 8.6952 |
| λ_5 | 2.6029 | 4.2123 | 6.1918 | 7.7168 | 8.7547 |
| λ_6 | 2.7907 | 4.3328 | 6.2748 | 7.7837 | 8.8138 |
| λ_7 | 2.9666 | 4.45 | 6.3567 | 7.8500 | 8.8726 |
| λ_8 | 3.1328 | 4.5643 | 6.4376 | 7.9160 | 8.9311 |
| λ_9 | 3.2905 | 4.6758 | 6.5176 | 7.9813 | 8.9894 |

Yukarıda ki Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7., Çizelge 4.4. ve Çizelge 4.5.'te sabit ve eşit yay parametrelerine sahip olan, yerel olmayan elastisite parametresine ve zemin yatak katsayısına artan değerler verilmesi sonucundaki eksenel titreşim frekansları gösterilmiştir. Buradan, zemin yatak katsayısının artırılması halinde eksenel titreşim frekanslarının da doğrusal olmayarak arttığı gözlenmiştir.

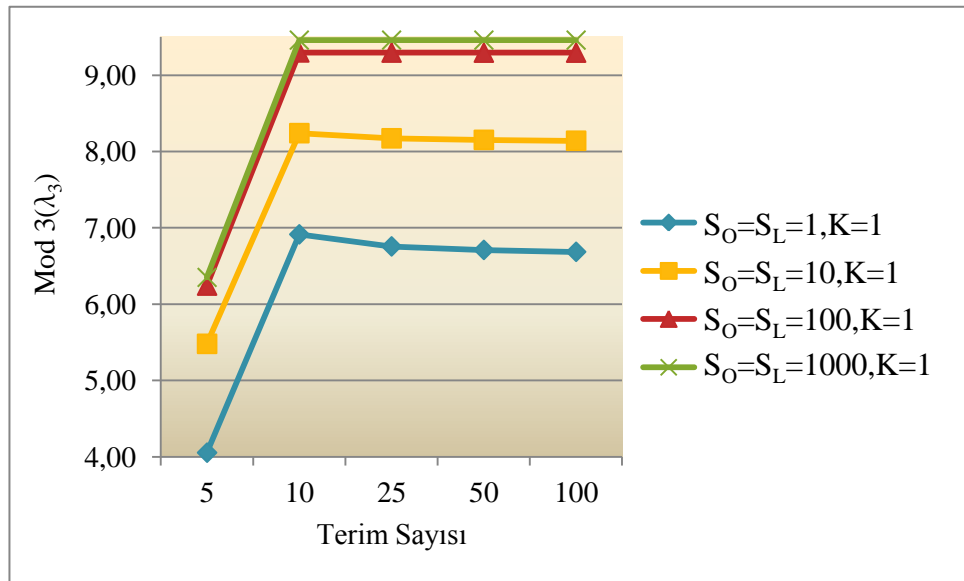
Dokuzuncu örnekte, bir nanoçubuğun, yerel olmayan elastisite teorisi ile yerel olmayan elastisite parametresinin $\beta = 0$, zemin yatak katsayısının $K=1$ ve yay parametrelerinde sırasıyla, $S_0 = S_L = 1, 10, 100, 1000$ değerleri alınarak eksenel titreşim frekansları araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, analizi yapılan terim sayıları ile Mod 1(λ_1) birinci titreşim frekansları arasındaki bağıntı Şekil 4.8'de, analizde tercih edilen terim sayıları ile Mod 2(λ_2) ikinci eksenel titreşim frekansları arasındaki bağıntı Şekil 4.9'da ve analizde kullanılan terim sayıları ile Mod 3(λ_3) üçüncü eksenel titreşim frekansları arasındaki bağlantı Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Aşağıdaki şekillerden de anlaşılacağı üzere, 10 terim kullanılarak yapılan analiz sonucunda bulunan sonuçlar ile 100 terim ile yapılan analiz sonucunda bulunan sonuçlar birbirine çok yakın değerler olduğu gözlenmiştir. Bu sebeple, eksenel titreşim frekansları, 10 terim gibi az terim sayısı ile kolayca bulunabileceği gözlenmiştir.



Şekil 4.8. $\beta=0$, $K=1$ olan nanoçubuk için λ_1 aksenal titreşim frekansları.

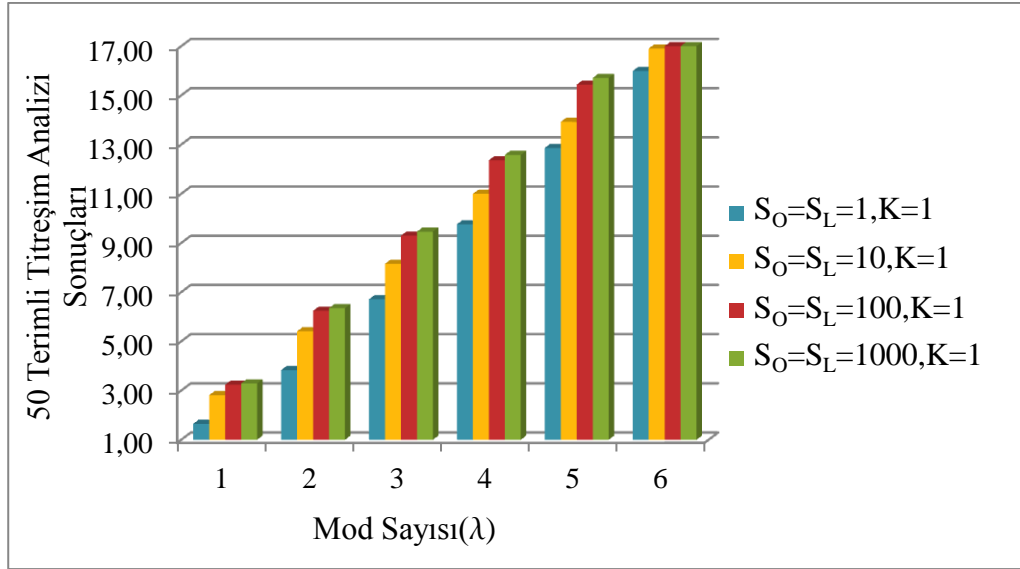


Şekil 4.9. $\beta=0$, $K=1$ olan nanoçubuk için λ_2 aksenal titreşim frekansları.

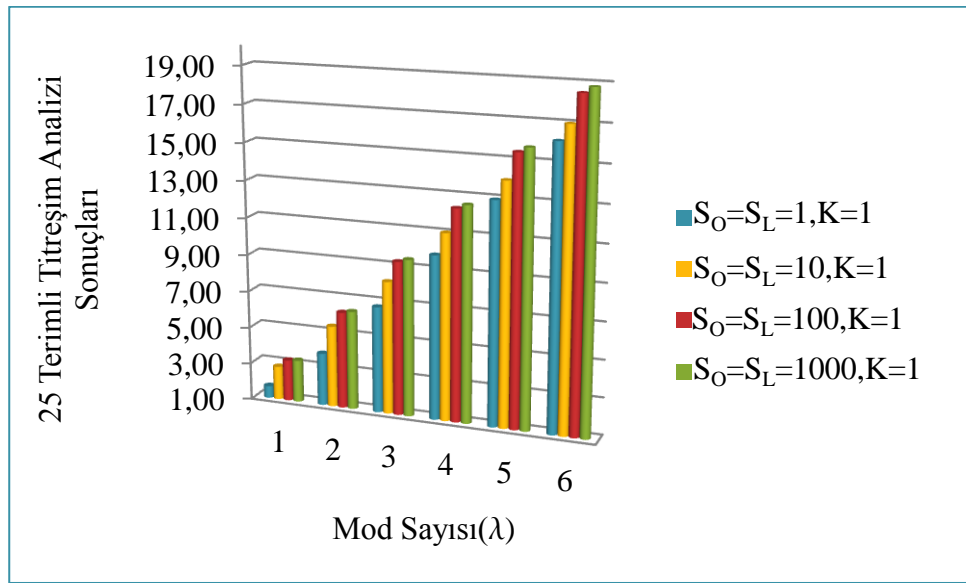


Şekil 4.10. $\beta = 0$, $K=1$ olan nanoçubuk için λ_3 eksenel titreşim frekansları.

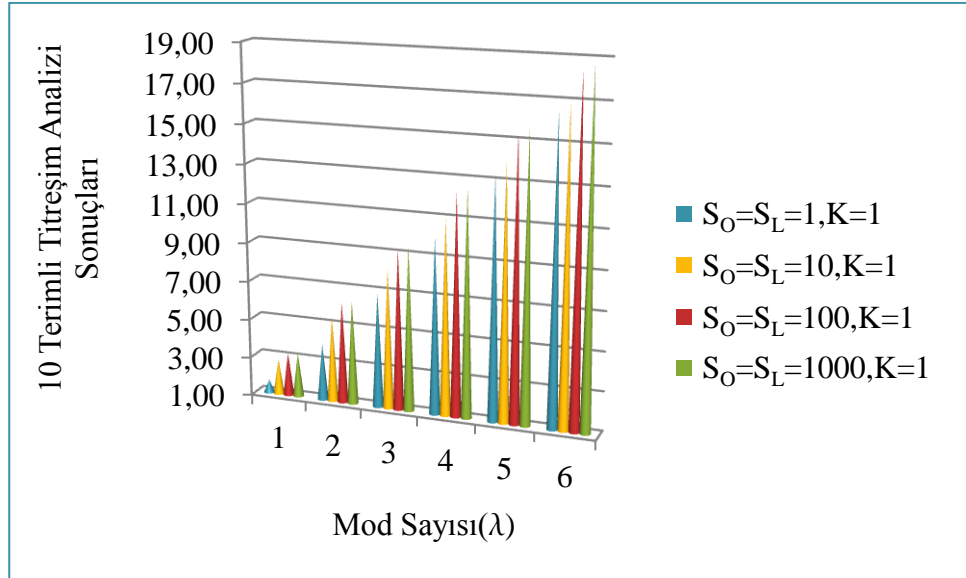
Onuncu örnekte, dokuzuncu örnekteki nanoçubuğun kullanılarak, 50, 25, 10 terimlerine göre eksenel titreşim frekansları araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda bulunan ilk altı eksenel titreşim frekanslarının, mod sayısına göre durumu ortaya çıkmıştır. 50 terime göre elde edilen titreşim frekansları ile mod sayısı arasındaki ilişki Şekil 4.11'de, 25 terime göre elde edilen titreşim frekansları ile mod sayısı arasındaki bağlantı Şekil 4.12'de ve 10 terime göre elde edilen titreşim frekansları ile mod sayısı arasındaki meydana gelen durum Şekil 4.13'de gösterilmiştir. 10 terimde yapılan analiz sonuçları ile 50 terimde yapılan analizler sonuçları birbirine çok yakın değerler olarak bulunmuştur. Bu nedenle, az terim sayısı kullanılması ile % 2 hata oranında eksenel titreşim frekansları elde edilmiştir.



Şekil 4.11. $\beta=0$, $K=1$ olan nanoçubuk için 50 terimde bulunan λ aksenal titreşim frekansları.

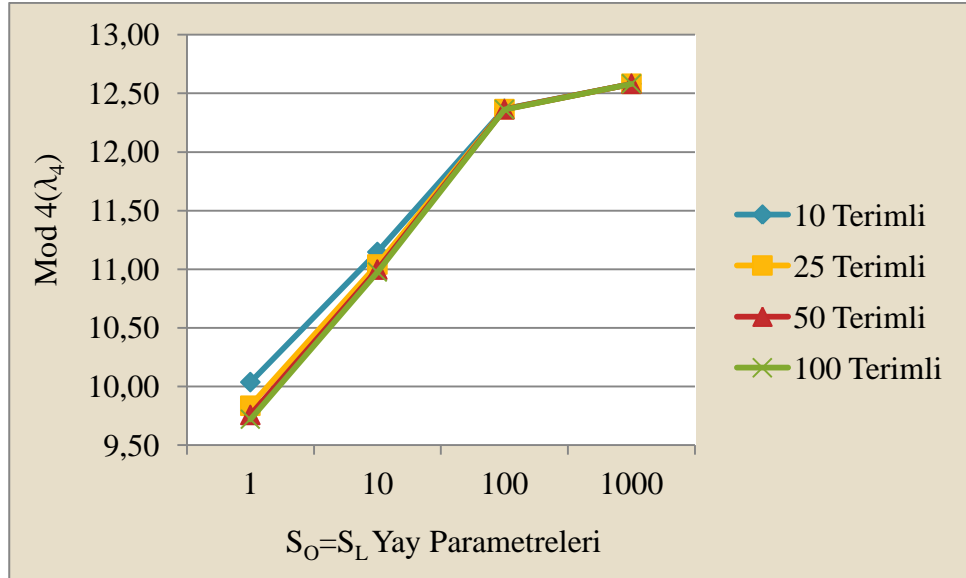


Şekil 4.12. $\beta=0$, $K=1$ olan nanoçubuk için 25 terimde bulunan λ aksenal titreşim frekansları.

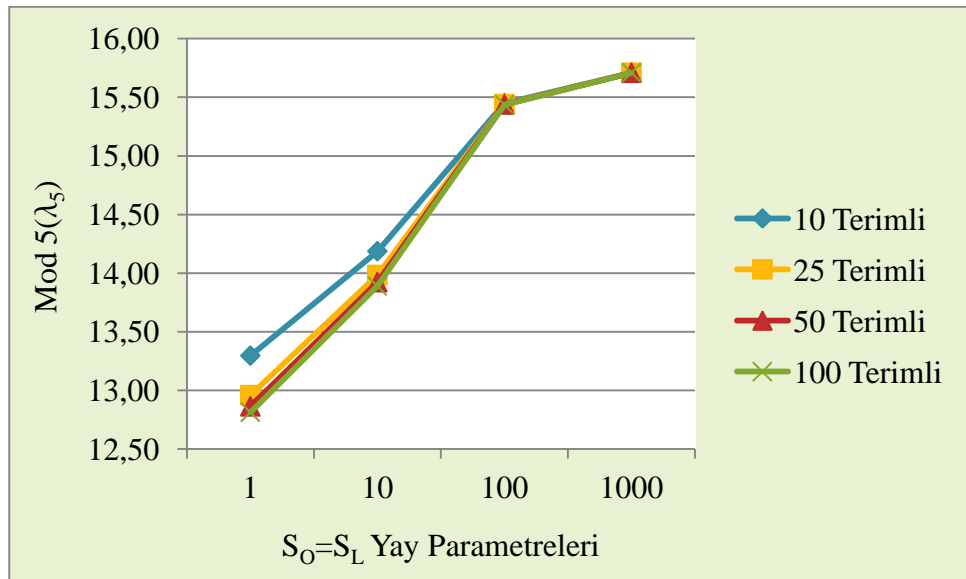


Şekil 4.13. $\beta=0$, $K=1$ olan nanoçubuk için 10 terimde bulunan λ aksel titreşim frekansları.

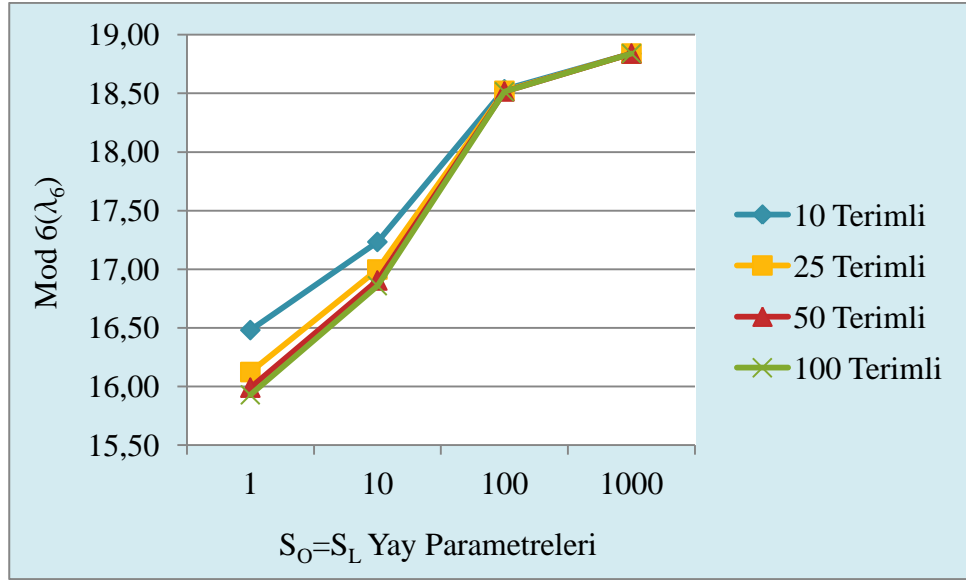
Onbirinci örnekte, yay parametrelerin eşit ve $S_O = S_L = 1, 10, 100, 1000$ gibi değerler aldığı, zemin yatak katsayısı $K=1$ olduğu nanoçubuğun, 10, 25, 50, 100 terimlerdeki aksel titreşim frekansları incelenecektir. Yapılan incelemeler sonucunda, dördüncü moddaki(λ_4), beşinci moddaki(λ_5) ve altıncı moddaki(λ_6) aksel titreşim frekansları elde edilmiştir. Elde edilen dördüncü moddaki(λ_4) aksel titreşim frekansları ile nanoçubuğun ucunda bulunan yay parametreleri arasında meydana gelen durum Şekil 4.14'de, bulunan beşinci moddaki(λ_5) aksel titreşim frekansları ile yay parametreleri arasındaki bağlantı Şekil 4.15'de ve hesaplanan altıncı moddaki(λ_6) aksel titreşim frekansları ile nanoçubuğa uçlarından bağlı yay parametreleri arasındaki ilişki Şekil 4.16'de gösterilmiştir. Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16'da nanoçubuğun ucunda bulunan yay parametrelerinin değerleri ile terim sayılarının arttırılması sonucu, aksel titreşim frekansları çok yakın değerler almaya başlamıştır. Rijit olmayan sınır şartlarında yerel olmayan elastisite teorisine göre titreşim frekansları analizi, 10 terim ile çözümünde bile % 2 hata oranının altında sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 4.14. $\beta = 0$, $K=1$, $S_0=S_L = 1,10,100,1000$ olan nanoçubuğun λ_4 eksenel titreşim frekansları.



Şekil 4.15. $\beta = 0$, $K=1$, $S_0=S_L = 1,10,100,1000$ olan nanoçubuğun λ_5 eksenel titreşim frekansları.



Şekil 4.16. $\beta = 0$, $K=1$, $S_0=S_L = 1,10,100,1000$ olan nanoçubuğun λ_6 aksel titreşim frekansları.

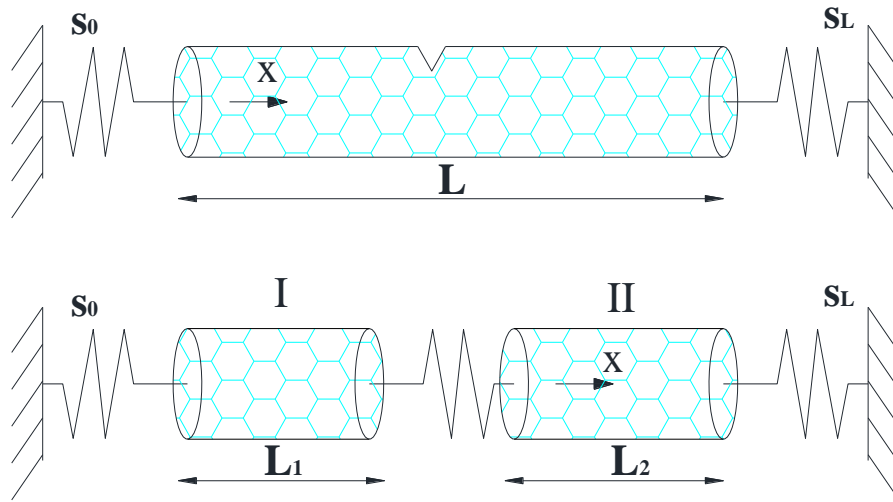
5. HASARLI NANOÇUBUKLAR

Bu bölümde, hasarlı nanoçubukların aksenal titreşim analizleri incelenmiştir.

5.1 Hasarlı Nanoçubukların Aksenal Titreşim Analizleri

Bu bölümde, hasarlı bir nanoçubuğun aksenal titreşim analizinde, Fourier sinus serisi ve Stokes' dönüşümü kullanılması ile katsayılar matrisi oluşturulmuştur. Hesaplanan nanoçubuğun aksenal titreşim frekanslarını, literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

5.1.1. Hasarlı nanoçubuğun formülasyonları



Şekil 5.1. Hasarlı bir nanoçubuğun şekli ve kurulan fiziksel modeli.

Şekil 5.1'de hasarlı bir nanoçubuğun şekli ve kurulan fiziksel modeli verilmiştir. Bu durumda, aksenal titreşimini ifade eden denklem aşağıda iki parça halinde yazılmıştır.

$$EA \frac{\partial^2 V_1(x,t)}{\partial x^2} - \left\{ 1 - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right\} G \frac{\partial^2 V_1(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad 0 < x < L_1 \quad (5.1)$$

$$EA \frac{\partial^2 V_2(x,t)}{\partial x^2} - \left\{ 1 - (e_0 a)^2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right\} G \frac{\partial^2 V_2(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad L_1 < x < L_2 \quad (5.2)$$

(5.1) ve (5.2) denklemlerinde E elastisite modülü, A nanoçubuğun en kesit alanı, $V_1(x, t)$ ve $V_2(x, t)$ aksenal yer değiştirme fonksiyonları, G birim uzunluk kütlesi, a bir iç karakteristik uzunluk, e_0 sabit bir sayı, L_1 ve L_2 uzunluklar ve t ile de zaman ifade edilmiştir. Hasarlı nanoçubuğun, harmonik titreşim yaptığı kabul edilerek $V_1(x, t)$ ve $V_2(x, t)$ aksenal yer değiştirme fonksiyonları, (5.3) ve (5.4) denklemleri ile aşağıdaki şekilde yazılmıştır.

$$V_1(x, t) = \varphi_1(x) \cos(\omega t) \quad (5.3)$$

$$V_2(x, t) = \varphi_2(x) \cos(\omega t) \quad (5.4)$$

Yukarıdaki denklemlerde ω açısal frekansı, $\varphi_1(x)$ ve $\varphi_2(x)$ modal yer değiştirme fonksiyonlarıdır. Hasarlı nanoçubuğun, hasar noktasından iki parçaya ayrıldığı kabulüne göre aşağıdaki bağıntı geçerli olmuştur.

$$L = L_1 + L_2 \quad (5.5)$$

Modal yer değiştirme fonksiyonları aşağıda verilen setlerdeki gibi ifade edilmiştir.

$$\varphi_1(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \varphi_1^0 & x = 0 \\ \varphi_1^{L_1} & x = L_1 \\ \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin[\alpha_i x] & 0 < x < L_1 \end{array} \right\} \quad (5.6)$$

$$\varphi_2(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \varphi_2^0 & x = L_1 \\ \varphi_2^L & x = L \\ \sum_{i=1}^{\infty} B_i \sin[\beta_i x] & L_1 < x < L \end{array} \right\} \quad (5.7)$$

Burada,

$$\alpha_i = \frac{i\pi x}{L_1} \quad (5.8)$$

$$\beta_i = \frac{i\pi x}{L_2} \quad (5.9)$$

ifade edilmiştir.

5.1.2. Hasarlı nanoçubuğun Stokes' dönüşümleri

Şekil 5.1.'te görüleceği üzere rijit olmayan sınır koşullarını, problemin çözümüne dâhil edilebilmesi için matematiksel bir dönüşüm yapılması gerekmektedir. Bu nedenle Fourier sinüs serisi ve Stokes' dönüşümü birlikte kullanılması sonucunda hareketli sınır koşulları probleme dâhil edilmiştir. (5.10) ve (5.11) denklemindeki Fourier katsayısı A_i ve B_i aşağıda ki gibi ifade edilmiştir.

$$A_i = \frac{2}{L_1} \int_0^{L_1} \varphi_1(x) \sin(\alpha_i x) dx \quad (5.10)$$

$$B_i = \frac{2}{L_2} \int_0^{L_2} \varphi_2(x) \sin(\beta_i x) dx \quad (5.11)$$

Yukarıda ki (5.6) ve (5.7) denklemlerinin türevleri alınırsa, (5.12) ve (5.13) denklemleri elde edilmiştir.

$$\varphi_1'(x) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \frac{i\pi}{L_1} \cos\left(\frac{i\pi x}{L_1}\right) \quad (5.12)$$

$$\varphi_2'(x) = \sum_{i=1}^{\infty} B_i \frac{i\pi}{L_2} \cos\left(\frac{i\pi x}{L_2}\right) \quad (5.13)$$

(5.12) ve (5.13) denklemleri Fourier kosinüs serileriyle birlikte ifade edilerek, (5.14) ve (5.15) denklemleri bulunmuştur.

$$\varphi_1'(x) = \frac{a_0}{L_1} + \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos\left(\frac{i\pi x}{L_1}\right) \quad (5.14)$$

$$\varphi_2'(x) = \frac{b_0}{L_2} + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \cos\left(\frac{i\pi x}{L_2}\right) \quad (5.15)$$

(5.14) ve (5.15) denkleminde ki (a_0, a_i) ve (b_0, b_i) Fourier sabitleri, aşağıdaki gibi gösterilmiştir.

$$a_0 = \frac{2}{L_1} \int_0^{L_1} \varphi_1'(x) dx = \frac{2}{L_1} (\varphi_1^{L_1} - \varphi_1^0) \quad (5.16)$$

$$a_i = \frac{2}{L_1} \int_0^{L_1} \varphi_1'(x) \cos\left(\frac{i\pi x}{L_1}\right) dx \quad i=1,2,\dots,L_1 \quad (5.17)$$

$$b_0 = \frac{2}{L_2} \int_0^{L_2} \varphi_2'(x) dx = \frac{2}{L_2} (\varphi_2^L - \varphi_2^0) \quad (5.18)$$

$$b_i = \frac{2}{L_2} \int_0^{L_2} \varphi_2'(x) \cos\left(\frac{i\pi x}{L_2}\right) dx \quad i=1,2,\dots,L_2 \quad (5.19)$$

(5.17) ve (1.19) denklemlerine kısmi integrasyon uygulanarak, aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

$$a_i = \frac{2}{L_1} \left[\varphi_1(x) \cos\left(\frac{i\pi x}{L_1}\right) \right]_0^{L_1} + \frac{2}{L_1} \left[\frac{i\pi}{L_1} \int_0^{L_1} \varphi_1(x) \sin\left(\frac{i\pi x}{L_1}\right) dx \right] \quad (5.20)$$

$$a_i = \frac{2}{L_1} \left[(-1)^i \varphi_1^{L_1} - \varphi_1^0 \right] + \frac{i\pi}{L_1} A_i \quad (5.21)$$

$$b_i = \frac{2}{L_2} \left[\varphi_2(x) \cos\left(\frac{i\pi x}{L_2}\right) \right]_0^{L_2} + \frac{2}{L_2} \left[\frac{i\pi}{L_2} \int_0^{L_2} \varphi_2(x) \sin\left(\frac{i\pi x}{L_2}\right) dx \right] \quad (5.22)$$

$$b_i = \frac{2}{L_2} \left[(-1)^i \varphi_2^L - \varphi_2^0 \right] + \frac{i\pi}{L_2} B_i \quad (5.23)$$

Stokes' dönüşümü kullanılarak $\varphi_1(x)$ ve $\varphi_2(x)$ modal yer değiştirme fonksiyonlarının daha yüksek dereceden türevleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

$$\frac{d\varphi_1(x)}{dx} = \frac{\varphi_1^{L_1} - \varphi_1^0}{L_1} + \sum_{i=1}^{\infty} \cos(\alpha_i x) \left(\frac{2((-1)^i \varphi_1^{L_1} - \varphi_1^0)}{L_1} + \alpha_i A_i \right) \quad (5.24)$$

$$\frac{d^2\varphi_1(x)}{dx^2} = -\sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \sin(\alpha_i x) \left(\frac{2((-1)^i \varphi_1^{L_1} - \varphi_1^0)}{L_1} + \alpha_i A_i \right) \quad (5.25)$$

$$\frac{d\varphi_2(x)}{dx} = \frac{\varphi_2^L - \varphi_2^0}{L_2} + \sum_{i=1}^{\infty} \cos(\beta_i x) \left(\frac{2((-1)^i \varphi_2^L - \varphi_2^0)}{L_2} + \beta_i B_i \right) \quad (5.26)$$

$$\frac{d^2\varphi_2(x)}{dx^2} = \sum_{i=1}^{\infty} \beta_i \sin(\beta_i x) \left(\frac{2((-1)^i \varphi_2^L - \varphi_2^0)}{L_2} + \beta_i B_i \right) \quad (5.27)$$

(5.3), (5.6) ve (5.25) denklemleri (5.1) denkleminde yerine yazarak Fourier katsayısı A_i , φ_1^0 ve $\varphi_1^{L_1}$ modal yer değiştirme fonksiyonları açısından (5.28) denkleminde ki gibi bulunmuştur.

$$A_i = \frac{2}{L_1} \left(\frac{(L_1^2 - \bar{\omega}_1^2 (e_0 a)^2) \alpha_i ((\varphi_1^0 - (-1)^i \varphi_1^{L_1}))}{-\bar{\omega}_1^2 + (L_1^2 - \bar{\omega}_1^2 (e_0 a)^2) \alpha_i^2} \right) \quad (5.28)$$

Burada,

$$\bar{\omega}_1^2 = \frac{G\omega^2 L_1^2}{EA} \quad (5.29)$$

(5.4), (5.7) ve (5.26) denklemleri (5.2) denkleminde yerine yazarak Fourier katsayısı B_i , φ_2^0 ve φ_2^L modal yer değiştirme fonksiyonları açısından (5.30) denkleminde ki gibi bulunmuştur.

$$B_i = \frac{2}{L_2} \left(\frac{(L_2^2 - \bar{\omega}_2^2 (e_0 a)^2) \beta_i ((\varphi_2^0 - (-1)^i \varphi_2^L))}{-\bar{\omega}_2^2 + (L_2^2 - \bar{\omega}_2^2 (e_0 a)^2) \beta_i^2} \right) \quad (5.30)$$

Burada,

$$\bar{\omega}_2^2 = \frac{G\omega^2 L_2^2}{EA} \quad (5.31)$$

Eksenel titreşim yapan hasarlı nanoubuğun yer değiştirme fonksiyonları aşağıdaki gibi (5.32) ve (5.33) denklemleri ile ifade edilmiştir.

$$V_1(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{L_1} \left(\frac{P_1 \alpha_i (\varphi_1^0 - (-1)^i \varphi_1^{L_1})}{-\bar{\omega}_1^2 + P_1 \alpha_i^2} \right) \sin(\alpha_i x) \cos(\omega t) \quad (5.32)$$

$$V_2(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2}{L_2} \left(\frac{P_2 \beta_i (\varphi_2^0 - (-1)^i \varphi_2^L)}{-\bar{\omega}_2^2 + P_2 \beta_i^2} \right) \sin(\beta_i x) \cos(\omega t) \quad (5.33)$$

Burada,

$$P_1 = L_1^2 - \bar{\omega}_1 (e_0 a)^2 \quad (5.34)$$

$$P_2 = L_2^2 - \bar{\omega}_2 (e_0 a)^2 \quad (5.35)$$

olarak ifade edilmiştir.

5.1.3. Yerel olmayan sınır ve sureksizlik koşulları

Bu blemde, Şekil 5.1'de gösterilen hasarlı nanoçubuk göz önüne alınarak, hasar noktasının L_1 noktasında olduğu düşünülürse; çubuk uzunlukları L_1 ve L_2 olan iki parçaya ayrıldığı kabul edilmiştir. Yerel olmayan elastisite de normal kuvvet aşağıda verilmiştir.

$$N = \left[EA + (e_0 a)^2 G \frac{\partial}{\partial t^2} \right] \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} \quad (5.36)$$

Burada V , eksenel yer değiştirmeyi ifade etmiştir. Yukarıdaki denklem sınırlarda bulunan yaylar dikkate alınarak tekrar yazılması ile aşağıdaki denklemler bulunmuştur.

$$s_0 \phi_1^0 = \left[EA + (e_0 a)^2 G \frac{\partial}{\partial t^2} \right] \frac{V_1(x, t)}{\partial x}, \quad x=0 \quad (5.37)$$

$$s_L \phi_2^L = - \left[EA + (e_0 a)^2 G \frac{\partial}{\partial t^2} \right] \frac{V_2(x, t)}{\partial x}, \quad x=L \quad (5.38)$$

Burada s_0 ve s_L nanoçubuğunun her iki ucunda bulunan yay sabitlerini ifade etmiştir. Son olarak süreksizlik koşulları aşağıda verilmiştir.

$$\Psi(\phi_1^{L_1} - \phi_2^0) = - \left[EA + (e_0 a)^2 G \frac{\partial}{\partial t^2} \right] \frac{V_1(L_1, t)}{\partial x}, \quad x=L_1 \quad (5.39)$$

$$\frac{V_1(L_1, t)}{\partial x} = \frac{V_2(0, t)}{\partial x}, \quad x=L_1 \quad (5.40)$$

Burada Ψ hasarın boyutunu temsil eden bir katsayıdır. Sınır ve süreksizlik koşulları ile birlikte yukarıda bulunmuş olan Fourier katsayıları da kullanılarak, aşağıda verilen sonsuz serilerden oluşan homojen denklem takımı elde edilmiştir.

$$(-\delta_1 S_0 + \gamma^2 \lambda^2 - 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_1^2 \lambda^2 - 2\gamma^2 \delta_1^2 \lambda^4}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_1^0 + \quad (5.41)$$

$$(1 - \gamma^2 \lambda^2 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\gamma^2 \delta_1^2 \lambda^4 (-1)^i - 2\delta_1^2 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_1^{L_1} = 0$$

$$(1 - \gamma^2 \lambda^2 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\gamma^2 \delta_2^2 \lambda^4 (-1)^i - 2\delta_2^2 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_2^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_2^0 + \quad (5.42)$$

$$(-\delta_2 S_L + \gamma^2 \lambda^2 - 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_2^2 \lambda^2 - 2\gamma^2 \delta_2^2 \lambda^4}{-\delta_2^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_2^L = 0$$

$$(\gamma^2 \lambda^2 - 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_1^2 \lambda^2 - 2\gamma^2 \delta_1^2 \lambda^4}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_1^0 \quad (5.43)$$

$$+ (1 - \gamma^2 \lambda^2 + \frac{\delta_1}{\Psi} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\gamma^2 \delta_1^2 \lambda^4 (-1)^i - 2\delta_1^2 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_1^{L_1} - \frac{\delta_1}{\Psi} \phi_2^0 = 0$$

$$(-\frac{1}{\delta_1} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_1 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_1^0 +$$

$$(\frac{1}{\delta_1} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_1 \lambda^2}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_1^{L_1} \quad (5.44)$$

$$+ (\frac{1}{\delta_2} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_2 \lambda^2}{-\delta_2^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_2^0 +$$

$$(-\frac{1}{\delta_2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_2 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_2^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}) \phi_2^L = 0$$

Burada;

$$\gamma = \frac{e_0 a}{L}, \quad (5.45)$$

$$\Psi = \frac{EA}{kL}, \quad (5.46)$$

$$\delta_1 = \frac{L_1}{L}, \quad (5.47)$$

$$\delta_2 = \frac{L_2}{L}, \quad (5.48)$$

$$S_0 = \frac{s_0 L}{EA}, \quad (5.49)$$

$$S_L = \frac{s_L L}{EA}, \quad (5.50)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{G\omega^2 L^2}{EA}}, \quad (5.51)$$

ve farklı sınır koşullarına sahip, hasarlı nano ölçekteki çubuğun eksenel titreşim frekansları aşağıdaki doğrusal denklem sistemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} & \Phi_{14} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \Phi_{23} & \Phi_{24} \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & \Phi_{33} & \Phi_{34} \\ \Phi_{41} & \Phi_{42} & \Phi_{43} & \Phi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1^0 \\ \varphi_1^{L_1} \\ \varphi_2^0 \\ \varphi_2^L \end{bmatrix} = 0, \quad (5.52)$$

Yukarıda ki matris formundan,

$$\Phi_{11} = -\delta_1 S_0 + \gamma^2 \lambda^2 - 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_1^2 \lambda^2 - 2\gamma^2 \delta_1^2 \lambda^4}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.53)$$

$$\Phi_{12} = 1 - \gamma^2 \lambda^2 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\gamma^2 \delta_1^2 \lambda^4 (-1)^i - 2\delta_1^2 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.54)$$

$$\Phi_{13} = 0, \quad \Phi_{14} = 0, \quad \Phi_{21} = 0, \quad \Phi_{22} = 0, \quad (5.55)$$

$$\Phi_{23} = 1 - \gamma^2 \lambda^2 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\gamma^2 \delta_2^2 \lambda^4 (-1)^i - 2\delta_2^2 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_2^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.56)$$

$$\Phi_{24} = -\delta_2 S_L + \gamma^2 \lambda^2 - 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_2^2 \lambda^2 - 2\gamma^2 \delta_2^2 \lambda^4}{-\delta_2^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.57)$$

$$\Phi_{31} = \gamma^2 \lambda^2 - 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_1^2 \lambda^2 - 2\gamma^2 \delta_1^2 \lambda^4}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.58)$$

$$\Phi_{32} = 1 - \gamma^2 \lambda^2 + \frac{\delta_1}{\Psi} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\gamma^2 \delta_1^2 \lambda^4 (-1)^i - 2\delta_1^2 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.59)$$

$$\Phi_{33} = -\frac{\delta_1}{\Psi}, \quad \Phi_{34} = 0, \quad (5.60)$$

$$\Phi_{41} = -\frac{1}{\delta_1} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_1 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.61)$$

$$\Phi_{42} = \frac{1}{\delta_1} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_1 \lambda^2}{-\delta_1^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.62)$$

$$\Phi_{43} = \frac{1}{\delta_2} - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_2 \lambda^2}{-\delta_2^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.63)$$

$$\Phi_{44} = -\frac{1}{\delta_2} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{2\delta_2 \lambda^2 (-1)^i}{-\delta_2^2 \lambda^2 - \pi^2 \gamma^2 \lambda^2 i^2 + \pi^2 i^2}, \quad (5.64)$$

denklemleri elde edilmiştir. (5.52) denklemi bir öz değer problemi olup, λ öz değerleri (5.65) denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\det \begin{vmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & \Phi_{13} & \Phi_{14} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \Phi_{23} & \Phi_{24} \\ \Phi_{31} & \Phi_{32} & \Phi_{33} & \Phi_{34} \\ \Phi_{41} & \Phi_{42} & \Phi_{43} & \Phi_{44} \end{vmatrix} = 0 \quad (5.65)$$

(5.65) ifadesi eksenel titreşim yapan hasarlı çubukların eksenel titreşim frekanslarını veren en genel bir denklemdir. Sadece bu denklem kullanılarak herhangi bir sınır koşulu için eksenel titreşim frekansları bulunabilmektedir.

5.1.4. Hasarlı nanoçubuğun analitik çözümleri ve değerlendirmeleri

5.1.4.1. Hasarlı nanoçubuk için kurulan formülasyonun doğruluğunun tespiti

Hasarlı nanoçubuğun, her iki ucunda rijit olmayan sınır koşulları da eksenel titreşim analizi sonuçları ile literatür de bulunan mevcut yöntemlerle elde edilen sonuçlarının karşılaştırılması için nanoçubuğun uzunluğu 1 nm olarak kabul edilmiştir. Hasar boyutunu temsil eden parametre $\Psi = 0,1144$, hasarın ayırdığı uzunlukların gerçek nanoçubuğun uzunluğuna oranları $\delta_1 = 0,2002$ ve $\delta_2 = 0,7998$, yerel olmayan elastisite parametresi $\gamma = 0$, yay parametrelerinden biri $S_0 = 1000$ ve diğer yay parametresi $S_L = 0$ değerleri verilen hasarlı nanoçubuk konsol gibi davranmıştır. Yapılan analiz

sonucunda çıkan sonuçlar Çizelge 5.1'de verilmiştir. Bu çalışmalarda, sonsuz serinin ilk 50 terimi kullanılmıştır.

Çizelge 5.1.Konsol gibi davranan hasarlı nanoçubuk için karşılaştırma.

| λ_1 | Hsu ve vd.(2011) | Bu Çalışmada |
|-------------|------------------|--------------|
| 1 | 1.4278 | 1.4264 |
| 2 | 4.5576 | 4.5136 |
| 3 | 7.8540 | 7.9106 |

Çizelge 5.1.'de ki karşılaştırma sonucunda, önerilen yöntemde bulunan sonuçların literatürdeki çalışmada bulunan sonuçlara çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Bu nedenle önerilen yöntemin doğruluğu ispat edilmiştir.

5.1.4.2.Hasarlı nanoçubuğun sayısal sonuçları ve değerlendirmeleri

Bu bölümde, çeşitli sayısal örnekler çözülerek, çubuğun uçlarında bulunan yay parametrelerinin, eksenel titreşim frekanslarına etkisi araştırılmıştır.

Birinci örnekte, hasarı temsil eden parametre $\Psi = 0,1144$, hasar sonucunda ikiye ayrılan çubukların uzunlukların ilk uzunluğa oranları $\delta_1 = 0,2002$ ve $\delta_2 = 0,7998$, yerel olmayan elastistie parametresi $\gamma = 0$, yay parametrelerinden birisi $S_0 = 1000$ ve $S_L = 0,1,2,3,\dots,10$ gibi artan değerler aldığı kabulü sonucunda, hasarlı nanoçubuğun eksenel titreşim frekanslarının analizi yapılmıştır. Yapılan analiz sonucunda bulunan eksenel titreşim frekansları Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.2. $\Psi=0.1144$, $\delta_1= 0,2002$, $\delta_2= 0,7998$, $\gamma= 0$, $S_0=1000$ olan hasarlı nanoçubuğun aksenal titreşim frekansları.

| λ S_L | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $S_L=1$ | 1.8811 | 4.7303 | 8.0478 | 11.5780 | 15.2758 |
| $S_L=2$ | 2.1303 | 4.9155 | 8.1763 | 11.6737 | 15.3530 |
| $S_L=3$ | 2.2869 | 5.0694 | 8.2943 | 11.7650 | 15.4279 |
| $S_L=4$ | 2.3935 | 5.1961 | 8.4011 | 11.8512 | 15.5000 |
| $S_L=5$ | 2.4702 | 5.3005 | 8.4969 | 11.9319 | 15.5691 |
| $S_L=6$ | 2.5278 | 5.3870 | 8.5824 | 12.0071 | 15.6349 |
| $S_L=7$ | 2.5725 | 5.4595 | 8.6586 | 12.0768 | 15.6975 |
| $S_L=8$ | 2.6081 | 5.5206 | 8.7264 | 12.1412 | 15.7568 |
| $S_L=9$ | 2.6372 | 5.5726 | 8.7868 | 12.2006 | 15.8127 |
| $S_L=10$ | 2.6612 | 5.6174 | 8.8408 | 12.2554 | 15.8655 |

İkinci örnekte, hasarlı nanoçubuğun hasar boyutunu temsil eden parametre, yerel olmayan elastisite parametresi ve yay parametrelerden biri önceki örnekteki gibi $\Psi =0,1144$, $\gamma= 0$ ve $S_0=1000$, hasarlı nanoçubuğun hasarlı çubukların uzunlukları ilk çubuğun oranları $\delta_1= 0,3$ ve $\delta_2= 0,7$, yay parametrelerinden diğeri $S_L=0,1,2,3,\dots,10$ gibi değerler aldığı kabul edilen hasarlı nanoçubuğun aksenal titreşim frekansları incelenmiştir. İncelemeler sonucunda, bulunan sonuçlar Çizelge 5.3 'de verilmiştir.

Çizelge 5.3. $\Psi = 0,1144$, $\delta_1 = 0,3$, $\delta_2 = 0,7$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1000$ olan hasarlı nanoçubuğun aksenal titreşim frekansları.

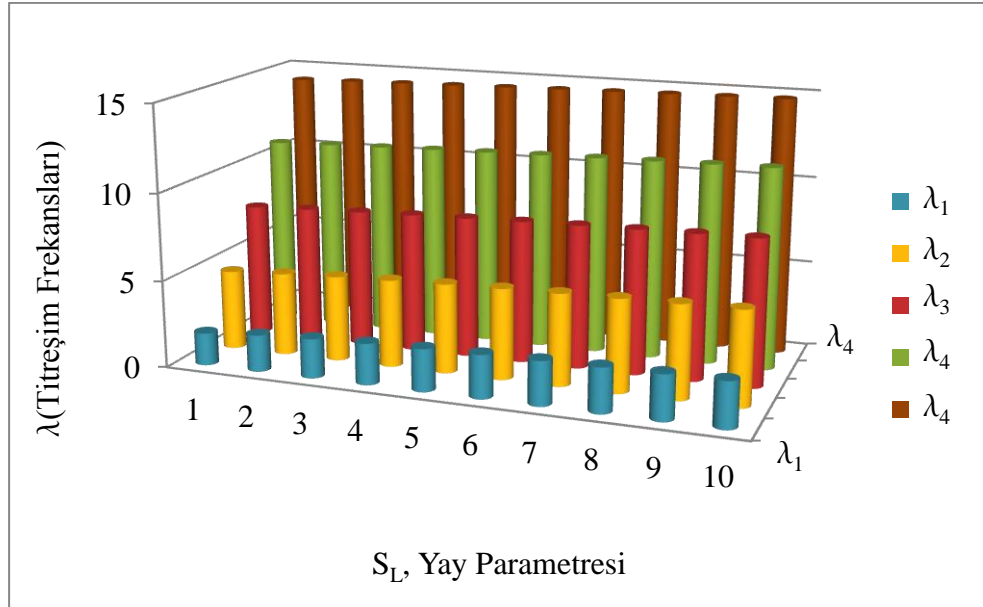
| λ S_L | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $S_L = 1$ | 1.8989 | 4.9051 | 8.4931 | 12.5557 | 18.8367 |
| $S_L = 2$ | 2.1549 | 5.0981 | 8.6269 | 12.6719 | 18.9107 |
| $S_L = 3$ | 2.3171 | 5.2597 | 8.7507 | 12.7846 | 18.9826 |
| $S_L = 4$ | 2.4282 | 5.3938 | 8.8636 | 12.8933 | 19.0522 |
| $S_L = 5$ | 2.5085 | 5.5052 | 8.9658 | 12.9976 | 19.1193 |
| $S_L = 6$ | 2.5690 | 5.5982 | 9.0577 | 13.0969 | 19.1838 |
| $S_L = 7$ | 2.6161 | 5.6764 | 9.1402 | 13.1914 | 19.2457 |
| $S_L = 8$ | 2.6538 | 5.7428 | 9.2143 | 13.2811 | 19.3048 |
| $S_L = 9$ | 2.6845 | 5.800 | 9.2807 | 13.3660 | 19.3613 |
| $S_L = 10$ | 2.7100 | 5.8485 | 9.3405 | 13.4464 | 19.4151 |

Üçüncü örnekte, ikinci örnektekinden farklı olarak hasarlı çubukların uzunluklarının hasarsız çubuğun uzunluğuna oranı olan $\delta_1 = 0,4$ ve $\delta_2 = 0,6$ olduğu kabulü ile diğer parametreler aynı olan hasarlı nanoçubuğun titreşim frekansları araştırılmıştır. Bu problemde, $\Psi = 0,1144$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1000$ ve $S_L = 0,1,2,3,\dots,10$ alınmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, elde edilen sonuçlarla Çizelge 5.4'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. $\Psi = 0,1144$, $\delta_1 = 0,4$, $\delta_2 = 0,6$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1000$ olan hasarlı nanoçubuğun aksenal titreşim frekansları.

| λ S_L | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $S_L = 1$ | 1.9209 | 5.1022 | 9.0323 | 16.5885 | 20.9428 |
| $S_L = 2$ | 2.1850 | 5.3025 | 9.1815 | 16.6700 | 21.0091 |
| $S_L = 3$ | 2.3538 | 5.4716 | 9.3222 | 16.7493 | 21.0742 |
| $S_L = 4$ | 2.4701 | 5.6132 | 9.4538 | 16.8259 | 21.1378 |
| $S_L = 5$ | 2.5547 | 5.7317 | 9.5760 | 16.8995 | 21.1999 |
| $S_L = 6$ | 2.6187 | 5.8313 | 9.6892 | 16.9700 | 21.2601 |
| $S_L = 7$ | 2.6687 | 5.9156 | 9.7941 | 17.0374 | 21.3184 |
| $S_L = 8$ | 2.7087 | 5.9875 | 9.8913 | 17.1015 | 21.3748 |
| $S_L = 9$ | 2.7415 | 6.0492 | 9.9818 | 17.1623 | 21.4292 |
| $S_L = 10$ | 2.7688 | 6.1027 | 10.0664 | 17.2199 | 21.4816 |

Dördüncü örnekte, Hasarlı nanoçubuğun, $\Psi = 0,1144$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1000$ ve $S_L = 0,1,2,3,\dots,10$ gibi değerler aldığı ve hasarlı çubukların uzunlukları ilk hasar öncesi çubuğun uzunluğuna oranları $\delta_1 = 0,1$ ve $\delta_2 = 0,9$ kabul edilmesi sonucunda, hasarlı nanoçubuğun aksenal titreşim frekansları incelenmiştir. Yapılan incelemelerde, bulunan sonuçlar Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



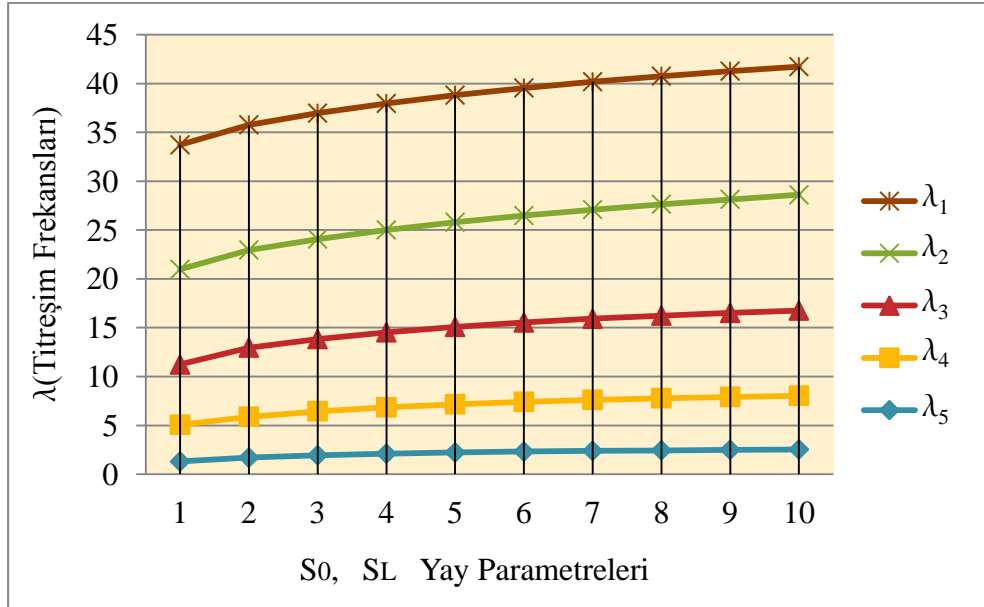
Şekil 5.2. $\Psi=0,1144$, $\delta_1=0,1$, $\delta_2=0,9$, $\gamma=0$, $S_0=1000$ olan hasarlı nanoçubuğun λ eksenel titreşim frekansları.

Beşinci örnekte, hasarlı nanoçubuğun hasarı temsil eden parametresi $\Psi=0,1144$ ve yerel olmayan elastisite parametresi $\gamma=0$, yay parametreleri $S_0=1,2,3,\dots,10$ ve $S_L=0,1,2,3,\dots,10$, hasarlı olan çubukların uzunluklarının ilk çubuk uzunluğuna oranı $\delta_1=0,2$ ve $\delta_2=0,8$ kabul edilen hasarlı nanoçubuğun eksenel titreşim frekansları araştırılmıştır. Yapılan araştırmalar sonucunda, elde edilen değerler Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.5. $\Psi=0,1144$, $\delta_1= 0,2$, $\delta_2= 0,8$, $\gamma= 0$, $S_0=1,2,3,\dots,10$ ve $S_L=0,1,2,3,\dots,10$ olan hasarlı nanoçubuğun aksenal titreşim frekansları.

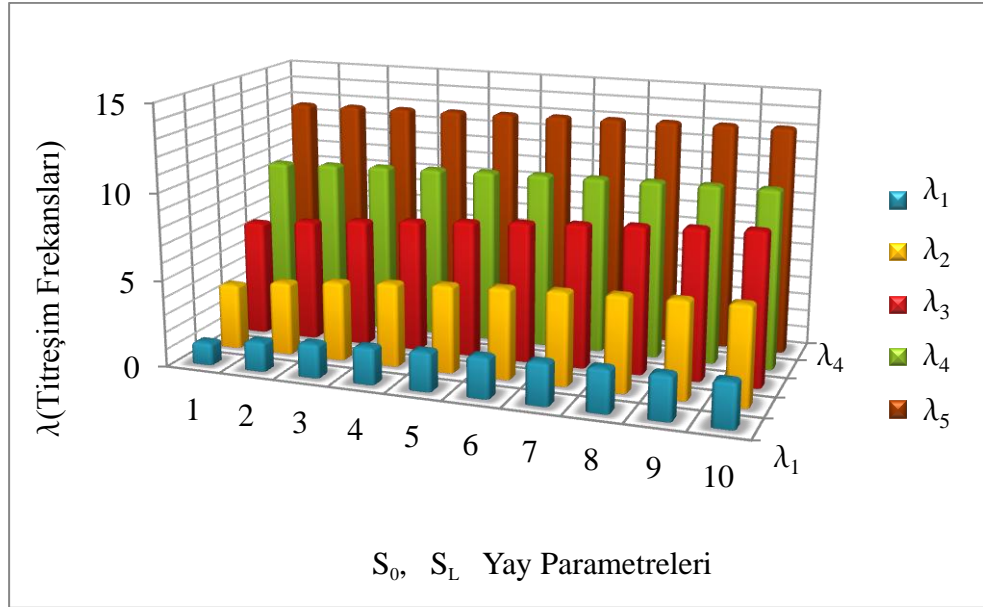
| λ $S_0=S_L$ | λ_1 | λ_2 | λ_3 | λ_4 | λ_5 |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $S_0=S_L=1$ | 1.2923 | 3.7371 | 6.7115 | 9.7810 | 12.8769 |
| $S_0=S_L=2$ | 1.6837 | 4.1335 | 7.0510 | 10.0812 | 13.1143 |
| $S_0=S_L=3$ | 1.9186 | 4.4243 | 7.3349 | 10.3594 | 13.3585 |
| $S_0=S_L=4$ | 2.0780 | 4.6464 | 7.5718 | 10.6114 | 13.6057 |
| $S_0=S_L=5$ | 2.1937 | 4.8210 | 7.7705 | 10.8361 | 13.8514 |
| $S_0=S_L=6$ | 2.2815 | 4.9615 | 7.9383 | 11.0344 | 14.0908 |
| $S_0=S_L=7$ | 2.3505 | 5.0767 | 8.0812 | 11.2087 | 14.3196 |
| $S_0=S_L=8$ | 2.4061 | 5.1727 | 8.2040 | 11.3617 | 14.5339 |
| $S_0=S_L=9$ | 2.4518 | 5.2537 | 8.3104 | 11.4963 | 14.7312 |
| $S_0=S_L=10$ | 2.4900 | 5.3230 | 8.4031 | 11.6151 | 14.9100 |

Altıncı örnekte, hasarlı nanoçubukların uzunluklarının ilk nanoçubuğun uzunluğuna oranları $\delta_1= 0,3$ ve $\delta_2= 0,7$, hasarı temsil edilen parametre $\Psi=0,1144$, yerel olmayan elastisite parametresi $\gamma= 0$, yay parametreleri $S_0=1,2,3,\dots,10$ ve $S_L=0,1,2,3,\dots,10$ olan hasarlı nanoçubuğun aksenal titreşim frekansları analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları olan aksenal titreşim frekansları Şekil 5.3'te gösterilmiştir.



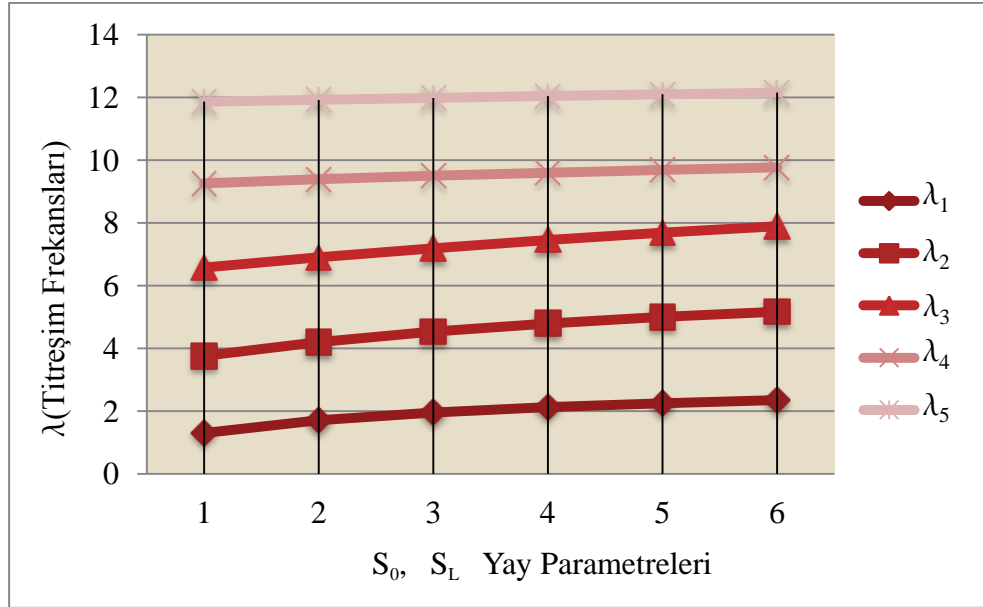
Şekil 5.3. $\Psi = 0.1144$, $\delta_1 = 0.3$, $\delta_2 = 0.8$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1, 2, 3, \dots, 10$ ve $S_L = 0, 1, 2, 3, \dots, 10$ olan hasarlı nanoçubuğun λ aksenal titreşim frekansları.

Yedinci örnekte ise hasarlı nano çubuğun farklı parametrelerde analizi yapılmıştır. Bu problemde söz konusu parametreler $\Psi = 0.1144$, $\delta_1 = 0.4$, $\delta_2 = 0.6$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1, 2, 3, \dots, 10$ ve $S_L = 0, 1, 2, 3, \dots, 10$ değerlerini aldığı kabulü yapılmıştır. Analiz sonucunda çıkan sonuçlar Şekil 5.4'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. $\Psi=0,1144$, $\delta_1=0,4$, $\delta_2=0,6$, $\gamma=0$, $S_0=1,2,3,\dots,10$ ve $S_L=0,1,2,3,\dots,10$ olan hasarlı nanoçubuğun λ eksenel titreşim frekansları.

Sekizinci örnekte, yerel olmayan elastisite parametresine sabit bir değer verilmesi sonucunda hasarlı nanoçubuğun eksenel titreşim frekansları araştırılmıştır. Bu problemde parametreler $\Psi=0,1144$, $S_0=1,2,3,\dots,10$ ve $S_L=0,1,2,3,\dots,10$ bir önceki örnekteki gibi değerler aldığı kabul edilmiştir. Hasarlı çubukların uzunluklarının ilk nanoçubuğun uzunluğuna oranları $\delta_1=0,4$ ve $\delta_2=0,6$, yerel olmayan elastisite parametresi $\gamma=0,03$ olan hasarlı nanoçubuğun eksenel titreşim frekansları incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, elde edilen değerler Şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. $\Psi = 0,1144$, $\delta_1 = 0,4$, $\delta_2 = 0,6$, $\gamma = 0$, $S_0 = 1,2,3,\dots,10$ ve $S_L = 0,1,2,3,\dots,10$ olan hasarlı nanoçubuğun λ aksenal titreşim frekansları.

Yukarıda incelenen hasarlı nanoçubuklarda, yay parametreleri ile aksenal titreşim frekansları arasındaki etkileşim araştırılmıştır. Yapılan tüm bu araştırmalar neticesinde, yay parametrelerinin artırılması sonucunda, aksenal titreşim frekansları da doğrusal olmayan bir şekilde arttığı tespit edilmiştir.

6.SONUÇLAR

Bu çalışmada, ilk önce klasik elastisite teorisi kullanılarak, elastik zemine oturan bir çubuğun rijit olmayan sınır şartları için aksel titreşim frekanslarının bulunması ile ilgili matematiksel bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel yöntemde, modal titreşim fonksiyonu olarak Fourier sinüs serilerinden yararlanılmıştır. Ayrıca sınır koşullarının düzeltilmesi ve seçiminde esneklik sağlanması için Stokes' dönüşümünden faydalanılmıştır. Daha sonra 2×2 'lik ve sonsuz serilerden meydana gelen katsayılar matrisi oluşturulmuştur. Bu katsayılar matrisinin öz değerleri bulunması ile aksel titreşim frekansları elde edilmiştir. Önerilen bu yöntem, hem rijit hem de rijit olmayan sınır koşullarının mevcut olması durumlarında bile kullanılabilir.

İkinci olarak da, yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak, elastik zemine oturan bir nanoçubuğun rijit olmayan sınır koşulları için aksel titreşim frekanslarının bulunması ile ilgili matematiksel bir yöntem geliştirilmiştir. Her iki yöntemde de elastik zemini yaylar ile modelleyen Winkler zemin modeli kullanılmıştır. Ayrıca nanoçubuğun her iki ucunda da yaylarla bağlı olduğu varsayılmıştır. Bu yöntemde, modal titreşim fonksiyonu, Fourier serilerinden yararlanılarak bulunmuştur. Stokes' dönüşümü yapılarak sınır koşullarında, gerekli düzeltme ve seçimin de esneklik sağlanmıştır. Bu işlemlerden sonra 2×2 'lik ve sonsuz serilerden oluşan katsayılar matrisi elde edilmiştir. Bu katsayılar matrisinin öz değerleri bulunarak, aksel titreşim frekansları bulunmuştur.

Üçüncü olarak da, hasarlı bir nanoçubuğun aksel titreşim frekansları bulunması ile ilgili matematiksel bir yöntem geliştirilmiştir. Modal titreşim fonksiyonu olarak Fourier sinüs serisinden yararlanılmıştır. Sınır koşullarının düzeltilmesi için Stokes' dönüşümünden faydalanılmıştır. Daha sonra katsayılar matrisi oluşturulmuştur. Bu katsayılar matrisinin öz değerleri bulunarak, nanoçubuğun aksel titreşim frekansları hesaplanmıştır. Bu yöntem kullanılarak herhangi bir sınır koşulunda hasar tespiti yapılabilecektir.

Bütün çözülen örneklerden görüleceği gibi sınır koşulları, aksel titreşim frekanslarını doğrudan etkilemektedir. Sınır koşullarında bulunan yay parametreleri arttırıldığı zaman, aksel titreşim frekanslarında doğrusal olmayan bir şekilde arttığı gözlenmiştir.

İleride çalışma yapacak araştırmacılara, kendi çalışmalarını karşılaştırabileceği düşünülerek, bu çalışmada tablolar % 0,1 hassasiyeti ile hazırlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Akbaba, M., “Elastik zemine oturan çelik lif donatılı ve çelik hasır donatılı beton plakların sayısal analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2006).
- Akgöz, B., “Yüksek mertebeden elastisite teorileriyle mikro ve nano yapıların doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya(2010).
- Akkurt, F.G, “Elastik zemine oturan doğru ve daire eksenli çubukların dinamik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Hatay(2006).
- Aköz, A.Y., and Kadioglu, F., “Elastik zemine oturan doğru ve daire eksenli kirişlerin karışık sonlu eleman çözümü” *INFO Teknik Dergi*, 101:1373-1395 (1997).
- Aksencer, T., “Yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak nano plakların statik ve dinamik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne(2010).
- Aluç, A., “Elastik zemine oturan iki yapıya sh dalgası etkimesi durumunda yapı-zemin-yapı etkileşim problemi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(2007).
- Arı, O., Görgün, A.R., Kaya, A., Çoşkun, Ö., Kaya, İ., “Karbon nanotüp malzeme ile tasarlanan heliks antenlerin performans parametrelerinin incelenmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 2(4): 1-7(2012).
- Avcar, M., “Elastik zemin üzerinde bulunan homojen olmayan elastik kirişin stabilite ve titreşimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta (2007).
- Avcar, M., “Elastik zemin üzerinde bulunan her iki ucu ankastre mesnetli rastgele ve sürekli homojen olmayan kirişin serbest titreşimi,” *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 1(1): 33-38 (2010).
- Avcar, M., “Free Vibration Analysis of Beams Considering Different Geometric Characteristics and Boundary Conditions,” *International Journal of Mechanics and Applications*, 4: 94-100 (2014).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Attarnejad, R., Shahba, A., Jandaghi Semnani, S., “Application of differential transform in free vibration analysis of Timoshenko beams resting on two-parameter elastic foundation”, *The Arabian Journal for Science and Engineering*, 35(2B):125–132 (2010).
- Aydogdu, M. “Axial vibration of the nanorods with the nonlocal continuum rod model,” *Physica E*, 41: 861-864 (2009).
- Aydogdu, M., “Axial vibration analysis of nanorods (carbon nanotubes) embedded in an elastic medium using nonlocal elasticity,” *Mechanics Research Communications*, 43: 34-40(2012).
- Ayvaz, Y. and Oguzgan, K., “Application of modified Vlasov model to free vibration analysis of beams resting on elastic foundations,” *Journal of Sound and Vibration*, 255(1): 111-127 (2002).
- Akyol, A., “Elastik zemin üzerine oturan kirişlerin yönetici denklem ve sap2000 analiz programı ile karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale (2007).
- Bahçıvan, A., and Karadağ, V., “Elastik zemin üzerindeki çubuk uygulamalarının serbest ve nondoğrusal titreşim analizi” *İTÜ Dergisi/d*, 4(4): 51–61 (2005).
- Badr, E.D.S.I, “Behavior of Continuous Beams on Elastic Foundations Under Different Conditions of Loadings”, *University of Illinois at Urbana*, Champaign(1964).
- Bald, W.B., “Introduction to the Theory of Beams on Elastic Foundations”, *Draftsmen's & Allied Technicians' Association*(1964).
- Bartul, Z., Trenor,J.,“Advances in Nanotechnology”, *Nova Science Publishers*, New York(2011).
- Beni, Y.T.,Jafari,A.Razavi,H., “Size Effect on Free Transverse Vibration of Cracked Nano-beams using Couple Stress Theory,” *International Journal of Engineering*, 28(2): 296-304 (2015)
- Benoit, D.,Bresse, J.F.,Dack, L.V.,Werner, H.,Wernisch, J.,“Microbeam and Nanobeam Analysis”,*Springer-Verlag*, New York(1996).
- Berg, G.V, “A Method of Stiffness Coefficients for The Beam on an Elastic Foundation”, *The University of Michigan*, Michigan(1958).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Bilgin, E.,“Elastik zemine oturan daire eksenli kirişler için taşıma matrisi ve uygulamalar”,Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2007).
- Binns, C.,“Introduction to Nanoscience and Nanotechnology”, *John Wiley & Sons, Inc*, New York(2010).
- Bozdoğan, K. B., Sezer, A., and Aklık P., “Elastik zemine oturan kirişlerin taşıma matrisi yöntemi ile birinci ve ikinci mertbe statik ve stabilite analizi,” *S.Ü. Müh.-Mim. Fak. Derg.*, 19(1): 39-48 (2004).
- Broekhuizen, W., “Stiffness Coefficients for a Beam Element on an Elastic Foundation”, *University of Texas at Arlington*, Arlington(1972).
- Carroll, W.T., “Continuous Beams on Elastic Foundation”, *Vanderbilt University*, Nashville(1969).
- Chang, S., “Infinite Beams on an Elastic Foundation”, *University of Missouri at Rolla*, Rolla(1965).
- Chattopadhyay, K.K.,Banerjee, A.N., “Introduction To Nanoscience And Nanotechnology”,*PHI Learning Private Limited*, New Delhi(2009).
- Chez, E.L., “Beam on Elastic Foundation as a Model for Certain Contact Problems”, *Northwestern University*, Evanston(1974).
- Chung, R.A., “Bending of a Constrained Circular Beam on an Elastic Foundation”, The author, U.S.A.(1953).
- Civalek, Ö., “Elastik zemine oturan kirişlerin noro-fuzzy tekniği ile analizi,” *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Yedinci Ulusal Kongresi, Yıldız Teknik Üniversitesi*, :250-259 (1998).
- Civalek, Ö., “Elastik zemine oturan yapıların hesap yöntemlerine genel bir bakış,”*Türkiye Mühendislik Haberleri*, 432: 45-52 (2004a).
- Civalek, Ö., “Elastik zemine oturan plakların doğrusal olmayan analizi,” *Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi*, 432: 45-54 (2004b).
- Civalek, Ö., “Winkler elastik zemine oturan dairesel plakaların geometrik bakımdan doğrusal olmayan dinamik analizi,” *Journal of Engineering and Natural Sciences Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 2006/1: 56–66 (2005).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Civalek, Ö., and Ülker, M., “Polinomal diferansiyel quadrature(PDQ) ve sonlu farklar(SF) metod çifti ile elastik zemine oturan dikdörtgen plakların geometrik bakımdan doğrusal olmayan analizi,” *İMO Teknik Dergi*, 246: 3739-3760 (2006).
- Civalek, Ö., and Demir, Ç., “Elastik zemine oturan kirişlerin ayrık tekil konvolüsyon ve harmonik diferansiyel quadrature yöntemleriyle analizi,” *BAÜ FBE Dergisi*, 11(1): 56–71 (2009).
- Clastornik, J., “Beams on Variable Elastic Foundation”, *Technion-Israel Institute of Technology*, Haifa(1986).
- Contreras, M.L., Benitez, E., Alvarez J., Rozas R., “Algorithm for nanotubes computer generation with different configurations”, *Algorithms*, 2: 108-210(2009).
- Cooley, E.J.,“ Parametric Study of Beams on Elastic Foundations for Various Loadings”, *University of Tennessee at Chattanooga*, Chattanooga(1992).
- Coşkun, I., “Non-linear vibrations of a beam resting on a tensionless Winkler foundation,” *Journal of Sound and Vibration*, 236(3): 401-411 (2000).
- Çelebi, K., Keleş, İ., and Tütüncü, N., “Homojen olmayan çubuğun zorlanmış titreşim analizi için kapalı-form çözümleri,” *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 27(4): 753-763 (2012).
- Çıracı, S., “Metrenin bir milyarda biri”, *Bilim ve Teknik Dergisi*, (2005)
- Develi, A.G, “Elastik zemin üzerine oturan timoshenko kirişinde titreşim problemi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2007).
- Doğan, O., “Elastik zemin üzerine oturan kirişler”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (1993).
- Doshi, S.N., “Beams of Nonuniform Cross Section on Elastic Foundation”, *Ohio State University*, Columbus(1976).
- D'Souza, F.,“Fullerenes, Nanotubes, and Carbon Nanostructures - 213th ECS Meeting, 14. sayı”, *The Electrochemical Society*, Pennington(2008).
- Duman, T.,“Elastik zemine oturan radye temellerin hesabı”,Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(2008).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Düzgün, M., “Elastik zemine oturan sürekli temellerin kuvvet yöntemi ile analizi ve sayısal hesabı için geliştirilen bilgisayar programı” *DEÜ FBE Dergisi*, 3(3): 33-50 (2001).
- Ebbesen, T.W.,“Carbon Nanotubes: Preparation and Properties”, *CRC Press*, London(1997).
- Editors of Scientific American,“Understanding Nanotechnology”,*Grand Central Publishing*, New York(2002).
- Eisenberger, M., “Vibration frequencies for beams on variable one-parameter and two-parameter elastic foundations,” *Journal of Sound and Vibration*, 176(5): 577-584 (1994).
- Elishakoff, I.,“Carbon Nanotubes and Nanosensors: Vibration, Buckling and Ballistic Impact”, *Wiley*, New York(2012).
- Endo, M., Iijima,S.,“Carbon Nanotubes”,*Elsevier*(1996).
- Erkoç, Ş.,“Karbon nanoyapılar” *Bilim ve Teknik Dergisi*, (398): 46-51 (2001).
- Frederick, G.B,“ The Influence of Secondary Effects on Beams on Elastic Foundations and Vibrating Beams”, *Virginia Polytechnic Institute*, Blacksburg(1954).
- Fulekar, M.H., “Nanotechnology: Importance and Applications”, *I.K International Publishing House Pvt. Ltd*, New Delhi(2010).
- Graza, W.D.L., “Matrix Analysis of Beams on Elastic Foundation”, *California State University*, Sacramento(1970).
- Grigoriu, M. and Khater, M., “Finite Difference Analysis of Stochastic Beams on Elastic Foundation”, *Department of Structural Engineering, Cornell University*, Ithaca(1985).
- Güler, S., “Elastik zemine oturan çelik tel donatılı beton plakların deneysel analizi ve sayısal sonuçlarla karşılaştırmalar”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2007).
- Hayes, D.R., “Buckling of Beams on an Elastic Foundation”, *North Carolina State University*, Raleigh(1976).
- Hetenyi, M. , “Beams on elastic foundation”, *University of Michigan Press*, Michigan(1946).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Hızal, Ç., “Elastik zemin üzerine oturan kirişlerin zorlanmış titreşimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir (2012).
- Hornyak, G.L., Tibbals,H.F., Dutta,J., Moore,J.J.,“Introduction to Nanoscience and Nanotechnology”, *Taylor & Francis*, London(2009).
- Hsu, C.M.,“Beams on One-way Elastic Foundations”, *Kansas State University*, Kansas(1970).
- Hsu, J.C., Lee, H.L., Chang, W.J., “Longitudinal vibration of cracked nanobeams using nonlocal elasticity theory,” *Elsevier BV*, 11 (6): 1384-1388 (2011).
- Işık, Ç., “Nano ve mikro yapıların yerel olmayan elastisite teorisi ile eğilme ve titreşim hesabı”, Yüksek Lisans Tezi, *Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Antalya (2011).
- Işık, H., “Çift duvarlı karbon nanotüplerin bir ucu ankastre diğer ucu yaylı durumunda çözümünün incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2013).
- Jr.Poole, C.P., Owens, F.J. “Introduction to Nanotechnology”, *John Wiley & Sons, Inc*, New York(2003).
- Jones, G., Jones, M. “Analysis of Beams on Elastic Foundations”, *Telford*, London(1997).
- Jones, M., “Analysis of Beams on Elastic Foundations: Using Finite Difference Theory”, *Thomas Telford*, London(1997).
- Kao, R.K.C, “Beams on Non-linear Elastic Foundation”, *University of South Carolina*, Columbia(1968).
- Kapoor, M.“Advances in Nanotechnology”, *Oxford Book Company*, Hindistan(2012).
- Karaşin, A.H., Ö., and Gülkan, P., “Elastik zeminlere oturan plakların sonlu ızgara yöntemi ile yaklaşık çözümü,” *İMO Teknik Dergi*, 293: 4445-4454 (2008).
- Karkare, M., “Nanotechnology: Fundamentals and Applications”, *I.K International Publishing House Pvt. Ltd*, New Delhi(2008).
- Karličić, D.,Jovanović, D., Kozíć, P., Čajić,M., “Thermal and magnetic effects on the vibration of a cracked nanobeam embedded in an elastic medium,” *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 10 (1): 43-62 (2015).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Kılıç, V.,“Elastik zemine oturan dikdörtgen plakların titreşimleri”,Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(2006).
- King, V.B.,“Nanotechnology Research Advances”,*Nova Science Publishers*, New York(2007).
- Kişin, E., “Elastik zemine oturan çelik lif ve çelik hasır donatılı beton plakların mekanik davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2006).
- Koç, M.B., “Nanotüpler”, Bitirme Tezi, *Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü*, Ankara (2003).
- Kösegil, A.,“Yerel olmayan elastisite teorisinde açı ve ritz yöntemlerinin nanoteknolojiye uygulanması”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(2010).
- Kumar, B.M., and Sujith, R.I., “Exact solutions for the longitudinal vibration of non-uniform rods,” *Journal of Sound and Vibration*, 207(5): 721-729 (1997).
- Kurt, E.L, Medikonda,M.,“Understanding the Nanotechnology Revolution”,*Wiley*, New York(2012).
- Kutlu, E., “Elastik zemine oturan çelik lif donatılı beton plakların deneysel analizi ve genel bir değerlendirme”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2007).
- Kutucu, B., “Nanoteknoloji ve çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2010).
- Kuyumcu, Z.,“Elastik zemine oturan kablolu köprülerin stokastik analizi”,Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon(2011).
- Küçüyıldırım, B.O., Akdoğan,Eker, A., “Karbon nanotüpler, sentezleme yöntemleri ve kullanım alanları”, *TMMOB MMO Mühendis ve Makina Dergisi*, 53(630): 34-44(2012).
- Lai, Y.C., “Dynamic Response of Beams on Elastic Foundation”, *University of Missouri*,Columbia(1990).
- Leissa, A.W., Qatu, M.S., “Vibration of Continuous Systems”, *McGraw Hill*, Yeni Delhi (2011).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Lin, K.K., “Bending of a Constrained Circular Beam on an Elastic Foundation”, *Kansas State University*, Kansas(1970a).
- Lin, K.K., “Beams on One-way Elastic Foundations”, *Kansas State University*, Kansas(1970b).
- Liu, T. W.,“ A Generalized Beam on Elastic Foundation Model for Fracture Studies”, *University of Hong Kong*, Pok Fu Lam(1988).
- Loya, J., Puente, J. L., Zaera, R., Sáez, J. F., “Free transverse vibrations of cracked nanobeams using a nonlocal elasticity model,” *Journal of Applied Physics*, 105, 044309 (2009).
- Maddox, D., “Nanotechnology”, *Blackbirch Press*, Woodbridge(2005).
- Mahler, E., Seiler, D.,“Carbon Nanotube and Nanocomposite Research”, *Nova Science Publishers*, New York(2011).
- Melerski, E.S., “Design Analysis of Beams, Circular Plates and Cylindrical Tanks on Elastic Foundations”, *A.A.Balkema*, Rotterdam(2000).
- Menceloğlu, Y., Kırca, M.,“ Uluslararası Rekabet Stratejileri:Nanoteknoloji ve Türkiye, TÜSİAD Rekabet Stratejileri Dizisi 11 ”, *TÜSİAD*, İstanbul(2008).
- Meshgin, Q., “Beam on Elastic Foundation”, *University of Southwestern Louisiana*, Louisiana(1974).
- Meyyappan, M.,“Carbon Nanotubes: Properties and Applications”, *CRC Press*, London(2004).
- Mohammad, A.,“Nanotechnology”, *Lap Lambert Academic Publishing GmbH KG*(2011).
- Morris, J.E., Iniewski, K.,“Graphene, Carbon Nanotubes, and Nanostructures: Techniques and Applications”, *CRC Press*, London(2013).
- Nakamoto, T.A., “Deflections of a Beam on an Elastic Foundation”, *California State University*, Long Beach(1976).
- Nugent, G., “Beams and Circular Plates on Elastic Foundation”, *Trinity College*, Dublin(1975).
- O’Connell, M.J., “Carbon Nanotubes: Properties and Applications”, *CRC Press*, London(2006).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Orkov, G. and Saxenhofer, H.,“Beams on Elastic Foundation”, *California Department of Water Resources*, Sacramento(1967).
- Oruçoğlu, K., “Yerel olmayan elastisite de çatlak problemi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(1991).
- Özdemir, Ö.,“Elastik zemine oturan kirişlerin sonlu titreşimi”,Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(2009).
- Özgan, K., and Daloğlu, A.T., “Elastik zemine oturan kalın plaklar için kayma kilitlenmesiz bir sonlu eleman modeli,” *İMO Teknik Dergi*, 346: 5341-5358 (2011).
- Özgan, K., Daloğlu A.T.,, "Elastik zemine oturan plaklar için etkili zemin derinliği", *Antalya Yöresinin İnşaat Mühendisliği Sorunları Kongresi*, :635-647 (2005).
- Pentaras, D.,“Vibration, Buckling and Impact of Carbon Nanotubes”, *Florida Atlantic University*, Boca Raton(2009).
- Pilkey, W.D, “Analysis and Design of Elastic Beams: Computational Methods”, *John Wiley & Sons, Inc*, New York(2002).
- Pradeep, T.,“Nano: The Essentials”,*McGraw-Hill*, Yeni Delhi(2007).
- Ramsden, J., “Nanotechnology: An Introduction”, *Access Online via Elsevier*, Waltham(2011).
- Ramsden, J., “Essentials of Nanotechnology”, *Ventus Publishing,Bookboon.com*, Londra(2009).
- Rao, S.S., “Vibration of continuous systems”, *John Wiley and Sons Ltd*, New York (2007).
- Ray, K.C.,“ Beams on Elastic Foundation”, *Orient Longmans*, Haydarabad(1966).
- Saito, R., Dresselhaus, G., Dresselhaus. M.S.,“Physical Properties of Carbon Nanotubes”, *Imperial College Press*, Londra(1998).
- Schodek, D.L., Ferreira, P., Ashby,M.F., “Nanomaterials, Nanotechnologies and Design: An Introduction for Engineers and Architects”, *Butterworth-Heinemann*, Burlington(2009).
- Selvadurai, A. P. S., “Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction”, *Elsevier Science*, Amsterdam(1979).
- Sevi, A.H., “Nanoteknolojide karbon nanotüplerin dayanıklılık simülasyonları”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2006).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Seyman, M.C., “Çift duvarlı karbon nanotüplerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2010).
- Seyis, F.,“Elastik zemine oturan deprem etkisindeki kalın plakların parametrik incelenmesi”,Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon(2010).
- Singh, K.V., “Transcendental inverse eigenvalue problems in damage parameter estimation,” *Journal Mechanical Systems and Signal Processing*, 23(6): 1870-1883(2009).
- Sirmen, E., “Tek ve çift duvarlı karbon nanotüpte eğilme”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2010).
- Smith, T. E. and Herrmann, G., “Stability of a Beam on an Elastic Foundation Subjected to a Follower Force”, *Defense Technical Information Center*, Fort Belvoir(1972).
- Sofiyev, A.H., Avcar, M., Ozyigit, P., Adigozel, S., “The Free Vibration of Non-Homogeneous Truncated Conical Shells on a Winkler Foundation, ” *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(1): 34-41 (2009).
- Sofiyev, A.H., Avcar, M., “The Stability of Cylindrical Shells Containing a FGM Layer Subjected to Axial Load on The Pasternak Foundation,” *Engineering*, 2:228-236 (2010).
- Sönmezeleş, M.,“Elastik zemine oturan daire eksenli kirişlerin taşıma matrislerinin bulunması için bir sayısal yöntem”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2007).
- Stekel, A., “Analysis of Circular Cross Section Beams on Elastic Foundation”, *Technion-Israel Institute of Technology*, Haifa(1992).
- Şahin, A., “Karbon nanotüplerin burkulma yüklerinin hesabı için yaklaşık yöntem”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2010).
- Şahinkaya, Y.,“Elastik zemine oturan düzgün yayılı yük etkisindeki kalın plakların parametrik incelenmesi”,Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon(2010).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Seçkin, T.C.,“Elastik zemine oturan bir kirişin simetrik olmayan yükleme altındaki harmonik titreşimleri”,Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(2007).
- Şık, D.,“Değişken derinlikli iki parametrelili elastik zemine oturan plaklar”,Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(2010).
- Tanaka, K., Iijima. S.,“Carbon Nanotubes and Graphene”, *Elsevier*, Amsterdam(2014).
- Tanyi, G.E., “Beams Partially Constrained by Elastic Foundations”, *Illinois Institute of Technology*,Chicago(1962).
- Tchoul, M.N.,“Composites of Carbon Nanotubes”, *ProQuest LLC*, Ann Arbor(2008).
- Tepe, A., “Nanoteknolojide nano ölçekteki yapıların yerel olmayan elastisite çerçevesinde incelenmesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2007).
- Tetik, E., “Karbon nanotüplerin fiziksel özellikleri üzerine katkılamanın etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana (2012).
- Timoshenko, S.P., “Vibration Problems in Engineering”, *D. Van Nostrand*, Princeton, NJ (1937).
- Timp, G.L.,“Nanotechnology”, *Springer-Verlag*, New York(1999).
- Torbacki, W. and Buczkowski, R.,“ Finite Element Analysis of Beams and Plates on Elastic Foundation”, *Omniscryptum GmbH & Company Kg.*,Saarbrücken(2014).
- Tserpes, K.I., Silvestre,N., “Modeling of Carbon Nanotubes, Graphene and their Composites”, *Springer*, Berlin(2014).
- Tsudik, E. “Analysis of Beams and Frames on Elastic Foundation”, *Trafford Publishing*, Bloomington(2006).
- Tsudik, E. “Analysis of Structures on Elastic Foundations”, *Ross, J. Publishing*, U.S.A.(2012).
- Tuma, J.J. and Alberti, G., “Static Parameters of Beams on Elastic Foundation”, *Birkhauser Basel*, Zürich(1970).
- Turan, M.,“Elastik zemine oturan sonsuz uzun elastik kirişin hareketli yük altında dinamik davranışı”,Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon(2012).

KAYNAKLAR(Devam ediyor)

- Vajtai, R., “Nanotechnology, 5118. cilt”, *Spie*, Bellingham(2003).
- Varadan, V.K., “Nanoscience and Nanotechnology in Engineering”, *World Scientific*, Singapur(2010).
- Varma, A. “Nanotechnology: Uses and Applications”, *Icfai University Press*, Hindistan (2012).
- Vlasov, V.Z., Barouch, A., Leontev, N.N., “Beams, plates and shells on elastic foundations”, *Israel Program for Scientific Translations* Kudüs(1966).
- Weberg, S.E., “Frequency Analysis of a Curved Beam on Elastic Foundation”, *Norges tekniske høyskole, Institutt for statikk*, Geilo(1969).
- Winkler, E., “Die Lehre von der Elastizität und Festigkeit”, Prague, (1867).
- Yanık, F., Yaylı, M.Ö., “Rijit olmayan sınır koşullarında elastik zemine oturan bir çubuğun aksenal titreşim analizi”, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (1): 35-44(2015)
- Yaylı, M.Ö., “Yerel olmayan elastisite teorisine göre nano ölçekteki kirişlerin doğrusal olmayan teoriye göre incelenmesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(2010).
- Yaylı, M.Ö., “Weak formulation of finite element method for nonlocal beams using additional boundary conditions”, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 8 (11): 2173-2180(2011a)
- Yaylı, M.Ö., “Stability analysis of a gradient elastic beam using finite element method”, *Journal of Vibration and Control*, 6(12): 2844-2851(2011b)
- Yaylı, M.Ö., “On the axial vibration of carbon nanotubes with different boundary conditions”, *Micro & Nano Letters*, 9(11):807-811(2014a)
- Yaylı, M.Ö., “Free Vibration Behavior of a Gradient Elastic Beam with Varying Cross Section”, *Shock and Vibration*, 2014(2014b).
- Yaylı, M.Ö., “A compact analytical method for vibration analysis of single-walled carbon nanotubes with restrained boundary conditions”, *Journal of Vibration and Control*, 2014(2014c).
- Yazıcı, E., “Elastik zemine oturan timoshenko kirisinin sonlu elemanlar yöntemiyle elastoplastik analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul(2009).

Yeşilce, Y.,“Yatak katsayısı değişken elastik zemine kısmi gömülü kazıkların serbest titreşim analizleri”,Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir(2004).

Zhang, Q.,“Carbon Nanotubes and Their Applications”, *Pan Stanford Publishing Pte.Ltd.*, Singapore(2012).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Fatma YANIK
Doğum Yeri ve Tarihi : Bilecik- 30.04.1982



Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : İnşaat Mühendisliği
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce
Bilimsel Faaliyetleri : Nano teknoloji

İş Deneyimi

Stajlar : Büro ve ulaşım
Projeler : Betonarme
Çalıştığı Kurumlar : Bilecik Belediyesi, Bilecik İl Afet ve Acil Durum
Mdürlüğü, Bilecik İl Özel İdaresi.

İletişim

Adres :Bilecik İl Özel İdaresi
Tel : 02282121099
E-Posta Adresi : ftmyank@gmail.com

Akademik Çalışmaları

- Yanık, F., Yaylı, M.Ö., “Rijit Olmayan Sınır Koşullarında Elastik Zemine Oturan Bir Çubuğun Eksenel Titreşim Analizi” *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (1): 35-44(2015)

Yabancı Dil Bilgisi

İngilizce

Tarih:...../...../.....