T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKIŞKAN TAŞIYAN BORULARIN DİNAMİĞİ

SEÇKİN FİLİZ

DOKTORA TEZİ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Tez Danışmanı: PROF. DR. METİN AYDOĞDU

EDİRNE- 2017

KABUL ve ONAY SAYFASI

SEÇKİN FİLİZ'in hazırladığı "AKIŞKAN TAŞIYAN BORULARIN DİNAMİĞİ" başlıklı tez, tarafımızca okunmuş, kapsam ve niteliği açısından Makine Mühendisliği Anabilim Dalında bir Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri: İmza

Prof. Dr. Metin Aydoğdu .....

Prof. Dr. Taner Timarcı .....

Prof. Dr. Mustafa Özcan .....

Doç. Dr. Erol Türkeş .....

Yrd. Doç. Dr. Güler Gaygusuzoğlu .....

Tez Savunma Tarihi: 07/12/2017

Bu tezin Doktora tezi olarak gerekli şartları sağladığını onaylarım.

İmza

Prof. Dr. Metin Aydoğdu .....
Tez Danışmanı

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitü onayı

.....
Prof. Dr. Murat Yurtcan
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

T.Ü. FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ DOKTORA PROGRAMI
DOĞRULUK BEYANI

Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tüm verilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini, kullanılan verilerde tahrifat yapılmadığını, tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını, kullanılan tüm literatür bilgilerinin bilimsel normlara uygun bir şekilde kaynak gösterilerek ilgili tezde yer aldığını ve bu tezin tamamı ya da herhangi bir bölümünün daha önceden Trakya Üniversitesi ya da farklı bir üniversitede tez çalışması olarak sunulmadığını beyan ederim.

07 /12 / 2017

Seçkin Filiz

Doktora Tezi

Akışkan Taşıyan Boruların Dinamiği

T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

ÖZET

Bu çalışmada, akışkan taşıyan boruların dinamik davranışları incelenmiştir. Bu kapsamda akışkan taşıyan boruların farklı sınır koşullarındaki serbest titreşimleri ve bu borularda dalga yayılımı problemleri araştırılmıştır. Hareket denklemleri, Hamilton Prensibi kullanılarak elde edilmiştir. Akışkan taşıyan borular çubuk ve kiriş olarak modellenmişlerdir. Boru, malzeme özellikleri izotrop ve fonksiyonel derecelendirilmiş olarak kabul edilmiştir. Dalga yayılımı, akışkan taşıyan tek ve birbirine bağlı karbon nanotüpler için yapılmıştır. Akışkan taşıyan boruların dinamiği farklı malzemeler ve ölçekler (makro ve nano) için incelenmiştir. Borunun enine titreşiminde, tek boru için inceleme yapılmıştır. Enine titreşim durumunda, hareket denklemlerinin çözümünde Sonlu Farklar Yöntemi kullanılmıştır. Boru geometrisi ve akışkanın hızı gibi etkilerin titreşim ve dalga yayılımındaki karakterleri incelenmiştir. Ayrıca, akışkan taşıyan boruların enine titreşimi analizinde, ısıl etkiler de dikkate alınmıştır. Boyuna titreşimde ise, Green fonksiyonları kullanılarak çözüm gerçekleştirilmiştir.

Yıl : 2017

Sayfa Sayısı : 111

Anahtar Kelimeler : akışkan taşıyan boruların titreşimi, dalga yayılımı, sonlu farklar yöntemi, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, nanotüpler.

Doctoral Thesis

Dynamics of Pipes Conveying Fluid

Trakya University Institute of Natural Sciences

Mechanical Engineering

ABSTRACT

In this study, dynamics of fluid conveying pipes have been studied. The vibration of fluid conveying pipes at different boundary conditions and the wave propagation problems were investigated. Equations of motion were obtained by using the Hamiltonian Principle.Fluid conveying pipes were modeled by using rod and beam models. Isotropic and functionally graded material properties have been considered. Wave propagation has been investigated for fluid conveying single and double nanotubes. In case of vibration, Finite Differences Method is used to solve equation of motion. Different materials and scales (nano and macro) were examined. In the tranverse vibration of the pipe, a single pipe is used. Finite Differences Method is used to solve equation of motion. The character of vibration and wave propagation on the effects of pipe geometry and velocity of the fluid flow are investigated. In addition, thermal effects were also taken into account in the analysis of the transverse vibration of the fluid conveying pipes. In longitudinal vibration, solution was realized by using Green functions.

Year : 2017

Number of Pages : 111

Keywords : vibration of fluid conveying pipes, wave propagation, finite differences method, functionally graded materials, nanotubes.

İÇİNDEKİLER

Önsöz v

Şekil Listesi vi

Çizelge Listesi x

Sembol Listesi xi

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Problem ve Önemi 1

1.2. Önceki Çalışmalar 2

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 5

BÖLÜM 2. EULER BERNOULLİ KİRİŞ TEORİSİ KULLANILARAK AKIŞKAN TAŞIYAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ BORULARIN HAREKET DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

2.1. Giriş 7

2.2. Fonksiyonel Derecelendirme 7

2.3. Akışkan Taşıyan Boruların Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi 11

BÖLÜM 3. AKIŞKAN TAŞIYAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MAKRO VE NANO ÖLÇEKTEKİ TÜPLERDE DALGA YAYILIMI

3.1. Giriş 14

3.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Makro Tüplerde Dalga Yayılımı 15

3.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Birbirine Yayla Bağlı Nanotüplerde Dalga Yayılımı . 18

BÖLÜM 4. AKIŞKAN TAŞIYAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ BORULARIN TİTREŞİMİ

4.1. Giriş 20

4.2.Akışkan Taşıyan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Boruların Eksene Dik Yönde (Enine) Titreşimi 20

4.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemede Sıcaklığın Etkisi 23

4.4. Sonlu Farklar Metodu. 24

BÖLÜM 5. AKIŞKAN TAŞIYAN BORULARIN BOYUNA TİTREŞİMİ
5.1. Giriş 29
5.2. Akışkan Taşıyan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Boruların Eksen Yönünde (Boyuna) Titreşimi 30

BÖLÜM 6. SAYISAL SONUÇLAR
6.1. Akışkan Taşıyan Boruların Dalga Yayılımı Sonuçları 31
6.1.1. Doğrusal-doğrusal malzeme değişiminin olduğu tüpte dalga yayılımı 34
6.1.2. Üstel malzeme değişiminin olduğu tüp 47
6.2. Akışkan Taşıyan Boruların Enine Titreşimi Sonuçları 50
6.3. Sıcak Akışkan Taşıyan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Boruların Eksene Dik Yönde (Enine)Titreşimi için Sayısal Sonuçlar 75
6.4. Akışkan Taşıyan Boruların Eksen Yönünde (Boyuna) Titreşimi Sonuçları 82

BÖLÜM 7. GENEL SONUÇLAR 84
KAYNAKLAR 86
EK 93
ÖZGEÇMİŞ 94
TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER 95

ÖNSÖZ

Çalışmalarımda, her türlü katkıyı benden esirgemeyen ve üzerimdeki emeklerini asla ödeyemeyeceğimhem akademik hem de insani olarak kendisinden ne kadar bahsetsem kelimeler yetişmeyecek olan, kendisinin öğrencisi olmaktan şeref duyduğum çok saygıdeğer hocam Prof. Dr. Metin AYDOĞDU'ya en içten teşekkürü bir borç bilirim.

Uzun ve yorucu geçen çalışmalarım esnasında, hak ettiği zamanı kendisinden esirgemek zorunda kaldığım, akademik çalışmalarım esnasındamanevi desteğini her zaman hissettiren, motivasyonumu daima ayakta tutan ve bu zor yolculukta benimle beraber yürüyüp, bana yol arkadaşlığı yapan sevgili eşim Dr. Ayşe Nihan BASMACI FİLİZ'e ne kadar teşekkür etsem az kalır.

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Akışkan taşıyan fonksiyonel derecelendirilmiş borunun yandan görünüşü 7

Şekil 2.2. Çubuk (a) ve Kiriş (b) geometrisi 9

Şekil 2.3. Akışkan taşıyan boruda akışkan hızı 11

Şekil 3.1. Enine (a) ve boyuna (b) santrifüj döküm …. 14

Şekil 3.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişin Elastisite Modülünün η üsteline göre değişimi 15

Şekil 3.3. Akışkan taşıyan fonksiyonel derecelendirilmiş boru. 16

Şekil 3.4. Birbirine yayla bağlı akışkan taşıyan FD borular. 16

Şekil 3.5. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Birbirine Yayla Bağlı Nanotüpler 19

Şekil 4.1. Akışkan taşıyan boru. 20

Şekil 4.2. Akışkan taşıyan tek borunun görünüşü 21

Şekil 4.3. Birbirine yayla bağlı akışkan taşıyan iki tüp 22

Şekil 4.5. Fonksiyonel derecelendirilmiş sıcak akışkan taşıyan boru 24

Şekil 4.5. Tek tüpte sonlu farklar uygulanması 24

Şekil 4.6. Sonlu Farklar 25

Şekil 4.7. Birbirine yayla bağlı iki tüpün *(A-B)* sonlu farklar ile parçalara ayrılması 25

Şekil 4.8. Sonlu farklar için sınır şartları (a- Ankastre, b- Basit destekli) 26

Şekil 4.9. Yakınsama çalışması 28

Şekil 5.1. Boyuna titreşen akışkan taşıyan boru 29

Şekil 6.1. Değişik durumlarda malzeme derecelendirilmesi 32

Şekil 6.2. Değişik akış durumları 33

Şekil 6.3. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı) ve genlik oranları. $v_1=v_2=0$ m/s(ZZF), Mr:1/1 34

Şekil 6.4. Değişik malzeme parametresinde (Mr) akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı) ve genlik oranı.$v_1=v_2=0$ m/s (ZZF) 35

Şekil 6.5. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı) ve genlik oranı. v_1=-v_2=1000 m/s (RLF) 36
Şekil 6.6a. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı) Mr 1/1,(RRF). 37
Şekil 6.6b. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FDtüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı) Mr:1/1 37
Şekil 6.7. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı). v_1=v_2=0 m/s(ZZF), Mr: 1/1 38
Şekil 6.8. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı),μ– frekans ilişkisi.(Mr : 1/1), k=8x10^8 38
Şekil 6.9. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), μ– frekans ilişkisi. v_1=1000 m/s, v_2= -1000 m/s, k=8x10^8 39
Şekil 6.10. Değişik yay sabitlerinde akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), k– frekans ilişkisi. v_1=v_2= 0 m/s. 39
Şekil 6.11a. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı farklı hızlarda akışkan taşıyan FD nanotüp için Faz hızları. 41
Şekil 6.11b. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için Faz hızları 42
Şekil 6.12. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için grup ve faz hızları 42
Şekil 6.13. Farklı Mr için akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüptefaz hızları. 43
Şekil 6.14. Düşük ve yüksek hızlarda akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı),k=8x10^8 43
Şekil 6.15a. RRF ve RLF durumlarda akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), k=8x10^8 44
Şekil 6.15b. RRF durumda akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı),k=8x10^8 45
Şekil 6.16a. Değişik Mr değerlerinde akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), k=8x10^8 45
Şekil 6.16b. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), Mr:1/1, k=8x10^8 46

Şekil 6.17. Değişik Mr değerlerinde akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), $k=8x10^8$ 46
Şekil 6.18. Mr:5/1 için Lineer ve Üstel durumlar için, akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), $v_1=v_2=0$ m/s ve $k=8x10^8$ 47
Şekil 6.19. Mr:5/1 için Lineer ve Üstel durumlar için, akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için faz ve grup hızları, $v_1=v_2=0$ m/s ve $k=8x10^8$ 48
Şekil 6.20. Mr:5/1 için Lineer ve Üstel durumlar için, akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), RL ve $k=8x10^8$ 49
Şekil 6.21. Mr:5/1 için Lineer ve Üstel durumlar için, akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), RL ve $k=8x10^8$. 49
Şekil 6.22. Fonksiyonel derecelendirilmiş boruda akış 50
Şekil 6.23. Akışkan taşıyan Ankastre - Ankastre (A-A) tüpün ilk 2 modunun kıyaslanması (*β:0.1 - Mr:1/1*)..... 51
Şekil 6.24. A-A tüpün ilk 3 modunun kıyaslanması (*β:0.1 - Mr:1/1*) 52
Şekil 6.25. Değişik malzeme parametrelerinde akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1 - Mr 2/1, β:0.1) 54
Şekil 6.26. Akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu(Mr 1/1, β:0.1) 57
Şekil 6.27. Akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu(Mr 2/1, β:0.1) 58
Şekil 6.28. Akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu(Mr 1/1, β:0.5). 59
Şekil 6.29. Akışkan taşıyan ankastre destekli FD tüpün ilk 3 modu(Mr 1/1, β:0.1)….. 61
Şekil 6.30. Akışkan taşıyan ankastre destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 2/1, β:0.1). 62
Şekil 6.31. Akışkan taşıyan ankastre-basit destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1)..... 63
Şekil 6.32. Akışkan taşıyan ankastre-basit destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 2/1, β:0.1)..... 65
Şekil 6.33. Akışkan taşıyan FD tüpte imajiner kısımlarının ilk 3 modu (β:0.1)..... 66
Şekil 6.34. Değişik β değerleri için akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu 67
Şekil 6.35. Basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1) 68
Şekil 6.36. Akışkan taşıyan basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1, U: 9..... 69

Şekil 6.37. Akışkan taşıyan basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1, U: 4..... 69
Şekil 6.38. Değişik hızlardaakışkan taşıyan basit destekli tüpün ilk modu (Mr 1/1, β:0.1)..... 70
Şekil 6.39. Akışkan taşıyan ankastre-ankastre destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1, U: 10)..... 70
Şekil 6.40. Akışkan taşıyan ankastre-basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1, U: 9)..... 71
Şekil 6.41. Değişik β değerlerinde akışkan taşıyan basit destekli tüpün ilk modu (Mr 1/1, U: 8)..... 71
Şekil 6.42. Değişik β değerlerinde akışkan taşıyan ankastre - basit destekli tüpün ilk modu (Mr 1/1, U: 9) 72
Şekil 6.43. Değişik β değerlerinde akışkan taşıyan ankastre – ankastre destekli tüpün ilk modu (Mr 1/1, U: 9) 72
Şekil 6.44. Akışkan taşıyan ankastre-ankastre destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.5, U: 5)..... 73
Şekil 6.45. Akışkan taşıyan ankastre-basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.5, U: 6)..... 73
Şekil 6.46. Fonksiyonel derecelendirilmiş sıcak akışkan taşıyan A-A boruda titreşim… 75
Şekil 6.47. Fonksiyonel derecelendirilmiş sıcaklığı değişken A-A boruda 3. Modlar… 76
Şekil 6.48. Değişik durumlarda sıcak akışkan taşıyan B-B boruda titreşim..... 77
Şekil 6.49. Sıcaklık farkının FD B-B boruda etkisi 3. Modlar 78
Şekil 6.50. Değişik durumlarda sıcak akışkan taşıyan A-B boruda titreşim. 79
Şekil 6.51. Sıcaklık farkının FD A-B boruda etkisi 3. Modlar..... 80
Şekil 6.52. Değişik durumlarda sıcak akışkan taşıyan B-B borunun yüksek hızlardaki 1. Moddaki titreşimi 81
Şekil 6.53. Değişik a parametrelerinde akışkan taşıyan A-A borunun boyuna titreşimi..... 82
Şekil 6.54. f(t):t iken değişik a parametrelerinde akışkan taşıyan A-A borunun boyuna titreşimi (x:0.5) 82
Şekil 6.55. Farklı f(t) için akışkan taşıyan A-A ve S-S boruların boyuna titreşimi... 83

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1. Malzeme özelliklerinin sıcaklıkla değişimi 26

Çizelge 2. Merkezi Sonlu Farklar ile türev ifadelerinin gösterilişi 29

Çizelge 3. Akışkan taşıyan basit destekli tüpün titreşim frekansları (Mr:1/1 ve β:0.1) 55

Çizelge 4. Akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün titreşim frekansları (Mr:2/1 ve β:0.1) 56

Çizelge 5. Akışkan taşıyan ankastre ankastre destekli tüpün titreşim frekansları (Mr:1/1 ve β:0.1) 60

Çizelge 6. Akışkan taşıyan ankastre basit destekli tüpün titreşim frekansları (Mr:1/1 ve β:0.1). 64

SEMBOL LİSTESİ

A	Çubuk ve kirişin boyuna dik kesit alanı
A_{11}	Uzama rijitliği
B_{11}	Birleşme rijitliği
D_{11}	Eğilme rijitliği
E	Elastisite Modülü
F	Eksene dik yöndeki kuvvet
f(t)	Akışkan hızı değişimi
h	Sonlu Farklar yönteminde adım sayısı
I	Atalet momenti
k	Dalga sayısı
K	Kinetik enerji
L	Kirişin boyu
M	Moment
N	Kuvvet
m_f	Akışkan kütlesi
m_p	Borunun kütlesi
n	Sonlu Farklar yönteminde düğüm sayısı
P	Sıcaklıkla değişen malzeme parametresi
q	Düşey yöndeki düzgün yayılı yük
t	Zaman
u	Çubukta eksenel yer değiştirme
U	Boyutsuz hız parametresi
Us	Genleme Potansiyel Enerjisi
x, y, z	Kartezyen koordinatlar
v	Akışkan hızı
V	Hacim
Vd	Dış kuvvetlerin işi
Vk	Kesme kuvveti

w	Kirişte düşey yöndeki yer değiştirme
α	Boyutsuz yay katsayısı
δ	Varyasyon sembolü
Δ	Fark sembolü
ε	Genleme
μ	Yerel olmayan (nonlokal) elastisite parametresi
η	Derecelendirme üsteli
ρ	Yoğunluk
σ	Gerilme
ω	Dairesel frekans

Kısaltmalar

A-A	Ankastre-Ankastre destek
A-S	Ankastre-Serbest destek
B-B	Basit-Basit destek
Exp.	Üstel
FD	Fonksiyonel Derecelendirilmiş
KNT	Karbon Nanotüp
Lin.	Lineer (doğrusal)
Mr	Malzeme parametresi
RLF	Sağ – Sol Akış
RRF	Sağ – Sağ Akış
RZF	Sağ – Sıfır Akış
S-S	Serbest-Serbest destek

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Tez çalışmasının bu bölümü, üç alt başlıktan oluşmaktadır. Birinci başlıkta çalışmada incelenen problem ve önemi açıklanmakta, ikinci başlıkta konu ile ilgili literatürde mevcut daha önce yapılmış çalışmalar detaylandırılmaktadır. Üçüncü başlıkta da çalışmanın amacı ve kapsamı üzerinde durulmaktadır.

1.1.Problem ve Önemi

Bu çalışmada, akışkan taşıyan fonksiyonel derecelendirilmiş boruların titreşim ve dalga yayılımı davranışı incelenecektir. Öncelikle hareket denklemleri ve sınır şartları Hamilton Prensibi kullanılarak çıkarılacak, hareket denkleminin çözümü için sonlu farklar yöntemi kullanılacaktır.

Akışkan taşıyan borularla ilgili çalışan sistemler, konut ve kimyasal tesisat proseslerininin tasarım ve optimizasyonu, jeotermal kaynaklardan çıkan suyun taşınması, doğalgaz ve petrol boru hatları gibi birçok teknolojik uygulamada görülmektedir. Ayrıca, kanın damarda akışı ve bitkilerde su taşınması da örnek olarak verilebilir. Dolayısıyla bu sistemlerin anlaşılabilmesi için içinden akışkan geçen, boruların dinamiği önemli bir konudur.

1.2. Önceki Çalışmalar

Akışkan taşıyan borular pek çok aygıtta kullanılmaktadır. Bu uygulamalara örnek olarak moleküler eleme (Kim, Moldovan & Espinosa, 2005), hidrolik sensörler (Longhurst & Quirke, 2007), nanopipetler (Gao, 2002), akışkan filtre aygıtları (Che, Lakhsmil, Fisher & Martin, 1998), ilaç üretim tesislerive nanokimyada krom emdirme mekanizmaları (Wang, 2010) verilebilir.

1971 yılından itibaren, akışkan taşıyan borular üzerinde çalışılmış ve bu çalışmalar milat olarak kabul edilmiştir (Paidoussis & Denise, 1971). Daha sonraki yıllarda, akışkan taşıyan kirişlerinin titreşimi hakkında bir çalışma yapılmıştır (Reddy & Wang, 2004). Bu çalışmada, Hamilton prensibi kullanılarak Euler Bernoulli ve Timoshenko kirişine ait hareket denklemleri de elde edilmiştir.

Akışkan taşıyan borular kullanım alanlarına göre farklı malzemelerden yapılmaktadır. Özellikle ısıl sistemlerde fonsiyonel derecelendirilmiş (FD) malzemeler son yıllarda tercih edilmeye başlanmıştır. Fonksiyonel Derecelendirilmiş malzemeler, son yılların önde gelen malzemelerinden olmuştur. Bu malzemelerde bileşenlerin hacim oranına göre, malzeme özellikleri bir noktadan diğer bir noktaya sürekli olarak değişmektedir. Bu malzemeler kullanılarak, katmanlı kompozit malzemelerdeki arayüz geçişleri sürekli hale getirilmiştir. FD malzemeler, iyi fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle, triboloji, jeoloji, elektronik, biyomekanik, mikro ve nano teknoloji gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır. FD malzemelerin mikro ve nanoteknoloji ile tanışması sayesinde, fiziksel özellikleri çok iyi olan, mikro/nano aygıtlar üretilmiştir (mikro/nano elektromekanik sistemler, şekil hafızalı ince tabakalı alaşımlar ve atomik kuvvet mikroskobu gibi). Fonksiyonel Derecelendirilmiş kirişler için yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak, nonlineer serbest titreşimi incelenmiştir (Nazemnezhad & Hosseini-Hashemi, 2014). Ayrıca, Ebrahimi ve Salari (2015), Fonksiyonel Derecelendirilmiş nanokirişlerin termal (ısıl) etkiler altındaki titreşimlerini çalışmışlardır.

Aydoğdu ve Taşkın (2007), FD makro-kirişlerin serbest titreşimini ele almışlardır. Euler-Bernoulli FD nanokirişi için varyasyonel formülasyonu Barretta R. vd., 2015) tarafından elde edilmiştir. Koizumi ve Suresh (1993), fonksiyonel

derecelendirilmiş malzeme fikrini ilk olarak ortaya atan Japon bilim insanlarıdır. Birkaç malzeme kullanılarak toz metalürjisi yardımıyla Fonksiyonel Derecelenmiş Malzeme üretimi yapmışlardır. Akışkan taşıyan FD boruların titreşimi ve dalga yayılımı konusu ile ilgili Dinamik Katılık Metodu ve hibrit metot kullanılarak, çözümler yapılmıştır (Deng, Liu Y., Zhang & Liu W., 2017). Bu çalışmalarda, malzeme özellikleri borunun kalınlığı boyunca değişmektedir (FD). Ayrıca, akışkan taşıyan mikro-ölçekli borularda dalga yayılımı da incelenmiştir (Deng, Liu Y. & Liu W., 2017).

Elastisite Modülünün yüksek olması ve yarı-iletken olarak kullanılabilmesinden dolayı, Poli kristal SiGe (poli-Si) MEMS (mikro-elektronik mekanik sistem) yapısında sıkça kullanılan bir elemandır. Bununla beraber, düşük bir gerilme elde edebilmek için yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyar (> 800°C). (Witvrouw, A. & Mehta, A., 2005) Bu yapılara örnek olarak, mürekkep enjektörleri, minyatür mekanik anahtarlar, ivme sensörleri vb. verilebilir.

Sheng ve Wang (2017), FD silindirik kabukların nonlineer karakteristik özellikleri Galerkin Metodu kullanılarak araştırmışlardır. Bu çalışmada, yük termal olarak alınmıştır. Nanoparçacık taşıyan FD borunun nonlineer titreşimi ve stabilite özellikleri yine Galerkin Metodu kullanılarak incelenmiştir (Raminnea M. vd., 2016). Buradaki çalışmanın amacı, optimum tasarım sağlamaktır (burkulma ve kararsızlıkları incelemek).

Chen ve Jian (2017), akışkan taşıyan eksenel fonksiyonel derecelendirilmiş mikro-borularda Galerkin Metodu kullanılarak enine titreşime bakmışlardır. Ayrıca, bu çalışmaya ek olarak, borunun dönme ve burkulma davranışları incelenmiştir (Min, Wang & Liu, 2016)

Akışkan taşıyan fonksiyonel derecelendirilmiş mikro-kabuklarda titreşim ve dinamik stabilite (kararlılık) davranışları çalışılmıştır (Ansari, Gholami, Norouzzadeh & Sahmani, 2015). Bu problemin çözümünde, Navier tipi çözüm metodu kullanılmıştır. Bu çalışmada, farklı modlardaki doğal frekansların akışkan hızı, derecelendirme özelliği gibi değişkenlere bağlı olduğu gösterilmiştir (Min Z. vd., 2016). Demir (2012), yüksek lisans çalışmasında ankastre düşey bir borunun titreşimini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak ele almıştır.

Karbon nanotüplerin keşfedilmesinin ardından, bu konuda yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmıştır (Iijima, 1991). Hatta 2017 yılı itibariyle, Sumio Iijima'nın bu

çalışması 40000'in üzerinde atıf almıştır. Bu sayede kiriş modelleri de nano ölçekte karbon nanotüp kabul edilerek çözümlenebilmiştir. Akışkan taşıyan nanotüplerde dalga yayılımı, araştırılmıştır (Yoon, Ru & Mioduchowski, 2006). Bu çalışmada, akışkan taşıyan KNT'lerin titreşim özelliklerini ve kararlılığını analiz etmek için klasik Euler-Bernoulli kiriş (EBB) modeli kullanılmıştır. Elastik bir ortama gömülmüş akışkan taşıyan karbon nanotüplerdeki dalga yayılımı özellikleri Dong, Wang ve Sheng (2007), tarafından araştırılmıştır. Yoon, Ru ve Mioduchowski (2006), akışkan taşıyan karbon nanotüplerin titreşimi üzerine çalışmışlardır. Liang ve Su ise yerel olmayan elastisite etkisindeki akışkan taşıyan tek duvarlı karbon nanotüplerin stabilitesi üzerine çalışmışlardır. Reddy, 2007 yılında, yerel olmayan elastisiteyi kullanarak kirişlerde çökme, burkulma ve titreşim analizi yapmıştır. Chang (2012), elastik bir ortama gömülü tek duvarlı bir karbon nanotübün akışkan taşıdığı haldeki titreşimi üzerinde durmuştur.

Elastik ortama gömülü çift duvarlı KNT'lerdeki çeşitli akışkan hızdaki dalga yayılımının frekans değişimleri, Arani ve Amir (2013), sıvı taşıyan çift cidarlı nanotüplerdeki frekans değişimleri ve ölçek etkisi karakteristikleri, Wang, Li ve Kishimoto (2010), tarafından araştırılmıştır.

Farklı akışkan hızlarında Timoshenko kirişinin frekans değeri analiz edilmiştir (Zhang, 2013). FD akışkan taşıyan tek duvarlı karbon nanotüplerinin dalga yayılımı (Wang, 2010) tarafından incelenmiştir.

Yerel olmayan elastisite teorisi kapsamında Eringen (1983), makalesinde yerel olmayan elastisite kavramını ortaya koymuştur. Bu kavrama göre, komşu noktaların etkileşimi de göz önüne alınmaktaydı. Aksencer ve Aydoğdu (2011) yerel olmayan elastisite kullanarak nanoplaklardaki titreşimi incelemişlerdir. Ayrıca, Uymaz (2013), yerel olmayan elastisite kullanarak, fonksiyonel derecelendirilmiş kirişlerin zorlanmış titreşimini incelemiştir.

Akışkan taşıyan boruların titreşiminin yaklaşık çözümünü elde edebilmek için yapılan çalışmalardan en kayda değer olanlarından biri Ni, Zhang ve Wang (2011)'de yaptıkları çalışmadır. Bu çalışmada, diferansiyel dönüşüm metodunu kullanarak akışkan taşıyan boruların titreşimini incelemişlerdir. Ayrıca, Lee ve Schultz (2004), pseudospectral metodu uygulayarak Mindlin plakları ve Timoshenko kirişinin özdeğer analizini gerçekleştirmiştir.

Literatürde, akışkan taşıyan borular kiriş gibi modellenmektedir. Kirişlerin yönetici denklemleri Reddy'e göre formüle edilmiştir (Reddy & Wang, 2004).Yerel olmayan elastisite teorisine göre referans bir noktadaki gerilme, yapının her noktasındaki gerinmenin fonksiyonu olarak ilişkilidir (Eringen, 1983). Bu çalışmalara bağlı olarak, dalga yayılımındaki küçük ölçek (nano) etkileri incelenmiştir (Q Wang, 2005). Fonksiyonel derecelendirilmiş nanotüplerin dalga yayılımı ilgili literatürde az yayın bulunmaktadır. Bu bağlamda, ilk olarak, akışkan taşıyan borunun yönetici denklemleri elde edilecektir. Daha sonra, malzeme özellikleri, dinamik davranış ve ısıl etkiler yönetici denklemlere uyarlanarak çözüm yapılacaktır.

Bu çalışmada, akışkan taşıyan boruların (tüplerin) dinamik davranışları (titreşim ve dalga yayılımı) incelenmiştir. Tüp malzeme parametresi belirlenmiş (malzemenin yoğunluğu ve Elastisite Modülü) ve buna göre Fonksiyonel derecelendirilme formüle edilmiştir. Ayrıca, tek tüpün dışında, tüpler yayla birbirine bağlanarak dalga yayılımı incelenmiştir. İki tüp olarak tasarlanan bu sistemde her tübün içinden akışkanın hızı ve yönü kontrol edilerek veriler değerlendirilmiştir. Enine titreşimde, ısıl farklılıkların malzeme üzerindeki etkileri de göz önünde bulunduran bir bölüme de yer verilmiştir. Eksene dik yönlü (enine) titreşim davranışının yanı sıra, eksen yönünde titreşime sahip olan akışkan taşıyan tüplerdeki titreşim de incelenmiştir. Bu çözüm, Green fonksiyonları kullanılmıştır.

1.3. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Akışkan taşıyan borular, günümüzde teknoloji açısından bir çok alanda kullanılmaktadır. Örneğin, petrol taşıyan borular, su tesisatları, kalorifer tesisatları, ısı değiştiriciler, havalandırma kanalları, otomobillerde egzos boruları, kompresörler ve hatta doğadan örnek vermek gerekirse bitkiler ve kan damarları da sayılabilir. Borunun içindeki akışkan dinamik olarak boru hareketiyle beraber etkileşime girer ve borunun titreşmesine neden olur. Bu çalışmanın amacı, borunun içinden geçen akışkan hızının, malzemenin fonksiyonel değişiminin ve akışkan sıcaklığının etkisiyle, bu sistemin

dinamik davranışının daha iyi anlaşılmasını sağlamaktır. Akışkan taşıyan fonksiyonel derecelendirilmiş borular üzerine yapılmış çalışmalar çok kısıtlıdır. Bu çalışmanın bir diğer amacı ise, literatürdeki bu eksikliği ortadan kaldırmaktır. İncelenecek problemin pek çok mühendislik uygulamasında yeni tasarım ve optimizasyonlara imkân verebileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmada ayrıca, akışkan taşıyan borularda dalga yayılımı yerel olmayan elastisite teorisi kullanılarak incelenecektir. Hızın değiştirilmesi ve yerel olmayan elastisite etkisinin değiştirmesiyle frekans değerlerinin değişiminin incelenmesi amaçlanmaktadır.

Çalışmada, grafiklerin çiziminde MathCAD ve Microsoft Excel programlarından yararlanılmıştır. Çizimlerin yapılmasında ise SolidWORKS ve Microsoft Word programları kullanılmıştır.

BÖLÜM 2

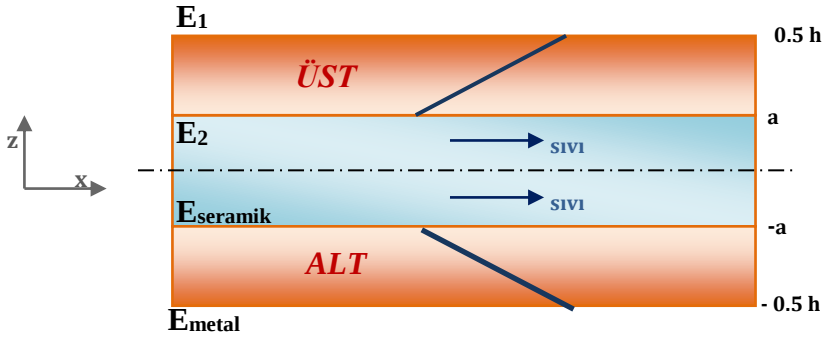
EULER BERNOULLİ KİRİŞ TEORİSİ KULLANILARAK AKIŞKAN TAŞIYAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ BORULARIN HAREKET DENKLEMLERİNİN ELDE EDİLMESİ

2.1. Giriş

Çalışmanın bu bölümünde, iki kısım bulunmaktadır. Birinci kısım'da Euler-Bernoulli kiriş denklemi fonksiyonel derecelendirilmiş borular için çıkarılmakta, ikinci kısım'da akışkan taşıyan fonksiyonel borunun hareket denklemi elde edilmektedir.

2.2. Fonksiyonel derecelendirme

İçinden akışkan geçen boruda, iç kısımdan dış kısma doğru fonksiyonel derecelendirme yapılarak (Şekil 2.1), malzemenin titreşim frekansına etkisi incelenecektir.



Şekil 2.1. Akışkan taşıyan fonksiyonel derecelendirilmiş borunun yandan görünüşü.

Fonsiyonel derecelendirme değişimi doğrusal olarak seçilerek formülasyonu üst kısım ve alt kısım mantığında kurabiliriz. Dolayısıyla üst kısma ayrı, alt kısma ayrı fonksiyon belirlersek ve başlangıçta lineer seçersek:

Üst kısım için fonksiyonu, $E(z) = \gamma z + \Phi$ olarak tanımlarsak ve sınır koşulları eksen çizgisi 0 kabul edilirse: $z(0) = E_2 \ \ ve \ z(0.5h) = E_1$ olur.

Aynı uygulamayı alt kısım için de tanımlarsak ve sınır koşulları eksen çizgisi 0 kabul edilirse: $z(0) = E_2 \ \ ve \ z(-0.5h) = E_1$ olur.

Alt kısım çözülürse:

$$E_1 = \gamma(-0.5h) + \Phi \tag{2.1a}$$

$$E_2 = \gamma(-a) + \Phi \tag{2.1b}$$

elde edilir.

Bu iki denklem birbirinden çıkartılırsa (2.1a ve 2.1b), alt kısım için rijitlik (katılık):

$$\gamma = \frac{E_1 - E_2}{a - 0.5h} \tag{2.2a}$$

$$\Phi = E_1 + 0.5\gamma h \tag{2.2b}$$

elde edilir. Alt kısım için bulunan katsayılar yerine koyulursa:

$$E_{ALT}(z) = \frac{E_1 - E_2}{a - 0.5h}\, z + E_1 + 0.5h\frac{E_1 - E_2}{a - 0.5h} \tag{2.3}$$

Aynı işlemleri üst kısım için de yaparsak, üst kısmın rijitliği:

$$E_{\text{ÜST}}(z) = -\frac{E_1 - E_2}{a - 0.5h}\, z + E_1 + 0.5h\frac{E_1 - E_2}{a - 0.5h} \tag{2.4}$$

elde edilir.

Borunun kalınlığı boyunca malzeme özellikleri değişimini aşağıdaki gibi doğrusal ve üstel olarak kabul edilmiştir, kalınlık boyunca malzeme özelliklerinin (m ve E) değişimini aşağıdaki gibi ifade ederiz:

$$E_q{}^{lin.} = pz + s \ \ ve \ \ m_q{}^{lin.} = pz + s \tag{2.5a}$$

$$E_q{}^{exp.} = \beta_q e^{\delta_q z} \ \ ve \ \ m_q{}^{exp.} = \beta_q e^{\delta_q z} \tag{2.5b}$$

Burada, E ve m, elastisite modülü ve borunun uzunluk başına kütlesidir. (E, m) aynı zamanda (M) olarak da gösterilmektedir ve malzeme özellikleri değişimleri Mr

(E_2/E_1, m_{p2}/m_{p1}) olarak tanımlanmıştır. Lin. ve Exp. doğrusal ve üstel FD boruları ifade etmektedir.

Bulunan fonksiyonal derecelendirme, integrasyon formunda yazılırsa atalet terimlerini içinde barındırır (D_{11}). Elde ettiğimiz bu değer fonksiyonel derecelendirilmiş borunun rijitliğidir ve (2.6a) ve (2.6b)'deki gibi ifade edilir:

$$D_{11} = d \int E_q z^2 \mathrm{dz} \;\; ve \; m_p = \int m_q \mathrm{dz} \tag{2.6a}$$

$q: FD\ malzemenin\ alt\ ve$ üst *kısımları.*

$$D_{11} = d \int_{ALT} E_{ALT} z^2 \mathrm{dA} + d \int_{\ddot{U}ST} E_{\ddot{U}ST} z^2 \mathrm{dA} \tag{2.6b}$$

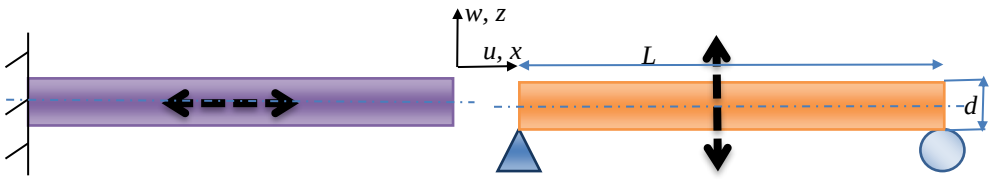
Burada, d: tüp (boru) çapıdır.

(2.6b)'de rijitlik terimi (E I) terimi yerine, (2.7)'de D_{11} koyulursa:

$$D_{11} \frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4} + \left[m_p + m_f\right] \frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} + m_f \left[2v \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial t} + v^2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\right] = 0 \tag{2.7}$$

Akışkan taşıyan Fonksiyonel Derecelendirilmiş bir kirişte enine titreşim denklemi elde edilir.

Çalışmanın bu bölümünde, kiriş için Hamilton Prensibi kullanılarak hareket denklemleri çıkarılacaktır. Bu bölümde Euler Bernoulli Kirişi için hareket denklemleri elde edilecektir. Şekil 2.2'de, L uzunlığunda, d çaplı bir kiriş gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Çubuk (a) ve Kiriş (b) geometrisi.

Euler-Bernoulli kiriş teorisi kapsamında kirişe ait elemandaki bir noktanın yerdeğiştirmesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$u(x,z,t) = u_0(x,t) - z\frac{\partial w}{\partial x} \tag{2.8}$$

$$w(x,z,t) = w_0(z,t) \tag{2.9}$$

Burada, t zaman, u(x,t) eksen yönünde yer değiştirmeyi; w(z,t) ise eksene dik yöndeki yer değiştirmeyi, u_0(x,t) ve w_0(z,t) kiriş orta düzlemindeki bir noktanın eksenel ve düşey yöndeki yer değiştirmelerini göstermektedir. Hareket denklemini elde etmek amacıyla, Hamilton Prensibi aşağıdaki gibi yazılabilir (Liu Z. & Niu J., 2018):

$$\int_0^T [(\delta Us - \delta Vd) - \delta K]dt = 0 \quad (2.10)$$

Burada; Us: genleme potansiyel enerjisi, Vd: dış kuvvetlerin virtüel işi, K:kinetik enerji ve δ varyasyonel semboldür. Kalınlık doğrultusunda fonksiyonel derecelendirilmiş kiriş için kinetik enerji:

$$K = \frac{1}{2}\int_V \rho(z)[\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2]dV \quad (2.11)$$

şeklinde yazılır. Burada, V cismin hacmi, ρ ise kalınlığın fonksiyonu olan yoğunluktur. Denklem (2.8) ve (2.9) (2.11)' de yerine yazılırsa:

$$= \frac{1}{2}\int_0^L [I_1\left(\frac{\partial u_0}{\partial t}\right)^2 + I_1\left(\frac{\partial w_0}{\partial t}\right)^2 - 2I_2\frac{\partial u_0}{\partial t}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial t} + I_3\left(\frac{\partial w_0}{\partial t}\right)^2]dx \quad (2.12)$$

elde edilir. Burada atalet terimleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$(I_1, I_2, I_3) = \frac{1}{2}\int_A \rho(z)[1, z, z^2]dA \quad (2.13)$$

Genleme potansiyel enerjisi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$Us = \frac{1}{2}\int_V \sigma_x \varepsilon_x dV \quad (2.14)$$

$$= \frac{1}{2}\int_0^L [A_{11}\left(\frac{\partial u_0}{\partial x}\right)^2 - 2B_{11}\frac{\partial u_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} + D_{11}\left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\right)^2]dx \quad (2.15)$$

Burada, A_{11} uzama, B_{11} birleşme ve D_{11} eğilme rijitliği olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(A_{11}, B_{11}, D_{11}) = \frac{1}{2}\int_A E(z)[1, z, z^2]dA \quad (2.16)$$

Burada, E(z) kalınlığa bağlı olarak değişen elastisite modülünü göstermektedir. Dış kuvvetlerin işi ise,

$$Vd = \int q(x,t)w(x,t)\,dx \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada, q(x,t):düşey yöndeki yayılı kuvveti gösterir. Enerji ifadeleri (2.10) Hamilton Prensibinde yerine yazılırsa aşağıdaki kalınlık doğrultusunda fonksiyonel derecelendirilmiş kirişe ait hareket denklemleri elde edilir.

$$A_{11}\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - B_{11}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} = I_1\frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} - I_2\frac{\partial^3 w_0}{\partial x \partial t^2} \quad (2.18)$$

$$-B_{11}\frac{\partial^3 u_0}{\partial x^3} - D_{11}\frac{\partial^4 u_0}{\partial x^4} + f(x,t) = I_1\frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2} + I_2\frac{\partial^3 u_0}{\partial x \partial t^2} - I_3\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2 \partial t^2} \quad (2.19)$$

(2.18) ve (2.19) de verilen denklemler kiriş orta düzlemine göre simetrik olmayan malzeme özellikleri dağılımına sahip olan kiriş yapıları için denklem sistemi oluştururlar. Kiriş orta düzlemine göre simetrik malzeme dağılımına sahip kirişler için B_{11} terimi sıfır olup iki denklem birbirinden ayrılır ve bağımsız hale gelir. Bu durumda (2.18) denklemi çubuk hareket denklemi ve (2.19) denklemi ise kiriş hareket denklemi adını alır. Euler Bernoulli Kirişi için sınır koşulları aşağıdaki gibi elde edilir.

Sınır Şartları:

$$N = A_{11}\frac{\partial u_0}{\partial x} - B_{11}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (2.20)$$

$$M = B_{11}\frac{\partial u_0}{\partial x} - D_{11}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \quad (2.21)$$

$$Vk = B_{11}\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - D_{11}\frac{\partial^3 w_0}{\partial x^3} \quad (2.22)$$

$$Yer\ değiştirme, \delta w_0|_0^L = 0 \quad (2.23)$$

Burada, N eksenel kuvvet, M moment ve Vk kesme kuvvetini göstermektedir.

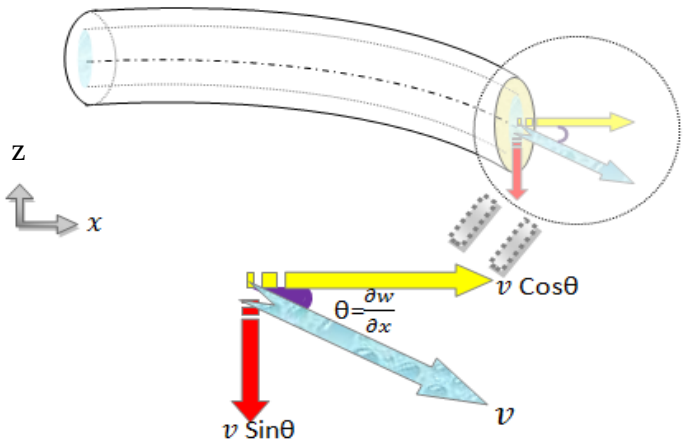
2.3. Akışkan Taşıyan Boruların Hareket Denklemlerinin Elde Edilmesi

(2.24) ve (2.25)'te verilen yerdeğiştirme alanı için birim şekil değişimlerini yazarsak;

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2 - z\left(-\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\right)^2 \quad (2.24)$$

$$\varepsilon^0{}_{xx} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2, \varepsilon^1{}_{xx} = -\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)^2 \quad (2.25)$$

elde edilir.



Şekil 2.3.Akışkan taşıyan boruda akışkan hızı bileşenleri.

Hamilton Prensibi akışkan taşıyan boru için aşağıdaki gibi yazılabilir (Reddy & Wang, 2004).

$$\int_0^T [(\delta Us - \delta Vd) - \delta K]dt = 0 \tag{2.26}$$

Burada, akışkan taşıyan boru için, Us: iç kuvvetlerin virtüel işi (Genleme Enerjisi), Vd: dış kuvvetlerin virtüel işi, K:kinetik enerji olarak adlandırılır. Genleme enerjisi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\delta Us = \frac{1}{2}\int_0^T \int_V [\sigma_{xx}(\delta\varepsilon_{xx}{}^0 + z\delta\varepsilon_{xx}{}^1)]dVdt \tag{2.27}$$

Şekil (2.2) kullanılarak dış kuvvetlerin virtüel işi aşağıdaki gibi yazılır.

$$\delta Vd = \int_0^L \left[q\delta w_0 - m_f v^2 \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}((sin\,\theta)\delta u_0 + (cos\,\theta)\delta w_0) - m_f \frac{\partial v}{\partial t}((cos\,\theta)\delta u_0 - (sin\,\theta)\delta w_0)\right] dx \tag{2.28}$$

Burada v^2 li terim normal kuvvet bileşeni, $\frac{dv}{dt}$ terimi ise teğetsel kuvvet bileşenini göstermektedir. Kinetik enerji aşağıdaki gibi yazılır.

$$\delta K = \int_0^L \int_{A_p} \rho_p \left[\left(\frac{\partial u_0}{\partial t} - z\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial t}\right)\left(\frac{\partial \delta u_0}{\partial t} - z\frac{\partial^2 \delta w_0}{\partial x \partial t}\right) + \frac{\partial w_0}{\partial t}\delta\frac{\partial w_0}{\partial t}\right] dAdx + \int_0^L \int_{A_f} \rho_f \left[\left\{\left(vcos\theta + \frac{\partial \delta u_0}{\partial t}\right) + \left(-vsin\theta + \frac{\partial \delta w_0}{\partial t}\right)\right\} + z^2\left(\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial t}\right)\left(\frac{\partial^2 \delta w_0}{\partial x \partial t}\right)\right] dAdx \tag{2.29}$$

$m_f=0$ ve $v=0$ iken, Euler Bernoulli kirişleri için hareket denklemleri, (2.30a) ve (2.30b)'de görülmektedir.

$$-\frac{\partial N_{xx}}{\partial x}+m_p\frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2}=0 \tag{2.30a}$$

$$-\frac{\partial^2 M_{xx}}{\partial x^2}-\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}N_{xx}\right)+m_p\frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2}+I_p\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^2\partial t^2}=0 \tag{2.30b}$$

Burada, eksenel kuvvet (N_{xx}) ve Moment (M_{xx}) bileşenleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$N_{xx}=E_pA_p\left[\frac{\partial \mathrm{u}_0}{\partial x}+\frac{1}{2}(\frac{\partial w_0}{\partial x})^2\right] \tag{2.31a}$$

$$M_{xx}=-E_pI_p\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \tag{2.32}$$

Eğer, $\theta=-\frac{\partial w_0}{\partial x}$ çok küçük bir yer değiştirme kabul edilirse ve ($cos\theta=1$ ve $sin\theta=\theta$),(2.28) ve (2.29)'da yerine yazılırsa:

$$E_pA_p\left[\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2}+\frac{\partial \mathrm{w}_0}{\partial x}\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\right]-\left[m_p+m_f\right]\frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2}-m_f\frac{\partial v}{\partial t}+m_fv\frac{\partial \mathrm{w}_0}{\partial x}\left[\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial t}+v\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\right]=0 \tag{2.33a}$$

$$E_pI_p\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4}-\left[I_p+I_f\right]\frac{\partial^4 w_0}{\partial t^2\partial x^2}+\left[m_p+m_f\right]\frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2}+m_f\left[\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)+2v\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial t}+v^2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\right]=q \tag{2.33b}$$

elde edilir. (2.33a) ve (2.33b) dönme atalet terimleri ve lineer olmayan terimler ihmal edilirse, akışkan taşıyan borunun Euler-Bernoulli kiriş teorisi kapsamında hareket denklemleri elde edilir.

$$E_pA_p\frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2}-\left[m_p+m_f\right]\frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2}-m_f\frac{\partial v}{\partial t}=0 \tag{2.34a}$$

$$E_pI_p\frac{\partial^4 w_0}{\partial x^4}+\left[m_p+m_f\right]\frac{\partial^2 w_0}{\partial t^2}+m_f\left[\left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)\left(\frac{\partial w_0}{\partial x}\right)+2v\frac{\partial^2 w_0}{\partial x\partial t}+v^2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2}\right]=0 \tag{2.34b}$$

(2.34a)'da akışkan taşıyan çubuğun eksenel titreşimi, (2.26b)'de ise ise akışkan taşıyan kirişin enine titreşimi elde edilmektedir. (2.34b)'deki ilk iki terim sıvı akışından bağımsız katılık ve kütle terimleridir ve akışkan bulunmadığı durum için kiriş hareket denklemidir. Beşinci terim boru eğriliğinden dolayı sıvı akışıyla oluşan terimdir. Dördüncü terim ise akışkanın dönmesinden kaynaklanan terimdir.

Bir sonraki bölümde, (2.34b) kullanılarak, akışkan taşıyan boruların dalga yayılımı denklemleri elde edilecektir.

BÖLÜM 3

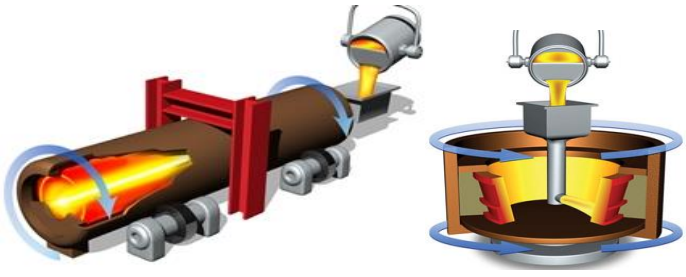
AKIŞKAN TAŞIYAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MAKRO VE NANO ÖLÇEKTEKİ TÜPLERDE DALGA YAYILIMI

Çalışmanın bu bölümünde tek ve birbirine bağlı iki tüpte dalga yayılımı incelenecektir. Ayrıca, yerel olmayan elastisite teorisi de kullanılarak, nanotüplerde dalga yayılımına da bakılacaktır. Bu kapsamda yayınım eğrileri, faz ve grup hızları dalga sayılarına bağlı olarak detaylı biçimde incelenecektir.

3.1. Giriş

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılan kiriş, plak ve kabuklar istenilen yönde malzeme özelliklerinin düzgün dağılımını sağlayabildiği için tercih edilmektedir. Bu üniform dağılım sayesinde, kompozit malzemelerde katmanlar arasındaki süreksiz olan gerilme dağılımları ortadan kaldırır. Bu özelliğinden dolayı, havacılık, otomotiv endüstrisi ve makine elemanlarında kullanılmaktadır.

Bu malzemelerde, derecelendirme daha çok metal ve seramik malzemelerle sağlanmaktadır. Metal malzeme, derecelendirmeye süneklik ve tokluk özelliği sağlarken, seramik malzeme ise, iyi bir ısıl direnç meydana getirmektedir. Bu tarz fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler sinterleme ve santrifüj dökümle elde edilebilmektedir (Şekil 3.1).



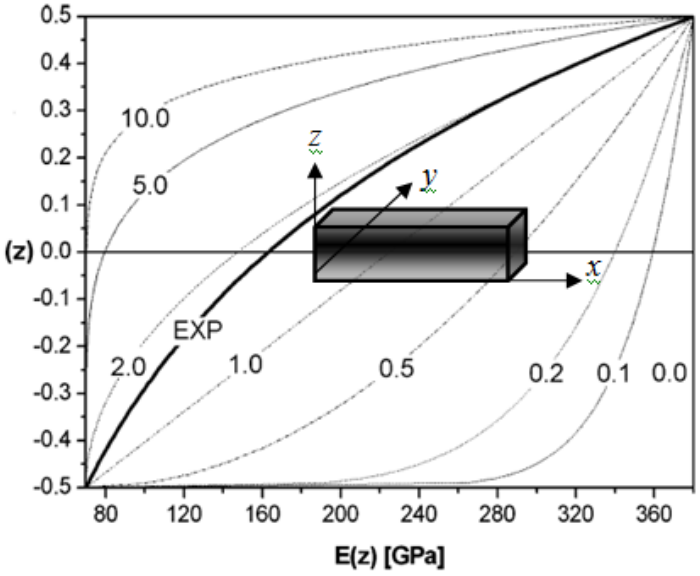
(a) (b)

Şekil 3.1.Enine (a) ve boyuna (b) santrifüj döküm (Chirita Soares & Silva,2008).

Örneğin, fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme içerisinde metal ve seramik bileşenleri bulunduran bir malzemede, elastisite modülü değişimi aşağıdaki gibi yazılabilir (Aydoğdu & Taşkın, 2007):

$$E(z) = (E_m - E_c)\left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^{\eta} + E_c \qquad (3.1)$$

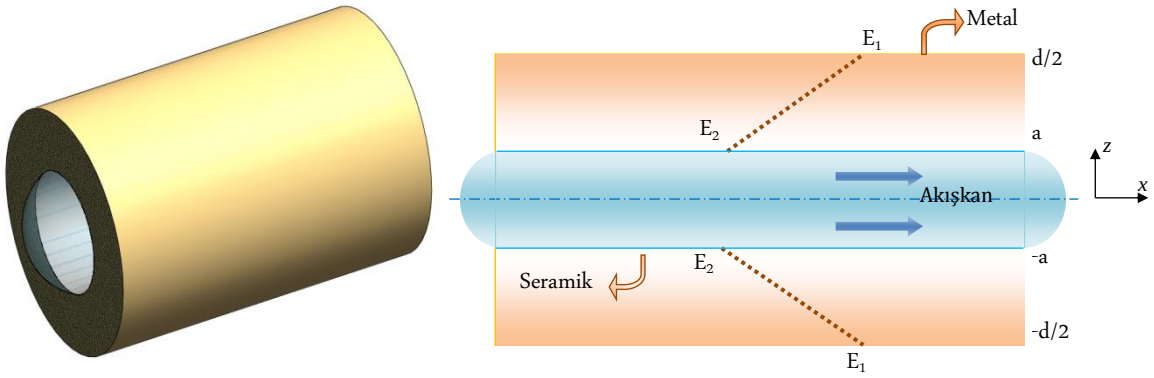
Burada, z düşey eksen, h kiriş kalınlığı, η üstel, E_c: Seramik malzemenin elastisite modülü ve E_m: metal malzemenin elastisite modülüdür.



Şekil 3.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kirişin Elastisite Modülünün η üsteline göre değişimi.

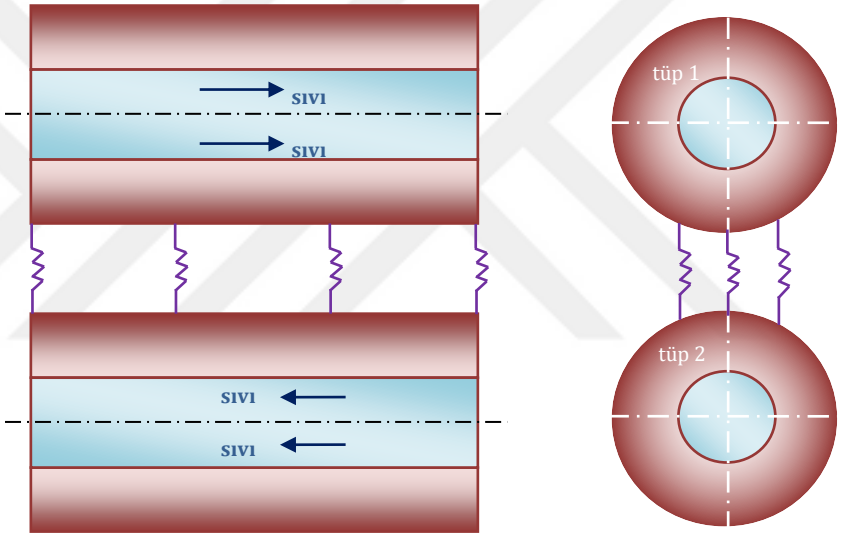
3.2. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Makro Tüplerde Dalga Yayılımı

Şekil 3.3'te, malzeme özellikleri koordinat sisteminde gösterildiği gibi değişen tipik bir fonksiyonel derecelendirilmiş boru görülmektedir. Malzeme özellikleri (elastisite modülü ve yoğunluk), x eksenine göre simetrik olarak değiştiği kabul edilmiştir. Burada, boru boyu sonsuz kabul edilerek dalga yayılımı incelenmektedir. Bu sayede uçlardan oluşacak yansımalar dikkate alınmamıştır.



Şekil 3.3.Akışkan taşıyan fonksiyonel derecelendirilmiş boru.

Şekil 3.3'te d tüp dış çapını, a tüp iç yarıçapını göstermektedir. Şekil 3.4'te birbirine yayla bağlı iki tüp gösterilmiştir.



Şekil 3.4.Birbirine yayla bağlı akışkan taşıyan FD borular.

Birbirine elastik bir ortam ile bağlı iki FD tüp için hareket denklemleri şu şekilde ifade edilir:

$$D_{11}\left(\frac{\partial^4 w_1}{\partial x^4}\right) + m_{f1}{v_1}^2\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2}\right) + 2m_{f1}v_1\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial t}\right) + \left(m_{f1}+m_{p1}\right)\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2}\right) = \alpha(w_2 - w_1) \quad (3.2a)$$

$$D_{11}\left(\frac{\partial^4 w_2}{\partial x^4}\right) + m_{f2}{v_2}^2\left(\frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}\right) + 2m_{f2}v_2\left(\frac{\partial^2 w_2}{\partial x \partial t}\right) + \left(m_{f2}+m_{p2}\right)\left(\frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2}\right) = \alpha(w_1 - w_2) \quad (3.2b)$$

Burada, elastisite modülü atalet momenti çarpımı, eğilme rijitliği, D_{11} olarak gösterilmiştir ve α elastik ortamdaki yay katsayısını göstermektedir. Dalga yayılımı için yer değiştirme alanı şu şekilde ifade edilir:

$$w^j = W^j e^{-i(kx-\omega t)} \quad (3.3)$$

Burada,$i = \sqrt{-1}$ imajiner sayı, k dalga sayısı ve ω açısal frekanstır. (3.3) ifadesi, (3.2) ifadelerinde yerine yazılırsa aşağıdaki ifade elde edilir.

$$D_{11}k^4W_1 - m_f{v_1}^2k^2W_1 + \alpha W_1 + 2m_f v_1 k\omega W_1 - \left(m_f + m_p\right)\omega^2 W_1 - \alpha W_2 = 0 \qquad (3.4a)$$

$$D_{11}k^4W_2 - m_f{v_2}^2k^2W_2 + \alpha W_2 + 2m_f v_2 k\omega W_2 - \left(m_f + m_p\right)\omega^2 W_2 - \alpha W_1 = 0 \qquad (3.4b)$$

(3.4a) ve (3.4b)'nin çözümünden aşikâr çözüm elde edildiği için, katsayılar matrisinin determinantı sıfıra eşitlenir:

$$\begin{vmatrix} a_1\omega^2 + a_2\omega + a_3 & a_4 \\ a_4 & a_1\omega^2 + b_2\omega + a_3 \end{vmatrix} = 0 \qquad (3.5)$$

Burada, determinanttaki terimler:

$$a_1 = -\left(m_f + m_p\right) \qquad (3.6a)$$

$$a_2 = 2m_f v_1 k\omega \qquad (3.6b)$$

$$a_3 = EIk^4 - m_f{v_1}^2k^2 + \alpha \qquad (3.6c)$$

$$a_4 = -\alpha \qquad (3.6d)$$

$$b_2 = 2m_f v_2 k\omega \qquad (3.6e)$$

b_2 ikinci tüpün hızının birinci tüpün hızından daha farklı yönünün zıt yönde olması istenildiği zaman değiştirilebilir.

(3.5)'in çözümünde, iki frekans değeri hesaplanır. Birinci spektrum sıfırda başlar, ikinci mod k=0 iken kesim (cut-off) frekansı olarak adlandırılır. Kesim frekansları şu şekilde bulunmuştur:

$$\omega_1 = 0 \qquad (3.7a)$$

$$\omega_2 = \omega_{kesim} = \frac{\sqrt{2\alpha(m_f+m_p)}}{m_f+m_p} \qquad (3.7b)$$

Kesim frekansı, yay katsayısına (α) akışkan yoğunluğuna ve tüp yoğunluğuna bağlıdır. Ayrıca, faz ve grup hızları şu şekilde ifade edilir:

$$c_p = \frac{\omega}{k} \qquad (3.8a)$$

$$c_g = \frac{\partial\omega}{\partial k} \qquad (3.8b)$$

3.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Birbirine Yayla Bağlı Nanotüplerde Dalga Yayılımı

Klasik mekanikte, bir noktaya etki eden gerilme diğer noktalardan bağımsız olarak düşünülürken, yerel olmayan elastisite teorisinde bir noktadaki gerilme elastik ortamda belirli bir komşuluktaki noktaların şekil değişiminden de etkilendiği kabul edilmektedir (Eringen, 1976). Yerel olmayan elastisite kapsamında gerilme ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir (Lu P. vd., 2007).

$$(1-\mu^2\nabla^2)\tau_{kl}=\gamma\varepsilon_{rr}\delta_{kl}+2G\varepsilon_{kl} \tag{3.9}$$

Burada, τ_{kl} yerel olmayan gerilme tansörü bileşenleri, ε_{kl} genleme tansörü bileşenlerini, γ ve G Lame sabitleri, $\mu=(e_0a_0)$ yerel olmayan parametreyi, a_0 karakteristik uzunluk, e_0 sabit ve ∇^2 Laplasiyendir. Bu parametre, atomik modeller temel alınarak dalga yayılımı ile eşleştirilmesiyle belirlenmiştir (Eringen, 1972). Bir materyal için, karşılık gelen yerel olmayan parametre, atomik kafes dinamiği ve deney sonuçlarına uymasıyla tahmin edilebilir. Çalışmalar neticesinde tek duvarlı bir nanotüpte, (e_0a_0)<2.0 nm şartının sağlanması gerektiği sonucuna varılmıştır (Wang, 2005). Sonuç olarak, tek boyutta gerilme

$$\left(1-\mu^2\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right)\tau_{xx}=E\varepsilon_{kl} \tag{3.10}$$

şeklinde ifade edilebilir.

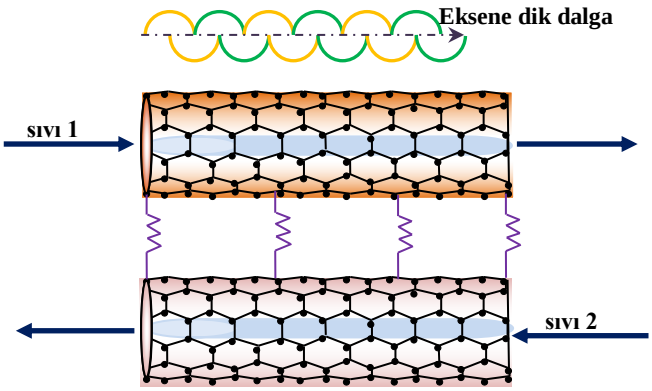
Akışkan taşıyan tek duvarlı nanotüpte hareket denklemi yerel olmayan elastisite teorisi kapsamında aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$EIw^{\iota v}+m_fv^2w''+2m_fv\dot{w}'+(m_f+m_p)\ddot{w}-\mu\left[m_fv^2w''+2m_fv\dot{w}'+(m_f+m_p)\ddot{w}\right]''=0 \tag{3.11}$$

Burada, μ=0 alınırsa klasik elastisite kapsamında akışkan taşıyan boruya ait denklemler bulunur. α yay katsayısı olmak üzere, birbirine yayla bağlı nanotüplerde hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir (Şekil 3.6):

$$E_1I_1w^{\iota v}+m_f{v_1}^2w''+2m_fv\dot{w}'+(m_f+m_p)\ddot{w}-\mu\left[m_fv^2w''+2m_fv\dot{w}'+(m_f+m_p)\ddot{w}\right]''=\alpha(w_2-w_1) \tag{3.12a}$$

$$E_2I_2w^{\iota v}+m_f{v_2}^2w''+2m_fv_2\dot{w}'+(m_f+m_p)\ddot{w}-\mu\left[m_f{v_2}^2w''+2m_fv_2\dot{w}'+(m_f+m_p)\ddot{w}\right]''=\alpha(w_1-w_2) \tag{3.12b}$$



Şekil 3.5. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Birbirine Yayla Bağlı Nanotüpler.

Burada tüpler farklı malzeme ve geometrik özelliklere sahip olabileceği gibi, her bir tüpten akan akışkan hızının büyüklüğü ve yönü farklı olabilir.

Bir sonraki bölümde, (2.34b) kullanılarak, akışkan taşıyan boruların enine titreşimi denklemleri elde edilecektir.

BÖLÜM 4

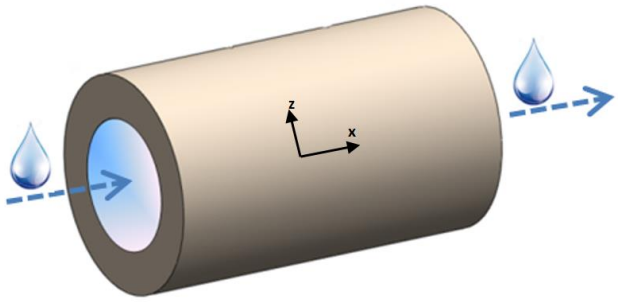
AKIŞKAN TAŞIYAN FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ BORULARIN TİTREŞİMİ

Çalışmanın bu bölümünde, iki kısım bulunmaktadır. Tek ve birbirine bağlı iki tüpte titreşimi incelenecektir. Titreşim ilk kısımda enine gerçekleşirken, ikinci kısımda, titreşim Green fonksiyonunun yardımıyla boyuna incelenecektir.

4.1. Giriş

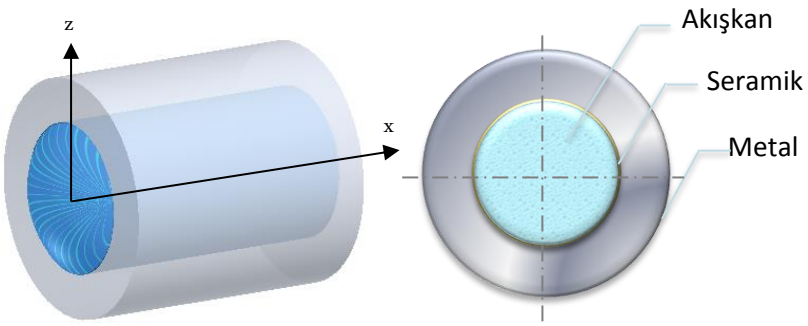
Şekil 4.1'de, tipik bir fonksiyonel derecelendirilmiş boru görülmektedir. Malzeme özellikleri (Elastisite modülü ve kütle), akışkan akış yönü olan x eksenine göre simetrik olarak değişmektedir.

4.2. Akışkan Taşıyan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Boruların Eksene Dik Yönde (Enine) Titreşimi



Şekil 4.1. Akışkan taşıyan boru.

Öncelikle tek tüp için enine titreşim incelenmiştir. Akışkan taşıyan tüpün iç yüzeyindeki malzeme ile dış yüzeyindeki malzeme birbirinden farklı olup, bu malzeme geçişi doğrusal olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.2. Akışkan taşıyan tek borunun görünüşü.

Pratikte, bu sistemi iç çeperi seramik olan dış çeperi metal olan bir boru olarak tasarlayabiliriz. Bu tip borular, ısıl etkilere maruz kalan uygulamalarda kullanılmaktadır.

Tek tüp için incelemeye başlanırsa:

Tek tüp için hareket denklemi (2.24)'ten elde edilmektedir. FD tek tüp için hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$D_{11}\left(\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}\right)+m_f v^2\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)+2m_f v\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial t}\right)+\left(m_f+m_p\right)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}\right)=0 \qquad (4.1)$$

$$w=\eta L;\quad x=\xi L;\quad \beta=\frac{m_f}{m_f+m_p};\quad t=\tau L^2\sqrt{\frac{m_f+m_p}{D_{11}}};\quad U=\frac{v}{L}\sqrt{\frac{D_{11}}{m_f}} \qquad (4.2)$$

Burada, U: boyutsuz hız parametresi, τ: boyutsuz zaman parametresidir. (4.1)'in çözümü için değişkenlerine ayırma yöntemiyle aşağıdaki ifade yazılabilir:

$$\eta(\xi,\tau)=W(\xi)\mathrm{e}^{-\omega\tau} \qquad (4.3)$$

Burada, ω: boyutsuz frekans parametresidir. (4.3), (4.1)'de yerine yazılırsa;

$$\frac{\partial^4 W}{\partial \xi^4}+(U^2)\frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2}+\left(2\sqrt{\beta}U\omega\right)\frac{\partial W}{\partial \xi}+(\omega^2)W=0 \qquad (4.4)$$

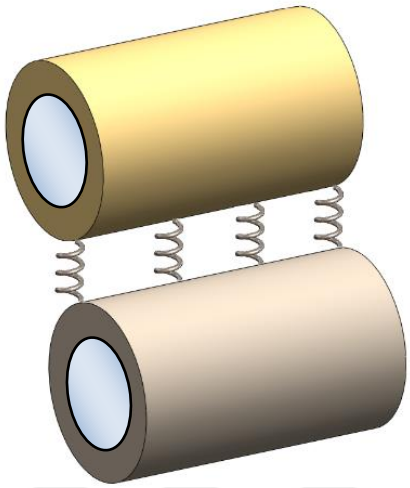
elde edilir.

Yerel olmayan (nonlokal) elastisite için hareket denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial^4 W}{\partial \xi^4}-\left(\frac{2\sqrt{\beta}U\omega\frac{\mu}{L^2}}{1-U^2\frac{\mu}{L^2}}\right)\frac{\partial^3 W}{\partial \xi^3}+\left(\frac{U^2-\omega^2\frac{\mu}{L^2}}{1-U^2\frac{\mu}{L^2}}\right)\frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2}+\left(\frac{2\sqrt{\beta}U\omega}{1-U^2\frac{\mu}{L^2}}\right)\frac{\partial W}{\partial \xi}+\left(\frac{\omega^2}{1-U^2\frac{\mu}{L^2}}\right)W=0 \qquad (4.5)$$

Bu bölümde, titreşim için yerel olmayan elastisite incelenmeyecektir.

Birbirine yayla bağlı akışkan taşıyan tüp, yayla bağlanmış tüpler ve fonksiyonel derecelendirilmiş sistem Şekil 4.3'te görülmektedir.



Şekil 4.3. Birbirine yayla bağlı akışkan taşıyan iki tüp.

Fonksiyonel derecelendirilmiş birbirine yayla bağlı akışkan taşıyan iki borunun hareket denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$D_{11}\left(\frac{\partial^4 w_1}{\partial x^4}\right) + m_{f1}{U_1}^2\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2}\right) + 2m_{f1}U_1\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial x \partial t}\right) + \left(m_{f1} + m_{p1}\right)\left(\frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2}\right) = \alpha(w_2 - w_1) \tag{4.6a}$$

$$D_{11}\left(\frac{\partial^4 w_2}{\partial x^4}\right) + m_{f2}{U_2}^2\left(\frac{\partial^2 w_2}{\partial x^2}\right) + 2m_{f2}U_2\left(\frac{\partial^2 w_2}{\partial x \partial t}\right) + \left(m_{f2} + m_{p2}\right)\left(\frac{\partial^2 w_2}{\partial t^2}\right) = \alpha(w_1 - w_2) \tag{4.6b}$$

Burada, α yay katsayısıdır. w_1 1. boru, w_2 ikinci borudaki yer değiştirmeleri göstermektedir. Tüp sistemi için boyutsuzlaştırma yapılırsa, 1. Tüp için (4.7a), ikinci tüp için de (4.7b) bulunur:

$$\frac{\partial^4 W_1}{\partial \xi^4} + (U^2)\frac{\partial^2 W_1}{\partial \xi^2} + \left(2\sqrt{\beta}U\omega\right)\frac{\partial W_1}{\partial \xi} + (\omega^2 + 1)W_1 - \alpha W_2 = 0 \tag{4.7a}$$

$$\frac{\partial^4 W_2}{\partial \xi^4} + (U^2)\frac{\partial^2 W_2}{\partial \xi^2} + \left(2\sqrt{\beta}U\omega\right)\frac{\partial W_2}{\partial \xi} + (\omega^2 + 1)W_2 - \alpha W_1 = 0 \tag{4.7b}$$

Elde ettiğimiz bu denklemlerde, ısıl etkiler ihmal edilmiştir. Bu etki, bir sonraki kısımda incelenecektir.

4.3. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemede Sıcaklığın Etkisi

Bu bölümden önceki kısımlarda, akışkanın sıcaklığı önemsenmemiştir. Sıcaklık hesaba katıldığında fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin özellikleri sıcaklığa bağlı olarak değişecektir. Bu kısımda, akışkan hızı ve FD parametresinin yanı sıra akışkanın sıcaklığı da hesaba katılacaktır.

Burada $T=T_0+\Delta T$'dir.T_0=300 K'deki değerler Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelge 1.Malzeme Özelliklerinin Sıcaklıkla Değişimi (Trinh vd., 2016).

Malzeme	**Özellik**	**P_0**	**P_{-1}**	**P_1**	**P_2**	**P_3**
Al_2O_3 (Alümina)	E (GPa)	*349.55*	*0*	*$-3.853 * 10^{-13}$*	*$4.027 * 10^{-16}$*	*$-1.673 * 10^{-19}$*
	P (kg/m^3)	*3800*	*0*	*0*	*0*	*0*
	α(K^{-1}*10^-6)	*6.8269*	*0*	*183.8*	*0*	*0*
	K (Wm/K)	*-14.087*	*-1123.6*	*-0.006227*	*0*	*0*
SUS 304 (Çelik)	E (GPa)	*201.04*	*0*	*$3.079 * 10^{-13}$*	*$-6.534 * 10^{-16}$*	*0*
	P (kg/m^3)	*8166*	*0*	*0*	*0*	*0*
	α(K^{-1}*10^-6)	*14.9*	*0*	*808.5*	*0*	*0*
	K (Wm/K)	*15.379*	*0*	*-0.001264*	*$2.092 * 10^{-6}$*	*$-7.223 * 10^{-10}$*

Karışımlar Kuralına göre:

$$V_c + V_m = 1 \tag{4.8a}$$

$$P(z,T) = P_c(T)V_c + P_m(T)V_m \tag{4.8b}$$

Karışımlar Kural'ını, Elastisite Modülü ve yoğunluğa uyarlarsak:

$$E(z,T) = [E_c(T) - E_m(T)]\left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^{\eta} + E_m(T) \tag{4.9a}$$

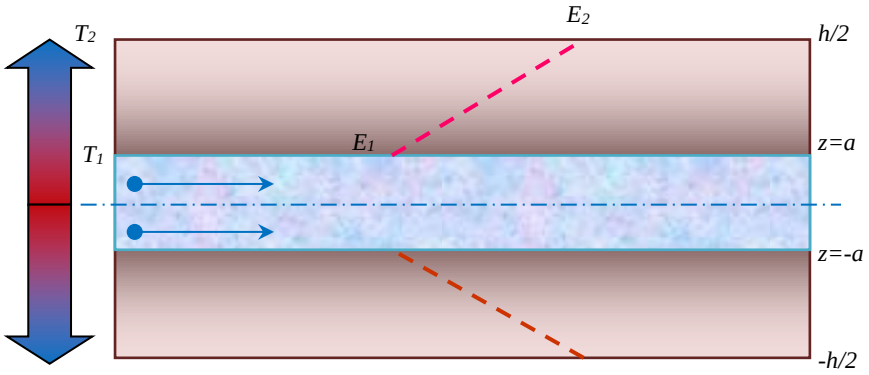
$$\rho(z,T) = [\rho_c(T) - \rho_m(T)]\left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^{\eta} + \rho_m(T) \tag{4.9b}$$

Elde edilir.

Burada η derecelendirme üstelidir. Kiriş malzemesi için sıcaklığa bağlı özellikler P ile gösterilecek olursa, bu özellikler:

$$P = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3) \tag{4.10}$$

Çizelge 2'deki özelliklere göre elastisite modülü ve yoğunluklar hesaplanabilir.



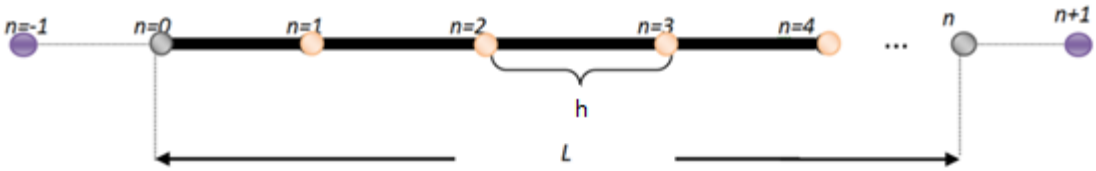
Şekil 4.4.Fonksiyonel derecelendirilmiş sıcak akışkan taşıyan boru.

(4.7)'nin analitik çözümü $\frac{\partial W}{\partial \xi}$ teriminin varlığı sebebiyle mümkün değildir. Bu nedenle, bu denklemlerin yaklaşık çözüm yöntemleri ile çözümü gerekmektedir. Bu çalışmada Sonlu Farklar yöntemi kullanılarak çözüm yapılacaktır.

4.4. Sonlu Farklar Metodu

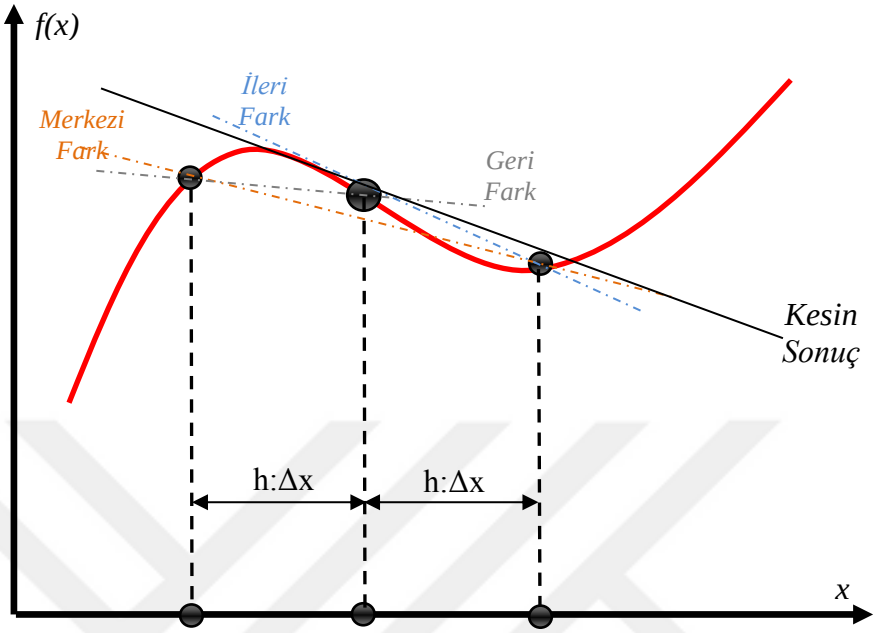
Bu kısımda, önceki kısımda elde edilen akışkan taşıyan borulara ait hareket denklemlerinin çözümünde kullanılacak olan Sonlu Farklar yöntemi anlatılacaktır.

Burada, L uzunluğundaki bir kirişi eşit aralıklar veya adımlarla böldüğümüz takdirde her bir noktada yerdeğişimi meydana gelir ve ayrıca bu noktalar yakınındaki noktalardan etkilenir. Adım sayısı kadar denklem oluşturularak bu noktalardaki yer değişimi dolayısıyla titreşim incelenir (Polyanin, 2002).



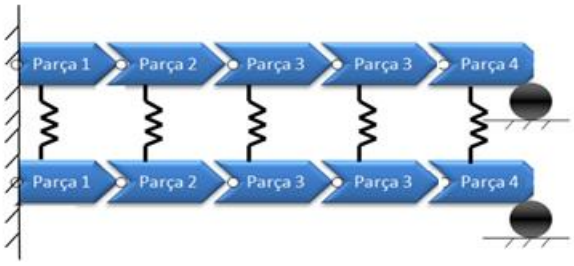
Şekil 4.5. Tek tüpte sonlu farklar uygulanması.

Şekil 4.6'da kesin sonuca ileri ve geri farklarla yaklaşımı görülmektedir. Taylor seri açılmından, İleri ve geri farkları kullanarak merkezi farkları elde edelim.



Şekil 4.6. Sonlu Farklar.

Tek tüpte olabileceği gibi, birbirine yayla bağlı iki kiriş (boru) sistemi için de bu yöntem uygulanabilir.



Şekil 4.7. Birbirine yayla bağlı iki tüpün *(A-B)* sonlu farklar ile parçalara ayrılması.

Taylor açılımına göre, bir sonraki nokta komşuluğundaki fonksiyon:

$$f(x+\mathrm{h}) = f(x) + \frac{\mathrm{h}}{1!}\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\mathrm{h}^2}{2!}\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\mathrm{h}^3}{3!}\frac{\partial^3 f}{\partial x^3} + \frac{\mathrm{h}^4}{4!}\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} + \frac{\mathrm{h}^5}{5!}\frac{\partial^5 f}{\partial x^5} + \cdots, \qquad (4.11)$$

Burada: $\frac{[f(x)-f(x+\mathrm{h})]}{\mathrm{h}}$ ifadesi yalnız bırakılırsa, bize ileri farkları verir. Taylor açılımına göre, bir önceki nokta komşuluğundaki fonksiyon:

$$f(x-\mathrm{h}) = f(x) - \frac{\mathrm{h}}{1!}\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\mathrm{h}^2}{2!}\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \frac{\mathrm{h}^3}{3!}\frac{\partial^3 f}{\partial x^3} + \frac{\mathrm{h}^4}{4!}\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} - \frac{\mathrm{h}^5}{5!}\frac{\partial^5 f}{\partial x^5} + \cdots, \qquad (4.12)$$

şeklinde ifade edilebilir ve Burada: $\frac{[f(x)-f(x-\mathrm{h})]}{\mathrm{h}}$ ifadesi yalnız bırakılırsa, bize geri farkları verir.

(4.11) ve (4.12)'den elde ettiğimiz ileri ve geri fark ifadelerini toplayıp ortalamasını alırsak bize, merkezi sonlu farkları verir. Merkezi sonlu farklar ifadesinde $O(h^2)$'den sonraki terimler kesilip atılırsa. Merkezi farklar hassasiyeti, $O(h^2)$ mertebesinde olur.

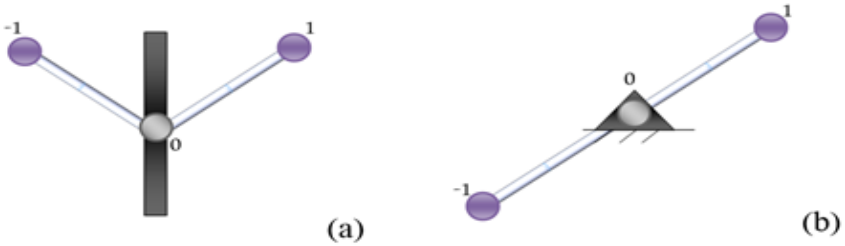
$$\frac{f(x+\mathrm{h})-f(x-\mathrm{h})}{2}=\frac{2\mathrm{h}}{1!\,2}\frac{\partial f}{\partial x}+\overbrace{\frac{2\mathrm{h}^3}{3!\,2}\frac{\partial^3 f}{\partial x^3}+\frac{2\mathrm{h}^5}{5!\,2}\frac{\partial^5 f}{\partial x^5}+\cdots}^{\text{Kesme } O(h^2)}, \tag{4.13}$$

$O(h^2)$'de birinci türev $(\frac{\partial f}{\partial x})$:

$$\frac{f(x+\mathrm{h})-f(x-\mathrm{h})}{2}=\frac{2\mathrm{h}}{1!\,2}\frac{\partial f}{\partial x}+O(\mathrm{h}^2) \tag{4.14}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x}=\frac{f(x+\mathrm{h})-f(x-\mathrm{h})}{2\mathrm{h}} \tag{4.15}$$

ifade edilir.(2.36)'ya sonlu farklar uygulanır ve Çizelge 2'deki sınır koşullarıyla çözüm gerçekleştirilir.



Şekil 4.8. Sonlu farklar için sınır şartları (a- Ankastre, b- Basit destekli)

Şekil 4.8'i çizelgede ifade edersek:

Çizelge 2. Merkezi Sonlu Farklar ile türev ifadelerinin gösterilişi.

Basit Destekli(B)	Ankastre (A)
$w_n=0$	$w_n=0$
$w_{n+1}=-w_{n-1}$	$w_{n+1}=w_{n-1}$

Burada, n düğüm sayısıdır.

Boyutsuz frekanslar, $O(h^2)$ mertebesinde hesaplanmış olup, öncelikle FD tek tüp için Basit Destekli - Basit Destekli, Ankastre - Basit Destekli ve Ankastre - Ankastre durumlar için, incelenecektir.

Şekil 4.5'te görülen kirişin,(4.7)'deki basit destekli çözümü şu şekilde yaparız:

(4.22)'de f yerine w yer değiştirme fonksiyonunu ve (x+h) yerine (n+1) koyarsak:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{w_{n+1} - w_{n-1}}{2\mathrm{h}} [birinci\ türev] \tag{4.16a}$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{(w_{n+1} - 2w_n + w_{n-1})}{\mathrm{h}^2} [ikinci\ türev] \tag{4.16b}$$

$$\frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = \frac{(w_{n+2} - 2w_{n+1} + 2w_{n-1} - w_{n-2})}{2h} [üçüncü\ türev] \tag{4.16c}$$

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \frac{(w_{n+2} - 4w_{n+1} + 6w_n - 4w_{n-1} + w_{n-2})}{\mathrm{h}^2} \quad [dördüncü\ türev] \tag{4.16d}$$

n=1'den n=3 e kadar, (4.16a-b-c-d), (4.7)'de yazılır ve kiriş 4'e bölündüğü için h=L/4 alınır.

Buna göre:

$$\frac{(w_{n+2} - 4w_{n+1} + 6w_n - 4w_{n-1} + w_{n-2})}{\mathrm{h}^2} + (U^2)\frac{(w_{n+1} - 2w_n + w_{n-1})}{\mathrm{h}^2} + \left(2\sqrt{\beta}U\omega\right)\left(\frac{w_{n+1} - w_{n-1}}{2\mathrm{h}}\right) + (\omega^2)w_n = 0 \tag{4.17}$$

elde edilir. Bu denklem, üç defa yazılır:

n=1 için;

$$\frac{(w_3 - 4w_2 + 6w_1 - 4w_0 + w_{-1})}{\mathrm{h}^2} + (U^2)\frac{(w_2 - 2w_1 + w_0)}{\mathrm{h}^2} + \left(2\sqrt{\beta}U\omega\right)\left(\frac{w_2 - w_0}{2\mathrm{h}}\right) + (\omega^2)w_1 = 0 \tag{4.18a}$$

n=2 için;

$$\frac{(w_4 - 4w_3 + 6w_2 - 4w_1 + w_0)}{\mathrm{h}^2} + (U^2)\frac{(w_3 - 2w_2 + w_1)}{\mathrm{h}^2} + \left(2\sqrt{\beta}U\omega\right)\left(\frac{w_3 - w_1}{2\mathrm{h}}\right) + (\omega^2)w_2 = 0 \tag{4.18b}$$

n=3 için;

$$\frac{(w_5 - 4w_4 + 6w_3 - 4w_2 + w_1)}{\mathrm{h}^2} + (U^2)\frac{(w_4 - 2w_3 + w_2)}{\mathrm{h}^2} + \left(2\sqrt{\beta}U\omega\right)\left(\frac{w_4 - w_2}{2\mathrm{h}}\right)$$

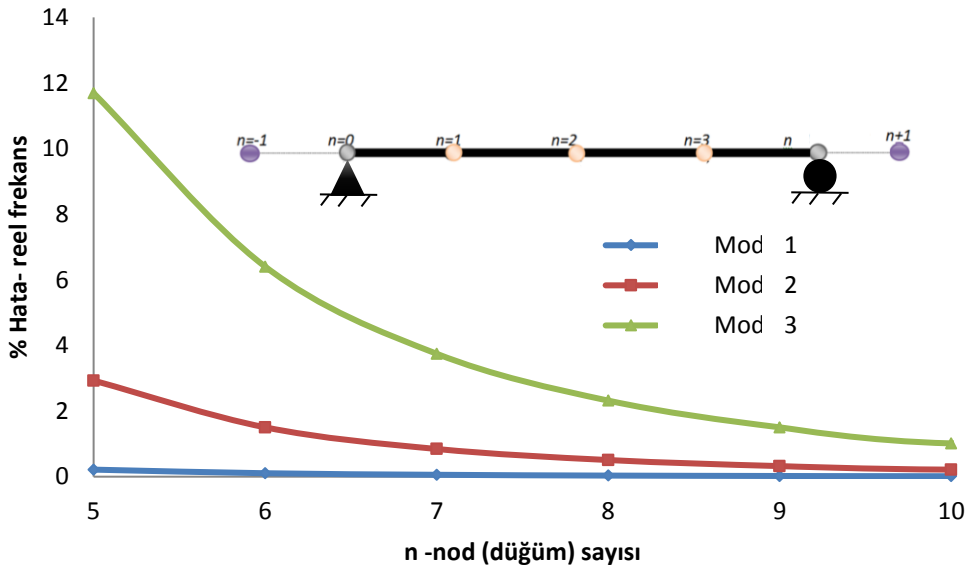
$$+ (\omega^2)w_3 = 0 \qquad (4.18c)$$

Çizelge 2'deki sınır şartlarından, ($w_0 = w_4 = 0,\ w_5 = -w_3\ ve\ w_{-1} = -w_1$), (4.18a), (4.18b) ve (4.18c) matris formunda ifade edilirse:

$$\begin{matrix} \boldsymbol{w_1} & \boldsymbol{w_2} & \boldsymbol{w_3} \end{matrix}$$

$$\left\|\begin{matrix} \omega^2 + \frac{5}{\mathrm{h}^2} - \frac{2U^2}{\mathrm{h}^2} & \omega^2 - \frac{4}{\mathrm{h}^2} + \frac{U^2}{\mathrm{h}^2} + \frac{2\sqrt{\beta}U\omega}{2h} & \frac{1}{\mathrm{h}^2} \\ \omega^2 - \frac{4}{\mathrm{h}^2} + \frac{U^2}{\mathrm{h}^2} - \frac{2\sqrt{\beta}U\omega}{2h} & \omega^2 + \frac{6}{\mathrm{h}^2} + \frac{2\sqrt{\beta}U\omega}{2h} - \frac{2v^2}{\mathrm{h}^2} & \omega^2 - \frac{4}{\mathrm{h}^2} + \frac{U^2}{\mathrm{h}^2} + \frac{2\sqrt{\beta}U\omega}{2h} \\ \frac{1}{\mathrm{h}^2} & \omega^2 - \frac{4}{\mathrm{h}^2} + \frac{U^2}{\mathrm{h}^2} + \frac{2\sqrt{\beta}U\omega}{2h} & \omega^2 + \frac{5}{\mathrm{h}^2} - \frac{2U^2}{\mathrm{h}^2} \end{matrix}\right\| = 0 \qquad (4.19)$$

elde edilir. (4.19) çözülürse, çıkan kökler ile, O(h^2) mertebesinde frekans değerlerine ulaşılmaktadır.Burada, Merkezi Sonlu Farklardaki, basit destekli akışkan taşımayan bir tüp için O(h^2) mertebesindeki yakınsama çalışması sonuçlarını göstermektedir. Bu çalışmaya göre, 1. ve 2. modda frekanslardaki hata çok küçük değerlerde seyretmektedir. 3. modda ise, düğüm sayısını arttırarak hata % 1 seviyesine çekilebilmektedir. Bu çalışmada, düğüm sayısı 10 alınmıştır.



Şekil 4.9. Yakınsama çalışması.

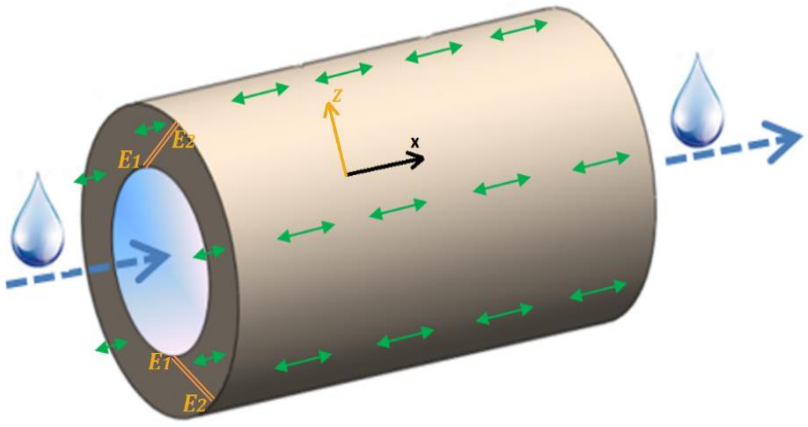
BÖLÜM 5

AKIŞKAN TAŞIYAN BORULARIN BOYUNA TİTREŞİMİ

5.1. Giriş

Bu bölümde, akışkan taşıyan boruların boyuna titreşimi Green fonksiyonları kullanılarak incelenecektir. Bu bölümdeki çalışma, literatür incelendiği takdirde, daha önce üzerinde pek durulmamış bir konudur ve bu haliyle orijinaldir.

Şekil 5.1'de, malzeme özellikleri koordinat sisteminde gösterildiği gibi değişen tipik bir fonksiyonel derecelendirilmiş boruda boyuna titreşimi inceleyelim. Malzeme özellikleri (Elastisite Modülü ve yoğunluk), x eksenine göre simetrik olarak değişmektedir. Burada, 2. Bölümde akışkan taşıyan borularda boyuna titreşim denklemi Green fonksiyonları kullanılarak çözülecektir.



Şekil 5.1. Boyuna titreşen akışkan taşıyan boru.

5.2. Akışkan Taşıyan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Boruların Eksen Yönünde (Boyuna) Titreşimi

Akışkan taşıyan bir borunun hareket denklemini (2.33a)'da 2. Bölümde elde etmiştik. Bu denklem bize boyuna titreşimi vermektedir. Denklemin çözümü için Green fonksiyonları kullanılmaktadır. (2.33a), bir kere daha yazılıp (5.1) olarak ifade edilip, daha sonrasında homojen olmayan dalga denklemine çevrilip, ardından Green fonksiyonları cinsinden yazılacaktır.

$$E_p A_p \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \left[m_p + m_f\right]\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - m_f \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \;\; (boyuna\ titreşim) \qquad (5.1)$$

(5.1) denklemi aşağıdaki gibi homojen olmayan bir dalga denklemi formundadır.

$$\frac{\partial^2 u_0}{\partial t^2} - \mathrm{a}^2 \frac{\partial^2 u_0}{\partial x^2} - \psi(x,t) = 0 \qquad (5.2)$$

Buradaki terimler aşağıda tanımlanmıştır.

$$\mathrm{a} = \sqrt{\frac{E_p A_p}{m_p + m_f}} \qquad (5.3a)$$

$$\psi(x,t) = \frac{m_f}{m_p + m_f} f(t) \qquad (5.3b)$$

Burada, f(t) ifadesi hızın zamanla değişimidir. (5.2) denkleminin çözümü Green fonksiyonları cinsinden aşağıdaki şekilde yazılabilir

$$w(x,t) = \frac{\partial}{\partial t}\int_0^L f(\xi) G(x,\xi,t) d\xi + \int_0^L g(\xi) G(x,\xi,t) d\xi + \int_0^t \int_0^L \phi(\xi,\tau,t-\tau)\mathrm{d}\xi\mathrm{d}t \qquad (5.4)$$

$$\mathrm{t{:}\ 0\ anında}, w = f(x) \quad ve \quad \frac{\partial w}{\partial t} = g(x) \qquad (5.5)$$

Ardından Green fonksiyonları G(x, ξ, t) şöyle tanımlanır:

Ankastre-Ankastre boru için

$$\mathrm{x{:}\ 0\ ve\ 1\ de}, w = 0 \qquad (5.6a)$$

$$G(x,\xi,t) = \frac{2}{a\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\left[\sin(\frac{n\pi x}{l})\sin(\frac{n\pi \xi}{l})\sin(\frac{n\pi a t}{l})\right] \qquad (5.6b)$$

şeklinde yazılır. Serbest serbest boru için ise

$$\mathrm{x{:}\ 0'da}, \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad ve \quad \mathrm{x{:}\ l'de},\ \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \qquad (5.7a)$$

$$G(x,\xi,t) = \frac{t}{l} + \frac{2}{a\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\left[\cos(\frac{n\pi x}{l})\cos(\frac{n\pi\xi}{l})sin(\frac{n\pi at}{l})\right] \quad (5.7b)$$

şeklinde ifade edilir.

Yer değiştirme fonksiyonunda Green fonksiyonlarını yerine koyarsak:

$$u(x,\xi,t) = \int_0^t \int_0^L G(x,\xi,t)\, t \, d\xi dt \quad (5.8)$$

İstediğimiz sınır koşuluna göre dinamik yer değiştirmeyi elde edebiliriz. Denklem 5.8'de, Denklem 5.6 ve Denklem 5.7'yi sırasıyla yerine yazarsak:

$$u(x,\xi,t) = \int_0^t \int_0^L \frac{2}{a\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\left[\sin(\frac{n\pi x}{l})\sin(\frac{n\pi\xi}{l})\sin(\frac{n\pi at}{l})\right] t \, d\xi dt \quad (5.9a)$$

Ankastre-Ankastre destek için,

$$u(x,\xi,t) = \int_0^t \int_0^L \frac{t}{l} + \frac{2}{a\pi}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n}\left[\cos(\frac{n\pi x}{l})\cos(\frac{n\pi\xi}{l})sin(\frac{n\pi at}{l})\right] t \, d\xi dt \quad (5.9b)$$

Serbest-Serbest destek için elde edilir.

Burada, n dalga sayısını ve t zamanı göstermektedir.

BÖLÜM 6

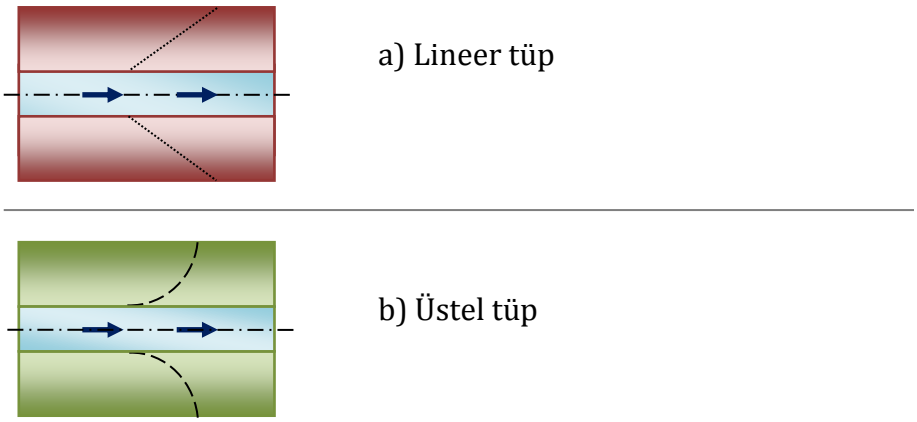
SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölüm, içerisinde üç ana çalışmanın sonuçların grafiklerini, tablolarını ve yorumlarını içermektedir. Bunlar: akışkan taşıyan boruların enine titreşimi, akışkan taşıyan boruların enine dalga yayılımı ve taşıyan boruların boyuna titreşimidir.

6.1. Akışkan Taşıyan Boruların Dalga Yayılımı Sonuçları

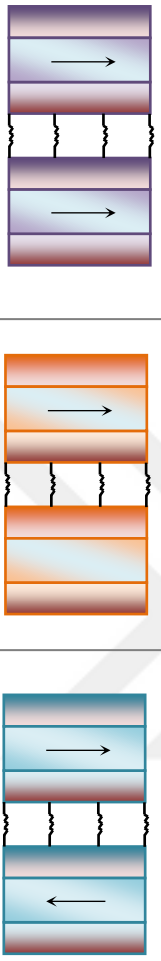
Bu kısımda, üç farklı malzeme dağılımına sahip akışkan taşıyan borulardaki dalga yayılımı incelenmektedir. Bunlar: Doğrusal – Doğrusal (Lineer-Lineer), Lineer-Üstel ve Üstel-Üstel. Bu üç senaryo (durum) Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te gösterilmektedir.

Şekil 4.2'deki geometrik değişkenler a=0.4 nm ve d=1 nm olarak alındığında, elastisite modülü değişimi 1000 GPa'dan 5000 GPa'a kadar olmaktadır. Boru yoğunlukları değişimi, 1000 gr/m^{3}'dan 5000 gr/m^{3}'a kadar alınmaktadır.



Şekil 6.1. Değişik durumlarda malzeme derecelendirilmesi.

Üç farklı akış durumu incelenmiştir. Bunlar: Sağ-Sağ Akış (RRF), Sağ-Sıfır Akış (RZF), Sağ-Sol Akış (RLF).



a) (RRF)

b) (RZF)

c) (RLF)

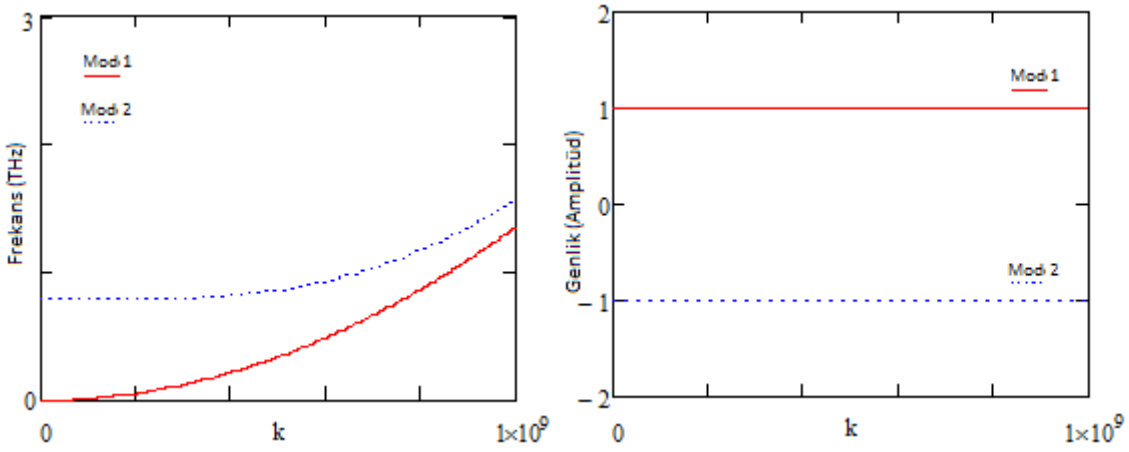
Şekil 6.2. Değişik akış durumları.

6.1.1.Doğrusal-doğrusal malzeme değişiminin olduğu tüpte dalga yayılımı

Bu kısımda, farklı malzeme özellikleri, akış hızları ve yerel olmayan parametreler için elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Genelde dalga yayılımı imajiner (sanal) niceliklerdir. Şekillerde imajiner bileşenler, sıfır olmayan değerler için verilmiştir. İzotropik bir malzemede, kiriş için yayınım eğrileri (dalga yayılımı), akışkan akışı olmaksızın Şekil 6.3a'da verilmiştir. İki dalga yayılım eğrisi (spektrum) elde edilmiştir. Birinci spektrum sıfır frekanstan başlarken, ikinci spektrum bir kesme frekansından (sıfır olmayan değerden) başlar. Kesme frekansı (cut off) (3,7b)'den elde edilmektedir. Spektrum eğrileri dalga sayısı arttıkça birbirine yaklaşmaktadır.

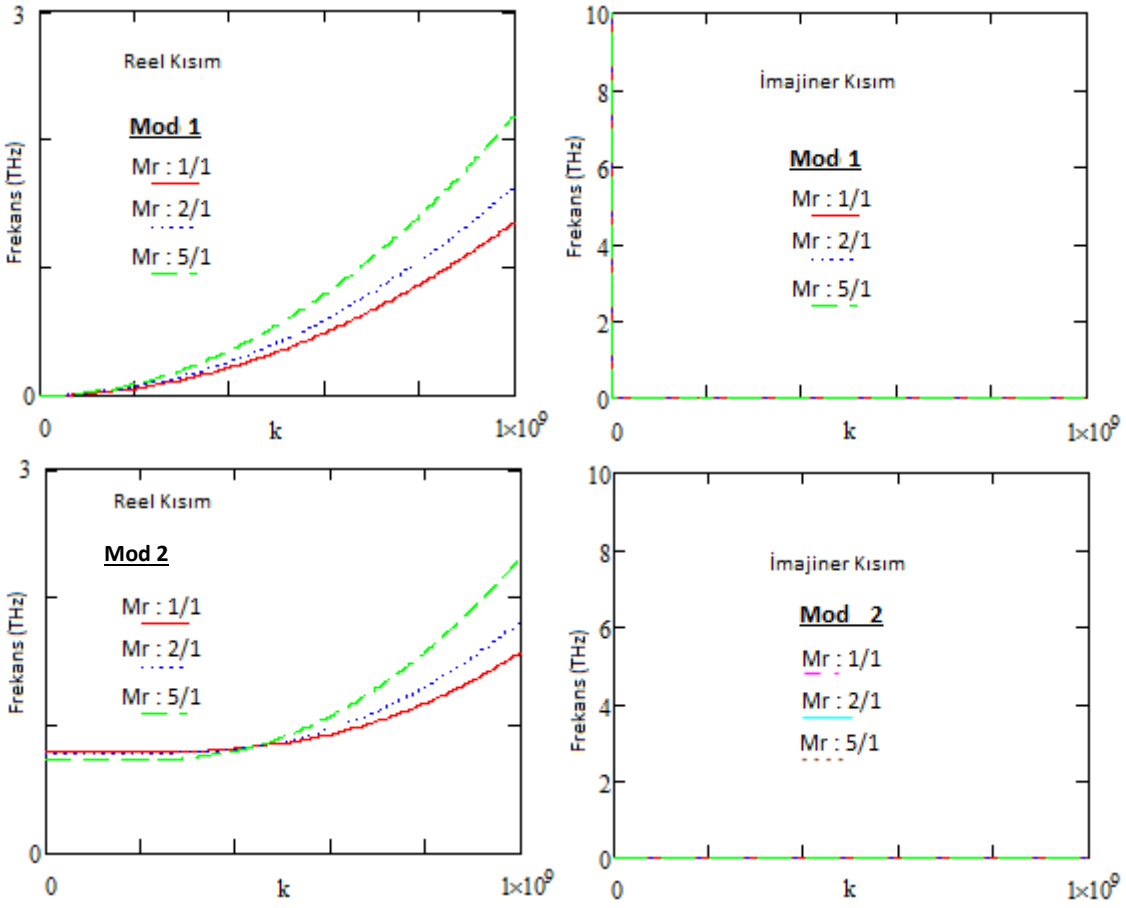
Dalga yayılımı için iki tüpün genlik oranları Şekil 6.3b'de verilmiştir. İki tüpün birinci spektrum için faz içi aynı yönde hareket ve ikinci mod için zıt faz farklı yönde hareketleri olduğu görülmektedir. (Örneğin şekil değiştirmeler birinci mod için aynı yöndedir, oysa ikinci mod için ters yöndedir).



a) b)

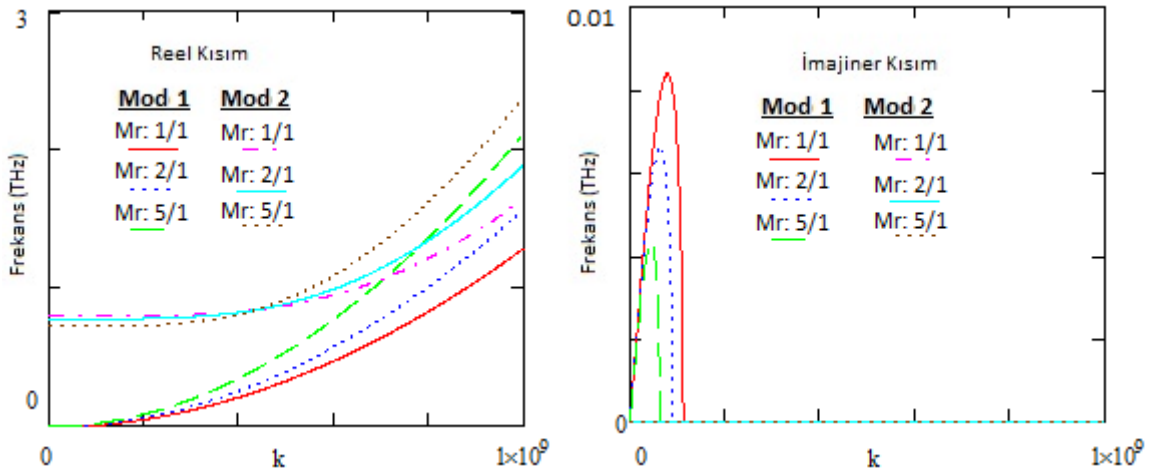
Şekil 6.3. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için a) yayınım eğrisi (a- dalga yayılımı ve b- genlik oranları.) $v_1=v_2=0$ m/s(ZZF), Mr:1/1.

Akış olmadan, bir FD kiriş için dalga yayılımı her iki spektrum için Şekil 6.4'te verilmektedir. Spektrumlar arasındaki fark, dalga sayısı arttıkça artmaktadır. Akışkan akışı olmayan tüplerde (v = 0) frekansların imajiner kısmı sıfırdır. Malzeme parametresi Mr (m_1 / m_2) büyüdükçe, frekans değerleri artmaktadır. Birinci spektrum değerleri sıfırdan başlarken, ikinci spektrum değerleri belirli bir değerden başlar, buna kesim (cut off) frekansı denir. Ayrıca, yüksek hızlarda, Şekil 6.15b'de RRF durumunda ve RLF durumunda (Şekil 6.16b) birinci frekansın sıfır olmadığı da görülmektedir.



Şekil 6.4. Değişik malzeme parametresinde (Mr) akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı) ve genlik oranı. v_1=v_2=0 m/s (ZZF).

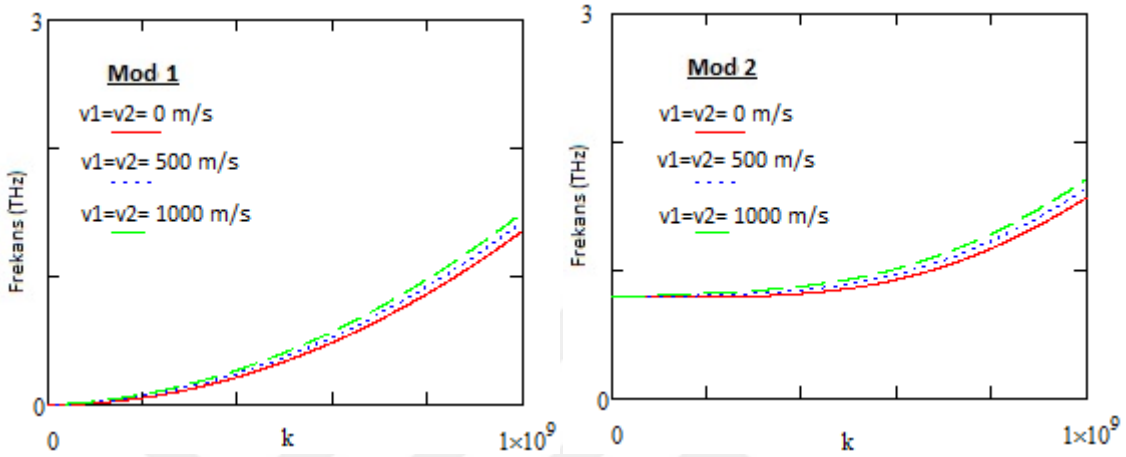
Şekil 6.5'te, akış yönünün birbirine yayla bağlanmış tüplerdeki dalga yayılımı üzerindeki etkisini görülmektedir. Mr oranının artışı ile frekans değerlerinin arttığı görülmektedir. Burada, iki tüpteki akış birbirine zıt yönlüdür. Bu akış durumundan dolayı, belirli bir k dalga sayısına kadar ($k=6x10^8$) sönümde değer gözlenmektedir.



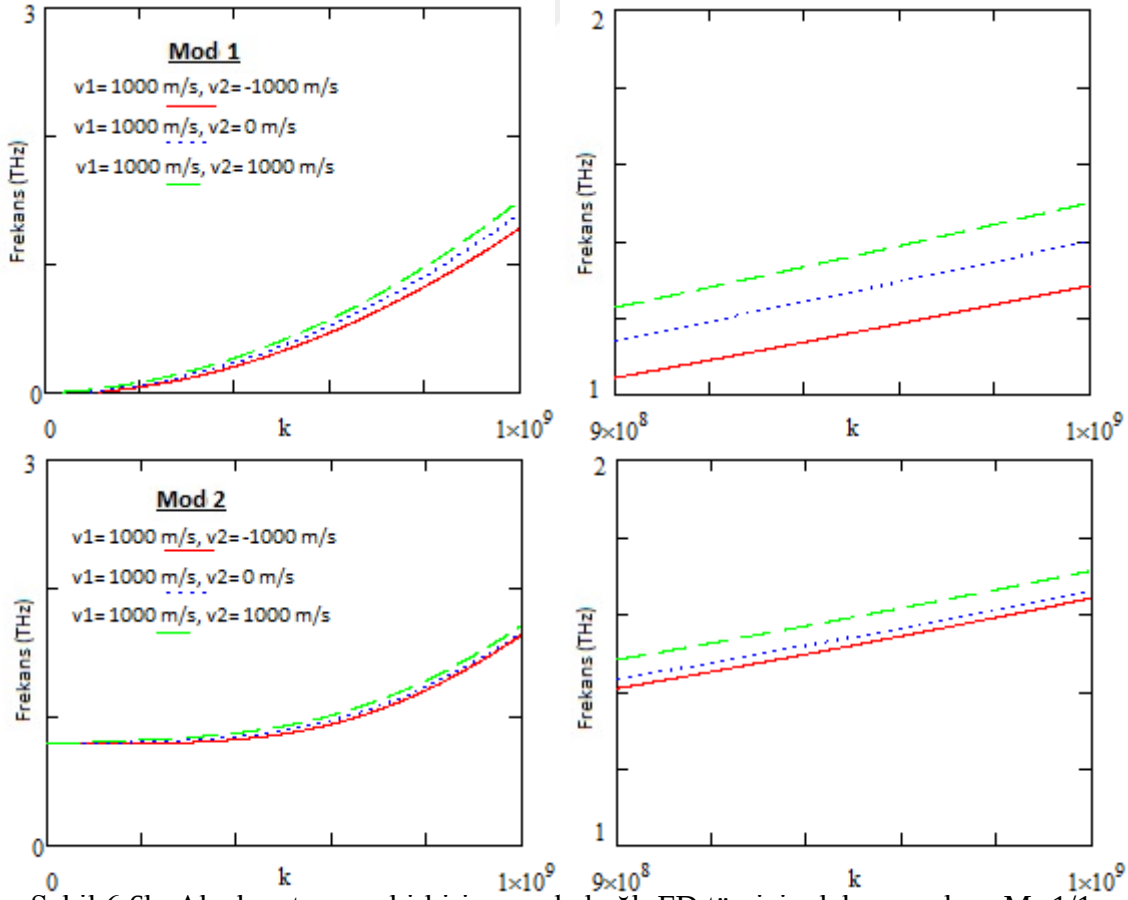
Şekil 6.5. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı) ve genlik oranı. $v_1=-v_2=1000$ m/s (RLF).

Şekil 6.6a'da, ters yönde akış (RLF) için en düşük frekanslar elde edilmiş, aynı yönde (RRF) akışkan akışında ise en yüksek frekanslar elde edilir.

Şekil 6.6b'deki RLF, RZF ve RRF durumlarda FD kiriş için dalga yayılımı verilmiştir. Dikkate alınan RRF durumunda artan k ile frekansların arttığı görülmektedir.



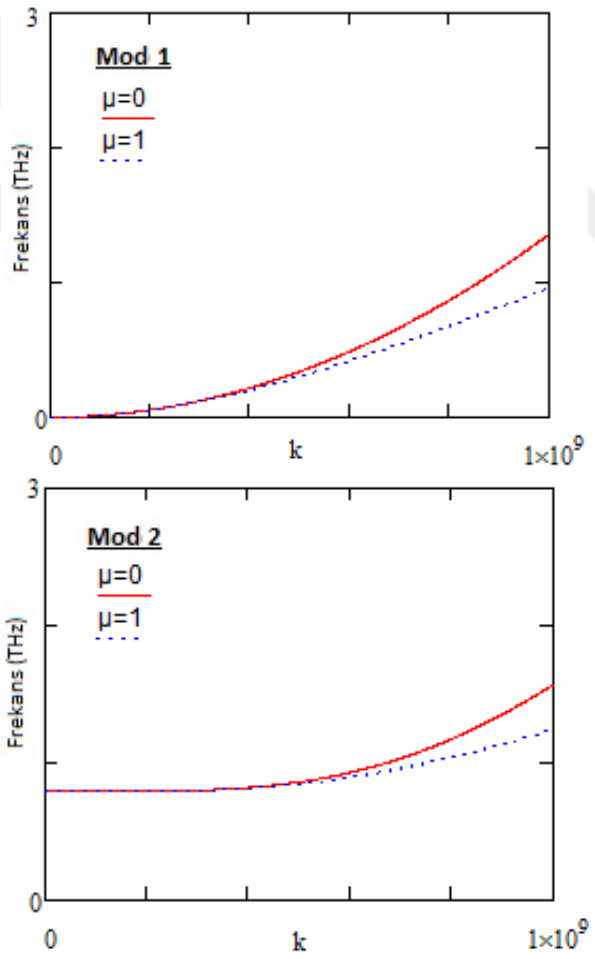
Şekil 6.6a.Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı) Mr:1/1(RRF).



Şekil 6.6b. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için dalga yayılımı Mr:1/1.

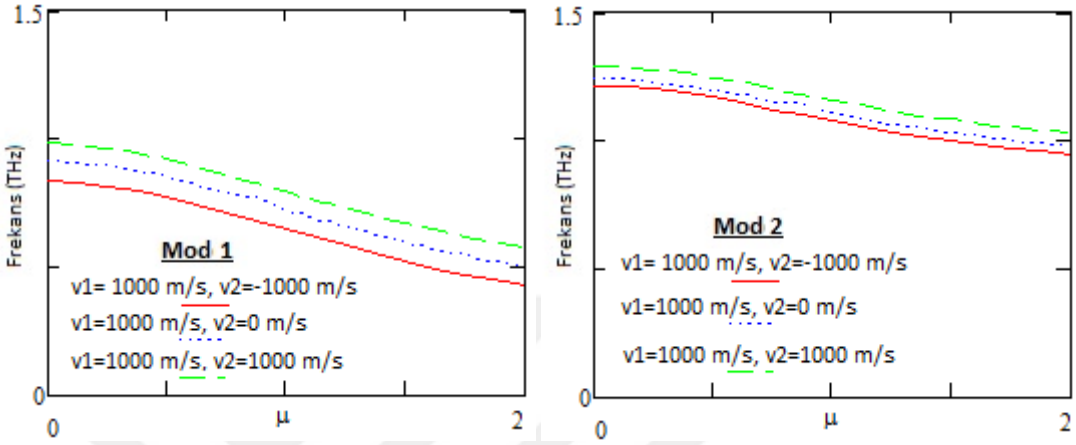
Şekil 6.7'de, yerel olmayan elastisite kullanılarak elde edilen dalga yayılım eğrileri verilmiştir. Yerel olmayan frekanslar, özellikle daha yüksek dalga sayıları düşünüldüğünde klasik teoriye göre daha düşük değerler vermektedir. Bunun nedeni nanokirişin ölçek etkisidir. Yerel olmayan etkilerin katılması akışkan taşıyan borunun elastisite modülünü düşürdüğü şeklinde yorumlanabilir. Bu sonuçlar klasik teoriye kıyasla kafes dinamiği modelleri ile daha uyumludur.

Şekil 6.8 ve Şekil 6.9'da yerel olmayan elastisite parametresinin (μ) ile frekansların değişimi verilmiştir. Yerel olmayan elastisite parametresi ile frekans değerleri azaldığı görülmektedir. Şekil 6.9'da yerel olmayan elastisite parametresinin artışı ile akış hız değerlerinden bağımsız olarak, frekanslar, birbirlerine yaklaşmaya başladığı görülmektedir.

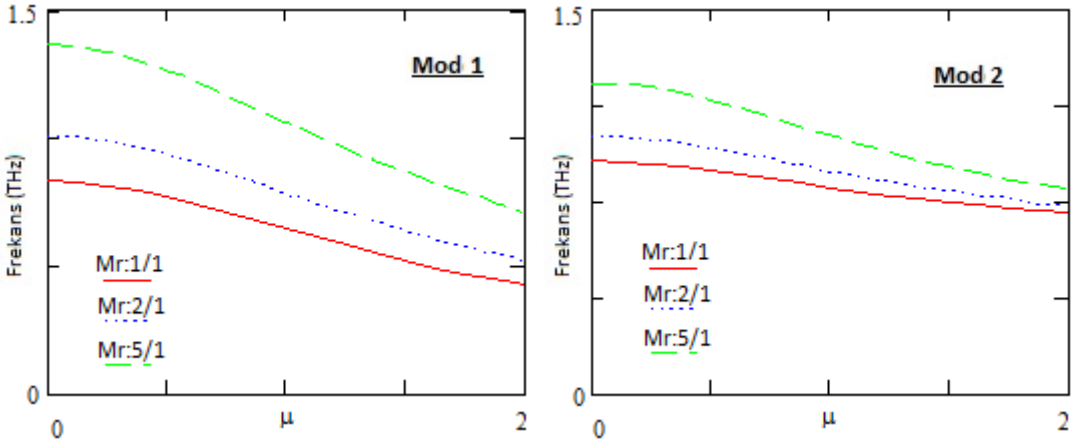


Şekil 6.7. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı). $v_1=v_2=0$ m/s(ZZF), Mr: 1/1.

Lineer durum için ortamın rijitliğinin frekanslara etkisi Şekil 6.9'da verilmiştir. Daha yüksek yay katsayısı için daha yüksek frekanslar elde edilir. İlk modda frekanslar değişmez ve ikinci mod yüksek yay katsayıları frekansları yükseltir.

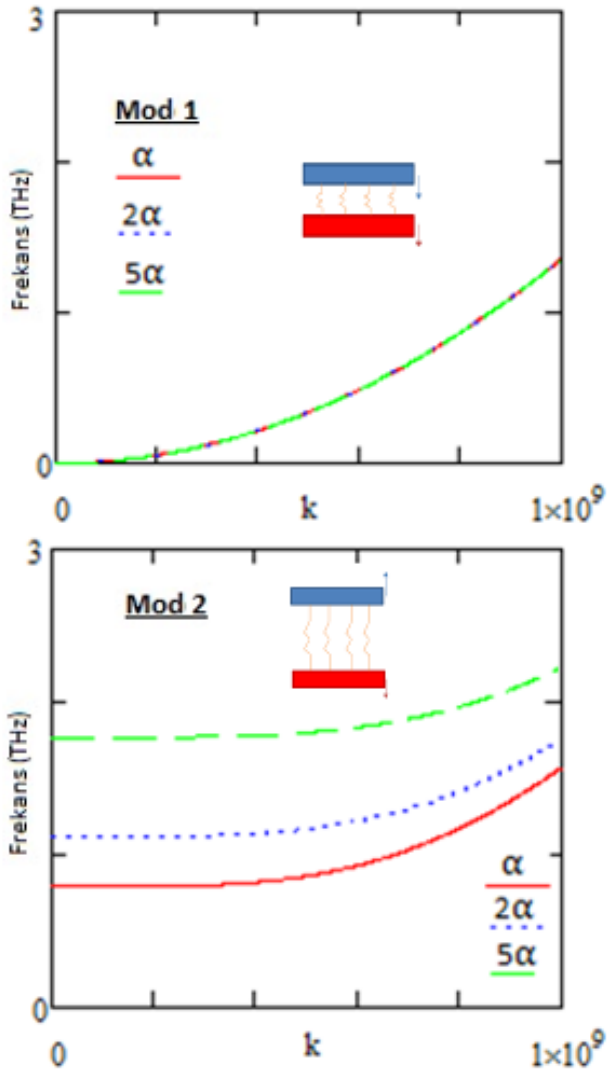


Şekil 6.8. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), μ– frekans ilişkisi. (Mr: 1/1), $k=8x10^8$



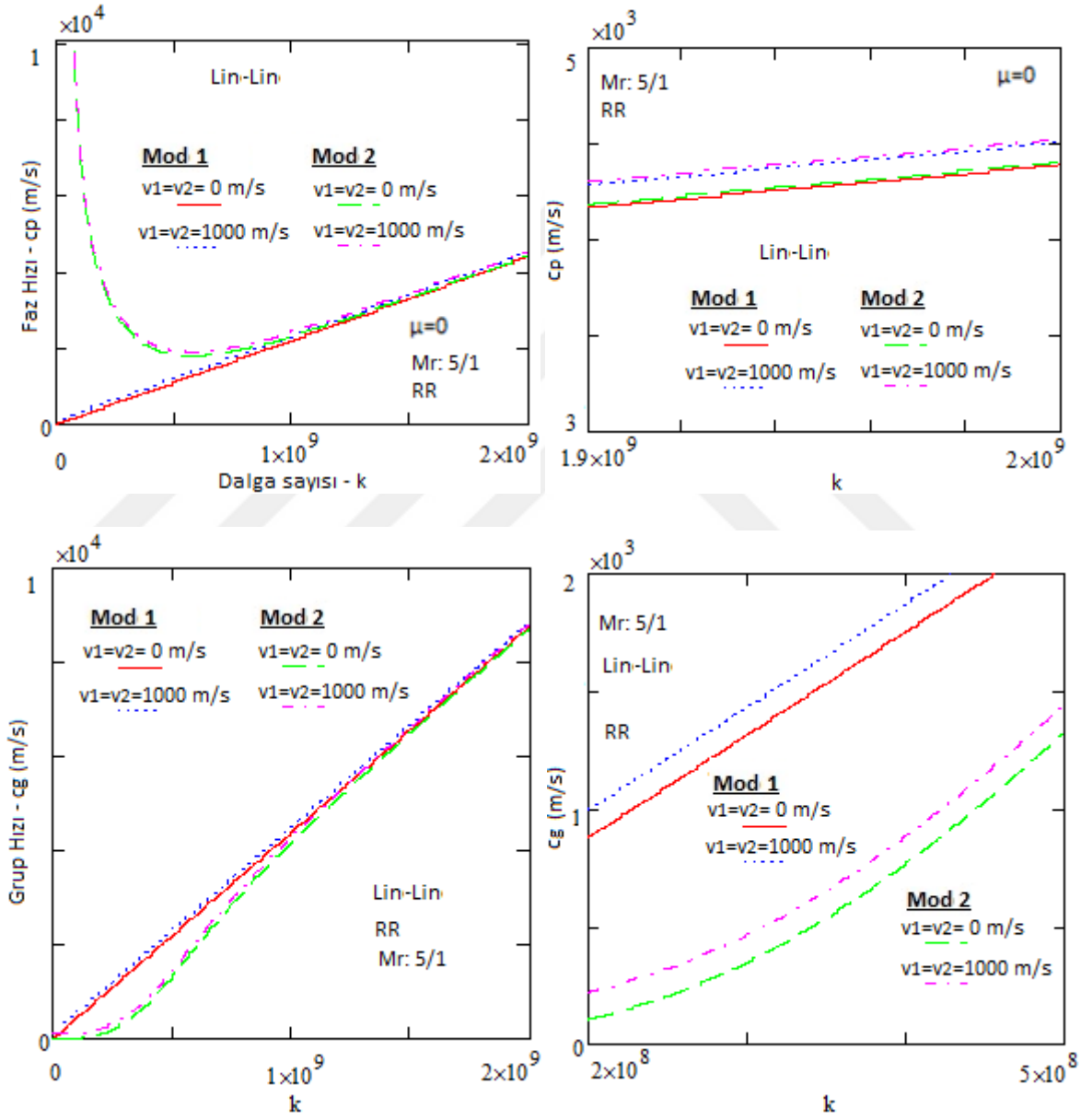
Şekil 6.9. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), μ– frekans ilişkisi. $v_1=1000$ m/s, $v_2= -1000$ m/s, $k=8x10^8$

Şekil 6.10'da α yay katsayısı artışı ile 1. Modda bir değişiklik gözlenmezken, 2. Modda α yay katsayısı artışı ile beraber artış görülmektedir. 1. Modda iki tüp titreşim hareket yönü ve genliği aynı olduğu için bütün yay katsayıları için frekans değerleri çakışık çıkmıştır. 2. Mod antifaz (zıt fazda) hareket halindedir.

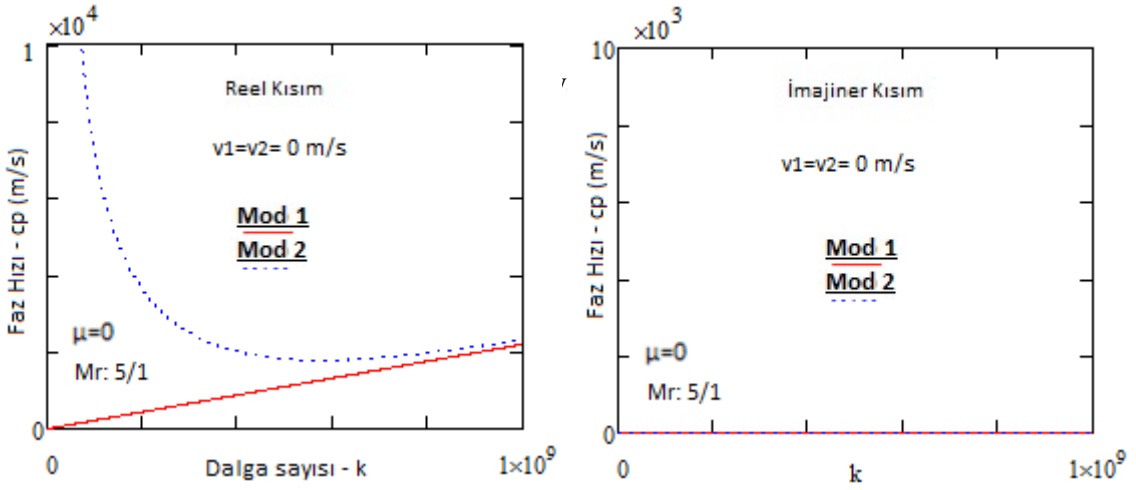


Şekil 6.10. Farklı yay sabitlerinde akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), k– frekans ilişkisi. v_1=v_2= 0 m/s.

Şekil 6.11a ve Şekil 6.18'de akışkan taşıyan bir borudaki faz ve grup hızı değişimleri verilmiştir. İlk modlar için, faz hızları artan dalga sayısı ile artmaktadır. RRF'de birinci ve ikinci modda faz hızları ZZF'lerden daha yüksektir. İkinci modlarda faz hızı c_p yaklaşık olarak k = 5x10^8'e kadar azalma eğilimi gösterir, k = 5x10^8'den daha yüksek değerler için artar. Grup hızı c_g, artmaya eğilim gösterir. RRF'de grup hızları birinci ve ikinci modda ZZF'lerden daha yüksektir.

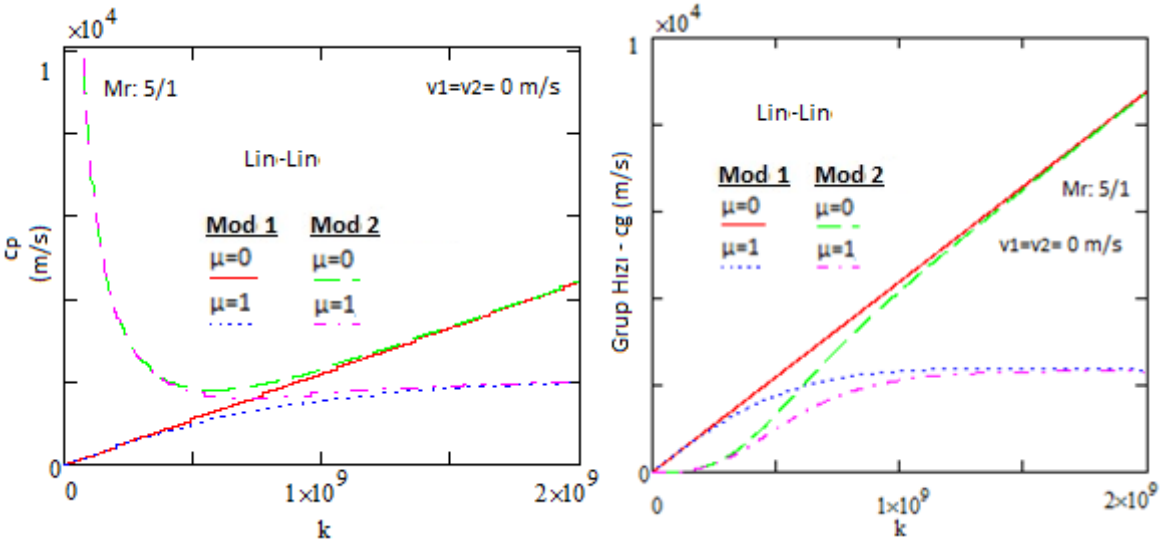


Şekil 6.11a.Birbirine yayla bağlı farklı hızlarda akışkan taşıyan FD nanotüp için Faz hızları.

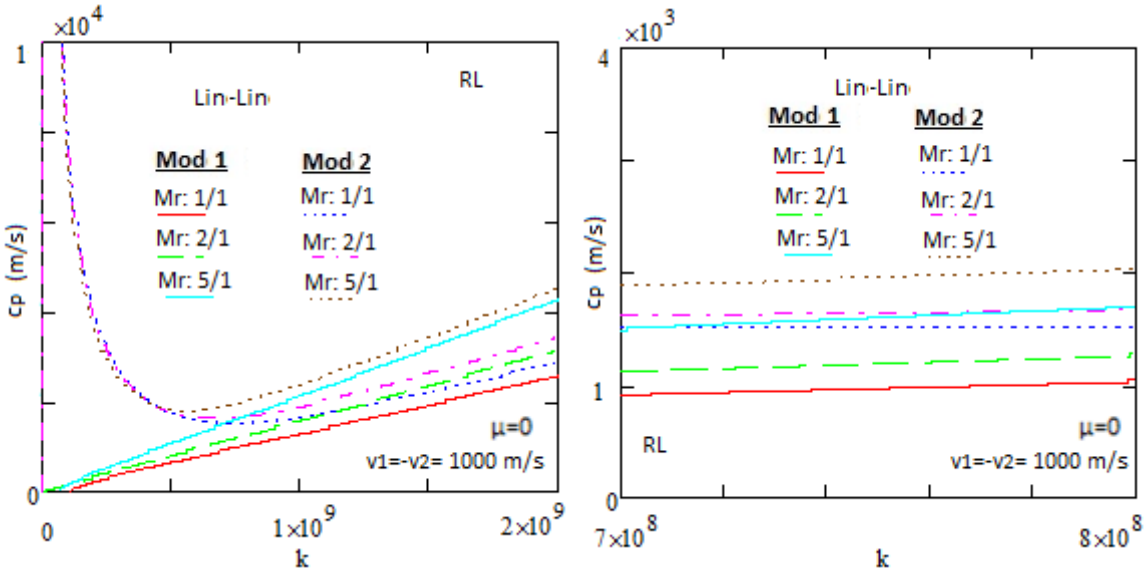


Şekil 6.11b.Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için Faz hızları.

c_p ve c_g'nin dalga boyuyla değişimi Şekil 6.12'de gösterilmiştir. c_p ve c_g hızları, yerel olmayan parametrenin artması ile azalmaktadır. Eğriler artan yerel olmayan parametrelerde birbirlerine yaklaşmaktadır. Birinci modda, μ = 0 olduğunda, eğriler doğrusal olarak artmaktadır. Şekil 6.13'te Lin.-Lin tüplerde farklı malzeme özellikleri için faz ve grup hızı dağılımları elde edilmiştir. Yüksek Mr'lerde daha yüksek frekans değerleri elde edilir.

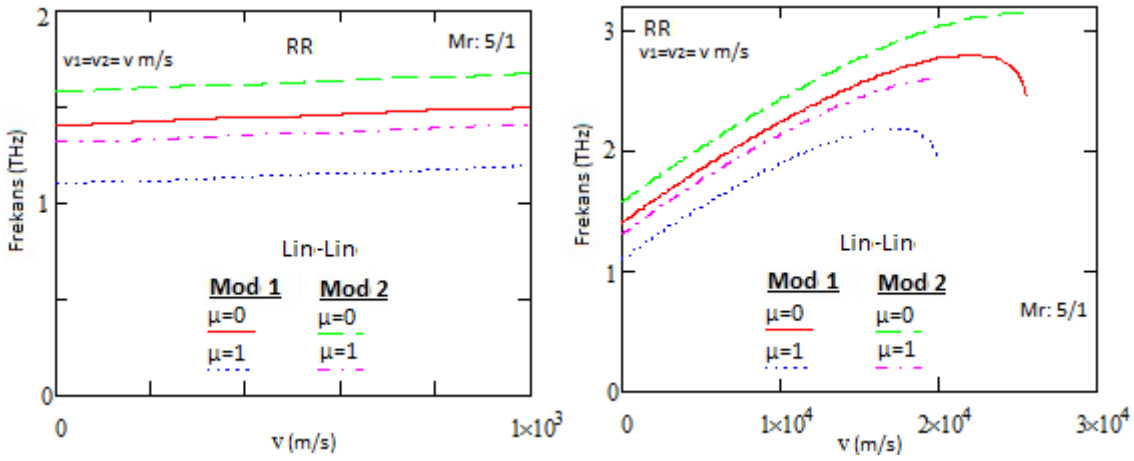


Şekil 6.12. Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için grup ve faz hızları.



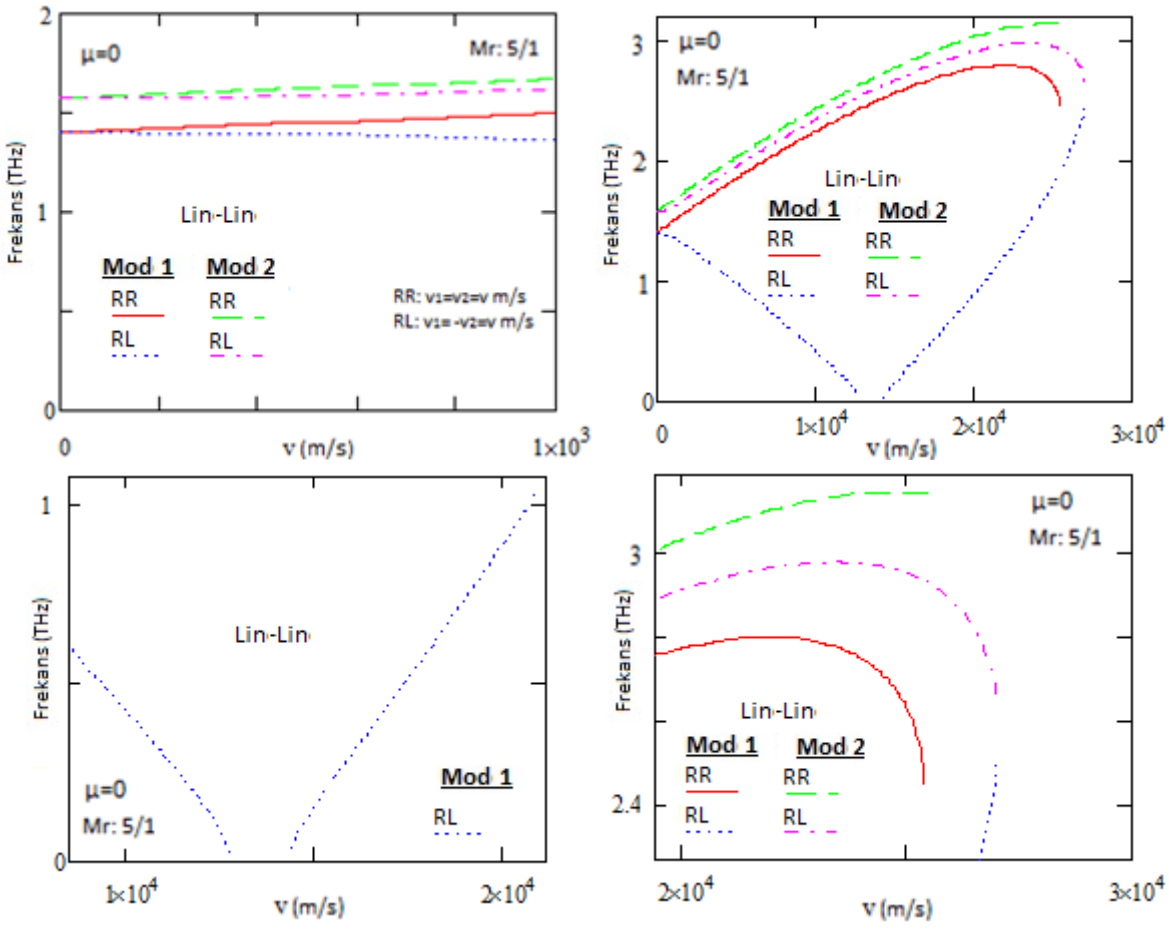
Şekil 6.13. Farklı Mr için akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüpte faz hızları.

Şekil 6.14-6.17'de, Lin.-Lin. RR akışı için, akış hızının artmasıyla frekanslar artar, ancak v= 20 km/s gibi çok yüksek hızlarda frekansların özellikleri değişir ve azalmaya başlar. RLF durumunda, akış hızının arttırılmasıyla 1. frekans değerleri hızla artar ve RRF'ye göre zıt bir şekil kazanır. Değerler v= 8-12 km/s arasında düşer ve daha sonra v=20-25 km/s aralığında 1. ve 2. frekans değerleri eşitlenir. RLF durumu içinde aynı mantık söz konusudur. Bunlara ek olarak, RRF frekansları RLF frekanslarına göre daha yüksek seyretmektedir.

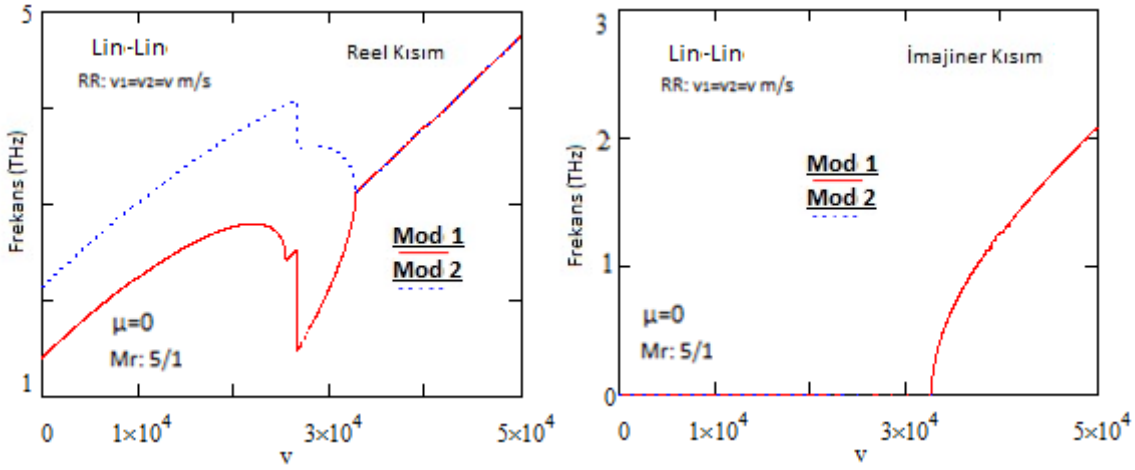


Şekil 6.14. Düşük ve yüksek hızlarda akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), $k=8x10^8$.

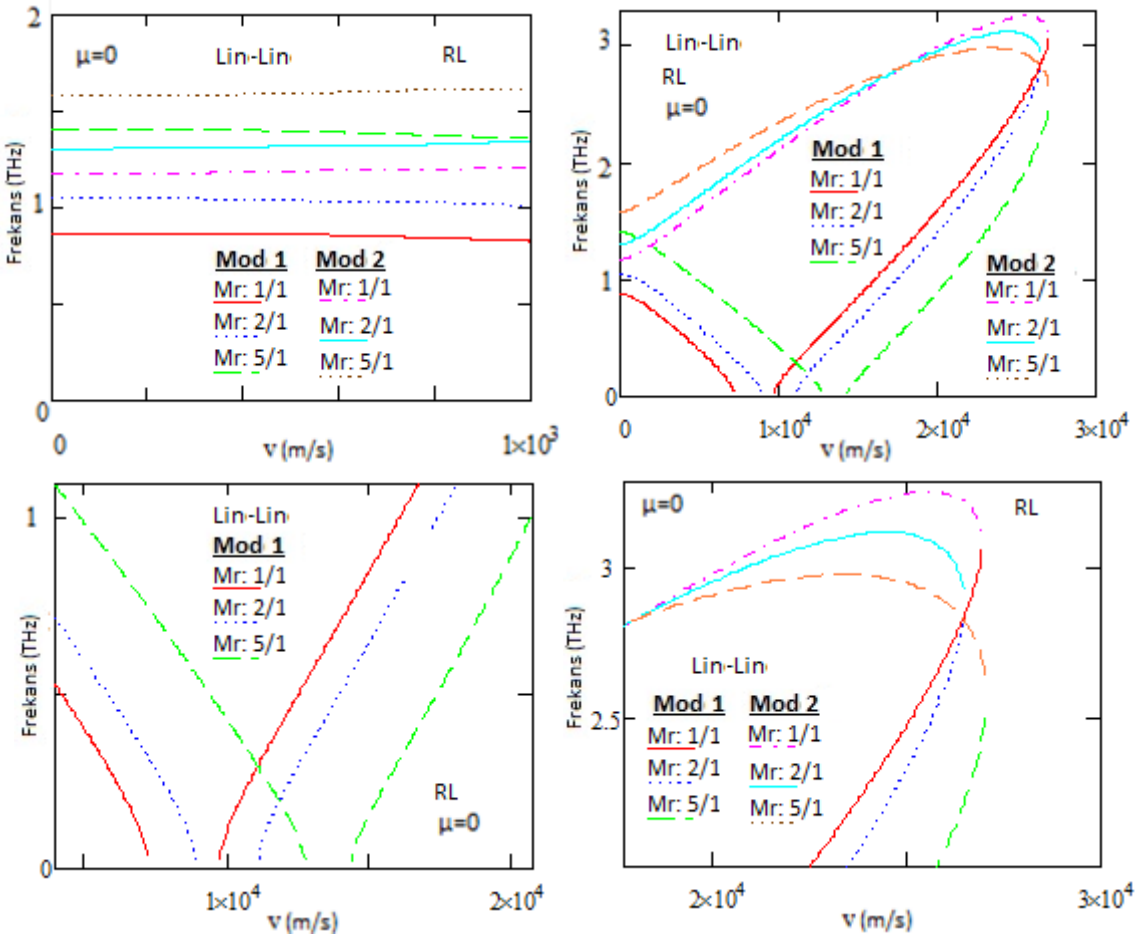
İlk frekans değerleri sıfırdan başlarken, ikinci frekans değerleri belirli bir değerden başlar, buna kesim (cut off) frekansı denir. Yüksek hızlarda, Şekil 6.15b'de sağ-sağ akışta (RRF) ve sağ-sol akış (RLF) durumunda (Şekil 6.16b) birinci frekansın sıfır olmadığı da görülmektedir. RL akış durumunda, v hızı artışıyla ilk frekans belirli bir v hızına kadar azalır (v:1200 m/s), daha sonra ilk frekans bir v aralığında (yaklaşık 1200 – 1500 m/s) sıfırlanır. Daha sonrasında tekrar artışına devam eder. Bu sıfırlandığı aralıkta, zıt yönlü akıştan dolayı sönüm etkisi meydana gelmiştir.



Şekil 6.15a. RRF ve RLF durumlarda akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), k=8x10^8.

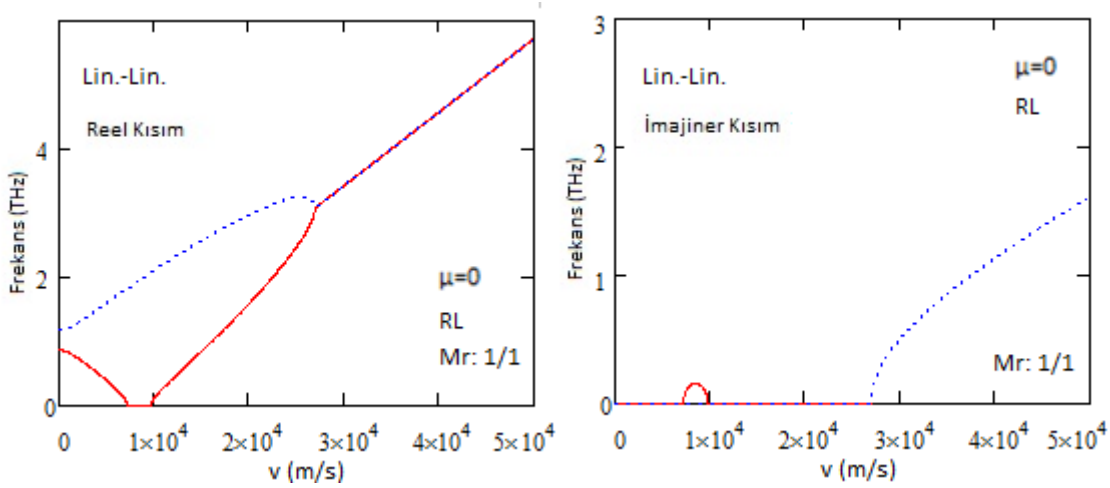


Şekil 6.15b.RRF durumda akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), k=8x10^8.

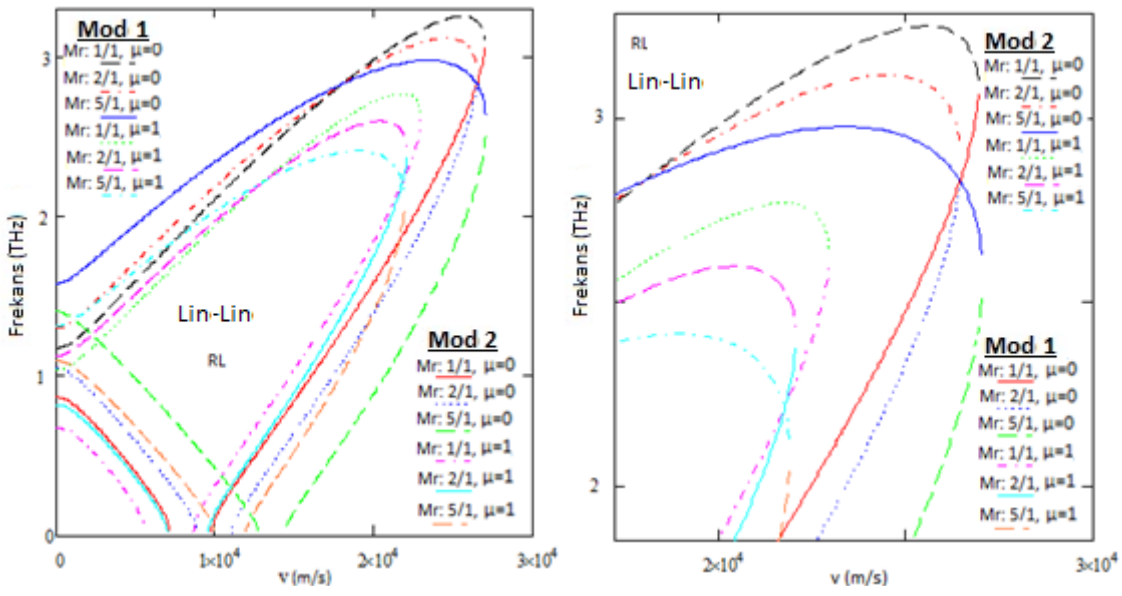


Şekil 6.16a. Değişik Mr değerlerinde akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), k=8x10^8.

Sönüm etkisinin net görüldüğü şekillerden bir tanesi de Şekil 6.16b'dır.İmajiner (sanal) kısmı incelersek, frekansın sıfırlandığı aralıkta sönüm frekansında artış meydana gelmiştir. Şekil 6.17'de ise, değişik malzeme (Mr) ve yerel olmayan elastisite parametresi (μ) özelliklerindeki değişiklikle meydana gelen frekanslar görülmektedir.



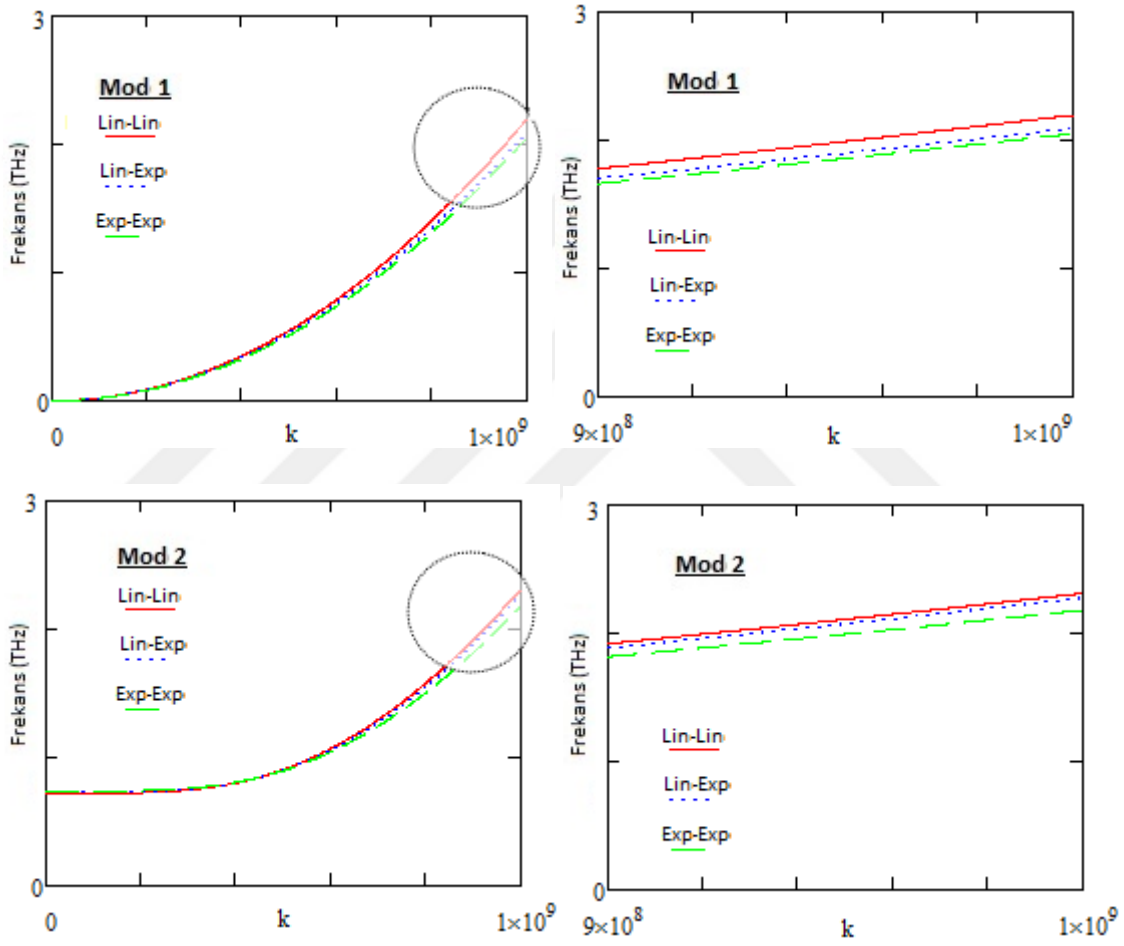
Şekil 6.16b.Akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), Mr:1/1, k=8x10^8.



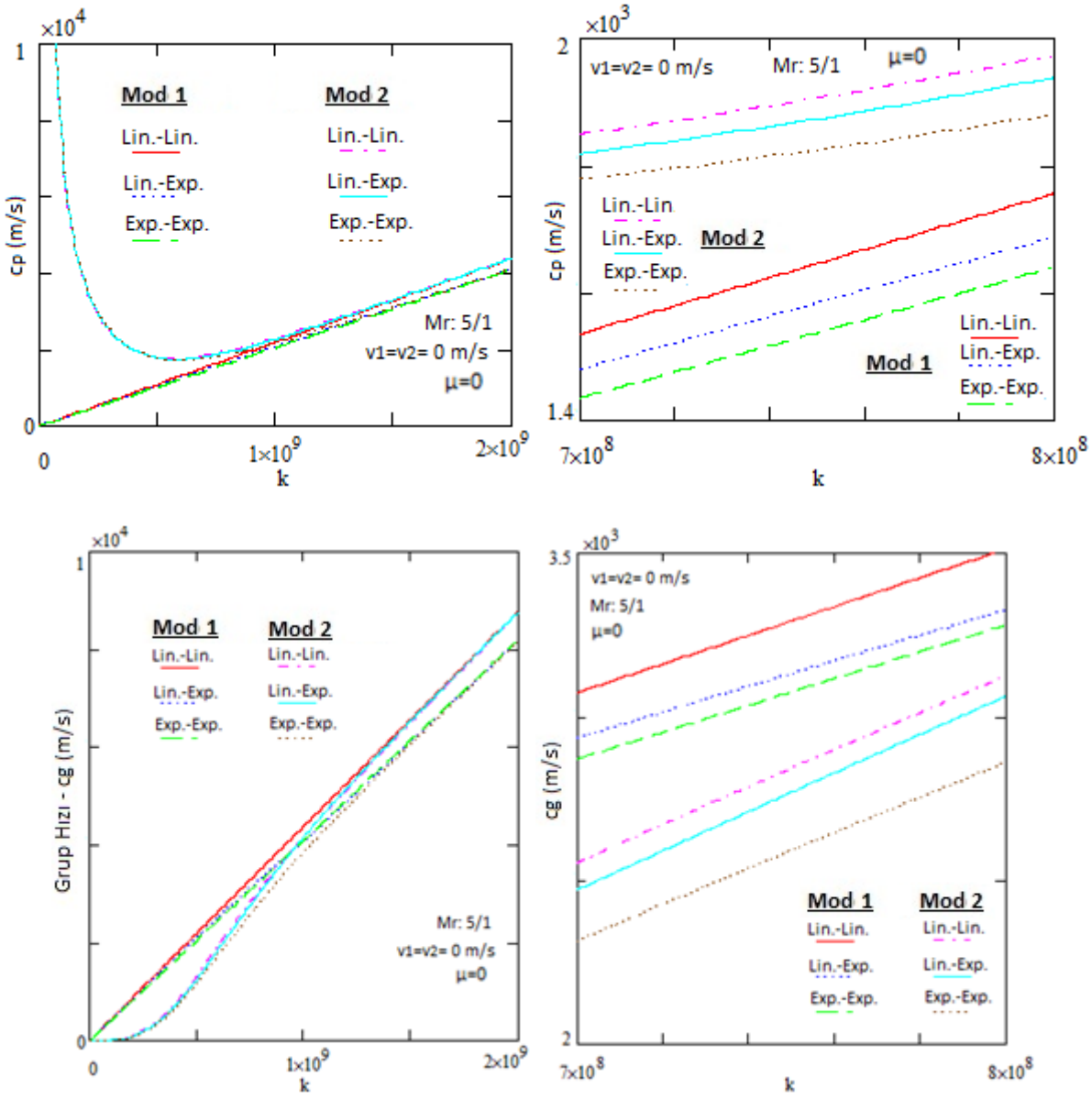
Şekil 6.17.Değişik Mr değerlerinde akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), k=8x10^8.

6.1.2.Üstel malzeme değişiminin olduğu tüp

Şekil 6.18-6.21'de, frekans değerleri, faz ve grup hızları Lin.-Lin., Lin.-Exp olarak sıralanmaktadır. Lineer durumda en yüksek faz hızı, grup hızı ve frekans değerleri gözlenir. En düşük değerler ise üstel durumda görülür. Mr:5/1 ve μ=0 için Lineer durumda, en yüksek değerleri görmekteyiz. En düşük değerler ise, Mr:1/1 ve μ=1 için, Üstel durumda gözlenmektedir.

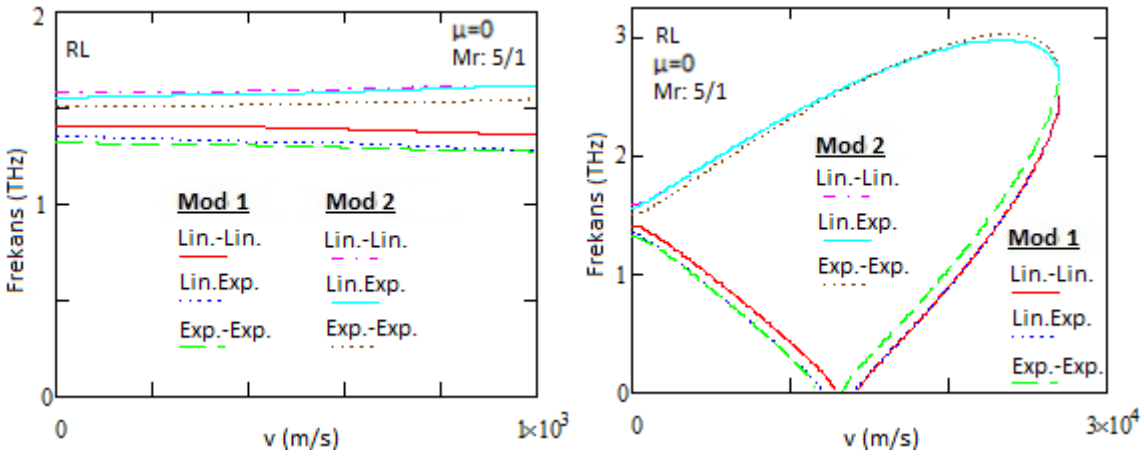


Şekil 6.18.Mr:5/1 için Lineer ve Üstel durumlar için, akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), $v_1=v_2=0$ m/s ve $k=8x10^8$.

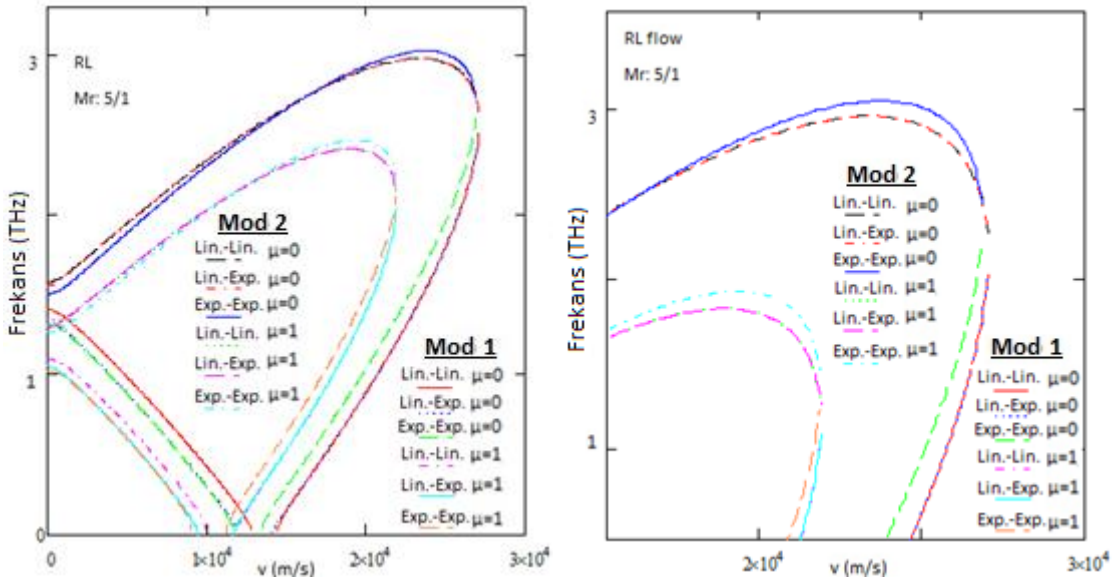


Şekil 6.19.Mr:5/1 için Lineer ve Üstel durumlar için, akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için faz ve grup hızları, $v_1=v_2=0$ m/s ve $k=8x10^8$.

Şekil 6.20 ve Şekil 6.21'de Lin.-Lin., Lin.-Exp. ve Exp.-Exp'de RL akışı için, en yüksek frekanslar Lineer durumda, en düşük frekanslar Üstel durumda elde edilir.



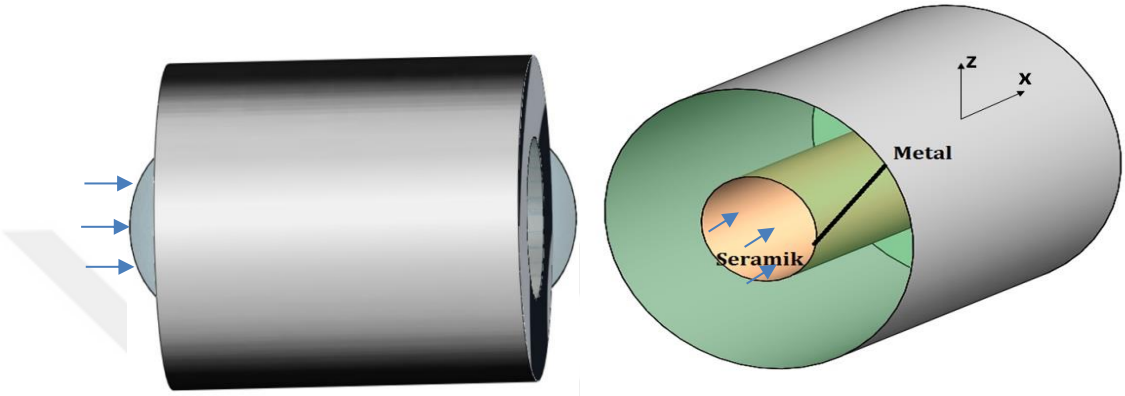
Şekil 6.20.Mr:5/1 için Lineer ve Üstel durumlar için, akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD tüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), RL ve k=8x10^8.



Şekil 6.21.Mr:5/1 için Lineer ve Üstel durumlar için, akışkan taşıyan birbirine yayla bağlı FD nanotüp için yayınım eğrisi (dalga yayılımı), RL ve k=8x10^8.

6.2. Akışkan Taşıyan Boruların Enine Titreşimi Sonuçları

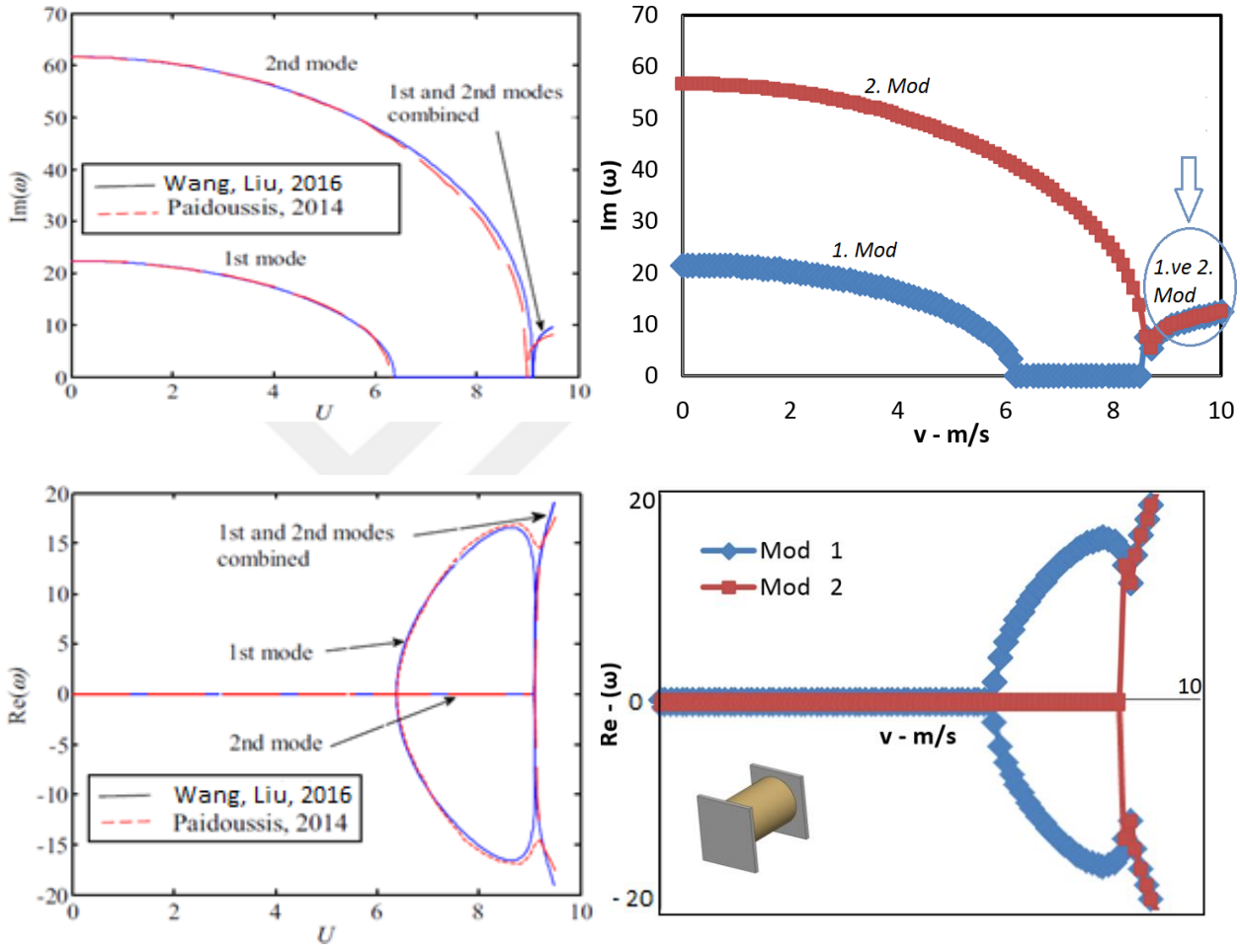
Bu kısımda, fonksiyonel derecelendirilmiş akışkan taşıyan borunun titreşim davranışı incelenmiştir. Burada, sınır koşulları, basit ve ankastre destekler olarak kabul edilmiştir. Ayrıca, termal etkiler de göz önüne bulundurulmuştur.



Şekil 6.22.Fonksiyonel derecelendirilmiş boruda akış

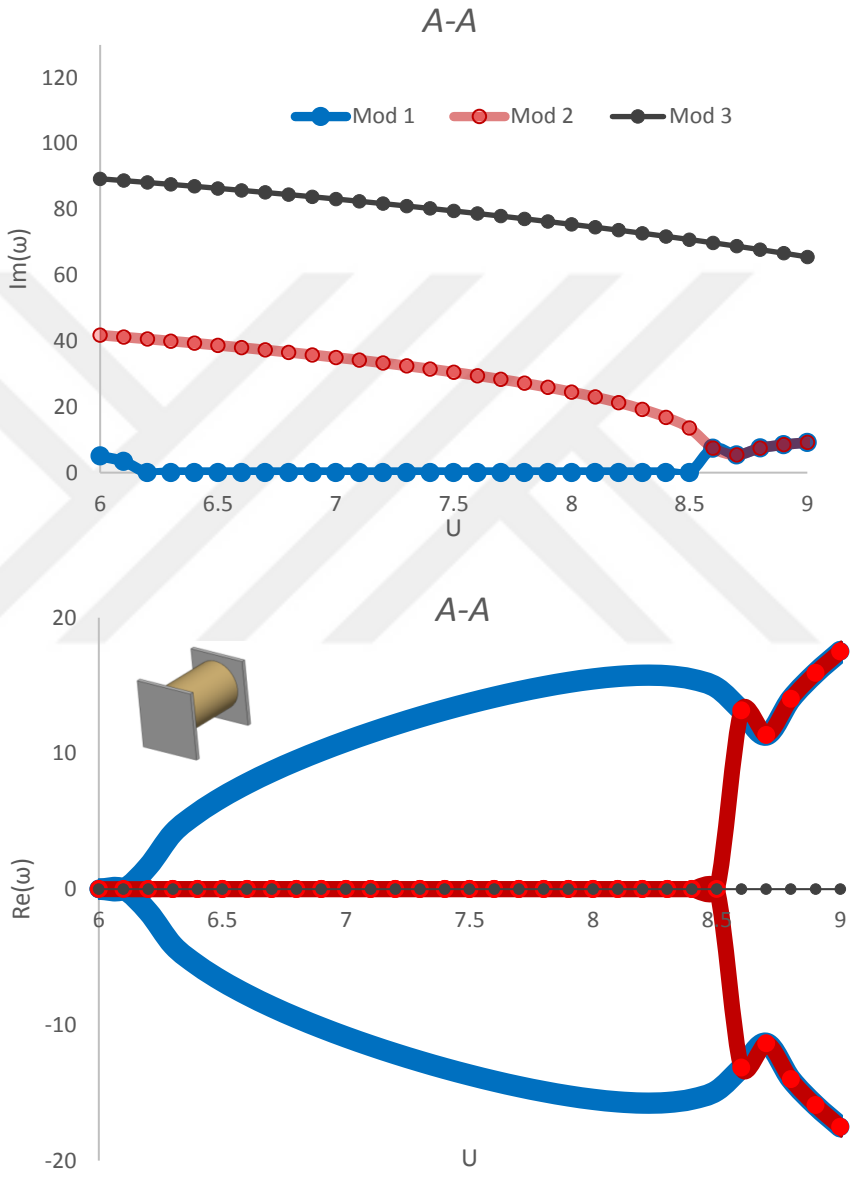
Bu kısımda, malzemenin fonksiyonel değişimi ve akışkan hızının artmasıyla oluşan frekanslar araştırılmıştır. Sabit kabul edilen akışkan hızları 0 ile 10 arasında değişmektedir. Malzeme parametresi, 1/1 ve 2/1 fonksiyonel derecelendirme oranlarını göstermektedir. Burada, frekansın reel (gerçel) ve imajiner (sanal) kısımları, yani titreşim frekansı ve sönüm etkisi birbirine zıt bir karakteristikte davranır. Yüksek hızlarda, modlar arasında geçiş veya çakışmalar meydana gelmektedir. Ayrıca, tüp fonksiyonel derecelendirilmiş olarak tasarlanacaksa, artan malzeme parametresine paralel olarak frekans değerlerinin de artacağı söyleyebiliriz.

Şekil 6.23'te, A-A bir boru için, daha önce yapılmış olan çalışmalarla kıyaslama yapılmıştır (Wang & Liu, 2016 ve Paidoussis, 2014). Aynı veriler kullanılarak yapılan çalışmada, aynı sonuçlar bu çalışma için de sağlanmıştır. Bu çalışmada, akışkan taşıyan fonksiyonel derecelendirilmiş boruların titreşimi detaylı olarak incelenecektir.



Şekil 6.23. Akışkan taşıyan Ankastre- Ankastre (A-A) tüpün ilk 2 modunun kıyaslanması (*β:0.1 - Mr:1/1*).

Şekil 6.24'te, akışkan taşıyan borunun U: 6 – 9 aralığındaki hızlarında titreşim davranışı incelenmiştir. Burada, hızın artışı ile beraber 3. modda azalma, 1. Modda ise akışkan hızı artışıyla sönümde artış gözlenmektedir. İmajiner kısım titreşim frekansını, reel kısım ise sönüm etkisini göstermektedir. 1. ve 2. modda U: 8.7 hızında modların birleştiği görülmüştür.

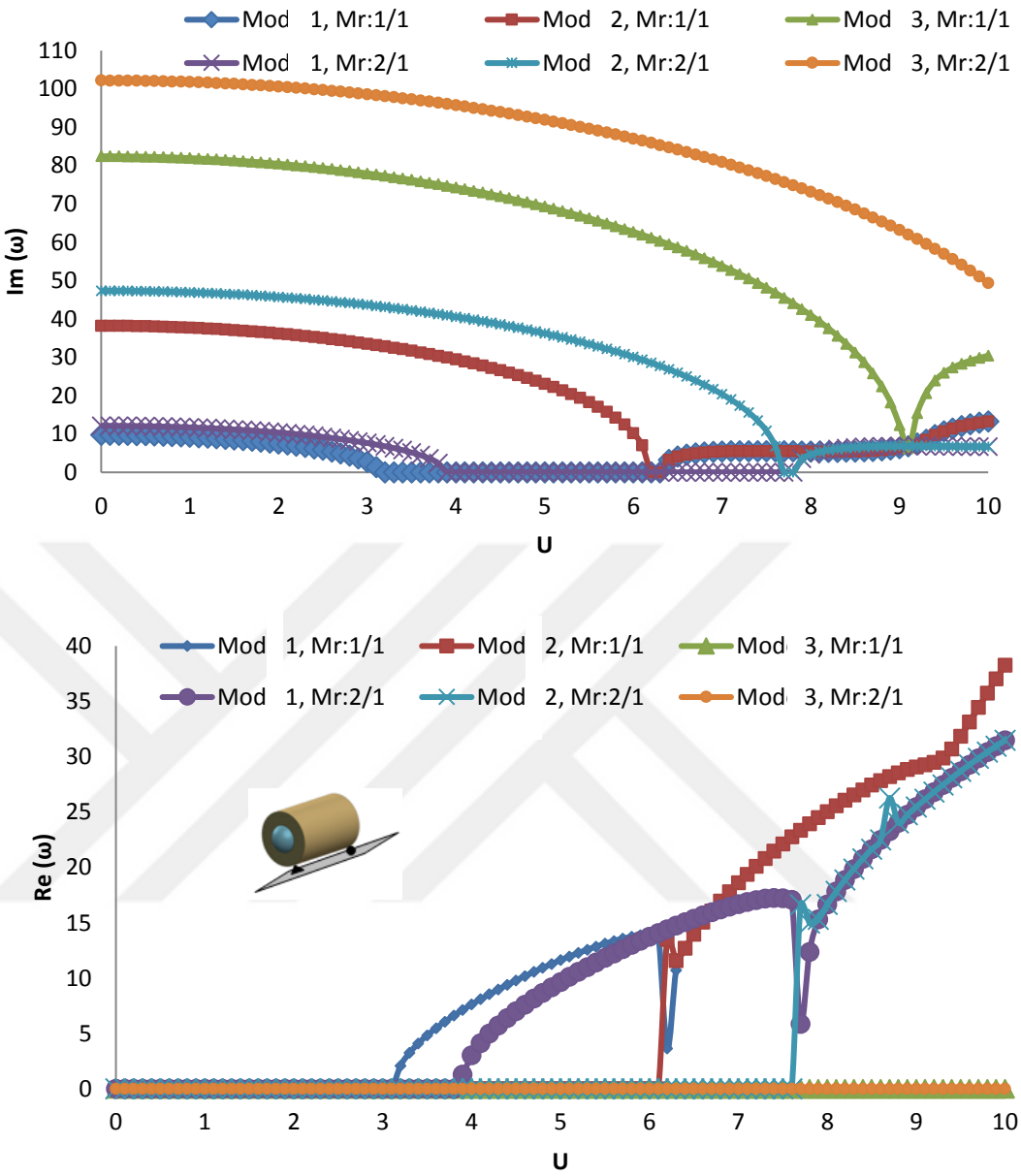


Şekil 6.24. A-A tüpün ilk 3 modunun kıyaslanması (*β:0.1 - Mr:1/1*)

Şekil 6.25'te ilk üç frekansın akışkan hızı ile değişimi verilmiştir. Frekansın imajiner kısmı titreşim frekansına karşı gelirken imajiner kısmı sönüm etkisini göstermektedir. Akışkan hızının artmasıyla frekanslar azalarak belirli bir kritik hız değerinde sıfır değerine ulaşmaktadır. Burada kararlılık kaybolarak burkulma kararsızlığı oluşarak titreşim frekansı sıfırlanır (birinci mod için 3.14 değeri elde edilmiştir). Akışkan hızının artmasıyla birinci frekans belirli bir değerden sonra (burada 6.28) tekrar sıfırdan farklı olur. Burada birinci ve ikinci modlar birleşerek mod birleşmesi (mode coupling) oluşturur. Bu bölgedeki mod biçimi birinci ve ikinci modların süperpozisyonundan oluşur. Bu şekle göre, reel kısım ve imajiner kısım birbirini tamamlar şekilde davranmaktadır. İmajiner kısımdaki titreşim frekansı azaldığında, reel kısımdaki sönüm frekansı artar. Mr: 1/1 için U:3.14'de imajiner kısım sıfırlanırken, reel kısım bu hız değerinden sonra artışa geçmektedir. U:6.28'de ve U:9.42'de yine aynı durum tekrarlanmaktadır.

Mr: 2/1 için U:4 civarında imajiner kısım sıfırlanırken, tamamlayıcısı olan reel kısım bu hız değerinden sonra artışa geçmektedir. Malzeme parametresinin artışı ile 1. mod frekansını sıfırlanışı ancak U:4 civarında oluşmaktadır. Ayrıca, oluşan frekans değerleri bu durum için daha yüksek değerde seyretmektedir.

Reel kısımdaki sönüm değerleri şekillerde, v eksenine göre simetrik olduğu için, daha sonraki şekillerde (Şekil 6.25 ve sonrasında) negatif gösterim kullanılmayacaktır.



Şekil 6.25. Değişik malzeme parametrelerinde akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1 - Mr 2/1, β:0.1).

Şekil 6.25'i, Şekil 6.26 ve Şekil 6.27'de ve Çizelge3 ve Çizelge 4'te daha detaylı bir şekilde görebiliriz.

Çizelge 3 ‘te, basit destekli tüp için frekans değerleri verilmektedir. Çizelge 4’te ise, FD basit destekli üniform (Mr:1/1) tüp için frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge 3. Akışkan taşıyan basit destekli tüpün titreşim frekansları (Mr:1/1 ve β:0.1).

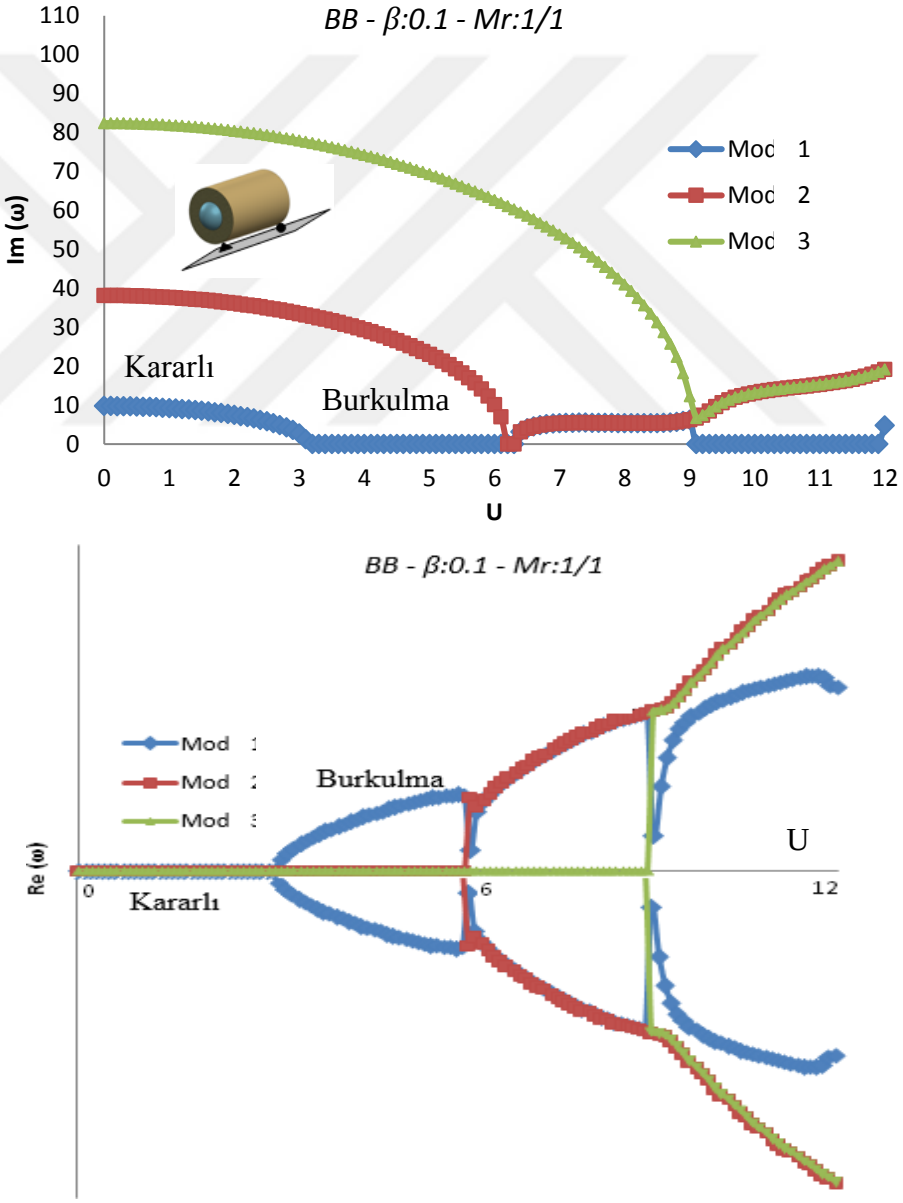
B - B	**Frekansın Sanal Kısmı**			**Frekansın Gerçel Kısmı**		
U	**ω_1**	**ω_2**	**ω_3**	**ω_1**	**ω_2**	**ω_3**
0	9.788	38.196	82.442	0	0	0
1	9.266	37.703	81.957	0	0	0
2	7.495	36.186	80.482	0	0	0
3	2.749	33.518	77.967	0	0	0
4	0	29.399	74.309	7.622	0	0
5	0	23.049	69.333	11.623	0	0
6	0	10.17	62.724	13.913	0	0
7	5.383	5.383	53.841	18.615	18.615	0
8	5.382	5.382	40.985	25.045	25.045	0
9	6.249	6.249	12.303	29.08	29.08	0
10	0	13.216	13.216	30.419	38.262	38.262
11	0	15.358	15.358	34.438	48.875	48.875
12	4.81	19.173	19.173	33.831	56.864	56.864

Çizelge 4. Akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün titreşim frekansları (Mr:2/1ve β:0.1).

B - B	Frekansın Sanal Kısmı			Frekansın Gerçel Kısmı		
U	**ω_1**	**ω_2**	**ω_3**	**ω_1**	**ω_2**	**ω_3**
0	12.131	47.339	102.176	0	0	0
1	11.713	46.942	101.784	0	0	0
2	10.365	45.731	100.6	0	0	0
3	7.637	43.645	98.598	0	0	0
4	0	40.557	95.727	3.033	0	0
5	0	36.22	91.912	9.648	0	0
6	0	30.086	87.03	13.725	0	0
7	0	20.369	80.887	16.685	0	0
8	4.657	4.657	73.153	16.643	16.643	0
9	6.821	6.821	63.184	25.458	25.458	0
10	6.65	6.65	49.383	31.488	31.488	0
11	7.267	7.267	23.973	35.658	35.658	0
12	0	14.772	14.772	34.911	42.411	42.411

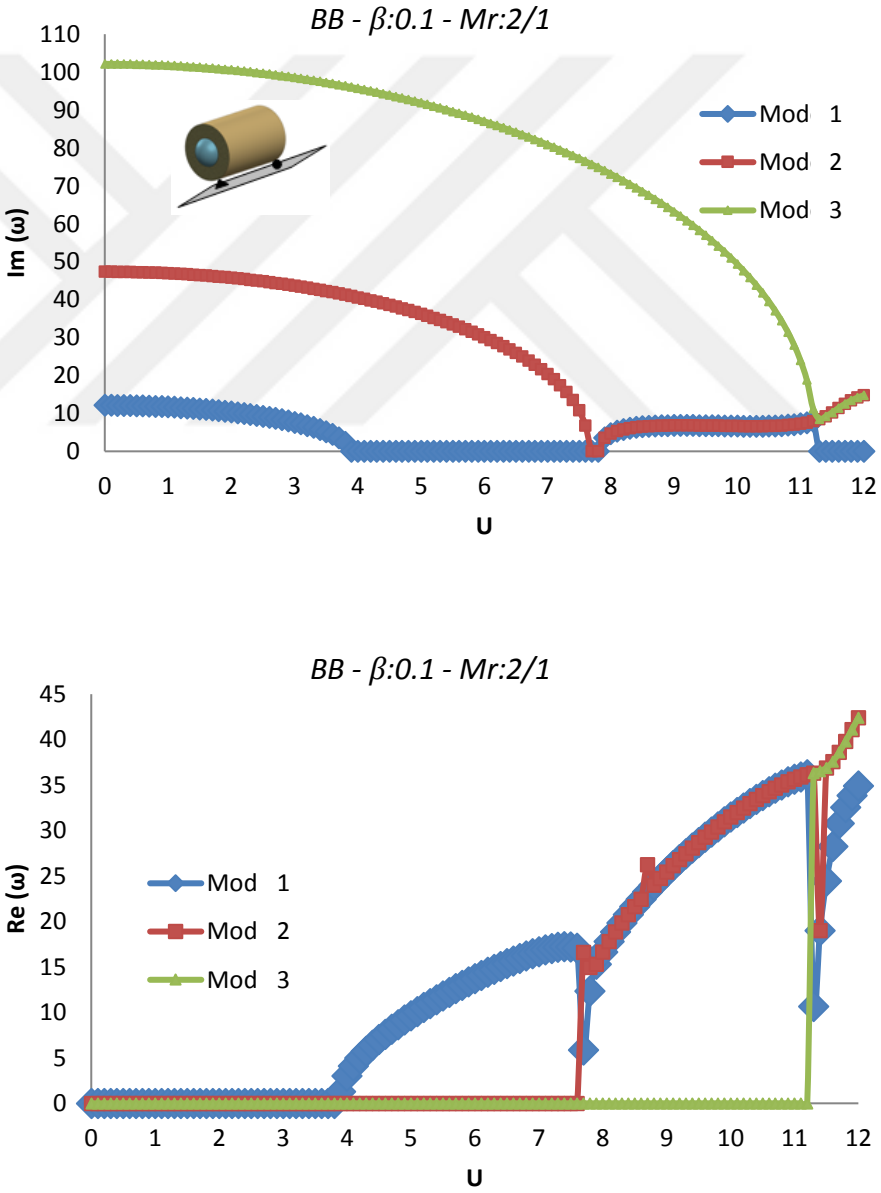
Basit destekli üniform bir boruda akış Şekil 6.26'da verilmektedir. Burada, U akışkan hızı 3.14'e ulaşıncaya dek kararlılık sürmekte, bu kritik değerden sonra stabilite kaybolmakta ve kiriş burkulmaktadır. Bu hal akışkan hızının 6.28'e ulaşmasına değin sürmektedir. Akışkan hızı 6.28 değerini geçtikten sonra 1. ve 2. mod birleşmesi meydana gelmektedir.

Sönüm kısmında yani Reel kısımda, pozitif ve negatif değerler simetrik olarak bulunmasına karşın, diğer grafiklerde sadece pozitif kısım gösterilecektir. Bu durum, istisna olarak Şekil 6.26'da gösterilmiştir. Bu şekilde hızın yaklaşık 9 değerini almasından sonra ikinci ve üçüncü modlar birleşmektedir.



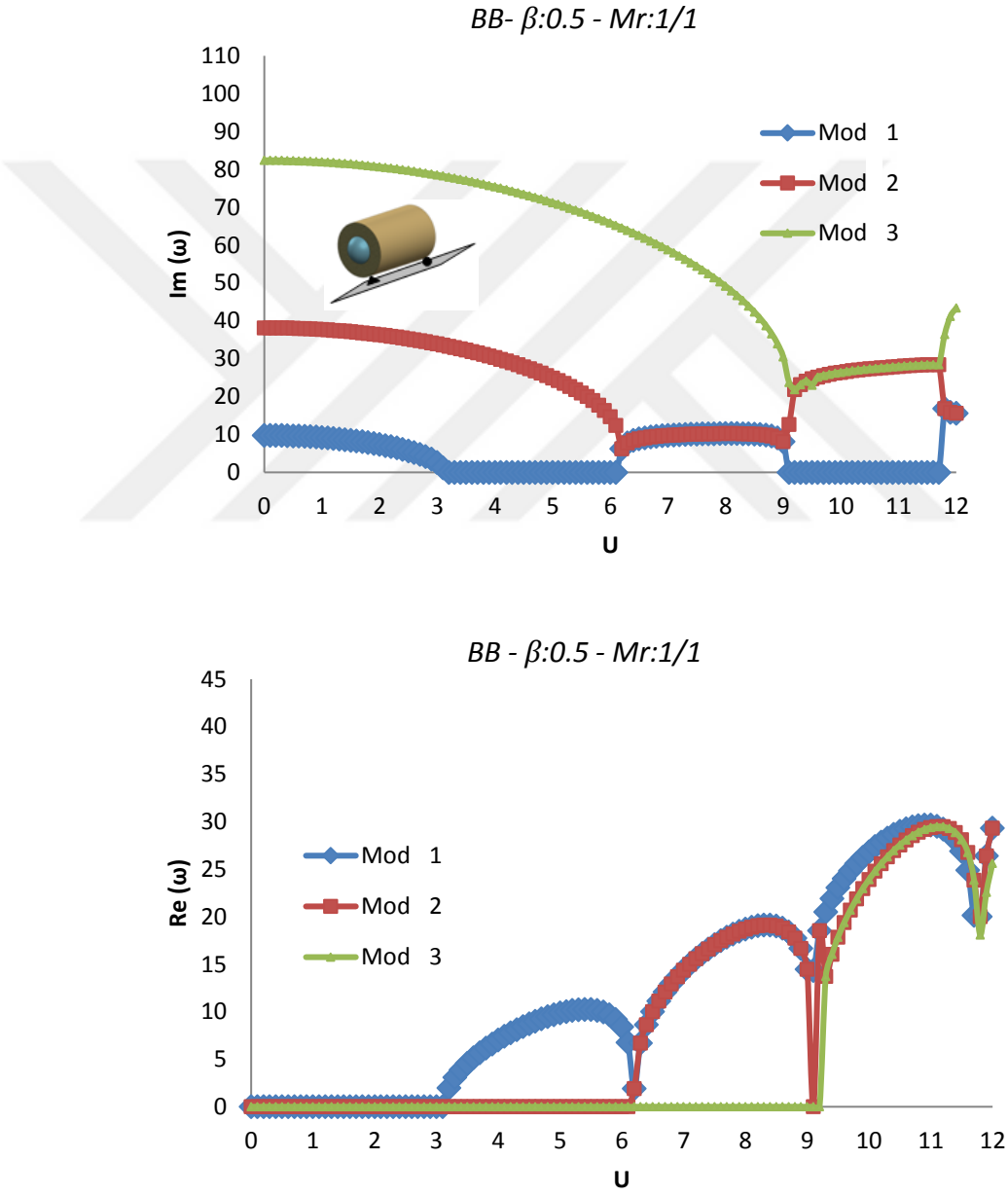
Şekil 6.26. Akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1).

Basit destekli üniform olmayan fonksiyonel derecelendirilmiş bir boruda akış Şekil 6.27'de verilmektedir. Burada, U akışkan hızı 4 civarında bulduğunda stabilite kaybolmaktadır. İzotrop duruma göre kritik akış hızının arttığı gözlenmektedir. Akışkan hızı 7.8'i geçtikten sonra 1. ve 2. mod birleşmesi meydana gelmektedir. Şekil 6.27'den itibaren, Re(ω) kısmı simetrik olduğu için, bu çalışmada sadece pozitif kısımlar gösterilecektir. Mr: 1/1 için v: 3.14'te imajiner kısım sıfırlanırken, Mr: 2/1 için U:4 civarında imajiner kısım sıfırlandığı, dolayısıyla, tamamlayıcısı olan reel kısım bu hız değerinden sonra artışa geçtiği görülmektedir.



Şekil 6.27. Akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 2/1, β:0.1).

Basit destekli üniform bir boruda akış Şekil 6.28'de verilmektedir. Burada, U akışkan hızı 3.14 civarında bulduğunda stabilite kaybolmaktadır. Akışkan hızı 6.28'i geçtikten sonra 1. ve 2. mod birleşmesi meydana gelmektedir. Şekil 6.26'dan farkı, akışkanın yoğunluğu (β) daha fazla alındığından boyutsuz frekanslar Şekil 6.25'e göre daha düşük çıkmaktadır. Dolayısıyla, akışkan miktarının artışıyla, frekansların azaldığı gözlemlenebilmektedir.

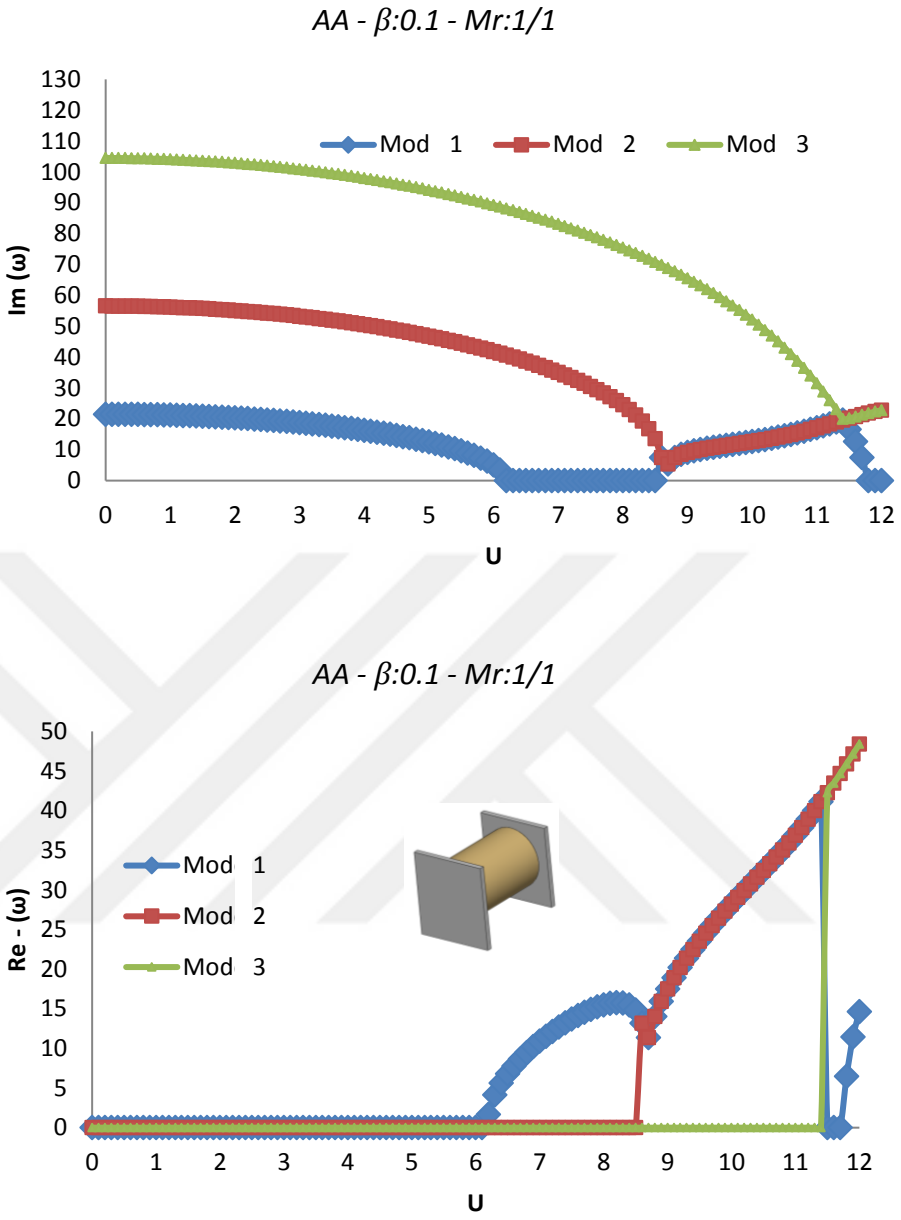


Şekil 6.28. Akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.5).

Ankastre destekli üniform bir boruda akış Şekil 6.29'da verilmektedir. Burada, U akışkan hızı 6.28 değerinde iken stabilite kaybolmaktadır. Akışkan hızı 8.7'i geçtikten sonra 1. ve 2. mod birleşmesi meydana gelmektedir. Ayrıca Şekil 6.28'de, imajiner kısımdaki titreşim frekansı azaldığında, reel kısımdaki sönüm frekansının arttığı gözlenmiştir. Çizelge 5'te, ankastre-ankastre destekli tüp için frekans değerleri verilmektedir.

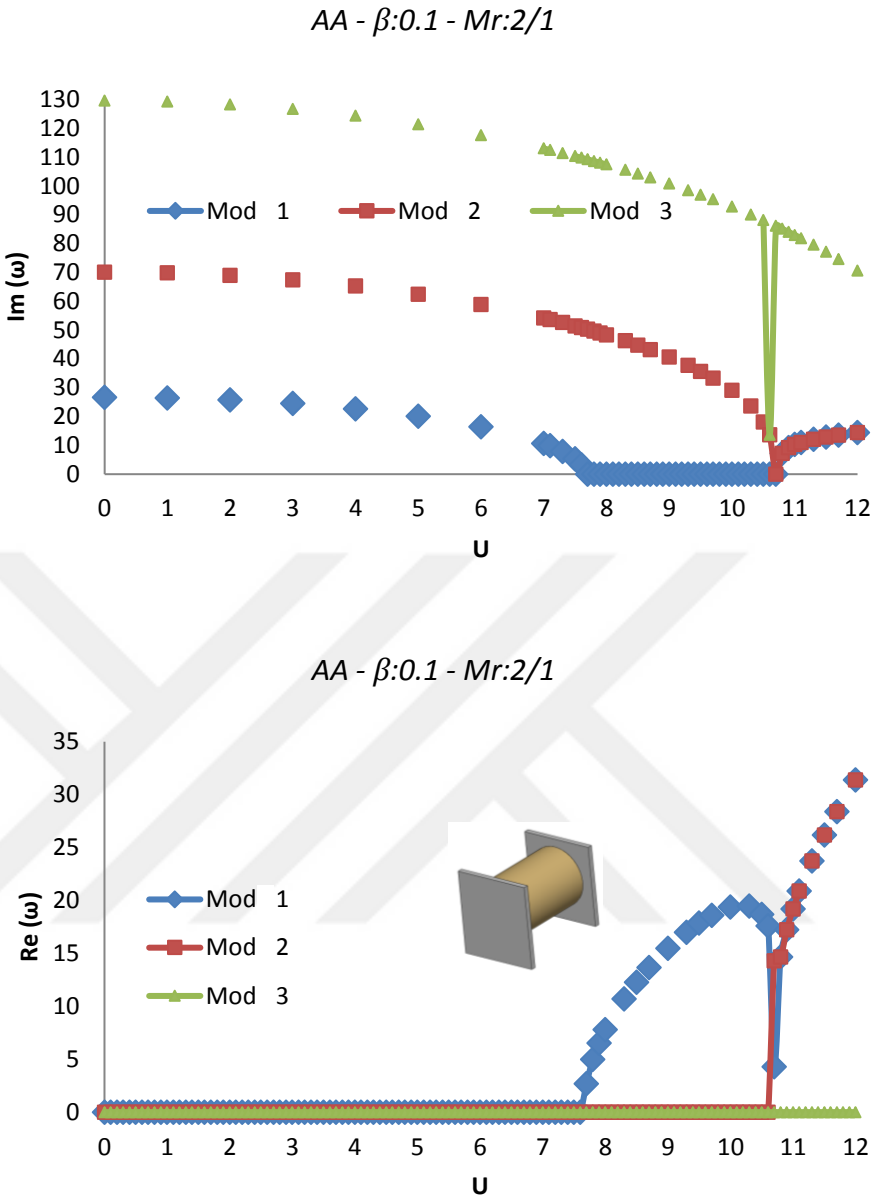
Çizelge 5. Akışkan taşıyan ankastre - ankastre destekli tüpün titreşim frekansları (Mr:1/1 ve β:0.1).

A - A	**Frekansın Sanal Kısmı**			**Frekansın Gerçel Kısmı**		
U	**ω_1**	**ω_2**	**ω_3**	**ω_1**	**ω_2**	**ω_3**
0	21.494	56.568	104.524	0	0	0
1	21.207	56.206	104.13	0	0	0
2	20.32	55.107	102.938	0	0	0
3	18.75	53.23	100.923	0	0	0
4	16.303	50.497	98.038	0	0	0
5	12.503	46.771	94.207	0	0	0
6	5.04	41.799	89.313	0	0	0
7	0	35.024	83.17	10.894	0	0
8	0	24.52	75.461	15.489	0	0
9	9.166	9.166	65.579	17.515	17.515	0
10	12.599	12.599	52.13	28.194	28.194	0
11	17.138	17.138	31.512	36.879	36.879	0
12	0	22.842	22.842	14.612	48.39	48.39



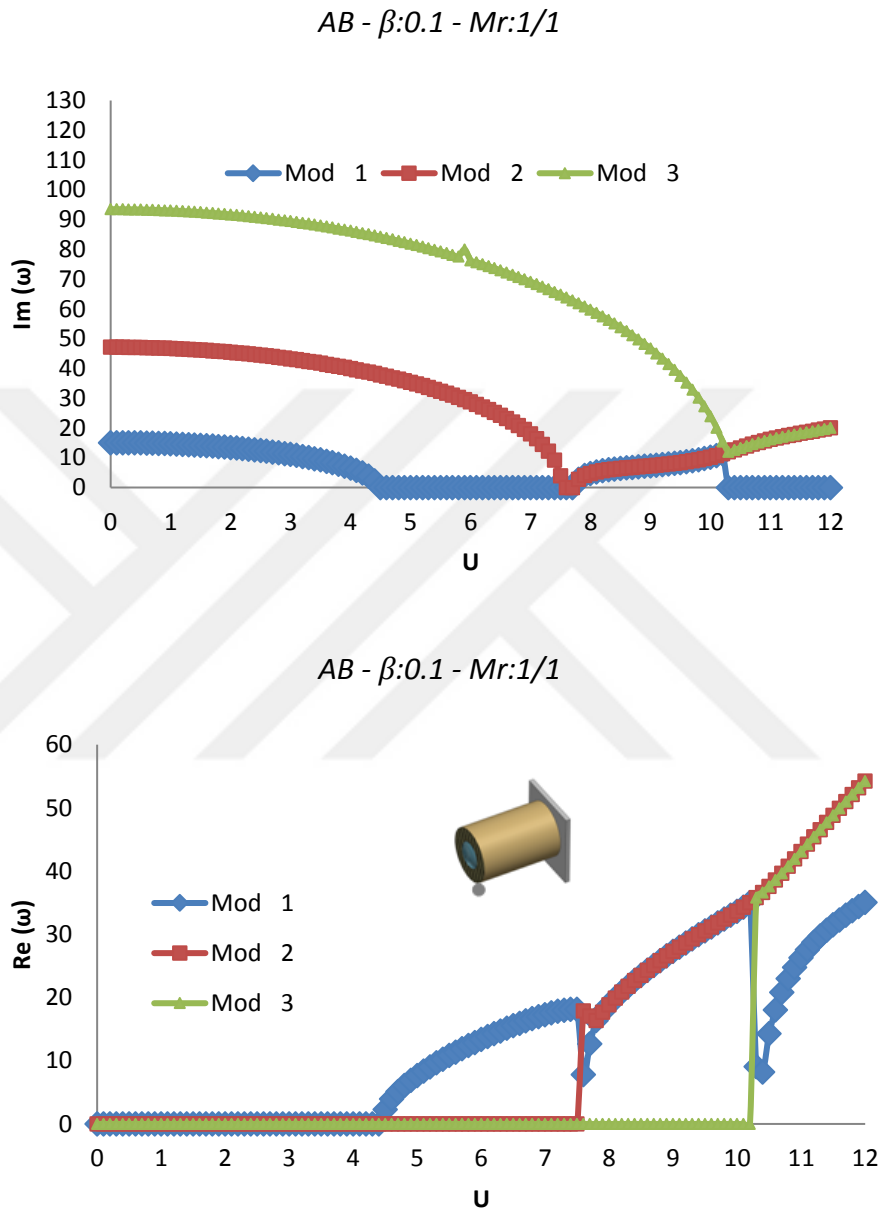
Şekil 6.29. Akışkan taşıyan ankastre destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1).

Ankastre destekli üniform olmayan fonksiyonel derecelendirilmiş bir boruda akış, Şekil 6.30'da verilmektedir. Burada, U akışkan hızı 7.8 civarında bulduğunda stabilite kaybolmaktadır. Akışkan hızı 10.8 'i geçtikten sonra 1. ve 2. mod birleşmesi meydana gelmektedir.



Şekil 6.30. Akışkan taşıyan ankastre destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 2/1, β:0.1).

Ankastre-Basit destekli üniform bir boruda akış, Şekil 6.31'de verilmektedir. Burada, U akışkan hızı 4.5 civarında bulduğunda stabilite kaybolmaktadır. Akışkan hızı 7.7'yi geçtikten sonra 1. ve 2. mod birleşmesi meydana gelmektedir.



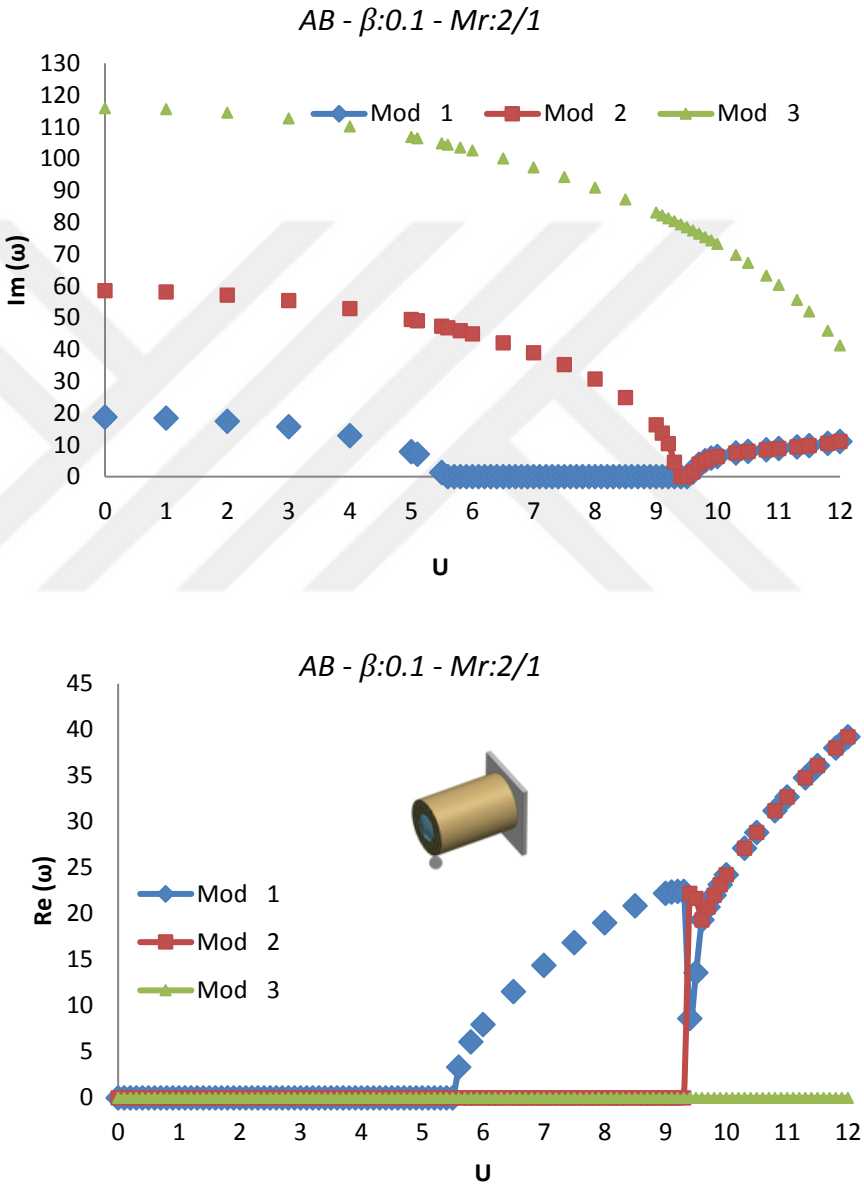
Şekil 6.31. Akışkan taşıyan ankastre-basit destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1).

Çizelge 6’da, ankastre-basit destekli tüp için frekans değerleri verilmektedir.

Çizelge 6. Akışkan taşıyan ankastre basit destekli tüpün titreşim frekansları (Mr:1/1 ve β:0.1).

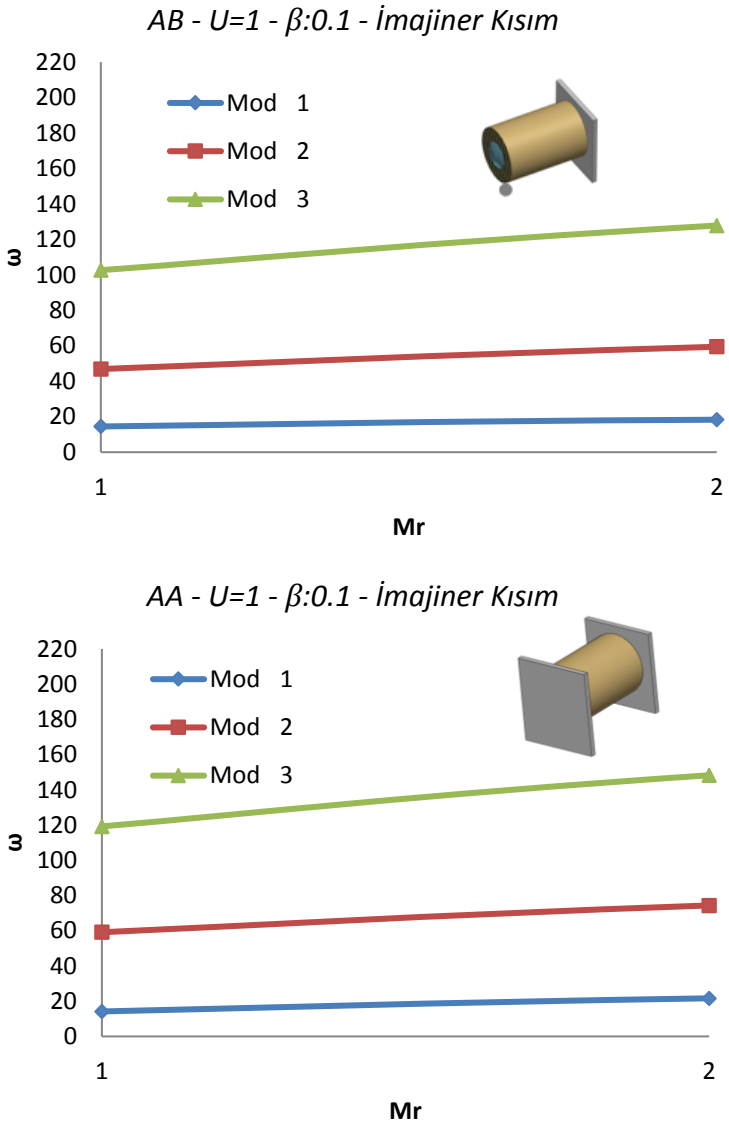
A - B	**Frekansın Sanal Kısmı**			**Frekansın Gerçel Kısmı**		
U	**ω_1**	**ω_2**	**ω_3**	**ω_1**	**ω_2**	**ω_3**
0	15.076	47.154	93.496	0	0	0
1	14.688	46.734	93.06	0	0	0
2	13.456	45.455	91.74	0	0	0
3	11.109	43.247	89.502	0	0	0
4	6.566	39.973	86.277	0	0	0
5	0	35.36	81.955	7.664	0	0
6	0	28.789	76.355	13.354	0	0
7	0	18.03	69.166	17.28	0	0
8	4.75	4.75	59.781	18.815	18.815	0
9	7.307	7.307	46.719	27.264	27.264	0
10	10.23	10.23	23.948	33.633	33.633	0
11	0	16.197	16.197	26.266	43.079	43.079
12	0	20.086	20.086	35.014	54.209	54.209

Ankastre-Basit destekli üniform olmayan bir boruda akış, Şekil 6.32'de verilmektedir. Burada, U akışkan hızı 5.5 civarında bulduğunda stabilite kaybolmaktadır. Akışkan hızı 9.3'i geçtikten sonra 1. ve 2. mod birleşmesi meydana gelmektedir.



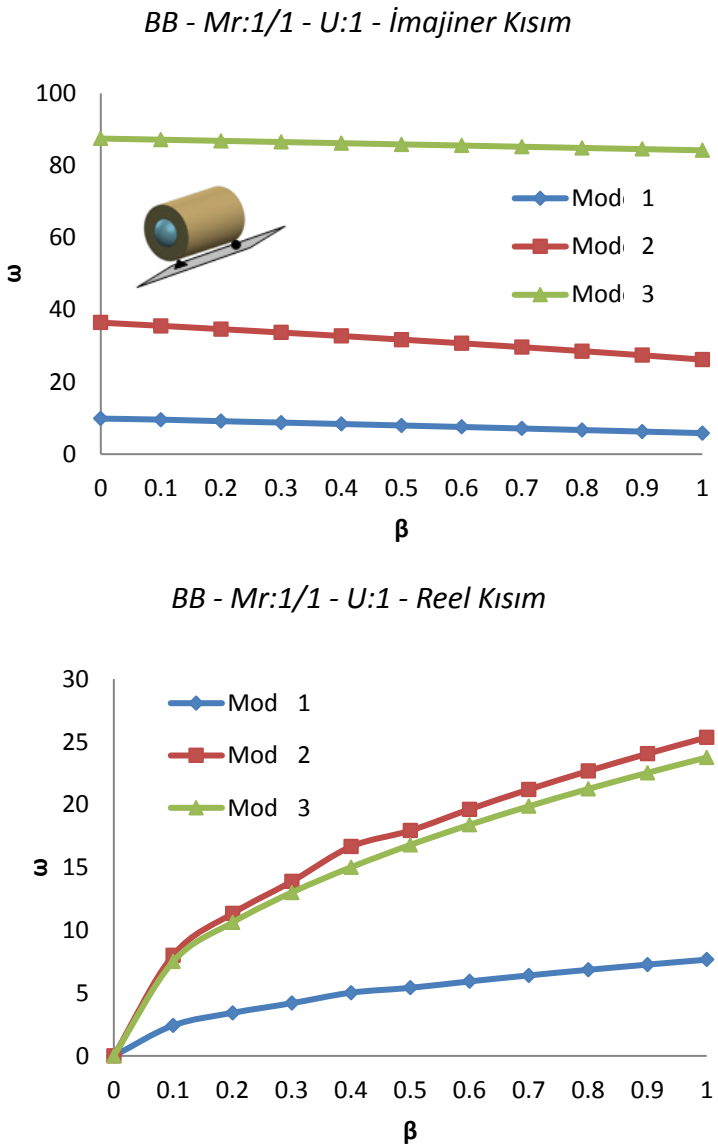
Şekil 6.32. Akışkan taşıyan ankastre-basit destekli FD tüpün ilk 3 modu (Mr 2/1, β:0.1).

Şekil 6.33'te malzeme parametresinin (Mr)'nin değişimiyle frekansın değişimi verilmiştir. Mr'nin artmasıyla malzemenin rijitliği arttığından frekans değerlerinde artış gözlenir.



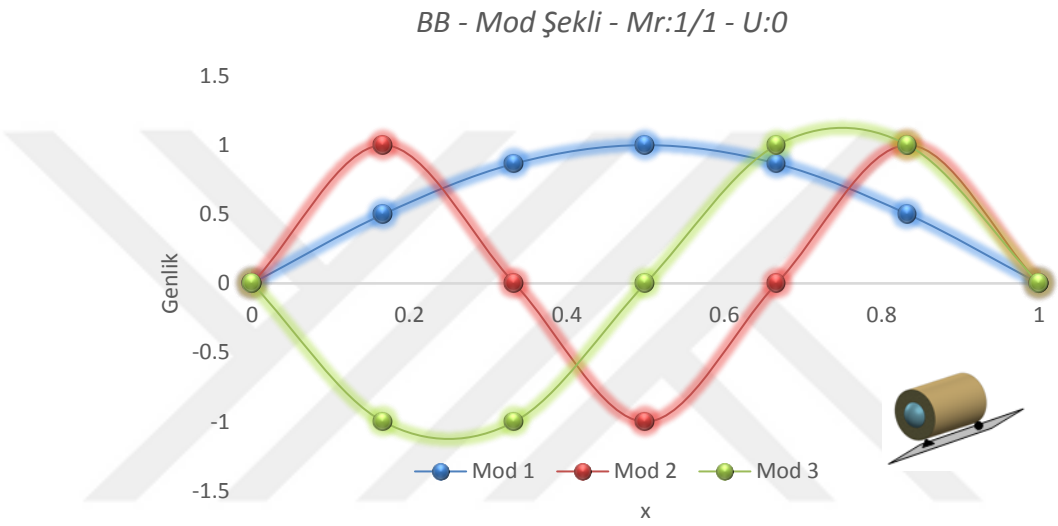
Şekil 6.33. Akışkan taşıyan FD tüpte imajiner kısımlarının ilk 3 modu (β:0.1).

Şekil 6.34'te, β değerinin artışı ile sönüm artar ve titreşim frekanslarında bir miktar azalma gözlenmektedir.

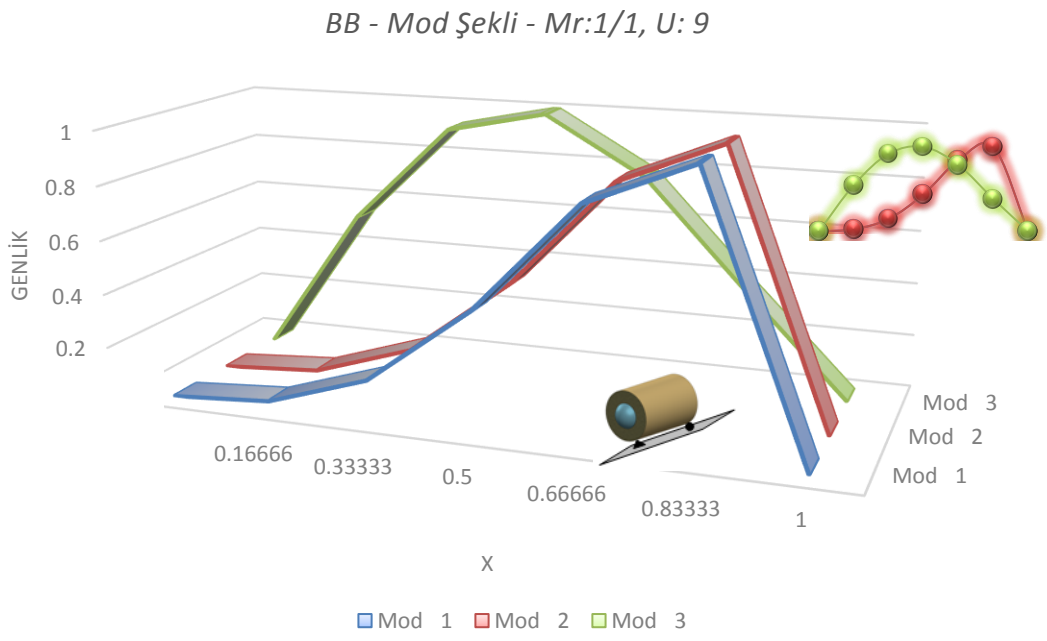


Şekil 6.34. Değişik β değerleri için akışkan taşıyan basit destekli FD tüpün ilk 3 modu.

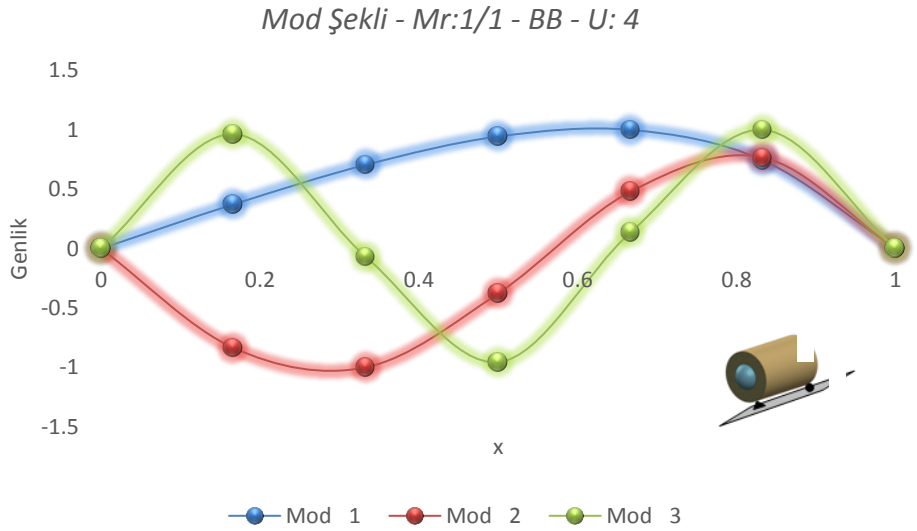
Şekil 6.35-6.45'te akışkan taşıyan boruların mod biçimlerine örnekler verilmiştir. Şekil 6.35'te akış olmayan bir tüp için mod biçimleri sunulmuştur. Akışkan etkisiyle mod biçimlerindeki en büyük genliklerin sağ uca doğru kaydığı gözlenmektedir. Yine akışkanın akış etkisiyle mod biçimlerinde birleşmeler gözlenmektedir. Yüksek modlarda düğüm sayısının azalarak düşük modlardaki biçimlere benzemeler gözlenmektedir. Artan β ile düğüm sayısı artmaktadır.



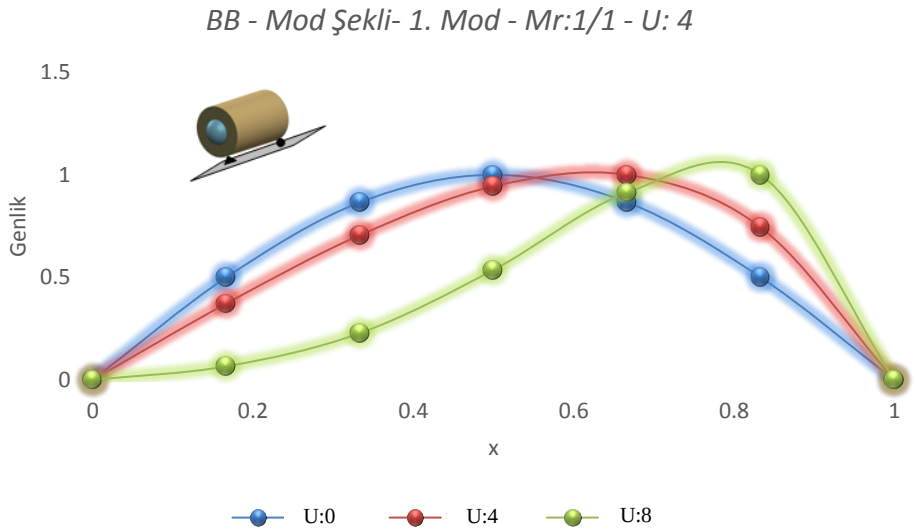
Şekil 6.35. Basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1).



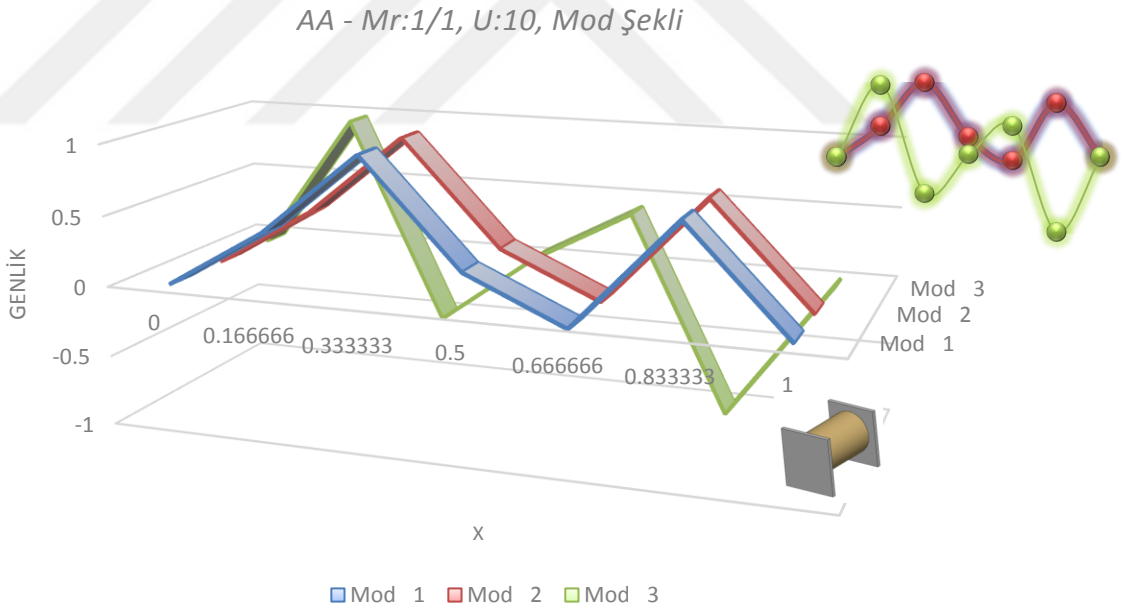
Şekil 6.36. Akışkan taşıyan basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1, U: 9).



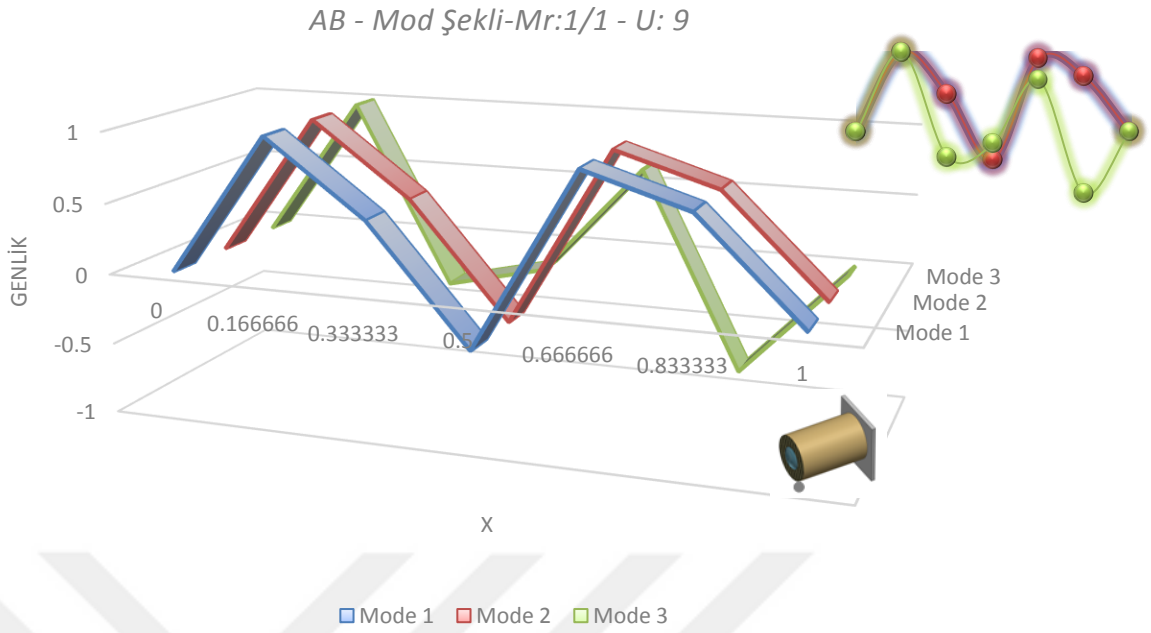
Şekil 6.37. Akışkan taşıyan basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1, U: 4).



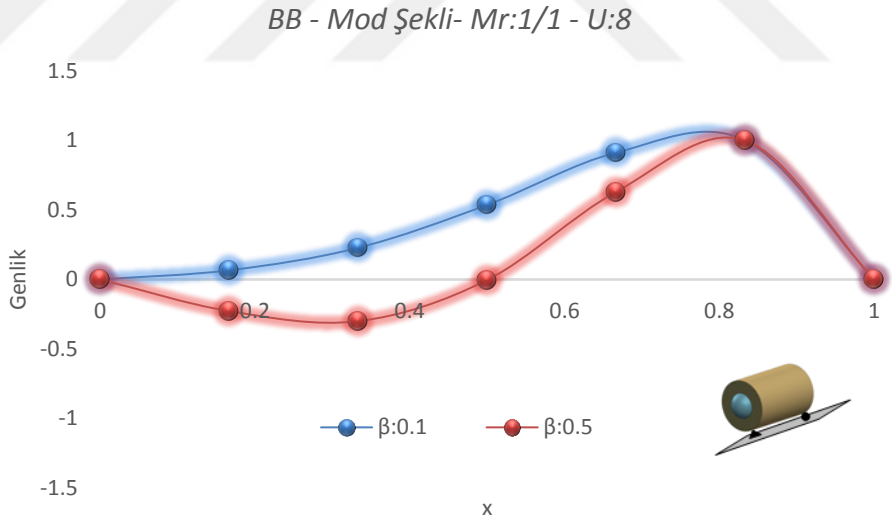
Şekil 6.38.Değişik hızlarda akışkan taşıyan basit destekli tüpün ilk modu (Mr 1/1, β:0.1).



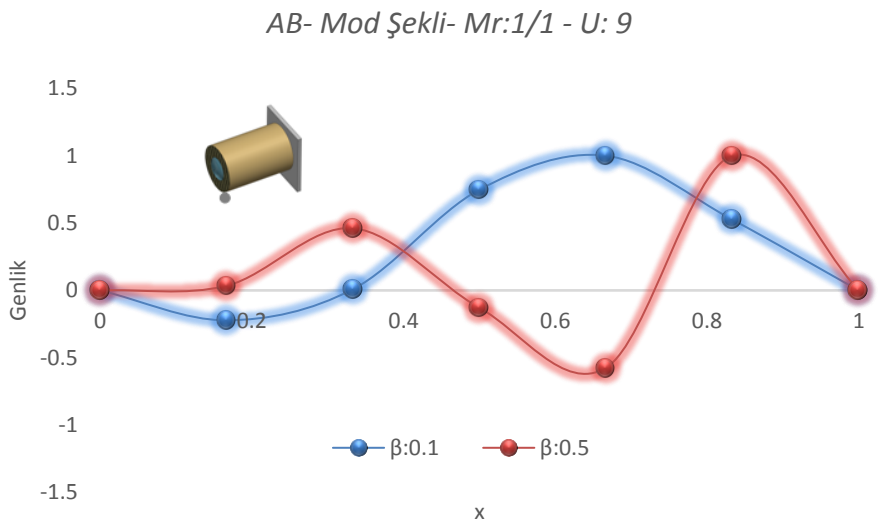
Şekil 6.39. Akışkan taşıyan ankastre-ankastre destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1, U: 10).



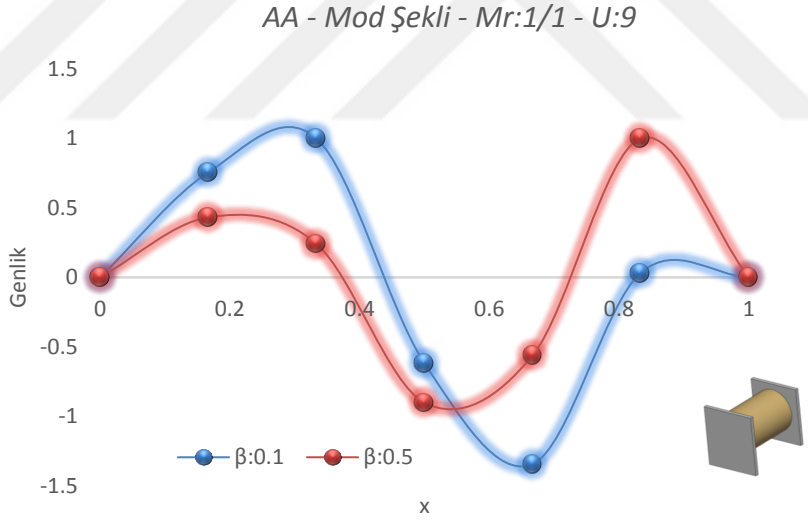
Şekil 6.40. Akışkan taşıyan ankastre-basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.1, U: 9).



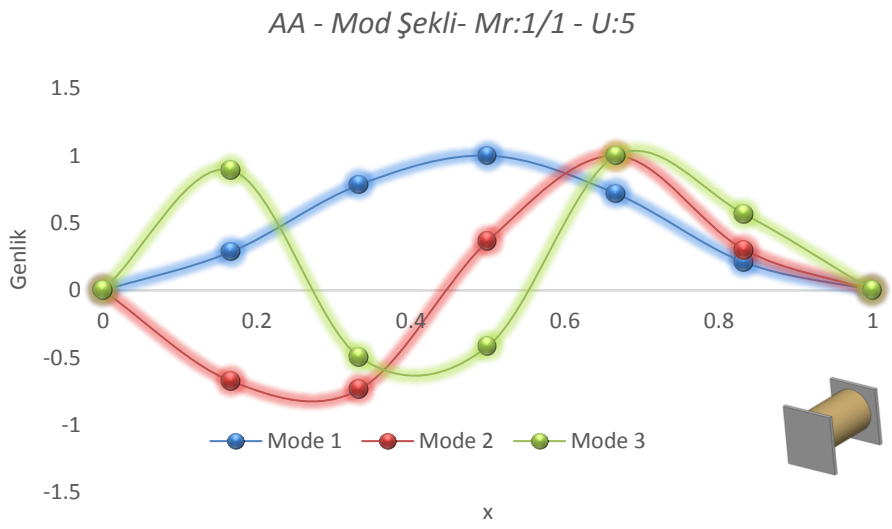
Şekil 6.41. Değişik β değerlerinde akışkan taşıyan basit destekli tüpün ilk modu (Mr 1/1, U: 8).



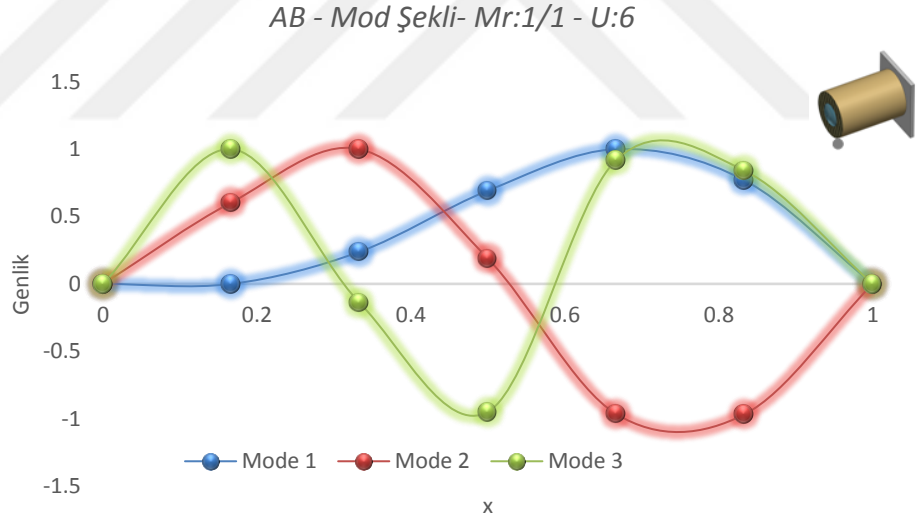
Şekil 6.42. Değişik β değerlerinde akışkan taşıyan ankastre- basit destekli tüpün ilk modu (Mr 1/1, U: 9).



Şekil 6.43. Değişik β değerlerinde akışkan taşıyan ankastre – ankastre destekli tüpün ilk modu (Mr 1/1, U: 9).



Şekil 6.44. Akışkan taşıyan ankastre-ankastre destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.5, U: 5).



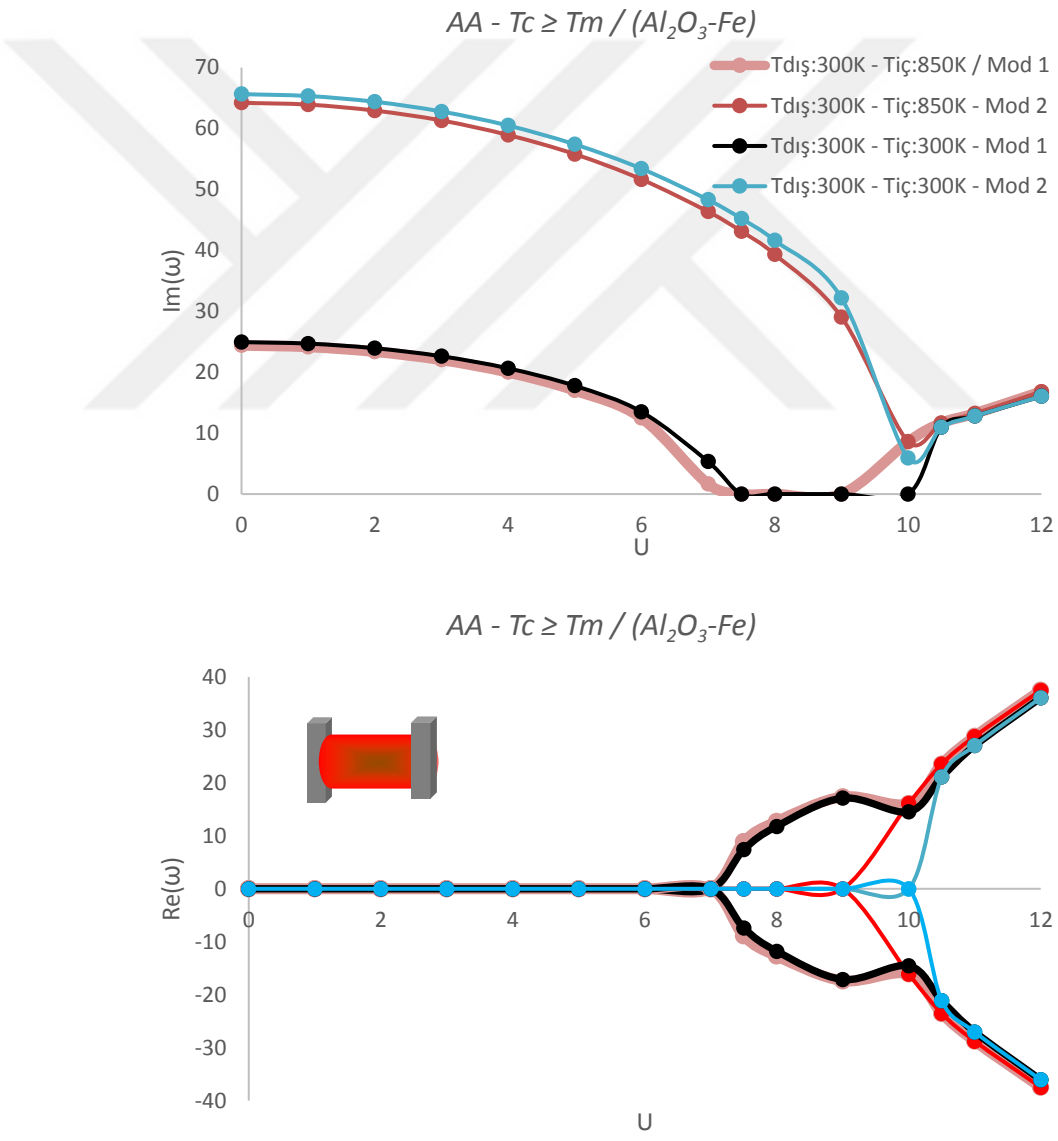
Şekil 6.45. Akışkan taşıyan ankastre-basit destekli tüpün ilk 3 modu (Mr 1/1, β:0.5, U: 6).

Bu kısımda, akışkan taşıyan tek tüpün (boru) titreşimi incelenmiştir. Genelde iki unsur göz önüne alınmıştır, bunlar; akış hızı ve malzeme parametresinin etkisi olarak düşünülmüştür. Bu hususlar göstermektedir ki; birinci (temel) modda, frekanslar artan hızla azalma eğilimine girmektedir, bu değer bir aralıkta sıfırlandıktan (burkulma) sonra reel kısımda sönüm frekanslarında artış görülür. Sönüm frekanslarının sıfırlandığı aralıkta titreşim frekansları artmaktadır. Bu olaylar meydana geldiğinde, ikinci mod azalmaya eğilim gösterir. İlk mod, ikinci titreşim frekansı belirli bir hıza ulaşınca bu iki mod çakışır. Bu çakışmanın ardından frekans değerleri artar. Yine, bu süre zarfında, üçüncü mod değerleri düşüştedir. Bu üç frekansın bu hız değerinden üç mod değeri de artma eğilimindedir.

Ayrıca, bu düşüncelerden yola çıkarak, (Mr: 2/1, U = 0) için en yüksek frekansların elde edildiği yerde artan akışkan hızıyla (Mr: 1/1) için en düşük titreşim frekansların elde edildiğini görülmektedir.

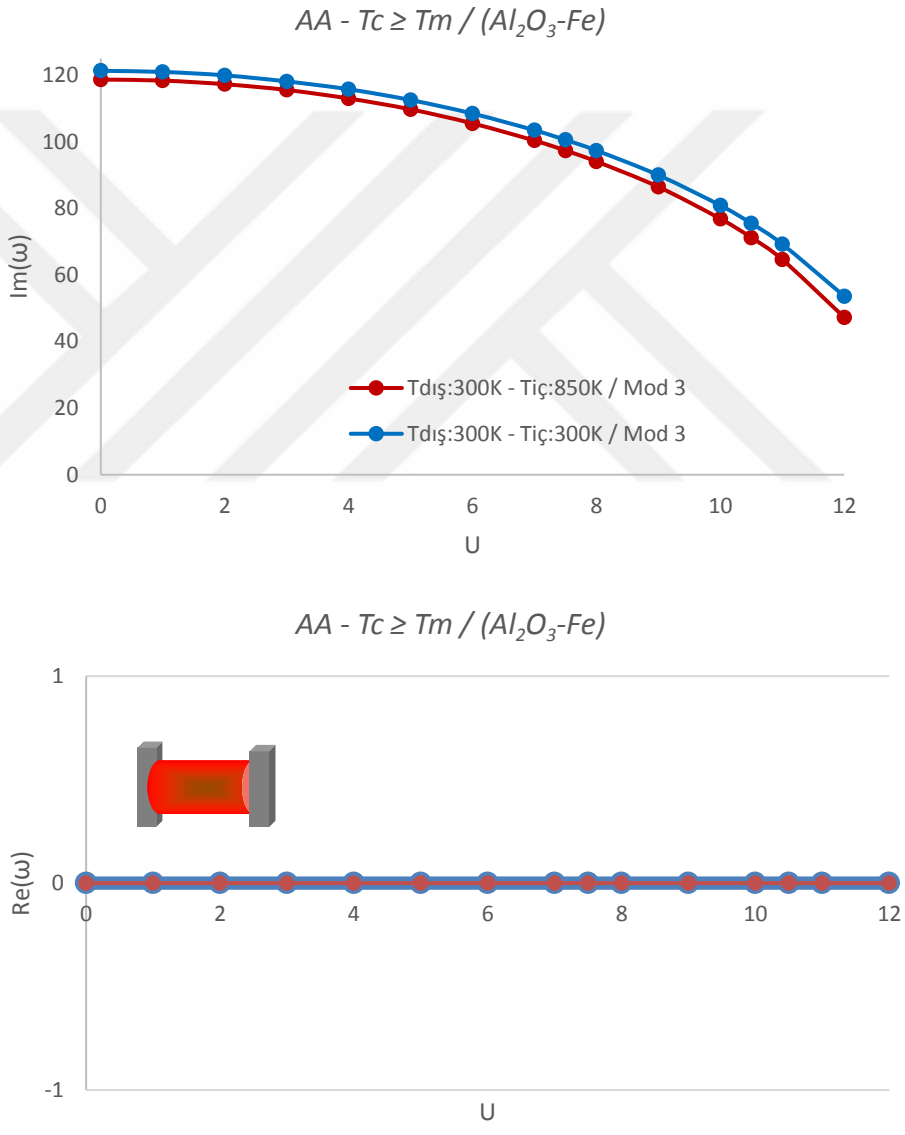
6.3. Sıcak Akışkan Taşıyan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Boruların Eksene Dik Yönde (Enine) Titreşimi için Sayısal Sonuçlar

Akışkan taşıyan fonksiyonel derecelendirmiş borunun ısıl etkilere maruz kalması durumunda malzeme mekanik özellikleri sıcaklıktan etkilenmektedir. Buna göre Çizelge 2'den yararlanarak, dışı metalle kaplı, içinden sıcak bir akışkan geçen ankastre-ankastre bir boruda titreşim için elde edilen frekanslar Şekil 6.46'da verilmiştir. Sıcaklık etkisinin dikkate alındığı durumda beklendiği gibi frekans değerleri düşmüştür.



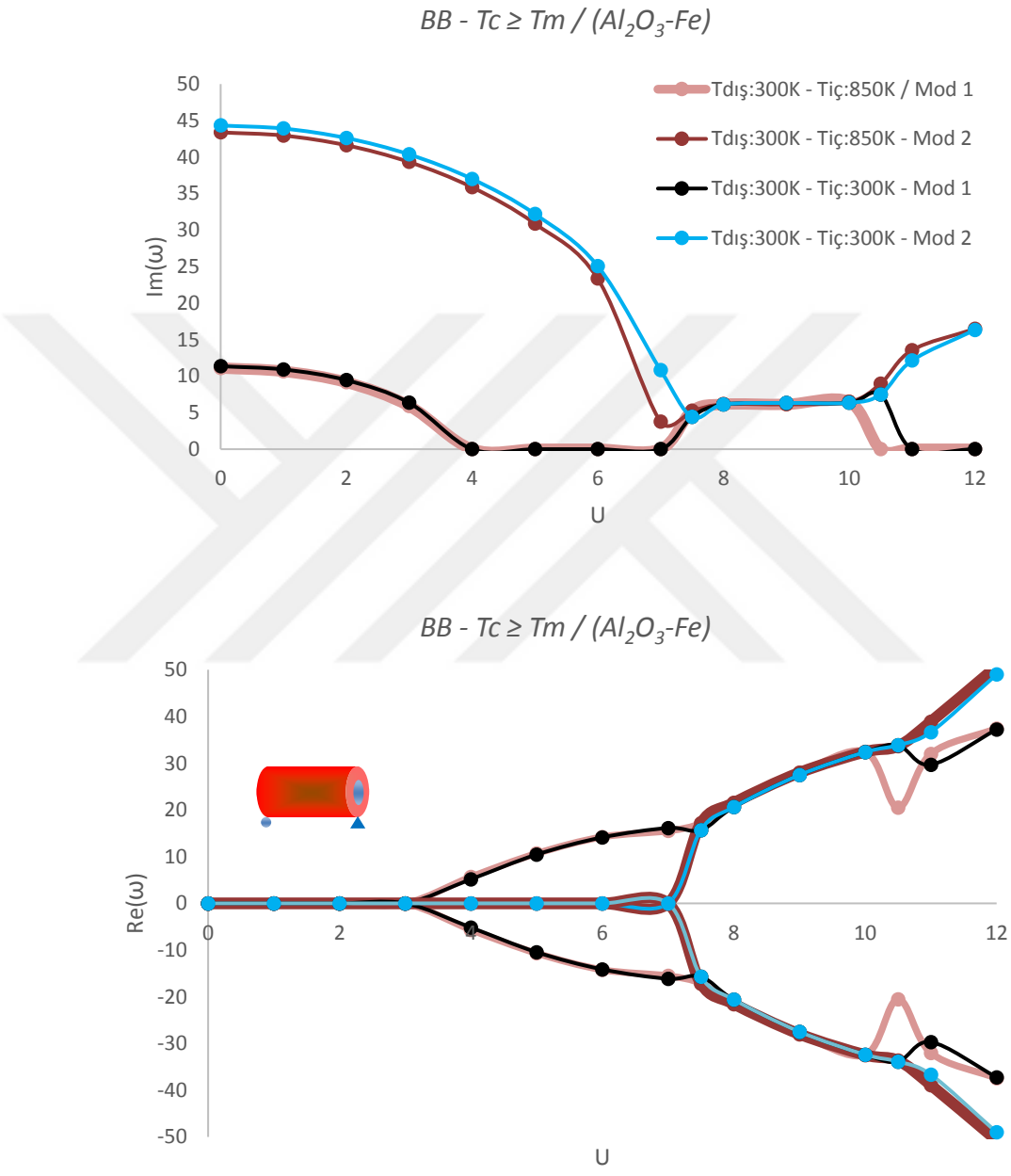
Şekil 6.46. Fonksiyonel derecelendirilmiş sıcak akışkan taşıyan A-A boruda titreşim.

Şekil 6.47'de, içinden sıcak akışkan geçen ankastre destekli bir boruda titreşimin 3. modunu incelenirse, frekans parametresinin değişen sıcaklık ile ters orantılı olarak azaldığıgözlemlenir. Bu gözlemlemeyi sabit sıcaklıklı (300 K) bir boru ile kıyaslarsak farkı daha net bir şekilde görülebilir. Şekil 6.46'da, Tc: Seramik sıcaklığı ve Tm: Metal sıcaklığı olmak üzere Tc:Tm:300 K ve Tc:850 K-Tm: 300 K durumu incelenmiştir, akışkan sıcaklık farkı 550 K'dir. Buna göre, akışkanın sıcaklığının Mr üzerinde etki ettiğini ve Mr'nin azaldığını, dolayısıyla titreşim frekansının da buna bağlı olarak azaldığı görülmektedir.



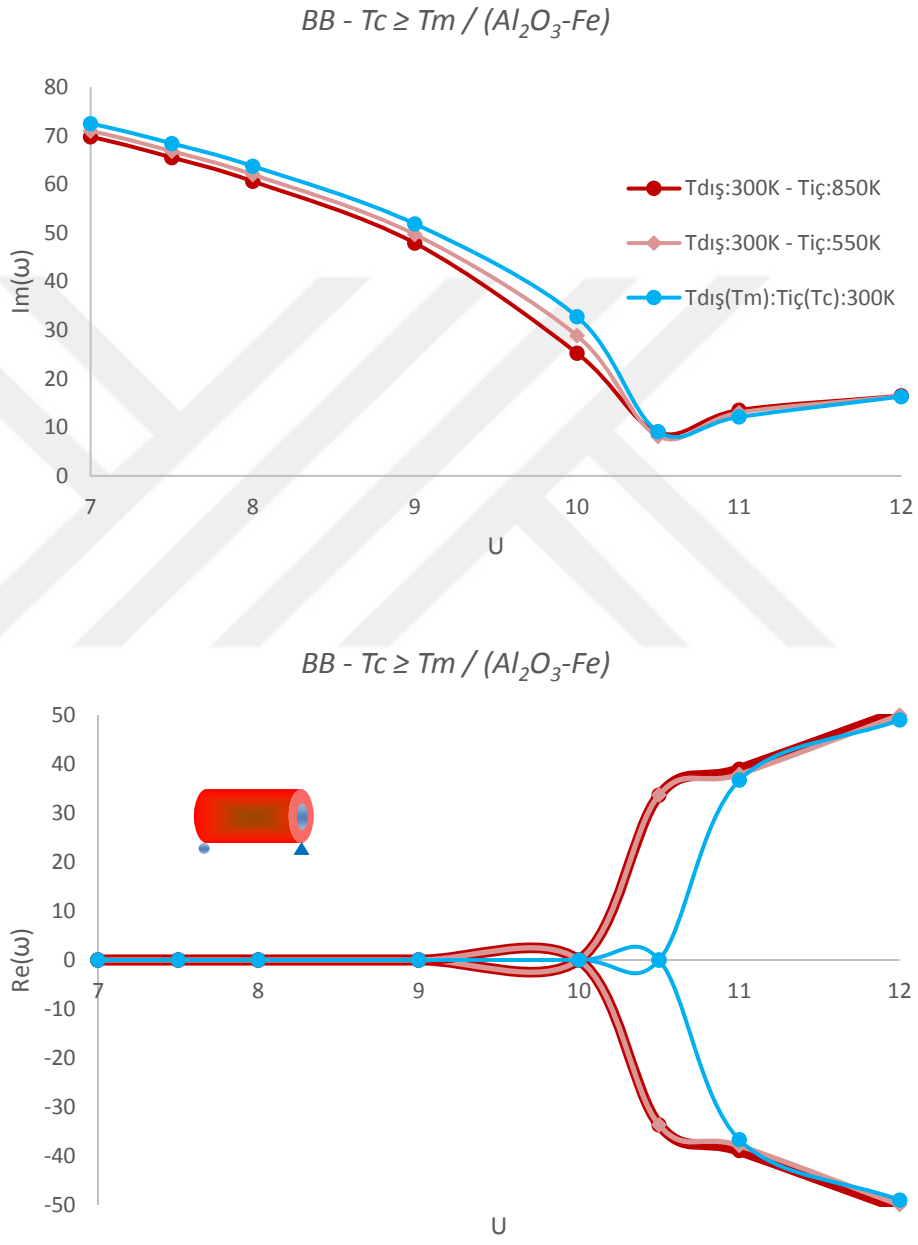
Şekil 6.47. Fonksiyonel derecelendirilmiş sıcaklığı değişken A-A boruda 3. Modlar.

Şekil 6.48'de içinden sıcak akışkan geçen basit destekli bir boruda ilk 2 modu için titreşimi incelenirse, frekans parametresinin değişen sıcaklık farkının artmasıyla ile ters orantılı olarak azaldığı gözlemlenir. İç ve dış sıcaklıklar arasındaki fark arttığında, frekans parametrelerinin çok düştüğü görülmektedir.



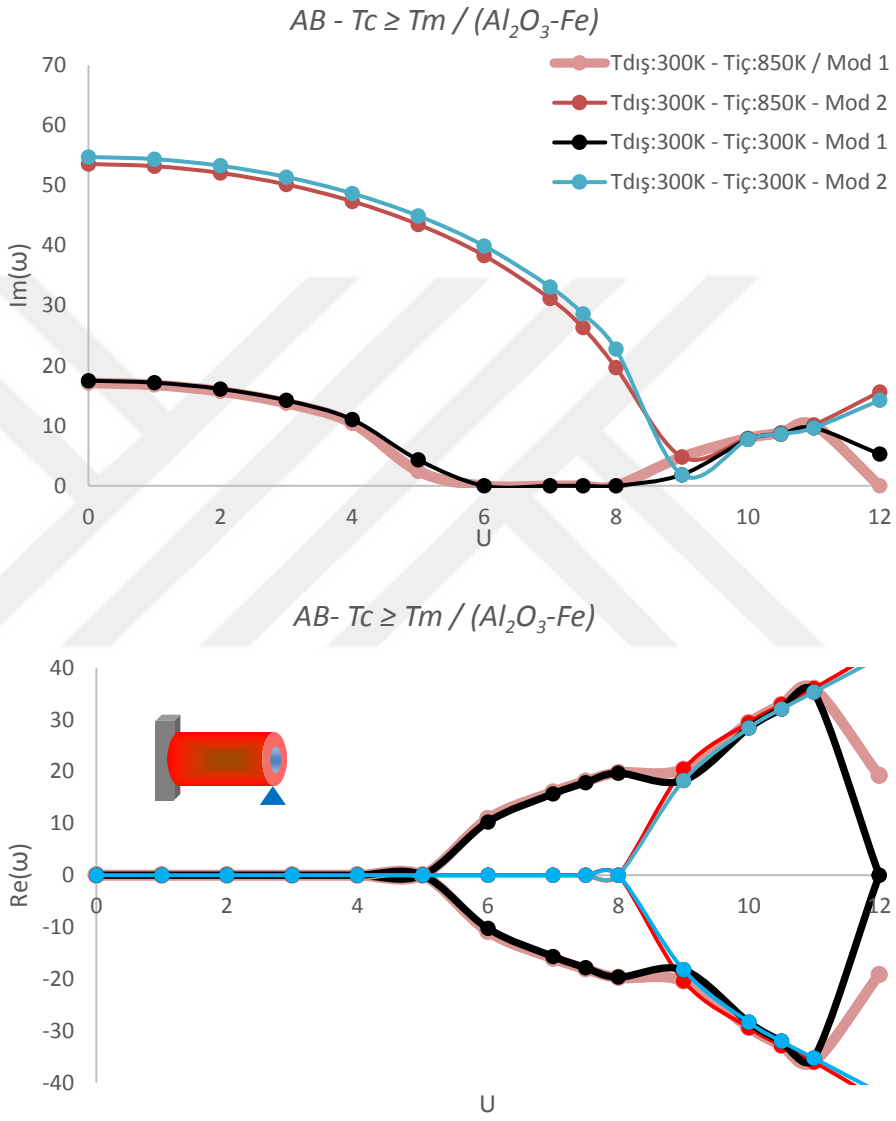
Şekil 6.48. Değişik durumlarda sıcak akışkan taşıyan B-B boruda titreşim.

Şekil 6.49’da, içinden sıcak akışkan geçen basit destekli bir boruda titreşiminin 3. modunu incelenirse, sıcaklık farkının artmasıyla frekansın azaldığını net bir şekilde görebiliriz. İç ve dış sıcaklıklar arasındaki fark arttığında, frekans parametrelerinin çok düştüğü görülmektedir.



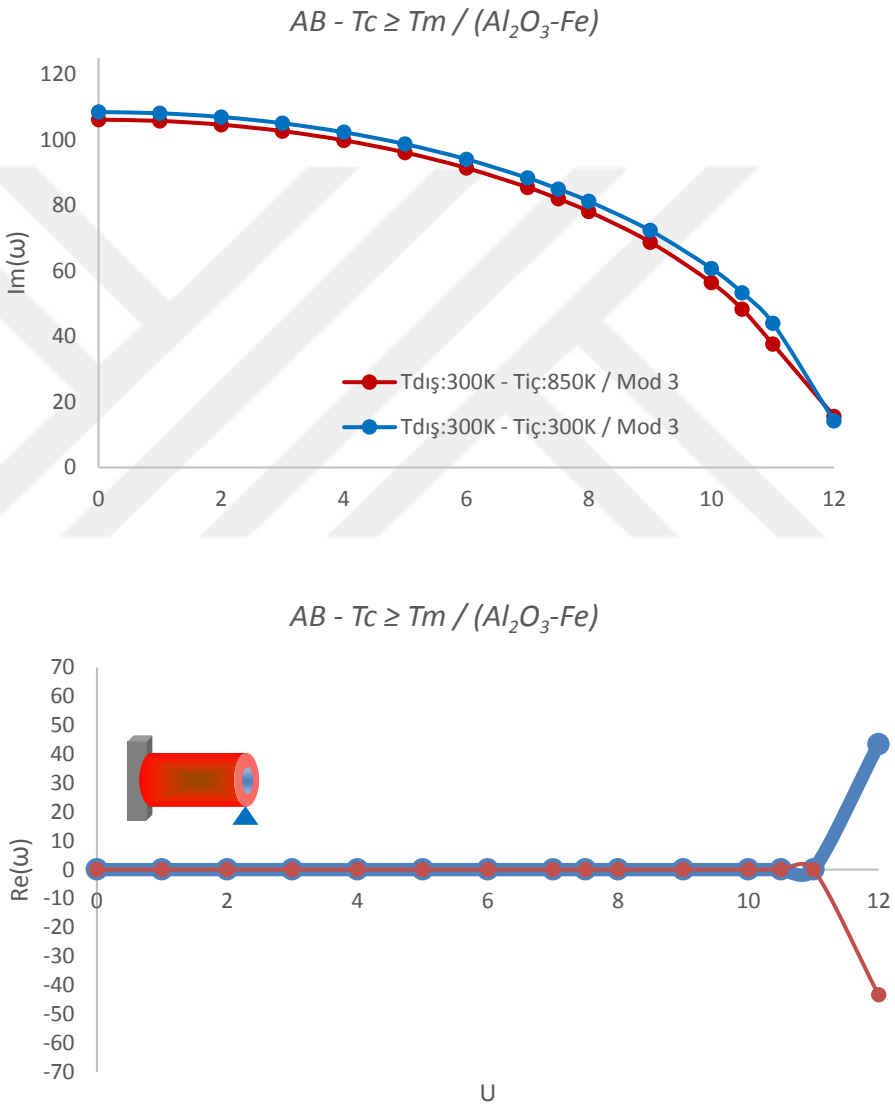
Şekil 6.49. Sıcaklık farkının FD B-B boruda etkisi 3. Modlar.

Şekil 6.50'de içinden sıcak akışkan geçen ankastre-basit destekli bir boruda ilk 2 modu için titreşimi incelenirse, frekans parametresinin değişen sıcaklık farkının artmasıyla ile ters orantılı olarak azaldığı gözlemlenir. İç ve dış sıcaklıklar arasındaki fark arttığında, frekans parametrelerinin çok düştüğü görülmektedir.



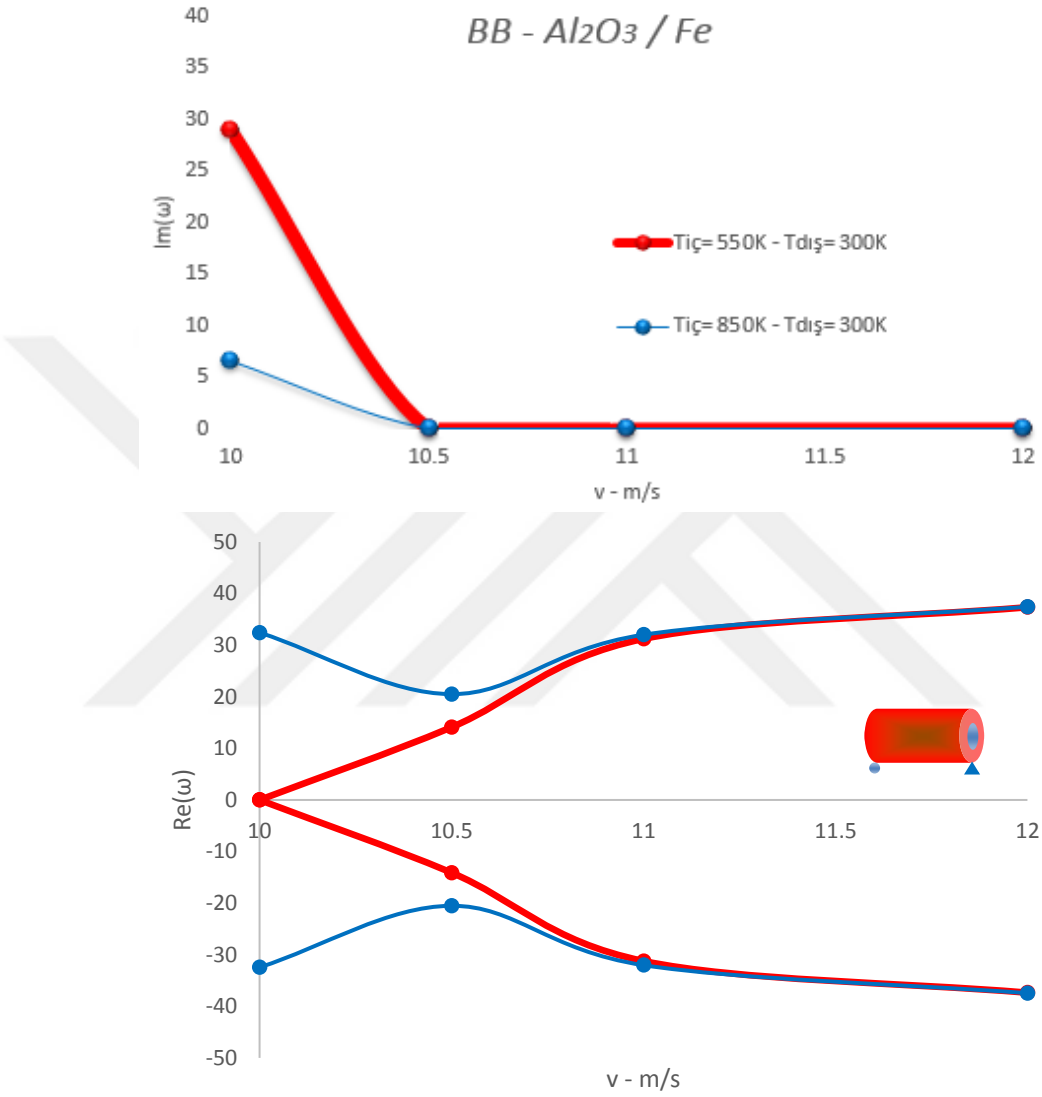
Şekil 6.50. Değişik durumlarda sıcak akışkan taşıyan A-B boruda titreşim.

Şekil 6.51'de, içinden sıcak akışkan geçen ankastre-basit destekli bir boruda titreşiminin 3. modunu incelenirse, sıcaklık farkının artmasıyla frekansın azaldığını net bir şekilde görebiliriz. İç ve dış sıcaklıklar arasındaki fark arttığında, frekans parametrelerinin çok düştüğünü görmekteyiz. Burada; U-Re(ω) Şeklinde, farklı olarak, U: 12'den sonra 3. Modda değişim gözlemlenmektedir. Dolayısıyla 4. Moda geçiş isteği burada gözlenebilir.



Şekil 6.51. Sıcaklık farkının FD A-B boruda etkisi 3. Modlar.

Şekil 6.52’de, içinden sıcak akışkan geçen basit destekli bir boruda titreşimi incelenirse, sıcaklık farkının artmasıyla frekansın azaldığını net bir şekilde görebiliriz. İç ve dış sıcaklıklar arasındaki fark arttığında, frekans parametrelerinin çok düştüğünü görmekteyiz.

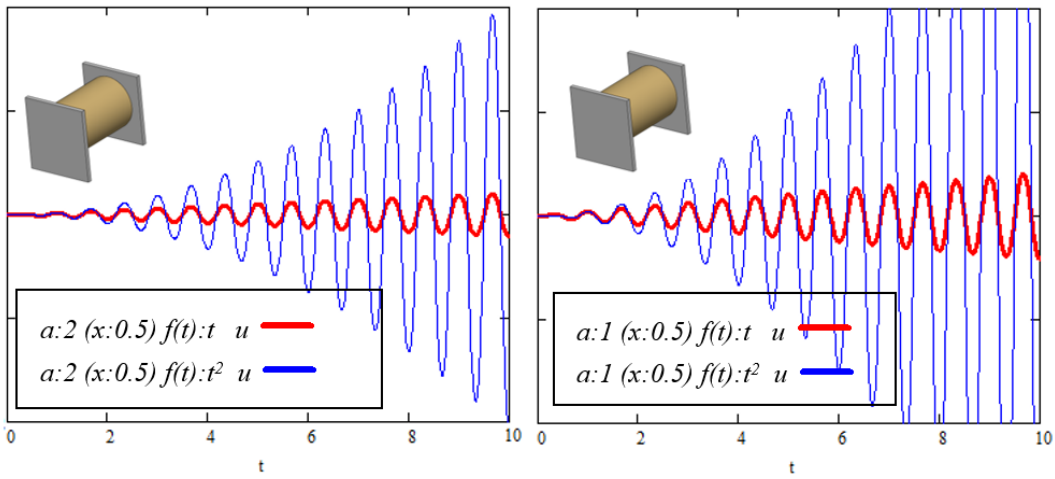


Şekil 6.52. Değişik durumlarda sıcak akışkan taşıyan B-B borunun yüksek hızlardaki1. Moddaki titreşimi.

6.4. Akışkan Taşıyan Boruların Eksen Yönünde (Boyuna) Titreşimi Sonuçları

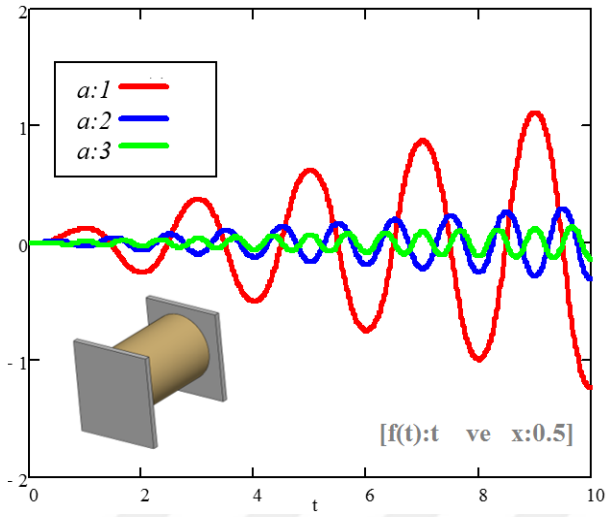
Bu bölümde, ankastre ve serbest sınır şartlarına sahip akışkan taşıyan borularda boyuna titreşim incelenmiştir.

Burada, farklı a değerleri için, farklı konum ve akışkan hızının zamanla değişimi f(t) durumları için titreşimler incelenmiştir. Şekil 6.53 ve 6.54'tegörülen f(t)=t durumu, $f(t)=t^2$ durumu söz konusudur. Burada, f(t): hızın zamanla değişimi ve $a = \sqrt{\frac{E_p A_p}{m_p+m_f}}$'dir. Dolayısıyla, $f(t)=t^2$ durumunda titreşim genliği daha yüksek çıkmaktadır. Şekil 6.54'te, boru uzunluğunu L=1 kabul edersek, x=0.1 ve x=0.9 konumlarının simetrik olduğu görülmektedir.



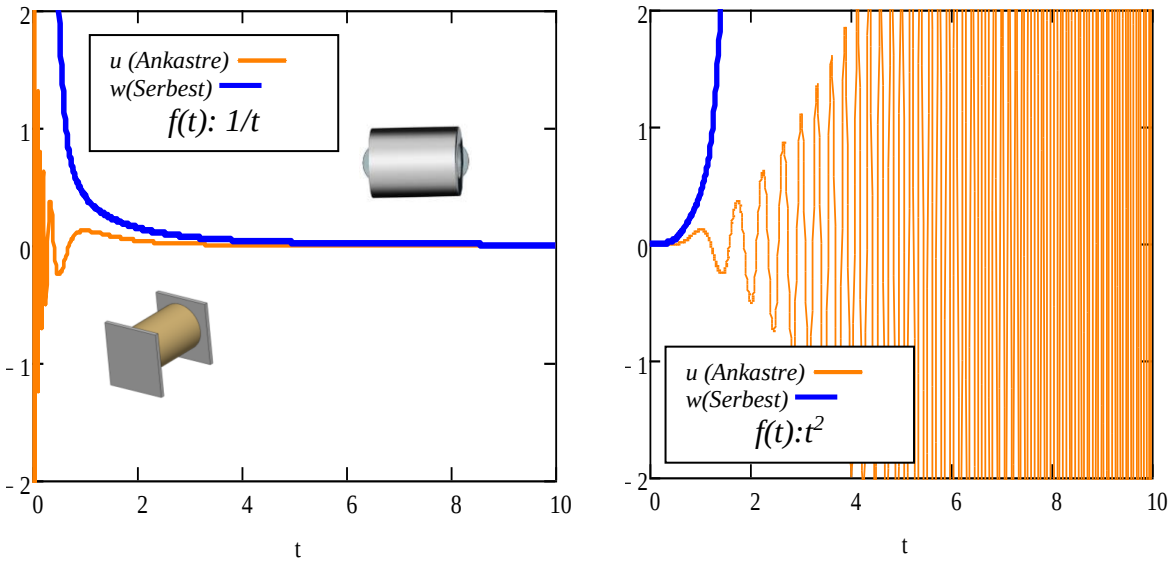
Şekil 6.53. Değişik a parametrelerinde akışkan taşıyan A-A borunun boyuna titreşimi.

Şekil 6.54'te ise, değişik a durumlarındaki titreşime bakılmıştır. Burada en yüksek genlik değeri a=1 iken görülmüştür.



Şekil 6.54. f(t):t iken değişik a parametrelerinde akışkan taşıyan A-A borunun boyuna titreşimi (x:0.5).

Şekil 6.55'te farklı sınır koşullarında ve farklı hız değişimi değerlerinde (f(t)) anlık titreşim değerleri verilmektedir.



Şekil 6.55. Farklı f(t) için akışkan taşıyan A-A ve S-S boruların boyuna titreşimi.

BÖLÜM 7

GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada akışkan taşıyan boruların dinamiği incelenmiştir. Formülasyonda klasik çubuk ve Euler Bernoulli Kiriş teorisi kullanılmıştır. Akışkan taşıyan borunun düşey yöndeki titreşimi ve dalga yayılımı incelenirken malzeme özellikleri kalınlık boyunca fonksiyonel olarak değiştirilmiştir. Dalga yayılımında hem tek ve hem de ikili borularda akış yönlerinin titreşim ve dalga yayılımına etkisi incelenmiştir. Bunların yanı sıra, dalga yayılımında, yapı nano ölçekte de incelenmiştir.

Akışkan taşıyan boruların titreşim ve dalga yayılımı davranışlarının kalınlık boyunca fonksiyonel derecelendirme ile bir derece kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada aynı boru hacmi için malzeme özelliklerinin kalınlık doğrultusunda derecelendirilmesi ile frekansların kontrol edilebileceği gösterilmiştir.

Bu çalışmanın sonuçlarını, en genel anlamda üç kısma ayırabiliriz:

a) Akışkan taşıyan makro ve nano ölçekte kalınlık doğrultusunda simetrik olarak fonksiyonel derecelendirilmiş tek ve birbirine bağlı tüplerde dalga yayılımı
b) Akışkan taşıyan makro kalınlık doğrultusunda simetrik olarak fonksiyonel derecelendirilmiş borunun enine titreşimi,
c) Akışkan taşıyan izotrop borunun boyuna titreşimi.

Bu doğrultuda sınıflandırma yaparsak:

a) Akışkan taşıyan kalınlık doğrultusunda simetrik olarak fonksiyonel derecelendirilmiş tek ve birbirine bağlı makro ve nano ölçekteki tüplerde dalga yayılımı:

Birbirine bağlı makro ve nano ölçekteki tüplerde dalga yayılımında iki adet yayınım eğrisi bulunmuş, birinci eğrinin sıfır frekanstan başlayarak arttığı, ikinci eğrinin bir kesim frekansından başladığı gözlenmiştir. Zıt yönlü akış ile yayınım frekansının azaltılabildiği gözlenmiştir.

Yerel olmayan elastisite kullanımı ile frekanslar, faz ve grup hızları μ artışı ile azalır ve frekans eğrileri birbirine yaklaşmaya başlar. Akışkan hareketinin oluşturduğu sönüm etkisiyle bazı akışkan hızlarında birinci yayınım eğrisinin frekanslarının sıfırlanarak bir bant aralığı oluşturdukları gözlenmiştir. Bu bant aralıkları dalga yayınımının engellenmek istendiği pratik uygulamalarda elverişli olabilir.

b) Akışkan taşıyan kalınlık doğrultusunda simetrik olarak fonksiyonel derecelendirilmiş makro borunun enine titreşimi:

Akışkan hızının artmasıyla akışkan taşıyan borularda frekanslar düşerek belli bir hız aralığında sıfırlanarak kararlılık kaybı (burkulma) meydana gelir. Ardından frekanslar bir üst mod ile birleşerek belli bir akışkan hızı aralığında sıfırdan farklı değerler alırlar. Kalınlık doğrultusunda boruların simetrik olarak fonksiyonel derecelendirilmesi ile kararsızlık oluşan hız değerlerinin daha yüksek hızlara doğru kaydırılabileceği sonucuna varılmıştır. Isıl etkilerin göze alınmasıyla boru malzemesinin sıcaklık etkisiyle rijitliğinin azalmasıyla frekansların azaldığı gözlenmiştir.

c) Akışkan taşıyan izotrop borunun boyuna titreşimi:

Enine titreşimden farklı olarak boyuna titreşimde, akışkan hızı zamanla değişebilmektedir. Green fonksiyonları kullanılarak boyuna titreşim durumunda dinamik yer değiştirmeler bulunmuştur.

Bu çalışmada kullanılan sonlu farklar yöntemi burada değinilmeyen ankastre-serbest sınır şartlarına geliştirilebilir. Ayrıca doğrusal olmayan titreşimler için de çalışma genişletilebilir.

KAYNAKLAR

Aksencer, T., & Aydogdu, M. (2011). Forced tranverse vibration of nanoplates using nonlocal elasticity. *Physica E*, 44:1752-1759.

Ansari, R., Gholami, R., Norouzzadeh, A., & Sahmani, S. (2015). Size-dependent vibration and instability of fluid-conveying functionally graded microshells based on the modified couple stress theory, *Microfluidics and Nanofluidics*,19,509-522.

Arani, A.G., & Amir, S. (2013). Nonlocal vibration of embedded coupled CNTs conveying fluid under thermo-magnetic fields via ritz method. *Journal of Solid Mechanics*, 5:206-215.

Aydogdu, M., & Taskin, V. (2007). Free vibration analysis of functionally graded beams with simply supported edges. *Material & Design*, 28:1651-1656.

Barretta, R., Feo, L., Luciano, R., & Moratti de Sciarra, F. (2015). Variational formulations for functionally graded nonlocal Bernoulli-Euler nanobeams. *Composite Structures*, 129:80-89.

Chang, A.W., & Lee, H. (2009). Free vibration of a single-walled carbon nanotube containing a fluid flow using the Timoshenko beam model. *Physics Letter A*, 373:982–985.

Che, G., Lakshmil, B.B., Fisher, E.R., & Martin, C.R. (1998). Carbon nanotubule membranes for electrochemical energy storage and production. *Nature*, 393:346–349.

Chen A., & Jian S. (2017). Dynamic Behavior of Axially Functionally Graded Pipes Conveying Fluid, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-11.

Chirita, G., Soares, D., &Silva, F.S. (2008). Advantages of the centrifugal casting technique for the production of structural components with Al–Si alloys, *Materials & Design*, 29:20–27.

Dao, M., Chollacoop, N., Van Vliet, K.J., Venkatesh, T.A., & Suresh, S. (2001). Computational modeling of the forward and reverse problems in instrumented sharp indentation. *Acta Materialia*, 49(19), 3899 - 3918.

Demir, M.H. (2012). *Akışkan Taşıyan Ankastre Bir Borunun Dinamik Analizi ve Bulanık Mantık Tabanlı Uyarlamalı Kontrol*. (Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Deng, J., Liu, Y., & Liu, W. (2017). Size-dependent vibration analysis of multi-span functionally graded material micropipes conveying fluid using a hybrid method,*Microfluidics and Nanofluidics*,21:133.

Deng, J., Liu, Y., Zhang, Z., & Liu, W. (2017).Dynamic behaviors of multi-span viscoelastic functionally graded material pipe conveying fluid, *Journal of Mechanical Engineering Science* , 231:3181-3192.

Deng, J., Liu, Y., Zhang, Z., & Liu, W. (2017).Stability analysis of multi-span viscoelastic functionally graded material pipes conveying fluid using a hybrid method, *European Journal of Mechanics – A/Solids*,65:257-270.

Dong, K., Liu, B.Y., & Wang, X. (2008). Wave propagation in fluid-filled multi-walled carbon nano-tubes embedded in elastic matrix. *Computational Material Science*, 42:139–148.

Dong, K., Wang, X., & Sheng, G.G. (2007). Wave dispersion characteristics in fluid-filled carbon nanotubes embedded in an elastic medium. *Modelling and Simulation in Material Science and Engineering*, 15:427-439.

Ebrahimi, F., & Salari, E. (2015). Nonlocal thermo-mechanical vibration analysis of functionally graded nanobeams in thermal environment. *Acta Astronautica*, 113:29-50.

Eringen, A.C. (1972). Linear theory of nonlocal elasticity and dispersion of plane waves. *International Journal Engineering Science*, 10(5):425-435.

Eringen, A.C. (1976). Nonlocal polar field models. New York: Academic Press.

Fu, Y.M., Hong, J.W., & Wang, X.Q. (2006). Analysis of nonlinear vibration for embedded carbon nanotubes. *Journal of Sound and Vibration*, 296:746–756.

Gao, Y. (2002). Carbon nanothermometer containing gallium. *Nature*, 415:599.

Giannakopoulos, A.E., Blech, I.A., & Suresh, S. (2001). Large deformation of thin films and layered flat panels: effects of gravity. *Acta Materialia*, 49(18):3671-3688.

Gouldstone, A., Van Vliet, K.J., & Suresh, S. (2001). Nanoindentation - simulation of defect nucleation in a crystal, *Nature*, 411(6838):656 - 656.

He, X.Q., Wang, C.M., Yan, Y., Zhang, L.X., & Nie, G.H. (2008). Pressure dependence of the instability of multiwalled carbon nanotubes conveying fluids. *Archive of Applied Mechanics*, 78:637–648.

Iijima, S. (1991). Helical microtubules of graphitic carbon. *Nature*, 354,56-58.

Khosravian, N., & Rafii-Tabar, H. (2007). Computational modelling of the flow of viscous fluids in carbon nanotubes. *Physics D: Applied Physics*, 40:7046.

Khosravian**,** N**.**, & Rafii-Tabar**,** H**.** (2008). Computational modelling of a non-viscous fluid flow in a multi-walled carbon nanotube modelled as a Timoshenko beam. Nanotechnology 19:275703.

Kim, K.H., Moldovan, N., & Espinosa, H.D. (2005). A nano fountain probe with sub-100 nm molecular writing resolution. *Small*, 1:632–635.

Koizumi, M. (1993). The concept of FGMs. In: Holt, JB, Koizumi M, Hirai T, Munir Z. (Eds.), Ceramic transactions functionally gradient materials. *American Ceramic Society Bulletin*, 34:3-10, Westville, OH.

Kuang, Y.D., He, X.Q., Chen, C.Y., & Li, G.Q. (2009). Analysis of nonlinear vibrations of double-walled carbon nanotubes conveying fluid. *Computational Materials Science*, 45:875–880.

Kuang, Y.D., Li, S.Q., Chan, P.K.L., & Chen, C.Y. (2010). A continuum model of the Van der Waals interface for determining the critical diameter of nanopumps and its application to analysis of the vibration and stability of nanopump systems. *International Journal of Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 11:121–133.

Lee, H., & Chang, W. (2008). Free transverse vibration of the fluid-conveying single-walled carbon nanotube using nonlocal elastic theory. *Journal of Applied Physics*, 103:024302.

Lee, H., & Chang, W. (2009). Vibration analysis of fluid-conveying double-walled carbon nanotubes based on nonlocal elastic theory. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21:115302.

Lee, J., & Schultz, W.W. (2004). Eigenvalue analysis of Timoshenko beams and axisymmetric Mindlin plates by the pseudospectral method. *Journal of Sound and Vibration*, 269:609–621.

Liu Z., & Niu J. (2018). Vibration energy flow model for functionally graded beams. *Composite Structures*, 186:17-28.

Longhurst, M.J., & Quirke, N. (2007). Pressure Dependence of the radial breathing mode of carbon nanotubes: the effect of fluid adsorption. *Physical Review Letters*, 98:145503.

Longhurst, M.J., & Quirke, N. (2007). Temperature-driven pumping of fluid through single-walled carbon nanotubes. Nano Letters, 7:3324–3328.

Lu, P., Lee, H.P., Lu, C., & Zhang, P.Q. (2007). Application of nonlocal beam models for carbon nanotubes. *International Journal of Solids and Structures*, 44(16):5289-5300.

Min, Z., Wang, Y., & Liu, Z. (2016). Transverse vibration of pipe conveying fluid made of functionally graded materials using a symplectic method, *Nuclear Engineering and Design*, 298,149-159.

Natsuki, T., Ni, Q.Q., & Endo, M. (2007). Wave propagation in single- and double-walled carbon nanotubes filled with fluids. *Applied Physics*, 101:034319.

Nazemnezhad, R., & Hosseini-Hashemi, S. (2014). Nonlocal nonlinear free vibration of functionally graded nanobeams. *Composite Structures*, 110:192-199.

Ni, Q., Zhang, Z.L., & Wang, L. (2011). Application of the differential transform method to vibration analysis of pipes conveying fluid. *Applied Mathematics and Computation*, 217:7028–7038.

Numayr, K.S., Haddad, M.A., & Ayoub, A.F. (2006). Investigation of free vibrations of composite beams by using the finite-difference method. *Mechanics of Composite Materials*, 42(3).

Païdoussis, M.P. (2014). *Slender Structures and Axial Flow*, Fluid–Structure Interactions, 1., 2nd ed. London: Academic Press.

Païdoussis, M.P., & Denise, J.P. (1971). Flutter of cylindrical shells conveying fluid. *Journal of Sound and Vibration*, 16:459–461.

Païdoussis, M.P., & Denise, J.P. (1972), Flutter of thin cylindrical shells conveying fluid. *Journal of Sound and Vibration*, 20:9–26.

Païdoussis, M.P., & Li, G.X. (1993). Pipes Conveying Fluid: A Model Dynamical Problem. *Journal of Fluids and Structures*, 7:137-204.

Polyanin, A. (2002). *Handbook of Linear Partial Differential Equations for Engineers and Scientists*, Miami: CRC Press.

Rahaeifard, M., Kahrobaiyan, M.H., & Ahmadian, M.T. (2009). Sensitivity analysis of atomic force microscope cantilever made of functionally graded materials. *ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*.

Raminnea, M., Biglari, H., Tahami, F.V., & Vakili, F. (2016). Nonlinear higher order Reddy theory for temperature-dependent vibration and instability of embedded functionally graded pipes conveying fluid-nanoparticle mixture, *Structural Engineering and Mechanics*, 59,153-186.

Reddy, C.D., Lu, C., Rajendran, S., & Liew, K.M. (2007). Free vibration analysis of fluid-conveying single-walled carbon nanotubes. *Applied Physics Letters*, 90:133122.

Reddy, J.N., & Wang, C.M. (2004). Dynamics of fluid conveying beams. Singapore: Centre for Offshore Research and Engineering, National University of Singapore.

Sheng, G.G., & Wang, X. (2017). Nonlinear response of fluid-conveying functionally graded cylindrical shells subjected to mechanical and thermal loading conditions, *Composite Structures*, 168, 675-684.

Spiegel, M.R., & Liu, J. (1968), *Mathematical Handbook of Formulas and Tables,* New York: McGraw Hill.

Suresh, S., & Mortensen, A. (1998). *Fundamentals of functionally graded materials: processing and thermomechanical behaviour of graded metals and metal-ceramic composites.* London: Maney Material Sciences.

Tomanek, D., & Enbody, R. (2000). Science and Application of Nanotubes. *Kuwlar/Plenum*, New York.

Tounsi, A., Heireche, H., & Bedia, E.A. (2008). A comment on Free transverse vibration of the fluid-conveying single-walled carbon nanotube using nonlocal elastic theory. *Journal of Applied Physics*, 103:024302.

Trinh, T.H., Bui, V.T., Nguyen, N.H., Nguyen, D.K., & Gan, B. (2016). Dynamic Behaviour of functionally graded beams in thermal enviroment due to a moving harmonic load. *International Journal of Mechanical System Engineering*, 2, 119.

Uymaz, B. (2013). Forced vibration analysis of functionally graded beams using nonlocal elasticity. *Composite Structures*, 105:227-239.

Vaidyanathan, R., Dao, M., Ravichandran, G.,& Suresh, S. (2001). Study of mechanical deformation in bulk metallic glass through instrumented indentation. *Acta Materialia*, 49(18):3781-3789.

Wang, Q. (2005). Wave propagation in carbon nanotubes via nonlocal continuum mechanics. *Journal of Applied Physics*, 98(12):124301.

Wang, L. (2010). Size-dependent vibration characteristics of fluid-conveying microtubes. *Journal of Fluids Structures*, 26:675–684.

Wang, X., Wang, X.Y., & Sheng, G.G. (2007). The coupling vibration of fluid-filled carbon nanotubes. *Physics D: Applied Physics*, 40(8):2563–2572.

Wang, L., & Ni, Q. (2009). A reappraisal of the computational modelling of carbon nanotubes conveying viscous fluid. *Mechanics Research Communications*, 36:833-837.

Wang, L., Ni, Q., Li, M., & Qian, Q. (2008). The thermal effect on vibration and instability of carbon nanotubes conveying fluid. *Physica E*, 40:3179–3182.

Wang, L., Li, Q., & Li, M. (2008). Buckling instability of doublewall carbon nanotubes conveying fluid. *Computational Material Science*, 44:821–825.

Wang, L. (2009). Dynamical behaviors of double-walled carbon nanotubes conveying fluid accounting for the role of small length scale. *Computational Material Science*, 45:584-588.

Wang, L. (2009). Vibration and instability analysis of tubular nano- and micro-beams conveying fluid using nonlocal elastic theory. *Physica E*, 41:1835–1840.

Wang, L. (2010). Wave propagation of fluid-conveying single-walled carbon nanotubes via gradient elasticity theory. *Computational Material Science*, 49: 761-766.

Wang, L.F., Guo, W.L., & Hu, H.Y. (2009). Flexural wave dispersion in multi-walled carbon nanotubes conveying fluids. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 22:623–629.

Wang, Q., Zhou, G.Y., & Lin, K.C. (2006). Scale effect on wave propagation of double-walled carbon nanotubes. *International Journal of Solids and Structures*, 43: 6071-6084.

Wang, Y.Z., Feng-Ming, L., & Kikuo, K. (2010). Wave propagation characteristics in fluid-conveying double-walled nanotubes with scale effects. *Computational Material Science*, 48: 413-418.

Wang, Y.Z., Li, F.M., & Kishimoto, K. (2010). Wave propagation characteristics in fluid-conveying double-walled nanotubes with scale effects. *Computational Material Science*, 48;413–418.

Witvrouw, A., & Mehta, A. (2005). The use of functionally graded poly-SiGe layers for MEMS applications. *Material Science Forum*, 492-493:255-260.

Yan, Y., He, X.Q., Zhang, L.X., & Wang, C.M. (2009). Dynamic behavior of triple-walled carbon nanotubes conveying fluid. *Journal of Sound and Vibration*, 319:1003–1018.

Yan, Y., Wang, W.Q., & Zhang, L.X. (2010). Noncoaxial vibration of fluid-filled multi-walled carbon nanotubes. *Applied Mathematical Modelling*, 34:122–128.

Yan, Y., He, X.Q., Zhang, L.X., & Wang, Q. (2007). Flow-induced instability of double-walled carbon nanotubes based on an elastic shell model. *Journal of Applied Physics*, 102:044307.

Yan, Y., Wang, W.Q., & Zhang, L.X. (2009). Nonlinear vibration characteristics of fluid-filled double-walled carbon nanotubes. *Modern Physics Letter B*, 23:2625–2636.

Yoon, J., Ru, C.Q., & Mioduchowski, A. (2002). Noncoaxial resonance of an isolated multiwall carbon nanotube. *Physical Review B*,66:233402.

Yoon, J., & Ru, C.Q. (2003). Mioduchowski A. Vibration of embedded multiwall carbon nanotubes. *Composite Science Technology*, 63:1533–1542.

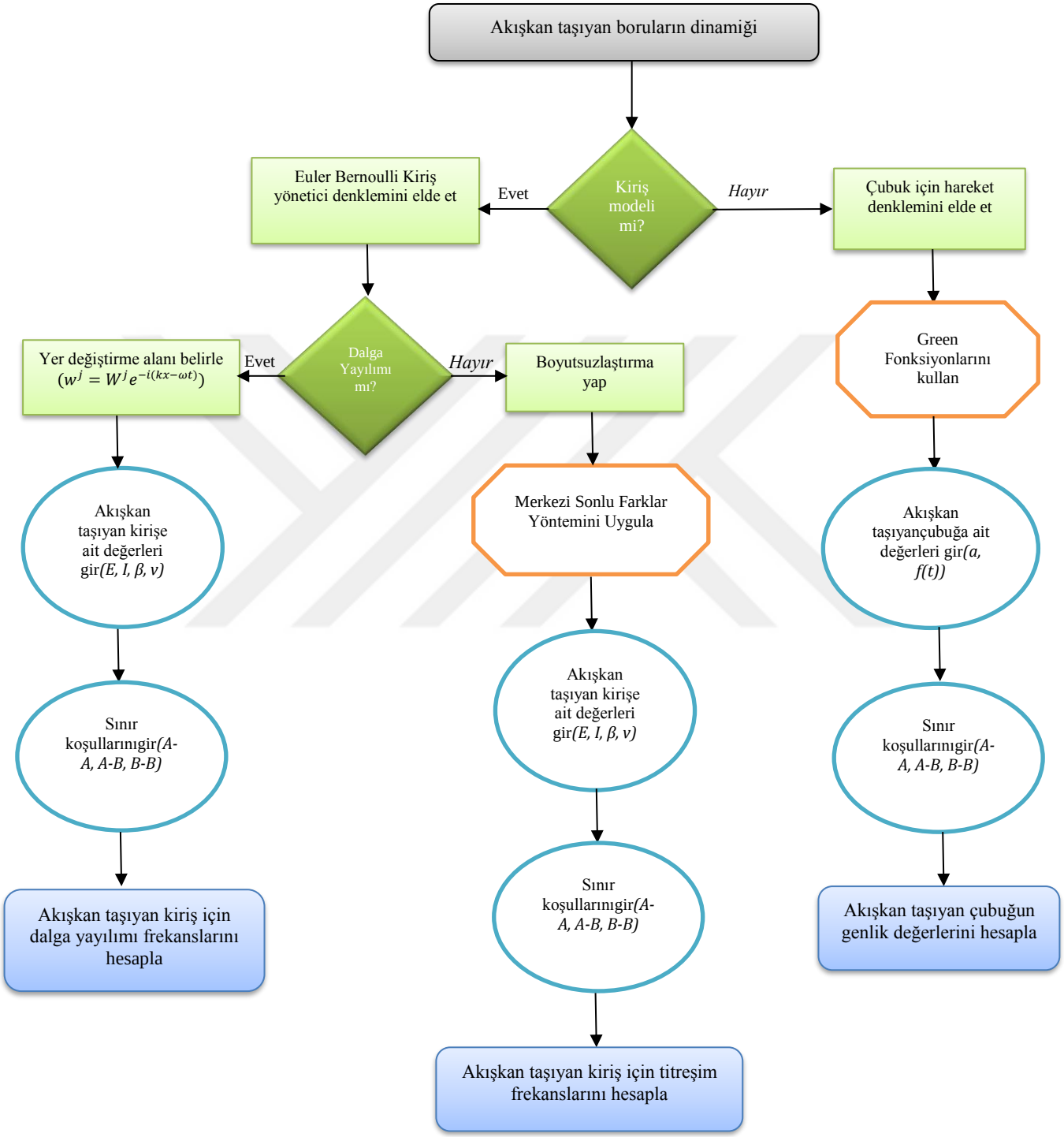
Yoon, J., Ru, C.Q., & Mioduchowski A (2005). Vibration and instability of carbon nanotubes conveying fluid. *Composite Science and Technology*, 65:1326–1336.

Yoon, J., Ru, C.Q., & Mioduchowski, A. (2006). Flow-induced flutter instability of cantilever carbon nanotubes. *International Journal of Solids Structures*, 43:3337–3349.

Zhang, Y.W., Yang, T.Z., Zang, J., & Fang, B. (2013). Terahertz wave propagation in a nanotube conveying fluid taking into account surface effect. *Materials Open Access*, 6: 2393-2399.

EK

ALGORİTMA



ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Edirne'de doğdu. İlk Öğrenimini 1995-1999 arasında Lüleburgaz Anadolu Lisesi'nde; Orta Öğrenimini ise, 1999-2002 yıllarında Eskişehir Anadolu Lisesi'nde tamamladı. Lisans öğrenimini, 2003-2007 yılları arasında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'nde görerek, bu Üniversite'nin Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 2008 yılında başladığı yüksek lisansını 2010 yılında tamamlayarak, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği'nde mezun oldu. Yine aynı Enstitüde, 2010 yılında doktora öğrenimine başlamıştır. 2011 yılından bu yana, Namık Kemal Üniversitesi Çorlu Meslek Yüksekokulu Makine Programında Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Evlidir.

TEZ İLE İLGİLİ BİLİMSEL FAALİYETLER

SCI Expanded Makale:**'*Wave propagation analysis of embedded (coupled) functionally graded nanotubes conveying fluid*'** konulu çalışma SCI Expanded Composite Structures dergisinde 2015 yılında makale olarak çıkmıştır.

Uluslararası Bildiri: '***Vibration of fluid conveying functionally graded beam considering thermal effects'*** 3rd International Conference on Mechanics of Composites, Bologna, 4-7 Temmuz 2017.