

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KARIŞIK SINIR KOŞULLARI ALTINDA FONKSİYONEL  
DERECELİ SİLİNDİRİK KABUKLARIN TİTREŞİM ANALİZİ**

**Mustafa SÜZER**

**Danışman  
Prof. Dr. Abdullah AVEY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA - 2019**



© 2019[Mustafa SÜZER]


## TEZ ONAYI

**Mustafa SÜZER** tarafından hazırlanan "**Karışık Sınır Koşulları Altında Fonksiyonel Dereceli Silindirik Kabukların Titreşim Analizi**" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**                      **Prof. Dr. Abdullah AVEY**  
Süleyman Demirel Üniversitesi

**Jüri Üyesi**                      **Prof. Dr. Fethi KADIOĞLU**  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyesi**                      **Doç. Dr. Kemal Tüfat YÜCEL**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



**Enstitü Müdürü**              **Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR**

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Mustafa SÜZER**



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
İÇİNDEKİLER .....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
1.1. Tezin Önemi .....	1
1.2. Tezin Amacı .....	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	5
2.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerle İlgili Makale Özetleri .....	5
2.2. FDM Kabukların Serbest Titreşim ve Stabilitesine Ait Makale Özetleri.....	9
2.3. Farklı Sınır Koşulları Altındaki FDM Kabukların Serbest Titreşim ve Stabilitesine Ait Makale Özetleri.....	19
2.4. Karışık Sınır Koşulları Altındaki Homojen ve FDM Kabukların Serbest Titreşim ve Stabilitesine Ait Makale Özetleri.....	24
2.5. Tez Konusuna Ait Olan Kitaplardan Bazıları .....	27
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	31
3.1. Problemin Formülasyonu .....	31
3.2. Temel Denklemlerin Çıkarılması .....	33
4. ARAŞTIRMA BULGULARI .....	39
4.1. Temel Denklemlerin Çözümü ve Karışık Sınır Koşullarında FDSK'ların Serbest Titreşiminin Frekansı İçin İfadelerin Bulunması.....	39
4.2. Literatürdeki Mevcut Çalışmalarla Karşılaştırmalar .....	41
4.3. FDM Çeşitleri, Özellikleri ve Modelleri.....	44
4.4. Karışık Sınır Koşulları Altındaki F <sub>D</sub> A ve F <sub>D</sub> B tip SK'ların Boyutsuz Frekans Parametreleri İçin Yeni Hesap ve Analizler .....	85
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR .....	86
KAYNAKLAR .....	87
ÖZGEÇMİŞ .....	94

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### KARIŞIK SINIR KOŞULLARI ALTINDA FONKSİYONEL DERECELİ SİLİNDİRİK KABUKLARIN TİTREŞİM ANALİZİ

Mustafa SÜZER

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdullah AVEY

Tez çalışmasında, fonksiyonel dereceli silindirik kabukların (FDSK'ların) titreşim problemi klasik kabuk teorisi (KKT) kullanılarak çözülmektedir. Fonksiyonel dereceli malzemelerin (FDM'lerin) modelleri oluşturulduktan sonra gerilme-deformasyon arasındaki temel bağıntılar oluşturulmakta ve bu bağıntılar kullanılarak KKT kapsamında hareket ve deformasyon uygunluk denklemleri türetilmektedir. KKT kapsamında, karışık sınır koşulları için kısmi türevli diferansiyel denklemler Galerkin yöntemi uygulanarak çözüldükten sonra frekans için analitik formül elde edilmektedir. Elde edilen ifade dalga sayılarına göre minimize edilerek, frekansın minimum değeri bulunmaktadır. Elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki mevcut sonuçlarla mukayese edilerek doğruluğu teyit edilmektedir. FDM'lerin kritik parametreler üzerindeki etkilerini görmek için farklı profiller için yeni ve özgün sayısal örnekler sunulmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** FDM'ler, silindirik kabuk, serbest titreşim, karışık sınır koşulları, frekanslar

**2019, 94 sayfa**

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **VIBRATION ANALYSIS OF FUNCTIONALLY GRADED CYLINDRICAL SHELLS UNDER MIXED BOUNDARY CONDITIONS**

**Mustafa SUZER**

**Suleyman Demirel University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Civil Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Abdullah AVEY**

In the thesis study, the vibration problem of functionally-graded cylindrical shells is solved by using classical shell theory (CST). Once the models of functionally graded materials (FGMs) are formed, then the basic relationships between stresses and deformations are generated and the motion and compatibility equations are derived within the CST. The partial differential equations for mixed boundary conditions are solved by the Galerkin method and the analytical formula for the frequency is obtained. The obtained expression is minimized according to the number of waves and the minimum values of the frequency is obtained. The current results are compared with the results in the literature and their accuracy is confirmed. New and unique numerical examples are presented for different profiles to see the effects of FGMs on the frequencies.

**Keywords:** FGMs, cylindrical shell, free vibration, mixed boundary conditions, frequencies

**2019, 94 pages**

## TEŞEKKÜR

Bu alıŐma Suleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir. Tez alıŐması dőneminde, bana daima destek olan, fedakârlıktan kaçınmayan, yapıcı öneri ve düzenlemeleriyle çalışmanın içeriğine büyük katkıda bulunan tez yöneticisi, saygıdeğer danışman hocam, Sayın **Prof. Dr. Abdullah AVEY**'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

Tezimin her aŐamasında beni yalnız bırakmayan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Mustafa SÜZER  
ISPARTA, 2019





## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1.1. FDSK, koordinat sistemi ve notlar .....	31
Şekil 4.3.1. a) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni ve b) ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların $\bar{E}_f$ boyutsuz Young modülünün $V_1 = (X_3 + 0.5)^{0.25}$ (d=0.25) hacim kesir için $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı .....	46
Şekil 4.3.2. a) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni ve b) ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların $\bar{E}_f$ boyutsuz Young modülünün d=0.5 hacim kesir için $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı .....	47
Şekil 4.3.3. a) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni ve b) ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların $\bar{E}_f$ boyutsuz Young modülünün doğrusal (d=1) hacim kesir için $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı.....	48
Şekil 4.3.4. a) FD <sub>A</sub> ve b) FD <sub>B</sub> tip SK'ların $\bar{E}_f$ boyutsuz Young modülünün $V_1 = (X_3 + 1/2)^2$ kuadratik (d=2) hacim kesir için $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı .....	49
Şekil 4.3.5. a) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni ve b) ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların $\bar{E}_f$ boyutsuz Young modülünün kübik (d=3) hacim kesir için $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı.....	50
Şekil 4.3.6. a) FD <sub>A</sub> ve b) FD <sub>B</sub> tip SK'ların $\bar{E}_f$ boyutsuz Young modülünün $V_1 = (X_3 + 1/2)^{10}$ kübik (d=10) hacim kesir için $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı .....	51
Şekil 4.3.7. a) Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni ve b) ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların $\bar{E}_f$ boyutsuz Young modülünün $V_1 = 1 - (1/2 - X_3)^2$ ters kuadratik hacim kesir için $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı .....	52
Şekil 4.4.1a. FD <sub>A</sub> çeşit SK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	55
Şekil 4.4.1b. FD <sub>A</sub> çeşit SK'ların profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranı 100'den 500 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	56
Şekil 4.4.2a. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ d=0 ile d=1 arasında değiştiğinde ve r/h oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	57
Şekil 4.4.3a. FD <sub>A</sub> çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ d=1 ile d=10 arasında değiştiğinde ve r/h oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı.....	58
Şekil 4.4.3b. FD <sub>A</sub> çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ d=1 ile d=10 arasında değiştiğinde ve r/h 100'den 500 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	59
Şekil 4.4.4a. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için r/h oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	61

Şekil 4.4.4b. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için r/h oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	62
Şekil 4.4.5a. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı.....	65
Şekil 4.4.5b. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranı 100'den 500 'e kadar değiştiğinde dağılımı.....	66
Şekil 4.4.6a. FD <sub>B</sub> çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ d=0 ile d=1 arasında değiştiğinde ve r/h oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı.....	67
Şekil 4.4.6b. FD <sub>B</sub> çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ d=0 ile d=1 arasında değiştiğinde ve r/h oranı 100'den 500 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	67
Şekil 4.4.7a. FD <sub>B</sub> çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ d=1 ile d=10 arasında değiştiğinde ve r/h oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı.....	68
Şekil 4.4.7b. FD <sub>B</sub> çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ d=1 ile d=10 arasında değiştiğinde ve r/h oranı 100'den 500 'e kadar değiştiğinde dağılımı.....	69
Şekil 4.4.8a. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için R/h oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	70
Şekil 4.4.8b. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için r/h oranı 100'den 500 'e kadar değiştiğinde dağılımı.....	71
Şekil 4.4.9a. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin tüm HKİ'leri için L/r oranı 0.5'den 2 'ye kadar değiştiğinde dağılımı.....	74
Şekil 4.4.9b. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin tüm HKİ'leri için L/r oranı 1'den 5 'e kadar değiştiğinde dağılımı.....	75
Şekil 4.4.10a. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için L/r oranı 0.5'den 2 'ye kadar değiştiğinde dağılımı .....	76
Şekil 4.4.10b. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için L/r oranı 1'den 5 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	77
Şekil 4.4.11a. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin tüm HKİ'leri için L/r oranı 0.5'den 2 'ye kadar değiştiğinde dağılımı .....	80
Şekil 4.4.11b. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin tüm HKİ'leri için L/r oranı 2'den 5 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	82
Şekil 4.4.12a. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için L/r oranı 0.5'den 2 'ye kadar değiştiğinde dağılımı .....	83

Şekil 4.4.12b. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için L/r oranı 2'den 5 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	83
Şekil 4.4.13. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 ve Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımlarından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin <i>d</i> hacim kesir indeksi 0.25'den 1 'e kadar değiştiğinde dağılımı .....	85
Şekil 4.4.14. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 ve Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımlarından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin <i>d</i> hacim kesir indeksi 1'den 10 'a kadar değiştiğinde dağılımı .....	85



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4.1. Karışık sınır koşullarında pür metal silindirik kabuğun frekanslarının literatürdeki sonuçlarla mukayesesi .....	43
Çizelge 4.2. Karışık sınır koşullarında FDSK'nın frekanslarının literatürdeki sonuçlarla mukayesesi .....	44
Çizelge 4.3. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı değişimi .....	54
Çizelge 4.4. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı değişimi ...	64
Çizelge 4.5. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin değerleri ve dalga sayıları L/r oranına bağlı değişimi .....	73
Çizelge 4.6. ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin L/r oranına bağlı değişimi...	79
Çizelge 4.7. Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni ve ZrO <sub>2</sub> /SUS304 karışımlarından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin <i>d</i> hacim kesir indeksine bağlı dağılımı .....	84

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

BFP	Boyutsuz frekans parametresinin kısaltması
$C_i$	FDSK özelliklerine bağlı katsayılar
$d$	Hacim kesir indeksi
$D_0$	Silindirik sertlik parametresi
$E_f, \nu_f, \rho_f$	FDM'nin etkin Young Modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu
$E_{01}, E_{02}$	Sırasıyla homojen metal ve seramiğin Young modülleri
$E_1, E_2$	Sırasıyla FDM'lerin metal ve seramik yüzeylerinin Young modülleri
$e_{x_1}, e_{x_2}, \gamma_{x_1x_2}$	FDSK'ların referans yüzeyden $x_3$ uzaklığındaki yüzeyin deformasyon bileşenleri
$\bar{e}_{x_1}, \bar{e}_{x_2}, \bar{\gamma}_{x_1x_2}$	Referans yüzeydeki deformasyonlar
$E_{ij}(X_3), (i,j=1,2,6),$	Normalleştirilmiş kalınlık koordinatı $X_3$ ' e bağlı olarak değişen büyüklükler
FDSK	Fonksiyonel dereceli silindirik kabuğun kısaltması
FDM	Fonksiyonel dereceli malzeme kısaltması
FD <sub>A</sub>	Silikon nitrat ve nikel karışımı (Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni) kabuk tipi
FD <sub>B</sub>	Zirkonyum oksit ve paslanmaz çelik (ZrO <sub>2</sub> /SUS304) karışımından oluşmuş kabuk tipi
h	Silindirik kabuğun kalınlığı
HKİ	Hacim kesir indeksinin kısaltması
L	Silindirik kabuğun uzunluğu
$L_i(\phi, u_3), (i=1,2)$	Diferansiyel operatör
$m_{ij}, (i, j=1,2)$	Moment bileşenleri
$m=1,3,5,\dots$	$x_1$ doğrultusundaki dalga sayısı
$n$	$x_2$ doğrultusundaki dalga sayısı
Ni	Nikelin sembolü
$n_{ij}, (i, j=1,2)$	Kuvvet bileşenleri
$k_{i\alpha}, (\alpha=0,1,2)$	FDSK özelliklerine bağlı katsayılar
$P$	Genel malzeme özelliği
$P_1, P_2$	Sırasıyla metal ve seramiğin özellikleri
$P_j, j=-1,0,1,2,3$	Sıcaklığa bağlı katsayılar
$r$	Silindirik kabuğun yarıçapı
$q_i, Q_j$	FDSK özelliklerine bağlı katsayılar
SK	Silindirik kabuk kısaltması
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Silikon nitrat sembolü
SUS304	Paslanmaz çelik sembolü
T (K)	Sıcaklık katsayısı
$t$	Zaman parametresi
$u_3$	Çökme

$\bar{u}_3(t)$	Zamana bağılı fonksiyon
$V_1, V_2$	Metal ve seramik fazlarının hacim kesirleri
ZrO <sub>2</sub>	Zirkonyum Oksit sembolü
$\alpha = \frac{m\pi}{L}, \beta = \frac{n}{r}$	Dalga sayılarına bağılı parametreler
$\bar{\alpha}$	$m$ dalga sayısı ve kabuk ölçülerine bağılı parametre
$\phi$	Airy gerilme fonksiyonu
$\bar{\phi}(t)$	Zamana bağılı fonksiyon
$\nu_{01}, \nu_{02}$	Sırasıya, homojen metal ve seramiğin Poisson oranları
$\nu_1, \nu_2$	FDM'nin metal ve seramik yüzeyinin Poisson oranları
$\tau_{x_1}, \tau_{x_2}, \tau_{x_1x_2}$	FDSK'ların gerilme bileşenleri
$\rho_{01}, \rho_{02}$	Sırasıya, homojen metal ve seramiğin yoğunlukları
$\rho_1, \rho_2$	FDM'lerin metal ve seramik yüzeylerinin yoğunlukları
$\bar{\rho}_f$	FDSK'nın yoğunluk parametresi
$\omega$	Serbest titreşim frekansı (rad/s)
$\omega_1$	Boyutsuz titreşim frekansı
$x_i (i = 1, 2, 3)$	Koordinat eksenleri
$X_3$	Boyutsuz kalınlık koordinatı



## 1. GİRİŞ

Silindirik kabuklar birçok mühendislik uygulamasında örneğin, havacılık, nükleer reaktörler, petrokimyasallar, denizcilik endüstrisi, inşaat ve makine mühendisliğinde yapısal elemanlar olarak yaygın olarak kullanıldığından, onların stabilite ve titreşim davranışları uzun bir süredir incelenmektedir. Geçen yüzyılın sonunda fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM'ler) yüksek sertlik, aşınma direnci, düşük sürtünme katsayısı, düşük ısı iletkenliği ve diğer mükemmel mekanik ve kimyasal özelliklerle üretilmiştir. Fonksiyonel dereceli silindirik kabukların (FDSK) geniş uygulama alanına sahip olması, onların tasarımı esnasında stabilite ve titreşim analizlerinin yeniden yapılmasını gerekli kılmaktadır.

Tez çalışmasında, karışık sınır koşulları altında FDM'den oluşan silindirik kabukların serbest titreşim davranışı incelenmektedir. FDM silindirik kabukların bir ucunda, uzunlamasına yer değiştirmesini ve dönmesini engelleyen bir kavrama kullanılmaktadır. Diğer uç ise serbestçe desteklenmektedir. FDSK'ların temel denklemlerinin türetilmesinde Donnell tipi kabuk teorisi kullanılmaktadır. Bu çalışmayı doğrulamak için, literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırma yapılmaktadır. Son olarak FDM'lerin kritik parametreler üzerindeki etkilerini görmek için farklı FDM profilleri için yeni ve özgün sayısal örnekler sunulmaktadır.

### 1.1. Tezin Önemi

Yeni nesil kompozit malzemelerin yapısal özelliklerine bağlı olarak derecelenebilir olması fikri ilk olarak Bever ve Duwez (1972) çalışmasında ortaya atılmış ve yerel özelliklerde ortaya çıkan değişimlerin malzemenin genel özelliklerini etkilediği gösterilmiştir. Bu dönemde teknolojinin seviyesi Bever ve Duwez (1972) çalışmasının sonuçlarını uygulanmasına olanak sağlamamıştır.

FDM'ler ilk olarak 1984 yılında bir grup Japon bilim adamı tarafından ısı kalkanları olarak geliştirilen farklı mekanik özelliklere sahip iki veya daha fazla malzemenin karışımından elde edilmiştir (Koizumi, 1997). Bu çalışmayı takiben FDM'lerin özelliklerinin araştırılması birçok bilim insanı tarafından hayata geçirilmiştir (Fukui, 1991; Hirai, 1996; Giannakopoulos ve Suresh, 1997; Butcher, 1999). Başlangıçta



büyük sıcaklık değişikliklerine karşı termal koruma için geliştirilen bu yeni nesil kompozit malzemeler seramik ve metal karışımından oluşturularak, yüksek yapısal özellikler gerektiren çeşitli uygulamalar için kullanılmaktadır (Kieback vd., 2003; Müller vd., 2003).

FDM'ler, çeşitli yöntemlerle üretilmektedir. Örneğin; Buhar biriktirme (PVD), Kimyasal buhar biriktirme (CVD), Plazma püskürtme, sıçratma, Darbeli lazer biriktirme (PLD), Sol-jel teknikleri vs (Kawasaki ve Watanabe, 1997; Miyamoto vd., 1997; Suresh ve Mortensen, 1998; Lambros vd., 1999; Uduba vd., 2014; Mahamood ve Akinlabi, 2017)

FDM'lerin seri üretiminin yapılabilmesi için ilk önce bu malzemelerin özelliklerinin araştırılması doğrultusunda çalışmalar yapılmıştır. İlk çalışmalar, FDM'lerin termo-mekanik özelliklerinin araştırılmasına adanmıştır (Reddy ve Chin, 1998; Suresh, 2001; Pitakthapanaphong ve Busso, 2002).

FDM'lerin seramik bileşenlerinin düşük ısı iletkenliklerinden dolayı yüksek termal dayanım gösterdiği, metal bileşenlerin ise yüksek viskozite nedeniyle kırılmayı önlediği görülmüştür. Bu üstün özellikler FDM'leri yeni nesil kompozitler arasında özgün kılmakta ve FDM silindirik kabukların günümüz teknolojisinde geniş kullanım alanına sahip olmasını sağlamaktadır. FDM'lerin termo-mekanik özellikleri incelendikten ve geleneksel malzemelere kıyasla önemli avantajlara sahip olduğu belirlendikten sonra bu tür malzemelerden oluşan yapı elemanlarının titreşim ve stabilite davranışları ile ilgili çalışmalar gündeme gelmiştir. FDSK'ların titreşim ve stabilite problemlerinin çözümünde farklı kabuk teorileri ve çeşitli yöntemler kullanılarak çok sayıda çalışma yapılmıştır (Loy vd., 1999; Sofiyev, 2003; Kadoli ve Ganesan, 2006; Matsunaga 2008 ve 2009; Tornabene, 2009; Sofiyev, 2014; Mantari ve Soares, 2014; Jin vd., 2014; Ebrahimi ve Najafizadeh, 2014; Sofiyev vd., 2015; Kim, 2015; Wali vd., 2015; Sofiyev, 2015; Yıldız, 2015; Brischetto, 2016; Golpayegani ve Ghorbani, 2016; Arefi vd., 2016; Sofiyev, 2016a ve 2016b; Liang vd., 2016; Park ve Kim, 2016; Ersoy vd., 2018; Xu vd., 2018; Zghal vd., 2018).

Bu çalışmaların yanısıra farklı sınır koşullarının FDM kabukların titreşim problemlerine etkisinin araştırılmasına ait literatürde yeteri kadar çalışmalar

mevcuttur (Pradhan vd., 2000; Haddadpour vd., 2007; Najafizadeh ve Isvandzibaei, 2007; Qu vd., 2013; Bochkarev ve Lekomtsev, 2015; Pandey ve Pradyumna, 2015; Alibeigloo ve Jafarian, 2016; Isvandzibaei vd., 2016; Civalek, 2017a ve 2017b).

Yaklaşım fonksiyonun matematiksel olarak tanımlanmasında ortaya çıkan zorluklardan dolayı karışık sınır koşulları altında FDSK'ların titreşimi konusunda sınırlı sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların büyük çoğunluğu Sofiyev ve meslektaşlarına aittir (Agenosov ve Sachenkov, 1964; Sofiyev ve Kuruoglu, 2015; Sofiyev vd., 2015; Jin vd., 2016; Sofiyev ve Hui, 2019; Sofiyev, 2019).

Bu faktörler FDSK'ların titreşim davranışının yeniden ele alınmasını ve karışık sınır koşullarında yeni ve özgün çözüm yöntemleri geliştirmesini talep etmektedir. FDSK'ların karışık sınır koşullarında yeni ve özgün sayısal hesaplarının yapılması bu tür yapı elemanlarının güvenilirliği ve emniyeti açısından önemlidir.

Tez çalışmasında, karışık sınır koşulları altında FDSK'ların serbest titreşim problemi KKT çerçevesinde detaylı bir şekilde araştırılmıştır.

## **1.2. Tezin Amacı**

Tez çalışmasında, FDSK'ların titreşim problemi KKT çerçevesinde çözülmektedir. FDM'lerin modelleri oluşturulduktan sonra gerilme deformasyon arasındaki temel bağıntılar oluşturularak KKT kapsamında hareket ve deformasyon uygunluk denklemleri türetilmektedir. Karışık sınır koşulları için kısmi türevli diferansiyel denklemler Galerkin Yöntemi uygulanarak çözüldükten sonra frekans için formül elde edilmektedir. Elde edilen ifade dalga sayılarına göre minimize edilerek, boyutsuz frekans parametresinin minimum değerleri bulunmaktadır. Elde edilen sayısal sonuçlar literatürdeki mevcut sonuçlarla mukayese edilerek doğruluğu teyit edilmiştir. FDM'lerin kritik parametreler üzerindeki etkilerini görmek için çeşitli profillerin yer aldığı yeni ve özgün sayısal örnekler sunulmaktadır. Son olarak hacim kesir fonksiyonu ve indeksi değerinin, silindirin uzunluğu ve kalınlığının yarıçapına oranları değişiminin frekans parametrelerine etkileri detaylı olarak incelenmektedir.

Sayısal hesaplarda MAPLE 14, EXCEL ve AutoCAD bilgisayar programları kullanılmaktadır.



## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerle İlgili Makale Özetleri

Bu alt bölümde FDM'lerin üretimi, özellikleri, davranışları ve uygulamalarına ait makale özetleri yer almaktadır.

Yeni nesil kompozit malzemelerin yapısal özelliklerine bağlı olarak derecelenebilir olması fikri ilk olarak Bever ve Duwez (1972) çalışmasında ortaya atılmış ve yerel özelliklerde ortaya çıkan değişimlerin malzemenin genel özelliklerini etkilediği gösterilmiştir. Çeşitli fonksiyonel dereceli kompozitler ele alınarak onların özellikleri teorik incelenmiş ve potansiyel uygulamalara sahip olabileceklerine dikkat çekilmiştir. Bu dönemde teknolojinin seviyesi Bever ve Duwez (1972) çalışmasının sonuçlarını uygulanmasına olanak sağlamamıştır.

Butcher (1999) çalışmasında, FDM'nin Young modülünün uzay koordinatlarına bağlı olarak derecelendirilmesini deneysel olarak araştırmıştır. Yazar optik interferometri kullanarak, deneysel olarak elastisite modülünün geçişlerinin uygun uzunluk ölçekleri üzerinde meydana geldiğini göstermiştir. Çatlaklarda kırık parametreleri ayıklamak için optik ölçümler kullanılmıştır. FDM'nin ölçülen elastik özelliklerini içeren sonuçlar sonlu eleman sonuçları ile mükayese edilmiştir. Parçalı homojen eklem yerine FDM tabakasının kullanılmasının avantajı, çatlak oluşumu testleri ile gösterilmiştir.

FDM'lerin üretimi ile ilgili ilk çalışmalardan biri Fukui (1991) çalışmasıdır. Bu çalışmada, merkezkaç döküm tekniği yöntemi, yani metal içerisindeki seramik tozunun derecelenmiş dağılımına merkezkaç kuvvetinin olanak sağladığı dikkate alınarak FDM'ler üretilmiştir. Deneysel bir model olarak plaster ve korindon malzemelerin karışımı kullanılmıştır. FDM oluşturmak için farklı hacim kesirlere

sahip malzemelerin karışımı halka şeklindeki kalıplara dökülmüş ve üçüncü mertebeden polinomlar kullanılarak, korindon profili ölçülmüştür. Merkezkaç kuvvetinin ve tozun hacim kesrinin dağılım üzerindeki etkisi matematiksel bir model olarak sunulmuştur.

Hirai (1996) çalışmasında, metal, seramik, polimer, yarı iletkenler ve kompozitler içeren çeşitli malzeme türleri ile ilgili özet bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca bu çalışma, Malzeme Bilimi ve Teknolojik uygulamalar ve işlemler ile ilgili temel ilkeler sunmaktadır. Malzeme Bilimi ve Teknoloji baskısı olan bu online sistem 14.000 sayfadan ve 24 adet baskıdan oluşan bilgiyi paylaşmaktadır. Aynı zamanda sistem, onbin adet resim ve binden fazla çizelge içermektedir.

Young modülü kalınlığın fonksiyonu olarak değişen yüzeyin noktasal kuvvet altındaki gerilmelerine ait analitik ve sayısal sonuçlar sunulmuştur. Kalınlık doğrultusunda değişen özellikler dışında malzemenin doğrusal elastik ve yerel izotropik olduğu varsayılmıştır. Kapalı form çözümleri, birçok Poisson oranı değerleri ve basit bir kuvvet kuralı ve üstel değişimleri için türetilmiştir. Analitik çözümler sonlu elemanlar simülasyonlarıyla kontrol edilmiştir. Kuvvet kuralı durumunda noktasal yük altındaki gerilme dağılımında değişikliklerin meydana geldiği bir kritik Poisson oranı olduğu gösterilmiştir. Bununla birlikte, Poisson oranının Young modülüne göre daha az duyarlı olduğu gösterilmiştir (Giannakopoulos ve Suresh, 1997).

Eski günlerden beri derecelendirilmiş yapılar sıradan mühendislik malzemelerinde bulunmaktadır. Ancak, istenilen fonksiyon ve özellikleri elde etmek için malzemenin bileşeninin veya mikro yapısının derecelendirilmesi FDM olarak bilinmektedir. FDM, kimyasal, biyokimyasal ve mekanik özelliklerinin derecelendirilmesiyle bir çok alanda uygulanma potansiyeline sahiptir. Bu çalışmada, termal bariyer malzemeleri üzerine yapılan çalışmalara atıfta bulunarak FDM kavramı kısaca açıklanmıştır (Kawasaki ve Watanabe, 1997).

Kieback vd. (2003) makalesinde, Alman bilim adamlarının öncülüğünde yapılan “Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler” in işleme teknikleri ilgili çalışmalar özetlenmiştir. Toz işleme süreci ve teknikleri tanımlanarak derecelendirilmiş polimer tabanlı işleme alanındaki son gelişmeler sunulmuştur. Ayrıca, pişirme ve kurutma yöntemleri ile bulunan FDM'lerin simülasyonuna ait bazı uygulamaları sunulmuştur.

Japonya'nın Sendai Bölgesinde, 1984 yılında malzeme bilimcileri tarafından yeni malzeme türü olarak FDM kavramı ortaya atılmıştır ve ilk olarak termal engel olarak kullanılması hedeflenmiştir. FDM'leri oluşturan bileşenlerin mikro yapılarında ve gözeneklilerinde oluşan, sürekli ve yumuşak geçişli değişiklikler sonucunda onların sertliklerinin ve ısı dayanımının arttığı gözlenmiştir. 1987 yılında Japonya'da, başlatılan ve 1992 yılında başarı ile sonlandırılan “FDM'lerin basit teknolojileri üzerinde incelemeler” başlıklı projede 300 mm<sup>2</sup> levha ve SiC-C ile üretilmiş 50 mm üst kısmı açık yarım dairesel koni hazırlanmıştır. Bu çalışmaların ardından FDM'ler üzerine Ar-Ge çalışmaları hız kazanmıştır (Koizumi, 1993).

1987 yılında başlatılan ve 1992 yılında başarı ile sonlandırılan “FDM'lerin basit teknolojileri üzerinde araştırmalar” başlıklı projenin ardından 1993 yılında, ikinci ulusal proje, FDM araştırılma ve geliştirmesi için başlatılmıştır. Bu çalışmada, program çerçevesinde, enerji dönüşüm verimliliğinin iyileştirilmesi ve FDM'lerin üretim teknolojisinin geliştirilmesi hedeflenmiştir (Koizumi, 1997).

Lambros vd. (1999) makalesinde, FDM'lerin tasarımı ve üretimi ile ilgili temel bilgilerin yanı sıra, deney çalışmaları ile ilgili bilgiler sunmuştur. Selektif ultraviyole ışınlama yöntemi kullanarak FDM'lerin oluşumunu sağlamıştır. Etilen-karbon monoksit (E-KM) maddesinin selektif ultraviyole ışığı altında çabuk derecelenme özelliğine sahip olmasından dolayı FDM üretilmiştir. Işın altındaki E-KM önce sertleşir ve dayanaklığı artmaktadır, fakat artan ışınlama ile gevrekleşmektedir. Ultraviyole ışınlama etkisi altındaki E-KM'nin davranışı bir dizi çekme testi ile test edilmiştir. Ayrıca, özellikleri sürekli ve süreksiz fonksiyonlar şeklinde değişen numunelerin ışınlama süresinin kontrolü yapılmıştır. Üretilen FDM'lerin, Young

modüllerinin 160 MPa'dan 250 MPa'ya arttığı ve 150 mm genişlikteki numunede çökme zorlaması %900'den %10'a kadar azaldığı gözlenmiştir.

Miyamoto vd. (1999) çalışmasında, malzeme özelliklerinin sürekli değişimine bağlı olarak FDM'lerde kompozisyon, yapı ve hacmin yumuşak bir biçimde değiştiği kanıtlanmıştır. FDM üretiminde, birçok olasılık düzgün uygulanması, malzemenin gelişeceğini ve yeni fonksiyonel malzemelerin oluşacağını göstermektedir. Bu çalışmada, FDM'lerin tasarımı, modellemesi hesabı ve uygulamaları detaylı olarak sunulmuştur.

Müller vd. (2003) çalışmasında, FDM'lerin hazırlanma teknolojileri, özellikleri ve uygulama alanlarının yanı sıra, sensörler ve termojeneratörlerde FDM'lerin uygulanması için onların termoelektrik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada ayrıca FDM'lerin çeşitli uygulamaları, örneğin; düşük sıcaklık katsayısına sahip kapasitörler için dielektrik ince-film kümesi, yakıt hücresi elektrotlarındaki mikrodalga-işlemcili yapı gradyanları ve Peltier ısıtıcılar için bölgesel-erimli değişimli  $(Bi_{1-x}Sb_x)_2Te_3$  malzemeleri ile ilgili önemli analizler gerçekleştirilmiştir.

Reddy ve Chin (1998) makalesinde, FDM' den oluşan aksel-simetrik silindirik kabuk ve plakların dinamik termoelastik tepkisi incelenmiştir. Termal yük etkisi altındaki FDM' den oluşan silindirin ısı iletimi ve termo-elastik denklemlerinin çözümü için bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Ek olarak, FDM' den oluşan plak için KDT kapsamında termo-elastik sınır değer problemi formüle edilmiş ve çözülmüştür. Her iki problemde, seramik ve metalin hacim kesirleri basit kuvvet kuralı dağılımına tabi tutulmuştur (Reddy ve Chin, 1998).

Suresh (2001) çalışmasında, FDM'lerin, temas durumunda meydana gelen deformasyonlara ve oluşan hasarlara karşı direnci değerlendirilmiş ve dereceli malzemelerin olası uygulamaları özetlenmiştir. FDM malzemelerin davranışları ve iç yapıları, triboloji, opto-elektronik, biomekanik, kırılma mekaniği ve nano teknoloji

gibi değişik dallarda ilgi çekçi hale gelmiştir. FDM kullanıldığında, normal ve kayma temasına veya çarpmaya karşı yüzeylerin bozulma direnci artabilir ve oluşacak hasar büyük ölçüde değişebilir.

FDM'ler, sürekli değişen bileşim profillerine sahip olacak şekilde tasarlanan iki veya daha fazla malzemeden oluşan homojen olmayan malzemelerdir. Bu çalışmada, FDM'lerin temel kavramları, sınıflandırılması, özellikleri ve hazırlanma yöntemlerine genel bir bakış sunulmuştur. Mevcut uygulama durumları dikkate alınarak bazı problemler tartışılmaktadır. FDM'lerin şu anki durumu ve gelecekteki beklentiler ile ilgili bilgiler sunulmuştur (Uduba vd., 2014).

## **2.2. FDM Kabukların Serbest Titreşim ve Stabilitesine Ait Makale Özetleri**

Bu alt başlıkta, pür FDM kabukların serbest ve parametrik titreşimleri ve stabilitesi ile ilgili önemli makalelerin özetleri sunulmaktadır.

İki ince fonksiyonel derecelendirilmiş piezoelektrik (FDP) tabakayla birleştirilmiş, fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik bir kabuğun üç boyutlu titreşim analizi için analitik bir yöntem sunulmuştur. Elektromekanik sistemi modellemek için birinci mertebe kayma deformasyon teorisi kullanılmıştır. Doğrusal olmayan hareket denklemleri, von Karman doğrusal olmayan şekildeğiştirme-yer değiştirme ilişkilerini dikkate alan Hamilton prensibi kullanılarak türetilmiştir. Çekirdeğin iç ve dış yüzeylerindeki piezoelektrik tabakalar, sistemin karakteristik titreşimini kontrol etmek için bir algılayıcı ve bir uyarıcı olarak düşünölebilmektedir. Hareket denklemleri, kısmi diferansiyel denklemler olarak türetilmiş ve Navier yöntemi ile ayrık hale getirilmiştir. Silindirin karakteristik titreşimine farklı malzeme ve geometri parametrelerinin etkisini araştırmak için sayısal simölasyon gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, sistemin doğal frekansının FDP katmanlarının ve fonksiyonel derecelendirilmiş çekirdeğin homojen olmama



indeksinin artmasıyla azaldığını göstermektedir. Dahası, çekirdek kalınlığı/silindir uzunluğu oranının artmasıyla silindirin doğal frekanslarının önemli ölçüde arttığı sonucuna varılmıştır (Arefi vd., 2016).

Brischetto (2016) çalışmasında, FDM yapılarının serbest titreşim analizi için kullanılan üç boyutlu denge denklemlerinde eğrilik terimlerinin etkileri araştırılmıştır. 3B denge denklemleri, küresel kabuklar için geçerli olan, genel ortogonal eğrisel koordinatlarda yazılmıştır. Bunlar, iki eğrilik yarıçapından birinin ve ikisinin de sonsuz olarak dikkate alındığı, sırasıyla, silindirik kabuk ve plaklar için kolayca dönüştürülebilmektedir. 3B denge denklemlerindeki eğrilik terimleri yaklaşımı, frekans analizi ile değerlendirilmiştir. Kesin geometri 3B denge denklemleri ile elde edilen sonuçlar, eğrilik terimleri yaklaşımıyla yazılan 3B denge denklemleri ile hesaplanan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Eğrilik yaklaşımının etkileri, yapıların eğriliklerine ve kalınlıklarına, malzemelere, tabaka düzenine ve FDM yasalarına, frekans derecelerine ve titreşim modlarına bağlı olmaktadır. Sonuçta oluşan ikinci mertebe kısmi diferansiyel denklemler sistemi, değişkenleri iki katına çıkaran birinci mertebe kısmi diferansiyel denklem sistemine indirgenmiştir. Bu nedenle, üstel matris yöntemi bir layerwise yaklaşımı kullanılarak uygulanmıştır. Son durumdaki 3B denklemler, harmonik yer değiştirme bileşenleri ve basit mesnetli yapılar dikkate alınarak kesin olarak çözülmüştür. Eğrilik terimleri yaklaşımı, kabuk 3B denge denklemlerinde ortaya atılmıştır. Sayısal nedenlerden dolayı, ara tabakalardaki süreklilik koşulları, üst ve alt yüzey sınır ile yükleme koşulları tam geometri de dahil edilerek yazılmıştır. Eğrilik yaklaşımlarının sadece denge denklemlerine girmesi, serbest titreşim problemlerinde FDM yapılarının eğrilik terimlerinin önemini analizini elde etmek için yeterli olmaktadır.

Golpayegani ve Ghorbani (2016) makalede, düzgün olmayan doğrusal ve doğrusal olmayan iç basınç altında FDM ince silindirik kabukların serbest titreşimleri araştırmış ve düzgün olmayan iç basıncın serbest titreşimlere ve doğal frekanslara etkisi analiz etmişlerdir. Bu çalışmada, iki kenarı basit mesnetli sınır şartı kullanılmış ve denklemlerin türetilmesi amacıyla Sanders ince kabuk teorisi ve Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan basınç profili, malzeme,

kalınlık/yarıçap ve uzunluk/ çap oranları gibi çeşitli parametrelerin iç basınç altında kabukların doğal frekansları ve serbest titreşimlerine etkisi araştırılmıştır. Ek olarak, iç basınçların doğal frekans profillerine etkisi farklı boyuna modlarda ve ortamda türetilmiştir. Literatürdeki verilerle ve ABAQUS yazılımı ile doğrulanan bu çalışmanın sonuçları, gelecekteki tasarımcılar ve araştırmacılar için bir referans olarak kullanılabilir.

Ebrahimi ve Najafzadeh (2014) makalesinde, FD dairesel silindirik kabuğun serbest titreşimi analiz edilmiştir. Hareket denklemleri, klasik kabuk teorisine dayanmaktadır. Hareket denklemlerinin ve sınır koşullarının uzaysal türevleri, genelleştirilmiş diferansiyel kareleme ve genelleştirilmiş integral kareleme yöntemleriyle ayrıştırılmıştır. İki çeşit mikromekanik model, Voigt ve Mori-Tanaka modelleri kullanılmıştır. Sonuçları doğrulamak için, literatürdeki uygun sonuçlarla kıyaslama yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, bileşenlerin hacim oranlarının değiştirilmesiyle beklenen sonuçları karşılamak için malzemenin doğal frekansının değiştirilebileceğini göstermektedir.

Ersoy vd. (2016) makalesinde, dairesel silindirik kabuklar, kesik koni kabuklar ve dairesel plakların serbest titreşim analizi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal simülasyonlar için sırasıyla tekil sarım yöntemi (DSC) ve diferansiyel kareleştirme (DQ) yöntemi kullanılmıştır. Yüksek mertebe kayma deformasyon teorisinden elde edilen temel hareket denklemlerini tanımlayan kısmi türevli diferansiyel denklemler, uzayda bu iki yöntemin kullanılmasıyla çözülmüştür. İzotropik, tabakalı ve FDM gibi farklı malzeme özellikleri dikkate alınmıştır. FDM durumlarında, seramik hacim kesir için dört parametrelilik kuvvet kuralı ve basit kuvvet kuralı dağılımları kullanılmıştır. Mevcut iki teknikte elde edilen koni kabukların serbest titreşimiyle ilgili sayısal sonuçlar, literatürdeki sonuçlar ile kıyas edilmiştir. Farklı geometrik ve malzeme parametreleri için dairesel silindirik kabuk ve dairesel plak sonuçları da sunulmuştur. Dairesel plaklar ve kabuklar için ağ dağılım tipinin ve sayısının etkileri de incelenmiştir.

Jin vd. (2014) makalede, FDSK'ların serbest titreşimini Haar dalgacık yöntemi uygulayarak KDT çerçevesinde incelemiştir. Önce Levi yaklaşımına göre

değişkenlerin ayrıklaştırılması gerçekleştirilmiş ve Haar dalgacık ayrıklaştırması aksenal doğrultu için kullanılmıştır. Fourier serisi uygulanarak kısmi türevli diferansiyel denklemler cebirsel denklemlere dönüştürülmüş ve bilinmeyen integral sabitleri sınır koşullarından belirlenmiştir. FDSK'ların frekansları cebirsel denklemlerin çözümünden elde edilmiştir. Sayısal örnekler literatürdeki sonuçlarla mukayese edilerek makalede uygulanan yöntemin doğruluğu ve güvenilirliği kanıtlanmıştır.

Kadoli ve Ganesan (2006) makalesinde, her iki ucu ankastre mesnetli FDSK'ların termal stabilite ve serbest titreşim analizleri ele alınmıştır. FDSK'ların özellikleri kalınlık koordinatına bağlı olarak sürekli değişmektedir. Problemin formülasyonu KDT çerçevesinde ele alınmıştır. Sayısal analizlerde, kritik parametrelere, kuvvet indeksinin ve FDSK karakteristiklerinin değişim etkileri araştırılmıştır. Yüksek sıcaklık altındaki FDSK'ların minimum doğal frekansına karşı gelen dalga sayılarının, minimum burkulma sıcaklığı dalga sayılarına mukayesede keskin azaldığı tespit edilmiştir.

Eğik kenarlı bir elastik temel üzerine kısmen oturan, FDM silindirik kabukların serbest titreşim özellikleri analitik bir yöntemle araştırılmıştır. Silindirik kabuk, Pasternak modeli ile temsil edilen elastik bir temel ile kısmen çevrelenmiştir. Esnek temelin bir kenarı, kabuk eksenine ile belli bir açı yapan eğik bir düzlemdir. Kabuk hareketi, dönel ataleti ve enine kayma şekil değiştirmelerini hesaba katmak için birinci mertebe kayma deformasyon teorisi (FSDT) çerçevesinde ifade edilmektedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik kabuk, paslanmaz çelik ve silisyum nitrürden oluşmuştur. Malzeme özellikleri, bileşenlerin hacim kesir cinsinden dört parametrelili bir kuvvet kuralı dağılımına göre kalınlık boyunca sürekli değişmektedir. Özdeğer problemi için hareket denklemi, Rayleigh-Ritz yöntemi ve varyasyonel yaklaşımla elde edilmiştir. Buradaki yöntemi doğrulamak için, sayısal örnek sunulmuş ve literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Kim, 2015).

Liang vd. (2016) çalışmasında, FDM temel alan su altındaki halka takviyeli silindirik kabukların birleştirilmiş titreşim özellikleri araştırılmıştır. Flügge teorisi ve ortotropi

teorisi çerçevesinde su altındaki halka takviyeli FDM silindirik kabukların birleşik titreşim karakteristik denklemleri dalga yöntemi ile türetilmiştir. Su altındaki halka takviyeli FDM silindirik kabukların birleştirilmiş frekansı Newton iterasyon yöntemi ile elde edilmiştir. Mevcut analiz sonuçlar, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Hidrostatik basıncın, malzeme bileşeninin, hacim kesrinin, kabuk boyutunun, halka boyutu ve sayısı ile sınır koşullarının su altındaki halka takviyeli silindirik kabuğun doğal frekanslarına etkisi sayısal örneklerle gösterilmiştir.

Loy vd. (1999) makalesinde, paslanmaz çelik ve nikelin karışımından oluşan FDSK'ların serbest titreşiminin analizini gerçekleştirmiştir. Malzeme özellikleri, hacim kesri kuvvet kuralı dağılımına göre kalınlık doğrultusunda derecelenmektedir. Temel denklemler Kirchhoff-Love hipotezine dayanmaktadır. Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılarak sayısal analizler yapılmış ve hacim kesir ve malzeme bileşenlerinin frekans değerlerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar mevcut sonuçlarla mukayese edilerek doğruluğu saptanmıştır.

Mantari ve Soares (2014) bu makalede, FD kabukların eğilme analizleri için sinüs eğrisi şeklindeki yüksek mertebeden kayma deformasyon teorisinin optimizasyonu sunulmuştur. Temel denklemler ve sınır koşulları sanal iş yöntemi kullanılarak türetilmiştir. Basit mesnetli sınır koşulları altındaki FD plak ve kabuklar için Navier tipi kapalı çözüm elde edilmiştir. Sunulan sayısal sonuçlardan kesinlik durumlarında optimize işlemlerinin yararlı olduğu ve bilinmeyen sabitlerin koruma kesinliğinin muhtemel olduğu gibi kilit sonuçlar ortaya çıkmıştır.

Matsunaga (2008) makalesinde, enine kayma ve normal deformasyonlar ve atalet momentinin etkileri dikkate alınarak FDM sığ kabukların doğal frekansları ve burkulma yükleri analiz edilmiştir. Kabuğun elastisite modülünün, bileşenlerin hacim kesirlerine bağlı olarak kuvvet kuralı dağılımına göre değiştiği varsayılmıştır. FD dikdörtgen sığ kabuk için iki boyutlu (2D) yüksek mertebeli teorisinin bir dizi temel dinamik denklemleri Hamilton prensibi yardımıyla türetilmiştir. Basit mesnetli FD sığ kabuğun öz değer problemini çözmek için kesik yaklaşım teorilerinin birçok çeşidi uygulanmıştır. Düzlem içi gerilmelere maruz FD kabukların kritik burkulma

yükleri de elde edilmiştir ve düzlem içi gerilmelere maruz olmayan basit mesnetli FD kabukların burkulma gerilmesi ve doğal frekansı arasındaki bağıntı sunulmuştur.

FDSK'ların titreşim ve stabilitesi için iki boyutlu yüksek mertebeden deformasyon teorisi kullanılmıştır. FDSK'ların Young modülü, bileşenlerin hacim kesirlerine göre kuvvet kuralı dağılımı ile değiştiği varsayılmıştır. Normal ve enine kayma deformasyonları ve dönel atalet kuvvetleri gözönüne alınarak temel denklemler, Hamilton prensibi yardımıyla türetilmiştir. Basit mesnetli FDSK'nın öz değer problemi birçok yaklaşım teorileri kullanarak çözülmüştür. Söz konusu teorinin doğruluğunu kanıtlamak için,  $r=s=1$  modları için temel doğal frekansın yakınsama özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca, izotrop ve FD silindirik kabukların doğal frekansları mevcut sonuçlarla mukayese edilmektedir ve kullanılan teorinin avantajları sayısal olarak gösterilmektedir (Matsunaga, 2009).

Kısmen esnek temel üzerine oturan FDM silindirik kabukların akış kaynaklı titreşim özellikleri (doğal frekans ve kritik akış hızı) analitik bir yöntemle araştırılmıştır. Bu kabuklar sıvı ile tamamen doldurulmuş veya akışkan bir sıvıya maruz bırakılmıştır. Silindirik kabuklar, Pasternak modeli ile temsil edilen eğik kenarlı elastik bir temel ile kısmen çevrelenmiştir. Esnek temelin bir sınır kenarı, kabuk eksenine ile belli bir açı yapan eğik bir düzlemdir. FDM modellerinin uygun malzeme özellikleri, Voigt ve Mori-Tanaka modelleri gibi iki homojenleştirme yöntemine dayanılarak elde edilmiştir. Malzeme özellikleri, bileşenlerin hacim kesri cinsinden dört parametrelilik bir kuvvet kuralı dağılımına göre kalınlık boyunca sürekli olarak değişmektedir. Termal etkiler de dahil edilmiş ve FDM malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılmıştır. Akışkan, klasik potansiyel akış teorisi ile tanımlanmıştır. Özdeğer problemi için temel denklem Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Mevcut yöntemi doğrulamak için sayısal örnekler sunulmuş ve literatürde mevcut olan sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Park ve Kim, 2016).

Pitakthapanaphong ve Busso (2002) makalesinde, ısı yükleri etkisi altındaki FDM katman içeren genel üçlü sistemin analizleri yapılmıştır. FDM ara eleman

kullanılarak metalik ve seramik tabakalardan oluşan üçlü sistemin termo-elastik ve termo-elastoplastik davranışları tanımlanmıştır. Analitik ve yarı-analitik çözümler rasgele sıcaklığa maruz FDM içeren üçlü sistemdeki gerilme dağılımı için sunulmuştur. FDM katmanın elastoplastik davranışı homojenleştirme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu makalede, metalik fazın hacim kesir kuvvet-kuralına tabii olduğu varsayılmıştır. Sonlu eleman analizleri ile bulunan sayısal çözümler FDM sistemlerinin katmanları arasındaki gerilme dağılımları karşılaştırılmıştır ve iyi uyum içinde olduğu görülmüştür.

Sofiyev (2003) çalışmasında, zamana bağlı kuvvet fonksiyonu şeklinde değişen dış basınç yükü etkisi altındaki FDSK'ların dinamik burkulma problemini ele almıştır. FDSK'ların özellikleri kalınlık doğrultusunda kuvvet kuralı dağılımına bağlı olarak değişmektedir. Donnell tip dinamik stabilite ve uygunluk denklemlerinin türetilmesinde Love kabuk teorisi kullanılmaktadır. Önce Galerkin yöntemi ve ardından Ritz tip varyasyonel yöntem uygulanarak temel denklemler iki farklı başlangıç koşulları için çözülmüştür. Yükleme parametrelerinin yeteri kadar büyük değerlerinde kritik parametreler için analitik formüller bulunmuştur. Son olarak yapılan analizler, kritik parametrelerin, bileşen malzemelerden, yükleme parametrelerinin varyasyonlarından ve dış basınç yükünden önemli derecede etkilendiği görülmüştür.

FDM, metal ve seramik kaplamalarla kaplı olan sandviç silindirik kabukların KDT çerçevesinde titreşim ve burkulma davranışları incelenmiştir. FDM sandviç silindirik kabukların hareket denklemleri türetildikten sonra boyutsuz frekanslar ve kritik hidrostatik basınç yükü için kapalı form çözüm elde edilmektedir. FDM kaplamaların, kayma gerilmelerinin, kabuk karakteristiklerinin ve FDM profillerin boyutsuz frekansa ve kritik yüke etkileri detaylı bir biçimde analiz edilmiştir (Sofiyev, 2014).

Sofiyev (2015) yaptığı çalışmanın amacı, eksenel basınç yükü altında FD koni kabukların titreşim ve stabilitesini kayma deformasyon teorisini (KDT) kullanarak araştırmaktır. Kayma ile deformasyona uğrayabilen FD koni kabukların temel

denklemleri Donnell kabuk teorisi kullanılarak türetilmiş ve Galerkin yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Bu çalışmanın özgünlüğü, serbest mesnetli FD kesik koni kabukların boyutsuz frekansları ve kritik aksenal yükleri için KDT çerçevesinde kapalı form çözümleri elde etmektir. Kayma gerilmelerinin, bileşen profillerinin ve koni kabuk özelliklerinin kritik parametrelere etkilerini araştırmak için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmanın doğruluğunu göstermek amacıyla çeşitli çalışmalarla bazı karşılaştırmalar yapılmıştır.

Dönel ataletli ve Kayma gerilmeli ve gerilmesiz Pasternak temeline oturan, FD çekirdekli aksenal yüklü sandviç silindirik kabukların titreşim ve stabilitesi araştırılmıştır. Dinamik stabilite, kayma gerilmelerini içeren birinci mertebeye kayma deformasyon teorisi (BMKDT) çerçevesinde türetilmiştir. Kayma gerilmeli ve dönel ataletli ve Pasternak temeline oturan (FD) sandviç kabuklar için aksenal yük ve boyutsuz temel frekansı bulunmuştur. Son olarak, FD çekirdek değişimlerinin, elastik temellerin, kayma gerilmelerinin ve dönel ataletin temel frekanslara ve kritik aksenal yüklerle etkileri incelenmiştir (Sofiyev vd., 2015).

Çalışma, doğrusal olmayan Winkler elastik temeli ile etkileşen FDM ortotropik silindirik kabukların büyük genlik titreşimini Donnell kabuk teorisi çerçevesinde araştırmayı amaçlamıştır. Doğrusal olmayan elastik temel ile etkileşen FDM ortotropik silindirik kabukların temel denklemlerinin türetilmesi için Von-Karman tipi geometrik doğrusal olmama kullanılmıştır. Yukarıdaki denklemleri doğrusal olmayan adi diferansiyel denklem haline dönüştürmek için Süperpozisyon ve Galerkin yöntemleri kullanılmıştır. Doğrusal olmayan elastik temel ile etkileşen FD ortotropik silindirik kabuğun frekans-genlik karakteristikleri yarı-ters yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmanın doğruluğu, literatürdeki diğer çözümlerle karşılaştırılmasıyla kanıtlanmıştır. Ayrıca, doğrusal olmayan elastik temelin, titreşim genliğinin, FD ortotropik profillerin ve kabuk özelliklerinin etkilerini araştırmak amacıyla silindirik kabukların doğrusal olmayan frekans parametreleri için bazı yeni sonuçlar sunulmuştur (Sofiyev, 2016a).

Son yıllarda FD kabuğun parametrik titreşimleri, modern havacılık endüstrisindeki, füze teknolojisindeki ve makine mühendisliğindeki önemi nedeniyle daha fazla ilgi görmüştür. Statik ve zamana bağlı periyodik düzgün yanal basınca maruz kayma ile deforme olabilen fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kesik koni kabukların parametrik titreşimleri çalışılmıştır. Bu çalışma, serbestçe desteklenen FD kesik koni kabukların birinci mertebeye kayma deformasyon teorisine dayanan parametrik titreşimlerine yönelik ilk denemelerden biri olmuştur. FD kesik koni kabukların malzeme özellikleri, bileşenlerin hacim oranlarının bir kuvvet-kuralı dağılımına göre kalınlık boyunca sürekli olarak değişmektedir. İlk olarak, temel bağıntılar ve denklemler Donnell kabuk teorisi kullanılarak BMKDT ile türetilmiştir. Temel denklemleri çözmek amacıyla serbestçe desteklenen sınır koşulları için kritik parametrelerin minimum koşullarından belirlenecek bilinmeyen bir lamda parametresi kullanılmıştır. Bu kısmi diferansiyel denklemler Galerkin metodu kullanılarak, FD kesik konik kabukların parametrik titreşim davranışını tanımlayan Mathieu tipi diferansiyel denklem haline dönüştürülmüştür. Bolotin yöntemi vasıtasıyla, boyutsuz uyarılma frekansları belirlenmiştir. Kayma gerilmelerinin, hacim kesir indeksinin, FG profillerinin, statik ve dinamik yük faktörlerinin ve kesik koni kabuk özelliklerinin kararsız bölgelere etkilerini ortaya koymak için sayısal sonuçlar sunulmuştur. Mevcut çalışmada elde edilen ifadeler ve sonuçlar, FD koni kabukların yapılarında kullanılması, test edilmesi ve geliştirilmesi aşamalarında kullanılabilir (Sofiyev, 2016b).

Tornabene (2009), bu makalede, BMKDT çerçevesinde nispeten kalın FD konik, silindirik kabukların ve daire dilimli plakların dinamik davranışı incelenmiştir. Silindirik kabuk ve daire dilimli plak, konik kabuğun özel durumu olarak elde edilmiştir. Malzemelerin kalınlık boyunca izotropik ve homojen olmadığı durum için doğrusal elastisite teorisiyle geliştirilmiştir. İki bileşenli FD kabuk, metal ve seramikten meydana gelmiştir. Bu bileşenler kabuğun bir yüzeyinden diğerine kalınlık boyunca derecelendirilmiştir. Seramik için iki farklı 4 parametrelilik kuvvet kuralı dağılımı dikkate alınmıştır. Birinci kuvvet kuralı dağılımı için, yapının alt yüzeyinin seramikçe zengin olduğu varsayılırken diğer yüzeyin ise metalce zengin, seramikçe zengin veya metal ve seramik karışımından oluştuğu varsayılmıştır.



Homojen izotropik malzeme durumu FDM'nin özel bir durumu olarak elde edilmiştir. Hareket denklemleri beş kinematik parametrenin fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Çözüm, kabuğun orta yüzeyindeki noktaların genelleştirilmiş yerdeğiştirme bileşenleri cinsinden verilmiştir. Sistem denklemlerinin Genelleştirilmiş Diferansiyel Kareleme Metodu ile ayrıklaştırılması, Fourier mod genişleme metodolojisi kullanılmadan iki bağımsız değişkenin dahil olduğu standart bir doğrusal özdeğer problemine yol açmaktadır. Altı tür kabuk yapısına ilişkin sayısal sonuçlar, kuvvet kuralı indeksinin, kuvvet kuralı dağılımının ve düşünülen kabuk yapılarının mekanik davranışı üzerindeki etkilerini göstermektedir.

FDM kabuk yapılarının serbest titreşim tepkisi, ayrık bir çift yönetmenli kabuk elemanı temel alan etkili bir 3B-kabuk modeli kullanılarak incelenmiştir. Bu elemanla, üst ve alt yüzeylerdeki enine kayma şekil değiştirmelerinin olmaması durumu ayrık bir formda düşünülmüştür. Kabuk yapısı mekanik özelliklerinin, bileşenlerin hacim kesri cinsinden genel dört parametrelilik kuvvet- kuralı dağılımına göre, kalınlık doğrultusunda sürekli değiştiği varsayılmıştır. FDM kabuk yapıları için temel denklemler, virtüel iş prensibi kullanılarak türetilmiştir. Buradaki ayrık çift yönetmenli kabuk modelinin (AÇYKM) performansı ve doğruluğu, sonlu eleman analizlerinden elde edilen çözümlerin literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırılmasıyla kanıtlanmıştır (Wali vd., 2015).

Xu vd. (2018) çalışmasında, FD içi boş kalın silindirin zaman tanım alanlı dinamik tepkisi incelenmiştir. Silindirdeki elastik dalga yayılımının analizi için aksinel simetrik bir katı spektral sonlu eleman modeli önerilmiştir. Önerilen modelin etkinliği geleneksel sonlu elemanlar metodu ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Malzeme derecelendirilme modelinin etkisi analiz edilmiştir. Sonuçlar, mevcut yöntemin aksinel simetriye sahip FD katılarda elastik dalga yayılım analizi için etkinliğini göstermiş ve malzeme bileşimi varyasyonunun yapısal dalga yayılma davranışı üzerinde önemli bir etkisinin varlığını ortaya koymuştur.

Yıldız (2015) yüksek lisans tezinde, FDM çekirdekli seramik ve metalden oluşan silindirik kabukların parametrik titreşim problemi incelenmektedir. FD çekirdek

içeren sandviç silindirik kabukların dinamik stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri türetildikten sonra, Galerkin Yöntemi uygulanarak Mathieu-Hill denklemine dönüştürülmektedir. Bu denklem çözülerek FD sandviç silindirik kabukların kararsızlık bölgeleri, frekans parametresi ve kritik statik yük için ifadeler elde edilmektedir. Son olarak kararsızlık bölgelerinin sınırlarına, FD çekirdek çeşitlerinin ve hacim kesir bileşenleri değişiminin, kabuk karakteristikleri ve çekirdek-kabuk kalınlıkları oranı değişiminin etkileri kapsamlı bir şekilde incelenmektedir.

Zghal vd. (2018) çalışması, karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş, FD kompozit kabuk yapılarının serbest titreşim analizi ile ilgilidir. Düzgün dağılımlı ve yapının kalınlığı doğrultusunda derecelendirilmiş üç karbon nanotüp dağılımı göz önünde bulundurulmuştur. Etkili malzeme özellikleri bir mikro-mekanik model ile belirlenmiştir. Hareket denklemleri, daha yüksek mertebeli yerdeğiştirme alanı yardımıyla enine kayma deformasyonları ifade eden kabuk sonlu eleman formülasyonu temel alınarak türetilmiştir. Bu tür kabuk yapılarının titreşimsel davranışının öngörülmesinde uygulanabilirliği ve önerilen modelin etkinliğini vurgulamak için karbon nanotüpler ile güçlendirilmiş çeşitli FD kompozit kabuk yapıları için karşılaştırma çalışmaları yapılmıştır.

### **2.3. Farklı Sınır Koşulları Altındaki FDM Kabukların Serbest Titreşim ve**

#### **Stabilitesine Ait Makale Özetleri**

Bu alt başlıkta, farklı sınır koşulları altındaki FDM kabukların titreşim ve stabilitesine ait makale özetleri yer almaktadır.

Alibeigloo ve Jafarian (2016) makalesinde, karbon nanotüp takviyeli kompozit (CNTRC) silindirik kabuğun eğilme ve serbest titreşim analizi, üç boyutlu elastisite teorisi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tek duvarlı karbon nanotüp (SWCNT) takviyesi, kalınlık doğrultusunda düzgün dağılan (DD) veya fonksiyonel dereceli

(FD) olup, bunlar FD- $\Delta$ , FD-V, FD- $\diamond$  ve FG- X gibi durumlarda belirtilmiştir. CNTRC silindirik kabuğun uygun malzeme özellikleri, karışım kuralına ve ayrıca CNT verimlilik parametrelerini dikkate alarak belirtilmiştir. Basitçe desteklenen CNTRC silindirik kabuk için radyal koordinat boyunca durum uzayı tekniği ile birlikte eksenel koordinat boyunca Fourier serisi kullanılarak analitik bir çözüm gerçekleştirilmiştir. Dahası, diğer kenar sınır koşullarına sahip CNTRC silindirik kabuk için radyal koordinat boyunca durum uzayı tekniği ve eksenel koordinat boyunca diferansiyel karesel yöntem (DQM) kullanılarak yarı analitik bir çözüm sağlanmıştır. Mevcut yaklaşım, sayısal sonuçların mevcut yayınlanmış sonuçlarla karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Ayrıca, polimer matrisindeki CNT dağılımlarının, CNT hacim kesri, kenar sınır şartları ve yarıçap/kalınlık oranı, FD-CNTRC silindirik kabuğun eğilme ve serbest titreşim davranışına etkisi incelenmiştir.

Bochkarev ve Lekomtsev (2015) makalesinde, durgun bir ideal sıvı içeren ısıtmalı silindirik dairesel FDM kabukların doğal titreşim incelemelerinin sonuçları sunulmuştur. Zirkonyum oksit ve titanyum alaşımının bir karışımını temsil eden malzemenin sıcaklığa bağlı özellikleri, kuvvet kuralına göre kabuk kalınlığı boyunca değişmektedir. Radyal koordinat boyunca sıcaklık dağılımı, yarı-doğrusal bir boyutlu ısı iletim denkleminin çözülmesi ile ifade edilmiştir. Problemin matematiksel formülasyonu kabukların klasik teorisine ve virtüel yerdeğiştirme ilkesine dayanmaktadır. Sıvının davranışı, potansiyel teori çerçevesinde tanımlanmıştır. Geçirimsizlik koşulu ve sınır şartları ile birlikte ilgili dalga denklemi, Bubnov-Galerkin yöntemi kullanılarak bir denklem sistemine dönüştürülmüştür. Sonuç olarak, problemin aranan çözümü yarı analitik versiyonlu sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasıyla birleşik denklem sisteminin karmaşık özdeğerlerinin hesaplanmasına indirgenmiştir. Geliştirilen algoritmanın uygulanmasıyla elde edilen sonuçların güvenilirliği, bilinen sayısal analiz çözümleri ile karşılaştırma yapılarak kanıtlanmıştır. Farklı sınır koşullarına sahip dairesel silindirik kabukların elde edilen verileri, FDM'nin farklı hacim kesirlerindeki minimum titreşim frekansının sıcaklığa bağlılığını ortaya çıkarmıştır. Farklı ısıtma düzenleri ve geometrik boyutlar için kritik sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Boş ve sıvı içeren kabukların ısıtma ile oluşan dinamik özellikleri arasındaki fark analiz edilmiştir. Konsol kabuk durumunda,

sistemin titreşim davranışına en önemli etkiyi kabuğun içindeki sıvı varlığının meydana getirdiği gösterilmiştir.

Civalek (2017a) çalışmasında; dönel kesik koni kabukların, dairesel kabukların ve panellerin serbest titreşim analizi ayrı tekil sarım (ATS) yöntemi kullanılarak sunulmuştur. İzotropik, ortotropik, FDM ve tabakalı malzeme durumları göz önüne alınmıştır. Merkez kaç ve Koriyolis ivmelerinin etkileri ve başlangıç halka gergi kuvveti etkileri hesaba katılmıştır. Mevcut analiz, Love teorisinin birinci yaklaşımını temel almaktadır. Frekans değerleri; farklı tipteki sınır koşulları, dönme hızı, çevresel dalga sayısı, geometrik ve malzeme parametreleri için elde edilmiştir. Bu yöntem, mevcut sonuçların literatürde var olan sonuçlarla karşılaştırılmasıyla doğrulanmıştır. Dönel dairesel plakalarla ilgili bazı sonuçlar da koni kabuk denklemleri vasıtasıyla sunulmuştur. Mevcut yöntemin, dönel kabukların ve plakaların titreşim analizi için güvenilir ve uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

Civalek (2017b) çalışmasında, koni ve silindirik kabukların, kompozit tabakalı ve FDM'den yapılmış dairesel plakaların serbest titreşim analizi incelenmiştir. Karbon nanotüp takviyeli (CNTR) kompozit durum, FDM için de dikkate alınmıştır. Koni kabuk için hareket denklemleri, enine kayma deformasyon teorisi çerçevesinde Hamilton prensibi ile elde edilmiştir. Sistemin özdeğer problemini elde etmek için, ayrı tekil sarım yöntemi kullanılmıştır. FDM durumları için malzeme özellikleri, bir hacim kesir kuvvet kuralına ve dört parametrelilik kuvvet kuralı indekslerine göre kalınlık doğrultusunda derecelenmektedir. CNTR malzemesinin beş tip dağılımı da göz önüne alınmıştır. Bu yöntemin doğruluğunu kanıtlamak için, elde edilen sonuçların literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılması yapılmıştır. Silindirik kabukların ve FDM dairesel plakaların serbest titreşimleri özel durumlar olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, aynı zamanda karbon nanotüp takviyeli (CNTR) kompozit silindirik kabuklar ve dairesel plakalar için de sunulmuştur. Buradaki DSC yönteminin uygunluğunun ve doğruluğunun, fonksiyonel derecelendirilmiş ve CNTR fonksiyonel derecelendirilmiş kabukların titreşim problemi için oldukça iyi olduğu bulunmuştur.

Haddadpour vd. (2007) çalışmasında, farklı düzlem içi sınır koşulları altındaki, malzeme özellikleri sıcaklığa ve kalınlık koordinatına bağlı olarak sürekli değişen FDSK'ların serbest titreşimi araştırılmıştır. Silindirin dış ve iç yüzeylerindeki sıcaklıklar belirlenerek, sıcaklık artışının frekansa etkileri incelenmiştir. Kabuk kalınlığı doğrultusundaki sıcaklık dağılımı, kalınlık doğrultusundaki kararlı durum sıcaklık iletilimi ile bulunmuştur. Hareket denklemlerinin türetilmesinde Love kabuk teorisi ve von Karman-Donnell-tip kinematik doğrusal olmama kullanılmış ve sonra Galerkin yöntemi kullanılarak hareket denklemleri çözülmüştür. Kuvvet kuralı indeksinin, termal ortamda doğal frekans ve dalga sayılarına etkileri detaylı olarak analiz edilmiştir.

Isvandzibaei vd. (2016) makalesinde, basınç yüklemesine maruz FDM'den yapılmış destekli kalın duvarlı bir silindirik kabuğun titreşimi üzerine bir çalışma sunulmuştur. FDM kabuğu, paslanmaz çelik ve nikel olmak üzere iki bileşenden hacim kesir kuralına göre geliştirilmiştir. Kuvvet kuralı üs dağılımı için, yapının üst yüzeyi çelik / nikel açısından zengin olduğu, alt yüzey ise nikel / çelik bakımından zengin olduğu varsayılmıştır. FDM özellikleri kabuğun kalınlık doğrultusu boyunca derecelendirilmiştir. Bir basınç ve halka yüklemelerine maruz desteklenen FDM kalın kabuk denklemleri, birinci mertebe kayma deformasyon teorisi çerçevesinde oluşturulmuştur. Hareketin temel denklemleri, enerji fonksiyonu kullanılarak ve Ritz metodu uygulanarak oluşturulmuştur. FDM kalın kabuğun sınır koşulları; basit mesnetli-basit mesnetli, ankastre-ankastre, serbest-serbest, ankastre-serbest, ankastre-basit mesnetli, serbest-basit mesnetli, kayıcı mesnetli-serbest ve kayıcı mesnetli-ankastre şeklindedir. Hacim kesir kuralı üssünün, basınç yüklemesinin, halka konumunun ve farklı sınır koşullarının doğal frekans karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde mevcut olanlarla karşılaştırılmıştır.

Najafzadeh ve Isvandzibaei (2007) bu makalede, paslanmaz çelik ve nikelden oluşmuş FDSK'ların titreşim davranışını ele almıştır. Temel denklemler, enerji yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılarak problem çözüldükten sonra FDM özellikleri ve sınır koşullarının frekans değerlerine etkileri

araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırılarak doğruluğu kanıtlanmıştır.

Pandey ve Pradyumna (2015) makalesinde, termal ve termal olmayan ortamlarda FDM sandviç kabuğun dinamik analizi için bir layerwise sonlu elemanlar formülasyonu sunulmuştur. Bu çalışmada kullanılan layerwise teorisi, tabaka arayüzünde yer değiştirme sürekliliğini sağlayan her tabaka için birinci mertebeye kayma deformasyon teorisine (BMKDT) dayanmaktadır. FDM sandviç kabukların, birincisi FDM yüzey tabakalı ve homojen çekirdekli ikincisi ise homojen yüzey tabakalı ve FDM çekirdekli iki durumu dikkate alınmıştır. FDM'nin uygun malzeme özellikleri, Voight karışım kuralı (ROM) ve Mori-Tanaka (MT) şeması olmak üzere iki mikro-mekanik modele göre hesaplanmıştır. Termal ortamdaki kabuklar için, kalınlık doğrultusunda doğrusal olmayan bir sıcaklık dağılımı dikkate alınmış ve elastik özelliklerin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılmıştır. Önerilen formülasyondan elde edilen sonuçlar, literatürde mevcut olanlarla doğrulanmıştır. Farklı geometrik ve sınır koşulları için Sanders, Love ve Donnell kabuk teorilerinden elde edilen doğal frekanslar, termal olmayan ortamda FDM sandviç kabukları için farklı kabuk teorilerinin performansını değerlendirmek amacıyla karşılaştırılmıştır. Hacim kesir indeksinin, çekirdek kalınlığının ve sıcaklık değişiminin FDM sandviç kabukların doğal frekanslarına etkisi incelenmiştir. Sunulan formülasyon basit, doğru ve hesap açısından uygundur.

Bu çalışmada, paslanmaz çelik ve zirkonyumdan üretilen FDSK'ların titreşim problemi ele alınmıştır. Malzeme özellikleri hacim oranları kuvvet kuralı dağılımına göre kalınlık koordinatına sürekli bağlı olarak değiştiği varsayılmaktadır. Sınır koşullarının ve hacim oranlarının FDSK'ların doğal frekanslarına olan tesirleri analiz edilmiştir. FDSK'ların frekans karakteristikleri ile izotropik silindirik kabukların frekans karakteristiklerinin benzer olduğu görülmüştür. Ayrıca, FDSK'ların doğal frekanslarının hacim oranları bileşenleri ve sınır koşullarına bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir. Temel bağıntılar için Kirchhoff- Love varsayımı kullanılmıştır. Temel denklemlerin çözümü için Rayleigh yöntemi uygulanmış ve elde edilen analitik

sonuçlar literatürdeki çalışmalarla mukayese edilerek doğrulanmıştır (Pradhan vd., 2000).

Qu vd. (2013) alışması, keyfi sınır koşullarına sahip FD dñnel kabukların serbest, kararlı durum ve geçici titreşim analizlerini içermektedir. Denklemler, BMKDKT'yi temel alan çok parçalı bir bñlme prosedürü ile dñzenlenmiř bir varyasyonel prensibiyle tñretilmiřtir. Kabuk malzeme özelliklerinin bileşenlerin hacim oranları cinsinden 4 parametrelili kuvvet kuralı dağılımına göre kalınlık doğrultusunda derecelendirilmiştir. Fourier serisi ve polinomları, her bir kabuk parçasının yer değiştirmesini ve dñnmesini açmak için uygulanmıştır. Formülasyonun çok yönlñlüđü, Chebyshev ortogonal polinomlarının, Legendre ortogonal polinomlarının, Hermite ortogonal polinomlarının ve güç polinomlarının uygulanmasıyla gösterilmiştir. Farklı sınır koşulları için FD silindirik, konik ve küresel kabukların serbest titreşimleri için sayısal örnekler verilmiştir. Çalışma, literatürdeki uygun sonuç ve sonlu elemanlar özömleriyle doğrulanmıştır. Kuvvet kuralı dağılımlarının, sınırı şartlarının ve yüklenme süresinin koni kabukların geçici tepkilerine etkileri incelenmiştir.

## **2.4. Karışık Sınır Koşulları Altındaki Homojen ve FDM Kabukların Serbest**

### **Titreşim ve Stabilitesine Ait Makale Özetleri**

Bu alt bölümde, karışık sınır koşulları altındaki homojen ve FDM kabukların titreşim ve stabilitesine ait makale özetleri yer almaktadır.

Aganosov ve Sachenkov (1964) makalesinde, sığ olmayan kabukların diferansiyel denklemleri silindirik kabuk için çökmeye bağlı dñrdñncü mertebeden kısmi türevli diferansiyel denkleme, koni kabuklar Airy gerilme fonksiyonu ve çökmeye bağlı için dñrdñncü dereceden diferansiyel denkleme indirgenir. Problemin özümünde Galerkin yöntemi kullanılmaktadır. Geniş sınıf kabuklar için frekans ve kritik yük değerleri bulunmaktadır. Kabuklar için anlaşılır sayısal hesaplar yapılmaktadır.

Sayısal analizlerde ortaya çıkan farklılıklar yöntemin olarak sağladığı sınırlar içindedir.

Jin vd. (2016) makalesinde, keyfi sınır koşullarına sahip FDM çift eğrili kabuğun titreşim analizi için birleşik bir çözüm ifade edilmiştir. Çözüm, derinlik terimlerinin etkilerini hesaba katan birinci mertebe kayma deformasyon kabuk teorisi çerçevesinde düzenlenmiş Fourier serisi yöntemi ile türetilmiştir. Kabukların malzeme özelliklerinin, hacim kesirlerinin genel üç parametrelilik kuvvet kuralı fonksiyonlarına göre yüzey normali doğrultusunda sürekli ve düzenli olarak değiştiği varsayılmıştır. Özetle, kabukların enerji fonksiyonu, öncelikle beş yer değiştirme bileşeninin bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. Ardından, yer değiştirme bileşenlerinin her biri düzenlenmiş bir Fourier serisine açılmıştır. Son olarak, çözümler varyasyonel işlem kullanılarak elde edilmiştir. Çözümün uygunluğu ve doğruluğu, sonuçların literatürde bulunanlarla karşılaştırılmasıyla kanıtlanmıştır. Klasik ve elastik sınır koşullarının yanı sıra farklı geometrik ve malzeme parametreleri ne sahip dairesel halka şekilli, parabolit, hiperbolit, katenar, sikloidal ve elips şeklindeki kabukların yeni bir çeşit sonuçları sunulmuş ve bunlar gelecekteki araştırmalar için kıyaslayarak değerlendirme çözümü olarak kullanılabilir. Ayrıca, sınır koşullarının, kabuğun geometrik ve malzeme parametrelerinin frekanslara etkileri de incelenmektedir.

Sofiyev ve Kuruoglu (2015) makalesinde, karışık sınır koşullarına sahip FD kesik konik kabukların titreşim problemlerini çözmek için teorik bir yaklaşım sunulmuştur. FD kabuğun malzeme özelliklerinin kabuk kalınlığı boyunca sürekli değiştiği varsayılmıştır. FD kesik konik kabukların temel bağıntıları, hareket ve deformasyon uygunluk denklemleri Airy gerilme fonksiyonu yardımıyla türetilmiştir. Temel denklemler Galerkin yöntemiyle çözülmüş ve FD kesik konik abukların temel frekansları elde edilmiştir. Sonuçlar literatürdeki uygun çalışmalarla kıyaslanarak doğrulanmıştır. Yarıçap/kalınlık, uzunluk/yarıçap oranları ile malzeme özelliklerinin ve karışık sınır koşullarının temel frekanslara etkileri detaylı olarak incelenmiştir.



Sofiyev vd. (2015) bu çalışmada, karışık sınır koşullarına sahip heterojen ortotropik konik kabukların titreşim davranışı analiz edilmiştir. Heterojen ortotropik kesik konik kabukların temel denklemleri Donnell-Mushtari kabuk teorisi kullanılarak türetilmiştir. İki karışık sınır koşuluna sahip heterojen ortotropik konik kabukların frekans ifadeleri değişkenlerine ayırma ve Galerkin yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Sonuçlar literatürdeki uygun değerlerle kıyaslanarak doğrulanmıştır. Kesik konik kabuk karakteristikleri, heterojenlik, malzeme ortotropisi ve karışık sınır koşullarının boyutsuz frekans parametrelerine etkileri araştırılmıştır.

Sofiyev (2019) makalesinde, hidrostatik basınca maruz ve karışık sınır koşullarına sahip kaplama-FD-substrat konik kabukların titreşimi ve burkulması incelenmiştir. Temel denklemler Donnell tipi doğrusal kabuk teorisi kullanılarak elde edilmiş ve Galerkin yöntemiyle çözülmüştür. Çalışmanın yeniliği, karışık sınır koşullarına sahip kaplama-FD-substrat konik kabukların kritik hidrostatik basıncı ve döngüsel frekansları için formüller elde edilmesidir. Son olarak, FD çekirdeklerin ve malzeme derecelenme indeksinin kritik hidrostatik basınca ve döngüsel frekanslara etkileri incelenmiştir.

Sofiyev ve Hui (2019) çalışmasında, dış basınca maruz ve karışık sınır koşullarına sahip FD silindirik kabukların titreşim ve stabilite problemleri birinci merteye kayma deformasyon teorisi (BMKDT) kullanılarak incelenmiştir. FD silindirik kabukların temel denklemleri Donnell tipi kabuk teorisiyle elde edilmiş ve Galerkin yöntemiyle çözülmüştür. Bu çalışmadaki yenilik, karışık sınır koşullarında özdeğer probleminin kapalı-form çözümünün BMKDT kapsamında elde edilmesidir. Son olarak, farklı hacim oranlarının, FD profillerinin ve kabuk özelliklerinin karışık sınır koşuluna sahip FD silindirik kabukların kritik parametrelerine etkileri incelenmiştir.

## 2.5. Tez Konusuna Ait Olan Kitaplardan Bazılarının Kısa Özetleri

Bu alt başlıkta tez konusu ile direkt bağılı olan ve tezin temel bağıntı, denklemleri ve çözüm yöntemlerinin bilimsel tabanını oluşturan önemli ve güncelliğini koruyan bilimsel kitapların özetleri sunulmuştur.

Amabili (2008) kitabında, plak ve kabukların doğrusal ve doğrusal olmayan titreşim ve stabilite problemlerini teorik ve deneysel sonuçları yer almaktadır. Ayrıca, plak ve kabukların doğrusal olmayan titreşim ve stabilitesine onların sıvı ile temasları esnasında ortaya çıkan etkiler dikkate alınarak problemlerin çözümü sunulmuştur. Geleneksel ve yeni nesil malzemelerden oluşan kabuk ve plakların titreşim ve stabilitesi için çok sayıda diyagram ve nümerik çözümler kitapta yer almaktadır. Kapsamlı bir matematiksel alt yapıya gereksinim duyulmadan, dinamik kararsızlık, dallanma ve karmaşık olgular kolaylıkla anlaşılabilir. Kitap, lisansüstü öğrencilerin kabuk ve plakların doğrusal olmayan mekaniğine ait tam metin içermektedir. Ayrıca, (ii) kitapta doğrusal olmayan dinamiğe giriş ve (iii) sıvı-yapı etkileşim problemlerini içeren, kabuk ve plakların doğrusal olmayan titreşim ve stabilitesine ait çalışmalar sunulmuştur.

Leissa (1973) kitabı, beş bölüm ve ekler kısmından oluşmakta olup, yapı elemanlarının titreşim davranışlarını içermektedir. Kitabın birinci bölümünde, elastik ince duvarlı kabukların temel denklemleri türetilmektedir. İkinci ve üçüncü bölümler, dairesel ince duvarlı silindirik kabukların titreşim davranışlarına adanmıştır. Kitabın dördüncü bölümü, dairesel olmayan ince duvarlı silindirik kabukların titreşim davranışlarını içermekte iken, beşinci bölüm koni kabukların titreşim problemlerinin çözümüne aittir. Sonuncu altıncı bölüm küresel ve diğer kabuk çeşitlerinin titreşim davranışlarına ait olup ek kısmında, kabukların hareket denklemlerinin yanı sıra, sınır koşulları, temel denklemlerinin çözümleri ve frekanslar için ifadeler yer almaktadır.

Geleneksel kompozit malzemelerin yetersizliği, tabakalı kompozitlerde mükemmel olduğu varsayılan arayüzeylerdeki hasarların oluşumundan kaynaklanmaktadır. Arayüzlerde gerilme yığılmasının meydana gelmesi temas yüzeylerinde çatlakların başlangıcını ve yayılımını artırmaktadır. Bu olay delaminasyon olarak adlandırılmaktadır. Japon malzeme bilimcileri, bir uzay aracı projesinde bu arayüzey problemini ortadan kaldırmayı hedeflediler. Bu çalışma sonucunda, geleneksel kompozit malzemelerdeki keskin arayüzü yerine sürekli olarak değişen bir arayüz ürettiler. Bu arayüzü oluşturan malzemeyi fonksiyonel derecel malzeme yani FDM olarak adlandırdılar. Böylece üretilen FDM zorlu çalışma koşullarına dayanabilmiş ve arayüzeydeki gerilme yığılmasının azalması sağlanmıştır. FDM'ler daha sonra birçok mühendislik alanında kullanılmıştır. FDM'ler, hacimsel olarak değişiklik gösteren değişken özellikli gelişmiş kompozit malzemelerdir. Kitap şu bölümlerden meydana gelmiştir; birinci bölümde FDM'nin tarihsel gelişimi verilmiştir. İkinci bölümde, FDM türleri ve kullanım alanları sunulmuştur. Üçüncü ve dördüncü bölümlerde ise, FDM üretim ve elde edilme tekniğinden söz edilmiştir. Beşinci bölümde, titanyum alaşımlı kompozit FDM için bir çalışma sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar detaylı olarak tartışılmıştır. Bölüm altı ise, kitabın kapsamlı bir özeti olarak ele alınmıştır (Mahamood ve Akinlabi, 2017).

Nayfeh ve Mook (1979) kitabı, titreşim problemlerinin çözüm tekniklerini içermektedir. Lineer olmamanı tanımlamak için genel bir bakış açısı geliştirilmiştir. İlk önce, tek serbestlik dereceli sistemler ele alınmış ve temel bağıntılar ve analitik çözüm yöntemleri gösterilmiştir. Sonraki bölümlerde temel bağıntı ve denklemler ve onların çözüm yöntemleri çok serbestlik dereceli sistemlere genişletilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan dalgaları tanımlamak için çeşitli örneklerin çözümleri sunulmuştur. Sonuçlar grafiksel olarak sunulmuş ve ayrıca kaynak özetleri sunulmuştur.

Bu monografi, kompozit kabuk ve plakların titreşimi konuları ile ilgili araştırmalar içermektedir. Çalışmada, kabuk ve plakların titreşiminin tarihsel gelişimini kabuk

teorilerini ve çözüm yöntemleri yer almaktadır. Ayrıca, kirişler, plaklar, sıg kabuklar, silindirik kabuklar, koni kabuklar ve küresel kabukların titreşimi ile ilgili çeşitli problemlerin çözümü bu çalışmada yer almaktadır. Bu kitap araştırmacılar ve mühendisler için önemli bir kaynaktır (Qatu, 2004).

Reddy (2004) çalışması on üç bölümden ibaret olup, tabakalı yapı elemanlarının değişik sınır koşulları ve yükler etkisi altında, kayma deformasyonu ve geometrik doğrusal olmama dikkate alınarak bir dizi problemlin çözümleri sunulmuştur. İlk üç bölümde temel bilgiler, kompozit anizotrop cisimlerin temel bağıntı ve denklemleri, sanal iş ve varyasyonel yöntemler yer almaktadır. Dördüncü bölüm kompozit malzemelere ait olan tanımlar, gerilme ve deformasyon dönüşümleri içermektedir. Bölüm 5 katmanlı plaklara, Bölüm 6 ise KKT ve KDT çerçevesinde tabakalı kirişler odaklanmıştır. Ortotropik dikdörtgen tabakaların KKT kapsamında analizi Bölüm 7'de sunulmuştur. KKT ve KDT çerçevesinde plak teorileri için Navier ve Levy yöntemleri kullanılarak doğal titreşimi, burkulma ve eğilme problemlerinin analitik çözümleri Bölüm 8 ve 9' in ana kısmını oluşturmaktadır. Kompozit tabakaların sonlu eleman analizi, yüksek mertebe tabaka teorileri ve tabaka yöntem teorisi ve sonlu elemanlar yöntemi ve analitik modeller sırasıyla Bölüm 11, 11 ve 12'de tincelenmiştir. Kompozit tabakaların geometrik olarak doğrusal olmayan davranışı sonuncu bölümde ele alınmıştır.

Shen (2009) kitabı FDM plak ve kabukların doğrusal olmayan analizi üzerine adanmış ilk ve çok kapsamlı bir çalışmadır. Hui-Shen Shen 2001 yılından başlayarak FDM plak ve kabukların doğrusal ve doğrusal olmayan tepkisi, doğrusal olmayan eğilme, burkulma ötesi ve doğrusal olmayan titreşimine ait olan araştırmalar yürütmektedir. Bu kitapta FDM için yer alan tüm bağıntılar, denklemler ve çözümleri yazar ve onun meslektaşlarına aittir.

Çalışmada, işleyiş metalürjisi, kompozit sentez, kompozitlerin mikro-mekaniği, kırılma mekaniği konularını içeren oldukça geniş kapsamlı konular ele alınmıştır. Ayrıca değişimli metallere ve metal/seramik kompozitlerin (FDM'lerin) termo-

mekanik tepkileri ve işleyişi üzerine çalışmalar sunulmuştur (Suresh ve Mortensen, 1998).

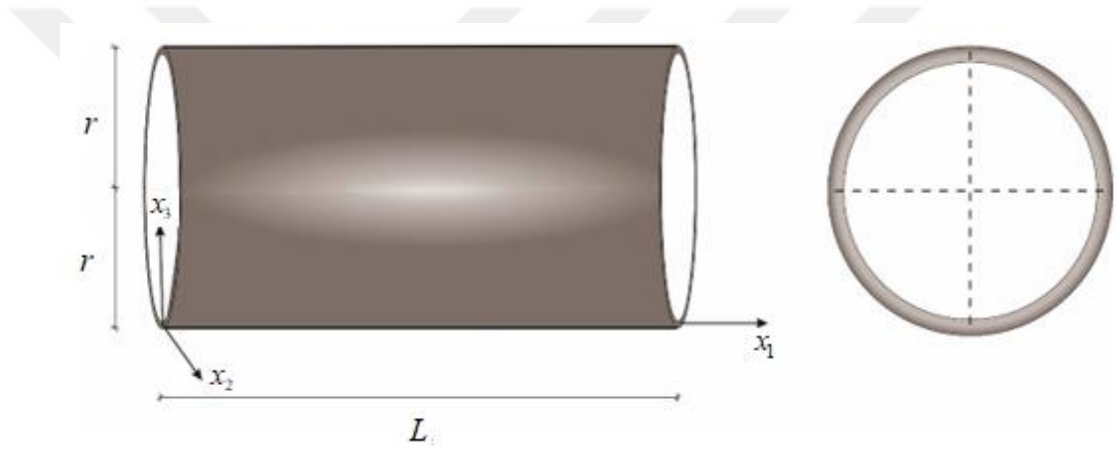
Bu kitapta, karbon çelikler, dökme demirler ve 800°C'nin üzerinde eriyen alaşımlı çelikler için termo fiziksel veriler grafik ve çizelgeler biçiminde sunulmuştur. İzlenen verileri, yoğunluk, erime noktası, füzyon ısısı, buharlaşma ve süblimleşme, sabit basınçta özgül ısı, ısı iletkenlik, yayılım, doğrusal genişleme, ışıma karakteristikleri ve buhar basıncı ve diğer termal özellikler araştırılmıştır (Touloukian, 1967).

Volmir (1967) kitabı, değişik statik ve dinamik yükler etkisi altındaki kiriş, plak ve kabukların lineer ve lineer olmayan eğilme, burkulma ve titreşim davranışları değişik teoriler kullanılarak formüle edilmiş ve çeşitli yöntemler kullanılarak çözümleri değişik sınır koşulları için sunulmuştur. Kitapta yer alan kiriş, plak ve kabukların elastik, plastik, viskoelastik ve visko-plastik davranışları ile ilgili deney yöntemleri ve sonuçları yer almaktadır. Ayrıca kitabın yayım tarihine kadar olan müddette, stabilite ve titreşim teorisine ait olan temel teorik ve deney çalışmaları kaynaklar listesinde sunulmuştur.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Problemin Formülasyonu

Uzunluğu  $L$ , yarıçayı  $r$  ve kalınlığı  $h$  olan FDSK'da koordinat sistemi sol uçta referans yüzeyinde bulunmaktadır.  $x_1$  ve  $x_2$  eksenleri sırasıyla uzunluk ve dairesel doğrultularda  $x_3$  eksenine ise onların bulunduğu yüzeye diktir (Şekil 3.1.1).



Şekil 3.1.1. FDSK, koordinat sistemi ve notlar

Tez çalışmasında, FDSK'ların etkin malzeme özellikleri aşağıdaki biçimde tanımlanmıştır (Touloukian, 1967):

$$P_f = P_0 \left( P_{-1} T^{-1} + 1 + T P_1 + T^2 P_2 + T^3 P_3 \right) \quad (3.1.1)$$

Burada  $P_j$ ,  $j = -1, 0, 1, 2, 3$  olup,  $T$  (K) sıcaklık katsayılarıdır ve bileşen materyallere özgüdür.

$P$  genel malzeme özelliği,  $P_1$  ve  $P_2$  sırasıyla metal ve seramiğin özellikleri ise, FDM'lerin Voight modeline dayanan etkin özellikleri aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$P = \sum_{i=1}^2 P_i V_i \quad (3.1.2)$$

Burada  $V_1$  ve  $V_2$  metal ve seramik fazlarının hacim kesirleri olup aşağıdaki bağıntı sağlanmaktadır:

$$V_1 + V_2 = 1 \quad (3.1.3)$$

Seramik fazın hacim kesir fonksiyonu kuvvet kuralına tabidir (Shen, 2009; Sofiyev 2003):

1. Kuvvet-kuralı  $V_2 = (X_3 + 0.5)^d, d \geq 0$  (3.1.4)

2. Ters kuadratik fonksiyon:  $V_2 = 1 - (0.5 - X_3)^2$  (3.1.5)

Burada  $d$ , kuvvet üstü olup hacim kesir indeksidir ve FDM'nin kalınlık yönü boyunca değişim profilini belirlemektedir.

Yukarıda belirtilen karışım kuralına dayanarak, FDM'lerin etkin malzeme özellikleri kalınlık koordinatının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki biçimde yazılabilir (Reddy ve Chin, 1998; Shen, 2009):

$$E_f = (E_1 - E_2)V_2 + E_2, \quad \nu_f = (\nu_1 - \nu_2)V_2 + \nu_2, \quad \rho_f = (\rho_1 - \rho_2)V_2 + \rho_2 \quad (3.1.6)$$

Burada  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  ve  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ , sırasıyla FDM'lerin metal ve seramik yüzeylerinin Young modülleri, Poisson oranları ve yoğunluklarıdır. FDM profiller hakkında ek ve detaylı bilgi Tornabene (2009) ve Sofiyev (2003) makalelerinde bulunabilir.

### 3.2. Temel Denklemlerin Çıkarılması

Hamilton prensibi uygulanarak, FDSK'ların hareket ve deformasyon uygunluk denklemleri aşağıdaki biçimde elde edilir (Volmir, 1967; Leissa, 1973; Nayfeh ve Mook, 1979):

$$\frac{\partial^2 m_{11}}{\partial x_1^2} + 2 \frac{\partial^2 m_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial^2 m_{22}}{\partial x_2^2} + \frac{n_{22}}{r} = \bar{\rho}_f \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} \quad (3.2.1)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{e}_{x_1}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \bar{e}_{x_2}}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 \bar{\gamma}_{x_1 x_2}}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} = 0 \quad (3.2.2)$$

Burada  $m_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) moment bileşenleri,  $\bar{e}_{x_1}$  ve  $\bar{e}_{x_2}$  FDSK'ların referans yüzeyindeki  $x_1$  ve  $x_2$  doğrultularındaki normal deformasyon bileşenleri,  $\bar{\gamma}_{x_1 x_2}$  referans yüzeydeki kayma deformasyonudur,  $t$  zaman parametresi,  $u_3$  çökme olup yönü eğrilik merkezine doğru yönelmektedir ve  $\bar{\rho}_f$  FDSK'nın yoğunluk parametresi olup aşağıdaki gibi tanımlanır:



$$\bar{\rho}_f = \int_{-h/2}^{h/2} \rho_f dx_3 \quad (3.2.3)$$

Kirchhoff-Love varsayımı temelinde FDSK'ların gerilme-deformasyon ilişkileri aşağıdaki biçimde ifade edilebilir (Shen, 2009):

$$\begin{bmatrix} \tau_{x_1} \\ \tau_{x_2} \\ \tau_{x_1x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11}(X_3) & E_{12}(X_3) & 0 \\ E_{12}(X_3) & E_{11}(X_3) & 0 \\ 0 & 0 & E_{66}(X_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{x_1} \\ e_{x_2} \\ \gamma_{x_1x_2} \end{bmatrix} \quad (3.2.4)$$

Burada  $\tau_{x_1}, \tau_{x_2}, \tau_{x_1x_2}$  ve  $e_{x_1}, e_{x_2}, \gamma_{x_1x_2}$  FDSK'ların sırasıyla gerilme bileşenleri ve referans yüzeyden  $x_3$  uzaklığındaki yüzeyin deformasyon bileşenleri ve  $E_{ij}(X_3)$ , ( $i, j = 1, 2, 6$ ), normalleştirilmiş kalınlık koordinatı  $X_3$ ' e bağlı olarak değişen büyüklükler olup aşağıdaki biçimde ifade edilir:

$$E_{11}(X_3) = \frac{E_f(X_3)}{1 - \nu_f^2(X_3)}, \quad E_{12}(X_3) = \nu_f E_{11}(X_3), \quad E_{66}(X_3) = \frac{E_f(X_3)}{2[1 + \nu_f(X_3)]} \quad (3.2.5)$$

FDSK'lar için stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri küçük yer değiştirmeler teorisi kullanılarak, yani  $u_3 \ll h$  eşitsizliği kullanılarak elde edilmektedir. Dolayısıyla FDSK'lar için Kirchhoff-Love varsayımı geçerlidir. Kirchhoff-Love varsayımları dikkate alındığında, yukarıda tanımlanan FDSK'lar için referans yüzeyden  $x_3$  uzaklığındaki yüzeyin deformasyon bileşenleri ile referans yüzeyin deformasyon bileşenleri arasındaki bağıntılar aşağıdaki biçimde ifade edilir (Reddy, 2004; Amabili, 2008):

$$e_{x_1} = \bar{e}_{x_1} - x_3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2}, \quad e_{x_2} = \bar{e}_{x_2} - x_3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2}, \quad \gamma_{x_1 x_2} = \bar{\gamma}_{x_1 x_2} - 2x_3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1 \partial x_2} \quad (3.2.6)$$

FDSK' nın kuvvet ve moment bileşenleri aşağıdaki integrallerden elde edilir (Reddy, 2004; Qatu, 2004):

$$(n_{11}, n_{22}, n_{12}) = \int_{-h/2}^{+h/2} (\tau_{x_1}, \tau_{x_2}, \tau_{x_1 x_2}) dx_3 \quad (3.2.7)$$

ve

$$(m_{11}, m_{22}, m_{12}) = \int_{-h/2}^{+h/2} x_3 (\tau_{x_1}, \tau_{x_2}, \tau_{x_1 x_2}) dx_3 \quad (3.2.8)$$

(3.2.6) ifadesi (3.2.4) bağıntısında yerine yazılıp elde edilen ifadeler (3.2.7) ve (3.2.8) integrallerinde dikkate alındığında FDSK' ların kuvvet ve moment bileşenleri için aşağıdaki denklemler bulunur:

$$n_{11} = k_{10} \bar{e}_{x_1} + k_{20} \bar{e}_{x_2} - k_{11} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} - k_{21} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2}$$

$$n_{22} = k_{20} \bar{e}_{x_1} + k_{10} \bar{e}_{x_2} - k_{21} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} - k_{11} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} \quad (3.2.9)$$

$$n_{12} = k_{60} \bar{\gamma}_{x_1 x_2} - 2k_{61} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1 \partial x_2}$$

ve

$$\begin{aligned}
m_{11} &= k_{11} \bar{e}_{x_1} + k_{21} \bar{e}_{x_2} - k_{12} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} - k_{22} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} \\
m_{22} &= k_{21} \bar{e}_{x_1} + k_{11} \bar{e}_{x_2} - k_{22} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} - k_{12} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} \\
m_{12} &= k_{61} \bar{\gamma}_{x_1 x_2} - 2k_{62} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1 \partial x_2}
\end{aligned} \tag{3.2.10}$$

Burada, aşağıdaki tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}
k_{1\alpha} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E_f(X_3)}{1 - [v_f(X_3)]^2} x_3^\alpha dx_3 \\
k_{2\alpha} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{v_f(X_3) E_f(X_3)}{1 - [v_f(X_3)]^2} x_3^\alpha dx_3 \\
k_{6\alpha} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E_f(X_3)}{2[1 + v_f(X_3)]} x_3^\alpha dx_3, \alpha = 0, 1, 2
\end{aligned} \tag{3.2.11}$$

$n_{ij}$  ( $i, j = 1, 2$ ) kuvvet bileşenleriyle  $\phi$  Airy gerilme fonksiyonu arasındaki bağıntılar aşağıdaki biçimdedir (Volmir, 1967; Qatu, 2004):

$$n_{11} = h \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2}, n_{22} = h \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2}, n_{12} = -h \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_2} \tag{3.2.12}$$

(3.2.12) ifadesi (3.2.9) denklemlerinde yerine yazıldığında, referans yüzeydeki  $\bar{e}_{x_1}, \bar{e}_{x_2}, \bar{\gamma}_{x_1x_2}$  deformasyon bileşenleri şu şekle dönüşür:

$$\begin{aligned}\bar{e}_{x_1} &= q_1 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} + q_2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} - q_3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} - q_4 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} \\ \bar{e}_{x_2} &= q_2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} + q_1 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} - q_4 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} - q_3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} \\ \bar{\gamma}_{x_1x_2} &= -q_5 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_2} - q_6 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1 \partial x_2}\end{aligned}\tag{3.2.13}$$

Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}q_1 &= k_{10} \Delta, \quad q_2 = -k_{20} \Delta, \quad q_3 = (k_{20} k_{21} - k_{11} k_{10}) \Delta, \\ q_4 &= (k_{20} k_{11} - k_{21} k_{10}) \Delta, \quad q_5 = \frac{1}{k_{60}}, \quad q_6 = -\frac{2k_{61}}{k_{60}}, \quad \Delta = \frac{1}{k_{10} k_{10} - k_{20} k_{20}}\end{aligned}\tag{3.2.14}$$

(3.3.10) bağıntıları (3.3.7) ifadelerinde yerine yazıldığında, moment bileşenlerinin ifadeleri, şu biçimde yazılabilir:

$$\begin{aligned}m_{11} &= C_1 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} + C_2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} - C_3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} - C_4 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} \\ m_{22} &= C_2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_2^2} + C_1 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} - C_4 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} - C_3 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_2^2} \\ m_{12} &= -C_5 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_2} - C_6 \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1 \partial x_2}\end{aligned}\tag{3.2.15}$$

Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$Q_1 = k_{11}q_1 + k_{21}q_2, \quad Q_2 = k_{11}q_2 + k_{21}q_1, \quad Q_3 = k_{11}q_3 + k_{21}q_4 + k_{12}, \quad (3.2.16)$$

$$Q_4 = k_{11}q_4 + k_{21}q_3 + k_{22}, \quad Q_5 = k_{61}q_5, \quad Q_6 = k_{61}q_6 + k_{62}$$

(3.2.13), (3.2.14) ve (3.2.15) bağıntıları (3.2.1) ve (3.2.2) temel denklemlerinde yerine yazıldığında bazı işlemlerde sonra aşağıdaki ekle dönüşür:

$$L_1(\phi, u_3) \equiv Q_2 h \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_1^4} + 2(Q_1 - Q_5) h \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + Q_2 h \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_2^4} + \frac{h}{r} \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} \quad (3.2.17)$$

$$-Q_3 \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_1^4} - 2(Q_4 + 2Q_6) \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} - Q_4 \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_2^4} = \bar{\rho}_f \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}$$

$$L_2(\phi, u_3) \equiv hq_1 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_2^4} + h(2q_2 + q_5) \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + hq_1 \frac{\partial^4 \phi}{\partial x_1^4} - q_3 \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_1^4} \quad (3.2.18)$$

$$-(2q_3 - q_6) \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} - q_4 \frac{\partial^4 u_3}{\partial x_2^4} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} = 0$$

(3.2.17) ve (3.2.18) diferansiyel denklemler sistemi, FDSK'ların hareket ve deformasyon uygunluk denklemleridir ve titreşim problemlerinde kullanılabilir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Temel Denklemlerin Çözümü ve Karışık Sınır Koşullarında FDSK'ların Serbest Titreşiminin Frekansı İçin İfadelerin Bulunması

FDSK'nın bir ucunda, uzunlamasına yer değiştirmesini ve dönmesini önleyen bir kavrama kullanılır ve diğer ucu basitçe desteklenir. Tez çalışmasının amacı, bu tür karışık sınır koşullarında problemin çözümünü bulmaktır. Bu tür sınır koşullarının matematiksel modeli aşağıdaki biçimde tanımlanır (Agenosov ve Sachenkov, 1964; Sofiyev, 2015; Sofiyev ve Hui, 2019):

$$x_1 = 0 \quad \text{ise} \quad u_3 = \frac{\partial^2 u_3}{\partial x_1^2} = 0 \quad (4.1.1)$$

ve

$$x_1 = L \quad \text{ise} \quad u_1 = \frac{\partial u_3}{\partial x_1} = 0 \quad (4.1.2)$$

(4.1.1) ve (4.1.2) sınır koşullarını sağlayan (3.2.17) ve (3.2.18) denklemlerinin çözümü aşağıdaki biçimde aranır:

$$u_3 = \bar{u}_3(t) \sin\left(\frac{\alpha x_1}{2}\right) \cos(\beta x_2), \quad \phi = \bar{\phi}(t) \sin\left(\frac{\alpha x_1}{2}\right) \cos(\beta x_2) \quad (4.1.3)$$

Burada  $\bar{u}_3(t)$  ve  $\bar{\phi}(t)$  zamana bağlı fonksiyonlardır,  $\alpha = \frac{m\pi}{L}$  ve  $\beta = \frac{n}{r}$ , olup  $m=1,3,5,\dots$   $x_1$  doğrultusunda dalga sayısı ve  $n$ ,  $x_2$  doğrultusundaki dalga sayısıdır.

(3.2.17) ve (3.2.18) temel denklemlerine Galerkin yöntemi uygulayalım:

$$\int_0^{2\pi r} \int_0^L L_1(\phi, u_3) \sin\left(\frac{\alpha x_1}{2}\right) \cos(\beta x_2) dx_1 dx_2 = 0 \quad (4.1.4)$$

$$\int_0^{2\pi r} \int_0^L L_2(\phi, u_3) \sin\left(\frac{\alpha x_1}{2}\right) \cos(\beta x_2) dx_1 dx_2 = 0 \quad (4.1.5)$$

(4.1.3) bağıntıları (4.1.4) ve (4.1.5) denklemlerinde yerine yazılıp inetgrallemeden sonra  $\bar{\phi}(t)$  parametresi yok edildiğinde aşağıdaki şekle dönüşür:

$$16\bar{\rho}_f \frac{d^2 \bar{u}_3(t)}{dt^2} + \left\{ Q_3 \alpha^4 + 4Q_6 \alpha^2 \beta^2 + 16Q_3 \beta^4 + \left[ \frac{4\alpha^2}{r} - Q_2 \alpha^4 - 8(Q_1 - Q_5) \alpha^2 \beta^2 - 16Q_2 \beta^4 \right] \times \left[ \frac{4\alpha^2}{r} + q_4 \alpha^4 + 8(q_3 - q_6) \alpha^2 \beta^2 + 16q_4 \beta^4 \right] \right\} \bar{u}_3 = 0$$

$$\left. \begin{array}{l} \left[ \frac{4\alpha^2}{r} - Q_2 \alpha^4 - 8(Q_1 - Q_5) \alpha^2 \beta^2 - 16Q_2 \beta^4 \right] \times \\ \left[ \frac{4\alpha^2}{r} + q_4 \alpha^4 + 8(q_3 - q_6) \alpha^2 \beta^2 + 16q_4 \beta^4 \right] \\ \frac{q_1 \alpha^4 + 4q_5 \alpha^2 \beta^2 + 16q_1 \beta^4}{\phantom{q_1 \alpha^4 + 4q_5 \alpha^2 \beta^2 + 16q_1 \beta^4}} \end{array} \right\} \bar{u}_3 = 0 \quad (4.1.6)$$

(4.1.6) denkleminde FDSK'ların karışık sınır koşullarında serbest titreşim frekansı (rad/s) için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\omega = \sqrt{\frac{Q}{16\bar{\rho}_f}} \quad (4.1.7)$$

Burada şu tanım geçerlidir:

$$Q = \frac{4\alpha^2 - Q_2\alpha^4 - 8(Q_1 - Q_5)\alpha^2\beta^2 - 16Q_2\beta^4}{q_1\alpha^4 + 4q_5\alpha^2\beta^2 + 16q_1\beta^4} \times \quad (4.1.8)$$

$$\left[ \frac{4\alpha^2}{r} + q_4\alpha^4 + 8(q_3 - q_6)\alpha^2\beta^2 + 16q_4\beta^4 \right] + Q_3\alpha^4 + 4Q_6\alpha^2\beta^2 + 16Q_3\beta^4$$

FDSK'lar için karışık sınır koşullarında boyutsuz titreşim frekansı için aşağıdaki ifade kullanılmaktadır:

$$\omega_1 = \omega \frac{r^2}{h} \sqrt{\frac{\rho_1(1-\nu_1^2)}{E_1}} \quad (4.1.9)$$

## 4.2. Literatürdeki Mevcut Çalışmalarla Karşılaştırmalar

Tez çalışmasında karışık sınır koşulları altında frekans için elde edilen kapalı çözümü doğrulamak için (4.1.7) ifadesi kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılmaktadır.

Birinci karşılaştırmada karışık sınır koşulları altındaki pür metal silindirik kabuğun frekans değerleri Agenosov ve Sachenkov (1964) sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Agenosov ve Sachenkov (1964) makalesinde, frekans için aşağıdaki ifade kullanılmaktadır (Bkz., Denk. (4.6)):



$$\omega_{A-S} = \left( \frac{n^2}{1+n^2} \frac{1}{\rho_{02} h r^2} \right)^{1/2} \times \left\{ \frac{D_0}{16r^2} \left[ \bar{\alpha}^4 + 8\bar{\alpha}^2 n^2 + 16(n^2 - 1)^2 \right] + \frac{E_{02} h \bar{\alpha}^4}{[\bar{\alpha}^2 + 4n^2]^2} \right\}^{1/2} \quad (4.2.1)$$

Burada  $\bar{\alpha}$ ,  $m$  dalga sayısı ve kabuk ölçülerine bağlı parametre ve  $D_0$  silindirik sertlik parametresi olup şu tanımlar geçerlidir:

$$\bar{\alpha} = \frac{m\pi r}{L}, \quad D_0 = \frac{E_{02} h^3}{12(1-\nu_{02}^2)} \quad (4.2.2)$$

Karşılaştırma yapılabilmek için tez çalışmasında (4.1.7) ifadesinin özel hali kullanılmaktadır, yani  $d=0$  olduğunda FDSK pür metal silindirik kabuğa dönüşmektedir. Çizelge 4.1’de değişik  $r/h$  ve  $L/r$  oranları için karışık sınır koşullarında pür metal silindirik kabukların  $\omega(\text{rad}/sn)$  temel doğal frekans değerleri Agenosov ve Sachenkov (1964) çalışmasında elde edilen  $\omega_{A-S}(\text{rad}/sn)$  frekansları ile mukayese edilmektedir. Karşılaştırmada pür çelik özellikleri kullanılmıştır:  $E_{02} = 1.93 \times 10^{11} (Pa)$ ,  $\nu_{02} = 0.3$ ,  $\rho_{02} = 8000 \text{ kg}/m^3$ . Ayrıca silindirik kabuk parametreleri şu şekildedir:  $r/h = 150; 200; 250; 500; 1000$  ve  $L/r = 1$  ve  $3$ . Çizelge 4.1’de boyuna dalga sayısı bire eşit ( $m=1$ ) olarak dikkate alınmıştır. Karşılaştırmada kullanılan tüm veriler Agenosov ve Sachenkov (1964) çalışmasından alınmıştır. Tez çalışmasında elde edilen temel doğal frekans değerlerinin Agenosov ve Sachenkov (1964) çalışmasında elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum içinde olduğu Çizelge 4.1’den görülmektedir. Çizelge 4.1’den frekanslar arasındaki maksimum farkın % 0.67’den küçük olduğu görülmektedir.

**Çizelge 4.1.** Karışık sınır koşullarında pür metal silindirik kabuğun frekanslarının

literatürdeki sonuçlarla mukayesesi

	Agenosov ve Sachenkov (1964)	Tez çalışması	Agenosov ve Sachenkov (1964)	Tez çalışması
	$\omega_{A-S}(rad / sn)$	$\omega(rad/ sn)$	$\omega_{A-S}(rad / sn)$	$\omega(rad/ sn)$
$r/h$	$L/r = 1$		$L/r = 2$	
150	329.926 (6)	329.680 (6)	163.103 (4)	163.785 (5)
200	212.141 (6)	212.711 (6)	108.810 (4)	110.108 (4)
250	154.675(7)	154.444(7)	77.447(5)	77.133(5)
500	53.776(8)	53.772(8)	27.435(6)	27.346(6)
1000	19.074(9)	19.098(9)	9.590(7)	9.574(7)

İkinci karşılaştırma örneğinde, farklı hacim kesir indeksi için FDSK'ların frekans değerleri Sofiyev ve Kuruoglu (2015) çalışmasında elde edilen sonuçlarla mukayese edilmektedir. Sofiyev ve Kuruoglu (2015) çalışmasında, klasik kabuk teorisi çerçevesinde karışık sınır koşulları etkisi altındaki FDM konik kabukların frekans değerleri için formül elde etmiştir. FDM konik kabukların frekansı için elde edilen ifadelerde yarım tepe açısı sıfıra yaklaştığında, kesik koni kabuk silindirik kabağa dönüşür ve FDSK'ların frekans değerleri elde edilir. Karşılaştırmada kullanılan tüm veriler Sofiyev ve Kuruoglu (2015) makalesinden alınmıştır. FDM, silikon nitrat ve paslanmaz çeliğin karışımıdır ve  $Si_3N_4/SUS304$  olarak adlandırılır.  $Si_3N_4/SUS304$  malzeme özellikleri bir sonraki alt bölümde sunulmaktadır. Kabuk özellikleri şu şekildedir:  $r/h = 100$  ve  $L/r = 1$ . Bu çalışmanın sonuçları, Çizelge 4.2'de sunulmaktadır ve sonuçlar çok iyi bir uyum içindedir.

**Çizelge 4.2.** Karışık sınır koşullarında FDSK'nın frekanslarının literatürdeki

### sonuçlarla mukayesesi

	Sofiyev ve Kuruoglu (2015)	Tez çalışması
Hacim kesir indeksi ( $d$ )	$\omega(n)$	
0.25	1122.646(5)	1122.625(5)
0.50	993.856(5)	993.846 (5)
0.75	920.384(5)	920.326(5)
1.0	872.6565 (5)	872.6477 (5)
2.0	779.1579 (5)	779.1503 (5)
3.0	738.9256 (5)	738.9189 (5)
4.0	715.946(5)	715.939(5)
5.0	700.829 (5)	700.823(5)
10.0	665.963(5)	665.952(5)

### 4.3. FDM Çeşitleri, Özellikleri ve Modelleri

Sayısal analizlerde,  $FD_A$  ve  $FD_B$  gibi iki FDM türü kullanılmaktadır.  $FD_A$  ve  $FD_B$  silindirik kabukları, sırasıyla silikon nitrat ve nikel karışımı ( $Si_3N_4/Ni$ ), ve zirkonyum oksit ve paslanmaz çelik ( $ZrO_2/SUS304$ ) karışımından oluşmaktadır. FDM sabitleri Shen (2009) monografisinden alınmıştır.  $ZrO_2/SUS304$  ve  $Si_3N_4/Ni$  malzemelerinin Young modülleri ve Poisson oranları sıcaklığın bir fonksiyonu olarak aşağıdaki biçimde ifade edilmektedir:

$$E_{ZrO} = 2.4427 \times 10^{11} (1 - 1.371 \times 10^{-3} T + 1.214 \times 10^{-6} T^2 - 3.681 \times 10^{-10} T^3)$$

$$= 1.68063 \times 10^{11} (Pa)$$

$$E_{Sus} = 2.0104 \times 10^{11} (1 + 3.079 \times 10^{-4} T - 6.534 \times 10^{-7} T^2)$$

$$= 2.07788 \times 10^{11} (Pa)$$

$$\nu_{Zro} = 0.2882(1 + 1.133 \times 10^{-4} T) = 0.297996$$

$$\nu_{Sus} = 0.3262(1 - 2.002 \times 10^{-7} T + 3.797 \times 10^{-7} T^2) = 0.317756$$

ve

$$E_{Si_3N_4} = 3.4843 \times 10^{11} (1 - 3.07 \times 10^{-4} T + 2.16 \times 10^{-7} T^2 - 8.946 \times 10^{-11} T^3)$$

$$= 3.22271 \times 10^{11} (Pa)$$

$$E_{Ni} = 2.2395 \times 10^{11} (1 - 2.794 \times 10^{-4} T - 3.998 \times 10^{-9} T^2)$$

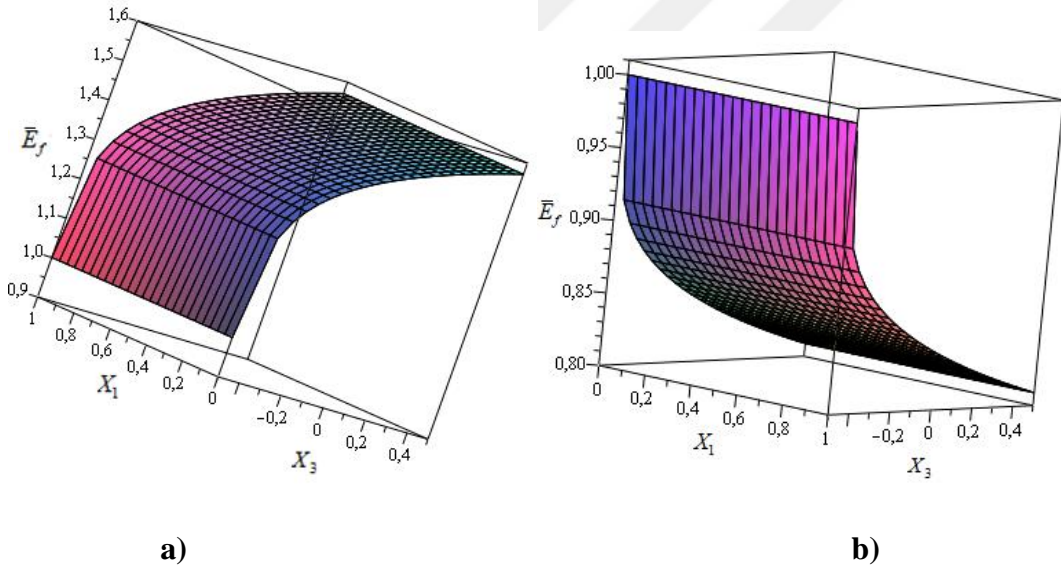
$$= 2.05098 \times 10^{11} (Pa)$$

$$\nu_{Si_3N_4} = 0.24, \quad \nu_{Ni} = 0.31$$

Burada  $T=300$  (K) ve bileşen maddelere özgüdür. Seramik ve metallerin yoğunlukları sıcaklık ve koordinatlara bağlı değildir. Zirkonyum oksit ( $ZrO_2$ ), Silikon nitrat ( $Si_3N_4$ ), Nikel (Ni), Paslanmaz çelik (SUS304) malzemelerinin yoğunlukları sırasıyla  $5680$  ( $kg/m^3$ ),  $2370$  ( $kg/m^3$ ),  $8900$  ( $kg/m^3$ ) ve  $8166$  ( $kg/m^3$ ) olarak ele alınmaktadır (Reddy ve Chin, 1998).

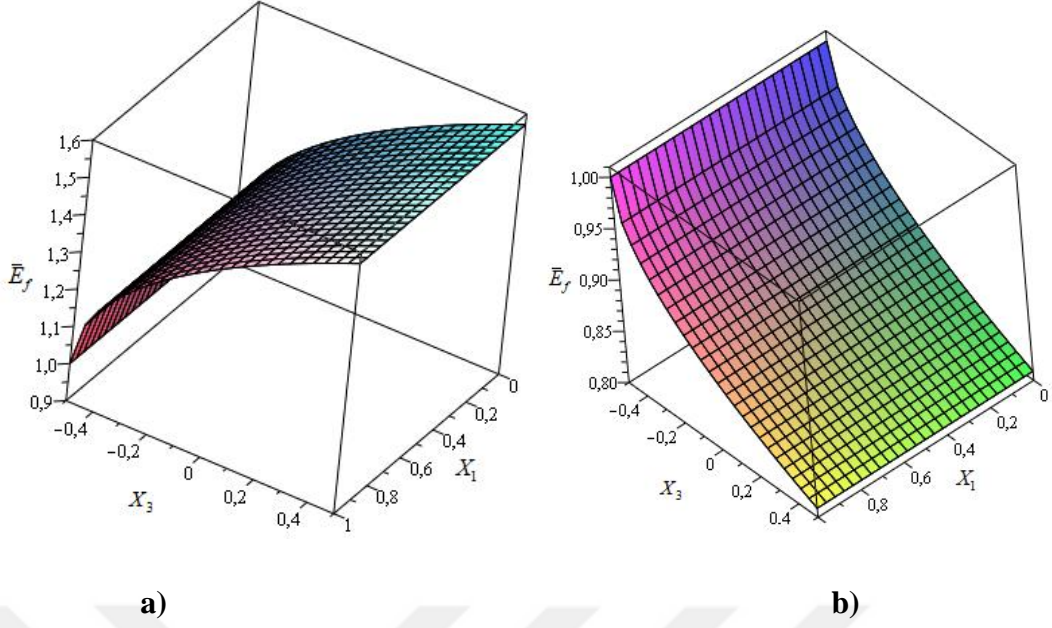
Şekil 4.3.1-4.3.7'de, a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların değişik hacim kesir indeksi için  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $X_3 = x_3 / h$  boyutsuz kalınlık koordinatına göre üç boyutlu değişimi sunulmaktadır. Şekil 4.3.1-4.3.7'de, eksenler üzerinde  $\bar{E}_f = E_f / E_2$ ,  $X_1 = x_1 / L$  ve  $X_3 = x_3 / h$  sembolleri kullanılmaktadır.

Şekil 4.3.1'de a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların hacim kesir  $V_1 = (X_3 + 0.5)^{0.25}$  olduğunda,  $\bar{E}_f = (E_1 / E_2 - 1)(X_3 + 1/2) + 1$  boyutsuz Young modülünün  $X_3$  'e bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği sunulmuştur.



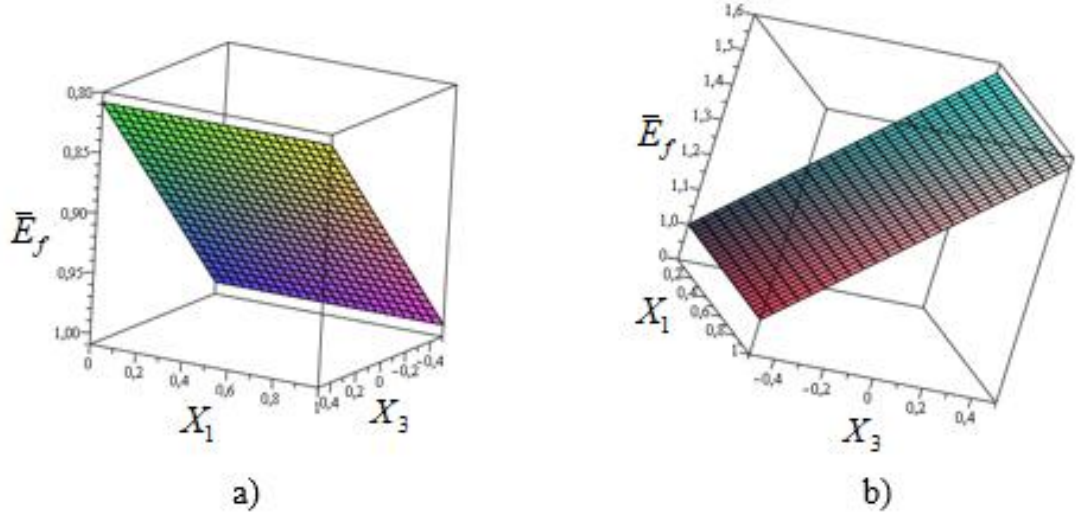
**Şekil 4.3.1.** a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $V_1 = (X_3 + 0.5)^{0.25}$  ( $d=0.25$ ) hacim kesir için  $X_3$  'e bağlı üç boyutlu dağılımı

Şekil 4.3.2'de  $\text{FD}_A$  ve  $\text{FD}_B$  tip SK'ların hacim kesir  $V_1 = (X_3 + 0.5)^{0.5}$  olduğunda,  $\bar{E}_f = (E_1 / E_2 - 1)(X_3 + 1/2) + 1$  boyutsuz Young modülünün  $X_3$  'e bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği sunulmuştur.



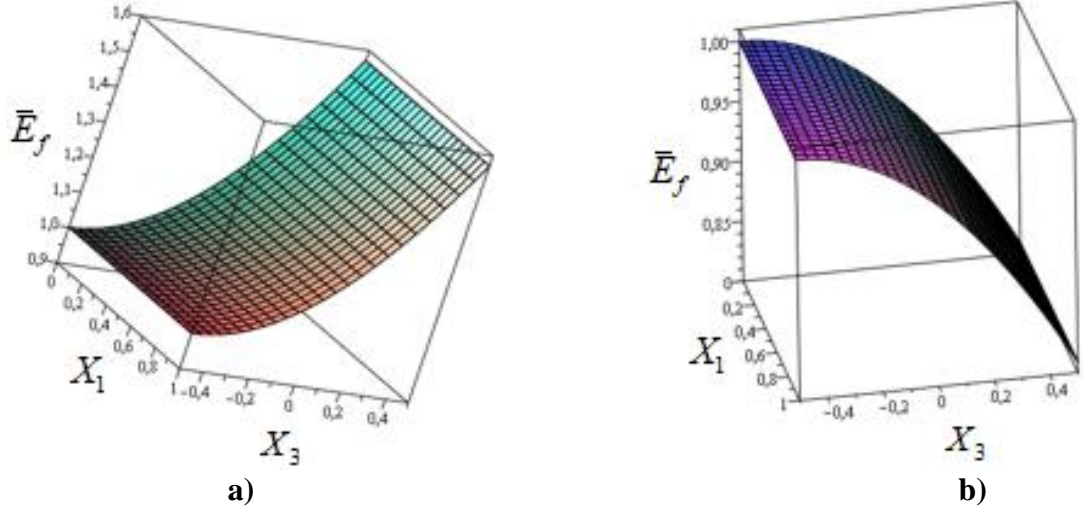
**Şekil 4.3.2** a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $d=0.5$  hacim kesir için  $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı

Şekil 4.3.3'de  $\text{FD}_A$  ve  $\text{FD}_B$  tip SK'ların hacim kesir  $V_1 = X_3 + 0.5$  olduğunda ( $d=1$ ),  $\bar{E}_f = (E_1 / E_2 - 1)(X_3 + 1/2) + 1$  boyutsuz Young modülünün  $X_3$ ' e bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği sunulmuştur.



**Şekil 4.3.3.** a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün doğrusal ( $d=1$ ) hacim kesir için  $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı

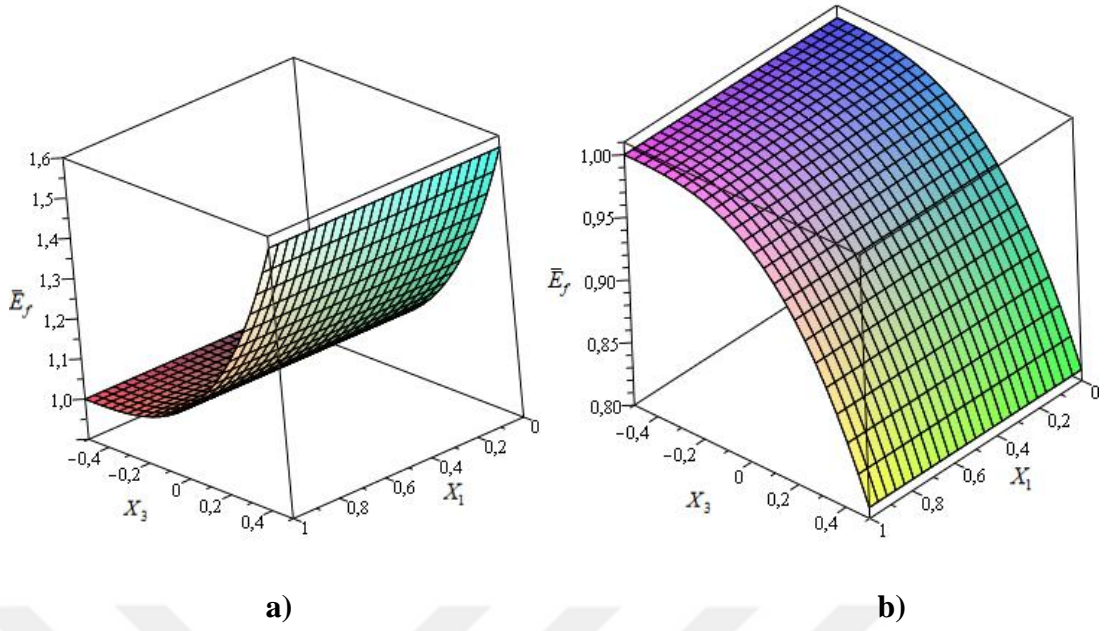
Şekil 4.3.4'te a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların hacim kesir  $V_1 = (X_3 + 1/2)^2$  olduğunda ( $d=2$ )  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $X_3$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı değişiminin üç boyutlu grafiği Şekil 4.3'de sunulmuştur.



**Şekil 4.3.4.** a) FDA ve b) FDB tip SK'ların  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $V_1 = (X_3 + 1/2)^2$  kuadratik (d=2) hacim kesir için  $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı

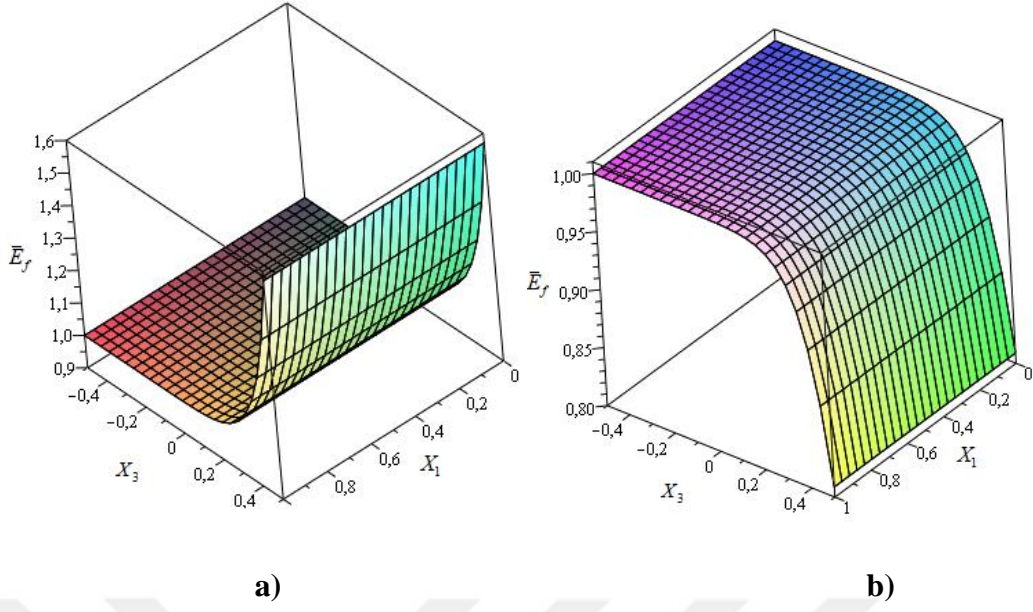
Şekil 4.3.5'de a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların hacim kesir  $V_1 = (X_3 + 1/2)^3$  olduğunda (d=3)  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $X_3$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı değişiminin üç boyutlu dağılımı sunulmuştur.





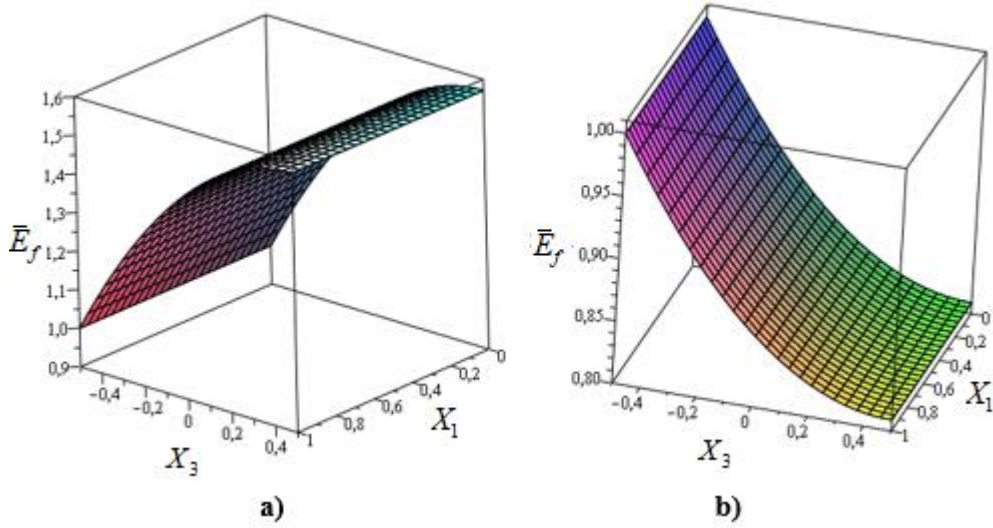
**Şekil 4.3.5.** a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün kübik ( $d=3$ ) hacim kesir için  $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı

Şekil 4.3.6'da a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların hacim kesir  $V_1 = (X_3 + 1/2)^{10}$  olduğunda ( $d=10$ )  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $X_3$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı değişiminin üç boyutlu dağılımı sunulmuştur.



**Şekil 4.3.6.** a) FDA ve b) FDB tip SK'ların  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $V_1 = (X_3 + 1/2)^{10}$  kübik (d=10) hacim kesir için  $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı

Şekil 4.3.7'de FDA ve FDB tip SK'ların hacim kesri ters kuadratik değiştiğinde, yani  $V_1 = 1 - (1/2 - X_3)^2$  olduğunda  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $X_3$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı üç boyutlu dağılımı Şekil 4.5'de sunulmuştur.



**Şekil 4.3.7.** a)  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  ve b)  $\text{ZrO}_2/\text{SUS304}$  karışımından oluşan FDSK'ların  $\bar{E}_f$  boyutsuz Young modülünün  $V_1 = 1 - (1/2 - X_3)^2$  ters kuadratik hacim kesir için  $X_3$ ' e bağlı üç boyutlu dağılımı

#### 4.4. Karışık Sınır Koşulları Altındaki $\text{FD}_A$ ve $\text{FD}_B$ tip SK'ların Boyutsuz Frekans Parametreleri İçin Yeni Hesap ve Analizler

Çizelge 4.3' te  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  karışımından oluşan veya  $\text{FD}_A$  çeşit SK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Çizelge 4.3' te  $L/r=2$ , pür seramik ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), FDM'nin hacim kesir indeksi (HKİ) için  $d=0.25; 0.5; 0.75; 1.0; 2.0; 3.0; 4.0; 5.0; 10$ , ters kuadratik profil ve pür metal (Ni) silindirik kabuklar (SK) kullanılmaktadır. Çizelge 4.3'te boyuna dalga sayısı  $m=1$  ve boyutsuz frekans parametresinin (BFP) minimum değerine karşı gelen dairesel dalga sayısı ( $n$ ) sunulmaktadır. Çizelge 4.3'ten görüldüğü gibi  $r/h$  oranının artması ile BFP değerlerinin ve onlara karşı gelen dairesel dalga sayısının arttığı görülmektedir. HKİ sıfırdan, yani  $d=0$ ' dan ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ 'ten)  $d=10$ 'a kadar arttığında seramiğin BFP değerleri nikelden oluşan SK'nın frekans değerlerine doğru sürekli bir biçimde azalma göstermektedir. FDSK'ların BFP değerleri  $\text{Si}_3\text{N}_4$  'den oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde,  $d=0.25$  olduğunda FD profilin BFP'ye etkisi (-%22.44) olduğu halde  $d=10$  olduğunda söz konusu etki (-%55.2) olmaktadır. Burada ve

sonraki karşılaştırmalarda eksi işaretinin FDM kabuğun BFP değerlerinin pür metal veya seramikten oluşan SK'ların BFP değerlerinden küçük olduğunu göstermektedir.

FDSK'ların BFP değerleri Nikrlden oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde, d=0.25 için FD<sub>A</sub> profilin BFP'ye etkisi (+%88) civarında iken d=10 olduğunda söz konusu etki (+%8) civarında olduğu görülmüştür.

Ters kudratik profil için BFP değerlerine FD<sub>A</sub> etkisi d=0.5 profilli kabuktaki BFP'ye etki ile yaklaşık aynı olduğu tespit edilmiştir. Örneğin seramik kabukla mukayesede etki (-%32) civarında iken, metal kabukla kıyaslandığında bu etki (+%63) etrafında olduğu tespit edilmiştir.

**NOT:** Karşılaştırmalarda aşağıdaki oranlar kullanılmaktadır:

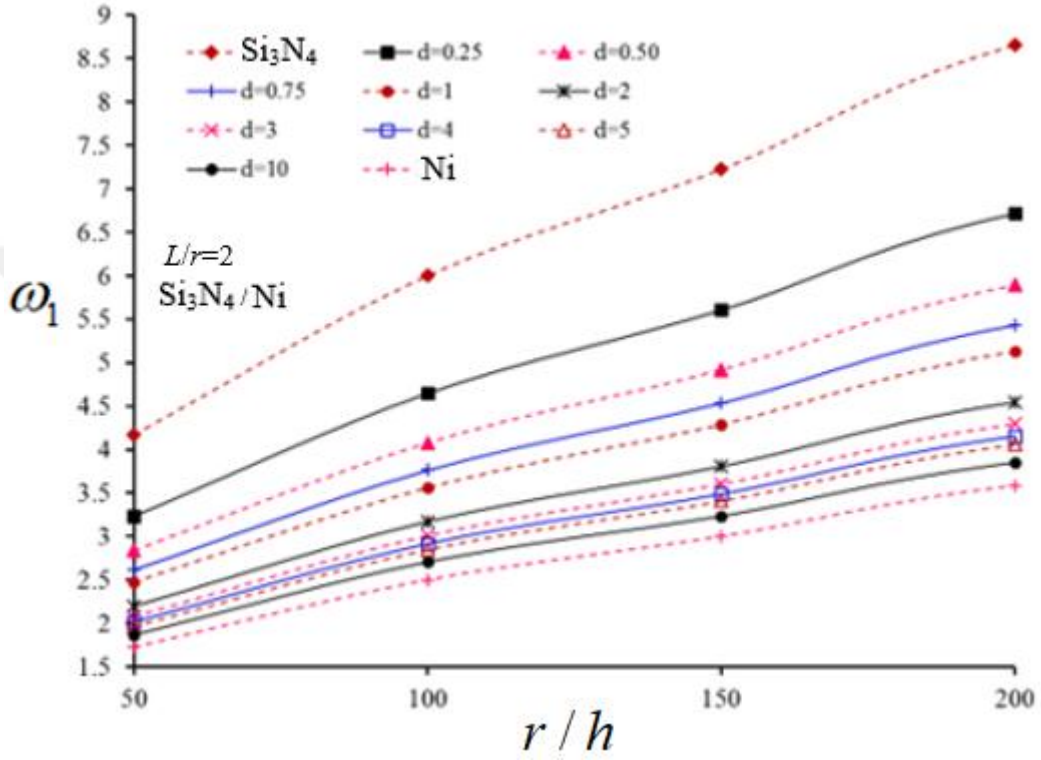
$$\%100 \times \frac{\omega_{1f} - \omega_{1m}}{\omega_{1m}}, \quad \%100 \times \frac{\omega_{1f} - \omega_{1c}}{\omega_{1c}}$$

**Çizelge 4.3.** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı değişimi

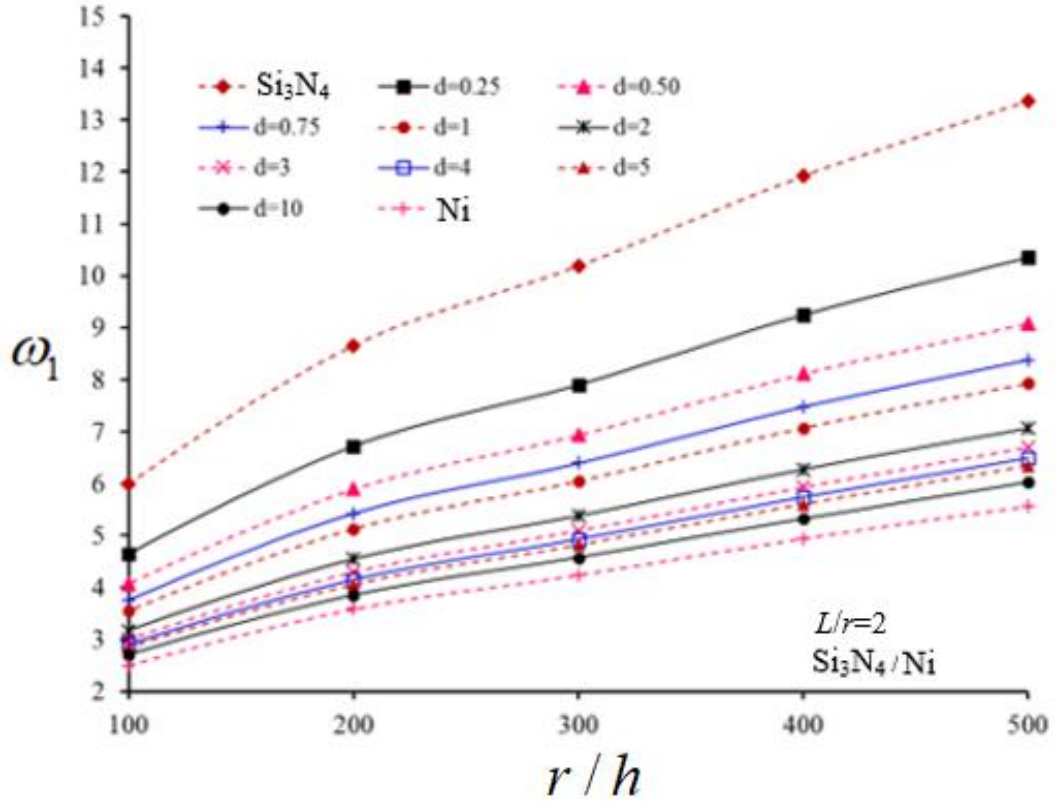
	$\omega_1$ (m, n)					
r/h	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	d=0.25	d=0.50	d=0.75	d=1	d=2
50	4.171(1,3)	3.235(1,3)	2.840(1,3)	2.618(1,3)	2.475(1,3)	2.198(1,3)
100	6.000(1,4)	4.647(1,4)	4.079(1,4)	3.762(1,4)	3.559(1,4)	3.171(1,4)
150	7.227(1,4)	5.605(1,4)	4.920(1,4)	4.535(1,4)	4.287(1,4)	3.807(1,4)
200	8.658(1,4)	6.717(1,4)	5.895(1,4)	5.431(1,4)	5.131(1,4)	4.546(1,4)
300	10.191(1,5)	7.900(1,5)	6.935(1,5)	6.394(1,5)	6.047(1,5)	5.378(1,5)
400	11.921(1,5)	9.247(1,5)	8.116(1,5)	7.480(1,5)	7.070(1,5)	6.273(1,5)
500	13.364(1,6)	10.352(1,6)	9.086(1,6)	8.380(1,6)	7.929(1,6)	7.062(1,6)
r/h	d=3	d=4	d=5	d=10	Ters Kwad.	Ni
50	2.08(1,3)	2.013(1,3)	1.969(1,3)	1.868(1,3)	2.835(1,3)	1.733(1,3)
100	3.007(1,4)	2.914(1,4)	2.852(1,4)	2.708(1,4)	4.065(1,4)	2.503(1,4)
150	3.603(1,4)	3.487(1,4)	3.411(1,4)	3.236(1,4)	4.912(1,4)	3.003(1,4)
200	4.296(1,4)	4.155(1,4)	4.063(1,4)	3.854(1,4)	5.890(1,4)	3.587(1,4)
300	5.094(1,5)	4.932(1,5)	4.826(1,5)	4.580(1,5)	6.919(1,5)	4.242(1,5)
400	5.932(1,5)	5.739(1,5)	5.613(1,5)	5.325(1,5)	8.106(1,5)	4.948(1,5)
500	6.696(1,6)	6.488(1,6)	6.350(1,6)	6.029(1,6)	9.058(1,6)	5.574(1,6)

Çizelge 4.3 kullanılarak FD<sub>A</sub> çeşit SK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı dağılımına ait grafikler Şekil 4.4.1a ve 4.4.1b olarak

sunulmaktadır. Şekil 4.4.1a ve Şekil 4.4.1b’de  $FD_A$  çeşit SK’ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranı 50’den 200 ‘e 50 şer olarak ve  $r/h$  oranı 100’den 500’e 100 er olarak değiştiğinde BFP değerlerinin arttığı görülmektedir.  $FD_A$  çeşit SK’ların BFP eğrilerinin seramik ve metal kabukların BFP eğrileri arasında değiştiği görülmektedir.

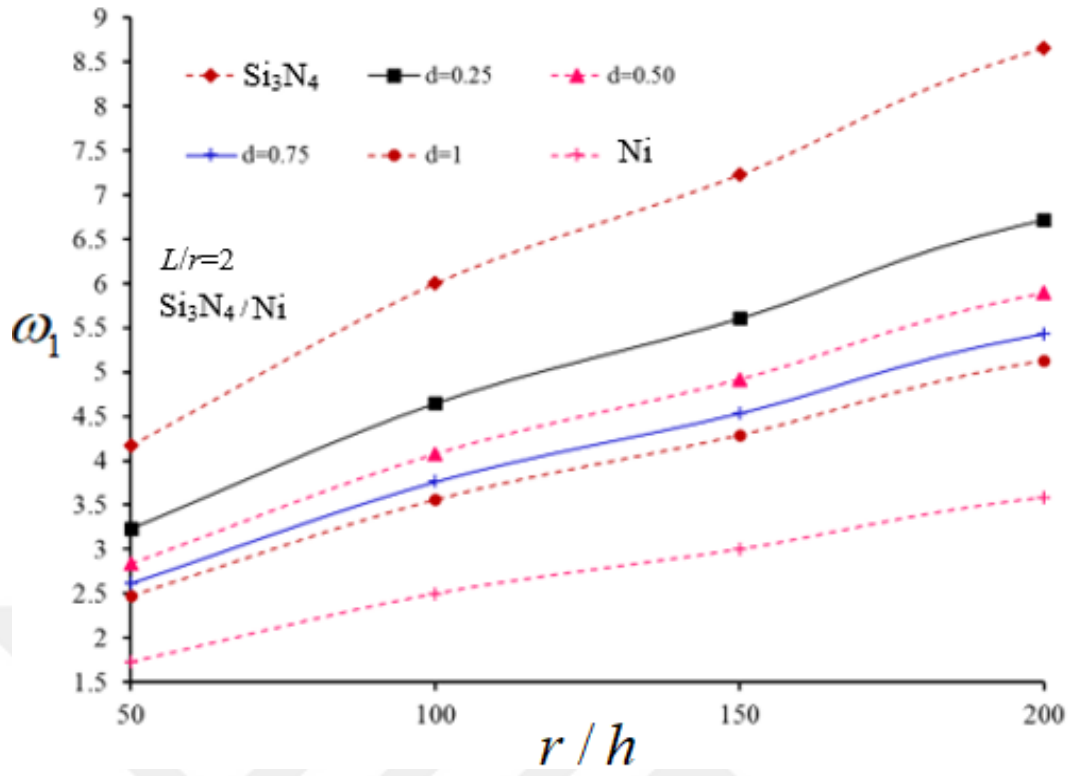


Şekil 4.4.1a.  $FD_A$  çeşit SK’ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranı 50’den 200 ‘e kadar değiştiğinde dağılımı



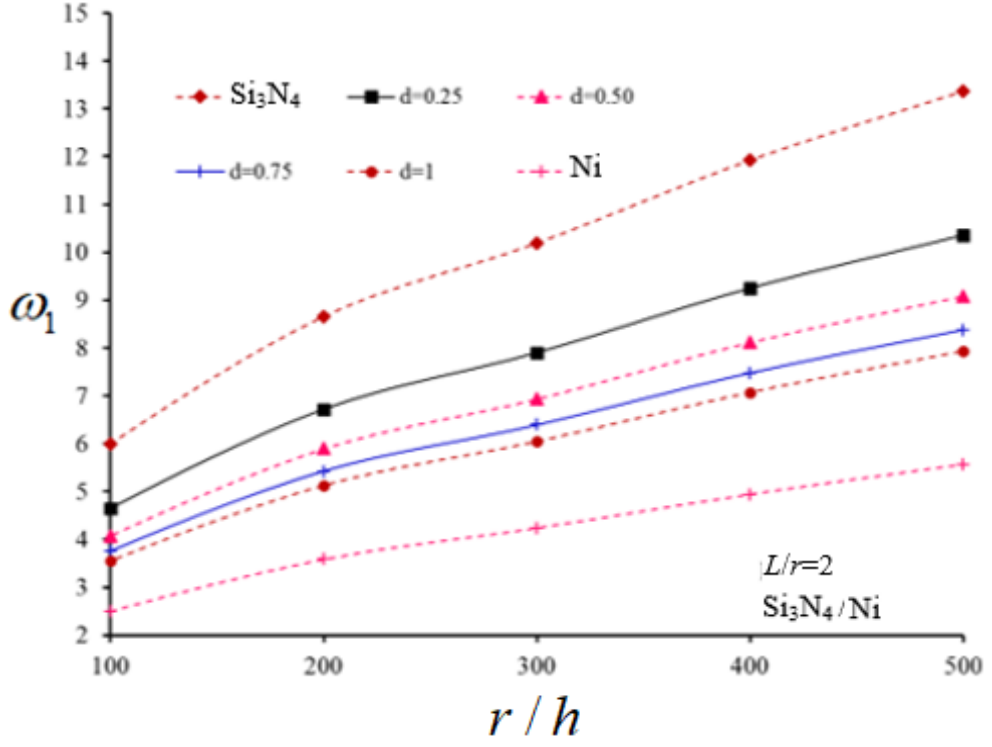
**Şekil 4.4.1b.** FDSK çeşit SK'ların profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranı 100'den 500'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.3 kullanılarak Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların d=0.25, d=0.5; d=0.75 ve d=1.0 profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı dağılımına ait eğriler Şekil 4.4.2a ve 4.4.2b'de sunulmaktadır. Şekil 4.4.2a ve Şekil 4.4.2b'de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların d=0.25, d=0.5; d=0.75 ve d=1.0 profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranı 50'den 200'e 50 şer olarak ve r/h oranı 100'den 500'e 100'er olarak değiştiğinde dağılımı sunulmaktadır. Şekil 4.1.10a ve 4.1.10b'den görüldüğü gibi 0<d<1 olduğunda, FDSK'ların frekans eğrileri metal ve seramik kabukların BFP eğrileri arasında daha düzenli dağılıma sahip olmaktadır.



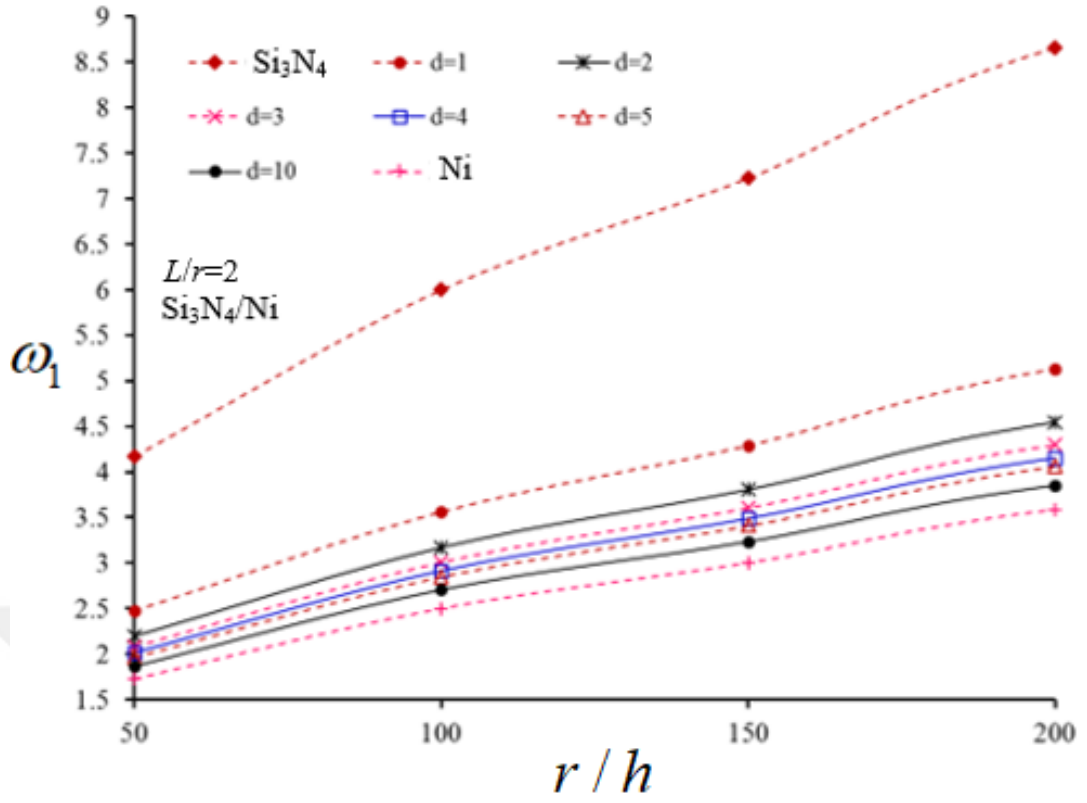
**Şekil 4.4.2a.** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ  $d=0$  ile  $d=1$  arasında değiştiğinde ve  $r/h$  oranı 50'den 200'e kadar değiştiğinde dağılımı



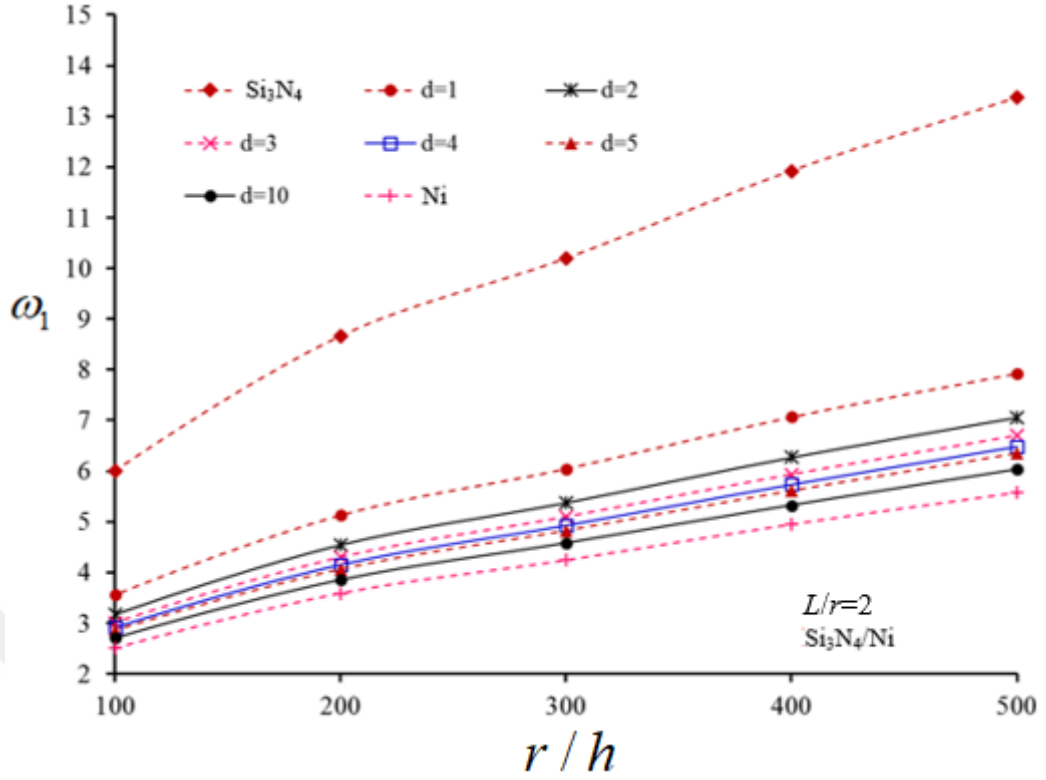


**Şekil 4.4.2b.** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ d=0 ile d=1 arasında değiştiğinde ve r/h oranı 100'den 500'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.3 kullanılarak FD<sub>A</sub> çeşit SK'ların d=1, d=2;d=3;d=4;d=5 ve d=10 profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı dağılımına ait eğriler Şekil 4.4.3a ve 4.4.3b'de sunulmaktadır. Şekil 4.4.3a ve Şekil 4.4.3b'de FD<sub>A</sub> çeşit SK'ların d=1, d=2;d=3;d=4;d=5 ve d=10 profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranı 50'den 200'e 50 şer olarak ve r/h oranı 100'den 500'e 100'er olarak değiştiğinde dağılımı sunulmaktadır. Şekil 4.4.3a ve Şekil 4.4.3b'den görüldüğü gibi d indeksi büyüdükçe FD<sub>A</sub> çeşit SK'ların frekans eğrileri metal kabuğun frekans eğrilerine daha yakın kümelenmektedir.

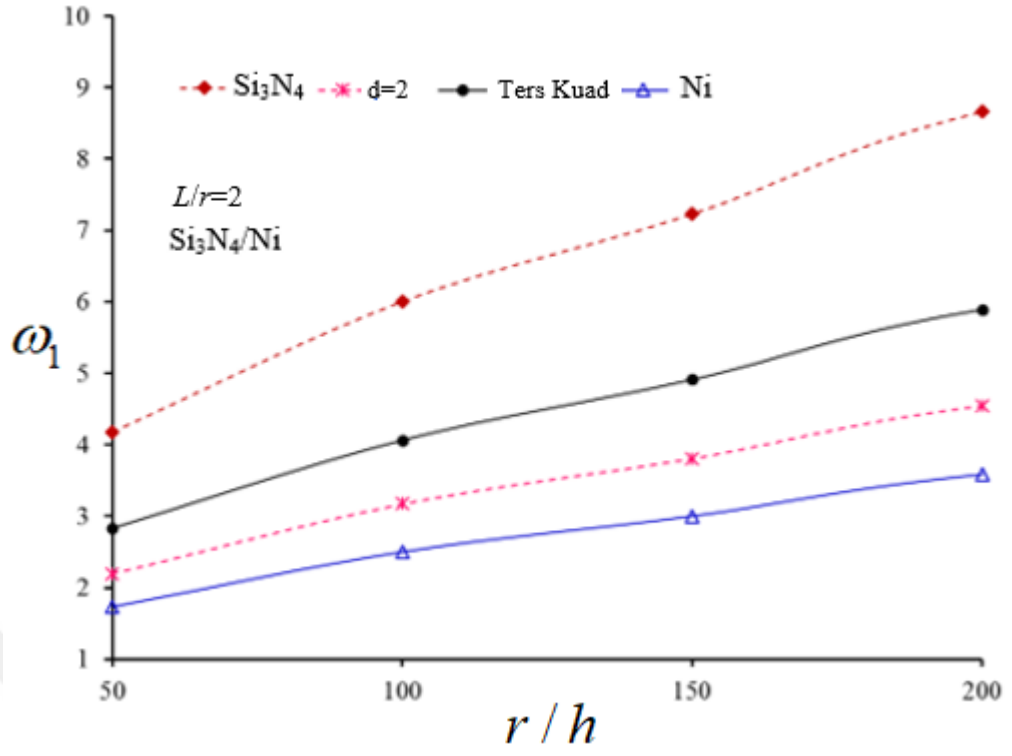


Şekil 4.4.3a. FD<sub>A</sub> çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ d=1 ile d=10 arasında değiştiğinde ve r/h oranı 50'den 200'e kadar değiştiğinde dağılımı

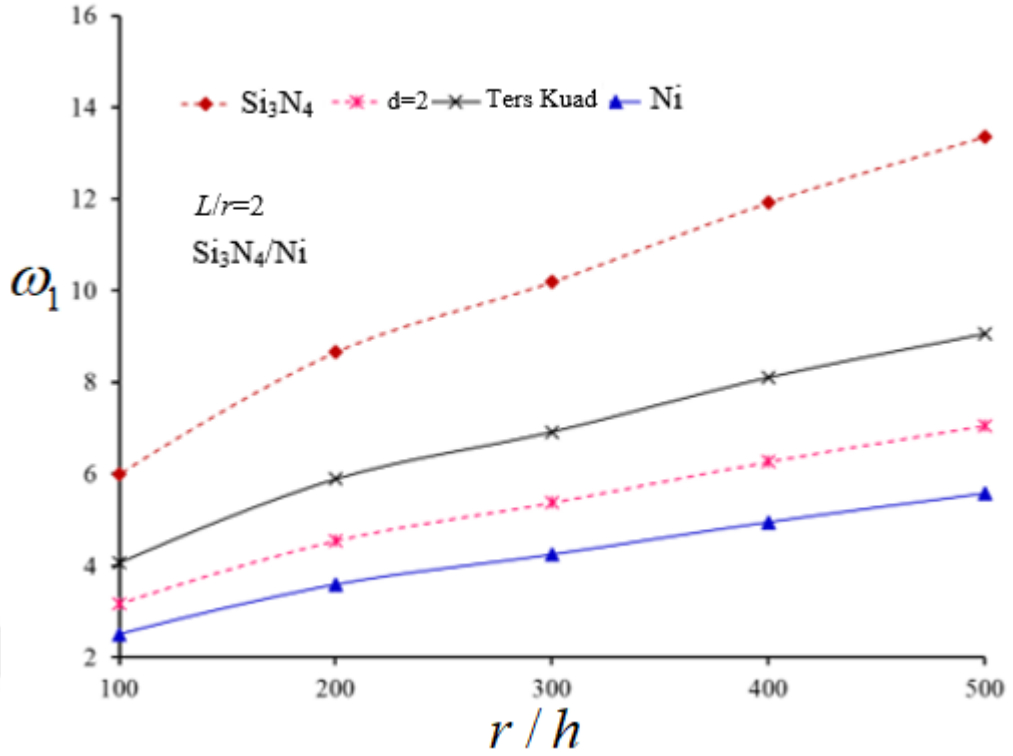


**Şekil 4.4.3b.**  $FD_A$  çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ  $d=1$  ile  $d=10$  arasında değiştiğinde ve  $r/h$  oranı 100'den 500'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.3 kullanılarak  $Si_3N_4/Ni$  karışımından oluşan FDSK'ların kuadratik ( $d=2$ ) ve ters kuadratik profilleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranına bağlı dağılımına ait çizgiler Şekil 4.4.4a ve 4.4.4b'de gösterilmektedir. Şekil 4.4.4a ve 4.4.4b'de  $Si_3N_4/Ni$  karışımından oluşan FDSK'ların kuadratik ( $d=2$ ) ve ters kuadratik profilleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranı 50'den 200'e 50 şer olarak ve  $r/h$  oranı 100'den 500'e 100'er olarak değiştiği durumlarda çizilen eğrilerin sürekli arttığı görülmektedir. Şekil 4.4.4a ve 4.4.4b'den görüldüğü gibi ters kuadratik profilli kabuğun BFP değerlerine karşı gelen eğriler Silikon nitrat ve Nikelden oluşan kabukların BFP eğrilerine yaklaşık aynı mesafede olmaktadır.



**Şekil 4.4.4a.** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için r/h oranı 50'den 200'e kadar değiştiğinde dağılımı



**Şekil 4.4.4b.** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için r/h oranı 100'den 500 'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.4' de ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan veya FD<sub>B</sub> çeşit SK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Çizelge 4.4' de L/r=2, ZrO<sub>2</sub>, FDM'nin hacim kesir indeksi (HKİ) için d=0.25; 0.5;0.75;1.0;2.0; 3.0; 4.0; 5.0; 10, ters kuadratik profil ve paslanmaz çelikten oluşan SK'lar kullanılmaktadır. Çizelge 4.4'de boyuna dalga sayısı m=1 ve boyutsuz frekans parametresinin (BFP) minimum değerine karşı gelen dairesel dalga sayısı (n) sunulmaktadır. Çizelge 4.4'den görüldüğü gibi r/h oranının artması ile BFP değerlerinin ve onlara karşı gelen dairesel dalga sayısının arttığı görülmektedir. HKİ sıfırdan, yani d=0 (pür seramikten) d=10'a kadar arttığında seramiğin BFP değerleri paslanmaz çelikten oluşan SK'nın frekans değerlerine doğru sürekli bir biçimde arttığı görülmektedir. FDSK'ların BFP değerleri ZrO<sub>2</sub> 'den oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde, d=0.25 olduğunda FD<sub>B</sub> profilin BFP'ye etkisi (+%5.1) civarında olduğu halde d=10 olduğunda söz konusu etki (+%23) civarında olduğu görülmektedir.

FD<sub>B</sub> çeşit SK'ların BFP değerleri SUS304 'ten oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde, d=0.25 olduğunda FD<sub>B</sub> profilin BFP'ye etkisi (-%16.9) civarında iken d=10 olduğunda söz konusu etki önemli derecede azalarak (-%2.5) civarında olduğu görülmektedir.

Ters kudratik profil için BFP değerlerine FD<sub>B</sub> etkisi d=0.5 profilli kabuktaki BFP'ye etki ile yaklaşık aynı olduğu tespit edilmiştir. Örneğin seramik kabukla mukayesede etki (+%8.6) civarında iken, metal kabukla kıyaslandığında bu etki (-%14) etrafında olduğu tespit edilmiştir.

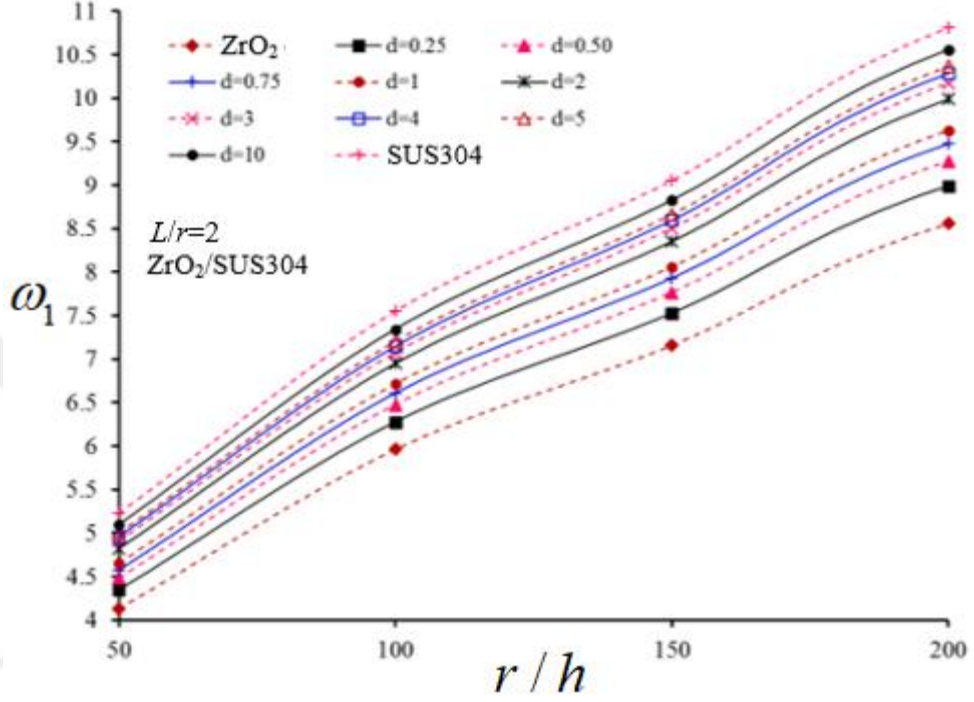


**Çizelge 4.4.** ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı değişimi

	$\omega_1$ (m, n)					
r/h	ZrO <sub>2</sub>	d=0.25	d=0.50	d=0.75	d=1	d=2
50	4.133(1,3)	4.344(1,3)	4.482(1,3)	4.579(1,3)	4.652(1,3)	4.821(1,3)
100	5.964(1,4)	6.276(1,4)	6.474(1,4)	6.612(1,4)	6.714(1,4)	6.950(1,4)
150	7.160(1,4)	7.526(1,4)	7.765(1,4)	7.933(1,4)	8.059(1,4)	8.352(1,4)
200	8.558(1,4)	8.988(1,4)	9.273(1,4)	9.476(1,4)	9.628(1,4)	9.987(1,4)
300	10.111(1,5)	10.634(1,5)	10.971(1,5)	11.207(1,5)	11.382(1,5)	11.790(1,5)
400	11.799(1,5)	12.399(1,5)	12.792(1,5)	13.071(1,5)	13.279(1,5)	13.767(1,5)
500	13.281(1,6)	13.974(1,6)	14.417(1,6)	14.724(1,6)	14.951(1,6)	15.478(1,6)
r/h	d=3	d=4	d=5	d=10	Ters Kuad.	SUS304
50	4.908(1,3)	4.963(1,3)	5.000(1,3)	5.093(1,3)	4.490(1,3)	5.225(1,3)
100	7.072(1,4)	7.150(1,4)	7.204(1,4)	7.341(1,4)	6.489(1,4)	7.550(1,4)
150	8.503(1,4)	8.598(1,4)	8.663(1,4)	8.823(1,4)	7.779(1,4)	9.052(1,4)
200	10.172(1,4)	10.286(1,4)	10.364(1,4)	10.552(1,4)	9.286(1,4)	10.810(1,4)
300	12.001(1,5)	12.134(1,5)	12.226(1,5)	12.454(1,5)	10.993(1,5)	12.791(1,5)
400	14.018(1,5)	14.174(1,5)	14.282(1,5)	14.544(1,5)	12.813(1,5)	14.912(1,5)
500	15.751(1,6)	15.923(1,6)	16.045(1,6)	16.35(1,6)	14.449(1,6)	16.812(1,6)

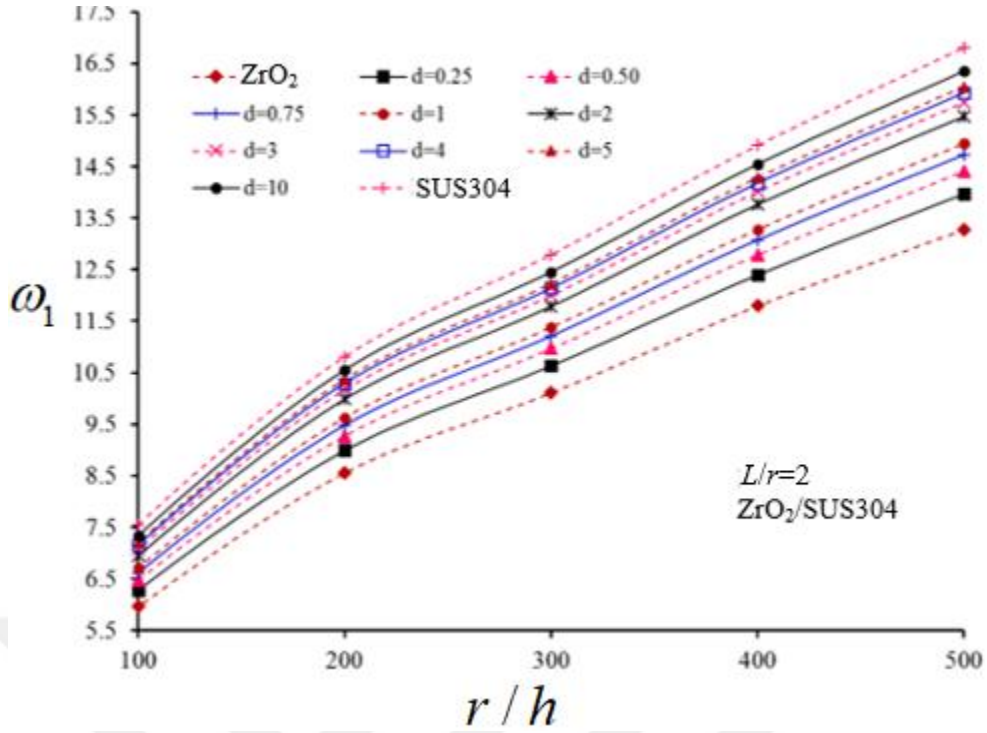
Çizelge 4.4 kullanılarak ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı dağılımına ait grafikler çizilmiş ve Şekil 4.4.5a ve Şekil 4.4.5b olarak sunulmaktadır. Şekil 4.4.5a

ve Şekil 4.4.5b'de  $r/h$  oranı 50'den 200 'e ve  $r/h$  oranı 100'den 500'e değiştiğinde,  $ZrO_2/SUS304$  karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin dağılımı sunulmaktadır. FDSK'ların BFP eğrilerinin seramik ve metal kabukların BFP eğrileri arasında değiştiği görülmektedir.



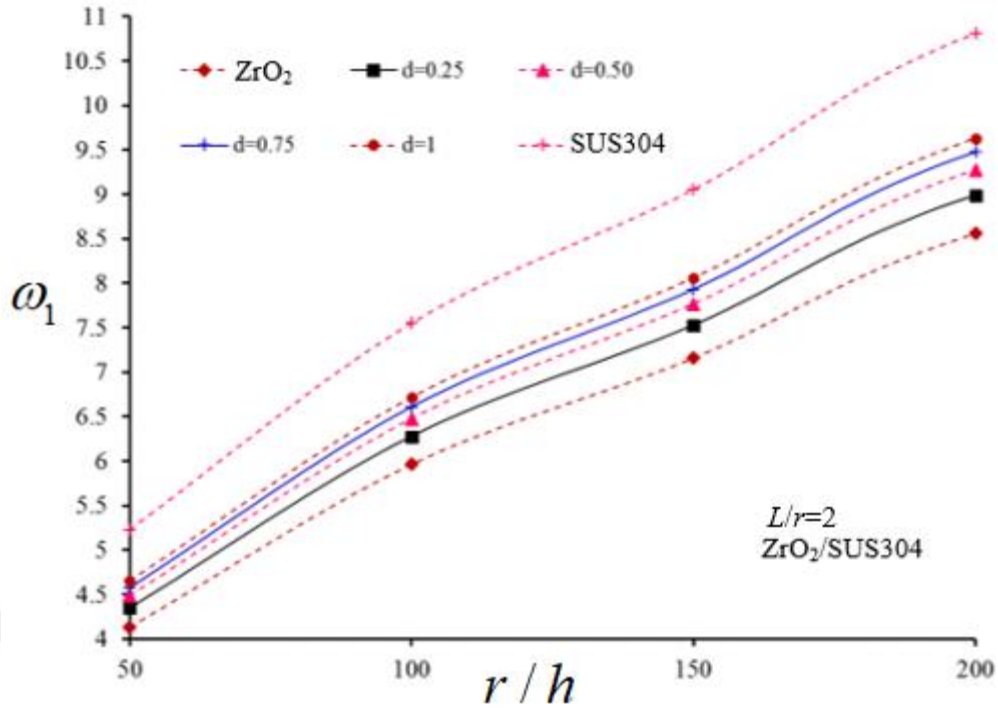
Şekil 4.4.5a.  $ZrO_2/SUS304$  karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı



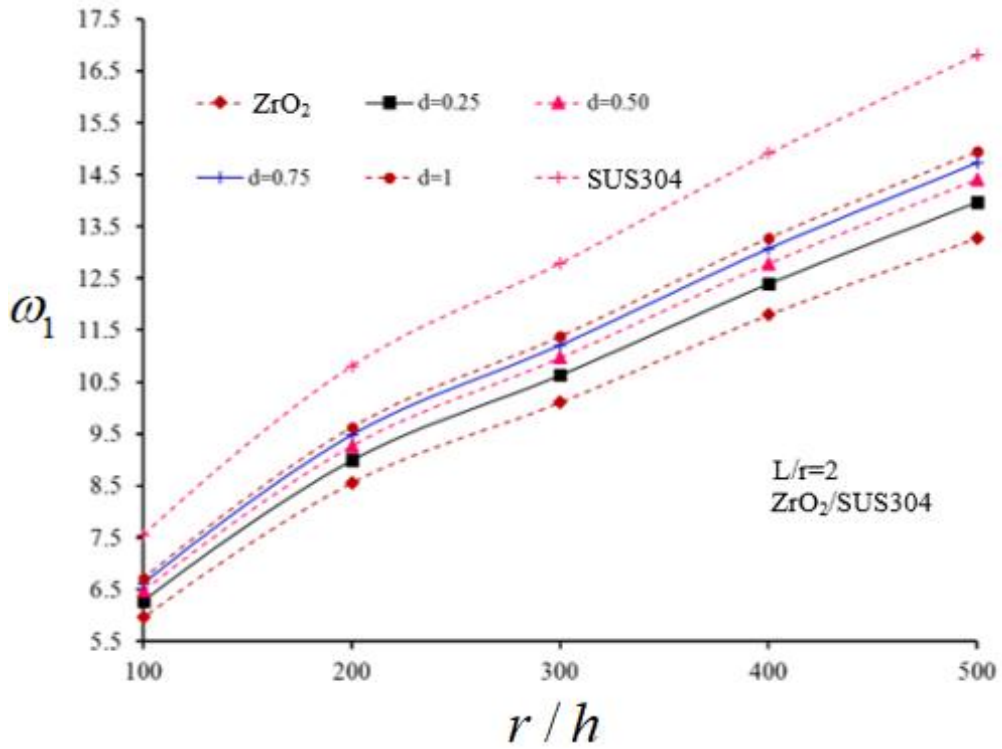


**Şekil 4.4.5b.** ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranı 100'den 500'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.4 kullanılarak ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların d=0.25, d=0.5; d=0.75 ve d=1.0 profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranına bağlı dağılımına ait eğriler Şekil 4.4.6a ve Şekil 4.4.6b'de sunulmaktadır. Şekil 4.4.6a ve Şekil 4.4.6b'de ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların d=0.25, d=0.5; d=0.75 ve d=1.0 profilleri için boyutsuz frekans parametresinin r/h oranı 50'den 200'e ve r/h oranı 100'den 500'e değiştiğinde dağılımı sunulmaktadır. Şekil 4.4.6a ve Şekil 4.4.6b'den görüldüğü gibi 0<d<1 olduğunda, FDSK'ların frekans eğrileri seramik kabukların BFP eğrilerinden hafif bir şekilde uzaklaşma olduğu görülmektedir.

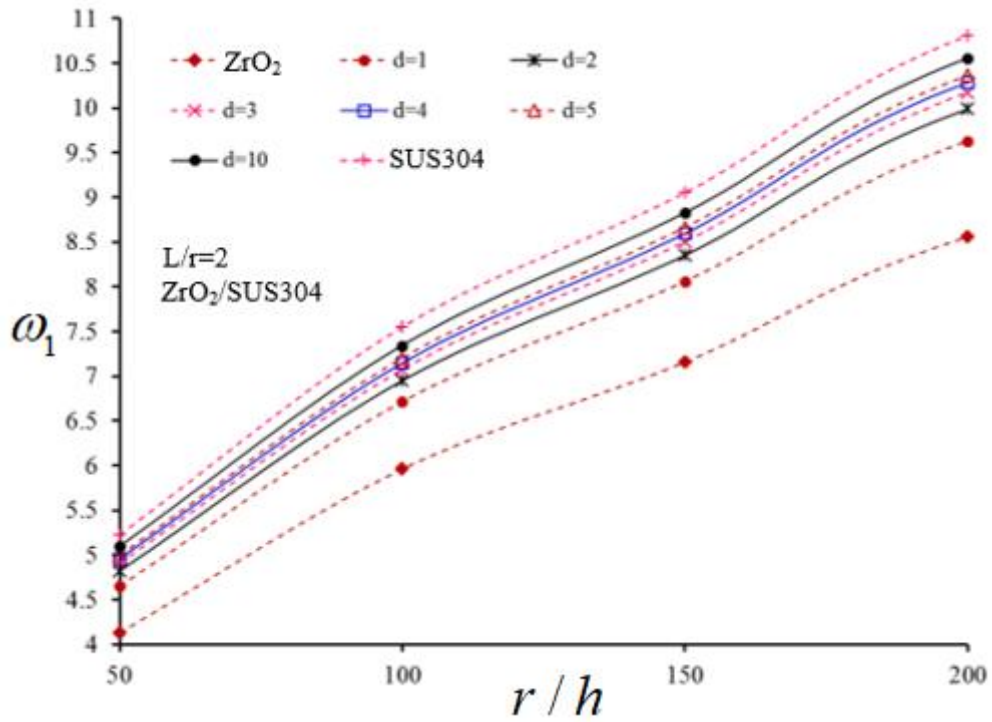


Şekil 4.4.6a.  $FD_B$  çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ  $d=0$  ile  $d=1$  arasında değiştiğinde ve  $r/h$  oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı

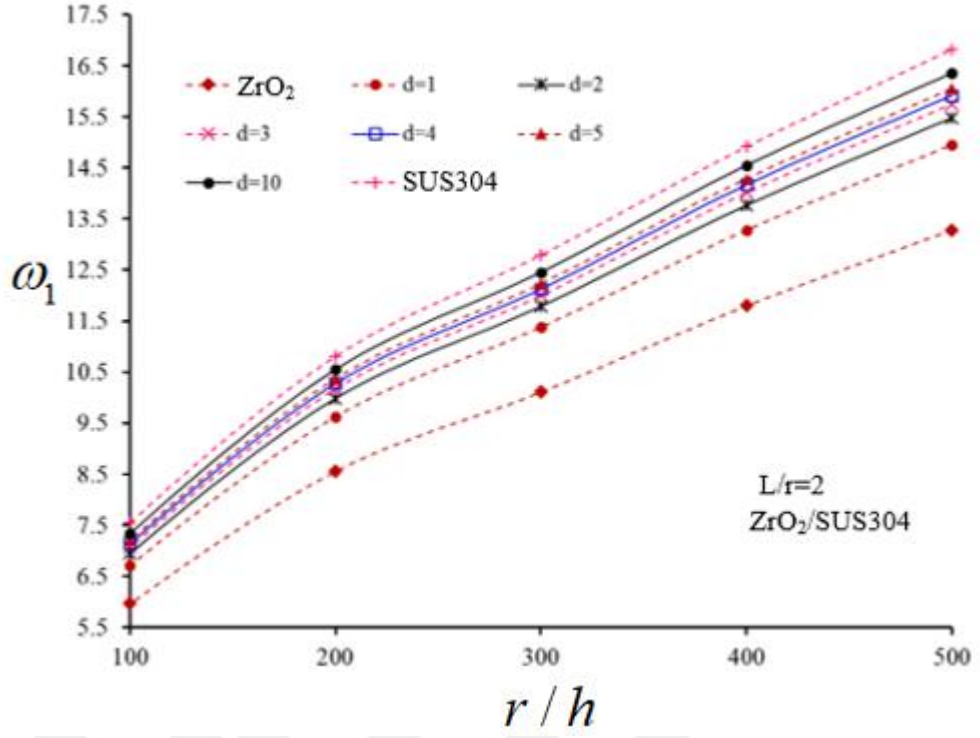


Şekil 4.4.6b.  $FD_B$  çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ  $d=0$  ile  $d=1$  arasında değiştiğinde ve  $r/h$  oranı 100'den 500 'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.4 kullanılarak  $FD_B$  çeşit SK'ların  $d=1, d=2; d=3; d=4; d=5$  ve  $d=10$  profilleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranına bağlı dağılımına ait eğriler Şekil 4.4.7a ve Şekil 4.4.7b'de sunulmaktadır. Şekil 4.4.7a ve Şekil 4.4.7b'de  $FD_B$  çeşit SK'ların  $d=1, d=2; d=3; d=4; d=5$  ve  $d=10$  profilleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranı 50'den 200 'e ve  $r/h$  oranı 100'den 500'e değiştiğinde dağılımı sunulmaktadır. Şekil 4.4.7a ve Şekil 4.4.7b'den görüldüğü gibi  $d$  büyüdükçe  $FD_B$  çeşit SK'ların frekans eğrileri metal kabuğun frekans eğrilerine daha yakın kümelenmektedir.

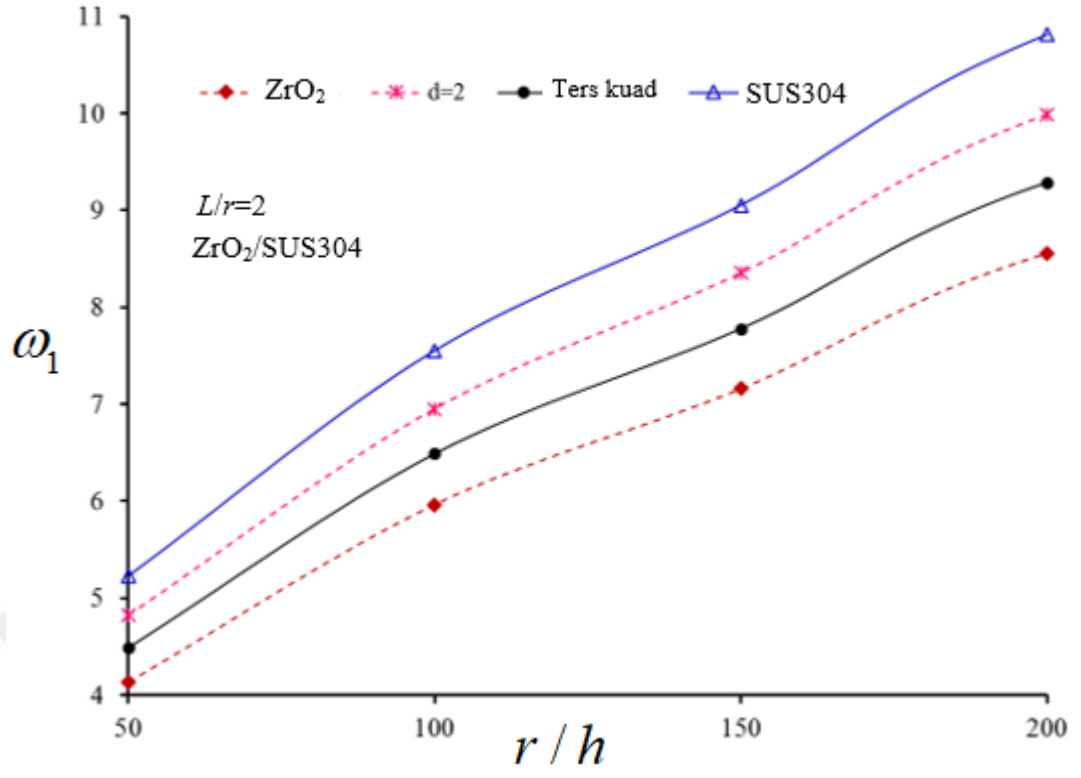


**Şekil 4.4.7a.**  $FD_B$  çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ  $d=1$  ile  $d=10$  arasında değiştiğinde ve  $r/h$  oranı 50'den 200 'e kadar değiştiğinde dağılımı

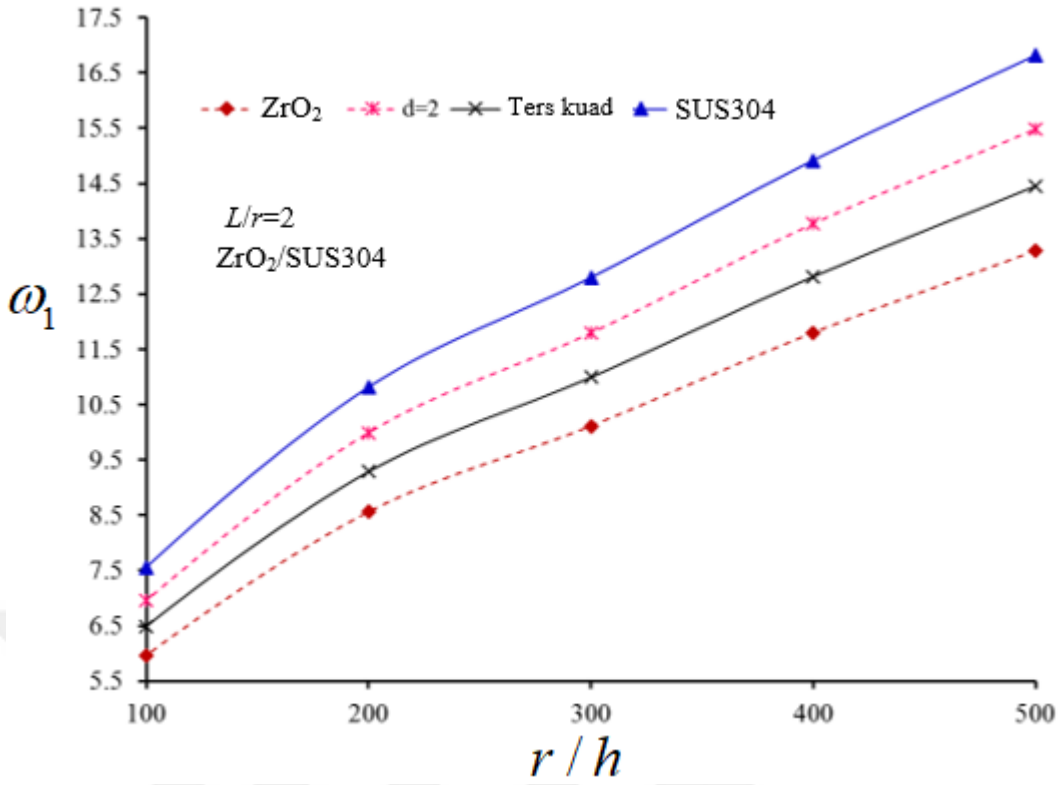


**Şekil 4.4.7b.**  $FD_B$  çeşit SK'ların boyutsuz frekans parametresinin HKİ  $d=1$  ile  $d=10$  arasında değiştiğinde ve  $r/h$  oranı 100'den 500'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.4 kullanılarak  $ZrO_2/SUS304$  karışımından oluşan FDSK'ların kuadratik ( $d=2$ ) ve ters kuadratik proflleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranına bağlı dağılımına ait çizgiler Şekil 4.4.8a ve 4.4.8b'de gösterilmektedir. Şekil 4.4.8a ve Şekil 4.4.8b'de  $ZrO_2/SUS304$  karışımından oluşan FDSK'ların kuadratik ( $d=2$ ) ve ters kuadratik profilleri için boyutsuz frekans parametresinin  $r/h$  oranı 50'den 200'e ve 100'den 500'e arttığında dağılımı sunulmaktadır. Şekil 4.4.8a ve Şekil 4.4.8b'den görüldüğü gibi ters kuadratik profilli kabuğun BFP değerlerine karşı gelen eğriler zirkonyum oksitten oluşan kabukların BFP eğrilerine daha yakın olduğu görülmektedir.



**Şekil 4.4.8a.** ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için r/h oranı 50'den 200'e kadar değiştiğinde dağılımı



**Şekil 4.4.8b.** ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için r/h oranı 100'den 500'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.5' de Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin değerleri ve dalga sayıları L/r oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Çizelge 4.5' te r/h=100, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, FDM'nin hacim kesir indeksi için d=0.25; 0.5;0.75;1.0;2.0; 3.0; 4.0; 5.0; 10, ters kuadratik profil ve Nikel silindirik kabuklar kullanılmaktadır. Çizelge 4.5'ten görüldüğü gibi L/r oranının artması ile BFP değerlerinin ve onlara karşı gelen dairesel dalga sayısının azaldığı görülmektedir.

HKİ sıfırdan, yani d=0 (pür seramikten) d=10'a kadar arttığında seramiğin BFP değerleri nikelden oluşan SK'nın frekans değerlerine doğru sürekli bir biçimde azalma göstermektedir. FDSK'ların BFP değerleri Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 'den oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde, d=0.5 olduğunda FD<sub>A</sub> profilin BFP'ye etkisi (-%32) civarında olduğu halde d=5 olduğunda söz konusu etki (-%52.7) civarında olmaktadır.

FDSK'ların BFP değerleri Nikelden oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde,  $d=0.5$  olduğunda FD profilin BFP'ye etkisi (+%64) civarında iken  $d=5$  olduğunda söz konusu etki (+%14) civarında olduğu görülmüştür.

Ters kudratik profil için BFP değerlerine FDM etkisi  $d=0.5$  profilli kabuktaki BFP'ye etki ile yaklaşık aynı olduğu tespit edilmiştir. Örneğin; silikon nitrat kabukla mukayesede  $FD_A$  etkisi (-%32) civarında iken, Nikelden oluşan kabukla kıyaslandığında bu etki (+%63) etrafında olduğu tespit edilmiştir. L/r oranının artması FDM'lerin BFP'lerine etkisini %1'den az olmakla beraber düzensiz olarak değiştirmektedir.



**Çizelge 4.5.** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz

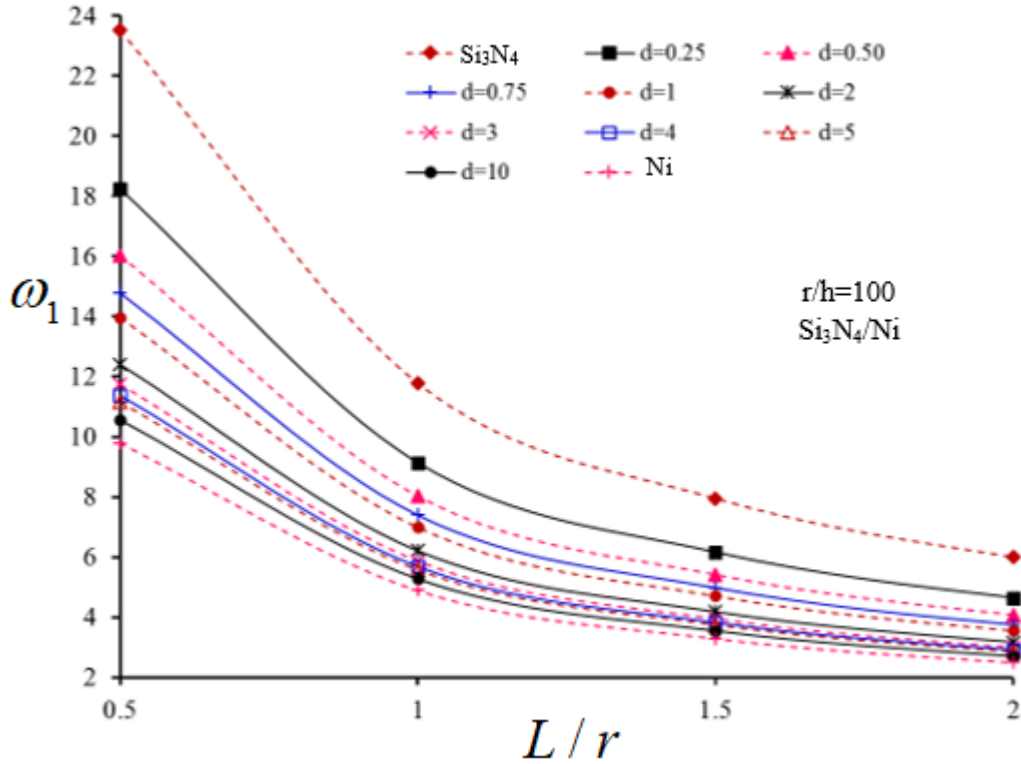
frekans parametresinin değerleri ve dalga sayıları L/r oranına bağlı

değişimi

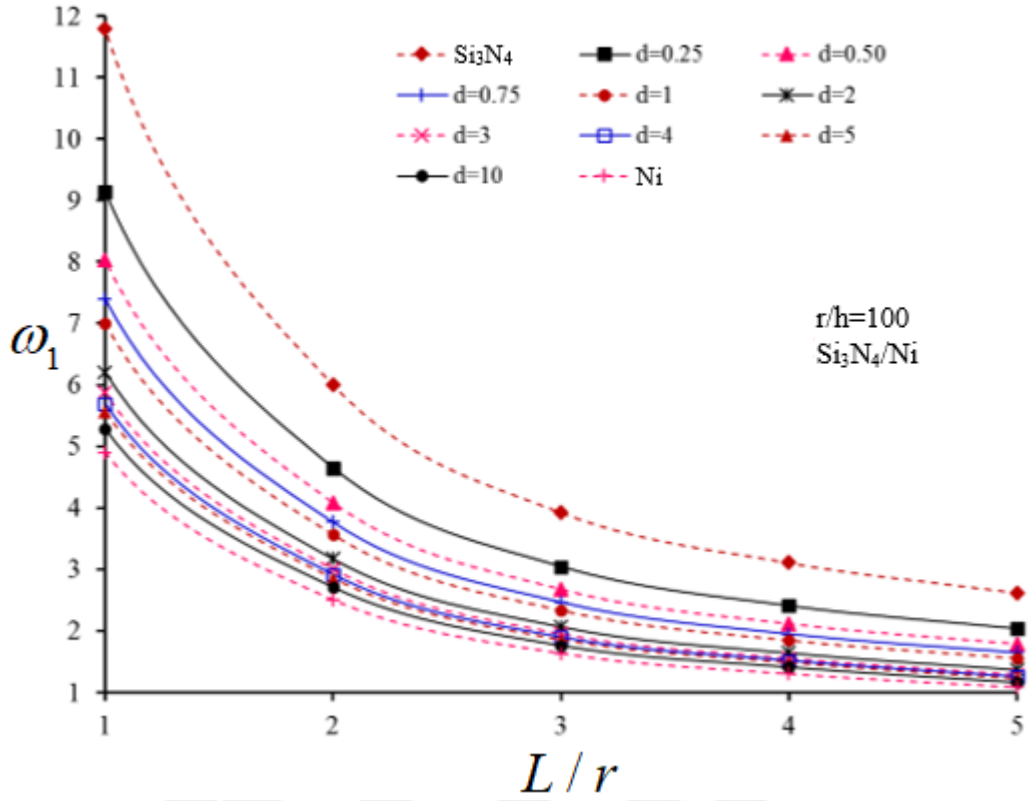
	$\omega_{1CST} (n)$					
L/r	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	d=0.25	d=0.50	d=0.75	d=1	d=2
0.5	23.531(1,7)	18.241(1,7)	16.012(1,7)	14.764(1,7)	13.962(1,7)	12.415(1,7)
1.0	11.786(1,5)	9.140(1,5)	8.023(1,5)	7.396(1,5)	6.993(1,5)	6.211(1,5)
1.5	7.945(1,4)	6.163(1,4)	5.410(1,4)	4.986(1,4)	4.712(1,4)	4.181(1,4)
2.0	6.000(1,4)	4.647(1,4)	4.079(1,4)	3.762(1,4)	3.559(1,4)	3.171(1,4)
2.5	4.899(1,3)	3.800(1,3)	3.335(1,3)	3.073(1,3)	2.903(1,3)	2.572(1,3)
3.0	3.925(1,3)	3.043(1,3)	2.671(1,3)	2.463(1,3)	2.329(1,3)	2.069(1,3)
4.0	3.108(1,3)	2.405(1,3)	2.111(1,3)	1.947(1,3)	1.843(1,3)	1.644(1,3)
5.0	2.620(1,2)	2.032(1,2)	1.783(1,2)	1.642(1,2)	1.551(1,2)	1.372(1,2)
L/r	d=3	d=4	d=5	d=10	Ters.Kuad.	Ni
0.5	11.759(1,7)	11.386(1,7)	11.140(1,7)	10.572(1,7)	15.976(1,7)	9.794(1,7)
1.0	5.878(1,5)	5.689(1,5)	5.565(1,5)	5.280(1,5)	8.009(1,5)	4.899(1,5)
1.5	3.954(1,4)	3.825(1,4)	3.741(1,4)	3.549(1,4)	5.403(1,4)	3.298(1,4)
2.0	3.007(1,4)	2.914(1,4)	2.852(1,4)	2.708(1,4)	4.065(1,4)	2.503(1,4)
2.5	2.431(1,3)	2.351(1,3)	2.299(1,3)	2.181(1,3)	3.333(1,3)	2.030(1,3)
3.0	1.958(1,3)	1.895(1,3)	1.854(1,3)	1.759(1,3)	2.666(1,3)	1.632(1,3)
4.0	1.560(1,3)	1.513(1,3)	1.481(1,3)	1.407(1,3)	2.102(1,3)	1.299(1,3)
5.0	1.295(1,2)	1.251(1,2)	1.223(1,2)	1.161(1,2)	1.783(1,2)	1.083(1,2)



Çizelge 4.5 kullanılarak  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  karışımından oluşan  $\text{FD}_A$  tip SK'ların tüm  $d$  değerleri için BFP'nin  $L/r$  oranı 0.5'den 2'ye ve 2'den 5'e değiştiğinde çizilen eğriler Şekil 4.4.9a ve Şekil 4.4.9b'de sunulmaktadır. Şekil 4.4.9a ve Şekil 4.4.9b'den görüldüğü gibi  $L/r$  oranı arttığında FDSK'ların frekans eğrileri aşağıya doğru yönelir, yani BFP değerleri azalmaktadır. Ayrıca  $d$ 'nin artması ile FDM kabukların frekans eğrileri metal kabuğun BFP eğrisine üstten kümelenmektedir.

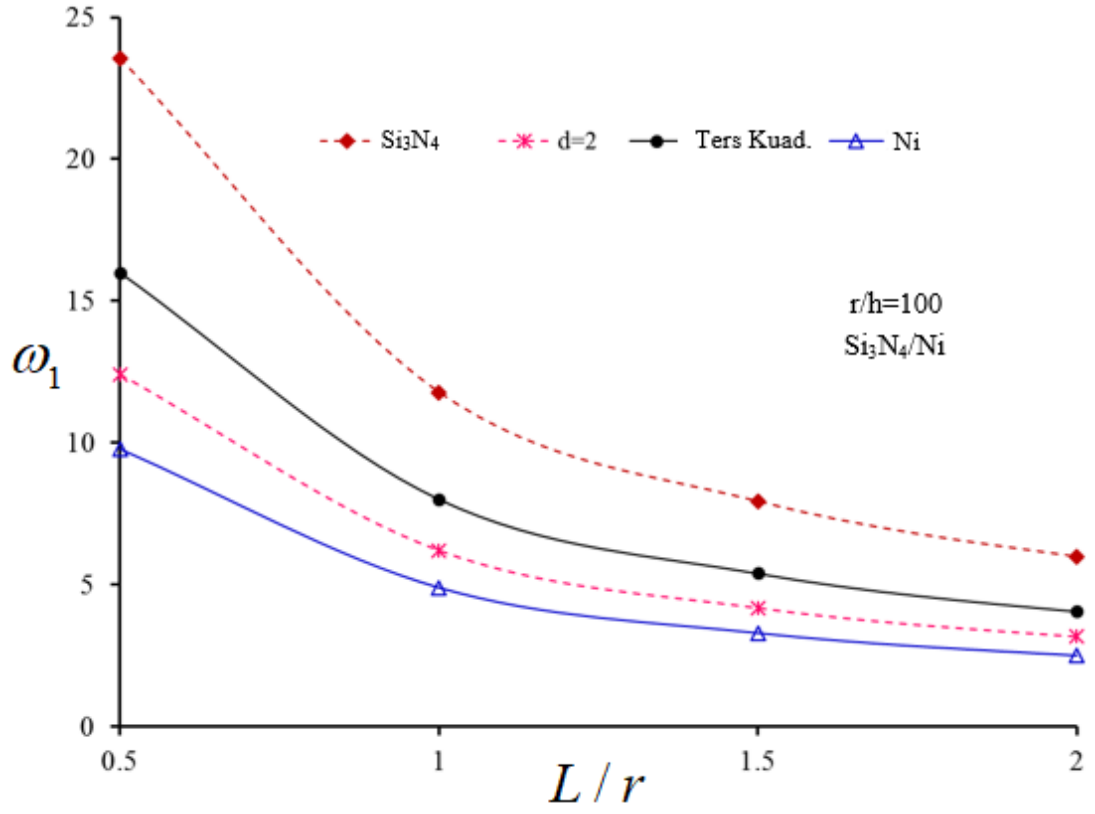


**Şekil 4.4.9a.**  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin tüm HKİ'leri için  $L/r$  oranı 0.5'den 2'ye kadar değiştiğinde dağılımı

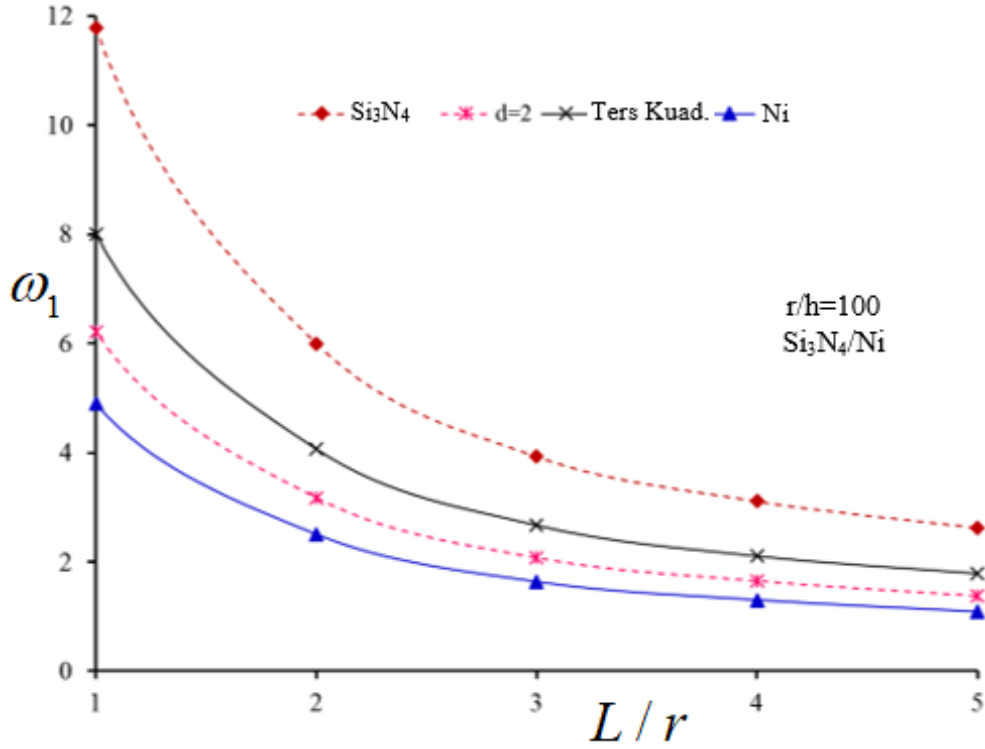


**Şekil 4.4.9b.** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin tüm HKİ'leri için L/r oranı 1'den 5'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.5 kullanılarak Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FD<sub>A</sub> tip SK'ların kuadratik ve ters kuadratik ptofilleri için BFP'nin L/r oranı sırasıyla 0.5'den 2'ye ve 2'den 5'e değiştiğinde çizilen eğriler Şekil 4.4.10a ve Şekil 4.4.10b'de sunulmaktadır. Şekil 4.4.10a ve Şekil 4.4.10b'den görüldüğü gibi L/r oranı arttığında ters kuadratik profil için kuadratik profile benzer olarak frekans eğrileri düşüş eğilimi göstermektedir.



**Şekil 4.4.10a.**  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Ni}$  karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için  $L/r$  oranı 0.5'den 2 'ye kadar değiştiğinde dağılımı



**Şekil 4.4.10b.** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için L/r oranı 1'den 5'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.6' ta ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FD<sub>B</sub> tip SK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin değerleri ve dalga sayıları L/r oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Çizelge 4.5' te r/h=100, Zirkonyum oksit, FDM'nin hacim kesir indeksi için d=0.25; 0.5;0.75;1.0;2.0; 3.0; 4.0; 5.0; 10, ters kuadratik profil ve paslanmaz çelikten oluşan SK'lar kullanılmaktadır. L/r oranının artışına bağlı olarak BFP değerleri ve onlara karşı gelen dairesel dalga sayısının azaldığı görülmektedir.

Hacim kesir indeksi d=0.25'ten d=10'a kadar arttığında zirkonyum oksitten oluşan SK'nın BFP değerleri paslanmaz çelikten oluşan SK'nın BFP değerlerine sürekli bir biçimde artış gösterdiği gözlenmektedir. FDSK'ların BFP değerleri ZrO<sub>2</sub> 'den oluşan kabuğun BFP değerleri ile karşılaştırıldığında, d=0.25 olduğunda FD<sub>B</sub> profilin BFP'ye etkisi (+%5.2) civarında olduğu halde d=10 olduğunda söz konusu etki (+%23.2) civarında olmaktadır.

FDSK'ların BFP değerleri paslanmaz çelikten oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde,  $d=0.25$  olduğunda FD profilin BFP'ye etkisi ( $-%16.9$ ) civarında iken  $d=10$  olduğunda söz konusu etki ( $-%2.5$ ) civarında olduğu görülmüştür.

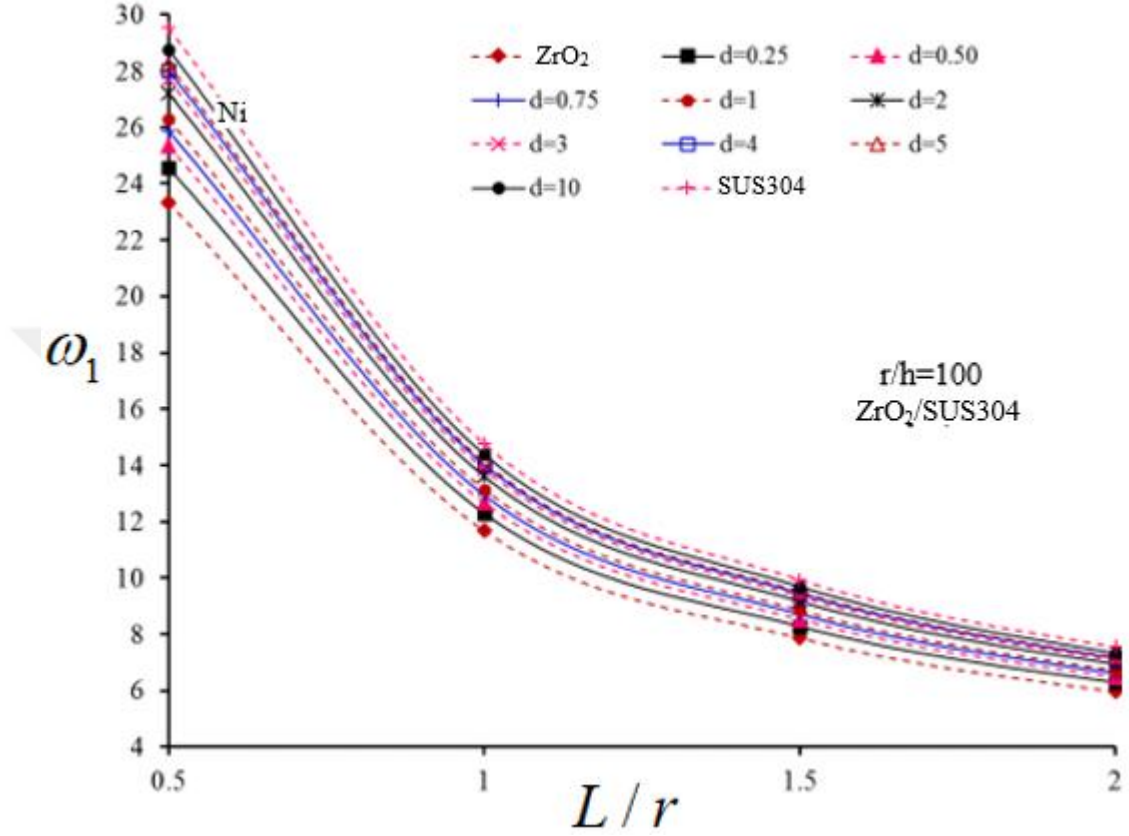
Ters kudratik profil için BFP değerlerine  $FD_B$  etkisi  $d=0.5$  profilli kabuktaki BFP'ye etki ile yaklaşık aynı olduğu tespit edilmiştir. Örneğin; zirkonyum oksitten oluşan kabukla mukayesede FDM etkisi ( $+%8.6$ ) civarında iken, paslanmaz çelikten oluşan kabukla kıyaslandığıında bu etki ( $-%14$ ) etrafında olduğu tespit edilmiştir.  $L/r$  oranının artması FDM'lerin BFP'lerine etkisini  $%1$ 'den az olmakla beraber düzensiz olarak değiştirmektedir.



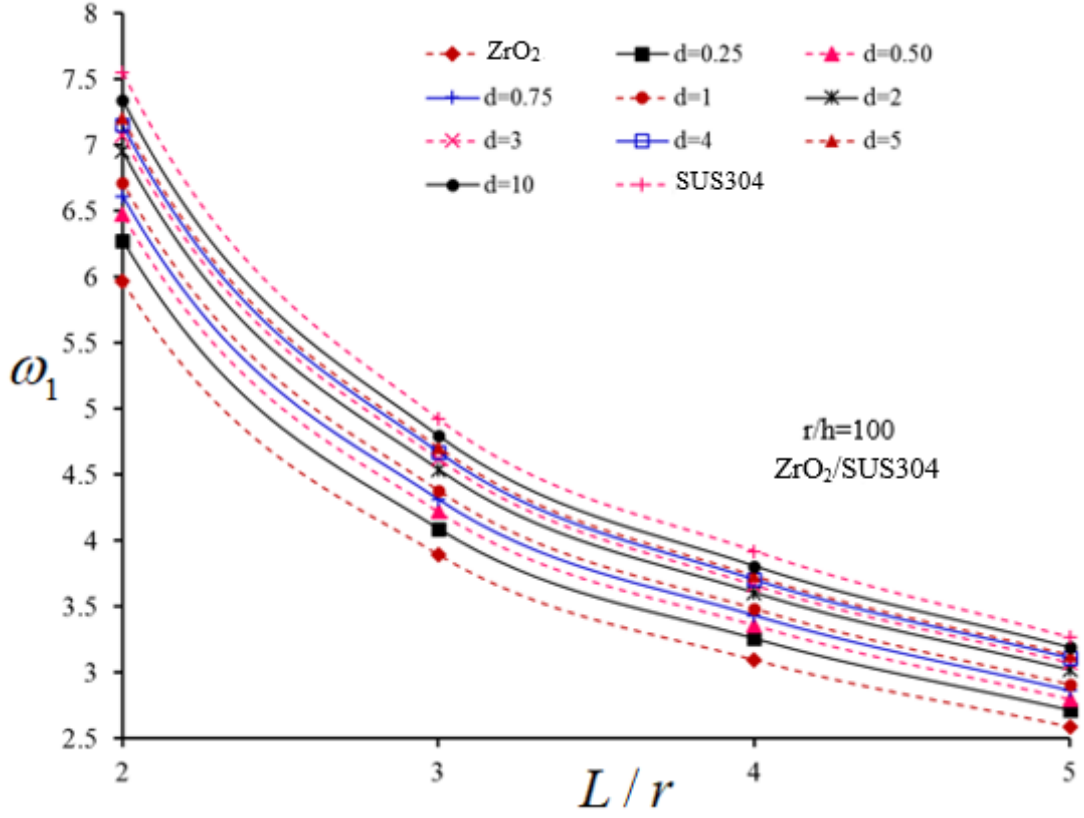
**Çizelge 4.6.** ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin L/r oranına bağlı değişimi

	$\omega_{1CST} (n)$					
L/r	ZrO <sub>2</sub>	d=0.25	d=0.50	d=0.75	d=1	d=2
0.5	23.343(1,7)	24.55(1,7)	25.328(1,7)	25.873(1,7)	26.277(1,7)	27.221(1,7)
1.0	11.679(1,5)	12.278(1,5)	12.667(1,5)	12.941(1,5)	13.146(1,5)	13.623(1,5)
1.5	7.864(1,4)	8.264(1,4)	8.526(1,4)	8.712(1,4)	8.850(1,4)	9.176(1,4)
2.0	5.964(1,4)	6.276(1,4)	6.474(1,4)	6.612(1,4)	6.714(1,4)	6.950(1,4)
2.5	4.842(1,3)	5.086(1,3)	5.247(1,3)	5.362(1,3)	5.448(1,3)	5.651(1,3)
3.0	3.890(1,3)	4.089(1,3)	4.219(1,3)	4.310(1,3)	4.378(1,3)	4.537(1,3)
4.0	3.093(1,3)	3.256(1,3)	3.359(1,3)	3.430(1,3)	3.482(1,3)	3.603(1,3)
5.0	2.585(1,2)	2.713(1,2)	2.799(1,2)	2.861(1,2)	2.907(1,2)	3.017(1,2)
L/r	d=3	d=4	d=5	d=10	Ters Kuad	SUS304
0.5	27.708(1,7)	28.013(1,7)	28.226(1,7)	28.754(1,7)	25.379(1,7)	29.529(1,7)
1.0	13.869(1,5)	14.023(1,5)	14.130(1,5)	14.391(1,5)	12.690(1,5)	14.767(1,5)
1.5	9.343(1,4)	9.447(1,4)	9.519(1,4)	9.694(1,4)	8.540(1,4)	9.939(1,4)
2.0	7.072(1,4)	7.150(1,4)	7.204(1,4)	7.341(1,4)	6.489(1,4)	7.55(1,4)
2.5	5.755(1,3)	5.820(1,3)	5.864(1,3)	5.970(1,3)	5.254(1,3)	6.116(1,3)
3.0	4.619(1,3)	4.670(1,3)	4.706(1,3)	4.793(1,3)	4.227(1,3)	4.919(1,3)
4.0	3.665(1,3)	3.705(1,3)	3.734(1,3)	3.806(1,3)	3.367(1,3)	3.918(1,3)
5.0	3.074(1,2)	3.109(1,2)	3.133(1,2)	3.189(1,2)	2.802(1,2)	3.263(1,2)

Şekil 4.4.11a ve Şekil 4.4.11b’de  $L/r$  oranı sırasıyla 0.5’den 2 ‘ye ve 2’den 5’e değiştiğinde  $FD_B$  çeşit SK’ların tüm  $d$  hacim kesir indeksleri için BFP’nin dağılımı sunulmaktadır.  $FD_B$  çeşit SK’ların frekans eğrileri  $L/r$  arttığında BFP değerlerinin önemli derecede azaldıkları görülmektedir.



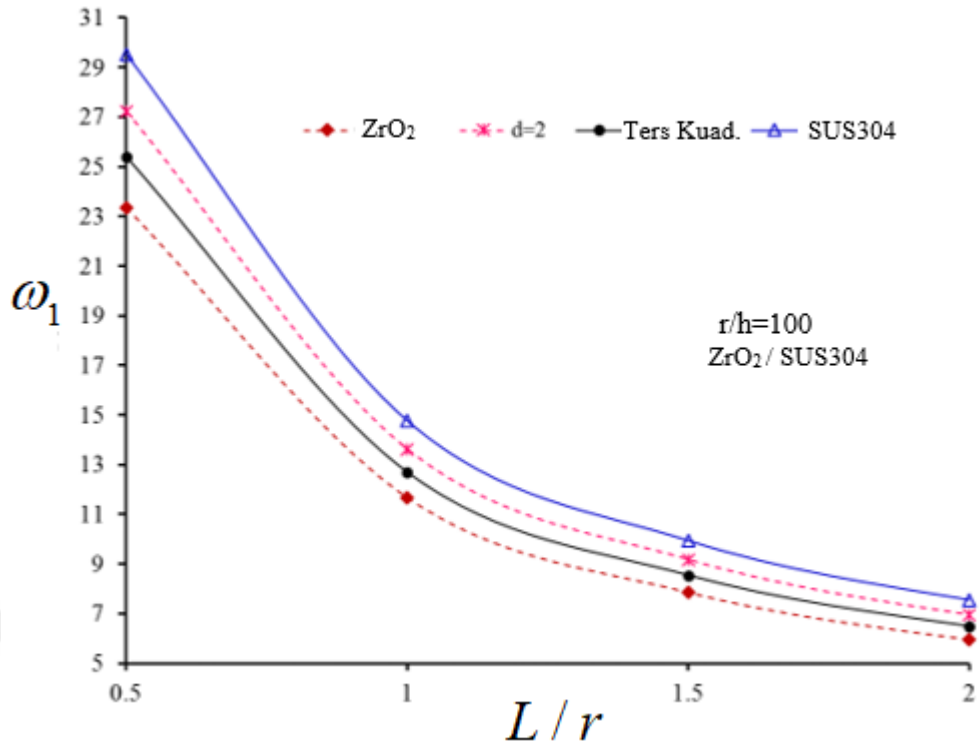
Şekil 4.4.11a. ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK’ların boyutsuz frekans parametresinin tüm HKİ’leri için  $L/r$  oranı 0.5’den 2 ‘ye kadar değiştiğinde dağılımı



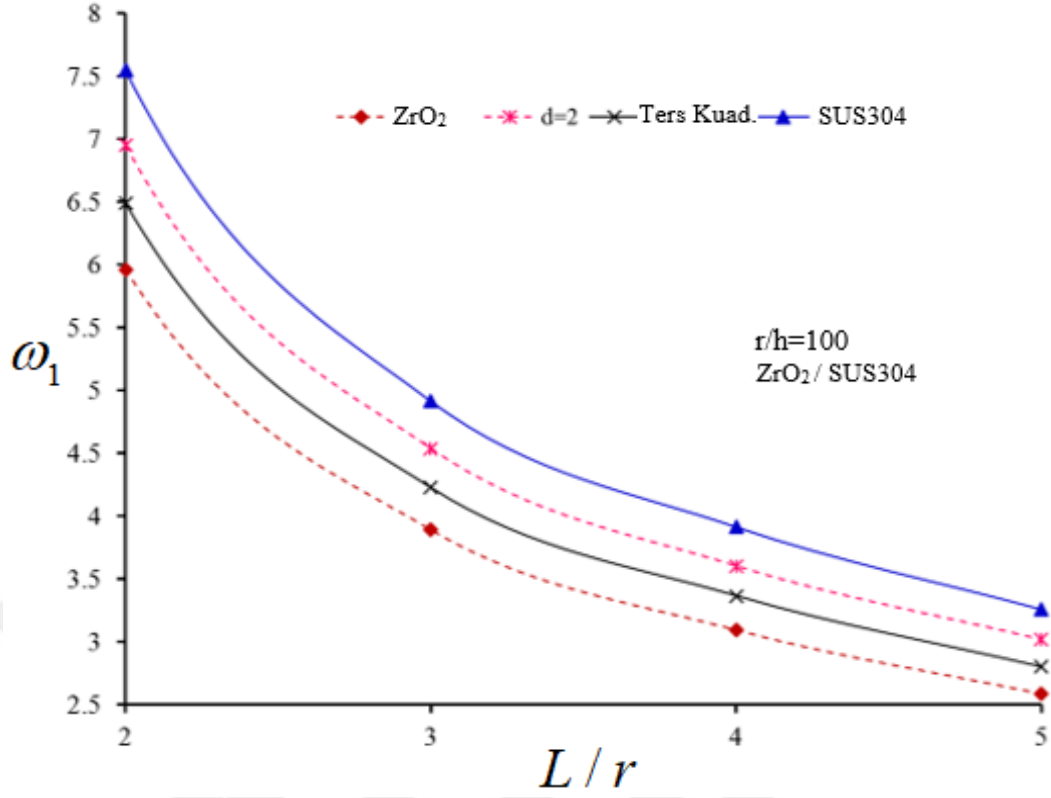
Şekil 4.4.11b. ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin tüm HKİ'leri için L/r oranı 2'den 5'e kadar değiştiğinde dağılımı

Şekil 4.4.12a ve Şekil 4.4.12b'de L/r oranı sırasıyla 0.5'den 2'ye ve 2'den 5'e değiştiğinde FD<sub>B</sub> çeşit SK'ların kuadratik ve ters kuadratik profilleri için BFP'nin dağılımından görüldüğü gibi L/r arttığında BFP değerlerinin önemli derecede azaldıkları görülmektedir. Ters kuadratik profil için BFP değerlerinin kuadratik durumdaki BFP değerlerinden küçük olduğu görülmektedir.





Şekil 4.4.12a. ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için  $L/r$  oranı 0.5'den 2 'ye kadar değiştiğinde dağılımı



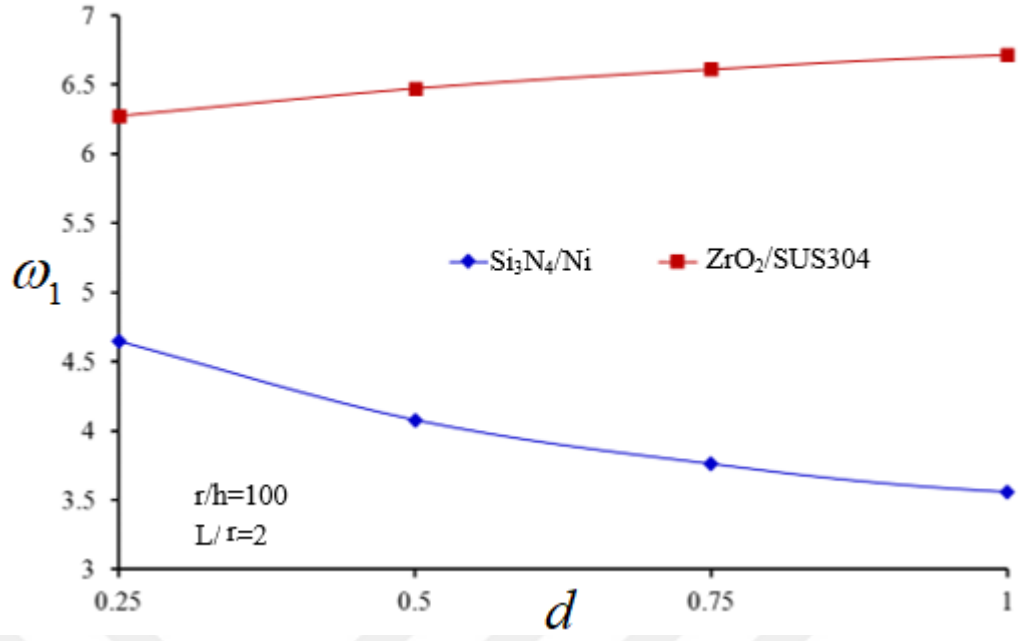
**Şekil 4.4.12b.** ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin kuadratik ve ters kuadratik profiller için L/r oranı 2'den 5'e kadar değiştiğinde dağılımı

Çizelge 4.7' de FD<sub>A</sub> ve FD<sub>B</sub> tip SK'ların tüm profilleri için boyutsuz frekans parametresinin değerleri ve d hacim kesir indeksine bağlı değişimi sunulmaktadır. d oranının artışına bağlı olarak Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımından oluşan SK'larda BFP değerleri sürekli azaldığı halde, ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımından oluşan SK'larda BFP değerleri artmaktadır. BFP'nin minimum değerlerine karşı gelen dalga sayıları sabit kalmaktadır.

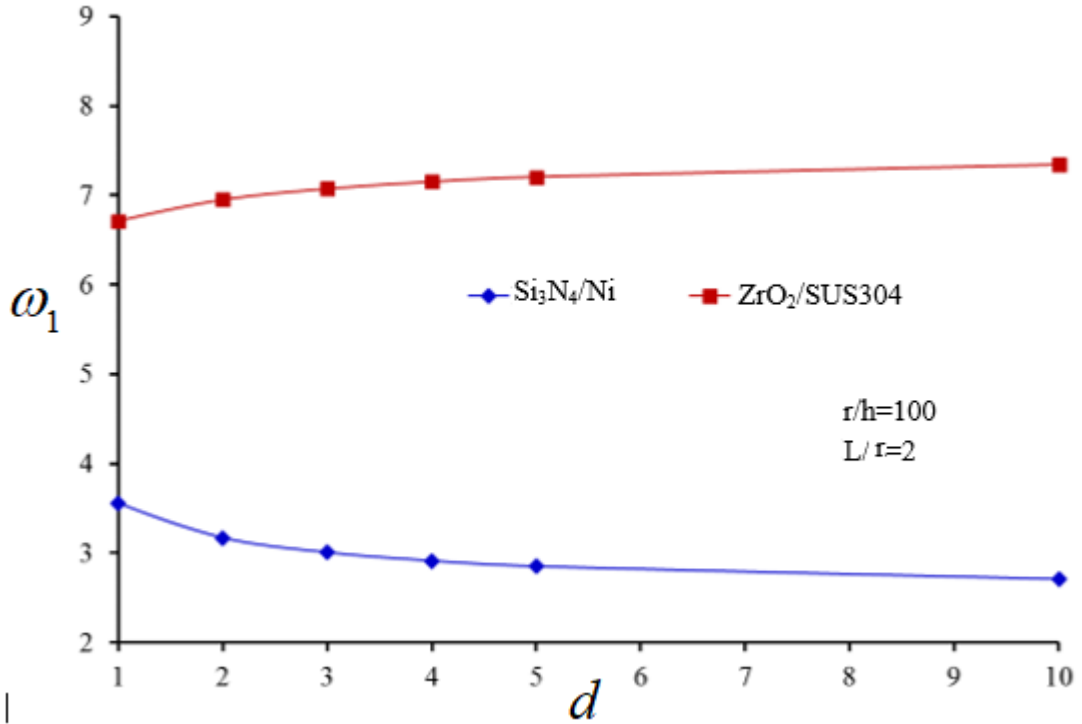
**Çizelge 4.7.** Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni ve ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımlarından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin  $d$  hacim kesre bağlı dağılımı

$d$	$\omega_1(n)$ (n)	
	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Ni	ZrO <sub>2</sub> /SUS304
Metal	2.503(1,4)	7.550(1,4)
0.25	4.647(1,4)	6.276(1,4)
0.5	4.079(1,4)	6.474(1,4)
0.75	3.762(1,4)	6.612(1,4)
1.0	3.559(1,4)	6.714(1,4)
2	3.171(1,4)	6.950(1,4)
3	3.007(1,4)	7.072(1,4)
4	2.914(1,4)	7.150(1,4)
5	2.852(1,4)	7.204(1,4)
10	2.708(1,4)	7.341(1,4)
Seramik	6.000(1,4)	5.964(1,4)

Çizelge 4.7 kullanılarak Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni ve ZrO<sub>2</sub>/SUS304 karışımlarından oluşan FD<sub>A</sub> ve FD<sub>B</sub> tip SK'ların BFP'nin  $d$  hacim kesri sırasıyla 0.25'den 1.0'e ve 1'den 10'a arttığında çizilen eğriler Şekil 4.4.13 ve Şekil 4.4.14'de sunulmaktadır. Şekil 4.4.13 ve Şekil 4.4.14'den görüldüğü gibi  $d$  hacim kesir indeksi arttığında ZrO<sub>2</sub>/SUS304 profilleri için BFP değerleri azalmakta Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni profilleri için BFP değerleri artmaktadır. Hacim kesir indeksi  $d > 4$  olduğunda BFP'nin artış (veya azalma) hızı yavaşlamaktadır.



Şekil 4.4.13. ZrO<sub>2</sub>/SUS304 ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımlarından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin  $d$  hacim kesir indeksi 0.25'den 1'e kadar değiştiğinde dağılımı



Şekil 4.4.14. ZrO<sub>2</sub>/SUS304 ve Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Ni karışımlarından oluşan FDSK'ların boyutsuz frekans parametresinin  $d$  hacim kesir indeksi 1'den 10'a kadar değiştiğinde dağılımı

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tez çalışmasında, karışık sınır koşulları altında FDSK'ların serbest titreşim davranışını incelenmektedir. FDSK'ların temel denklemlerinin türetilmesinde Donnell tipi kabuk teorisi kullanılmaktadır. Temel denklemler Galerkin yöntemi uygulanarak çözülmüş ve frekans için analitik ifade elde edilmiştir. Bu çalışmayı doğrulamak için, elde edilen sonuçlar literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Son olarak FDM'lerin boyutsuz frekans parametre değerleri üzerindeki etkilerini görmek için farklı  $FD_A$  ve  $FD_B$  profilleri için yeni ve özgün sayısal örnekler sunulmaktadır.

Sayısal sonuçlar aşağıdaki genelleştirmeleri desteklemektedir:

- a.)  $FD_A$  ve  $FD_B$  tip silindirik kabuklarda BFP değerlerinin ve onlara karşı gelen dairesel dalga sayısının  $r/h$  oranının artması ile arttığı görülmektedir.
- b.)  $FD_A$  ve  $FD_B$  profillerin BFP'lere etkisi  $r/h$  oranı değişiminden yaklaşık olarak bağımsız olduğu görülmektedir.
- c.) Hacim kesir indeksi sıfırdan ona kadar arttığında  $Si_3N_4$ 'ten oluşan SK'nın BFP değerleri nikelden oluşan SK'nın frekans değerlerine doğru sürekli bir biçimde azalma göstermiştir.
- d.)  $FD_A$  tip SK'ların BFP değerleri  $Si_3N_4$  'ten oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde  $FD_A$  profilin BFP'ye etkisi hacim kesir indeksinin artması ile artmaktadır.
- e.)  $FD_A$  çeşit SK'ların BFP değerleri nikelden oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde,  $FD_A$  profilin BFP'ye etkisi hacim kesir indeksinin artması ile önemli derecede azaldığı tespit edilmiştir.
- f.) HKİ sıfırdan ona kadar arttığında  $FD_B$  tip SK'nın BFP değerleri paslanmaz çelikten oluşan SK'nın frekans değerlerine doğru sürekli bir biçimde arttığı görülmektedir.

- g.)  $FD_B$  tip SK'ların BFP değerleri  $ZrO_2$  'den oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde,  $FD_B$  profilin BFP'ye etkisi artmasına rağmen  $FD_A$  tipin etkisinden az olmaktadır.
- h.)  $FD_B$  SK'ların BFP değerleri paslanmaz çelikten oluşan kabuğun BFP değerleri ile mukayese edildiğinde,  $FD_B$  profilin BFP'ye etkisi azalmanın yanı sıra rağmen  $FD_A$  tipin etkisinden az olmaktadır.
- i.)  $FD_A$  ve  $FD_B$  tip kabukların BFP değerlerine ters kudratik profilin etkisi  $d=0.5$  profilli kabuktaki BFP'ye etki ile yaklaşık aynı olduğu tespit edilmiştir.
- j.)  $L/r$  oranının artması ile BFP değerlerinin ve onlara karşı gelen dairesel dalga sayısının  $FD_A$  ve  $FD_B$  tip silindirik kabuklarda azaldığı görülmektedir.
- k.)  $L/r$  oranının artması  $FD_A$  ve  $FD_B$  profillerin BFP'lerine etkisini %1'den az olmakla beraber düzensiz olarak değiştirmektedir.
- l.) Hacim kesir indeksi arttığında  $ZrO_2/SUS304$  profilleri için BFP değerleri azaldığı,  $Si_3N_4/Ni$  profilleri için BFP değerlerinin ise arttığı gözlenmiştir.
- m.) Hacim kesir indeksi dörtten büyük olduğunda  $FD_A$  ve  $FD_B$  profilleri için BFP'nin artış (veya azalma) hızı yavaşlamaktadır.

## KAYNAKLAR

- Agenosov, L.G., Sachenkov, A.V., 1964. Stability and Free Vibration of Thin Circular Cylindrical and Conical Shells with Different Boundary Conditions. Research on the Theory of Plates and Shells, Kazan State University, Kazan, USSR, 2, 111–126 (in Russian).
- Alibeigloo, A., Jafarian, H., 2016. Three-Dimensional Static and Free Vibration Analysis of Carbon Nano Tube Reinforced Composite Cylindrical Shell Using Differential Quadrature Method. International Journal of Applied Mechanics, 8(3),165003.
- Amabili, M., 2008. Nonlinear Vibrations and Stability of Shells and Plates. Cambridge University Press, New York.
- Arefi, M., Karroubi, R., Irani, R.M., 2016. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Laminated Sandwich Cylindrical Shells Integrated with Piezoelectric Layer. Applied Mathematics and Mechanics, 37(7), 821-834.
- Bever, M.B., Duwez, P.F., 1972. Gradients in Composite Materials. Materials Science and Engineering, 10, 1–8.
- Bochkarev, S., Lekomtsev, S., 2015. Natural Vibrations of Heated Functionally Graded Cylindrical Shells with a Fluid. PNRPU, Mechanics Bulliten, 4, 19-35.
- Brischetto, S., 2016. Curvature Approximation Effects in the Free Vibration Analysis of Functionally Graded Shells. International Journal of Applied Mechanics, 1650079.
- Butcher, R.J., Rousseau, C.E., Tippur, H.V., 1999. A Functionally Graded Particulate Composite: Preparation, Measurements and Failure Analysis. Acta Materialia, 47, 259–268.
- Civalek, Ö., 2017a. Discrete Singular Convolution Method for the Free Vibration Analysis of Rotating Shells with Different Material Properties. Composite Structures, 160, 267-279.
- Civalek, Ö., 2017b. Free Vibration of Carbon Nanotubes Reinforced (CNTR) and Functionally Graded Shells And Plates Based on FSDT Via Discrete Singular Convolution Method. Composites Part B: Engineering, 111, 45-59.
- Ebrahimi, M.J., Najafizadeh, M.M., 2014. Free Vibration Analysis of Two-Dimensional Functionally Graded Cylindrical Shells. Applied Mathematical Modelling, 38(1), 308–324.
- Ersoy, H., Mercan, K., Civalek, Ö., 2018. Frequencies of FGM shells and annular plates by the methods of discrete singular convolution and differential quadrature methods. Composite Structures, 183,7-20.

- Fukui, Y., 1991. Fundamental Investigation of Functionally Gradient Material Manufacturing System Using Centrifugal Force. *International Journal of Japan Society Mechanical Engineering*, 34, 144–148.
- Haddadpour, H., Mahmoudkhani, S., Navazi, H.M., 2007. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Cylindrical Shells Including Thermal Effects. *Thin-Walled Structures*, 45, 591–599.
- Hirai, T., 1996. *Materials Science and Technology*. Brook, R.J., (Ed.), Vch Verlagsgesellschaft (292-341), Weinheim, Germany.
- Giannakopoulos, A.E., Suresh, S., 1997. Indentation of Solids with Gradients in Elastic Properties: Part I. Point Force Solution. *International Journal of Solids and Structures*, 34, 2357–2392.
- Golpayegani, I.F., Ghorbani, E., 2016. Free Vibration Analysis of FGM Cylindrical Shells Under Non-Uniform Internal Pressure. *Journal of Materials and Environmental Science*, 7(3), 981-992.
- Isvandzibaei, M.R., Jamaluddin, H., Hamzah, R.I.R., 2016. Vibration Analysis of Supported Thick-Walled Cylindrical Shell Made of Functionally Graded Material Under Pressure Loading. *Journal of Vibration and Control*, 22(4), 1023-1036.
- Jin, G., Xie X., Liu Z., 2014. The Haar Wavelet Method for Free Vibration Analysis of Functionally Graded Cylindrical Shells Based on the Shear Deformation Theory. *Composite Structures*, 108, 435-448.
- Jin, G., Ye, T., Wang, X., Miao, X., 2016. A Unified Solution for the Vibration Analysis of FGM Doubly-Curved Shells of Revolution with Arbitrary Boundary Conditions. *Composites Part B: Engineering*, 89, 230-252.
- Kadoli, R., Ganesan, K., 2006. Buckling and Free Vibration Analysis of Functionally Graded Cylindrical Shells Subjected to a Temperature-Specified Boundary Condition. *Journal of Sound Vibration*, 289, 450–480.
- Kawasaki, A., Watanabe, R. 1997. Concept and P/M Fabrication of Functionally Gradient Materials. *Ceramic International*, 23(1), 73–83.
- Kieback, B., Neubrand, A., Riedel, H., 2003. Processing Techniques for Functionally Graded Materials. *Materials Science and Engineering A*, 362, 81–106.
- Kim, Y.W., 2015. Free Vibration Analysis of FGM Cylindrical Shell Partially Resting on Pasternak Elastic Foundation with an Oblique Edge. *Composites Part B: Engineering*, 70, 263-276.
- Koizumi, M., 1993. The Concept of FGM. *Ceramic Transactions, Functionally Gradient Materials*, 34, 3–10.



- Koizumi, M., 1997. FGM Activities in Japan. *Composites Part B: Engineering*, 28, 1–4.
- Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T., 2017. *Functionally Graded Materials*. Metallurgy and Materials Engineering. Springer International Publishing DOI 10.1007/978-3-319-53756-6-2.
- Mantari, J.L., Soares, C.G., 2014. Optimized Sinusoidal Higher Order Shear Deformation Theory for the Analysis of Functionally Graded Plates and Shells. *Composites Part B: Engineering*, 56,126–136.
- Matsunaga, H., 2008. Free Vibration and Stability of Functionally Graded Shallow Shells According to a 2-D Higher-Order Deformation Theory. *Composite Structures*, 84, 132–146.
- Matsunaga, H., 2009. Free Vibration and Stability of Functionally Graded Circular Cylindrical Shells According to a 2D Higher-Order Deformation Theory. *Composite Structures*, 88, 519–531.
- Miyamoto, Y., Kaysser, W.A., Rabin, B.H., Kawasaki, A., Ford, R.G., 1999. *Functionally Graded Materials: Design, Processing, and Applications*. Kluwer, Massachusetts.
- Müller, E., Drašar, C., Schilz, J., Kaysser, W.A., 2003. Functionally Graded Materials for Sensor and Energy Applications. *Materials Science Engineering A*, 362, 1–2, 17–39.
- Leissa, A.W., 1973. *Vibration of Shells*. NASA SP–288.
- Lambros, J., Santare, M.H., Li, H., Sapna, G.H., 1999. A Novel Technique for the Fabrication of Laboratory Scale Model of FGM. *Experimental Mechanics*, 39, 184–190.
- Liang, B., Chen, J.X., Li, R., Zhang, W., 2016. Study on the Coupled Vibration of Submerged Ring-Stiffened Cylindrical Shells with Functionally Graded Material Using Wave Propagation Approach. *Journal of Ship Mechanics*, 20(8), 999-1006.
- Loy, C.T., Lam, K.Y., Reddy, J.N., 1999. Vibration of Functionally Graded Cylindrical Shells. *International Journal of Mechanical Science*, 41, 309–324.
- Najafizadeh, M.M., Isvandzibaei, M.R., 2007. Vibration of Functionally Graded Cylindrical Shells Based on Higher Order Shear Deformation Plate Theory with Ring Support. *Acta Mechanica*, 191, 75–91.
- Nayfeh, A.H., Mook, D.T., 1979. *Non-linear Oscillation*. Wiley, NewYork.
- Pandey, S., Pradyumna, S., 2015. A Layerwise Finite Element Formulation for Free Vibration Analysis of Functionally Graded Sandwich Shells. *Composite Structures*, 133, 438-450.

- Park, K.J., Kim, Y.W., 2016. Vibration Characteristics of Fluid-Conveying FGM Cylindrical Shells Resting on Pasternak Elastic Foundation with an Oblique Edge. *Thin-Walled Structures*, 106, 407-419.
- Pitakthapanaphong, S., Busso, E.P., 2002. Self-Consistent Elastoplastic Stress Solutions for Functionally Graded Material Systems Subjected to Thermal Transients. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 50, 695–716.
- Pradhan, S.C., Loy, C.T., Reddy, J.N., 2000. Vibration Characteristics of Functionally Graded Cylindrical Shells under Various Boundary Conditions. *Applied Acoustic*, 61, 111–129.
- Qatu, MS., 2004. *Vibration of Laminated Shells and Plates*. Elsevier, 426p, Oxford.
- Qu, Y.G., Long, X.H., Yuan, G.Q., Meng, G., 2013. A Unified Formulation for Vibration Analysis of Functionally Graded Shells of Revolution with Arbitrary Boundary Conditions. *Composites Part B: Engineering*, 50, 381–402.
- Tornabene, F., 2009. Free Vibration Analysis of Functionally Graded Conical, Cylindrical Shell and Annular Plate Structures with a Four-Parameter Power-Law Distribution. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198, 2911–2935.
- Reddy, J.N., Chin, C.D., 1998. Thermo-Mechanical Analysis of Functionally Graded Cylinders and Plates. *Journal of Thermal Stresses*, 21, 593–626.
- Shen, H.S., 2009. *Functionally Graded Materials, Nonlinear Analysis of Plates and Shells*, CRC Press, Florida.
- Suresh, S., Mortensen, A., 1998. *Fundamentals of Functionally Graded Materials*. IOM Communications Limited, United Kingdom, London.
- Suresh, S., 2001. Graded Materials for Resistance to Contact Deformation and Damage. *Science*, 292, 2447–2451.
- Sofiyev, A.H., 2003. Dynamic Buckling of Functionally Graded Cylindrical Thin Shells under Non-Periodic Impulsive Loading. *Acta Mechanica*, 165, 151–163.
- Sofiyev, A.H., 2014. The Vibration and Buckling of Sandwich Cylindrical Shells Covered by Different Coatings Subjected to the Hydrostatic Pressure. *Composite Structures*, 117, 124–134.
- Sofiyev, A.H., 2015. On the Vibration and Stability of Shear Deformable FGM Truncated Conical Shells Subjected to an Axial Load. *Composites Part B: Engineering*, 80, 53-62.

- Sofiyev, A.H., Kuruoglu, N., 2015. On a Problem of the Vibration of Functionally Graded Conical Shells with Mixed Boundary Conditions. *Composites Part B-Engineering*, 70, 122-130.
- Sofiyev, A.H., Huseynov S.E., Kuruoglu, N., 2015. Influence of Mixed Boundary Conditions and Heterogeneity on the Vibration Behavior of Orthotropic Truncated Conical Shells. *Archives of Mechanics*, 67, 331-348.
- Sofiyev, A.H., 2016a. Large Amplitude Vibration of FGM Orthotropic Cylindrical Shells Interacting with the Nonlinear Winkler Elastic Foundation. *Composites Part B: Engineering*, 98, 141-150.
- Sofiyev, A.H., 2016b. Parametric Vibration of FGM Conical Shells Under Periodic Lateral Pressure within the Shear Deformation Theory. *Composites Part B: Engineering*, 89, 282-294.
- Sofiyev, A.H., Hui, D., Valiyev A., Kadioglu, F., Turkaslan S., Yuan, G., Kalpakci, V., Özdemir A., 2016. Effects of Shear Stresses and Rotary Inertia on the Stability and Vibration of Sandwich Cylindrical Shells with FGM Core Surrounded by Elastic Medium. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 44(4), 384-404.
- Sofiyev, A.H., Hui, D., 2019. On the Vibration and Stability of FGM Cylindrical Shells Under External Pressures with Mixed Boundary Conditions by Using FOSDT. *Thin-Walled Structures*, 134, 419-427.
- Sofiyev, A.H., 2019. The Buckling and Vibration Analysis of Coating-FGM-Substrate Conical Shells Under Hydrostatic Pressure with Mixed Boundary Conditions. *Composite Structures*, 209, 686-693.
- Touloukian, Y.S., 1967. *Thermo Physical Properties of High Temperature Solid Materials*. McMillan, New York.
- Uduba, G., Rao, S.S., Gangadharan K.V., 2014. Functionally Graded Composite Materials: An Overview. *Procedia Material Science*, 5, 1291-1299.
- Volmir, A.S., 1967. *Stability of Elastic Systems*. Nauka, Moscow. English Translation: Foreign Tech. Division, Air Force Systems Command. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, AD628508.
- Wali, M., Hentati, T., Jarraya A, Dammak, F., 2015. Free Vibration Analysis of FGM Shell Structures with a Discrete Double Directors Shell Element. *Composite Structures*, 125, 295-303.
- Xu, C., Yu, Z.X., Du, F., 2018. Dynamic Analysis of a Thick Hollow Cylinder Made of Two-Dimensional Functionally Graded Material Using Time-Domain Spectral Element Method. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, DOI: 10.1080/15376494.2018.1444224 (in press).

- Yildiz, I., 2015. Fonksiyonel Değişimli ekirdeğe Sahip Ü Tabakalı Silindirik Kabukların Parametrik Titreşimi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1-114.
- Zghal, S., Frikha, A., Dammak, F., 2018. Free Vibration Analysis of Carbon Nanotube-Reinforced Functionally Graded Composite Shell Structures. Applied Mathematics Modeling, 53:132-155.



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mustafa SÜZER  
Doğum Yeri ve Yılı : Manavgat, 1991  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : mustafasuzer7@gmail.com



### Eğitim Durumu:

Lise : Manavgat Lisesi

Lisans : Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi  
İnşaatMühendisliği Bölümü, Isparta , 2016

### Yayınları:

#### Ulusal Toplantıda Sunularak Tam Metin Olarak Yayımlanan Bildiri

Haciyev VC, Avey A, Mirzeyeva GR, Şiriyev AI, Süzer M. 2018. Winkler elastik zemin üzerine oturan homojen olmayan ortotropik dikdörtgen plakların serbest titreşim probleminin çözümü. XX. Ulusal Mekanik Kongresi 5-9 Eylül 2017, Uludağ Üniversitesi, Bursa, 451-459.