

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

**FONKSİYONEL DEĞİŞİMLİ MALZEMELERLE KAPLANMIŞ  
METAL SİLİNDİRİK KABUKLARIN SERBEST TİTREŞİMİ**

**Uğur BESTELCİ**

**Danışman  
Prof. Dr. Abdullah AVEY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ISPARTA - 2013**

© 2013 [Uğur BESTELCİ]

## TEZ ONAYI

Uğur BESTELCİ tarafından hazırlanan "Fonksiyonel Değişimli Malzemelerle Kaplanmış Metal Silindirik Kabukların Serbest Titreşimi" 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**

**Doç. Dr. Mehmet KAMANLI**  
Selçuk Üniversitesi

.....

**Jüri Üyesi**

**Yrd. Doç. Dr. Mehmet AVCAR**  
Süleyman Demirel Üniversitesi

.....

**Enstitü Müdürü**

**Prof. Dr. Cengiz KAYACAN**

.....

## **TAAHHÜTNAME**

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

**Uğur BESTELCİ**

## İÇİNDEKİLER

|  | <b>Sayfa</b> |
|--|--------------|
| İÇİNDEKİLER.....   | i            |
| ÖZET .....   | ii           |
| ABSTRACT .....   | iii          |
| TEŞEKKÜR .....   | iv           |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....  | v            |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....  | vii          |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....  | viii         |
| 1. GİRİŞ .....   | 1            |
| 1.1. Tezin Önemi.....  | 2            |
| 1.2. Tezin Amacı .....   | 4            |
| 1.3. Genel Bilgiler .....  | 5            |
| 1.3.1. FDM'lerin Üretim Yöntemleri, Avantajları Ve Uygulama Alanları   | 5            |
| 1.3.2. FDM Kaplamalı Kabukların Uygulamaları Ve Avantajları .....  | 7            |
| 2. KAYNAK ÖZETLERİ .....   | 9            |
| 2.1. FDM'lerin Üretimi, Özellikleri, Uygulamaları Ve Gerilme Analizleri İle İlgili Makale Özetleri.....      | 9            |
| 2.2. Tez Konusu İle İlgili Homojen Silindirik Kabukların Titreşimine Ait Makale Özetleri .....               | 14           |
| 2.3. Pür FDM Veya FDM Tabaka İçeren Kabukların Titreşim Ve Stabilitesi İle İlgili Makale Özetleri.....       | 16           |
| 2.4. FD Kaplamalar Veya FD Kaplamalı Yapı Elemanlarının Davranışı İle İlgili Makale Özetleri.....            | 26           |
| 2.5. Tez konusu İle İlgili Literatürde Bulunan Önemli Kitaplardan Bazıları                                   | 33           |
| 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....   | 38           |
| 3.1. Problemin Formülasyonu.....   | 38           |
| 3.2. İçten Ve Dıştan FD Kaplamalı Metal Silindirik Kabukların Malzeme Özelliklerinin Modellenmesi .....      | 39           |
| 3.3. İçten Ve Dıştan FD Kaplamalı Metal Silindirik Kabukların Temel Denklemlerinin Çıkarılışı Ve Çözümü..... | 49           |
| 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....  | 58           |
| 4.1. Karşılaştırmalar .....  | 58           |
| 4.2. FD Kaplamaların Ve FD Kaplamalı Silindirik Kabukların Malzeme Özellikleri.....                          | 60           |
| 4.3. Çeşitli FD Kaplamalı Silindirik Kabukların Titreşim Analizi .....                                       | 63           |
| 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....   | 84           |
| KAYNAKLAR.....   | 86           |
| ÖZGEÇMİŞ.....  | 92           |

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### FONKSİYONEL DEĞİŞİMLİ MALZEMELERLE KAPLANMIŞ METAL SİLİNDİRİK KABUKLARIN SERBEST TİTREŞİMİ

Uğur BESTELCİ

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdullah AVEY

Tez çalışmasında, iç ve dış yüzeyleri fonksiyonel değişimli malzemelerle (FDM'ler) kaplanmış metal silindirik kabukların serbest titreşim problemi incelenmiştir.

İlk aşamada, fonksiyonel değişimli (FD) kaplama için kullanılan tabakaların ve metal malzemeden oluşturulan çekirdeğin ayrı-ayrı ve üçlü sistem olarak analitik modelleri oluşturulmakta ve bu modeller görsel olarak sunulmaktadır.

İkinci aşamada iç ve dış yüzeyleri FDM'lerle kaplanmış metal silindirik kabukların temel bağıntıları, hareket ve deformasyon uygunluk denklemleri türetilmektedir.

Temel denklemler Galerkin Yöntemi ile çözülerek iç ve dış yüzeyleri FDM'lerle kaplanmış metal silindirik kabukların serbest titreşiminin boyutsuz frekans parametresi için analitik ifade bulunmaktadır. Elde edilen ifadeden pür FDM ve pür metalden oluşan silindirik kabukların serbest titreşiminin boyutsuz frekans parametreleri için ifadeler özel olarak elde edilmektedir.

Son olarak, beş çeşit FD kaplama ve üç çeşit metal çekirdek kullanılarak oluşturulan kaplamalı silindirik kabukların serbest titreşimlerinin boyutsuz frekans parametrelerinin minimum değerlerine, hacim bileşenleri değişiminin, kabuk karakteristiklerinin, iç ve dış tabakaların kalınlıkları değişiminin etkileri sayısal olarak incelenmektedir.

Bu çalışmanın geçerliliği için elde edilen sonuçlar literatürde sunulan çalışmalarla karşılaştırılmıştır

**Anahtar Kelimeler:** Fonksiyonel değişimli malzeme (FDM), fonksiyonel değişimli (FD) kaplama, metal silindirik kabuk, serbest titreşim, boyutsuz frekans parametresi

2013, 92 sayfa

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **THE FREE VIBRATION OF METAL CYLINDRICAL SHELLS COATED WITH FUNCTIONALLY GRADED MATERIALS**

**Uğur BESTELCİ**

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

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

In this thesis, the free vibration problem of the metal cylindrical shell coated with functionally graded materials (FGMs) in the inner and outer surfaces is investigated.

Firstly, the analytical models of functionally graded (FG) coating and three-layer system are carried out and the visual presentations of these models are given. Then, the basic relations, modified Donnell type moving and deformation compatibility equations of the metal cylindrical shells coated with FGMs are derived.

Later, the basic equations are solved by using Galerkin method and analytical expression for the dimensionless frequency parameter of the metal cylindrical shell coated with FGMs is found. The expressions of dimensionless frequency parameter are obtained for the single-layer pure FGM and pure metal cylindrical shells, as a special case.

Finally, the effects of variations of volume fractions, shell characteristics and variations of the thickness of inner and outer coatings on the values of the dimensionless frequency parameters of free vibrations for coated cylindrical shells made of five different types of FG coating and three kinds of metal core are studied numerically.

Comparisons are made with the available studies in the open literature to validate this study.

**Keywords:** Functionally graded materials (FGMs), functionally graded (FG) coating, metal cylindrical shell, free vibration, dimensionless frequency parameter

**2013, 92 pages**

## TEŞEKKÜR

Bu alıŐma Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü InŐaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalıŐmasını sürdürdüğüm dönemde, bana daima destek olan, çalışma disiplini aŐılayan, fedakrlıktan kaçınmayan, yapıcı öneri ve düzenlemeleriyle çalışmanın içerik ve sunumundaki zenginliğine büyük katkıda bulunan tez yöneticisi, saygıdeğer danışman hocam, Sayın **Prof. Dr. Abdullah AVEY**'e sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

3161-YL1-12 No'lu proje ile tez çalıŐmamı maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi BaŐkanlıđı'na teŐekkürlerimi sunarım.

110M695 No'lu TUBİTAK projelerinde vermiŐ oldukları burs destekleri için TÜBİTAK'a sonsuz teŐekkürlerimi sunarım

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

Uğur BESTELCİ  
ISPARTA, 2013

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  | Sayfa |
|--|-------|
| Şekil 3.1. a) İç ve dış yüzeyi FDM kaplı silindirik kabukta koordinat sistemi, b) tabakaların diziliş şekli; (1) FD dış kaplama, (2) Metal, (3) FD iç kaplama .....  | 38    |
| Şekil 3.2. FD-Metal-FD üçlü sistemde FD kaplamaların hacim kesir fonksiyonları için boyutsuz Young modülünün değişimi .....  | 43    |
| Şekil 3.3. FD dış ve iç kaplamaların değişik hacim kesirleri için boyutsuz Young modüllerinin boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımı..  | 43-44 |
| Şekil 3.4. $d=0.25$ için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü .....  | 44    |
| Şekil 3.5. $d=0.5$ için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü .....   | 45    |
| Şekil 3.6. $d=0.75$ için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü .....  | 45    |
| Şekil 3.7. $d=1.0$ için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü .....   | 46    |
| Şekil 3.8. $d=2$ için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü .....   | 46    |
| Şekil 3.9. $d=3$ için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü .....   | 47    |
| Şekil 3.10. $d=5$ için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü .....  | 47    |
| Şekil 3.11. $d=15$ için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü .....   | 48    |
| Şekil 3.12. $d=25$ için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü .....   | 48    |
| Şekil 4.1. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin $d<1$ ( $d=0.25$ ve $0.75$ ) için $h_m / h_{FD}$ oranına bağlı değişimi .....  | 66    |
| Şekil 4.2. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin $d>1$ ( $d=1$ ve $2$ ) için $h_m / h_{FD}$ oranına bağlı değişimi.   | 67    |
| Şekil 4.3. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin $d=5$ ve $15$ için $h_m / h_{FD}$ oranına bağlı değişimi ( $R/h =100$ , $L/R=2$ ) .....  | 68    |
| Şekil 4.4. SUS304, Ti-6Al-4V, FDA/SUS304/FDA ve FDB/Ti-6Al-4V/FDB silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin değişik $d$ değerleri için $h_m / h_{FD}$ oranına bağlı değişimi ( $R/h =100$ , $L/R=2$ ) ... | 69    |
| Şekil 4.5. SUS304, Ti-6Al-4V, FDC/SUS304/FDC ve FDD/Ti-6Al-4V/FDD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin değişik $d$ değerleri için $h_m / h_{FD}$ oranına bağlı değişimi ( $R/h =100$ , $L/R=2$ ) ... | 70    |
| Şekil 4.6. Ni ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin değişik $d$ değerleri için $h_m / h_{FD}$ oranına bağlı değişimi .....  | 71    |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 4.7. SUS304, Ti-6Al-4V, FDA/SUS304/FDA ve FDB/Ti-6Al-4V/FDB silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin değişik d değerleri için R / h oranına bağlı değişimi ( $L/R=2$ , $h_m/h_{FD} =6$ )..... | 74 |
| Şekil 4.8. SUS304, Ti-6Al-4V, FDC/SUS304/FDC ve FDD/Ti-6Al-4V/FDD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin değişik d değerleri için R / h oranına bağlı değişimi ( $L/R=2$ , $h_m/h_{FD} =6$ )..... | 75 |
| Şekil 4.9. Ni ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin değişik d değerleri için R / h oranına bağlı değişimi ( $L/R=2$ , $h_m/h_{FD} =6$ ).....                                       | 76 |
| Şekil 4.10. FDA/SUS304/FDA silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin d=2 ve 15 ve değişik L/R oranı için R / h oranına bağlı değişimi ( $h_m/h_{FD} =6$ ).....                                       | 77 |
| Şekil 4.11. FDE/Ni/FDE silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin d=2 ve 15 ve değişik L/R oranı için R / h oranına bağlı değişimi ( $h_m/h_{FD} =6$ ).....   | 78 |
| Şekil 4.12. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin d=0.25 ve 0.75 için L / R oranına bağlı değişimi ( $R/h=100$ , $h_m/h_{FD} =6$ ).....                                    | 81 |
| Şekil 4.13. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin d=1 ve 2 için L / R oranına bağlı değişimi ( $R/h=100$ , $h_m/h_{FD} =6$ ).....  | 82 |
| Şekil 4.14. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresinin d=5 ve 15 için L / R oranına bağlı değişimi ( $R/h=100$ , $h_m/h_{FD} =6$ ).....   | 83 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|   | <b>Sayfa</b> |
|---|--------------|
| Çizelge 4.1. Tek tabakalı pür metal silindirik kabukların boyutsuz frekans parametresi değerlerinin Weingarten (1964a-b), Soedel (1980), Calladine (1983), Koga (1988) ve El-Mously (2003) çalışmaları ile karşılaştırılması .....  | 58           |
| Çizelge 4.2. Pür FDM (Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) silindirik kabuğun boyutsuz titreşim frekansının Matsunaga (2009) çalışması ile karşılaştırılması .....   | 59           |
| Çizelge 4.3. Seramik ve metalin Young modüllerinin (Pa) sıcaklığa bağlı katsayıları (Reddy ve Chin, 1998; Shen 2008).....   | 61           |
| Çizelge 4.4. Seramik ve metalin Poisson oranlarının sıcaklığa bağlı katsayıları (Reddy ve Chin, 1998; Shen 2008) .....  | 62           |
| Çizelge 4.5. Seramik ve metalin malzeme yoğunlukları (kg/m <sup>3</sup> ) (Reddy ve Chin, 1998) .....   | 62           |
| Çizelge 4.6. Üç çeşit zenginleştirilmiş metal, beş çeşit pür FDM ve beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresi ve ona karşı gelen çevresel dalga sayısının (n), değişik hacim kesir indeksi için $h_m / h_{FD}$ oranına bağlı değişimi (R/h =100, L/R=2) ..... | 65           |
| Çizelge 4.7. Üç çeşit zenginleştirilmiş metal ve beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz titreşim frekansı ve ona karşı gelen çevresel dalga sayısının (n), değişik hacim kesir indeksi için R / h oranına bağlı değişimi (L/R=2, $h_m/h_{FD}$ =6) .....                        | 73           |
| Çizelge 4.8. Üç çeşit zenginleştirilmiş metal ve beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların $\omega_1$ boyutsuz frekans parametresi ve ona karşı gelen çevresel dalga sayısının (n), değişik hacim kesir indeksi için L / R oranına bağlı değişimi (R/h=100, $h_m/h_{FD}$ =6) ....                     | 80           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|   |  |
|---|--|
| $a_{1k_1}, a_{2k_1}, a_{6k_1}$                  | Malzeme ve kabuk özelliklerine bağlı katsayılar  |
| $Al_2O_3$                                       | Alüminyum oksit  |
| Al  | Alüminyum  |
| Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>               | Alüminyum ve Alüminyum Oksit 'in karışımı  |
| $B_i, C_i (i = 1, 2, \dots, 6)$                 | Malzeme ve kabuk özelliklerine bağlı katsayılar  |
| $d (0 \leq d < +\infty)$                        | Hacim kesir indeksi olup FD kaplama kalınlığı boyunca malzeme değişimi profili                                   |
| $E_{FD}^{dis}, \nu_{FD}^{dis}, \rho_{FD}^{dis}$ | Sırasıyla, silindirik kabuğun dış yüzeyindeki FD kaplamanın Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu             |
| $E_{FD}^{ic}, \nu_{FD}^{ic}, \rho_{FD}^{ic}$    | Sırasıyla, silindirik kabuğun iç yüzeyindeki FD kaplamanın Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu              |
| $E_c, \nu_c, \rho_c$                            | Sırasıyla, FD kaplamanın seramik yüzeyinin Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu                              |
| $E_m, \nu_m, \rho_m$                            | Sırasıyla, FD kaplamanın metal yüzeyinin veya zenginleştirilmiş metalin Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu |
| $E_0, \nu_0, \rho_0$                            | Sırasıyla, hammaddenin Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu  |
| $E_{0m}, \nu_{0m}, \rho_{0m}$                   | Sırasıyla, pür metalin Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu  |
| $E_f, \nu_f, \rho_f$                            | Sırasıyla, efektif Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluk   |
| $E(Z), \nu(Z), \rho(Z)$                         | Sırasıyla, kaplamalı kabuğun Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu  |
| $e_x, e_y$                                      | Sırasıyla, kaplamalı kabuğun referans yüzeyindeki Ox ve Oy doğrultularında normal deformasyon bileşenleri        |
| $e_{xy}$  | Kaplamalı kabuğun referans yüzeyindeki kayma deformasyonu  |
| $f(t), \varphi(t)$                              | Zamana bağlı bilinmeyen fonksiyonlar   |
| FDA/ SUS304/ FDA                                | Birinci çeşit üç tabakalı silindirik kabuk   |
| FDB/Ti-6Al-4V/FDB                               | İkinci çeşit üç tabakalı silindirik kabuk  |
| FDC/ SUS304 / FDC                               | Üçüncü çeşit üç tabakalı silindirik kabuk  |
| FDD/ Ti-6Al-4V / FDD                            | Dördüncü çeşit üç tabakalı silindirik kabuk  |
| FDE/ Ni/ FDE                                    | Beşinci çeşit üç tabakalı silindirik kabuk   |
| FDM   | Fonksiyonel değişimli malzeme  |
| FD kaplama                                      | Fonksiyonel değişimli kaplama  |
| $h = 2h_{Fd} + h_m$                             | Üç katmanlı kabuğun genel kalınlığı  |
| $h_m$   | Metal katmanın kalınlığı   |
| $h_{FD}$  | FD kaplamaların her birinin kalınlığı  |
| $h_m / h_{FD}$                                  | Metal katman kalınlığının kaplama kalınlığına oranı  |
| k   | =1,2,3; Tabaka sayısı  |
| L   | Kaplamalı silindirik kabuğun uzunluğu  |

|  |   |
|--|---|
| $L / R$  | Kaplamalı silindirik kabuk uzunluğunun yarıçapa oranı                       |
| $L_i(\Phi_1, w)$ ( $i = 1,2$ )                 | Diferansiyel operatörler  |
| $M_x, M_y, M_{xy}$                             | Moment bileşenleri  |
| $m$  | Ana doğrultuda (Ox) dalga sayısı  |
| $m_1$  | $= \frac{m\pi}{L}$ , parametre  |
| $n$  | Çevre doğrultusunda (Oy) dalga sayısı                                       |
| $n_1$  | $= \frac{n}{R}$ , parametre   |
| Ni   | Nikel   |
| Ni/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (FDE)        | Nikel ve Alüminyum Oksit 'in karışımı                                       |
| Oxy  | Koordinat sistemi   |
| Ox, Oy, Oz                                     | Sırasıyla, uzunluk, çevresel ve kalınlık doğrultusunda koordinat eksenleri  |
| P  | FD malzeme özellikleri  |
| $P_s, P_m$                                     | FD malzemenin seramik ve metal yüzeylerinin ısıya bağlı malzeme özellikleri |
| $P_{-1}; P_0; P_1; P_2; P_3$                   | Sıcaklık fonksiyonları (birimi Kelvin)                                      |
| $Q_{ij}^{(k)}$ , ( $i, j = 1, 2, 6$ )          | FDM ve metal malzeme özelliklerine bağlı nicelikleri içeren katsayılar      |
| R  | Silindirik kabuğun yarıçapı   |
| Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>                 | Silikon Nitrat  |
| SUS304   | Paslanmaz Çelik   |
| SUS304/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (FDA)    | Paslanmaz Çelik ve Silikon Nitrat'ın karışımı                               |
| SUS304/ ZrO <sub>2</sub> (FDC)                 | Paslanmaz Çelik ve ve Zirkonyum'un karışımı                                 |
| T(K)   | Sıcaklık (Kelvin)   |
| $T_x, T_y, T_{xy}$                             | Kuvvet bileşenleri  |
| Ti-6Al-4V                                      | Titanyum Alaşımı  |
| Ti-6Al-4V/ZrO <sub>2</sub> (FDB)               | Titanyum Alaşımı ve Zirkonyum'un karışımı                                   |
| Ti-6Al-4V/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (FDD) | Titanyum Alaşımı ve Silikon Nitrat'ın karışımı                              |
| $V_s, V_m$                                     | Sırasıyla, FD malzemenin seramik ve metal hacim bileşenleri                 |
| $V_c^{ic}, V_c^{dis}$                          | Sırasıyla, iç ve dış yüzeydeki FD kaplamanın seramik hacim kesirleri        |
| $V_m^{ic}, V_m^{dis}$                          | Sırasıyla, iç ve dış yüzeydeki FD kaplamanın metal hacim kesirleri          |
| w  | Yer değiştirme ( $w \ll h$ )  |
| x/L  | Boyutsuz uzunluk koordinatı   |
| $Z = z / h$                                    | Boyutsuz kalınlık koordinatı  |
| $z_1 = h_1 / h$                                | Boyutsuz koordinatlar   |
| $z_2 = h_2 / h$                                |   |
| $z_3 = h_3 / h$                                |   |
| $z_4 = h_4 / h$                                |   |
| ZrO <sub>2</sub>                               | Zirkonyum oksit   |

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| $\varepsilon_x, \varepsilon_y$    | Kaplamalı metal silindirik kabuğun referans yüzeyinden z uzaklığındaki yüzeydeki Ox ve Oy doğrultularındaki normal deformasyon bileşenleri |
| $\varepsilon_{xy}$                | Kaplamalı metal silindirik kabuğun referans yüzeyinden z uzaklığındaki yüzeydeki kayma deformasyonu  |
| $\Lambda_i (i = 1,2,3,4)$         | Kabuk ve malzeme özelliklerine bağlı parametre   |
| $\Lambda_5$                       | FD kaplamalı kabuğun yarıçapı ve yoğunluğuna bağlı parametre   |
| $\rho_t$                          | Yoğunluk parametresi   |
| $\sigma_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}$  | İçten ve dıştan kaplamalı metal silindirik kabuğun tabakalarındaki sırasıyla, Ox ve Oy doğrultularındaki normal gerilmeler                 |
| $\sigma_{xy}^{(k)} (k=1,2,3)$     | İçten ve dıştan kaplamalı metal silindirik kabuğun tabakalarındaki kayma gerilmeleri   |
| $\Phi = \Phi_1 h$                 | Airy gerilme fonksiyonu  |
| $\omega(1/sn)$                    | FD kaplamalı metal silindirik kabuğun titreşim frekansı  |
| $\omega_1$                        | FD kaplamalı metal silindirik kabuğun boyutsuz titreşim frekansı   |
| $\omega_m^{\text{tektab}} (1/sn)$ | Tek tabakalı silindirik kabuğun titreşim frekansı  |
| $\omega_{1m}^{\text{tektab}}$     | FD kaplamalı metal silindirik kabuğun boyutsuz titreşim frekansı   |
| $\Omega$                          | Pür metal silindirik kabuğun boyutsuz frekans parametresi  |

## 1. GİRİŞ

Günümüzde yapı elemanlarının kullanım ömrü ve performansının artırılması için değişik kaplama türleri kullanılmaktadır. Seramik, ısı bariyer kaplamaları türbinlerde verimi artırmak ve yakıt ekonomisi sağlamak amacı ile kullanılır. Daha uzun kullanım süresi ve yüksek bir kesme performansı elde etmek için kesici kalemler aşınmaya dayanıklı seramik filmler ile kaplanır (Petit ve Goward, 1983; Komanduri ve Jahanmir, 1994). Genelde bu tür kaplamalar yapı elemanının üzerine tek katmanlı homojen kaplama olarak uygulanır. Düşük toklukları ve ısı genleşme katsayılarındaki uyumsuzluklar sebebiyle bu tür kaplamalar çatlamaya maruz kalmaktadır. Bu nedenle tasarım sırasında, temas yüzeyleri arasında meydana çıkan gerilme dağılımlarının düzenlenmesi önemlidir. Diğer taraftan malzeme biliminin ilerlemesiyle birlikte malzeme özelliklerinin malzeme içerisinde konuma bağlı olarak değiştirilebildiği çeşitli üretim yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler kullanılarak üretilen malzemeler fonksiyonel değişimli malzeme (FDM) olarak isimlendirilmekte olup genelde aşınmaya karşı direnç ve yüksek sıcaklıklara dayanabilme özelliği sağladıkları için nükleer reaktörlerinde, füzelerde, uzay araçlarında, savunma ve otomotiv sanayide, motorlarda, değişik makine elemanlarında, örneğin rulmanlarda, dişlilerde, kesici uçlarda vs kaplamalar olarak kullanılmaktadırlar (Suresh ve Mortensen, 1998; Suresh vd., 1999; Suresh, 2001). FDM' den oluşan bir kaplamaya önceden belirlenmiş bir malzeme görüntüsü verilebilmekte ve malzeme özellikleri, kaplamanın kalınlığı doğrultusunda sürekli değiştirilebilmektedir (Yamanouchi, vd., 1990; Holt vd., 1992). Dolayısıyla, FDM kaplamayı oluşturan malzemenin özellikleri kalınlık koordinatının bir fonksiyonu olup; kaplamanın altındaki veya üstündeki tabakanın malzeme özelliklerine eşit olmakla beraber kaplamanın üstüne veya altına doğru fonksiyonel olarak değişebilmektedir. FDM kaplamalarda iki önemli özellik dikkat çekmektedir. Birinci özellik; ana malzeme yüzeyinde karışım oranı %0 olan kaplama malzemesi, FDM kalınlığı boyunca kademeli olarak artmakta ve kaplama yüzeyinde %100 olduğundan, kaplamayla kaplanan eleman arasındaki bağlanma koşulu, malzeme uyumluluğu sebebiyle daha iyi olmaktadır. İkinci özellik; malzeme özellikleri dağılımları düzgün olduğundan FDM kaplı ara katmanda gerilme yığılmaları homojen kaplamalara göre daha düşük olmaktadır. Böylece, FDM kaplama kullanılarak yapı elemanının alt veya üst tabakası ile kaplama arasındaki uyumsuzluklar engellenebilir. İlk olarak mekanikçiler FDM'den oluşan kaplamaların

kırılma davranışlarını incelemişlerdir (Öztürk ve Erdoğan, 1995; Lee ve Erdoğan, 1998; Yıldırım ve Erdoğan, 2004; Yıldırım, 2004; Konez vd., 2005)

Son yıllarda, FDM'lerin değişik yönlerini inceleyen birçok yayın yapılmıştır (Freund, 1993; Jin ve Batra, 1996; Miyamoto, 1996; Reddy ve Chin, 1998). FDM'lerden oluşan yapı elemanları üzerine yapılmış çok sayıda çalışmalar içinde, en ilgi çekici konulardan biri de pür FDM silindirik kabukların titreşim analizleridir (Loy vd., 1999; Pradhan vd., 2000; Patel vd., 2005; Najafizadeh ve Isvandzibaei, 2007; Matsunaga, 2009; Tornabene, 2009; Shah vd., 2010; Sofiyev ve Schnack, 2012)

Günümüz teknolojisinde, FDM tabakaların kaplama veya çekirdek olarak sık şekilde kullanılması, FDM tabaka içeren katmanlı kabukların titreşim davranışlarının incelenmesi ile ilgili bazı önemli çalışmaların ortaya çıkmasına vesile olmuştur (Liew, 2006; Sofiyev vd., 2006; Sofiyev 2007; Li vd., 2010, Sofiyev vd., 2011).

Yapılan kapsamlı literatür taraması FD kaplamalı metal silindirik kabuğun titreşim probleminin henüz yeteri kadar çalışılmadığını ortaya koymuştur. Tez çalışmasında söz konusu problemin çözümü detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

## **1.1. Tezin Önemi**

Fonksiyonel değişimli malzeme (FDM) kavramı, ilk olarak 1984 yılında Japon bilim insanları tarafından önerilmiş yeni nesil bir mühendislik malzemesidir (Fukui, 1991; Koizumi, 1993 ve 1997). FDM'ler temel amaç olarak, uzay araçlarının itki sistemleri ve gövdelerinde oluşan termal gerilmeleri azaltmak ve ısıdan korunmayı arttırmak için süper rezistans malzemesi olarak geliştirilmiştir. Japon bilim insanları bu yeni malzemenin üretimi için bir kademeli görüntü içine seramik ve metal tozlarını karıştırmışlardır. Seramik, yüksek sıcaklık ortamında şiddetli termal yüklemelere direnç gösterebilir; metal ise soğutma öncesindeki aşamada seramik yüzey üzerinde meydana gelen büyük çekme gerilimini azaltabilir. Ayrıca, yeni imalat yöntemlerinden dolayı, bu yeni malzemeler, mikroskobik olarak homojen olmamasına rağmen, makroskobik olarak homojendirler. FDM'lerin kompozisyonu ve yapısının hacim üzerinde sürekli ve kademeli olarak değişmesi sonucunda malzeme özelliklerinde sürekli ve kademeli değişimler meydana gelir. Bu avantaj,

kompozit malzemelerin ara yüzey sorunlarını ortadan kaldırır ve böylece gerilme dağılımı düzgün hale gelir. FDM'ler ileri kompozitler olup malzeme özelliklerinde düzgün uzaysal değişimle, mikroskobik olarak genel performansı arttırmak amacıyla tasarlanmışlardır. Bu da kompozit malzemenin, bileşen malzemelerinde, ilgili hacim kesirlerinde ve mikro yapısında derecelenmiş uzaysal değişime sahip olarak üretilmesiyle gerçekleştirilebilir. Böylece, fonksiyonel performans gereksinimleri temel alınarak malzeme kompozisyonu uygun hale getirilir. FDM'ler işletme koşullarının zor olduğu yerlerde, örneğin nükleer, kimyasal ve savunma endüstrisinde ısı değişim tüpleri, füzyon reaktörleri, basınç kapları ve genel aşınmaya ve korozyona dayanıklı kaplamalar veya farklı iki malzemenin birleştirilmesi gibi uygulamalarda büyük kolaylıklar sağlamaktadırlar.

FDM yapılar arasında, plak ve kabuklar geniş uygulama alanlarına sahip olmalarından dolayı araştırmacılar için hep ilgi çekicidir. FDM plak ve kabuklar uzay araçları, roketler, nükleer reaktörleri, değişik makineler, endüstriyel alanlar ve tribolojide kullanıldığı için onların titreşim analizlerinin yapılması büyük önem arz etmektedir. İlk olarak Loy vd. (1999) çalışmasında fonksiyonel değişimli malzemelerden oluşan silindirik kabukların titreşim analizi ele alınmıştır. Bu çalışmanın ardından FDM silindirik kabukların dinamik davranışları ile ilgili bazı kayda değer çalışmalar ortaya konulmuştur (Pradhan vd., 2000; Sofiyev, 2003; Yang ve Shen, 2003; Kadoli ve Ganesan, 2006; Haddadpour vd., 2007; Matsunaga, 2008; Vel, 2010; Malekzadeh vd., 2012).

Son yıllarda iç ve dış yüzeyleri FDM'lerle kaplanmış silindirik kabuklar, çeşitli mühendislik uygulamalarında örneğin uçak, nükleer, inşaat ve ulaştırma gibi güçlü, rijit ve hafif yapılara gereksinim duyulan yerlerde kullanılmaktadır. FDM'ler kaplama veya çekirdek olarak kullanıldıklarında, malzeme özelliği uyumsuzluğu nedeniyle oluşan mekanik ve termal tesirli gerilmeleri azaltmaya ve yapışma gücünü artırmaya yardımcı olabilirler. Yüzey kaplaması ve çekirdek arasındaki rijitlik özelliklerindeki uyumsuzluktan dolayı kaplamalı silindirik kabukların işlevinde zaman-zaman sorunlar ortaya çıkmaktadır (Abrate, 1998). Bu sorunları ortadan kaldırmak için, kaplamalı silindirik kabukların tasarımında kaplama malzemesi olarak FDM'ler kullanılmaktadır. Günümüzde, araştırmacılar çeşitli malzeme sistemlerine kompozisyonel değişimin tanıtılması için ileri üretim tekniklerini

geliştirmektedirler (Lambros, 1999; Pitakthapanaphong ve Busso, 2002; Gupta, 2007). Üretim tekniklerindeki bu gelişmeler, FDM kaplamalı yapıların büyük bir potansiyele sahip olması fikrini desteklemektedir. Henüz sistematik bir şekilde gerçekleşiyor olmasa da, FDM'ler içeren üç tabakalı silindirik kabukların mekanik özellikleri ve titreşim davranışları çeşitli yönleriyle teorik olarak incelenmiştir (Sofiyev, 2007; Li vd., 2010). FDM yüz kaplamalı yapı elemanlarının titreşim problemleri ile ilgili yayın sayısı az olup genellikle plaklarla ilgilidir ve son birkaç yıl içinde ortaya çıkmıştır (Pan ve Han, 2005; Zenkour ve Alghamdi, 2010; Wang ve Shen, 2011, Sofiyev vd., 2011; Zerin vd., 2012).

İç ve dış yüzeyleri FDM ile kaplanmış olan metal silindirik kabukların günümüz teknolojisinde yeri ve önemi göz önüne alınarak, bu tür silindirik kabukların serbest titreşim davranışını incelemek, doğru ve güvenilir analizler geliştirmek önemli bir ihtiyaçtır.

## **1.2. Tezin Amacı**

Tez çalışmasında, iç ve dış yüzeyleri fonksiyonel değişimli malzemelerle kaplanmış metal silindirik kabukların serbest titreşim problemi incelenmektedir. İlk aşamada, fonksiyonel değişimli malzemelerden oluşan ve kaplama için kullanılan tabakaların ve metal malzemeden oluşturulan çekirdeğin ayrı-ayrı ve üçlü sistem olarak analitik modelleri oluşturulacak ve bu modellerin görsel sunumu yapılmaktadır. İkinci aşamada iç ve dış yüzeyleri fonksiyonel değişimli malzemelerle kaplanmış metal silindirik kabukların temel bağıntıları, hareket ve deformasyon uygunluk denklemleri türetilmektedir. Temel denklemler çözülerek iç ve dış yüzeyleri fonksiyonel değişimli malzemelerle kaplanmış metal silindirik kabukların serbest titreşiminin boyutsuz frekans parametresi için analitik ifade bulunmaktadır. Özel durumda, elde edilen ifadeden pür fonksiyonel değişimli malzeme ve zenginleştirilmiş metalden oluşan silindirik kabukların serbest titreşiminin boyutsuz frekans parametreleri için ifadeler elde edilmektedir. Son olarak elde edilen ifadeler kullanılarak beş çeşit FDM kaplama ve üç çeşit zenginleştirilmiş metalden oluşan kaplamalı silindirik kabuklar için sayısal hesap ve analizler yapılarak, serbest titreşiminin boyutsuz frekans parametresinin minimum değerlerine, hacim bileşenleri değişiminin, kabuk

karakteristiklerinin, iç ve dış tabakaların kalınlıkları değişiminin etkileri incelenmektedir. Elde edilen sonuçlar açık literatürde bulunan sonuçlarla karşılaştırılarak doğruluğu teyit edilmektedir.

### **1.3. Genel Bilgiler**

#### **1.3.1. FDM'lerin Üretim Yöntemleri, Avantajları Ve Uygulama Alanları**

Gelişen teknoloji ile özel karakterlere sahip malzeme gereksinimi çok büyük bir hızla artmaktadır ve bu hızla orantılı olarak metal alaşımlar gereksinimi karşılayamaz hale gelmiştir. Özellikle uzay taşıtlarındaki gereksinim olan, yüksek mukavemet ve ısı direnç özelliğini sağlayan homojen bir malzemenin bulunmayışı araştırmacıları yeni arayışlara yönlendirmiştir. Bu arayışlar sonucunda birçok özelliği bir arada bulduran ideal malzeme kombinasyonları, metal ve seramikler önem kazanmıştır. Bu malzeme çiftinden metal; tokluğa, elektrik geçirgenliğine, işlenebilirliğe, seramik ise; düşük yoğunluğa, yüksek mukavemete ve ısı dirence sahiptir. Bu özellikleri bünyesinde taşıyan malzeme ise fonksiyonel değişimli malzemelerdir. İyi ısı iletkenlik ve iyi ısı direnç gibi iki zıt özelliğin bir malzemede bulunabilmesi amacıyla FDM'ler geliştirilmiştir. Bu özellikler sayesinde hafiflik, güçlülük ve sağlamlık mümkün olmaktadır. Günümüzde FDM'ler makine, uçak mühendisliği, savunma sanayisi ve diğer endüstriyel alanlarda daha geniş kullanım alanı görmekte ve her geçen gün bu ilgi daha da artmaktadır (Markworth vd., 1995; Koizumi, 1997; Suresh ve Mortensen, 1998).

FDM yapısal malzeme ve enerji değişim malzemesi olarak özellikle uzay araçlarında kullanılan roket yapımında ve motorların dış duvarlarında uygulanmaktadır. FDM'nin endüstriyel malzemelerdeki uygulamalarının geliştirilmesi, araştırmaların ana hedeflerinden biri olmuştur. Örnek olarak derecelendirilmiş kesici kalemlerin geliştirilmesinin nedeni mukavemet ve ısı direnç bakımından daha iyi malzemelere ihtiyaç duyulmasıdır. Bu alanda umulan aşınma direnci ve sertlik elde edilmiştir. Kendi kendini yağlama fonksiyonu ve yüksek ısı dirençlerin kesici kalemlerde elde edilmesinin yanında, bazı derecelendirilmiş kalemler sayesinde yağ kullanılmadan uygulanan kuru kesimler de gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklık

uygulamalarının yanında FDM 'lerin triboloji alanında da kullanımları mevcuttur. Sürtünme veya normal gerilmelerden kaynaklanan yüzey çatlamasını geciktirmek için kullanılan FDM seramikler bu alandaki kullanıma örnek olarak verilebilir. Hafif olduğu için ve alerjik özellik göstermediği için titanyum saatlerde kullanılmaktadır. Biyomalzeme olarak; biyolojik bütünlüğü olmasından dolayı ve zararsız olduğu için suni kemik, eklem ve diş yapımında FDM uygulanabilir. Tıraş makinelerinde kullanılan bıçakların alt tabakası yüksek mukavemet ve tokluk için paslanmaz malzemeden, üst tabaka yüksek sertlik için intermetalik malzemeden imal edildikten sonra keskin ve derin tıraş sonucu ortaya çıkmıştır. Görsel iletişimin, sesli iletişimin düzeyine erişebilmesi için daha fazla geliştirilmeye ihtiyacı vardır. FDM'lerin plastik optik fiberlerdeki uygulaması sonucunda zararlı olan çok hızlı iletim önlenmektedir. FDM'ler dünyadaki görsel iletişimini çok daha kaliteli hale getirebilecek yapıya sahiptir. Güç İletim ve Dağıtım Sistemlerinde, FDM teknolojisi devir frenleyici, bağlantı kesici ve yıldırım durdurucu içeren kompleks bir anahtar olan Gaz Yalıtım Anahtarı (GIS-Gas Insulated Switchgear) olarak kullanılmaktadır (Obata ve Noda, 1994; Miyamoto, 1996; Mumm ve Evans, 2000).

FDM üretimi kuru ve yaş yöntemler olmak üzere iki ana grupta toplanır. Bu iki ana gruba giren yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Fukui, 1991; Kwon ve Crimp, 1997; Lambros vd., 1999; Miyamoto vd., 1999; Kieback vd., 2003; Konez vd., 2005):

1. Kuru Yöntem: Toz Metalürjisi, Plazma Spreyiyle Kaplama, SHS (Self-Propagating High-Temperature Synthesis), CVD Fırını ile Kaplama, Pervane Kuru Karıştırma (IDB)
2. Yaş Yöntem: Endüksiyonla Yığıma, Slip Döküm, Santrifüj Döküm.

### 1.3.2. FDM Kaplamalı Kabukların Uygulamaları Ve Avantajları

Genel olarak kaplamaların sayısı, uygulamaları ve amaçları öylesine çoktur ki davranışları hakkında genelleme yapılması çok zordur. Yaygın olarak kaplamalar ısı yalıtımı ses yalıtımı ve akustik, yangın ve elektromanyetik dalgaların yalıtımı ve tribolojik özelliklerin geliştirilmesi vs için kullanılmaktadır. Kaplamalar mükemmel hafiflik, alevlenmeyi geciktirici darbe dayanımı, korozyon direnci, kolay şekillendirme ve işleme, sürtünme ısısının dağıtılması ve iyi yalıtım özelliklerini bünyesinde toplamaktır. Sert, aşınmaya dirençli yüzeyler, sert yüzey oluşturma olarak bilinen ergitme kaynağı teknikleri daha yumuşak ve sünek malzemeler üzerinde biriktirilebilir (Petit ve Goward , 1983; Bao ve Wang, 1995; Abrate 1998).

Kaplamalı yapı elemanları kompozit endüstrisi tarafından geliştirilmiş kompozit yapıların en işlevsel formlarından biridir. Kaplamalı yapılar havacılık endüstrisi ve diğer birçok sanayi alanlarında geniş bir kabul görmekte ve yaygın olarak uçak ve uzay araçları, gemiler, istihdam ediliyor tekne, yük konteynerleri ve konut inşaatlarında kullanılmaktadır. İçten ve dıştan kaplamalı (sandviç) plak ve kabukların 40 yıl önce havacılık endüstrisinde kullanılmaya başlaması uçak sanayisinde bir devrim niteliğinde olduğu kabul edilmiştir. Uçağın değişik bölümlerinde kullanılan sandviç plak ve kabuklar onu daha hafif, daha emniyetli duruma getirmiş ve uçak hızının artmasını sağlamıştır. Ayrıca, uçağın daha fazla ağırlık taşımasına ve daha verimli yakıt kullanılmasına olanak sağlamıştır. Kaplamalı yapılar katmanlı yapıların özel bir biçimini temsil etmektedir. Bu yapılar genellikle iki ince, sert ve güçlü yüz yapraklardan ve nispeten kalın, hafif ve uyumlu çekirdek malzemenin oluşturulmaktadır. Kaplamalı yapıların yüzleri, genellikle metalden veya lamine edilmiş kompozit malzemelerden, çekirdek ise düşük mukavemetli petek tipi malzemenin veya polimerik köpükten oluşturulmaktadır. Ayrıca, yüzler ve çekirdek yapıştırıcı ile birleştirilmektedir. Yüzey kaplaması ve çekirdek arasındaki rijitlik özelliklerindeki uyumsuzluktan dolayı, kaplamalı kabuk ve paneller, özellikle dinamik yükleme durumlarında yüzey kaplaması/çekirdek bağlanma kaybına karşı hassas olmaktadır. Bu tip yetersizliklere karşı kaplamalı kabuk ve panellerin dayanıklılığını arttırmak için onların tasarımında son yıllarda fonksiyonel değişimli malzemeler kullanılmaktadır. FDM'ler işletme koşullarının zor olduğu yerlerde, örneğin nükleer, kimyasal ve savunma endüstrisinde ısı değişim tüpleri, füzyon

reaktörleri, basınç kapları ve genel aşınmaya ve korozyona dayanıklı kaplamalar veya farklı iki malzemenin birleştirilmesi gibi uygulamalarda büyük kolaylıklar sunmaktadır. (Lee ve Erdoğan, 1998; Yildirim ve Erdoğan, 2004; Szymczyk, 2005; Zenkour ve Alghamdi, 2010; Shu, 2011; Wang ve Shen, 2011; Baluragi vd., 2012; Kiani vd., 2012):

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

### 2.1. FDM' lerin Üretimi, Özellikleri, Uygulamaları Ve Gerilme Analizleri İle İlgili Makale Özetleri

Bu alt başlıkta FDM' lerin üretimi, özellikleri, uygulamaları ve gerilme analizleri ile ilgili makale özetleri sunulmaktadır.

Fukui (1991) çalışmasında seramik/metal fonksiyonel değişimli malzemenin (FDM) merkezkaç döküm tekniği yöntemiyle üretilme sistemi incelenmesidir. Merkezkaç kuvveti metal içersindeki seramik tozun derecelenmiş dağılım oluşturmasına imkân sağlamaktadır. Plaster ve korindondan meydana gelen karışım deneysel bir model olarak seçilmiştir. Üç farklı ağırlıklı ve dört farklı hacim kesirli kombine koşullar altında karıştırılan malzemeler halkalara dökülmüştür. Kübik mertebeli polinom denklemler kullanılarak, korindon profili ölçülmüştür. Merkezkaç kuvvetinin ve tozun hacim kesrinin dağılım üzerindeki etkisini dikkate almak için, ifadeye dayanan matematiksel bir model önerilmiştir. Model, gözlenen dağılım alanlarını birleşmiş biçimde ifade edebilir. Modeli kullanan üretim sisteminin, tozun dizayn edilen dağılımını sağlayıp sağlamadığı tartışılmıştır.

Fonksiyonel değişimli malzeme (FDM) kavramı ilk olarak, termal bariyer malzemelerinin hazırlanması için bir araç olarak, 1984 yılında Japonya Sendai bölgesindeki malzeme bilimciler tarafından sunulmuştur. Bu malzemelerin, kompozisyon, mikro yapı, porozite gibi özelliklerindeki sürekli değişimler sonucunda mekanik, mukavemet ve termal iletkenlik gibi özelliklerde değişimler ortaya çıkar. 1987' de başlayan "Termal Gerilmenin Relaksasyonu için Fonksiyonel Değişimli Malzemelerin Gelişimindeki Temel Teknolojiler Üzerine Araştırma" başlıklı ulusal proje çerçevesinde SiC-C FDM burun koniler için 300 mm kare kabuk ve 50 mm çaplı yarım küresel çanak örnekleri hazırlanmış ve proje 1992 yılında tamamlanmıştır (Koizumi, 1993).

Bu çalışmada dikkate alınan fiziksel sistem ince gerilmiş-tabakalı yapıdır. Keyfi kompozisyonel değişime ve epitaksiyal uyumsuz deformasyon sıcaklığının genel kalınlık dağılımına sahip bu gibi yapılarda gerilme dağılımı ve eğriliğin temel formül

vasıtasıyla belirlenebileceği gösterilmiştir. Örnek olarak, sonuçlar, 1185 tane orta tabakanın, kalınlığı boyunca değişen X'e sahip üçlü epitaksiyal yapı olarak bir GaAs/In<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As/In<sub>0.12</sub>Ga<sub>0.88</sub> içersindeki gerilmeyi hesaplamak için uygulanmıştır (Freund, 1993).

Bu makalede, fonksiyonel değişimli malzemelerden (FDM) oluşan içi boş dairesel bir silindir ve içi boş bir kürenin kararlı termal gerilmeleri dikkate alınmıştır. Bu araştırmanın amacı bileşimin etkisini anlamak ve en uygun FDM içi boş dairesel silindir ve içi boş küreyi tasarlamaktır. İç yarıçap büyüklüğünün gerilmelere ve mevcut sıcaklık bölgelerine olan etkisi tartışılmıştır. Elde edilen sonuçlar FDM plak için elde edilen sonuçlarla da karşılaştırılmıştır (Obata ve Noda, 1994).

Bu makalede, fonksiyonel değişimli malzemelerin (FDM) modellenme çalışmalarının tanımlaması yapılmıştır. İki temel başlık ele alınmıştır: mikro yapıya bağlı termo-fiziksel özellikler için modeller ve FDM'lerin tasarım, üretim ve performansı için modeller. Tek bir malzemenin derecelenmiş yönü boyunca mevcut olabilen mikro yapıların değişik çeşitlerinden dolayı, bu konulardan ilki FDM modellenmesi için çok önemli bir girdidir. Bu makalede tanımlanan çalışma temel alınarak, ek modelleme çalışmalarının yararlı olabileceği ilgili alanlar için de önerilerde bulunulmuştur. Modelleme için önerilen yaklaşımlar, süzme teorisi, kırılma analizi, kafes temelli mikro yapı modelleri, renormalizasyon grubu, yapay sinir ağları ve bulanık mantık gibi etkili teknikleri içermektedir (Markworth vd., 1995).

Bu makalede, genel homojen olmayan malzemedeki çatlak-kenar alanları özetlenmiştir. FDM'lerin kırılma tokluğu ve R-eğriliği çatlak-köprü kavramı ve karışım kuralı temel alınarak incelenmiştir. Alüminyum-Nikel FDM'de seramik bakımından zengin bölgeden metal bakımından zengin bölgeye doğru olduğunda kırılma tokluğunun önemli derecede arttığı gösterilmiştir. FDM'lerin mukavemet davranışlarını incelemek için sertleşme mekanizması kavramı uygulanarak seramik bölgede kenar çatlığa sahip Alüminyum-Nikel FDM'nin artık mukavemetinin çentiğe oldukça duyarsız olduğu bulunmuştur (Jin ve Batra, 1996).

Miyamoto (1996) çalışmasında, Japonya’da fonksiyonel değişimli malzemelerin yapı elamanı olarak kullanımından işlevsel kullanımına kadar olan çok çeşitli uygulamalarına ait örnekler ve incelemeler sunulmuştur.

Bu çalışma, Japonyada hayata geçirilen bir ulusal proje sonuçlarını kapsamaktadır. FDM kavramı sadece ısıya dayanıklı malzemelerin pratik tasarımı için değil aynı zamanda çeşitli fonksiyonel malzemelerin geliştirilmesi için de ilgi çekicidir. 1993 yılında, FDM’lerin fonksiyonel malzemeler olarak araştırılması ve geliştirilmesi için “Fonksiyonel Değişimli Yapıya Sahip Enerji Dönüşüm Malzemeleri Üzerine Araştırma” başlıklı ikinci ulusal proje başlatılmıştır Bu programda, enerji dönüşüm verimliliğinin geliştirilmesine fonksiyonel değişimli yapı teknolojisinin uygulanması amaçlanmıştır. Bu proje 1997 mali yılında tamamlanmıştır (Koizumi, 1997).

Bu çalışmada, fonksiyonel değişimli malzemelerin işlem-uyarımlı gerilmelerinin, başlangıç tozunu ve yığın karakteristiklerini işleyerek minimize edilebileceği önerilmiştir. Ayrıca, FDM tasarım işlemini otomatikleştirmek için biçimsel bir yaklaşım kullanılabilceği gösterilmiştir (Kwon ve Crimp, 1997).

Bu çalışmada, FD silindirlerin ve plakların dinamik termoelastik tepkisi incelenmiştir. Termo-mekanik eşleşme formülasyona dâhil edilerek, formülasyonun bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Termal yüklemeye maruz fonksiyonel değişimli eksenel-simetrik silindirin ısı iletimi ve termo-elastik denklemleri çözülmüştür. Ek olarak, fonksiyonel değişimli bir plak için enine kayma gerilmeleri ve yönlerini dikkate alan, üç boyutlu ısı iletim denklemi ile birleştirilen birinci mertebe kayma deformasyonlu plak teorisi kullanılarak termo-elastik bir sınır değer problemi formüle edilmiştir. Her iki problemde, bir seramik ve bir metalin hacim oranları kuvvet kuralı dağılımı kullanılarak değiştirilmiştir (Reddy ve Chin, 1998).

Bu çalışmada, FDM’lerin tasarım, üretim ve denenmesi tanımlanmıştır. Selektif ultraviyole (UV) ışınlama ile malzeme özellikleri değiştirilerek, homojen olmayan özelliklerinin değişimi sağlanmıştır. UV ışığı altındaki hızlı derecelenmeye sahip olmasından dolayı, FDM üretiminde çoklu (etilen-karbon monoksit) (ECO) kullanılmıştır. Işınlanan ECO sertleşir, güçlenir ve artan ışınlama zamanıyla daha da gevrek hale gelir. Bir dizi çekme testiyle, UV ışınlama süresinin bir fonksiyonu

olarak kullanılan özel ECO'nun mekanik davranışı karakterize edilmiştir. Bununla birlikte, ışınlama süresi kontrol edilerek, sürekli ve süreksiz değişen malzeme özelliklerine sahip numuneler üretilmiştir. Elde edilen değişimli malzemelerin, Young modülleri 160 Mpa'dan 250 MPa'ya değişmektedir ve 150 mm genişlikteki numunede çökme zorlaması %900'den %10 değişmektedir. Süreksiz ve sürekli değişen mekanik özellikler arasındaki farkları belirlemek için mikro sertlik ölçümleri kullanılmıştır (Lambros vd., 1999).

Bu çalışmada, tek başına bir yüzeydeki sürtünmeli kayıcı temas olan dirençte belirgin artışa neden olabilen, kontrollü değişimlerini göstermek için deneysel ve hesaplamalı sonuçlar sunulmuştur. Bu yeni kavramın gösterimi için seçilen model malzeme alüminyum silikat camla süzölmüş polikristal alüminyumdur. Bu sistemde, elastisite modülü temas yüzeyinden yaklaşık 2 mm derinlikte bulunan alt yüzeye kadar sürekli olarak %50 artmıştır, esasen uzun menzilli artık gerilmeler mevcut değildir. Elastisite modülü değişiminin bir sonucu olarak, temas yüzeyinin mukavemeti ve yerel kırılma tokluğu önemli derecede azalmıştır. Ancak elastisite modülündeki derecelenme, sürtünme kayma teması tarafından tanıtilan ana çekme gerilmesini tek başına öyle azaltır ki, cam-süzölmüş alüminyum temas hasarına, yekpare alüminyumdan veya camdan veya temas yüzeyinin kompozisyonuna denk olan düzgün kompozisyonun alüminyum-cam kompozitine kıyasla çok daha dirençli olur. Ayrıca, homojen ve değişimli malzemelerin kayma temas direncine ait çok çeşitli mekanik ve malzeme konuları ele alınmıştır (Suresh vd., 1999).

Bileşiminde uzaysal değişimler olan malzemelerin mekanik davranışları ve yapıları, triboloji, jeoloji, opto-elektronik, biomekanik, kırılma mekaniği ve nanoteknolojisi gibi disiplin dallarında önemli derecede ilgi çekmektedir. Bu gibi değişimlerde, normal ve kayma temasına veya darbeye karşı yüzeylerin bozulma direnci ve hasarı, söz konusu değişim boyunca büyük ölçüde değişebilir. Sunulan çalışmada, mevcut değişimli malzemelerin, temas deformasyonuna ve hasara karşı direnç anlayışı değerlendirilmiş ve değişimli malzemelerin ileriki araştırma talimatları ve muhtemel uygulamaları özetlenmiştir (Suresh, 2001).

Bu çalışmada, üretim teknikleri alanında, Alman Araştırmalar Merkezi desteği ile FDM'lerin avantajları incelenmiştir. Metal eriyikleri içeren belirlenen toz üretimi ve

teknikleri tanımlanmış ve derecelenmiş polimer üretim alanındaki son gelişmeler göz önünde bulundurulmuştur. Mikro yapıda tahmin edilebilen değişime sahip kusursuz kısımların üretimi için derecelenme formülasyonu, sinterleme ve kurutma modellemesinin önemi ve fonksiyonel değişimli malzemelerin üretiminin sayısal simülasyonlarının başarılı bir uygulama örneği sunulmuştur (Kieback vd., 2003).

Yıldırım (2004) çalışmasında, FDM' den yapılmış, kenar çatlağı içeren bir tabakanın ısı şok kırılması sonlu elemanlar metodu ile incelenmiştir. Çelikleri işlemede kullanılan kesme takımları kesme sırasında oluşan yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı nedeni ile  $Si_3N_4$ 'den yapılmaktadır ve  $Si_3N_4$ 'ün çelikle kimyasal reaksiyona girmemesi için  $Al_2O_3$  ile kaplanmaktadır. Bu çalışmada, böyle bir kaplamayı taklit edebilmek amacı ile incelenen tabakada fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme olarak  $Al_2O_3/Si_3N_4$  karışımları ele alınmıştır. Tabakanın alt yüzeyi ve yan yüzeyleri yalıtılmış, kenar çatlağının başlangıç noktası olan üst yüzeyine konveksiyon sınır koşulu uygulanmıştır. Homojen olmayan tabakaya herhangi bir mekanik kısıtlama uygulanmamıştır ve tabakanın düzlem gerinim durumu altında olduğu farz edilmiştir. Tabaka çalışma sıcaklığından oda sıcaklığına soğurken oluşan süreksiz rejimde mod I gerilim şiddet çarpanları farklı çatlak boyları ve malzeme karışımları için hesaplanmıştır.  $Si_3N_4$  miktarı fazla olan fonksiyonel derecelendirilmiş karışımdan yapılan tabakadaki kenar çatlaklarından daha düşük gerilim şiddet çarpanları elde edilmiştir. Gerilim şiddeti çarpanlarının belirli bir zamanda maksimum değere ulaşip sonra düştüğü ve artan çatlak boyu ile azaldığı gözlenmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeleri modellemek için özel bir sonlu elemanlar metodu ve çatlak ucundaki gerilim şiddet çarpanını hesaplamak için zenginleştirilmiş sonlu elemanlar kullanılmıştır.

Sunulan çalışmada, FDM üretim teknikleri ve aralarındaki farklılıklar kısaca incelenmiştir. Uzay araçları ve gelecek nesil füzyon reaktörleri uygulamalarında ısı gerilmeleri azaltmada kullanılmak üzere geliştirilmiş ve bu uygulamalarda anahtar teknoloji görevinde olan FDM kavramını, dereceli yapısal fonksiyonlara sahip metal/seramik kompozisyonlu yeni bir malzeme olarak tanımlanmıştır. FDM in en büyük avantajı, yapı boyunca tokluk ve diğer malzeme özelliklerine ait dereceli fonksiyonlar içerdiği belirtilmiştir. Derecelendirilmiş kompozisyona sahip bu malzemede üretim teknikleri arasındaki farklardan ortaya çıkabilecek malzeme

içyapısındaki değişiklikleri ve bunların sonuçlarını anlayabilmek için üretim tekniklerini, birbirleri arasındaki farklılıkları iyi bilinmesi gerekliliği ortaya konulmuştur. Son olarak yeni teorik çalışma olan Milimetrik dalga huzmesi ile üretim tekniği anlatılmaktadır. Ayrıca FDM in kullanım alanlarına değinilmiştir (Konez vd., 2005).

Köpükle doldurulmuş içi boş parçacıklardan (mikro balon) oluşan fonksiyonel değişimli bir yapı herhangi bir mukavemet kaybı olmaksızın % 60-75 zorlanmada, basınca karşı gelebilmektedir. Yeni fonksiyonel değişimli malzeme, mikro balon duvar kalınlığındaki derecelenmeye dayanmaktadır. Bu malzeme tüm yapı boyunca mikro balonla aynı hacim kesrine sahiptir, buda parçacık hacim kesrinin derecelenmesini içeren incelenen FDM 'de istenmeyen etkileri ortadan kaldırır. Sunulan çalışmada bu malzemenin üç kompozisyonu üretilmiş ve test edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, yeni sintatik köpüğün basınç modülü, mukavemet ve toplam enerji absorpsiyonu, mikro balonların uygun tipleri ve hacimleri kullanılarak kontrol edilebileceği görülmüştür (Gupta, 2007).

## **2.2. Tez Konusu İle İlgili Homojen Silindirik Kabukların Titreşimine Ait Makale Özetleri**

Bu alt başlıkta, tez konusu ile ilgili olan ve karşılaştırma kısmında kullanılan homojen silindirik kabukların titreşimine ait makale özetleri sunulmaktadır.

Weingarten, (1964a) çalışmasında, sonlu silindirik kabukların serbest titreşimi incelenmiştir. Bazı sadeleştirici varsayımlar yardımıyla, sınır koşullarının herhangi bir kombinasyonuna sahip kirişler için bilinen karakteristik fonksiyonlara dayanan frekans denklemi elde edilmiştir. Bir ucu sabitlenmiş diğeri serbest olan silindirin mod şekli ve frekans spektrumunu için elde edilen sonuçlar Rayleigh'in uzamayan teorisi ve yaklaşık frekans denklemleri ile uyum içersindedir. Test silindirleri için elde edilen yapısal sönümlenme katsayıları daha önceden yapılan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Sunulan çalışmada, çok tabakalı silindirik kabukların nefes-modu titreşimleri araştırılmıştır. Her bir tabakası aynı Poisson oranına sahip izotropik çok tabakalı kabukların eşdeğer silindir parametrelerini belirlemek için basit bir formül geliştirilmiştir. Bu eşdeğer silindir parametreleri, monokok silindirler için mevcut frekans denklemleri ile bir arada kullanılabilmesi belirtilmiştir (Weingarten, 1964b).

Soedel (1980) çalışmasında, enine çökmelerin hakim olduğu modlarda dairesel silindirik kabukların doğal frekansları için yeni bir formül sunulmuştur. Bu formül, benzer kiriş probleminin köklerinin elde edilebildiği tüm sınır koşulları için geçerlidir. Değişik sınır koşulları için elde edilen deneysel verilerle iyi bir uyum elde edilmiştir.

Koga (1988) çalışmasında, doğal frekans için basit bir formül, dairesel silindirik kabuğun nefes tipi serbest titreşiminin öz değer problemleri için asimptotik çözüm olarak türetilmiştir. Bu formülün, basit mesnetli, ankastre ve serbest kenarlı sınır koşullarının herhangi bir olası kombinasyonu altında uygulaması mümkündür. Formülde içerilen karakteristik değer, serbest titreşim karakteristikleri bir ucun serbest veya mesnetli olmasına ve mesnetli ucun aksel doğrultuda serbestçe hareket etmesine izin verilmesi veya verilmemesi koşullarına bağlı olduğunu gösteren  $SR(w = u = 0)$ ,  $SF(w = N = 0)$  ve  $FR(N = S = 0)$  üç sınır koşulunun kombinasyonuna bağlıdır. Formülün doğruluğu, sayısal çözümler ve deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapılarak kontrol edilmiştir.

El-Mously (2003) çalışmasında, ince silindirik kabuğun temel doğal frekansını hesaplamak için üç yaklaşık kesin formülün göreceli bir incelemesi ve onun ortak temel dalga sayıları sunulmuştur. Her bir formülün geçerlilik sınırlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada dikkate alınan üç yaklaşık formül şunlara dayanmaktadır : (a) Donnell–Mushtari–Vlasov denklemlerinin Weingarten–Soedel yaklaşımı (b) Winkler zemin modeli üzerinde bulunan Calladine–Koga geliştirilmiş klasik kiriş (c) Pasternak üzerinde bulunan kabuk benzeri Timoshenko kirişi. Sonuçlar, Flügge hareket denklemlerinin analitik çözümleri ile karşılaştırılmıştır ve ticari bir sonlu eleman paketi kullanılarak sonuçlar elde edilmiştir. 1,2,5,10 ve 20 uzunluk-yarıçap oranlarına ve 20,50,100,200 ve 500 yarıçap-kalınlık oranlarına ait sonuçlar çizelgelerde sunulmuştur.

### **2.3. Pür FDM Veya FDM Tabaka İçeren Kabukların Titreşim Ve Stabilitesi İle İlgili Makale Özetleri**

Bu alt başlıkta, pür FDM veya FDM tabaka içeren kabukların titreşim ve stabilitesi ile ilgili önemli makalelerin özetleri sunulmaktadır.

Bu makalede, paslanmaz çelik ve nikelin birleşiminden oluşan FDM silindirik kabukların titreşimi incelenmiştir. Sunulan çalışmada, hacim kesir bileşeni ve malzeme bileşenlerinin konfigürasyonlarının frekans değerlerine etkileri incelenmiştir. Malzeme özellikleri, hacim kesri kuvvet kuralı dağılımına göre kalınlık doğrultusunda derecelenmektedir. Frekans karakteristikleri, homojen izotropik silindirik kabuklarınkine benzer olduğu ve frekansların, bileşen hacim kesirlerinden ve malzemelerin bileşen konfigürasyonlarından etkilendiği elde edilen sonuçlarda görülmüştür. Sayısal analizler Love kabuk teorisinin gerilme yer değiştirmesi bağıntılarından faydalanılarak yapılmış ve temel denklemler Rayleigh-Ritz yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Sunulan analiz, literatürde bulunan çalışmalarla karşılaştırılarak teyit edilmiştir (Loy vd., 1999).

Sunulan çalışmada, paslanmaz çelik ve zirkonyum oksitten oluşan FD silindirik kabuğun titreşimi incelenmiştir. Malzeme özellikleri, kuvvet kuralı dağılımlı hacim kesirlerine göre kalınlık doğrultusunda derecelenmektedir. Sınır koşullarının ve hacim kesirlerinin, FD silindirik kabuğun doğal frekans değerlerine etkileri incelenmiştir. FD kabuğun frekans karakteristikleri izotropik silindirik kabuklarınkine benzer bulunmuştur. Dahası, kabuğun frekans değerlerinin, bileşen hacim kesirlerine ve sınır koşullarına bağlı olduğu gözlenmiştir. Love kabuk teorisine ait deformasyon yer değiştirme bağıntıları kullanılmıştır. Temel denklemlerin türetilmesinde Rayleigh yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca, literatürdeki sonuçlarla karşılaştırma yapılarak sonuçlar teyit edilmiştir (Pradhan vd., 2000).

Bu çalışmada, termal yüklemeye maruz, fonksiyonel değişimli tabaka içeren üç tabakalı sistemin davranışı incelenmektedir. Metal ve seramik tabakalardan oluşan ve FDM tabaka içeren üç tabakalı sistemin termo-elastik ve termo-elastoplastik

davranışını tanımlamak için analitik ve yarı-analitik çözümler elde edilmiştir. Keyfi sıcaklığa maruz genel FDM sistemde gerilme dağılımlarının çözümleri sunulmuştur. Tutarlı yaklaşım kullanılarak, yerel elasto-plastik FDM davranışının bireysel fazlarının özellikleri bakımından homojenleştirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, FDM metal faz için kuvvet kuralı sertleşme davranışı varsayılmıştır. FDM sistemlerindeki gerilme dağılımları, sonlu eleman analizinden elde edilen kesin sayısal çözümlerle karşılaştırılmış ve iyi uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Üç tabakalı sistemlerin plastik deformasyonun başlaması için gerekli olan kritik sıcaklık süreksizlikleri için de çözümler sunulmuştur (Pitakthapanaphong ve Busso, 2002).

Sofiyev (2003) çalışmasında, zamanın kuvvet fonksiyonu olarak değişen dış basınç yüküne maruz seramik ve metalden oluşan fonksiyonel değişimli malzemeden yapılmış silindirik ince kabuğun burkulması için bir formülasyon sunulmuştur. Malzeme özellikleri kalınlık boyunca hacim kesri kuvvet kuralı dağılımına göre değişmektedir. Love kabuk teorisi kullanılarak değiştirilmiş Donnell tip dinamik stabilite ve uygunluk denklemleri elde edilmiştir. Farklı başlangıç koşulları için bu denklemlere Galerkin yöntemi ve ardından Ritz tip varyasyonel yöntem uygulanarak ve yükleme parametrelerinin büyük değerlerini dikkate alarak, kritik parametre değerleri için analitik çözümler elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan, kritik parametrelerin, bileşen malzemelerden, yükleme parametrelerinin varyasyonlarından ve dış basınç ifadesinin değişiminde zamanın kuvvetinden etkilenmediği görülmüştür.

Bu makalede, termal ortamda bulunan statik ve periyodik kombine eksenel yüklere maruz fonksiyonel değişimli silindirik panellerin serbest titreşimi ve dinamik kararsızlığı incelenmiştir. Teorik formülasyonlar, panel kalınlığı boyunca enine kayma deformasyonlarının parabolik dağılımı ve dönme ataleti için sonuçlar sunmak için Reddy yüksek mertebeli kayma deformasyonlu kabuk teorisine dayanmaktadır. Kararlı sıcaklık değişiminden kaynaklanan termal etkiler analize dâhil edilmiştir. Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu ve kalınlık yönünde bileşenlerin hacim kesirleri açısından kuvvet kuralı dağılımıyla derecelendiği varsayılmıştır. Dikkate alınan panel iki düz kenarından ankastre ve basit mesnetlidir ve eğik kenarlarından serbest, basit mesnetli veya ankastre mesnetli olabilir. Panelin kararsız bölgelerini ve doğal frekansları belirlemek için bir boyutlu diferansiyel kareler yönteminin

avantajlarını içeren bir yarı analitik yaklaşım, Galerkin yöntemi ve Bolotin yöntemi kullanılmıştır. Silikon nitrit/paslanmaz çelik silindirik paneller için sayısal sonuçlar hem boyutsuz çizelgeler ve hem de grafikler şeklinde sunulmuştur. Malzeme kompozisyonunun, sıcaklık artışının, panel geometri parametrelerinin ve sınır koşullarının serbest titreşim ve parametrik rezonansa etkileri de incelenmiştir (Yang ve Shen, 2003).

Bu makalede, fonksiyonel değişimli, anizotrop ve manyeto-elektro-elastik malzemelerden oluşan çok tabakalı plağın tam çözümü sunulmuştur. Plağın kenarları basit mesnetli sınır koşulları altında olduğundan, genel mekanik, elektrik ve manyetik sınır koşulları plağın alt ve üst yüzeylerinin her ikisine de uygulanabilmektedir. Fonksiyonel değişimli malzemenin kalınlık yönünde üstel olduğu varsayılmıştır ve her bir tabakadaki homojen çözüm sözde Stroh biçimciliğine dayanarak elde edilmiştir. Çok tabakalı plak yapı için, yayıcı matriks yöntemi kullanılmıştır bu sayede sadece  $5 \times 5$ 'lik doğrusal cebirsel denklemler sisteminin çözülmesi yeterlidir. Bundan sonra, üst yüzeyine mekanik ve elektrik yükler etkileyen  $BaTiO_3$  piezo-elektrik ve  $CoFe_2O_4$  manyetostriktiften oluşan fonksiyonel değişimli (üstel) iki sandviç plağa kesin çözüm uygulanmıştır. Sayısal sonuçlar, üstel faktörün, elektro-elastik özellikleri ve yükleme tiplerinin uyarılmış manyeto-elektrik elastik alanlara etkilerini gösterirken, ayrıca, sonlu ve sınır eleman yöntemleri gibi sayısal yöntemlere ölçüt olarak da hizmet verebilir (Pan ve Han, 2005).

Bu çalışmada, hem düzlemsel hem de enine yer değiştirmelerin kalınlık yaklaşımları vasıtasıyla yüksek mertebeden teoriye dayanan sonlu eleman formülasyonu kullanılarak fonksiyonel değişimli eliptik silindirik kabukların serbest titreşim frekansları analiz edilmiştir. Kuvvet kuralı değişim özelliklerinin kalınlık doğrultusunda olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmada kullanılan sonlu eleman, alan-tutarlılık yaklaşımına dayanmaktadır ve kayma ve membran kilitleme problemlerinden arınmıştır. Kalınlık koordinatı-yarıçap oranı şartlarında hiçbir yaklaşım yapılmadan, formülasyona deformasyon-yer değiştirme bağıntıları tam olarak tanıtılmıştır. Dairesel olmamanın, yarıçap-kalınlık oranının, malzeme kompozisyonunun ve malzeme görüntü indeksinin fonksiyonel değişimli eliptik kabukların serbest titreşim ve mod şekli karakteristiklerine olan etkilerini incelemek

için detaylı parametrik çalışmalar sunulmuştur. Kalınlık esneme/kontraksiyon koşullarının önemi yapılan mod şekli çalışması ile vurgulanmıştır (Patel vd., 2005).

Sunulan çalışmada, sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerini temel alan ankastre-ankastre sınır koşullarına sahip fonksiyonel değişimli silindirik kabuklar için doğrusal termal burkulma ve serbest titreşim analizleri sunulmuştur. FGM kabukların malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca düzgün ve sürekli değiştiği varsayılmıştır. FGM kabuğun iç yüzeyinde belirlenmiş yüksek sıcaklık ve dış yüzeyin çevre sıcaklığıyla birlikte, kabuğun kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımını belirlemek için bir boyutlu ısı iletim denklemi uygulanmıştır; böylece, sıcaklık dağılımına bağlı malzeme özellikleri termal burkulma ve serbest titreşim analizleri için uygun hale getirilmiştir. Çevresel doğrultudaki yer değiştirme değişkenlerinin Fourier serilerine açılımı ile birlikte birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi, FGM kabuk modeli için kullanılmıştır. Sayısal çalışmalar kritik burkulma sıcaklığına, kuvvet kuralı indeksinin,  $R/h$  ve  $L/R$  oranlarının etkilerinin incelenmesini içermektedir. Yüksek sıcaklık altındaki FGM kabukların serbest titreşim çalışmalarından elde edilen sonuçlar, en düşük doğal frekansa karşı gelen mod, en düşük burkulma sıcaklığı moduyla karşılaştırıldığında doğal frekanstaki azalış çok şiddetli olduğunu göstermiştir (Kadoli ve Ganesan, 2006).

Sofiyev vd. (2006) çalışmasında, eksenel basınç yüküne maruz FD tabaka içeren üç tabakalı koni kabuğun titreşimi ve stabilitesi incelenmiştir. Fonksiyonel değişimli tabakanın malzeme özelliklerinin kabuk kalınlığı boyunca sürekli olarak değiştiği varsayılmıştır. Malzeme özellikleri, bileşenlerin hacim kesirlerine göre keyfi bir dağılım izlemektedir. İlk olarak FDM tabaka içeren üç tabakalı kesik koni kabukların temel bağıntıları, dinamik stabilite ve uygunluk denklemleri elde edilmiştir. Galerkin yöntemi uygulanarak, bu denklemler zamana bağlı diferansiyel denklemler çiftine dönüştürülmüş ve kritik eksenel yük ve frekans parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kritik parametrelerin, malzeme bileşenlerinin konfigürasyonlarından ve kabuk geometrisi değişiminden etkilendiğini göstermiştir. Sonuçlar literatürde mevcut olan diğer sonuçlarla karşılaştırılarak sunulan analizin geçerliliği teyit edilmiştir.

Sunulan çalışmada, FD silindirik kabukların serbest titreşim analizi dört grup düzlem içi sınır koşulları için gerçekleştirilmiştir. Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu ve kabuğun kalınlığı boyunca dereceli değiştiği varsayılmıştır. Silindirin dış yüzeyindeki keyfi yüksek sıcaklık ve iç yüzeyi çevreleyen sıcaklık belirlenerek, sıcaklık artışının etkileri araştırılmıştır. Kabuk kalınlığı boyunca sıcaklık dağılımı, kalınlık doğrultusu içersindeki kararlı durum sıcaklık iletimi ile bulunmuştur. Hareket denklemleri Love'nin kabuk teorisine ve von Karman-Donnell-tip kinematik doğrusal olmamaya dayanmaktadır. Temel denklemlerin kesin çözümlerini kullanan statik analiz, ilk olarak termal yükler tarafından uyarılmış ön gerilmeyi belirlemek için yapılmış ve daha sonra hareket denklemleri Galerkin yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Kuvvet kuralı indeksinin termal çevre içersinde doğal frekans ve ilgili mod şekillerine olan etkilerini göstermek için sonuçlar elde edilmiştir (Haddadpour vd., 2007).

Bu çalışmada, paslanmaz çelik ve nikelden oluşmuş fonksiyonel değişimli malzemeden yapılmış halka mesnetli ince silindirik kabukların titreşimi incelenmiştir. Silindirik kabuklar, kabuk boyunca gelişigüzel yerleştirilmiş ve sıfır yanal çökmeye neden olan halka mesnetlere sahiptir. Çalışma, üçüncü dereceden kayma deformasyon kabuk teorisi temel alınarak yapılmıştır. Amaç, bileşen hacim kesirlerinin etkisi ve bileşen malzemelerin konfigürasyonlarının frekanslar üzerindeki etkisini incelemektir. Özellikler, kalınlık doğrultusunda hacim kesri kuvvet kuralı dağılımına göre değişmektedir. Analiz, Love kabuk teorisine ait gerilme-yer değiştirme ilişkileri ile gerçekleştirilmiştir. Temel denklemler, Rayleigh-Ritz yöntemi ile birlikte bir enerji işlevsisi kullanılarak elde edilmiştir. Frekans karakteristikleri, halka mesnet konumunun etkisi ve sınır koşullarının etkisine ait sonuçlar sunulmuştur. Sunulan analizler literatürdeki diğer sonuçlarla karşılaştırılarak doğruluğu teyit edilmiştir (Najafzadeh ve Isvandzibaei, 2007).

Sofiyev (2007) çalışmasında, seramik, FDM ve metalden oluşan üç tabakalı silindirik kabukların değişik yükler etkisi altında titreşim ve stabilite problemi ele alınmıştır. FD tabakanın elastik özellikleri kalınlık doğrultusunda sürekli değişmektedir. Değiştirilmiş Donnell tipi stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri türetilerek, Galerkin yöntemi yardımı ile kritik parametreler için analitik ifadeler bulunmuştur. Bu ifadeler kullanılarak ve sayısal hesaplar yapılarak, yarıçapın kalınlığa ve

uzunluğa oranının değişiminin, malzeme profilinin, hacim oranları değişiminin, FDM tabakanın kalınlık değişiminin kritik parametrelere etkileri incelenmiştir.

Sunulan makalede, dönme ataletini ve enine kayma deformasyonunu dikkate alan birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi temel alınarak, elastik ortama gömülmüş FD silindirik kabukların titreşim, burkulma ve dinamik stabilitesine, termal yükün etkisi incelenmiştir. Sıcaklık dağılımını belirlemek için, kabuğun eni boyunca bir sıcaklık iletimi denklemi kullanılmıştır. Malzeme özelliklerinin, bileşenlerin hacim kesirlerine göre kuvvet kuralına uygun olarak en doğrultusunda değiştiği varsayılmıştır. Hesaplamalar, malzeme kompozisyonunun, termal yüklemenin, statik eksenel yüklemenin, ortam rijitliğinin ve kabuk geometri parametrelerinin, titreşim, burkulma ve parametrik rezonans üzerine etkilerini tanımlamıştır. Bu makalede yer alan, elastik ortam içinde bulunan FD silindirik kabukların, termal titreşim, burkulma ve dinamik stabilitesinin çözümünde yeni özellikler, bazı anlamlı ve ilginç sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu sonuçların, elastik ortamda bulunan ve termal ve mekanik yükler etkisi altındaki FD yapıların uygulanması ve dizaynı için yararlı olduğu sonucuna varılmıştır (Sheng ve Wang, 2008).

Bu çalışmada, enine kayma ve normal deformasyonlar ve atalet momentinin etkileri dikkate alınarak fonksiyonel değişimli malzemelerden oluşan sığ kabukların doğal frekansları ve burkulma gerilmeleri analiz edilmiştir. Kabuğun elastisite modülünün, bileşenlerin hacim kesirlerine bağlı olarak kuvvet kural dağılımına göre değiştiği varsayılmıştır. Yer değiştirme bileşenlerinin kuvvetlerine açılımı yöntemi kullanılarak, FD dikdörtgen sığ kabuk için iki boyutlu (2D) yüksek mertebe 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. Pozitif, sıfır ve negatif Gauss eğriliklerine sahip üç farklı basit mesnetli sığ kabuk dikkate alınmıştır. Sunulan teorisinin doğruluğunu teyit etmek için temel doğal frekansın ve ayrıca burkulma gerilmesinin yakınsama özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Düzlem içi gerilmelere maruz FD kabukların kritik burkulma gerilmeleri de elde edilmiştir ve düzlem içi gerilmelere maruz olmayan basit mesnetli FD kabukların burkulma gerilmesi ve doğal frekansı arasındaki bağıntı sunulmuştur. Kabuğun yüzey sınır koşullarını sağlayan kalınlık

doğrultusundaki üç boyutlu hareket denklemleri integrallenerek, tipik enine gerilmeler elde edilmiştir. Çözümün kesinliği için yeterli olan dış ve iç işlerin enerji denkliği sağlanarak, sunulan sayısal sonuçlar ayrıca teyit edilmiştir. Sunulan iki boyutlu yüksek mertebeye yaklaşım teorilerinin, basit mesnetli FD sığ kabukların doğal frekanslarını ve burkulma gerilmelerini kesin olarak tahmin edebildiği sonucuna varılmıştır (Matsunaga, 2008).

Matsunaga (2009) çalışmasında, fonksiyonel değişimli malzemelerden (FDM) oluşan dairesel silindirik kabuğun titreşim ve burkulma problemi için iki boyutlu yüksek mertebeden deformasyon teorisi kullanılmıştır. Fonksiyonel değişimli kabuğun elastisite modülünün, bileşenlerin hacim kesirlerine göre kuvvet kuralı dağılımı ile değiştiği varsayılmıştır. Sürekli yer değiştirme bileşenlerinin kuvvet serilerinin genişletilmesi yöntemi kullanılarak, enine kayma deformasyonlarını ve normal deformasyonlarının her ikisini ve dönme ataletini hesaba katan temel denklemler, Hamilton prensibi yardımıyla türetilmiştir. Basit mesnetli FD dairesel silindirik kabuğun öz değer problemini çözmek için birçok kesik m dereceden yaklaşım teorileri uygulanmıştır. Sunulan teorinin doğruluğunu teyit etmek amacıyla, temel mod  $r=s=1$  için temel doğal frekansın yakınsama özellikleri detaylı olarak incelenmiştir. Ayrıca, izotrop ve FG kabukların sunulan doğal frekansları, literatürde yer alan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Eksenel gerilmeye maruz basit mesnetli FD dairesel silindirik kabukların kritik burkulma yükleri ayrıca elde edilmiş ve burkulma gerilmesi ve doğal frekans arasındaki ilişki gösterilmiştir. Dâhili ve harici işler hesaplanmış ve çözümlerin sayısal doğruluğunu ispatlamak için karşılaştırılmıştır. Dış ve iç yüzeylerdeki gerilme sınır koşullarını sağlayan, kalınlık doğrultusundaki üç boyutlu hareket denklemleri integrallenerek tipik enine kayma ve normal gerilmeler hesaplanmıştır. FD dairesel silindirik kabukların titreşim ve burkulma problemlerinin analizinde iki boyutlu yüksek mertebeden deformasyon teorisi avantaja sahip olduğu vurgulanmıştır.

Tornabene (2009) çalışmasında, birinci mertebeden kayma deformasyon teorisi temel alınarak, kısmen kalın FD koni, silindir ve halka şeklindeki plakların dinamik davranışları incelenmiştir. Silindir ve halka, koni kabuk formülasyonunun özel durumları olarak elde edilmiştir. İnceleme, malzemelerin kalınlık doğrultusunda izotrop ve homojen olmadığı varsayılarak, doğrusal eleastisite teorisi kapsamında

geliştirilmiştir. İki bileşenli fonksiyonel değişimli kabuk seramik ve metalden oluşmuştur. Bu iki bileşen, kabuğun bir yüzeyinden diğerine doğru kalınlık doğrultusunda derecelenmektedir. Literatürde sunulmuş olan, kuvvet kural dağılımının bir genelleştirilmesi önerilmiştir. Seramik hacim kesri için iki farklı dört parametrelili kuvvet kural dağılımları dikkate alınmıştır. FD kabuk kalınlığı boyunca bazı malzeme profilleri, kuvvet-kuralı dağılımının dört parametresi değiştirilerek gösterilmiştir. Birinci kuvvet kuralı dağılımı için, yapının alt yüzeyi seramik bakımından zengin, üst yüzeyi metal bakımından zengin; seramik bakımından zengin veya iki bileşenin karışımı ve ikincisinin tam tersi olabilir. Bu çalışmada, simetrik ve asimetrik hacim kesri profilleri sunulmuştur. Homojen izotrop malzeme, FDM'lerin bir özel hali anlamına gelmektedir. Temel hareket denklemleri, temel ve kinematik ilişkiler kullanılarak beş kinematik parametrenin fonksiyonları ile ifade edilmiştir. Çözüm, kabuğun orta yüzeyi üzerinde uzanan noktaların genelleştirilmiş yer değiştirme bileşenlerine göre sunulmuştur. Genelleştirilmiş diferansiyel kareler yöntemi aracılığı ile sistem denklemlerinin ayrıklaştırılması, bir standart doğrusal öz değer problemini ortaya çıkarır, burada iki bağımsız değişken Fourier model genişleme metodolojisi kullanılmadan dâhil edilmiştir. Kabuk yapının altı tipine ait sayısal sonuçlar, kuvvet kural üstünün, kuvvet kural dağılımının ve dört parametrenin seçiminin, dikkate alınan kabuk yapıların mekanik davranışına olan etkisini göstermektedir.

Bu makalede, Winkler-Pasternak zemin üzerinde bulunan FD silindirik kabukların titreşimleri incelenmiştir. Winkler ve Pasternak zeminlerin modülleri dikkate alınarak kabuk denklemleri geliştirilmiştir. FD kabuğun dinamik denklemlerini çözmek için dalga yayılımı yöntemi kullanılmıştır. Yöntem, karakteristik giriş fonksiyonlarının yaklaşık öz değerlerine dayanmaktadır. Sunulan yaklaşımın geçerliliği ve doğruluğu birkaç karşılaştırmayla teyit edilmiştir (Shah vd., 2010).

Bu makalede, iç ve dış tabakaları aynı homojen malzemeden ve orta tabakası FDM'lerden oluşan basit mesnetli üç tabakalı dairesel silindirik kabuğun serbest titreşimleri incelenmiştir. Temel denklemleri türetmek, özdeş olarak sınır koşullarını sağlayan trigonometrik fonksiyonlara göre orta-düzlem yer değiştirmelerini ifade etmek ve geometrik ve malzeme parametrelerine göre doğal frekansları bulmak için Flügge kabuk teorisi kullanılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, temel doğal frekans

yarıçap-kalınlık oranının artmasıyla azaldığını ve Young modülünün orta tabakadan dış (veya iç) tabakaya artmasıyla, arttığını göstermiştir (Li vd., 2010).

Vel (2010) çalışmasında, FD silindirik kabukların serbest ve zorunlu titreşimleri için kesin bir elastik çözüm sunulmuştur. FD kabuklar basit mesnetli kenarlara ve radyal yönde keyfi malzeme derecelenmesine sahiptir. Üç boyutlu lineer elasto-dinamik denklemler, eksenel yönde genelleştirilmiş düzlem zorlanma deformasyon durumuna sadeleştirilmiştir ve sınır koşullarını özdeş olarak sağlayan uygun yer değiştirme fonksiyonları kullanılarak çözülmüştür. Değişken katsayılı adi diferansiyel denklemlerle birleştirilmiş elde edilen denklem, kuvvet serileri yöntemi kullanılarak analitik olarak çözülmüştür. Analitik çözüm, hem sığ kabuklar hem de keyfi kalınlığa sahip derin kabuklara da uygulanabilir. Formülasyon, kabuğun silindirik olarak ortotrop malzemelerden oluştuğunu varsaymaktadır fakat bu izotrop malzemelerin özel bir durumu içinde geçerlidir. İki bilenli izotropik ve fiber takviyeli kompozit malzemeler için sonuçlar sunulmuştur. İzotrop malzemelerin homojenize edilmiş elastik rijitlikleri istikrarlı düzen kullanılarak tahmin edilmiştir. Fiber takviyeli malzemeler durumunda, etkin malzeme özellikleri Mori-Tanaka veya asimtotik genişleme homojenizasyon yöntemlerinden herhangi biri kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada incelenen fiber takviyeli kompozit malzeme, radyal doğrultuda derecelenen fiber hacim kesri ve fiber oryantasyonuna sahip titanyum matris içersine gömülü silikon-karbitten oluşmuştur. Değişik malzeme derecelenmeleri ve kabuk geometrileri için doğal frekanslar, mod şekilleri, yer değiştirmeler ve gerilmeler sunulmuştur.

Bu çalışmada, Winkler elastik zemin üzerinde bulunan fonksiyonel değişimli tabaka içeren üç tabakalı silindirik kabukların burulma yükü etkisi altında burkulma problemi ele alınmıştır. Üç tabakalı silindirik kabuğun alt tabakası pür seramik, orta tabakası fonksiyonel değişimli malzeme (FDM) ve üst tabakası metalden oluşmaktadır. Önce FDM'lerin analitik modelleri oluşturulmuş ve bu modeller grafiksel ve sayısal olarak sunulmuştur. Sonra Winkler elastik zemin modelinin matematiksel ve grafiksel modeli sunulmuştur. Daha sonra FDM tabaka içeren üç tabakalı silindirik kabuğun temel bağıntıları, burulma yükü ve Winkler zemin etkisi dikkate alınarak, değiştirilmiş Donnell tipi stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri türetilmiştir. Temel denklemler, Galerkin yöntemi uygulanarak

çözölmüş ve Winkler elastik zemini üzerinde bulunan FDM içeren üç tabakalı silindirik kabuğun kritik burulma yükü için analitik ifade elde edilmiştir. Son olarak kritik burulma yüküne, fonksiyonel değışimli malzemenin farklı kompozisyonları ve hacim bileşenleri değışiminin, kabuk karakteristiklerinin, tabakaların kalınlıklarının değışiminin ve Winkler elastik zeminin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın geçerliliğı için elde edilen sonuçlar literatürde sunulan çalışmalarla karşılaştırılmıştır (Adıgüzel, 2011).

Bu makalede, termal ortama maruz FD kesik koni kabukların üç boyutlu serbest titreşim analizi sunulmuştur. Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağılı olduğu ve basit kuvvet kural dağılımına göre radyal doğrultuda değıştiğı varsayılmıştır. Başlangıç termal gerilmeler, termo-elastik denge denklemlerini çözerek ve kabuktaki iki boyutlu aksenal simetrik sıcaklık dağılımını dikkate alarak, kesin olarak elde edilmiştir. Termal ve termo-mekanik temel denklemleri çözmek için etkili ve kesin bir sayısal araç olan diferansiyel kareler yöntemi kullanılmıştır. Bu amaçla, kabuğun en kesitini diferansiyel kareler yönteminin hesaplanabilir alanına dönüştürmek için bir haritalama tekniğı uygulanmıştır. Yöntemin yakınsama davranışı sayısal olarak gösterilmiştir ve literatürde yer alan uygun sonuçlarla karşılaştırmalar yapılmıştır. Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağılılığının, geometrik parametrelerin, malzeme derecelenme indeksinin, termal ve mekanik sınır koşullarının FD kesik koni kabukların frekans parametrelerine olan etkileri incelenmiştir (Malekzadeh vd., 2012).

Bu makalede, Winkler-Pasternak zemin üzerinde bulunan fonksiyonel değışimli malzemelerden oluşan basit mesnetli kesik koni kabukların titreşim analizi için analitik bir formülasyon sunulmuştur. Kesik koni kabuğun, özellikleri kabuk kalınlığının fonksiyonu şeklinde değışen metal ve seramik karışımı olduğu varsayılmıştır. Donnel teorisine göre temel denklemler Galerkin yöntemi kullanılarak çözülmüştür ve iki parametrelili elastik zemin olduğu veya olmadığı durumlarda temel frekanslar analitik olarak bulunmuştur. Elastik zeminin, değışen büyük yarıçap-küçük yarıçap oranının, uzunluk yarıçap oranının, bileşen malzemelerin hacim kesirlerinin ve malzeme kompozisyonunun kesik koni kabuğun temel frekanslarına etkileri araştırılmıştır (Sofiyev ve Schnack, 2012).

## 2.4. FD Kaplamalar Veya FD Kaplamalı Yapı Elemanlarının Davranışı İle İlgili Makale Özetleri

Bu alt başlıkta, FD kaplamalar ve FD kaplamalı yapı elemanlarının davranışı ile ilgili makale özetleri sunulmaktadır.

İleri metaller ve alaşımlar üzerinde bulunan termal bariyer kaplaması gibi fonksiyonel değişimli kaplamalarda, termal ve mekanik yüklemeler sonucu çoklu çatlaklar oluşabilir. Kaplamanın kırılma davranışına ait bir özelliği de, metalin yerel hacim kesirleriyle karakterize edilebilen kaplama derecelendirilmesidir. Kaplama derecelendirmesi yapılarak çatlak hasarları en aza indirilebilir, kırılma mekaniğinin bir konusu da fonksiyonel değişimli seramik/metal kaplamalardaki çoklu çatlaklara neden olan kuvvetlerdir. Kaplamanın elastik özelliklerinin film kalınlığı boyunca değiştiği varsayılarak, metal alt yüzey ve seramik/metal kaplama lineer elastik olarak göz önüne alınır. Kaplama derecelenmesi, çatlak uzunluğu ve çatlak yoğunluğu ile belirlenen çatlak enerji boşalımı için sistematik sonlu eleman hesaplamaları yapılmıştır; mekanik ve termal yüklerin her ikisi de dikkate alınmıştır. Pür seramik kaplama ile kıyasla, kaplamanın derecelenmesi çatlak itici gücünü önemli derece azalttığı görülmüştür. Ayrıca, farklı derecelendirmelerin mekanik yükleme altında çatlak itici kuvveti üzerindeki etkisi göreceli olarak daha küçük olduğu saptanmıştır. Bununla birlikte, termal yükleme altında kaplama derecelenmesinin etkisi önemli olabilir. Elde edilen sonuçların fonksiyonel değişimli malzemelerin tasarımına uygulaması tartışılmıştır (Bao ve Wang, 1995).

Bu makalede, homojen yarı uzaya bağlı fonksiyonel değişimli kaplamanın düzlem içi elastisite problemi incelenmiştir. Kaplamanın, yüzeye dik periyodik çatlaklar içerdiği varsayılmıştır. Problem, kuvvetli tekil çekirdeklere sahip integral denklemlerine göre formüle edilmiştir. Çatlak derinliğini, malzemenin homojen olmamasını ve çatlak periyodikliğini gösteren üç boyutsuz parametre tanımlanmıştır. Bu üç parametre değiştirilerek hesaplanmış olan mod III gerilme yoğunluğuna ek olarak sunulan sonuçlar, kırılma kararsızlığı konusu, periyodik çatlakların kaplama yüzeyi üzerindeki gerilmelerin relaksasyonuna olan etkisini içermektedir. Ayrıca, çalışmada

kabul edilen basit gerilme relaksasyon modelindeki yüzey çatlaklarının bir sonucu olan toplam deformasyon enerjisi salınımı karşılaştırılmasının nitelikli olarak tartışması ele alınmaktadır (Öztürk ve Erdogan, 1995).

Bu çalışmada, değişimli kaplamalı homojen bir alt tabakadaki ara yüzey çatlağı için düzlem deformasyon termal gerilme problemi dikkate alınmıştır. Alt tabaka bir süper alaşımdır ve değişimli kaplamanın bileşenleri alt tabakadaki süper alaşımın aynısı ve kısmen stabilize zirkonyum dioksittir. Zirkonyum dioksitin hacim kesrinin ara yüzeyden-yüzeye sürekli olarak %0'dan %100'e değiştiği varsayılmıştır. Kaplamanın yüzeyi yüksek sıcaklıkta ortama maruzdur, alt tabakanın yüzeyi zorlanmış-soğutulmuştur ve numunelerin uçları doğal konveksiyona maruzdur. Çatlağın yüzeylerinin kısmen izole edildiği varsayılmıştır. Böylece, mekanik bakımdan homojen olmayan ortam, iletimli sınır koşullu kararlı durum ısı iletimi altındadır. %100 seramik dâhil, kaplamanın çeşitli kompozisyonel görüntüleri ve çatlak yüzey üzerindeki yalıtım koşulunu tanımlayan ısı iletim indeksinin değişik değerleri için termal gerilme problemi çözülmüştür. Problemdaki ana değişken, ara yüzey boyunca simetrik olarak yerleşmiş kenar çatlaklarının uzunluğudur. Sunulan örnek sonuçlar, alt tabaka ve kaplama yüzeyi üzerindeki, ara yüzey boyunca ve çatlak yüzeyler üzerindeki sıcaklık dağılımını, alt tabakanın bir tarafından öbür tarafına doğru olan toplam ısı akışını, mod I ve II gerilme yoğunluk faktörlerini ve deformasyon enerji bırakımı oranını içermektedir. Homojen seramik tabaka yüzey çatlağı her zaman negatif  $K_I$  verilmesine müdahale eder, statikçe belirsiz problem, gerilme yoğunluk faktörlerini tekrar hesaplamak için ve temas kuvvetini belirlemek için de çözülmüştür (Lee ve Erdogan, 1998).

Bu makalede, büyük termal etkiye maruz kaldıktan sonrasında termal bariyer kaplamalarının (TBC) özelliklerinin delaminasyonunun ve kalıntı sertleşmesini araştırmak için bir izlenim testi kullanılmıştır. Delaminasyon yörüngesi termal olarak oluşmuş (TGO) oksit kalınlığını değiştirmek için bulunmuştur. Küçük kalınlıklarda TGO ve TBC arasında genellikle delaminasyon meydana geldiği görülmüştür. 1100 °C'de 100 saat etkileşimden sonra geliştirilen kalın TGO'da delaminasyon TGO/bağ kaplama iç yüzeyi arasında uzandığı halde küçük oksit çevrelerde sınır kaplama içersine gömülür. Çalışmada, ayrıca, hatalı çekirdeklenmede morfolojik kusurların rolü ile birlikte iç yüzey adezyonundaki değişimler ve bu değişimin

mekanik güvenilirliği incelenmiştir. Tekrar yapıştırılmış TGO/TBC tabakalarının eğriliklerinden TBC'nin etkili düzlem içi modüllerinin belirlenmesi için bir yöntem de sunulmuştur (Mumm ve Evans, 2000).

Sunulan makalede, düzgün sıcaklık değişimi altında bulunan termal bariyer kaplamalar için aksel simetrik çatlak problemi dikkate alınmıştır. Çeşitli büyüklükte ve konumdaki çatlak için Mod I ve Mod II gerilme yoğunluk faktörleri ve deformasyon enerji bırakımı hesaplanmıştır. Problemdaki ana değişkenler, fonksiyonel değişimli kaplamanın malzeme homojen olmama parametresi, çatlağın boyutu ve konumu ve numunenin göreceli boyutlarıdır. Malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlılığının, yoğunluk faktörleri ve deformasyon enerji bırakımına olan etkileri de incelenmiştir. Problemi çözmek için, sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Homojen olmayan özel elemanlar geliştirilerek malzeme özellikleri değişimi açıklanmıştır ve zenginleştirilmif çatlak uç elemanları kullanılarak gerilme yoğunluk faktörleri hesaplanmıştır (Yildirim ve Erdoğan, 2004).

Szymczyk (2005) çalışmasında, içten yanmalı motorun valf ve pistonu üzerine yapılmış seramik kaplama incelenmiştir. Sayısal incelemeler, sonlu eleman yöntemine dayanan yazılım temel alınarak gerçekleştirilmifdir. Mikro ölçekte araştırmaların ihtiyaçları için, mikro mekanik model geliştirilmifdir. Bu modeldeki kaplama, doğrusal fonksiyona göre düzgünce değişen malzeme özelliklerine sahip fonksiyonel değişimli malzeme olarak dikkate alınmıştır. Ek olarak iki çeşit üç tabakalı seramik kaplama mevcuttur: bunlardan ilki  $Al_2O_3$  (valf) ve ikincisi  $ZrO_2$  dir (piston).

Bu makalede sabit ısı iletiminden dolayı sıcaklık değişimi kalınlık boyunca sabit olan ve genel sınır koşullarına sahip üç tabakalı kaplama-FDM-alt tabakalı silindirik panelin doğrusal ve doğrusal olmayan titreşim analizi incelenmiştir. Teorik formülasyon, enine kayma deformasyonu ve dönme ataleti etkisi için sonuçlar veren von-Karman hassasiyetinde geometrik doğrusal olmamaya ve birinci mertebeden kayma deformasyon teorisine dayanmaktadır. Değişimli tabaka tarafından ortaya konulan, eğilme ve gerilme birleşme etkisinden dolayı silindirik panelin ön gerilme durumunu ve termal uyarılmış deformasyonunu belirlemek için doğrusal olmayan ön-titreşim analizi gerçekleştirilmifdir. Hareketin doğrusal olmayan temel

diferansiyel denklemleri, ön-titreşim durumuna artan dinamik durum eklenerek elde edilmiştir. Silindirik panellerin doğrusal ve doğrusal olmayan titreşim davranışlarını modellemek için iteratif algoritmalarla diferansiyel kareler yöntemini birlikte kullanılmasını sağlayan sayısal bir yöntem uygulanmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan titreşim frekanslarının, titreşim genliğinden, sıcaklık değişiminden, düzlem dışı sınır koşullarından ve  $a/b$ ,  $a/h$  ve  $R/a$  değerlerinden önemli derecede etkilendiğini gösteren sayısal sonuçlar hem çizelge hem de grafik formda sunulmuştur. Düzlem içi yer değiştirme zorlamalarının ve ortadaki FDM ince tabakanın hacim kesri indeksinin etkileri çok önemli olmadığı vurgulanmıştır (Liew vd., 2006).

Bu çalışmada, basit mesnetli FDM yüzey kaplamalı sandviç plak için termal çevre ve termal burkulma sonrası altında ısı iletiminden kaynaklanan basınç burkulma sonrası incelenmiştir. FDM yüzey kaplamalarının malzeme özelliklerinin, bileşenlerin hacim kesirlerine göre basit kuvvet kural dağılımı ile kalınlık doğrultusunda değiştiği ve FDM yüzey kaplamaları ve homojen alt tabakanın her ikisinin de sıcaklığa bağlı olduğu varsayılmıştır. Temel denklemler, termal etkileri içeren yüksek mertebeden kayma deformasyonlu plak teorisine dayanmaktadır. Plağın başlangıç geometrik kusuru dikkate alınmıştır. Burkulma yüklerini (sıcaklık) ve burkulma sonrası denge durumunu belirlemek için iki adımlı pertürbasyon tekniği kullanılmıştır. Sayısal gösterimler, farklı termal çevre koşullarına maruz FDM yüzey kaplamalarına sahip kusurlu kusursuz sandviç plağın basınç ve termal burkulma sonrası davranışını içermektedir. Sonuçlar göstermiştir ki, sıcaklık değişimleri, FDM yüzey kaplamalarının hacim kesri dağılımı ve alt tabaka-yüzey kaplama kalınlığının sandviç plakların burkulma yükü ve burkulma sonrası üzerinde önemli etkiye sahiptir. Ayrıca, elde edilen sonuçlardan, ısı iletimi durumunda, burkulma sonrasında bir bifürkasyon türü olmadığı teyit edilmiştir (Shen ve Li, 2008).

Bu çalışmada, termo-mekanik yüklere maruz sandviç plakların eğilme tepkisi incelenmiştir. Sandviç plak yüzeylerinin kalınlık doğrultusunda izotropik iki bileşenli (metal-seramik) malzeme dağılımına sahip olduğu, yüzeylerin elastisite modülünün, Poisson oranının ve termal genleşme katsayısının bileşenlerin hacim kesirleri açısından kuvvet kural dağılımına göre değiştiği varsayılmıştır. Çekirdek tabaka homojendir ve izotrop seramik malzemedir yapılmıştır. Plağın simetrisini ve her bir

tabakanın kalınlığını dikkate alarak birçok çeşit sandviç plak kullanılmıştır. Kayma deformasyon teorileri veya klasik teorilerinden herhangi biri tarafından yönetilen deformasyonlara sahip fonksiyonel değişimli sandviç plağın alan denklemleri türetilmiştir. Temel denklemleri, değişken katsayılı eşleşmiş adi diferansiyel denklemler takımına indirgemek için sınır koşullarını özdeş olarak sağlayan yer değiştirme fonksiyonları kullanılmıştır. Fonksiyonel değişimli sandviç plaklar için kesin çözümler sunulmuştur. Malzeme dağılımının çökmelere ve gerilmelere olan etkilerini göstermek için sinüsoidal, üçüncü mertebe, birinci mertebe ve klasik teorileri sunulmuştur. Thermo-mekanik yüklere maruz sandviç plakların statik davranışı için çeşitli sonuçlar sunulmuştur. Fonksiyonel değişimli sandviç plakların boyutsuz çökmelerine ve eksenel ve enine kayma gerilmelerine thermo-mekanik yüklerin ve diğer parametrelerin etkileri incelenmiştir (Zenkour ve Alghamdi, 2010).

Bu makalede, yeniden kullanılabilir fırlatma aracının metalik termal koruma sistemi için yitriya stabilize zirkonya (YSZ) ve Ni-Cr-Al-Y'e dayanan fonksiyonel değişimli malzemeler(FDM) tasarlanmış ve geliştirilmiştir. Kaplama, plazma sprey yöntemi yardımıyla ön karışimli mekanik alaşimli YSZ ve Ni-Cr-Al-Y tozlar kullanılarak yapılmıştır. Yapılan termal gerilme analizi, çift kaplamaya kıyasla FDM kaplamadaki gerilmelerin önemli derecede azaldığını göstermiştir. Kaplamanın faz kompozisyonu, tasarlanan kompozisyona yakın elde edilmiştir. Porozite %8-18 aralığında değişmektedir. 30, 60, 90 derecelik üç farklı pozda ortalama salım gücü 0.8 olarak elde edilmiştir. Solar emicilik 0.55 olarak bulunmuştur. FDM kaplamanın yorulma ömrü, inconel ve Ti6Al4V metal alt tabakalar çift kaplamayla karşılaştırılarak elde edilmiştir. Inconel alt tabaka üzerinde bulunan çift kaplamaya kıyasla, FDM kaplamalarda, nispeten daha yüksek termal dalgalanmalarla yorulma testi yapılmıştır. Yeniden kullanılabilir fırlatma aracının üst yüzeyinde ölçülen ısı akışı, rüzgar yönünde ölçülen ısı akışına yakın olduğu görülmüştür. Her iki tip metal alt tabaka içinde üst yüzey sıcaklığı benzerdir ve ön görülen sıcaklığa uygundur. Bununla birlikte, Ti6Al4V'nin yüksek termal yayılma gücü nedeniyle, alt tabaka sıcaklığı inconel alaşıma kıyasla Ti6Al4V'de daha yüksektir (Baluragi vd., 2011).

Shu (2011) makalesinde, içi boş küreler ve dairesel silindirik kabuklar üzerinde bulunan fonksiyonel değişimli kaplamalar için piezo-termoelastik kontrol denklemleri çözülerek ve tabakalar arasındaki tekrarlanan bağıntılar kullanılarak açık

piezo-termoelastik çözümler elde edilmiştir. Çok tabakalı fonksiyonel değişimli piezoelektrik kaplamalar için elde edilen sonuçlar kesindir. Bir sürekli fonksiyonel değişimli piezo-elektrik kaplama birçok parçaya bölünürse, yaklaşık çözüm elde edilir ve tabaka sayısı arttığında kesin çözüme yakınsanır. Alt tabakadaki gerilmeler üzerindeki piezo-elektrik etkiler göz ardı edilebilir, fakat kaplama üzerindeki etkiler son derece açıktır. Kaplamadaki tabaka sayısının artması, azami gerilmeyi azaltmaz fakat tabakalar arası çevresel gerilmelerin sıçrayışını açık şekilde azaltır ve ara yüzey gerilme yoğunluğunu düşürür. Bununla birlikte, tabaka sayısı ile birlikte kaplama ve alt tabaka arasındaki radyal gerilme arttığı için ara yüzey mukavemeti azalır.

Bu bildiride, FDM kaplı sandviç kabukların elastik ortamlarda titreşim problemi sunulmuştur. Elastik zemin modeli olarak Pasternak tipi zemin modeli dikkate alınmıştır. Sandviç kabuk-zemin etkileşimi içeren temel denklemler çözülerek sandviç silindirik kabukların frekans parametresi için ifade elde edilmiştir. Sayısal analizler kısmında FD kaplama olarak (Ti6Al4V/ZrO<sub>2</sub>) ve çekirdek olarak pür (Ti6Al4V) metal malzeme kullanılmıştır. Dolayısıyla, çekirdeğin mekanik özellikleri FDM kaplamanın temas yüzeyindeki mekanik özelliklerle aynı değildir. Hacim kesir indeksi  $d=1$  ve  $d=2$  olarak dikkate alınmıştır. Titreşim frekansına elastik zemin, kabuk karakteristikleri ve Ti6Al4V/ZrO<sub>2</sub> kaplamanın etkileri incelenmiştir (Sofiyev vd., 2011).

Bu makalede, termal çevrede elastik zemin üzerine bulunan FDM'den oluşan yüzey kaplamalarına sahip sandviç plak için doğrusal olmayan titreşim, doğrusal olmayan eğilme ve burkulma sonrası analizleri sunulmuştur. FDM yüzey kaplamalarının malzeme özelliklerinin, bileşenlerin hacim kesirleri açısından basit kuvvet kuralı ile kalınlık doğrultusunda değiştiği varsayılmıştır. Plak-zemin etkileşimini içeren plak temel denklemleri, iki kademeli pertürbasyon tekniğiyle çözülmüştür. Termal etkiler de dahil edilmiştir ve FDM yüzey kaplamalarının ve homojen çekirdek tabakasının malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılmıştır. Sayısal sonuçlar göstermiştir ki zemin sertliği ve sıcaklık artışı, sandviç plağın doğal frekansı, burkulma yükü, burkulma sonrası yükü ve doğrusal olmayan eğilme davranışları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca, elde edilen sonuçlardan görülmüştür ki FDM yüzey kaplamalarının çekirdek-yüzey kaplaması kalınlık oranı ve hacim kesirleri dağılımı, plağın doğal frekans, burkulma yükü ve burkulma sonrası

davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir, oysaki bu etki doğrusal olmayan eğilme için daha az belirgindir ve aynı sandviç plağın doğrusal olmayan-doğrusal frekans oranları için marjinaldir (Wang ve Shen, 2011).

Bu makalede, termal veya mekanik yüklemeye maruz ve elastik zeminle temas eden fonksiyonel değişimli malzemelerden oluşan yüzey kaplamalarına sahip sandviç plakların kararsızlığı dikkate alınmıştır. Denklemlerin türetimi birinci mertebeden kayma deformasyonlu plak teorisine dayanmaktadır. FDM tabakaların termo-mekanik homojen olmayan özelliklerinin plak kalınlığı boyunca kuvvet kuralı dağılımına göre düzgün bir şekilde değiştiği varsayılmıştır. Doğrusal olmayan deformasyon-yer değiştirme bağıntıları kullanılarak, sandviç plakların denge ve stabilite denklemleri türetilmiştir. Plağın tüm kenarlarının basit mesneli olduğu varsayılmıştır. Winkler modeline kayma tabakası eklenerek elde edilen iki parametrelili Pasternak modeli kullanılarak elastik zemin modellenmiştir. Mühendisler için tasarımda yararlı olan kritik burkulma yükü ve sıcaklığını hesaplamak için kapalı form çözümleri sunulmuştur. Elastik zeminin, sandviç plak boyutlarının ve FDM tabakaların kuvvet kuralı indeksinin etkileri, sandviç plakların termo-mekanik burkulması için kapsamlı olarak sunulmuştur (Kiani vd., 2012).

Zerin vd. (2012) çalışmasında sadece dıştan FD kaplamalı, seramik malzemedeki oluşan silindirik kabukların uniform yanal basınç yükü etkisi altında burkulma problemini incelemişlerdir. FD kaplama ve seramik silindirik kabuk, iki tabakalı silindirik kabuk oluşturmaktadır. FDM özellikleri kalınlık koordinatına bağlı olarak sürekli değişmektedir. FD kaplı seramik silindirik kabuğun uniform yanal basınç yükü etkisi altında Donnell tipi stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri türetilmiştir. Temel denklemlere Galerkin yöntemi uygulanarak dış kaplamalı seramik silindirik kabuk için uniform yanal burkulma yükü bulunmuştur. İki tabakalı kabuk karakteristiklerinin FD kaplamanın hacim kesir dağılımının yanal burkulma yüküne etkisi tartışılmıştır.

## 2.5. Tez Konusu İle İlgili Literatürde Bulunan Önemli Kitaplardan Bazıları

Bu alt başlıkta tezin temel bağıntı ve formülasyonunun bilimsel tabanını oluşturan ve tez konusu ile bağlantılı olan önemli kitaplardan bazılarının özetleri sunulmuştur.

Gontkevich (1964) kitabında plak ve kabukların serbest titreşimlerine ait problemler ve çözümleri sunulmuştur. Kitap, plak ve kabukların serbest titreşimi ile ilgili ilk kaynaklardan biri olup çok önemli temel bilgiler içermektedir.

Bu kitapta, yüksek sıcaklıklı malzemelerin termomekanik özellikleri ele alınmıştır. Ayrıca, demirsiz alaşımlar, demirli alaşımlar, oksitler ve oksitlerin çözümleri ile karışımları, oksit olmayan ve bunların çözümleri ile çeşitli seramik malzemeler içeren karışımları, intermetaller, sermetler, polimerler ve kompozit sistemler hakkında deneysel ve teorik bilgiler sunulmuştur (Touloukian,1967).

Sunulan çalışmada, en kesit ekzantrikliğinde 0'dan (dairesel kabuk) 0.916'ya değişen sabit kütleli serbest-serbest izotropik eliptik silindirik kabukların deneysel ve analitik titreşimi sunulmuştur. Deneysel rezonant frekanslar, düğüm modeller ve mod şekilleri, kabuk yüzeyinin büyük bölümünde hareket edebilen temassız indüktans sondalı bir elektrodinamik çalkalayıcı veya bir hava-jeti çalkalayıcı kullanılarak elde edilmiştir. Deneysel frekanslar, çok terimli boyuna ve çevresel model genişlemeleri karakterize eden Rayleigh-Ritz tip analiz aracılığı ile hesaplanan analitik frekanslarla genelde uyum içersindedir. 0.916 eksantrikliğe sahip kabuklar için frekanslar, ilgili dairesel-kabuk frekanslarından % 40 daha düşüktür. Ekzantriklik arttığında, analitik ve deneysel mod şekilleri önemli boyuna ve çevresel model birleşme göstermiştir (Sewall vd., 1971).

Volmir (1972) kitabı on bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm büyük yer değiştirmeli plak ve kabukların dinamik teorisinin temel denklemlerini içermektedir. Bölüm 2-5'te, plak ve kabukların titreşimli hareketlerinin birçok çeşidi incelenmiştir. Doğal ve zorunlu titreşimlere ait özel problemler ilk olarak burada sunulmuştur. Otomatik endüksiyonlu titreşimlere ait bölümde, panel çarpıntılar hakkında yeni verilere öncelik verilmiştir. Bölüm 6-9'da dinamik yükleme altında, ince duvarlı sistemlerin davranışları incelenmiştir. Değişik tipteki hızlı ve çok hızlı darbe yükleri

altındaki plak ve kabukların deformasyon analizini sunulmuştur. Bölüm 10'da istatistiksel yaklaşım gerektiren, kabuk ve plakların dinamiğinin bazı problemleri sunulmuştur.

Bu çok önemli kitapta, çeşitli kabukların yapı elemanlarının titreşim problemleri ve çözümleri yer almaktadır. Kitap 5 bölüm ve ekler kısmından oluşmaktadır. Birinci bölümde elastik ince kabuk teorisinin temel denklemleri sunulmuştur. İkinci ve üçüncü bölümlerde dairesel ince silindirik kabuklar, dördüncü bölümde dairesel olmayan silindirik kabuklar, beşinci bölümde koni kabuklar ve altıncı bölümde küresel ve diğer kabuk çeşitleri ele alınmıştır. Ek kısmında hareket denklemleri, sınır koşulları, potansiyel fonksiyon, hareket denklemlerinin çözümleri, frekans denklemleri ve kaynaklar sunulmaktadır (Leissa (1973).

Sunulan kitapta, ilk olarak güncel gelişmelerdeki ilerlemeler, analiz teknikleri ve temel kavramlar sunulmuştur. Temel doğrusal olmama fenomenini tanıtmak için genel bir bakış açısı sunulmuştur. Temel kavramları ve analitik yöntemleri tanıtan tek serbestlik dereceli sistemler incelenmiştir; kavram ve metodlar çok serbestlik dereceli sistemlere genişletilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan dalgaları açıklamak için basit fiziksel örnekler kullanılmıştır. Çeşitli örnekler için detaylı çözümler sunulmuş, sonuçlar grafiksel sunulmuş ve fiziksel koşullarda açıklamalar yapılmıştır. Kapsamlı bir kaynakça sunulmuştur (Nayfeh ve Mook, 1979).

Kabuk yapılar, mühendislik projelerinin çok geniş bir yelpazesinde anahtar bileşenleri oluştururlar. Kabuk yapılar teorisi, büyük bir literatüre sahip çok eski ve geniş bir konudur. Ancak bu kitap, geçmişte elde edilen sonuçların bir derlemesi değildir. Aksine, mühendislerin yetkisi dâhilinde konunun esasının incelenmesi için yapılan bir girişimdir. Fiziksel bakımından, kabukta eğilme ve gerilme etkilerinin nasıl birleştiği ve etkileştiği temel sorusuyla ilgilenilmiştir ve bu yaklaşımın genelde kabukların yapı mekaniğinin ve özel problemlerin yararlı sonuçlarının öğrenilmesinin gerektiği gösterilmiştir. Kitabın ilk yarısında, temel fikirler ve denge denklemleri, geometri ve elastisite ve onların çeşitli faydalı kombinasyonları üzerinde durulmuştur. Bilhassa, genel eğrilikli yüzeylerin geometrisinin basit bir incelenmesi ele alınmıştır. İkinci yarısında, ilk olarak statik yükleme altında çeşitli kabuk yapıların davranışı incelenmiştir. Daha sonraki bölümlerde, kabukların

burkulması, titreşimi ve analiz ve tasarıma plastik teorisinin uygulaması ele alınmıştır (Calladine, 1983).

Sunulan kitapta yüksek sıcaklığa maruz uygulamalar için kaplamalar ele alınmıştır. Buharlaştırma ve püskürtme teknikleri; yüksek sıcaklıklarda kullanılan yığın kaplamalar; üretilen seramik kaplamaların uygulamaları ve değerlendirmeleri v.b. konular detaylı olarak ele alınmıştır (Petit ve Goward, 1983).

Bu kitapta, titreşim teorisi için etkin modern hesaplama teknikleri sunulmuştur. Sırasıyla, tek serbestlik dereceli sistemler; doğrusal olmayan karakteristikli sistemler; iki serbestlik dereceli sistemler; çok serbestlik dereceli sistemler; sonsuz serbestlik dereceli uzay-zaman süreklisi; ayrıklaştırılmış uzay-zaman süreklisi için sonlu elemanlar yöntemi, detaylı olarak incelenmiştir (Weaver vd. 1990).

Yamanouchi vd. (1990) kitabında, 1990 yılında ilki gerçekleştirilmiş olan fonksiyonel değişimli malzemeler uluslararası sempozyumunda sunulmuş olan bildiriler yer almaktadır. Bu bildiri kitabı FDM'lerin özellikleri ve oluşumu ile ilgili ilk kaynaklardan biridir.

Sunulan kitapta, 1992 yılında ikincisi düzenlenmiş olan fonksiyonel değişimli malzemeler uluslararası sempozyumunda sunulmuş olan bildiriler yer almaktadır (Holt, vd., 1992).

Sunulan kitapta, kontrollü sürtünme ve kullanım dayanıklılığı gerektiren tüm kullanımlar için modern seramik malzemelerin tribolojik bakış açılarına ait kapsamlı bilgiler sunulmuştur. Kitap, kayan veya yuvarlanan temas uygulamalarında optimum performansı oluşturmak için seramiğin mikro yapısının değiştirilmesine rehberlik etmektedir (Komanduri ve Jahanmir, 1994).

Kompozitler, mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanına sahiptir. Bu yapılardaki sabit sorunlardan biri, yabancı maddelerin darbe etkisi sonucu oluşabilecek önemli hasarlar olup bu durumun görsel tetkik ile belirlenememesidir. Bu çeşit darbeler en olağan şekilde, düşük hızla bir cismin yapının üzerine düşmesiyle veya uzay aracının yüksek hızla bir uzay enkazına çarpmasıyla oluşabilir.

Sunulan kitapta, çarpma esnasında darbenin nasıl geliştiği, yapıların mekanik davranışlarına darbe güdümlü hasarın etkisi ve darbe tahmini ve belirlenmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Bu konuları açıklamak için çok sayıda örnek sunulmuştur (Abrate, 1998).

Fonksiyonel değişimli malzemeler, mikro yapı ve kompozisyonunda kademeli geçişlere sahip olarak üretilirler, böylece yapı elamanın konumlandığı yere bağlı olarak değişen fonksiyonel performans gereksinimlerini karşılarlar ve yapı elamanının genel performansının en iyi şekilde kullanılmasını sağlarlar. Bu kitap, International Materials Reviews dergisinde yazarlar tarafından yayımlanan iki makalenin, revize edilmiş, güncellenmiş ve birleştirilmiş halini içermektedir. Derecelenmiş metal ve metal/seramik kompozitlerin üretimi ve termo mekaniğin temelleri üzerinde önemle durulmuştur, üretim metalurjisi, kompozit sentezi, kompozitlerin mekanik ve mikro mekaniği ve kırılma mekaniği konuları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Uygun olan durumlarda, temel prensiplerin, pratik durumlara olan uygulamaları da ayrıca gösterilmiştir (Suresh ve Mortensen, 1998).

Sunulan kitapta, fonksiyonel değişimli malzemenin (FDM), malzeme özelliklerindeki ilgili değişimler sonucunda kompozisyon, yapı ve hacmin yavaş yavaş değiştiği gösterilmiştir. FDM kavramında birçok olasılık doğal olarak uygulandığında, malzemenin gelişeceği ve yeni fonksiyonlar oluşturacağı beklenmektedir. FDM'lerin ve uygulamalarının tasarımı, modellenmesi, işletimi ve hesaplamasının ayrıntılı tanımı çalışmada sunulmuştur (Miyamoto vd., 1999).

Bu kitapta, plak ve kabukların doğrusal olmayan titreşimleri ve stabiliteyi, hem teorik hem de deneysel açıdan incelenmiştir. Uzman araştırmacılar bu kitapta, sıvı-yapı etkileşimli kabukların ileri problemlerini içeren plak ve kabukların doğrusal olmayan titreşim ve stabilitesine ait en son gelişmelere ulaşabilirler. Profesyoneller, geleneksel ve modern malzemelerden oluşan kabuk ve plaklar için yararlı birçok pratik kavrama, diyagram ve sayısal sonuca ulaşabilirler. Sunulan kitap yardımıyla, kapsamlı bir matematiksel alt yapıya gereksinim duyulmadan, dinamik kararsızlık, dallanma ve karışıklık gibi karmaşık olgular kolaylıkla anlaşılabilir. Kitapta, lisansüstü öğrencileri için (i) aşağı yukarı tüm mevcut teorileri basit bir biçimde bir araya getiren kabuk ve plakların doğrusal olmayan mekaniğine ait bir tam metin

sunulmaktadır. Ayrıca, (ii) doğrusal olmayan dinamiğe giriş ve (iii) sıvı-yapı etkileşim problemlerini içeren, kabuk ve plakların doğrusal olmayan titreşim ve stabilitesine ait bir çalışma sunulmuştur (Amabili, 2008).

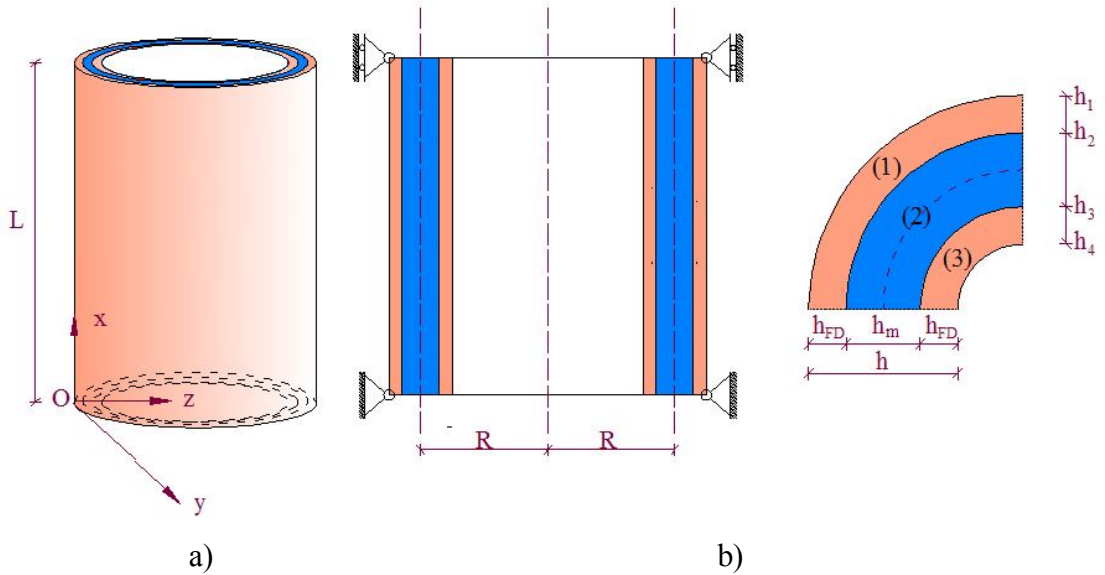
Bu kitap çok kapsamlı bir kitap olup, tabakalı kompozit plakların değişik sınır koşulları, değişik yükler etkisi altında, kayma şekil değiştirme ve geometrik doğrusal olmama koşulları dikkate alınarak çok sayıda problemlerin çözümleri sunulmuştur. Kitap 13 Bölümden oluşmaktadır. Bölüm 1-3'de bazı temel bilgiler, anizotrop cisimlerin elastik sınırlar içerisinde temel bağıntı ve denklemleri, virtüel iş ve varyasyonel yöntemlerle ilgili bilgiler sunulmuştur. Bölüm 4'te kompozit malzemelere ait tanımlar, gerilme ve deformasyon dönüşümlerinin temel denklemleri yer almaktadır. Bölüm 5'te klasik teori çerçevesinde ve birinci mertebe kayma deformasyonu kullanılarak tabakalı plakların hareket denklemleri türetilmiştir. Klasik ve birinci mertebe kayma deformasyon teorilerinin silindirik eğilmede tabakalı kirişler ve plak şeritlere uygulanması Bölüm 6'da sunulmuştur. Özel ortotropik dikdörtgen tabakaların klasik tabakalı plak teorisini kullanan analizi Bölüm 7'de ele alınmıştır. Klasik ve birinci mertebe kayma deformasyonlu plak teorileri için Navier ve Levy çözüm yaklaşımlarını temel alan dikdörtgen tabakaların süreksiz davranışları, doğal titreşim, burkulma ve eğilme için analitik çözümleri Bölüm 8 ve 9 da sunulmuştur. Kompozit tabakaların sonlu eleman analizi Bölüm 10'da incelenmiştir. Bölüm 11 ve 12'de sırasıyla, yüksek mertebe tabaka teorileri ve tabaka yöntem teorisi sunulmuş ve sonlu elemanlar yöntemi ve analitik modeller tartışılmıştır. Kompozit tabakaların geometrik olarak doğrusal olmayan analizi son bölümde Bölüm 13'te incelenmiştir (Reddy, 2004).

Fonksiyonel değişimli malzemelerden oluşan plak ve kabukların doğrusal olmayan analizleri Shen (2009) kitabında detaylı olarak ele alınmıştır. Kitap beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde fonksiyonel değişimli malzemelerin ve yapı elemanlarının modellenmesi sunulmuştur. İkinci bölümde kayma deformasyonlu FDM plakların doğrusal olmayan eğilmesi incelenmiştir. Üçüncü bölümde kayma deformasyonlu FDM plakların burkulma sonrası davranışları ele alınmıştır. Dördüncü bölümde kayma deformasyonlu FDM plakların doğrusal olmayan titreşimleri ve beşinci bölümde kayma deformasyonlu FDM silindirik kabukların burkulma sonrası davranışları ele alınmıştır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Problemin Formülasyonu

İç ve dış yüzeyi FD kaplamalı metal silindirik kabuk Şekil 3.1’de sunulmaktadır. İç ve dış yüzeyi FD kaplamalı silindirik kabuk üç tabakalı sistem oluşturmaktadır. Oxy koordinat sistemi kabuğun sol kenarında ve üç tabakalı silindirik kabuğun referans yüzeyinde gözönüne alınmaktadır. Ox eksenini ana doğrultuda, Oy eksenini çevresel doğrultuda, Oz eksenini ise söz konusu iki eksene dik olarak yönelmektedir (Şekil 3.1a). Üç katmanlı silindirik kabuğun orta katmanı metalden, iç ve dış katmanlar FDM’lerden oluşmaktadır. Üç katmanlı kabuğun uzunluğu  $L$ , yarıçapı  $R$ , genel kalınlığı  $h = 2h_{FD} + h_m$ , orta katmanın kalınlığı  $h_m$  ve FDM kaplamaların her birinin kalınlığı  $h_{FD}$ ’dır (Şekil 3.1b).



Şekil 3.1. a) İç ve dış yüzeyi FDM kaplı silindirik kabukta koordinat sistemi, b) tabakaların diziliş şekli; (1) FD dış kaplama, (2) Metal, (3) FD iç kaplama

### 3.2. İçten Ve Dıştan FD Kaplamalı Metal Silindirik Kabukların Malzeme Özelliklerinin Modellenmesi

Fonksiyonel değişimli malzemeler; mikroskobik olarak homojen olmayan ve mekanik özellikleri pürüzsüz ve bir yüzeyden diğerine sürekli olarak değişen kompozit malzemelerdir. FDM'ler, toz metalürji yöntemleri kullanılarak metal ve seramiğin bir karışımından veya değişik metallerin bir kombinasyonundan yapılır. Hacim oranı, uzay koordinatlarının fonksiyonları olup onların kombinasyonu olan FDM özellikleri aşağıdaki bağıntı ile tanımlanır (Touloukian, 1967; Koizumi, 1997; Reddy ve Chin, 1998; Shen, 2009):

$$P = P_s V_s + P_m V_m \quad (3.2.1)$$

Burada  $P_s$  ve  $P_m$ , FD malzemenin seramik ve metal yüzeylerinin ısıya bağlı özellikleri;  $V_s$  ve  $V_m$ , FD malzemenin seramik ve metal hacim bileşenleri olup şu bağıntı geçerlidir (Shen, 2009):

$$V_s + V_m = 1 \quad (3.2.2)$$

P malzeme özellikleri, sıcaklığın bir fonksiyonu şeklinde aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$P = P_0 \left[ \frac{P_{-1}}{T} + 1 + P_1 T + P_2 T^2 + P_3 T^3 \right] \quad (3.2.3)$$

Burada,  $P_{-1}$ ;  $P_0$ ;  $P_1$ ;  $P_2$ ;  $P_3$ , katsayıları T sıcaklığına bağlı fonksiyonlardır ve malzeme bileşenleri için tektirler, T, Kelvin ile ifade edilir (Touloukian, 1967).

(3.2.1) ve (3.2.2) bağıntıları kullanılarak silindirik kabuğun dış yüzeyindeki FD kaplamanın Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu için şu ifadeler elde edilir (Shen ve Li, 2008; Zenkour ve Alghamdi, 2010):

$$E_{FD}^{dis} = E_s + (E_m - E_s)V_m^{dis}$$

$$v_{FD}^{dis} = v_s + (v_m - v_s)V_m^{dis} \quad (3.2.4)$$

$$\rho_{FD}^{dis} = \rho_s + (\rho_m - \rho_s)V_m^{dis}$$

Silindirik kabuğun iç yüzeyindeki FD kaplamanın Young modülü Poisson oranı ve yoğunluğu için ise aşağıdaki ifadeler elde geçerli olur (Shen ve Li, 2008; Zenkour ve Alghamdi, 2010):

$$E_{FD}^{ic} = E_s + (E_m - E_s)V_m^{ic}$$

$$v_{FD}^{ic} = v_s + (v_m - v_s)V_m^{ic} \quad (3.2.5)$$

$$\rho_{FD}^{ic} = \rho_s + (\rho_m - \rho_s)V_m^{ic}$$

Burada  $E_m, v_m, \rho_m$  ve  $E_s, v_s, \rho_s$ , sırasıyla, metal silindirik kabuğun iç ve dış yüzeyindeki FD kaplamaların metal ve seramik yüzeylerinin Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğudur.

$V_m^{ic}$  ve  $V_m^{dis}$ , sırasıyla, metal silindirik kabuğun içindeki ve dışındaki kaplamaların metal hacim kesirleri olup (3.2.2) bağıntısı temel alındığında şu bağıntılar geçerlidir:

$$V_m^{dis} + V_s^{dis} = 1 \quad (3.2.6)$$

$$V_m^{ic} + V_s^{ic} = 1 \quad (3.2.7)$$

Burada  $V_s^{ic}$  ve  $V_s^{dis}$  sırasıyla, metal silindirik kabuğun iç ve dış yüzeyindeki FD kaplamaların seramik hacim kesirleridir.

Metal silindirik kabuğun dış yüzeyindeki FD kaplamanın hacim kesri,  $V_m^{\text{dis}}$ , kuvvet fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilir (Shen ve Li, 2008; Sofiyev vd., 2011)

$$V_m^{\text{dis}} = \left( \frac{Z - z_1}{z_2 - z_1} \right)^d \quad (3.2.8)$$

Metal silindirik kabuğun iç yüzeyindeki FD kaplamanın hacim kesri  $V_m^{\text{ic}}$  kuvvet fonksiyonu olup aşağıdaki şekildedir:

$$V_m^{\text{ic}} = \left( \frac{z_4 - Z}{z_4 - z_3} \right)^d \quad (3.2.9)$$

Burada  $Z = z/h$ ,  $z_1 = h_1/h$ ,  $z_2 = h_2/h$ ,  $z_3 = h_3/h$ ,  $z_4 = h_4/h$  boyutsuz koordinatlardır;  $d$  ( $0 \leq d < +\infty$ ) hacim kesir indeksi olup FD kaplama kalınlığı boyunca malzeme değişimi profilini belirler.

FD kaplama ile zenginleştirilmiş metal silindirik kabuğun temas yüzeylerinde metal hacim kesirleri aşağıdaki bağıntıları sağlar:

$$V_m^{\text{dis}} = 1 \quad z = h_2 \quad \text{ise} \quad (3.2.10)$$

$$V_m^{\text{ic}} = 1 \quad z = h_3 \quad \text{ise}$$

Orta tabaka zenginleştirilmiş metalden oluşmakta ve malzeme özellikleri, yani Young modülü  $E_m$ , Poisson oranı  $\nu_m$  ve yoğunluk  $\rho_m$  olup seçilen sıcaklıklar için sabittirler.

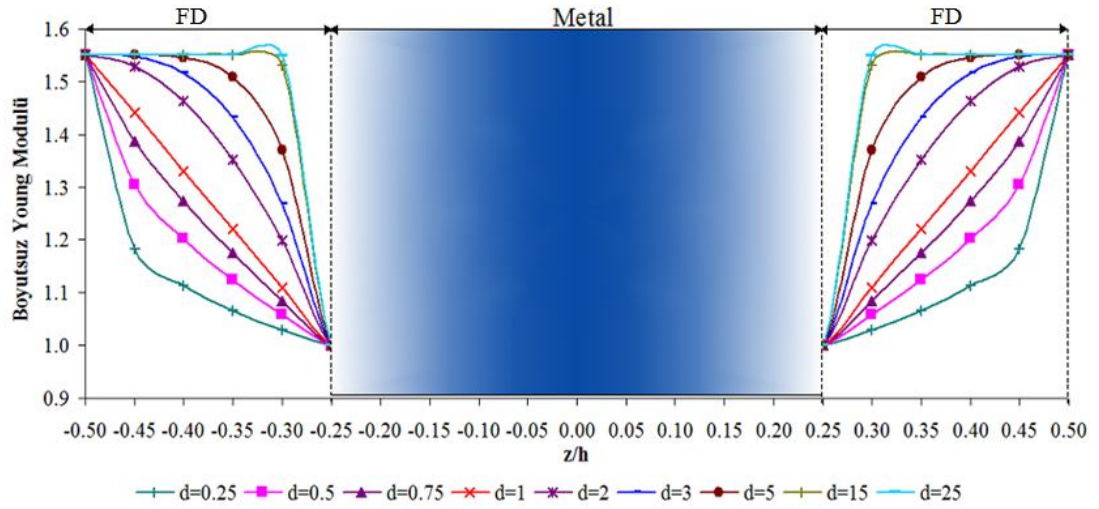
Söz konusu özellikler bir arada dikkate alındığında FD kaplamalı metal silindirik kabuğun malzeme özelliklerinin (Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğun) matematiksel modelleri aşağıdaki şekilde olacaktır (Shen ve Li, 2008; Kiani vd., 2012):

$$E(Z) = \begin{cases} E_{FD}^{dis} & -z_1 \leq Z \leq -z_2 \\ E_m & -z_2 \leq Z \leq z_3 \\ E_{FD}^{ic} & z_3 \leq Z \leq z_4 \end{cases} \quad (3.2.11)$$

$$\nu(Z) = \begin{cases} \nu_{FD}^{dis} & -z_1 \leq Z \leq -z_2 \\ \nu_m & -z_2 \leq Z \leq z_3 \\ \nu_{FD}^{ic} & z_3 \leq Z \leq z_4 \end{cases} \quad (3.2.12)$$

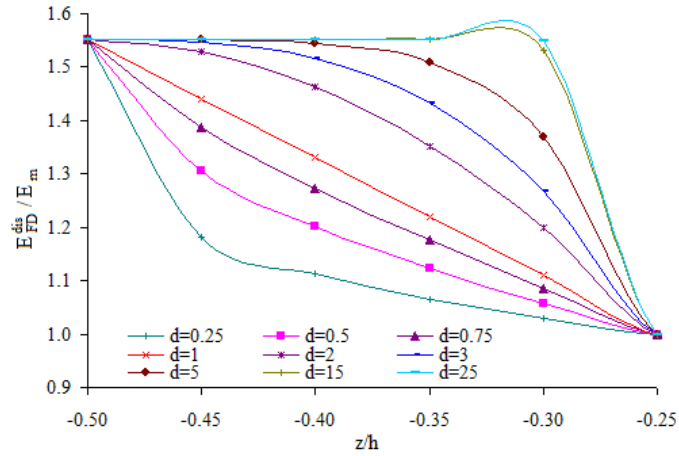
$$\rho(Z) = \begin{cases} \rho_{FD}^{dis} & -z_1 \leq Z \leq -z_2 \\ \rho_m & -z_2 \leq Z \leq z_3 \\ \rho_{FD}^{ic} & z_3 \leq Z \leq z_4 \end{cases} \quad (3.2.13)$$

Şekil 3.2' de, iç ve dıştan FDM'ler ile kaplanmış metal silindirik kabuk için boyutsuz Young modülünün,  $E(Z)/E_m$ , farklı metal hacmi kesir indeksleri için kalınlık koordinatına bağlı değişimi sunulmaktadır. Dikey ekseninde boyutsuz Young modülü ve yatay ekseninde boyutsuz  $Z = z/h$  kalınlık koordinatı sunulmaktadır. FD kaplamanın hacim kesir indeksi  $d=0.25; 0.5; 0.75; 1.0, 2.0; 3.0; 5.0; 15; 25$  şeklinde değişmektedir. FD kaplamanın dış yüzeyi zenginleştirilmiş seramikten oluşur ve hacim kesir bileşeni FD kaplamanın dış yüzeyinden iç yüzeyine doğru sürekli azalır.

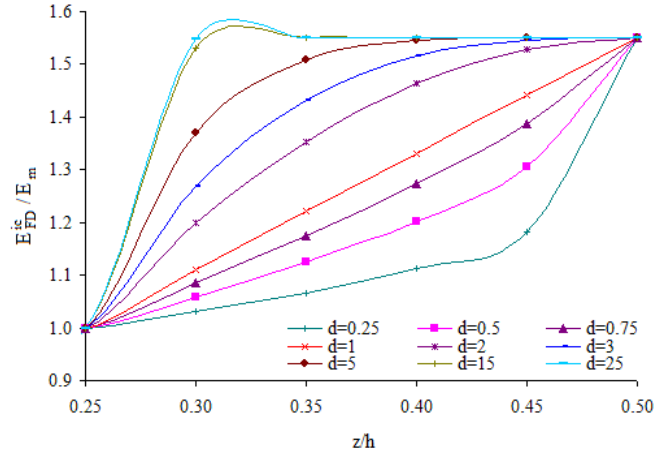


Şekil 3.2. FD-Metal-FD üçlü sistemde FD kaplamaların hacim kesir fonksiyonları için boyutsuz Young modülünün değişimi

Şekil 3.3 a ve b'de, sırasıyla, dış ve içteki fonksiyonel değişimli kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin,  $E_{FD}^{dis}/E_m$  ve  $E_{FD}^{ic}/E_m$ , farklı metal hacmi kesir indeksleri için kalınlık koordinatına bağlı değişimi sunulmaktadır.



a)

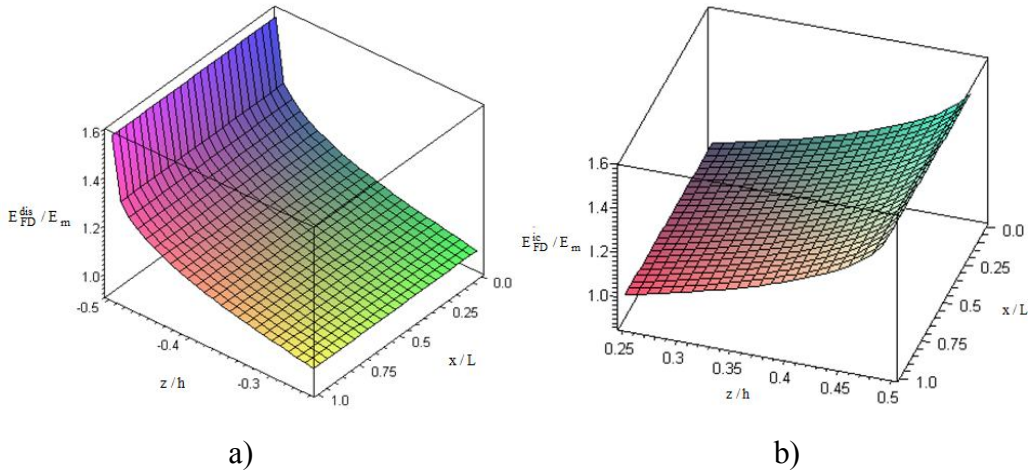


b)

Şekil 3.3. FD dış ve iç kaplamaların değişik hacim kesirleri için boyutsuz Young modüllerinin boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımı

FD kaplamada değişik hacim kesirleri için  $E_{FD}^{dis} / E_m$  ve  $E_{FD}^{ic} / E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına göre değişimi üç boyutlu olarak Şekil 3.4.-3.12'de sunulmaktadır. Şekillerin çiziminde eksenler üzerinde  $E_{FD}^{dis} / E_m$  ve  $E_{FD}^{ic} / E_m$ ,  $x/L$  ve  $z/h$  sembolleri kullanılmıştır.

$d=0.25$  için dış ve iç kaplamadaki  $E_{FD}^{dis} / E_m$  ve  $E_{FD}^{ic} / E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği sırasıyla, Şekil 3.4. a ve b'de sunulmuştur.

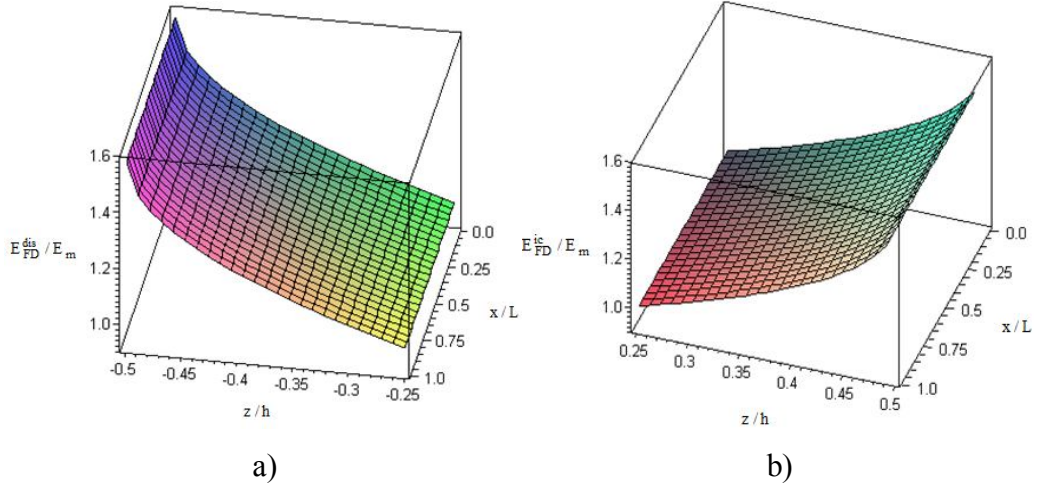


a)

b)

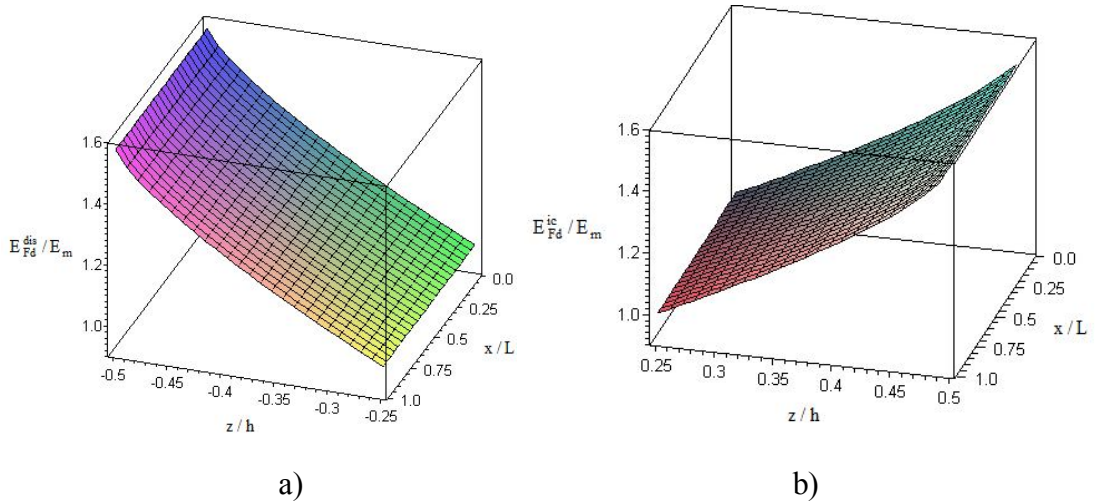
Şekil 3.4.  $d=0.25$  için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü

$d=0.5$  için dış ve iç kaplamalardaki  $E_{FD}^{dis}/E_m$  ve  $E_{FD}^{ic}/E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği, sırasıyla, Şekil 3.5 a ve b'de sunulmuştur.



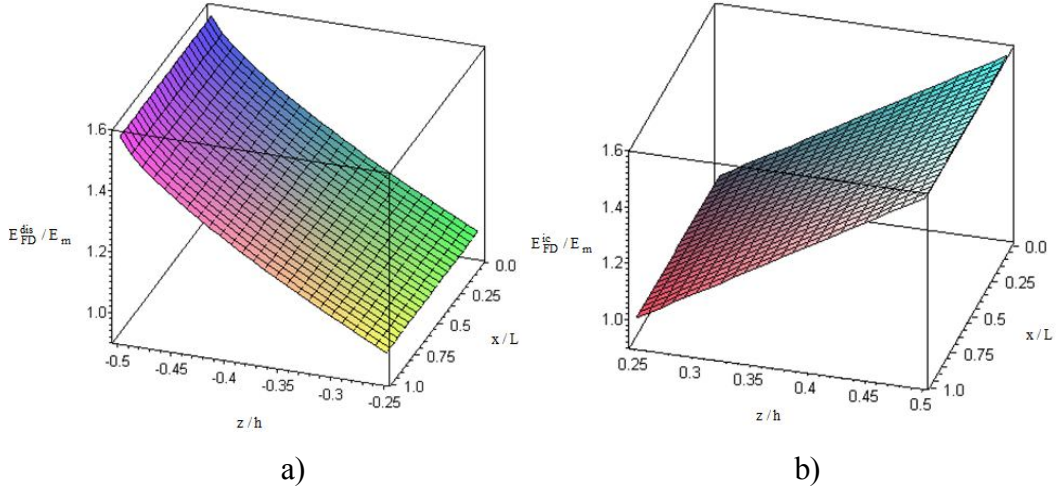
Şekil 3.5.  $d=0.5$  için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü

$d=0.75$  için dış ve iç kaplamalardaki  $E_{FD}^{dis}/E_m$  ve  $E_{FD}^{ic}/E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği, sırasıyla, Şekil 3.6 a ve b'de sunulmuştur.



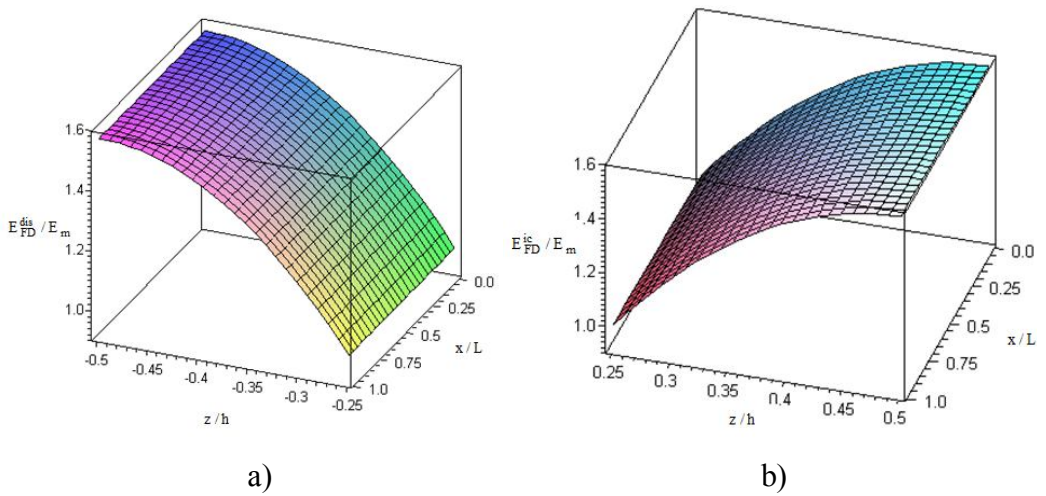
Şekil 3.6.  $d=0.75$  için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü

$d=1$  için dış ve iç kaplamalardaki  $E_{FD}^{dis}/E_m$  ve  $E_{FD}^{ic}/E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği, sırasıyla, Şekil 3.7 a ve b'de sunulmuştur.



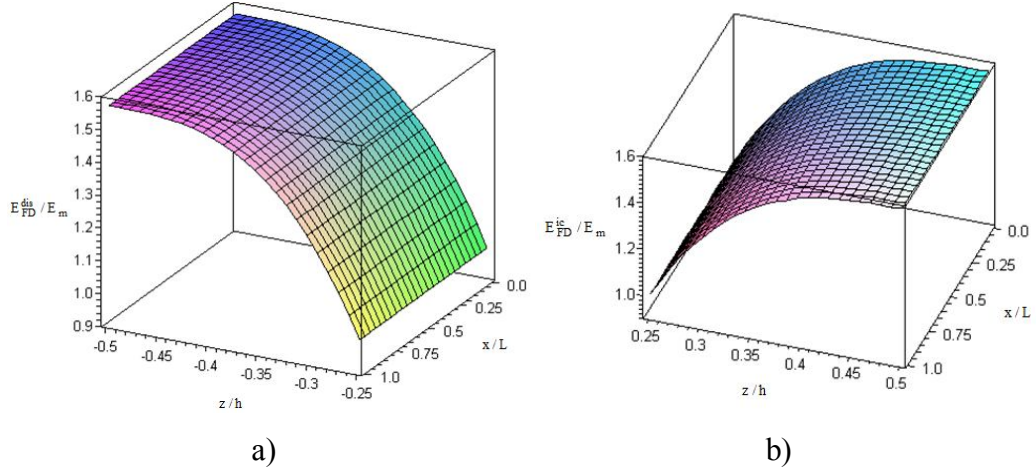
Şekil 3.7.  $d=1.0$  için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü

$d=2$  için dış ve iç kaplamalardaki  $E_{FD}^{dis}/E_m$  ve  $E_{FD}^{ic}/E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği, sırasıyla, Şekil 3.8 a ve b'de sunulmuştur.



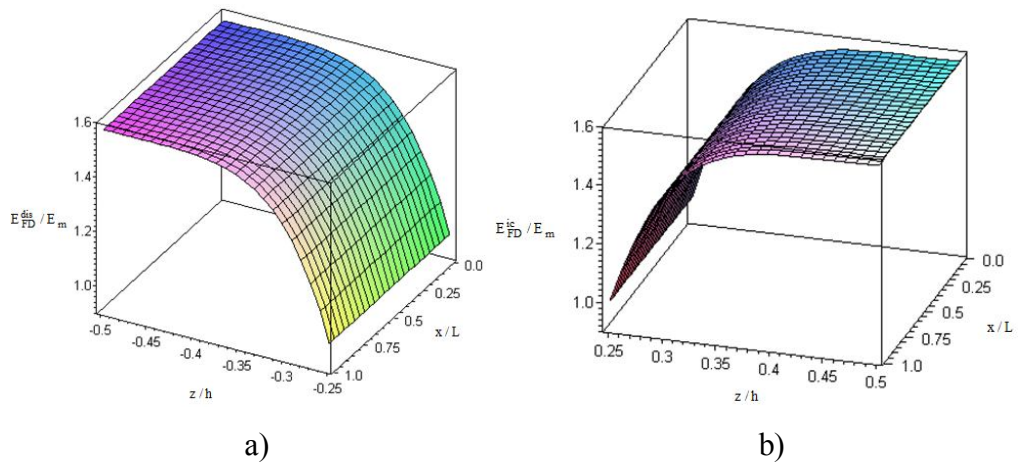
Şekil 3.8.  $d=2$  için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü

$d=3$  için dış ve iç kaplamalardaki  $E_{FD}^{dis}/E_m$  ve  $E_{FD}^{ic}/E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği, sırasıyla, Şekil 3.9 a ve b'de sunulmuştur.



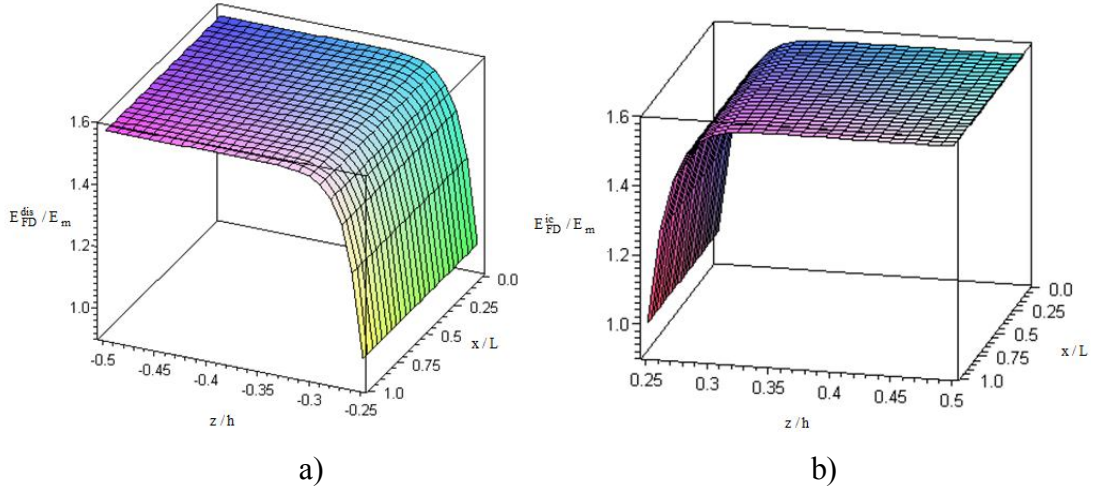
Şekil 3.9.  $d=3$  için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü

$d=5$  için dış ve iç kaplamalardaki  $E_{FD}^{dis}/E_m$  ve  $E_{FD}^{ic}/E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği, sırasıyla, Şekil 3.10 a ve b'de sunulmuştur.



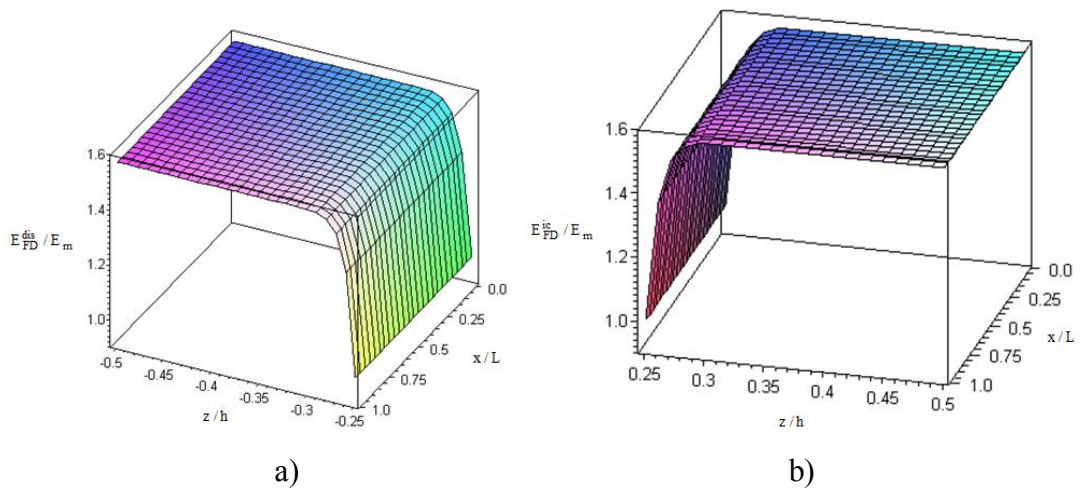
Şekil 3.10.  $d=5$  için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü

$d=15$  için dış ve iç kaplamalardaki  $E_{FD}^{dis}/E_m$  ve  $E_{FD}^{ic}/E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği, sırasıyla, Şekil 3.11 a ve b'de sunulmuştur.



Şekil 3.11.  $d=15$  için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü

$d=25$  için dış ve iç kaplamalardaki  $E_{FD}^{dis}/E_m$  ve  $E_{FD}^{ic}/E_m$  boyutsuz Young modüllerinin  $Z = z/h$  boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımının üç boyutlu grafiği, sırasıyla, Şekil 3. 12 a ve b'de sunulmuştur.



Şekil 3.12.  $d=25$  için dıştaki ve içteki kaplamaların boyutsuz Young modüllerinin üç boyutlu görünümü

### 3.3. İçten ve Dıştan FD Kaplamalı Metal Silindirik Kabukların Temel Denklemlerin Çıkarılışı ve Çözümü

Bu çalışmada göz önüne alınan FD kaplamalı metal silindirik kabuğun  $w$  yer değiştirmesinin kabuk kalınlığına oranla çok daha küçük olduğu dikkate alınmaktadır. Bir başka deyişle  $w \ll h$  eşitsizliği sağlanmaktadır. Deformasyon öncesinde olduğu gibi deformasyon sonrası da tabakalar elastikliğini korumaktadır. Kirchhoff-Love hipotezinin tüm kabuk için geçerli olduğu varsayıldığından tabakaların birinin diğerine basıncı ihmal edilebilir. Bu varsayımlar dikkate alındığında, yukarıda tanımlanan içten ve dıştan kaplamalı silindirik kabuk için referans yüzeyden  $z$  uzaklığındaki yüzeyin deformasyon bileşenleri ile referans yüzeyin deformasyon bileşenleri arasındaki bağıntılar aşağıdaki gibi olur (Gontkevich,1964; Leissa, 1973):

$$\varepsilon_x = e_x - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \varepsilon_y = e_y - z \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \varepsilon_{xy} = e_{xy} - 2z \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (3.3.1)$$

Burada  $\varepsilon_x$  ve  $\varepsilon_y$  içten ve dıştan kaplamalı metal silindirik kabuğun referans yüzeyinden  $z$  uzaklığındaki yüzeydeki  $O_x$  ve  $O_y$  doğrultularındaki normal deformasyon bileşenleri ve  $\varepsilon_{xy}$  referans yüzeyinden  $z$  uzaklığındaki yüzeydeki kayma deformasyonu;  $e_x$  ve  $e_y$  içten ve dıştan kaplamalı metal silindirik kabuğun referans yüzeyindeki  $O_x$  ve  $O_y$  doğrultularındaki normal deformasyon bileşenleri ve  $e_{xy}$  referans yüzeydeki kayma deformasyonu;  $w$  radyal yer değiştirmesinin eğrilik merkezine doğru yönü pozitif kabul edilmektedir.

Kuvvet bileşenleri aşağıdaki integrallerden bulunur (Reddy, 2004):

$$T_x = \int_{-h_1}^{-h_2} \sigma_x^{(1)} dz + \int_{-h_2}^{h_3} \sigma_x^{(2)} dz + \int_{h_3}^{h_4} \sigma_x^{(3)} dz$$

$$T_y = \int_{-h_1}^{-h_2} \sigma_y^{(1)} dz + \int_{-h_2}^{h_3} \sigma_y^{(2)} dz + \int_{h_3}^{h_4} \sigma_y^{(3)} dz \quad (3.3.2)$$

$$T_{xy} = \int_{-h_1}^{-h_2} \sigma_{xy}^{(1)} dz + \int_{-h_2}^{h_3} \sigma_{xy}^{(2)} dz + \int_{h_3}^{h_4} \sigma_{xy}^{(3)} dz$$

Burada  $T_x$  ve  $T_y$ , sırasıyla,  $Ox$  ve  $Oy$  doğrultularındaki normal kuvvetlerdir;  $T_{xy}$ ,  $Oxy$  düzleminde burulma kuvvetidir;  $\sigma_x^{(k)}$  ve  $\sigma_y^{(k)}$  içten ve dıştan FD kaplamalı metal silindirik kabuğun uygun tabakalarındaki sırasıyla,  $Ox$  ve  $Oy$  doğrultularındaki normal gerilmeler;  $k = 1,2,3$  olup tabaka sayısını göstermekte ve  $\sigma_{xy}^{(k)}$  ( $k=1,2,3$ ) içten ve dıştan FD kaplamalı metal silindirik kabuğun tabakalarındaki kayma gerilmeleridir.

Moment bileşenleri aşağıdaki integrallerden bulunur (Reddy, 2004):

$$M_x = \int_{-h_1}^{-h_2} \sigma_x^{(1)} z dz + \int_{-h_2}^{h_3} \sigma_x^{(2)} z dz + \int_{h_3}^{h_4} \sigma_x^{(3)} z dz$$

$$M_y = \int_{-h_1}^{-h_2} \sigma_y^{(1)} z dz + \int_{-h_2}^{h_3} \sigma_y^{(2)} z dz + \int_{h_3}^{h_4} \sigma_y^{(3)} z dz \quad (3.3.3)$$

$$M_{xy} = \int_{-h_1}^{-h_2} \sigma_{xy}^{(1)} z dz + \int_{-h_2}^{h_3} \sigma_{xy}^{(2)} z dz + \int_{h_3}^{h_4} \sigma_{xy}^{(3)} z dz$$

Burada,  $M_x$  ve  $M_y$ , sırasıyla,  $Ox$  ve  $Oy$  eksenlerine göre eğilme momentlerdir;  $M_{xy}$ , burulma momentidir.

FD kaplamalı metal silindirik kabuğun her tabakası için Hooke kuralı geçerli olup gerilme-deformasyon bileşenleri arasındaki bağıntılar ince kabuk teorisi çerçevesinde aşağıdaki şekilde yazılabilir (Reddy, 2004):

$$\sigma_x^{(k)} = Q_{11}^{(k)} \varepsilon_x + Q_{12}^{(k)} \varepsilon_y, \quad \sigma_y^{(k)} = Q_{12}^{(k)} \varepsilon_x + Q_{11}^{(k)} \varepsilon_y, \quad \sigma_{xy}^{(k)} = Q_{66}^{(k)} \varepsilon_{xy} \quad (3.3.4)$$

Burada,  $Q_{ij}^{(k)}$ , ( $i, j = 1, 2, 6; k = 1, 2, 3$ ), FDM ve metal malzeme özelliklerine bağlı nicelikleri içeren katsayılar olup aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Q_{11}^{(1)} = \frac{E_{FD}^{dis}(Z)}{1 - [v_{FD}^{dis}(Z)]^2}, \quad Q_{12}^{(1)} = \frac{v_{FD}^{dis}(Z) E_{fd}(Z)}{1 - [v_{FD}^{dis}(Z)]^2}, \quad Q_{66}^{(1)} = \frac{E_{FD}^{dis}(Z)}{1 + v_{FD}^{dis}(Z)}$$

$$Q_{11}^{(2)} = \frac{E_m}{1 - v_m^2}, \quad Q_{12}^{(2)} = \frac{v_m E_m}{1 - v_m^2}, \quad Q_{66}^{(2)} = \frac{E_m}{1 + v_m} \quad (3.3.5)$$

$$Q_{11}^{(3)} = \frac{E_{FD}^{ic}(Z)}{1 - [v_{FD}^{ic}(Z)]^2}, \quad Q_{12}^{(3)} = \frac{v_{FD}^{ic}(Z) E_{FD}^{ic}(Z)}{1 - [v_{FD}^{ic}(Z)]^2}, \quad Q_{66}^{(3)} = \frac{E_{FD}^{ic}(Z)}{1 + v_{FD}^{ic}(Z)}$$

(3.3.1) ifadesi (3.3.4) bağıntısında yerine yazılıp elde edilen ifadeler (3.3.2) ve (3.3.3) bağıntılarında yerine yazıldığında, içten ve dıştan FDM kaplı metal silindirik kabuğun en kesitindeki kuvvet bileşenlerinin ifadeleri,

$$T_x = a_{10} e_x + a_{20} e_y - a_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - a_{21} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$$

$$T_y = a_{20} e_x + a_{10} e_y - a_{21} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - a_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (3.3.6)$$

$$T_{xy} = a_{60} e_{xy} - a_{61} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

ve moment bileşenlerinin ifadeleri,

$$\begin{aligned}
M_x &= a_{11} e_x + a_{21} e_y - a_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - a_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
M_y &= a_{21} e_x + a_{11} e_y - a_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - a_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}
\end{aligned} \tag{3.3.7}$$

$$M_{xy} = a_{61} e_{xy} - a_{62} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

şeklini alır. Burada, aşağıdaki tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}
a_{1k_1} &= \int_{-h_1}^{-h_2} \frac{E_{FD}^{dis}(Z)}{1 - [v_{FD}^{dis}(Z)]^2} z^{k_1} dz + \frac{E_m}{1 - v_m^2} \int_{-h_2}^{h_3} z^{k_1} dz + \int_{h_3}^{h_4} \frac{E_{FD}^{ic}(Z)}{1 - [v_{FD}^{ic}(Z)]^2} z^{k_1} dz \\
a_{2k_1} &= \int_{-h_1}^{-h_2} \frac{v_{FD}^{dis}(Z) E_{FD}^{dis}(Z)}{1 - [v_{FD}^{dis}(Z)]^2} z^{k_1} dz + \frac{v_m E_m}{1 - v_m^2} \int_{-h_2}^{h_3} z^{k_1} dz + \int_{h_3}^{h_4} \frac{v_{FD}^{ic}(Z) E_{FD}^{ic}(Z)}{1 - [v_{FD}^{ic}(Z)]^2} z^{k_1} dz \\
a_{6k_1} &= \int_{-h_1}^{-h_2} \frac{E_{FD}^{dis}(Z)}{1 + v_{FD}^{dis}(Z)} z^{k_1} dz + \frac{E_m}{1 + v_m} \int_{-h_2}^{h_3} z^{k_1} dz + \int_{h_3}^{h_4} \frac{E_{FD}^{ic}(Z)}{1 + v_{FD}^{ic}(Z)} z^{k_1} dz, k_1 = 0,1,2
\end{aligned} \tag{3.3.8}$$

Temel denklemlerin çıkarılışı Donnell kabuk teorisine dayandığı için  $\Phi_1 = \Phi/h$  Airy gerilme fonksiyonu kullanılmaktadır.  $T_x, T_y, T_{xy}$  kuvvet bileşenleriyle  $\Phi_1 = \Phi/h$  Airy gerilme fonksiyonu arasındaki bağıntılar şu şekildedir (Sewall vd., 1971; Volmir, 1972):

$$T_x = \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2}, T_y = \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2}, T_{xy} = -\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x \partial y} \tag{3.3.9}$$

(3.3.9) bağıntıları (3.3.6) ifadelerinde göz önüne alınarak bazı matematiksel işlemler sonrası, referans yüzeydeki  $e_x, e_y, e_{xy}$  deformasyon bileşenleri için şu ifadeler elde edilir:

$$\begin{aligned}
e_x &= B_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} + B_2 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} - B_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - B_4 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
e_y &= B_2 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} + B_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} - B_4 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - B_3 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
e_{xy} &= -B_5 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} - B_6 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{3.3.10}$$

Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}
B_1 &= a_{10} L_0, \quad B_2 = -a_{20} L_0, \quad B_3 = (a_{20} a_{21} - a_{11} a_{10}) L_0, \\
B_4 &= (a_{20} a_{11} - a_{21} a_{10}) L_0, \quad B_5 = \frac{1}{a_{60}}, \quad B_6 = -\frac{a_{61}}{a_{61}}, \quad L_0 = \frac{1}{a_{10} a_{10} - a_{20} a_{20}}
\end{aligned} \tag{3.3.11}$$

(3.3.10) bağıntıları (3.3.7) ifadelerinde yerine yazıldığında moment bileşenlerinin ifadeleri,

$$\begin{aligned}
M_x &= C_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} + C_2 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} - C_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - C_4 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
M_y &= C_2 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} + C_1 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} - C_4 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - C_3 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\
M_{xy} &= C_5 \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} - C_6 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}
\end{aligned} \tag{3.3.12}$$

Şu şekle dönüşür. Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}
C_1 &= a_{11} B_1 + a_{21} B_2, \quad C_2 = a_{11} B_2 + a_{21} B_1, \quad C_3 = a_{11} B_3 + a_{21} B_4 + a_{12}, \\
C_4 &= a_{11} B_4 + a_{21} B_3 + A_{22}, \quad C_5 = a_{61} B_5, \quad C_6 = a_{61} B_6 + a_{62}
\end{aligned} \tag{3.3.13}$$

Doğrusal kabuk teorisi kullanıldığında silindirik kabuğun değiştirilmiş Donnell tipi hareket ve deformasyon uygunluk denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir (Volmir,1972; Weaver, 1990; Sheng ve Wang, 2008):

$$\frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + \frac{T_y}{R} - \rho_t \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (3.3.14)$$

$$\frac{\partial^2 e_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 e_y}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 e_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (3.3.15)$$

Burada  $\rho_t$  yoğunluk parametresi olup şu tanım geçerlidir:

$$\rho_t = \int_{-h_1}^{-h_2} \rho_{FD}^{dis}(Z) dz + \rho_m (h_2 + h_3) + \int_{-h_3}^{h_4} \rho_{FD}^{ic}(Z) dz \quad (3.3.16)$$

(3.3.9) ve (3.3.12) bağıntıları (3.3.14) denkleminde ve (3.3.10) bağıntısı (3.3.15) denkleminde yerine yazıldığında, bazı işlemlerden sonra aşağıdaki kısmi türevli diferansiyel denklemler elde edilir:

$$L_1(\Phi_1, w) \equiv C_2 \frac{\partial^4 \Phi_1}{\partial x^4} + 2(C_1 - C_5) \frac{\partial^4 \Phi_1}{\partial x^2 \partial y^2} + C_2 \frac{\partial^4 \Phi_1}{\partial y^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} - C_3 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - 2(C_4 + C_6) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} \quad (3.3.17)$$

$$-C_3 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \rho_t \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0$$

$$L_2(\Phi_1, w) \equiv B_1 \frac{\partial^4 \Phi_1}{\partial x^4} + 2(B_2 + B_5) \frac{\partial^4 \Phi_1}{\partial x^2 \partial y^2} + B_1 \frac{\partial^4 \Phi_1}{\partial y^4} - B_4 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (3.3.18)$$

$$- 2(B_3 - B_6) \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} - B_4 \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$$

Kaplamalı silindirik kabuğun kenarları basit mesnetli sınır koşullarına tabi olduğundan (3.3.17) ve (3.3.18) diferansiyel denklemlerinin çözümü aşağıdaki gibi aranır (Volmir, 1972; Nayfeh ve Mook, 1979; Amabili, 2008):

$$w = f(t)\sin(m_1x)\sin(n_1y), \quad \Phi_1 = \phi(t)\sin(m_1x)\sin(n_1y) \quad (3.3.19)$$

Burada,  $f(t)$  ve  $\phi(t)$  zamana bağlı bilinmeyen fonksiyonlar,  $n_1 = \frac{n}{R}$  olup  $n$  çevre doğrultusunda ( $Oy$ ) dalga sayısı ve  $m_1 = \frac{m\pi}{L}$  olup  $m$  ana doğrultuda ( $Ox$ ) dalga sayısıdır.

(3.3.19) ifadeleri  $x = 0; L$  olduğunda  $w = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0$  basit mesnetli sınır koşullarını sağlar.

(3.3.17) ve (3.3.18) denklemlerine Galerkin yöntemi uygulayalım:

$$\int_0^{2\pi R} \int_0^L L_1(\Phi_1, w) \sin(m_1x)\sin(n_1y) dx dy = 0 \quad (3.3.20)$$

$$\int_0^{2\pi R} \int_0^L L_2(\Phi_1, w) \sin(m_1x)\sin(n_1y) dx dy = 0 \quad (3.3.21)$$

$L_1(\Phi_1, w)$  ve  $L_2(\Phi_1, w)$  diferansiyel operatörlerinin (3.3.17) ve (3.3.18) ifadeleri (3.3.20) ve (3.3.21) denklemlerinde yerine yazılıp (3.3.19) dikkate alınarak integrallemeden sonra elde edilen denklemlerden  $\phi(t)$  değişkeni yok edildiğinde, FD kaplamalı metal silindirik kabuğun serbest titreşimi için aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilir:

$$\frac{d^2 f(t)}{dt^2} + \frac{1}{\Lambda_5} \left( \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{\Lambda_3} + \Lambda_4 \right) f(t) = 0 \quad (3.3.22)$$

Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}
\Lambda_1 &= m_1^2 R - C_2(m_1^4 + n^4) - 2(C_1 - C_5)m_1^2 n^2, \\
\Lambda_2 &= m_1^2 R + B_4(m_1^4 + n^4) + 2(B_3 - B_6)m_1^2 n^2, \\
\Lambda_3 &= B_1(m_1^4 + n^4) + 2(B_2 + B_5)m_1^2 n^2, \\
\Lambda_4 &= C_3(m_1^4 + n^4) + 2(C_4 + C_6)m_1^2 n^2, \quad \Lambda_5 = \rho_1 R^4.
\end{aligned} \tag{3.3.23}$$

(3.3.2) diferansiyel denkleminde FD kaplamalı metal silindirik kabuğun  $\omega(1/sn)$  titreşim frekansı için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{\Lambda_5} \left( \frac{\Lambda_1 \Lambda_2}{\Lambda_3} + \Lambda_4 \right)} \tag{3.3.24}$$

FD kaplamalı metal silindirik kabuğun  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresi için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\omega_1 = \omega R \sqrt{(1 - v_m^2) \rho_m / E_m} \tag{3.3.25}$$

(3.3.24) ve (3.3.25) ifadelerinde  $V_m^{dis} = V_m^{ic} = 1$  olduğunda zenginleştirilmiş metalden oluşan tek tabakalı silindirik kabuğun  $\omega_m^{tektab}(1/sn)$  titreşim frekansı için aşağıdaki ifade özel olarak elde edilir:

$$\omega_m^{tektab} = \sqrt{\frac{E_m}{12(1 - v_m^2)} \left( \frac{h}{R} \right)^3 \frac{1}{\rho_m R h} \left\{ \frac{m_1^4}{(m_1^2 + n^2)^2} \frac{12(1 - v_m^2) R^2}{h^2} + (m_1^2 + n^2)^2 \right\}} \tag{3.3.26}$$

FD kaplamalı metal silindirik kabuğun  $\omega_{1m}^{tektab}$  boyutsuz frekans parametresi için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\omega_{1m}^{\text{tektab}} = \frac{h}{2\sqrt{3}R} \sqrt{\frac{m_1^4}{(m_1^2 + n^2)^2} \frac{12(1 - \nu_m^2)R^2}{h^2} + (m_1^2 + n^2)^2} \quad (3.3.27)$$

FD kaplamalı ve tek tabakalı metal silindirik kabukların boyutlu ve boyutsuz titreşim frekanslarının minimum değerlerini bulmak için (3.3.25)-(3.3.27) ifadeleri (m,n) dalga sayılarına göre minimize edilir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

### 4.1. Karşılaştırmalar

Bu alt başlıkta altı farklı kaynaktan elde edilen sonuçlarla karşılaştırma yapılmıştır. Tez çalışmasında elde edilen sonuçların doğruluğunu teyit etmek için önce pür metalden oluşan değişik boyutlara sahip silindirik kabuklar için elde edilen  $\Omega = \omega(R^2/h)\sqrt{(1-v_{0m}^2)\rho_{0m}/E_{0m}}$  boyutsuz frekans parametresi değerleri Weingarten (1964a-b), Soedel (1980), Calladine (1983), Koga (1988) ve El-Mously (2003) çalışmalarındaki uygun sonuçlarla karşılaştırılmış ve Çizelge 4.1’de sunulmuştur. Karşılaştırma için pür (metal) çelik malzeme dikkate alınmıştır:  $E_{0m} = 2 \times 10^{11}$  (Pa),  $v_{0m} = 0.3$ ,  $\rho_{0m} = 7800$  kg/m<sup>3</sup>. Silindirik kabuk karakteristikleri şu şekildedir:  $L/R = 1$ ;  $R/h = 200; 500$ . Tüm hesaplarda boyutsuz frekans parametresine karşı gelen boyuna dalga sayısı  $m=1$  olduğundan çizelgede sadece çevresel dalga sayısı (n) değerleri sunulmaktadır. Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi tez çalışmasında elde edilen sonuçlar Weingarten (1964a-b), Soedel (1980), Calladine (1983), Koga (1988) ve El-Mously (2003) çalışmalarındaki sonuçlarla uyum içindedir.

Çizelge 4.1. Tek tabakalı pür metal silindirik kabukların boyutsuz frekans parametresi değerlerinin Weingarten (1964a-b), Soedel (1980), Calladine (1983), Koga (1988) ve El-Mously (2003) çalışmaları ile karşılaştırılması

| Karşılaştırmalar                         | R/h =200     |            | R/h =500     |            |
|--|--------------|------------|--------------|------------|
|  | $\Omega$ (n) | Hata oranı | $\Omega$ (n) | Hata oranı |
| Weingarten (1964a ve b) ve Soedel (1980) | 32.517(8)    | 2.18%      | 51.491(11)   | 1.31%      |
| Calladine (1983) ve Koga (1988)          | 32.451(8)    | 2.38%      | 50.931(11)   | 2.38%      |
| El-Mously (2003) -Flugge teorisi         | 32.753(8)    | 1.47%      | 51.715(11)   | 0.88%      |
| El-Mously (2003)-Sap 2000                | 32.794(8)    | 1.34%      | 51.763(11)   | 0.79%      |
| Tez çalışması                            | 33.241(8)    | -          | 52.174(11)   | -          |

Çizelge 4.2’de değişik L/R oranı ve hacim kesir indeksi için pür FDM silindirik kabuğun boyutsuz frekans parametresinin değerleri Matsunaga (2009) çalışmasında

elde edilen uygun sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırılmalarda kullanılan silindirik kabuk karakteristikleri Çizelge 4.2 içinde sunulmaktadır. Bu karşılaştırmada boyutsuz frekans parametresi  $\omega_1^{\text{tektab}} = \omega h \sqrt{E_c / \rho_c}$  olarak dikkate alınmıştır. FDM (Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) malzeme özellikleri aşağıda sunulmaktadır:

Metal (Alüminyum, Al) :  $E_m = 7 \times 10^{10} (\text{N/m}^2)$ ,  $\rho_m = 2702 (\text{kg/m}^3)$ ,  $\nu_m = 0.3$ .

Seramik (Alüminyum oksit, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>):  $E_s = 3.8 \times 10^{11} (\text{N/m}^2)$ ,  $\rho_s = 3800 (\text{kg/m}^3)$ ,  $\nu_s = 0.3$ .

Çizelge 4.2' den, tez çalışmasında elde edilen sonuçların Matsunaga (2009) çalışmasında elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğu görülmektedir. Tez çalışmasında elde edilen sonuçlarla Matsunaga (2009) çalışması arasındaki %1 ile %2 arasında değişen farkın nedeni, Matsunaga (2009) çalışmasında kayma deformasyonu da dikkate almış olmasıdır.

Çizelge 4.2. Pür FDM (Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) silindirik kabuğun boyutsuz titreşim frekansının Matsunaga (2009) çalışması ile karşılaştırılması

|     |      | $\omega_1^{\text{tektab}} = \omega h \sqrt{E_c / \rho_c} \times 10^4$ |            |            |           |            |                  |
|-----|------|---|------------|------------|-----------|------------|------------------|
| L/R | R/h  | d = 0<br>pür<br>seramik   | d = 0.5    | d = 1      | d=4       | d=10       | d→∞<br>pür metal |
| 2   | 1000 | 0.3844(9)   | 0.3368(9)  | 0.3068(9)  | 0.2571(9) | 0.2351(9)  | 0.1957(9)        |
| 5   |      | 0.1503(6)   | 0.1314(6)  | 0.1201(6)  | 0.1004(6) | 0.09247(6) | 0.07654(6)       |
|     |      | Tez çalışması   |            |            |           |            |                  |
| L/R | R/h  | d = 0<br>pür<br>seramik   | d = 0.5    | d = 1      | d=4       | d=10       | d→∞<br>pür metal |
| 2   | 1000 | 0.3888(9)   | 0.3401(10) | 0.3101(10) | 0.2599(9) | 0.2378(9)  | 0.1978(9)        |
| 5   |      | 0.1546(6)   | 0.1348(6)  | 0.1233(6)  | 0.1032(6) | 0.09514(6) | 0.07868(6)       |

Yukarıda yapılan karşılaştırmalar tez çalışmasının doğru olduğunu kanıtlamaktadır.

## 4.2. FD Kaplamaların Ve FD Kaplamalı Silindirik Kabukların Malzeme Özellikleri

Sayısal analizler kısmında metal malzeme olarak Paslanmaz Çelik (SUS304), Titanyum Alaşımı (Ti-6Al-4V), Nikel (Ni) ve seramik malzeme olarak Silikon Nitrat ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), Zirkonyum ( $\text{ZrO}_2$ ), Alüminyum Oksit ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ele alınmakta ve fonksiyonel değişimli kaplamaların oluşumunda beş değişik tip seramik ve metalin kombinasyonları kullanılmaktadır. Birinci grup malzemeler; SUS304/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  veya FDA ile ifade edilen Paslanmaz Çelik ve Silikon Nitrat'ın karışımıdır. İkinci grup, Ti-6Al-4V/ $\text{ZrO}_2$  veya FDB ile ifade edilen Titanyum Alaşımı ve Zirkonyum'un bir kombinasyonudur. Üçüncü grup malzemeler; SUS304/  $\text{ZrO}_2$  veya FDC ile ifade edilen Paslanmaz Çelik ve Zirkonyum'un karışımıdır. Dördüncü grup, Ti-6Al-4V/ $\text{Si}_3\text{N}_4$  veya FDD ile ifade edilen Titanyum Alaşımı ve Silikon Nitrat'ın karışımıdır. Beşinci grup, Ni/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  veya FDE ile ifade edilen Nikel ve Alüminyum Oksit 'in bir kombinasyonudur. Dolayısıyla, sayısal hesaplarda aşağıdaki FDM malzeme çeşitleri kullanılacaktır:

|                                    |      |     |
|------------------------------------|------|-----|
| SUS304/ $\text{Si}_3\text{N}_4$    | veya | FDA |
| Ti-6Al-4V/ $\text{ZrO}_2$          | veya | FDB |
| SUS304/ $\text{ZrO}_2$             | veya | FDC |
| Ti-6Al-4V/ $\text{Si}_3\text{N}_4$ | veya | FDD |
| Ni/ $\text{Al}_2\text{O}_3$        | veya | FDE |

FD kaplamalı metal silindirik kabuklar oluşturulduğunda ortadaki tabakada kullanılan malzeme, kaplama için kullanılan metal malzemenin aynısı olur. Dolayısıyla, beş çeşit üç tabakalı silindirik kabuk ele alınmaktadır: Birinci çeşit üç tabakalı silindirik kabukta kaplama FDA ve orta tabaka SUS304' den oluşmakta, yani FDA/ SUS304/ FDA şeklinde tasarlanmıştır. İkinci çeşit üç tabakalı silindirik kabukta kaplama FDB ve orta tabaka Ti-6Al-4V' dir, yani üç tabakalı silindirik kabuk FDB/Ti-6Al-4V/FDB şeklinde tasarlanmıştır. Üçüncü çeşit üç tabakalı silindirik kabukta kaplama FDC ve orta tabaka SUS304' den oluşmakta, yani FDC/ SUS304/ FDC şeklinde tasarlanmıştır. Dördüncü çeşit üç tabakalı silindirik kabukta kaplama FDD ve orta tabaka yine Ti-6Al-4V' dir, yani üç tabakalı silindirik kabuk FDD/ Ti-6Al-4V/FDD şeklinde tasarlanmıştır. Beşinci çeşit üç tabakalı silindirik

kabukta kaplama FDE ve orta tabaka Nikel'den oluşur, yani üç tabakalı silindirik kabuk FDE/ Ni/ FDE şeklinde tasarlanmıştır. Dolayısıyla, sayısal hesaplarda aşağıdaki FD kaplamalı metal silindirik kabuklar ele alınacaktır:

FDA/ SUS304/ FDA

FDB/Ti-6Al-4V/FDB

FDC/ SUS304/ FDC

FDD/ Ti-6Al-4V/FDD

FDE/ Ni / FDE

Söz konusu malzemelerin özellikleri Çizelge 4.3-4.5' de sunulmaktadır. Çizelge 4.3-4.5' de sunulan  $E_0, \nu_0, \rho_0$ , sırasıyla, hammaddenin Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluğu;  $E_f, \nu_f, \rho_f$  sırasıyla, efektif Young modülü, Poisson oranı ve yoğunluktur.

Çizelge 4.3. Seramik ve metalin Young modüllerinin (Pa) sıcaklığa bağlı katsayıları (Reddy ve Chin, 1998; Shen 2009)

| Malzemeler   | $E_0$                   | $E_{-1}$ | $E_1$                   | $E_2$                   | $E_3$                    | $E_f$                    |
|--|-------------------------|----------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Zirkonyum<br>(ZrO <sub>2</sub> )                     | $2.4427 \times 10^{11}$ | 0        | $-1.371 \times 10^{-3}$ | $1.214 \times 10^{-6}$  | $-3.681 \times 10^{-10}$ | $1.68063 \times 10^{11}$ |
| Alüminyum Oksit<br>(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | $3.8000 \times 10^{11}$ | 0        | 0                       | 0                       | 0                        | $3.8000 \times 10^{11}$  |
| Silikon Nitrat<br>(Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> )  | $3.4843 \times 10^{11}$ | 0        | $-3.070 \times 10^{-4}$ | $2.160 \times 10^{-7}$  | $-8.946 \times 10^{-11}$ | $3.22271 \times 10^{11}$ |
| Titanyum Alaşımı<br>(Ti-6Al-4V)                      | $1.2256 \times 10^{11}$ | 0        | $-4.586 \times 10^{-4}$ | 0                       | 0                        | $1.05698 \times 10^{11}$ |
| Paslanmaz Çelik<br>(SUS304)                          | $2.0104 \times 10^{11}$ | 0        | $3.079 \times 10^{-4}$  | $-6.534 \times 10^{-7}$ | 0                        | $2.07788 \times 10^{11}$ |
| Nikel (Ni)   | $2.2395 \times 10^{11}$ | 0        | $-2.794 \times 10^{-4}$ | $-3.998 \times 10^{-9}$ | 0                        | $2.05098 \times 10^{10}$ |

Çizelge 4.4. Seramik ve metalin Poisson oranlarının sıcaklığa bağlı katsayıları (Reddy ve Chin, 1998; Shen 2009)

| Malzemeler  | $\nu_0$ | $\nu_{-1}$ | $\nu_1$                 | $\nu_2$                | $\nu_3$ | $\nu_f$  |
|---|---------|------------|-------------------------|------------------------|---------|----------|
| Zirkonyum (ZrO <sub>2</sub> )                     | 0.2882  | 0          | $1.133 \times 10^{-4}$  | 0                      | 0       | 0.297996 |
| Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 0.3     | 0          | 0                       | 0                      | 0       | 0.3      |
| Silikon Nitrat (Si <sub>3</sub> Ni <sub>4</sub> ) | 0.2400  | 0          | 0                       | 0                      | 0       | 0.2400   |
| Titanyum Alaşımı (Ti-6Al-4V)                      | 0.2884  | 0          | $1.121 \times 10^{-4}$  | 0                      | 0       | 0.298099 |
| Paslanmaz Çelik (SUS304)                          | 0.3262  | 0          | $-2.002 \times 10^{-4}$ | $3.797 \times 10^{-7}$ | 0       | 0.317756 |
| Nikel (Ni)  | 0.31    | 0          | 0                       | 0                      | 0       | 0.31     |

Çizelge 4.3 ve 4.4 'de malzeme özellikleri T(K)=300K'de değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.5. Seramik ve metalin malzeme yoğunlukları (kg/m<sup>3</sup>) (Reddy ve Chin, 1998)

| Malzemeler  | $\rho_0$ | $\rho_{-1}$ | $\rho_1$ | $\rho_2$ | $\rho_3$ | $\rho_f$ |
|---|----------|-------------|----------|----------|----------|----------|
| Zirkonyum (ZrO <sub>2</sub> )                     | 5680     | 0           | 0        | 0        | 0        | 5680     |
| Alüminyum Oksit (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 3800     | 0           | 0        | 0        | 0        | 3800     |
| Silikon Nitrat (Si <sub>3</sub> Ni <sub>4</sub> ) | 2370     | 0           | 0        | 0        | 0        | 2370     |
| Titanyum Alaşımı (Ti-6Al-4V)                      | 4420     | 0           | 0        | 0        | 0        | 4420     |
| Paslanmaz Çelik (SUS304)                          | 8166     | 0           | 0        | 0        | 0        | 8166     |
| Ni (Ni)   | 8900     | 0           | 0        | 0        | 0        | 8900     |

### 4.3. Çeşitli FD Kaplamalı Silindirik Kabukların Titreşim Analizi

Sayısal hesaplar ve görsel sunumlarda MAPLE 14 bilgisayar programı, Excel, Auto Cad programları kullanılmaktadır. Sayısal hesaplarda FD kaplamalı ve tek tabakalı metal silindirik kabukların boyutsuz frekans parametresinin minimum değerlerini bulmak için (3.3.24)-(3.3.27) ifadeleri kullanılmaktadır.

Çizelge 4.6'de zenginleştirilmiş metal, pür FDM ve FD/Metal/FD silindirik kabukların boyutsuz frekans parametresi ( $\omega_1$ ) ve ona karşı gelen çevresel dalga sayısının ( $n$ ), değişik  $d$  hacim kesir indeksi değerleri için  $h_m / h_{FD}$  oranına bağlı değişimi sunulmaktadır.  $h_m / h_{FD}$  oranı artığında FDA/SUS304/FDA, FDB/Ti-6Al-4V/FDB, FDC/SUS304/FDC, FDD/Ti-6Al-4V/FDD ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değerleri azalır, ( $n$ ) çevresel dalga sayıları ise sabit kalır. FDA/SUS304/FDA kabuklar için  $d=5$  ve  $h_m / h_{FD} = 2$  için etki %35.90,  $h_m / h_{FD} = 8$  için söz konusu etki %13.88'dir. FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabuklar için  $d=5$  ve  $h_m / h_{FD} = 2$  olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %64.14,  $h_m / h_{FD} = 8$  için bu etki %30.11'dir. FDC/SUS304/FDC kabuklar için  $d=5$  ve  $h_m / h_{FD} = 2$  olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %0.56,  $h_m / h_{FD} = 8$  için etki oldukça az olup %(-0.30)'dur. FDD/Ti-6Al-4V/FDD kabuklar için  $d=5$  ve  $h_m / h_{FD} = 2$  olduğunda etki %9.77,  $h_m / h_{FD} = 8$  için etki %5.55'dir. FDE/Ni/FDE kabuklar için  $d=5$  ve  $h_m / h_{FD} = 2$  olduğunda etki %31.42,  $h_m / h_{FD} = 8$  için etki %12.78'dir. Hacim kesir indeksi  $d$  artığında pür FDM ve tüm çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz titreşim frekans değerleri artar, çevresel dalga sayısı ( $n$ ) ise sabit kalır. FDA/SUS304/FDA kabuklar için  $h_m / h_{FD} = 2$  ve  $d=0.25$  olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %7.87,  $d=15$  için ise söz konusu etki %41.09'dur. FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabuklar için  $h_m / h_{FD} = 2$  ve  $d=0.25$  olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %17.55,  $d=15$  için ise etki %70.72'dir. FDC/SUS304/FDC kabuklar için  $h_m / h_{FD} = 2$  ve  $d=0.25$  olduğunda etki %(-0.06),  $d=15$  için söz konusu etki %0.88'dir. FDD/Ti-6Al-4V/FDD kabuklar için  $h_m / h_{FD} = 2$  ve  $d=0.25$  olduğunda etki %3.10,  $d=15$  için etki %10.33'dür.

FDE/Ni/FDE kabuklar için  $h_m / h_{FD} = 2$  ve  $d=0.25$  olduğunda etki %7.27,  $d=15$  için etki %35.54'dır.

FDA/SUS304/FDA, FDB/Ti-6Al-4V/FDB, FDC/SUS304/FDC, FDD/Ti-6Al-4V/FDD ve FDE/Ni/FDE silindirik kabuklar için  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değerleri kendi aralarında kıyaslandığında en küçük değer FDC/SUS304/FDC kabukta en büyük değer ise FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabukta olduğu gözlenmiştir.

$h_m / h_{FD}$  oranı arttığında tüm çeşit FD/Metal/FD silindirik kabuklarda kompozisyonel profillerin boyutsuz frekans parametrelerine etkisi azalır.

FD/Metal/FD kabukların boyutsuz frekans parametresi uygun zenginleştirilmiş metal kabukların boyutsuz titreşim frekans değerleri ile kıyaslandığında kompozisyonel profillerin en az etkisi FDC/SUS304/FDC kabukta, en fazla etki ise FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabuklarda ortaya çıkmaktadır.

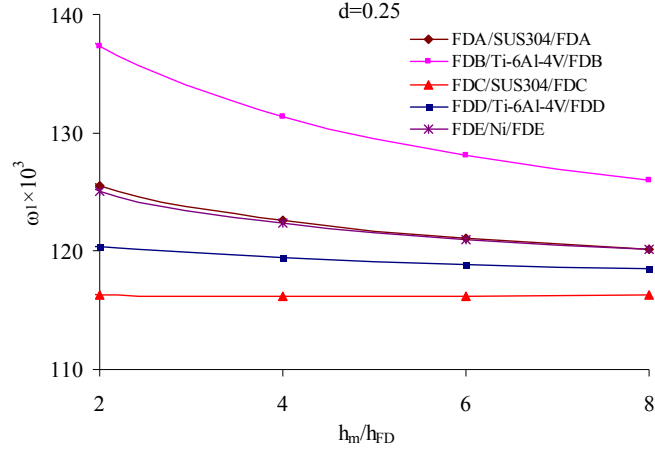
Çizelge 4.6. Üç çeşit zenginleştirilmiş metal, beş çeşit pür FDM ve beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresi ve ona karşı gelen çevresel dalga sayısının (n), değişik hacim kesir indeksi için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi ( $R/h=100$ ,  $L/R=2$ )

| $\omega_1 \times 10^3$ (n) |            |            |            |            |            |            |            |            |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| FDA/SUS304/FDA             |            |            |            |            |            |            |            |            |
| $h_m/h_{FD}$               | SUS304     | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| Pür FDA                    |            | 131.578(5) | 143.120(5) | 152.462(5) | 160.282(5) | 182.477(5) | 214.012(5) | 242.795(5) |
| 2                          | 116.369(5) | 125.527(5) | 131.883(5) | 136.569(5) | 140.173(5) | 148.907(5) | 158.141(5) | 164.190(5) |
| 4                          |            | 122.600(5) | 126.843(5) | 129.924(5) | 132.263(5) | 137.817(5) | 143.496(5) | 147.096(5) |
| 6                          |            | 121.095(5) | 124.288(5) | 126.593(5) | 128.334(5) | 132.438(5) | 136.587(5) | 139.192(5) |
| 8                          |            | 120.177(5) | 122.739(5) | 124.582(5) | 125.971(5) | 129.234(5) | 132.516(5) | 134.569(5) |
| FDB/Ti-6Al-4V/FDB          |            |            |            |            |            |            |            |            |
| $h_m/h_{FD}$               | Ti-6Al-4V  | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| Pür FDB                    |            | 144.882(5) | 161.898(5) | 174.153(5) | 183.628(5) | 207.565(5) | 236.335(5) | 259.249(5) |
| 2                          | 116.788(5) | 137.280(5) | 149.847(5) | 158.422(5) | 164.659(5) | 178.610(5) | 191.693(5) | 199.376(5) |
| 4                          |            | 131.335(5) | 140.387(5) | 146.597(5) | 151.125(5) | 161.275(5) | 170.823(5) | 176.442(5) |
| 6                          |            | 128.071(5) | 135.168(5) | 140.061(5) | 143.640(5) | 151.699(5) | 159.329(5) | 163.851(5) |
| 8                          |            | 126.006(5) | 131.848(5) | 135.892(5) | 138.859(5) | 145.564(5) | 151.950(5) | 155.757(5) |
| FDC/SUS304/FDC             |            |            |            |            |            |            |            |            |
| $h_m/h_{FD}$               | SUS304     | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| Pür FDC                    |            | 117.242(5) | 118.096(5) | 118.867(5) | 119.543(5) | 121.454(5) | 123.663(5) | 124.812(5) |
| 2                          | 116.369(5) | 116.296(5) | 116.305(5) | 116.347(5) | 116.401(5) | 116.624(5) | 117.024(5) | 117.393(5) |
| 4                          |            | 116.23(5)  | 116.175(5) | 116.146(5) | 116.135(5) | 116.152(5) | 116.249(5) | 116.364(5) |
| 6                          |            | 116.237(5) | 116.164(5) | 116.121(5) | 116.094(5) | 116.057(5) | 116.064(5) | 116.101(5) |
| 8                          |            | 116.247(5) | 116.176(5) | 116.131(5) | 116.101(5) | 116.046(5) | 116.021(5) | 116.026(5) |
| FDD/Ti-6Al-4V/FDD          |            |            |            |            |            |            |            |            |
| $h_m/h_{FD}$               | Ti-6Al-4V  | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| Pür FDD                    |            | 120.525(5) | 122.250(5) | 123.218(5) | 123.838(5) | 125.105(5) | 126.620(5) | 128.277(5) |
| 2                          | 116.788(5) | 120.413(5) | 122.530(5) | 123.895(5) | 124.835(5) | 126.739(5) | 128.196(5) | 128.849(5) |
| 4                          |            | 119.468(5) | 121.102(5) | 122.193(5) | 122.967(5) | 124.616(5) | 126.018(5) | 126.747(5) |
| 6                          |            | 118.905(5) | 120.225(5) | 121.121(5) | 121.766(5) | 123.173(5) | 124.425(5) | 125.112(5) |
| 8                          |            | 118.536(5) | 119.64(5)  | 120.397(5) | 120.947(5) | 122.162(5) | 123.271(5) | 123.898(5) |
| FDE/Ni/FDE                 |            |            |            |            |            |            |            |            |
| $h_m/h_{FD}$               | Ni         | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| Pür FDE                    |            | 130.277(5) | 140.118(5) | 147.721(5) | 153.851(5) | 170.179(5) | 191.073(5) | 208.303(5) |
| 2                          | 116.538(5) | 125.016(5) | 130.763(5) | 134.924(5) | 138.078(5) | 145.546(5) | 153.150(5) | 157.955(5) |
| 4                          |            | 122.354(5) | 126.255(5) | 129.056(5) | 131.163(5) | 136.096(5) | 141.029(5) | 144.092(5) |
| 6                          |            | 120.968(5) | 123.928(5) | 126.046(5) | 127.636(5) | 131.346(5) | 135.038(5) | 137.323(5) |
| 8                          |            | 120.117(5) | 122.503(5) | 124.208(5) | 125.487(5) | 128.466(5) | 131.428(5) | 133.259(5) |

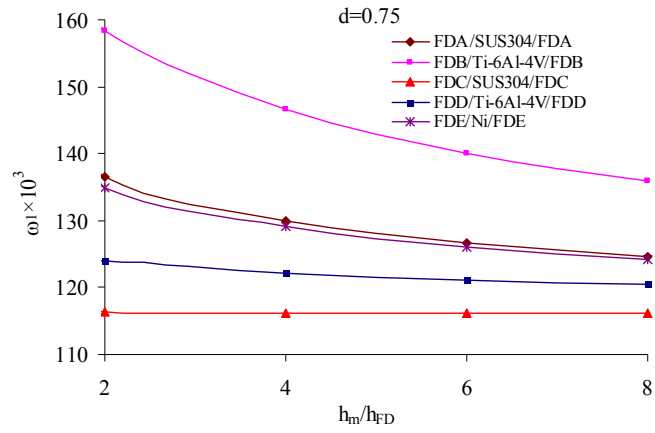
Çizelge 4.6 kullanılarak zenginleştirilmiş metal, pür FDM ve FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik hacim kesir indeksi için  $h_m / h_{FD}$  oranına bağlı değişimi grafiksel olarak aşağıda sunulmaktadır.

Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabuklar için  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d < 1$  ( $d=0.25$  ve  $0.75$ ) için  $h_m / h_{FD}$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.1.'de

sunulmaktadır.  $h_m/h_{FD}$  oranı arttığında boyutsuz frekans parametresinin değeri azalır. Kabuk karakteristikleri  $R/h=100$  ve  $L/R=2$  olarak göz önüne alınmıştır.



a)

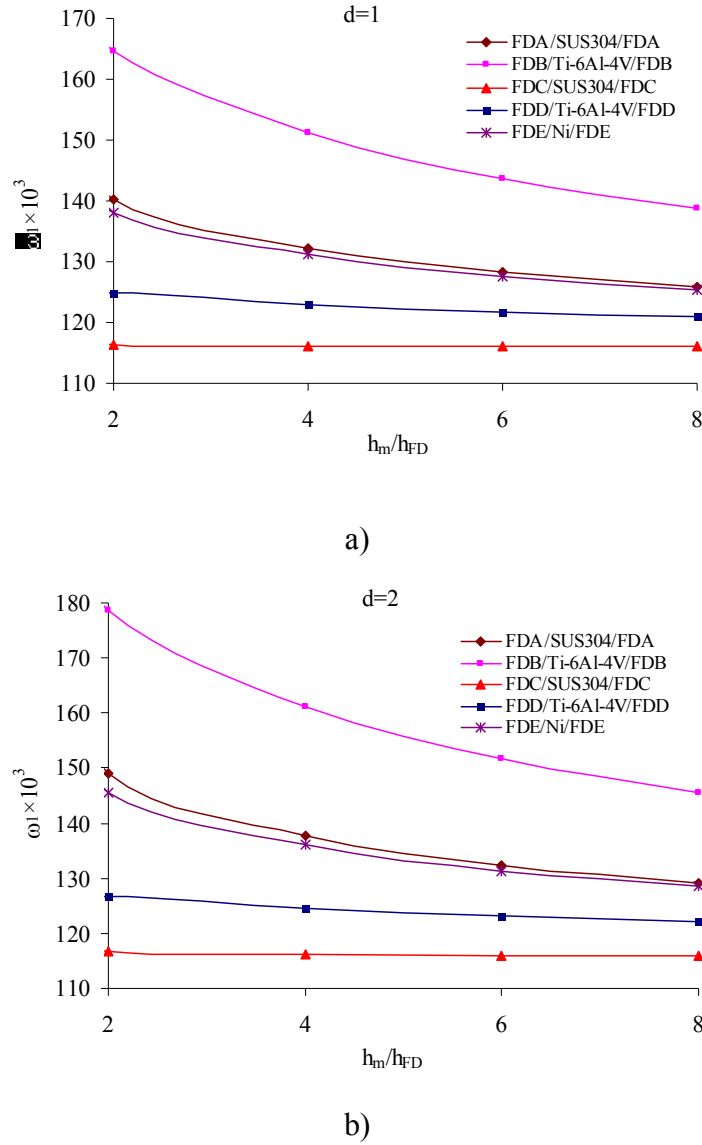


b)

Şekil 4.1. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d < 1$  ( $d=0.25$  ve  $0.75$ ) için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi

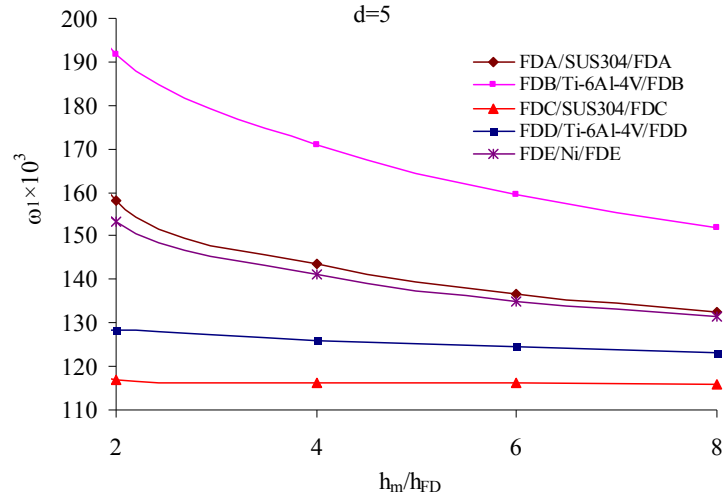
Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabuklar için  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d > 1$  ( $d=1$  ve  $2$ ) için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.2.'de sunulmaktadır.  $h_m/h_{FD}$  oranı arttığında boyutsuz frekans parametresi değeri azalır. FDC/SUS304/FDC ve FDD/Ti-6Al-4V/FDD kabukların boyutsuz frekans parametresi değerleri birbirine yakın olup değerce daha büyükler. FDB/Ti-6Al-4V/FDB ve FDA/SUS304/FDA kabukların boyutsuz frekans parametresi değerleri

bir-birine yakın olup değerce daha küçükler. FDE/Ni/FDE kabuğun boyutsuz frekans parametresi değeri sözkonusu kabukların boyutsuz frekans parametresi değeri arasında bulunur. Burada  $R/h = 100$  ve  $L/R = 2$  olarak dikkate alınmıştır.

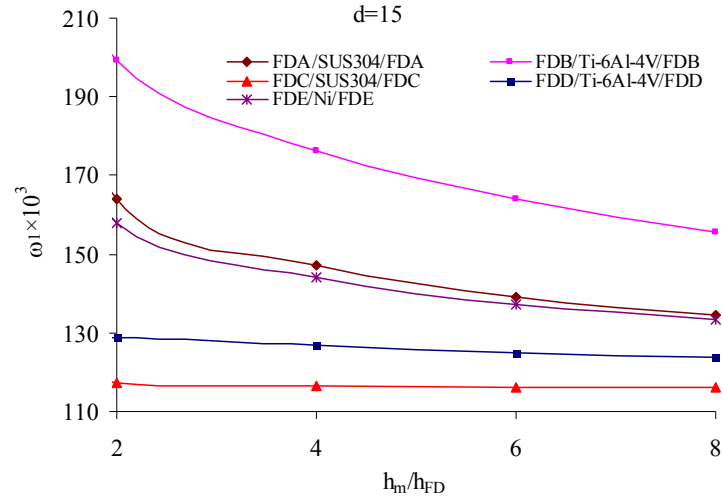


Şekil 4.2. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d > 1$  ( $d=1$  ve  $2$ ) için  $h_m / h_{FD}$  oranına bağlı değişimi

Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresi  $d=5$  ve  $15$  için  $h_m / h_{FD}$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.3’de sunulmaktadır.  $h_m / h_{FD}$  oranı artığında boyutsuz frekans parametresi değeri azalır. Hacim kesir indeksi artığında boyutsuz frekans parametre değeri artmaktadır. Silindirik kabuk karakteristikleri  $R/h = 100$  ve  $L/R = 2$  olarak göz önüne alınmıştır.



a)

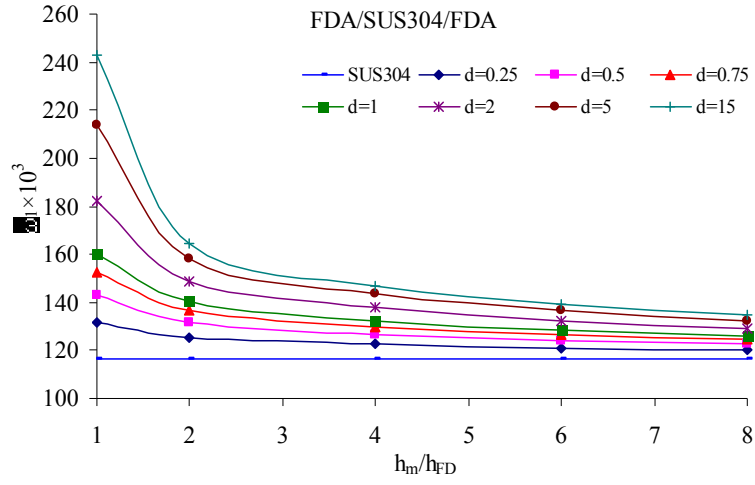


b)

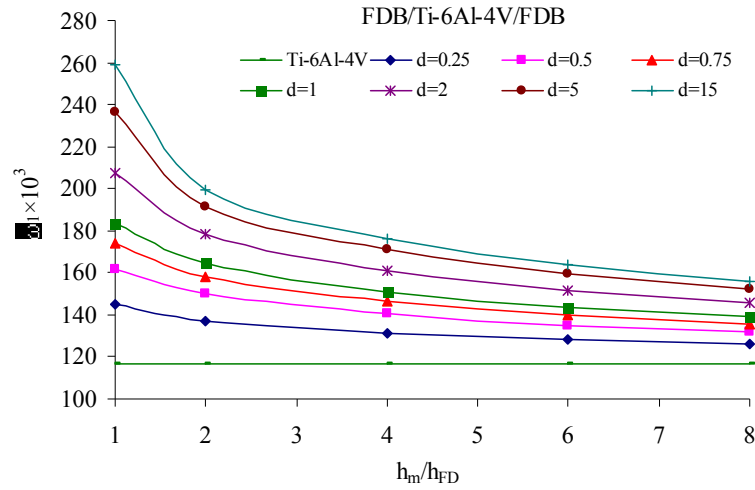
Şekil 4.3. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz titreşim frekansının  $d=5$  ve  $15$  için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi ( $R/h = 100$ ,  $L/R=2$ )

SUS304 ve Ti-6Al-4V tek tabakalı, FDA/SUS304/FDA ve FDB/Ti-6Al-4V/FDB üç tabakalı silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik  $d$  değerleri için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.4'de sunulmaktadır.  $h_m/h_{FD}$  oranı artığında boyutsuz frekans parametresi değerleri azalır.  $d=0.25$  olduğunda kompozisyonel profilin boyutsuz frekans parametresine etkisi az,  $d=15$  olduğunda ise

daha etkili olmaktadır. Frekans parametresinin en küçük değerleri zenginleştirilmiş metal kabuklarda ortaya çıktığı şekillerden görülmektedir



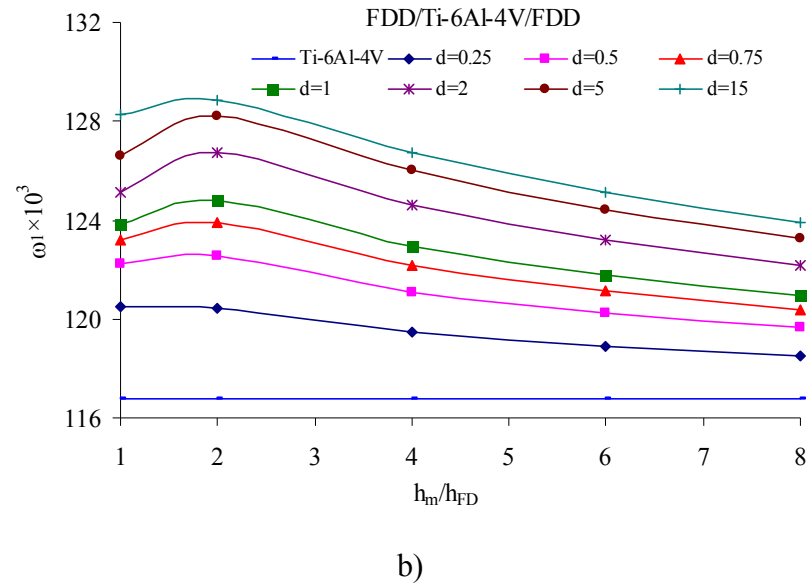
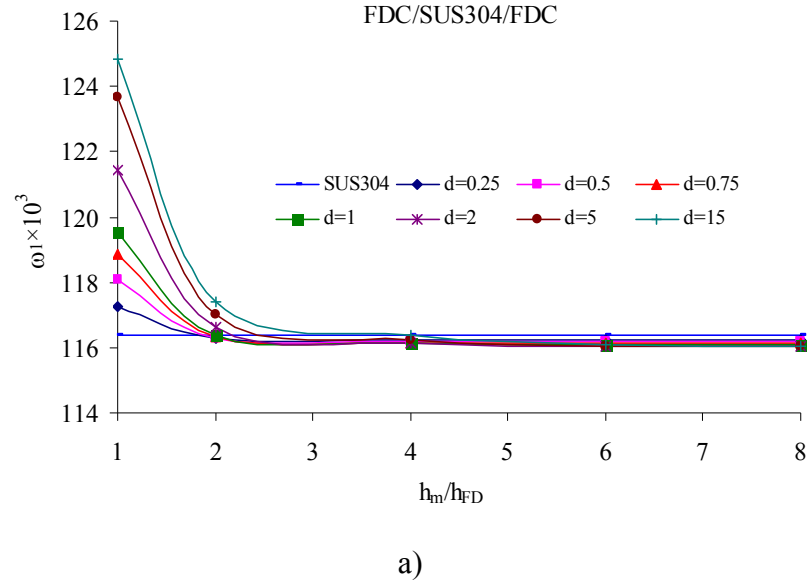
a)



b)

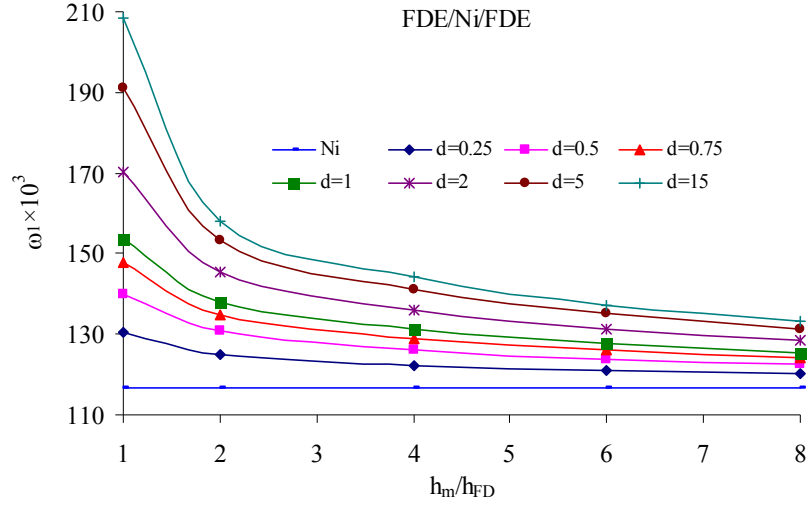
Şekil 4.4. SUS304 ve Ti-6Al-4V, FDA/SUS304/FDA ve FDB/Ti-6Al-4V/FDB silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik d değerleri için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi ( $R/h=100$ ,  $L/R=2$ )

SUS304, Ti-6Al-4V, FDC/SUS304/FDC ve FDD/Ti-6Al-4V/FDD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik  $d$  değerleri için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.5’de sunulmaktadır.  $h_m/h_{FD}$  oranı artığında FDC/SUS304/FDC kabukta boyutsuz frekans parametresi değerleri azalır ve FDD/Ti-6Al-4V/FDD kabukta ise boyutsuz frekans parametresi değeri önce artar sonra ise azalır.



Şekil 4.5. SUS304, Ti-6Al-4V, FDC/SUS304/FDC ve FDD/Ti-6Al-4V/FDD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik  $d$  değerleri için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi ( $R/h=100$ ,  $L/R=2$ )

Nikelden oluşan tek tabakalı ve FDE/Ni/FDE üç tabakalı silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik hacim kesir indeks değerleri için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.6’de sunulmaktadır.  $h_m/h_{FD}$  oranı artığında boyutsuz frekans parametresi değerleri azalır. Burada  $R/h=100$  ve  $L/R=2$  dir.



Şekil 4.6. Ni ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik  $d$  değerleri için  $h_m/h_{FD}$  oranına bağlı değişimi

Çizelge 4.7’de zenginleştirilmiş metal ve FD/Metal/FD silindirik kabukların boyutsuz frekans parametresi ( $\omega_1$ ) ve ona karşı gelen çevresel dalga sayısının ( $n$ ), değişik  $d$  hacim kesir indeksi değerleri için  $R/h$  oranına bağlı değişimi sunulmaktadır.  $R/h$  oranı artığında FDA/SUS304/FDA, FDB/Ti-6Al-4V/FDB, FDC/SUS304/FDC, FDD/Ti-6Al-4V/FDD ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresi değerleri azalır, ( $n$ ) çevresel dalga sayıları ise artar. FDA/SUS304/FDA, FDB/Ti-6Al-4V/FDB, FDC/SUS304/FDC, FDD/Ti-6Al-4V/FDD ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametrelerinin değerleri kendi aralarında kıyaslandığında en küçük değer FDC/SUS304/FDC kabukta en büyük değer ise FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabukta olduğu gözlenmiştir.

FD/Metal/FD silindirik kabukların boyutsuz frekans parametre değerleri uygun metal kabuğun boyutsuz frekans parametre değerleri ile karşılaştırıldığında kompozisyonel profillerin etkisi kaplama ve kabuğu oluşturan malzeme çeşitlerine göre önemli

derecede değişmektedir. Ayrıca, boyutsuz frekans parametre değerlerine kompozisyonel profillerin etkisi bazı durumlarda çok önemli olup R/h oranına bağlı olarak az olsa da değişim göstermektedir. Örneğin, FDA/SUS304/FDA kabuklar için d=5 olduğunda R/h=100, 200, 300, 400, 500 olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine kompozisyonel profilin etkisi %17.37, %17.31, %17.86, %16.97, %17.86 olarak elde edilmiştir. FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabuklar için d=5 olduğunda R/h=100, 200, 300, 400, 500 olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine kompozisyonel profilin etkisi %36.43, %36.21, %38.16, %35.00, %38.17 olmaktadır. FDC/SUS304/FDC kabuklar için d=5 olduğunda; R/h=100, 200, 300, 400, 500 olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine kompozisyonel profilin etkisi %(-0.26), %(-0.23), %(-0.52), %(-0.05), %(-0.52) şeklinde dağılım göstermektedir. FDD/Ti-6Al-4V/FDD kabuklar için d=5 olduğunda R/h=100, 200, 300, 400, 500 olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine kompozisyonel profilin etkisi %6.54, %6.46, %7.14, %6.05, %7.14 olmaktadır. FDE/Ni/FDE kabuklar için d=5 olduğunda; R/h=100, 200, 300, 400, 500 olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine kompozisyonel profilin etkisi %15.87, %15.81, %16.41, %15.44, %16.41 olmaktadır.

Dolayısıyla, FDC/SUS304/FDC kabukların boyutsuz frekans parametre değerleri SUS304 kabuğun boyutsuz frekans parametre değerleri ile karşılaştırıldığında kompozisyonel profillerin etkisinin olmadığı tespit edilmiştir. FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabukların boyutsuz frekans parametre değerleri Ni kabuğun boyutsuz frekans parametre değerleri ile karşılaştırıldığında kompozisyonel profillerin etkisinin en büyük olduğu görülmüştür.

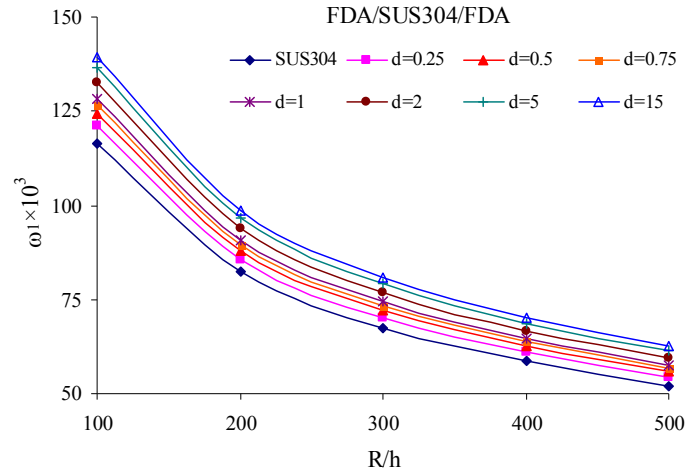
Hacim kesir indeksi d arttığında pür FDM ve tüm çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresi değerleri artar, çevresel dalga sayısı (n) ise sabit kalır. Hacim kesir indeksi d arttığında kompozisyonel profillerin boyutsuz frekans parametresi değerlerine etkisi önemli derecede artmaktadır. Örneğin, FDA/SUS304/FDA kabuklar için R/h = 300 ve d=0.25 olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %4.2 olduğu halde d=15 için ise söz konusu etki %20.14'dür. FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabuklar için R/h = 300 ve d=0.25 olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %10.23, d=15 için ise söz konusu etki %42.14'dür.

FDC/SUS304/FDC kabuklar için  $R/h = 300$  ve  $d=0.25$  olduğunda etki  $\%(-0.18)$ ,  $d=15$  için etki  $\%(-0.51)$ 'dir. FDD/Ti-6Al-4V/FDD kabuklar için  $R/h = 300$  ve  $d=0.25$  olduğunda etki  $\%1.99$ ,  $d=15$  için ise söz konusu etki  $\%7.77$ 'dir. FDE/Ni/FDE kabuklar için  $R/h = 300$  ve  $d=0.25$  olduğunda etki  $\%3.96$ ,  $d=15$  için ise söz konusu etki  $\%18.41$ 'dir.

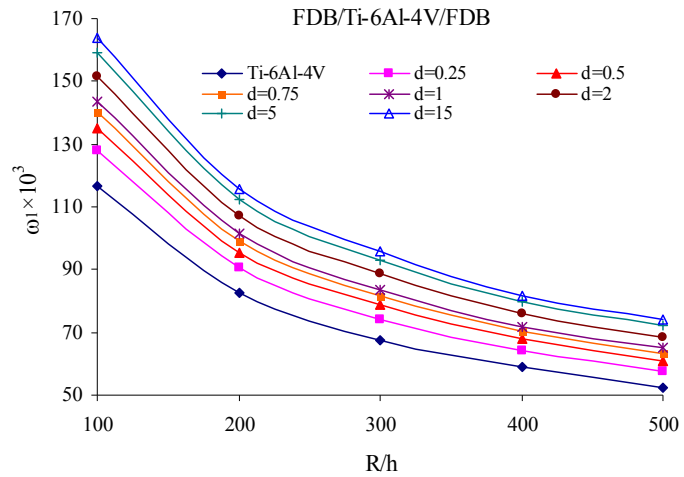
Çizelge 4.7. Üç çeşit zenginleştirilmiş metal ve beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresi ve ona karşı gelen çevresel dalga sayısının ( $n$ ), değişik hacim kesir indeksi için  $R/h$  oranına bağlı değişimi ( $L/R=2$ ,  $h_m/h_{FD}=6$ )

| $\omega_1 \times 10^3 (n_{cr})$ |            |            |            |            |            |            |            |            |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| FDA/SUS304/FDA                  |            |            |            |            |            |            |            |            |
| R/h                             | SUS304     | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 100                             | 116.369(5) | 121.095(5) | 124.288(5) | 126.593(5) | 128.334(5) | 132.438(5) | 136.587(5) | 139.192(5) |
| 200                             | 82.351(6)  | 85.681(6)  | 87.932(6)  | 89.557(6)  | 90.785(6)  | 93.680(6)  | 96.608(6)  | 98.448(6)  |
| 300                             | 67.223(7)  | 70.048(7)  | 71.951(7)  | 73.321(7)  | 74.354(7)  | 76.784(7)  | 79.230(7)  | 80.760(7)  |
| 400                             | 58.702(7)  | 61.018(7)  | 62.588(7)  | 63.722(7)  | 64.581(7)  | 66.609(7)  | 68.666(7)  | 69.963(7)  |
| 500                             | 52.072(8)  | 54.261(8)  | 55.735(8)  | 56.796(8)  | 57.597(8)  | 59.479(8)  | 61.374(9)  | 62.559(9)  |
| FDB/Ti-6Al-4V/FDB               |            |            |            |            |            |            |            |            |
| R/h                             | Ti-6Al-4V  | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 100                             | 116.788(5) | 128.071(5) | 135.168(5) | 140.061(5) | 143.640(5) | 151.699(5) | 159.329(5) | 163.851(5) |
| 200                             | 82.653(6)  | 90.579(6)  | 95.569(6)  | 99.011(6)  | 101.530(6) | 107.204(6) | 112.580(6) | 115.770(6) |
| 300                             | 67.430(7)  | 74.330(7)  | 78.642(7)  | 81.603(7)  | 83.763(7)  | 88.607(7)  | 93.164(7)  | 95.846(7)  |
| 400                             | 58.938(7)  | 64.357(7)  | 67.785(7)  | 70.156(7)  | 71.894(7)  | 75.823(7)  | 79.564(7)  | 81.794(7)  |
| 500                             | 52.232(8)  | 57.579(8)  | 60.919(8)  | 63.214(8)  | 64.887(8)  | 68.640(8)  | 72.170(8)  | 74.249(8)  |
| FDC/SUS304/FDC                  |            |            |            |            |            |            |            |            |
| R/h                             | SUS304     | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 100                             | 116.369(5) | 116.237(5) | 116.164(5) | 116.121(5) | 116.094(5) | 116.057(5) | 116.064(5) | 116.101(5) |
| 200                             | 82.351(6)  | 82.264(6)  | 82.217(6)  | 82.189(6)  | 82.173(6)  | 82.151(6)  | 82.161(6)  | 82.190(6)  |
| 300                             | 67.223(7)  | 67.101(7)  | 67.029(7)  | 66.984(7)  | 66.953(7)  | 66.898(7)  | 66.873(7)  | 66.878(7)  |
| 400                             | 58.702(7)  | 58.667(7)  | 58.652(7)  | 58.645(7)  | 58.642(7)  | 58.647(7)  | 58.671(7)  | 58.701(7)  |
| 500                             | 52.072(8)  | 51.978(8)  | 51.922(8)  | 51.887(8)  | 51.863(8)  | 51.820(8)  | 51.801(8)  | 51.805(8)  |
| FDD/Ti-6Al-4V/FDD               |            |            |            |            |            |            |            |            |
| R/h                             | Ti-6Al-4V  | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 100                             | 116.788(5) | 118.905(5) | 120.225(5) | 121.121(5) | 121.766(5) | 123.173(5) | 124.425(5) | 125.112(5) |
| 200                             | 82.653(6)  | 84.132(6)  | 85.056(6)  | 85.682(6)  | 86.134(6)  | 87.119(6)  | 87.996(6)  | 88.478(6)  |
| 300                             | 67.430(7)  | 68.773(7)  | 69.609(7)  | 70.174(7)  | 70.580(7)  | 71.463(7)  | 72.242(7)  | 72.666(7)  |
| 400                             | 58.938(7)  | 59.920(7)  | 60.534(7)  | 60.952(7)  | 61.254(7)  | 61.913(7)  | 62.504(7)  | 62.831(7)  |
| 500                             | 52.232(8)  | 53.274(8)  | 53.921(8)  | 54.359(8)  | 54.674(8)  | 55.358(8)  | 55.961(8)  | 56.290(8)  |
| FDE/Ni/FDE                      |            |            |            |            |            |            |            |            |
| R/h                             | Ni         | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 100                             | 116.538(5) | 120.968(5) | 123.928(5) | 126.046(5) | 127.636(5) | 131.346(5) | 135.038(5) | 137.323(5) |
| 200                             | 82.472(6)  | 85.592(6)  | 87.677(6)  | 89.169(6)  | 90.290(6)  | 92.905(6)  | 95.510(6)  | 97.122(6)  |
| 300                             | 67.306(7)  | 69.970(7)  | 71.743(7)  | 73.009(7)  | 73.958(7)  | 76.166(7)  | 78.353(7)  | 79.700(7)  |
| 400                             | 58.797(7)  | 60.958(7)  | 62.406(7)  | 63.444(7)  | 64.224(7)  | 66.049(7)  | 67.873(7)  | 69.006(7)  |
| 500                             | 52.137(8)  | 54.200(8)  | 55.574(8)  | 56.555(8)  | 57.290(8)  | 59.001(8)  | 60.695(8)  | 61.739(8)  |

SUS304, Ti-6Al-4V, FDA/SUS304/FDA ve FDB/Ti-6Al-4V/FDB silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz titreşim frekansının  $d=0.25$ ' ten 15'e kadar değiştiğinde R/h oranına bağlı değişimi Şekil 4.7'de sunulmaktadır. R/h oranı arttığında boyutsuz frekans parametresinin değeri azalır. FDA/SUS304/FDA kabukta boyutsuz titreşim frekansın değerleri bir- birine daha yakın olmaktadır. FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabukta boyutsuz frekans parametresinin değeri FDA/SUS304/FDA kabuktan daha büyüktür.



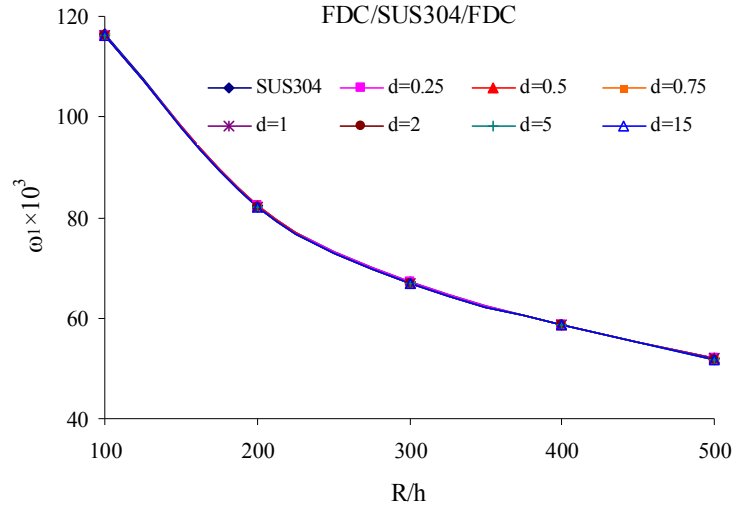
a)



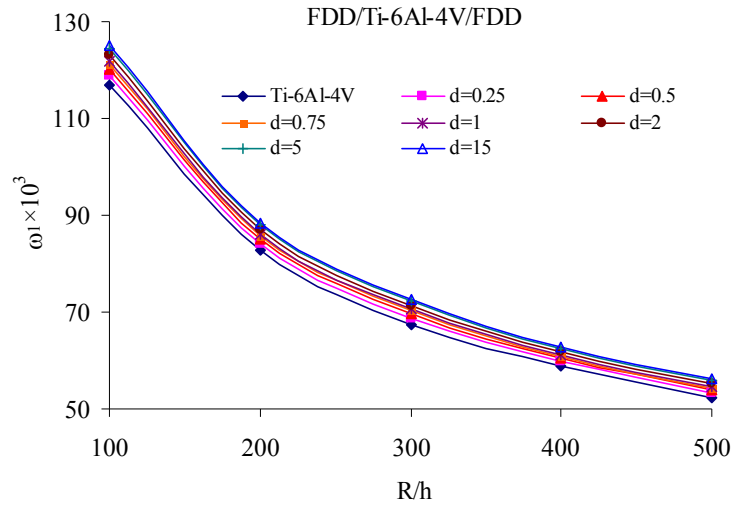
b)

Şekil 4.7. SUS304, Ti-6Al-4V, FDA/SUS304/FDA ve FDB/Ti-6Al-4V/FDB silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik d değerleri için R / h oranına bağlı değişimi ( $L/R=2$ ,  $h_m/h_{FD} =6$ )

SUS304, Ti-6Al-4V, FDC/SUS304/FDC ve FDD/Ti-6Al-4V/FDD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=0.25$  den 15'e kadar değiştiğinde R/h oranına bağlı değişimi Şekil 4.8'de sunulmaktadır. R/h oranı artığında boyutsuz frekans parametresinin değerleri azalır. FDC/SUS304/FDC kabuklarda kompozisyonel profillerin veya hacim kesir indeksi d' nin değişiminin etkisi olmamaktadır.



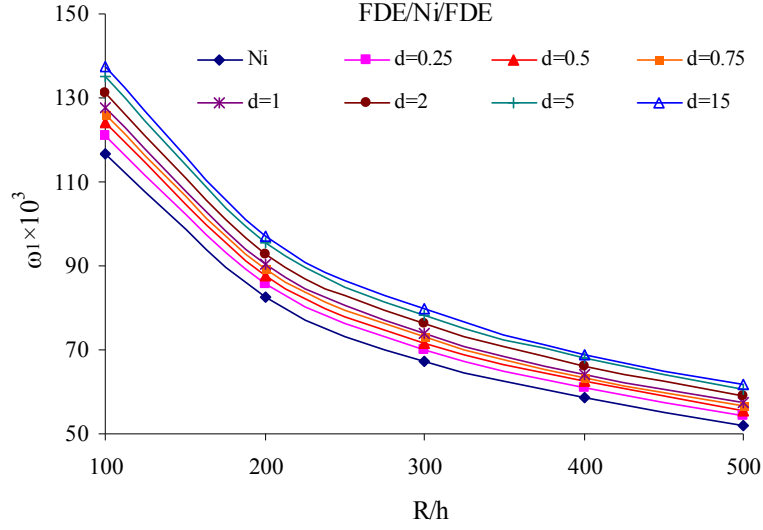
a)



b)

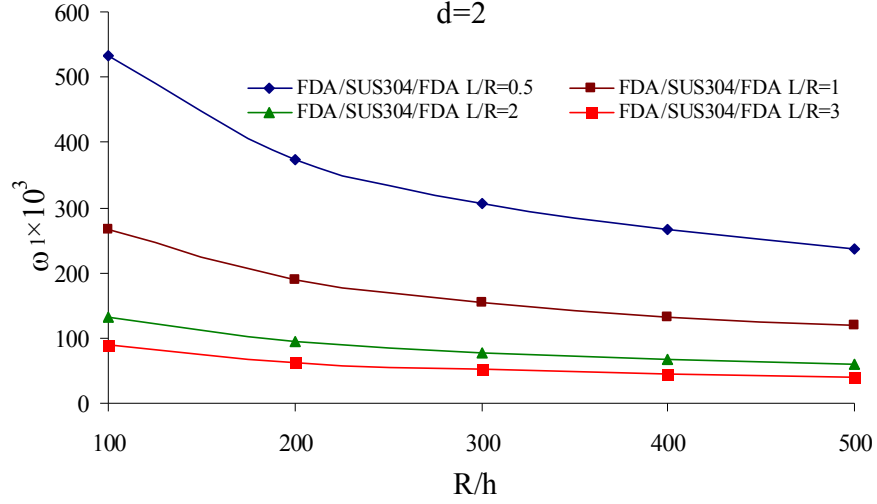
Şekil 4.8. SUS304, Ti-6Al-4V, FDC/SUS304/FDC ve FDD/Ti-6Al-4V/FDD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik d değerleri için R/h oranına bağlı değişimi ( $L/R=2$ ,  $h_m/h_{FD}=6$ )

Nikelden oluşan tek tabakalı ve FDE/Ni/FDE üç tabakalı silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=0.25$ ' den 15'e kadar değiştiğinde  $R/h$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.9'de sunulmaktadır.  $R/h$  oranı artığında boyutsuz frekans parametresinin değerleri azalmakta,  $d$  artığında ise söz konusu değerler artmaktadır.

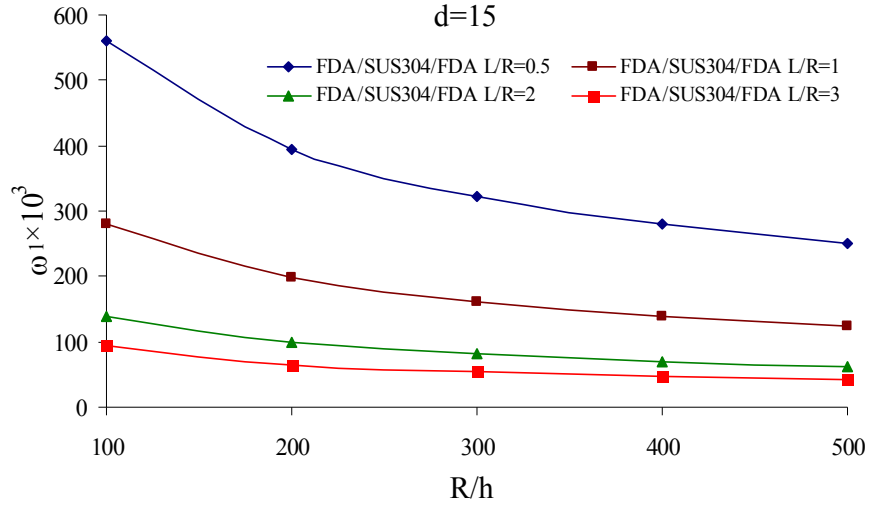


Şekil 4.9. Ni ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değişik  $d$ 'ler için  $R/h$  oranına bağlı değişimi ( $L/R=2$ ,  $h_m/h_{FD}=6$ )

FDA/SUS304/FDA silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=2$  ve 15 ve değişik  $L/R$  oranı için  $R/h$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.10' de sunulmaktadır.  $L/R$  ve  $R/h$  oranları artığında boyutsuz frekans parametresi değerleri azalmaktadır.



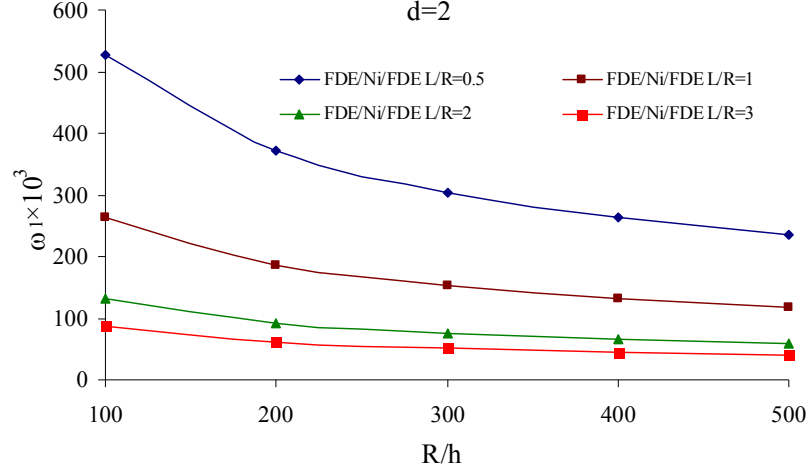
a)



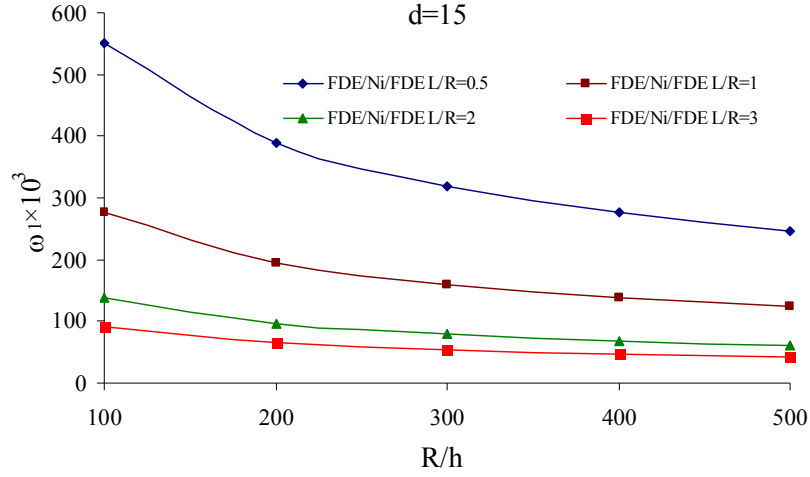
b)

Şekil 4.10. FDA/SUS304/FDA silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=2$  ve  $15$  ve değişik  $L/R$  oranı için  $R/h$  oranına bağlı değişimi ( $h_m/h_{FD}=6$ )

FDE/Ni/FDE silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=2, 15$  ve değişik  $L/R$  oranı için  $R/h$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.11’de sunulmaktadır.  $L/R$  ve  $R/h$  oranları arttığında boyutsuz frekans parametresinin değerleri azalmaktadır.



a)



b)

Şekil 4.11. FDE/Ni/FDE silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=2$  ve  $15$  ve değişik  $L/R$  oranı için  $R/h$  oranına bağlı değişimi ( $h_m/h_{FD}=6$ )

Çizelge 4.8’de zenginleştirilmiş metal ve FD/Metal/FD silindirik kabukların boyutsuz frekans parametresi ( $\omega_1$ ) ve ona karşı gelen çevresel dalga sayısının ( $n$ ), değişik  $d$  hacim kesir indeksi değerleri için  $L/R$  oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Silindirik kabuk karakteristikleri  $R/h=100$  ve  $h_m/h_{FD}=6$  olarak dikkate alınmıştır.  $L/R$  oranı artığında FDA/SUS304/FDA, FDB/Ti-6Al-4V/FDB, FDC/SUS304/FDC, FDD/Ti-6Al-4V/FDD ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin değerleri ve ( $n$ ) çevresel dalga sayıları azalır.

L/R oranı arttığında, FD/Metal/FD silindirik kabukların boyutsuz frekans parametre değerlerine kompozisyonel profillerin etkisi genel olarak azalmakta, fakat bu azalma düzensizlik göstermektedir. Örneğin; FDA/SUS304/FDA kabuklar için  $d=2$  ve  $L/R=0.5,1,2,3,4,5,10$  olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine kompozisyonel profillerin etkisi %14.17, %14.17, %13.81, %13.45, %14.79, %13.03, %12.46 şeklinde dağılım göstermektedir. FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabuklar için  $d=2$  ve  $L/R=0.5,1,2,3,4,5,10$  olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine kompozisyonel profillerin etkisi %29.64, %31.23, %29.89, %28.58, %33.45, %27.00, %24.91 olmaktadır. FDC/SUS304/FDC kabuklar için  $d=2$  ve  $L/R=0.5,1,2,3,4,5,10$  olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine söz konusu etki %(-0.52), %(-0.46), %(-0.27), %(-0.09), %(-0.78), %0.13, %0.42 dağılım göstermektedir. FDD/Ti-6Al-4V/FDD kabuklar için  $d=2$  ve  $L/R=0.5,1,2,3,4,5,10$  olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine kompozisyonel profillerin etkisi %5.81, %5.92, %5.47, %5.03, %6.68, %4.50, %3.80 olmaktadır. FDE/Ni/FDE kabuklar için  $d=2$  ve  $L/R=0.5,1,2,3,4,5,10$  olduğunda boyutsuz frekans parametresi değerlerine söz konusu etki %13.08, %13.11, %12.71, %12.31, %13.78, %11.84, %11.23 olmaktadır.

Hacim kesir indeksi  $d$  arttığında pür FDM ve tüm FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresi değerleri artar çevresel dalga sayısı ( $n$ ) ise sabit kalır. Örneğin, FDA/SUS304/FDA kabuklar için  $L/R = 3$  ve  $d=0.25$  olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %3.94,  $d=15$  için ise söz konusu etki %19.16'dır. FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabuklar için  $L/R = 3$  ve  $d=0.25$  olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %9.17,  $d=15$  için ise etki %38.70'dir. FDC/SUS304/FDC kabuklar için  $L/R = 3$  ve  $d=0.25$  olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %(-0.06),  $d=15$  için etki %0.01'dir. FDD/Ti-6Al-4V/FDD kabuklar için  $L/R = 3$  ve  $d=0.25$  olduğunda boyutsuz frekans parametresine etki %1.66,  $d=15$  için etki %6.58'dir. FDE/Ni/FDE kabuklar için  $L/R = 3$  ve  $d=0.25$  olduğunda etki %3.67,  $d=15$  için etki %17.34'dür.

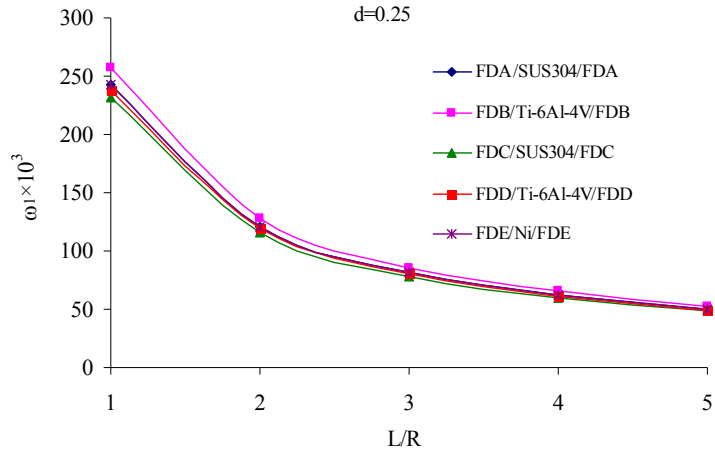
FDA/SUS304/FDA, FDB/Ti-6Al-4V/FDB, FDC/SUS304/FDC, FDD/Ti-6Al-4V/FDD ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresi

değerleri kendi aralarında kıyaslandığında en küçük değer FDC/SUS304/FDC kabukta en büyük değer ise FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabukta olduğu gözlenmiştir.

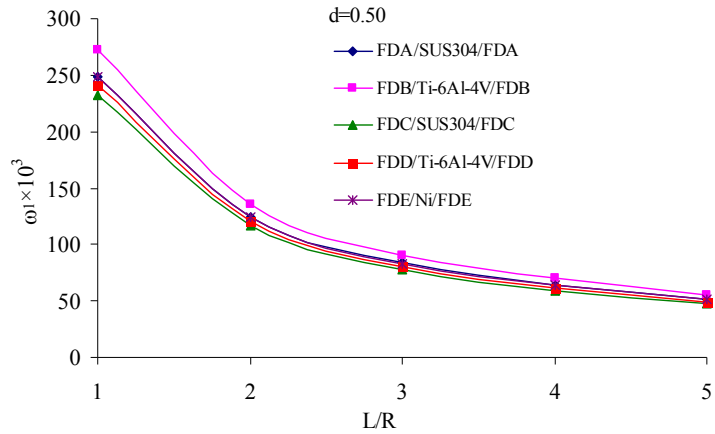
Çizelge 4.8. Üç çeşit zenginleştirilmiş metal ve beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresi ve ona karşı gelen çevresel dalga sayısının (n), değişik hacim kesir indeksi için L/R oranına bağlı değişimi ( $R/h=100, h_m/h_{FD}=6$ )

| $\omega_1 \times 10^3 (n_{cr})$ |            |            |            |            |            |            |            |            |
|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| FDA/SUS304/FDA                  |            |            |            |            |            |            |            |            |
| L/R                             | SUS304     | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 0.5                             | 466.360(9) | 486.070(9) | 499.337(9) | 508.887(9) | 516.090(9) | 532.453(9) | 548.918(8) | 559.290(8) |
| 1                               | 232.700(7) | 242.440(7) | 249.001(7) | 253.728(7) | 257.294(7) | 265.680(7) | 274.128(7) | 279.413(7) |
| 2                               | 116.369(5) | 121.095(5) | 124.288(5) | 126.593(5) | 128.334(5) | 132.438(5) | 136.587(5) | 139.192(5) |
| 3                               | 78.324(4)  | 81.410(4)  | 83.501(4)  | 85.013(4)  | 86.158(4)  | 88.860(4)  | 91.603(4)  | 93.332(4)  |
| 4                               | 59.497(4)  | 62.112(4)  | 63.865(4)  | 65.125(4)  | 66.073(4)  | 68.294(4)  | 70.519(4)  | 71.902(4)  |
| 5                               | 48.198(3)  | 50.027(3)  | 51.271(3)  | 52.173(3)  | 52.856(3)  | 54.476(3)  | 56.126(3)  | 57.172(3)  |
| 10                              | 25.716(2)  | 26.643(2)  | 27.277(2)  | 27.737(2)  | 28.088(2)  | 28.921(2)  | 29.776(2)  | 30.321(2)  |
| FDB/Ti-6Al-4V/FDB               |            |            |            |            |            |            |            |            |
| L/R                             | Ti-6Al-4V  | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 0.5                             | 467.752(9) | 514.490(8) | 541.977(8) | 560.988(8) | 574.927(8) | 606.411(8) | 636.376(8) | 654.231(8) |
| 1                               | 233.430(7) | 257.157(7) | 271.995(7) | 282.190(7) | 289.631(7) | 306.321(7) | 322.033(7) | 331.289(7) |
| 2                               | 116.788(5) | 128.071(5) | 135.168(5) | 140.061(5) | 143.640(5) | 151.699(5) | 159.329(5) | 163.851(5) |
| 3                               | 78.641(4)  | 85.853(4)  | 90.415(4)  | 93.572(4)  | 95.887(4)  | 101.120(4) | 106.103(4) | 109.075(4) |
| 4                               | 59.637(4)  | 66.204(4)  | 70.274(4)  | 73.055(4)  | 75.077(4)  | 79.588(4)  | 83.797(4)  | 86.255(4)  |
| 5                               | 48.419(3)  | 52.574(3)  | 55.222(3)  | 57.063(3)  | 58.417(3)  | 61.494(3)  | 64.447(3)  | 66.222(3)  |
| 10                              | 25.852(2)  | 27.870(2)  | 29.171(2)  | 30.081(2)  | 30.754(2)  | 32.293(2)  | 33.787(2)  | 34.696(2)  |
| FDC/SUS304/FDC                  |            |            |            |            |            |            |            |            |
| L/R                             | SUS304     | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 0.5                             | 466.360(9) | 465.457(9) | 464.924(9) | 464.584(9) | 464.356(9) | 463.935(9) | 463.725(9) | 463.743(9) |
| 1                               | 232.700(7) | 232.296(7) | 232.060(7) | 231.911(7) | 231.812(7) | 231.636(7) | 231.561(7) | 231.586(7) |
| 2                               | 116.369(5) | 116.237(5) | 116.164(5) | 116.121(5) | 116.094(5) | 116.057(5) | 116.064(5) | 116.101(5) |
| 3                               | 78.324(4)  | 78.280(4)  | 78.261(4)  | 78.252(4)  | 78.249(4)  | 78.257(4)  | 78.292(4)  | 78.332(4)  |
| 4                               | 59.497(4)  | 59.333(4)  | 59.234(4)  | 59.169(4)  | 59.124(4)  | 59.035(4)  | 58.976(4)  | 58.962(4)  |
| 5                               | 48.198(3)  | 48.205(3)  | 48.214(3)  | 48.224(3)  | 48.233(3)  | 48.262(3)  | 48.305(3)  | 48.342(3)  |
| 10                              | 25.716(2)  | 25.742(2)  | 25.763(2)  | 25.778(2)  | 25.791(2)  | 25.823(2)  | 25.861(2)  | 25.888(2)  |
| FDD/Ti-6Al-4V/FDD               |            |            |            |            |            |            |            |            |
| L/R                             | Ti-6Al-4V  | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 0.5                             | 467.752(9) | 477.216(9) | 483.095(9) | 487.074(9) | 489.637(8) | 494.941(8) | 499.687(8) | 502.315(8) |
| 1                               | 233.430(7) | 238.031(7) | 240.892(7) | 242.829(7) | 244.221(7) | 247.248(7) | 249.922(7) | 251.380(7) |
| 2                               | 116.788(5) | 118.905(5) | 120.225(5) | 121.121(5) | 121.766(5) | 123.173(5) | 124.425(5) | 125.112(5) |
| 3                               | 78.641(4)  | 79.946(4)  | 80.761(4)  | 81.316(4)  | 81.717(4)  | 82.594(4)  | 83.379(4)  | 83.814(4)  |
| 4                               | 59.637(4)  | 60.972(4)  | 61.799(4)  | 62.357(4)  | 62.756(4)  | 63.621(4)  | 64.379(4)  | 64.787(4)  |
| 5                               | 48.419(3)  | 49.133(3)  | 49.581(3)  | 49.887(3)  | 50.109(3)  | 50.596(3)  | 51.037(3)  | 51.285(3)  |
| 10                              | 25.852(2)  | 26.171(2)  | 26.372(2)  | 26.511(2)  | 26.611(2)  | 26.835(2)  | 27.040(2)  | 27.158(2)  |
| FDE/Ni/FDE                      |            |            |            |            |            |            |            |            |
| L/R                             | Ni         | d=0.25     | d=0.5      | d=0.75     | d=1        | d=2        | d=5        | d=15       |
| 0.5                             | 466.920(9) | 485.519(9) | 497.897(9) | 506.732(9) | 513.351(9) | 527.983(8) | 542.583(8) | 551.650(8) |
| 1                               | 232.994(7) | 242.170(7) | 248.282(7) | 252.648(7) | 255.920(7) | 263.535(7) | 271.085(7) | 275.737(7) |
| 2                               | 116.538(5) | 120.968(5) | 123.928(5) | 126.046(5) | 127.636(5) | 131.346(5) | 135.038(5) | 137.323(5) |
| 3                               | 78.452(4)  | 81.330(4)  | 83.258(4)  | 84.641(4)  | 85.681(4)  | 88.113(4)  | 90.543(4)  | 92.054(4)  |
| 4                               | 59.553(4)  | 62.036(4)  | 63.682(4)  | 64.854(4)  | 65.731(4)  | 67.762(4)  | 69.764(4)  | 70.988(4)  |
| 5                               | 48.287(3)  | 49.981(3)  | 51.121(3)  | 51.940(3)  | 52.558(3)  | 54.006(3)  | 55.461(3)  | 56.370(3)  |
| 10                              | 25.770(2)  | 26.621(2)  | 27.196(2)  | 27.611(2)  | 27.925(2)  | 28.664(2)  | 29.412(2)  | 29.882(2)  |

Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=0.25$  ve  $0.50$  için  $L/R$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.12’de sunulmaktadır.  $L/R$  oranı arttığında boyutsuz frekans parametresi değeri azalır.



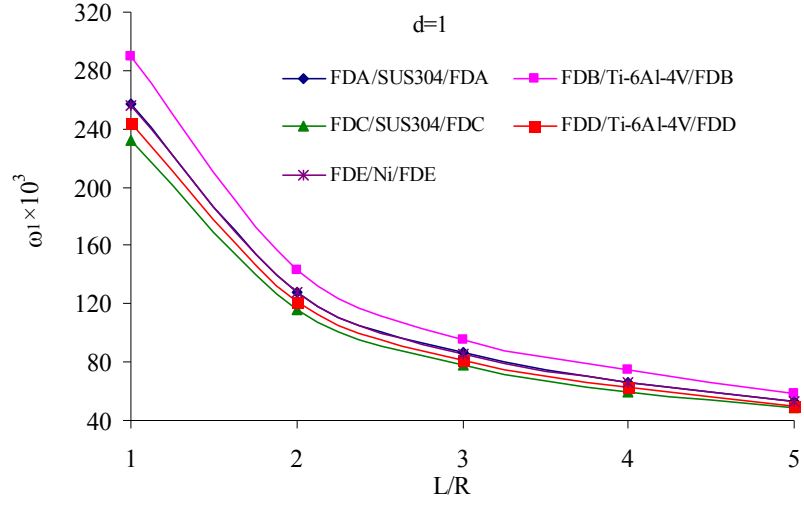
a)



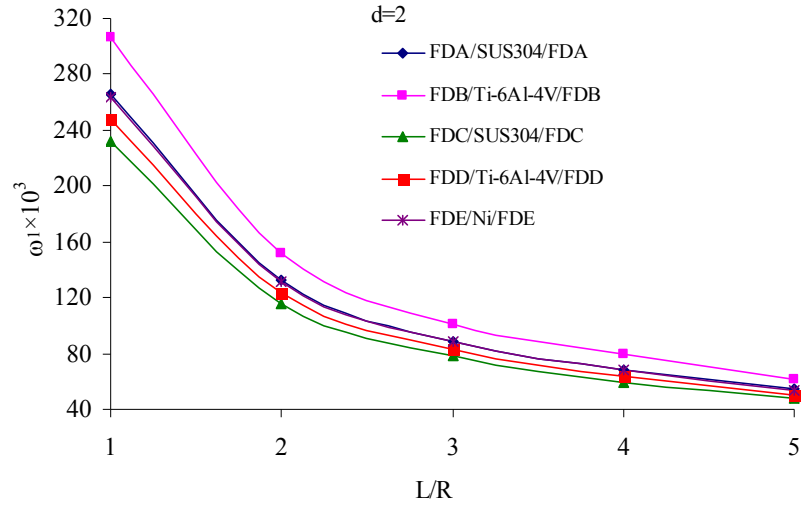
b)

Şekil 4.12. FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=0.25$  ve  $0.75$  için  $L/R$  oranına bağlı değişimi ( $R/h=100$ ,  $h_m/h_{FD}=6$ )

Şekil 4.13’de ise beş farklı çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=1$  ve  $2$  için  $L/R$  oranına bağlı değişimi çizilmiştir.  $L/R$  oranı arttığında boyutsuz frekans parametresi değeri azalmakta fakat  $d>1$  olduğunda önceki iki grafiğe kıyasla FD nin boyutsuz frekans değerlerine etkisinin önem kazandığı görülmüştür.



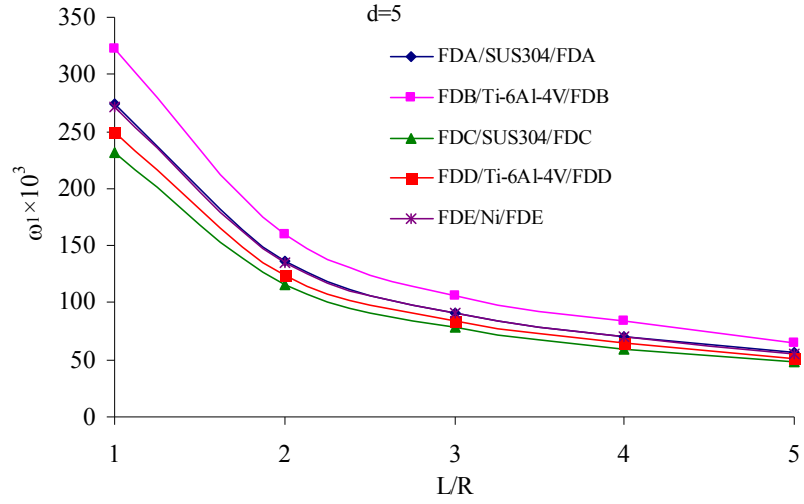
a)



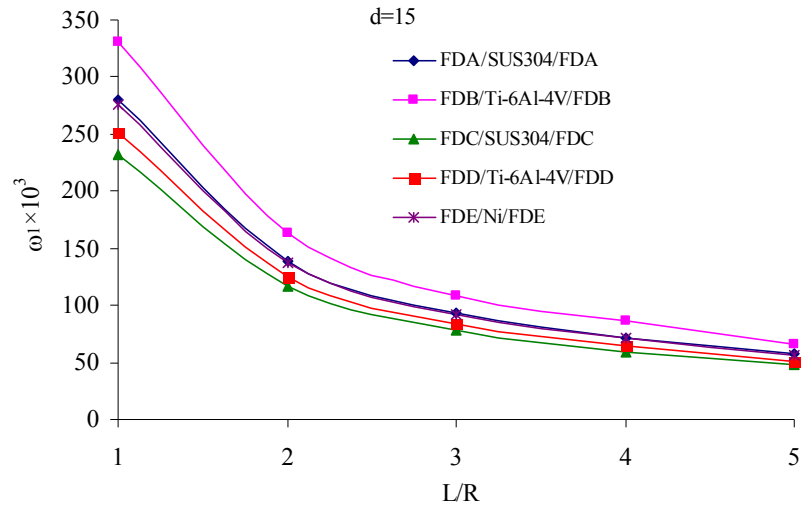
b)

Şekil 4.13. FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=1$  ve  $2$  için  $L/R$  oranına bağlı değişimi ( $R/h=100$ ,  $h_m/h_{FD}=6$ )

Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=5$  ve  $15$  için  $L/R$  oranına bağlı değişimi Şekil 4.14'de sunulmaktadır.  $L/R$  oranı artığında yine de boyutsuz frekans parametresi değeri azalmakta fakat  $d$  nin  $5$  den büyük değerleri için FD nin boyutsuz frekans parametresi değerlerine etkisinin çok yavaş değiştiği gözlenmiştir.



a)



b)

Şekil 4.14. Beş çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların  $\omega_1$  boyutsuz frekans parametresinin  $d=5$  ve  $15$  için  $L/R$  oranına bağlı değişimi ( $R/h=100$ ,  $h_m/h_{FD}=6$ )

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Tez çalışmasında, iç ve dış yüzeyleri FDM'lerle kaplanmış metal silindirik kabukların serbest titreşim problemi incelenmektedir. İlk aşamada, fonksiyonel değişimli malzemelerden oluşan ve kaplama için kullanılan tabakaların ve metal malzemeden oluşturulan çekirdeğin ayrı-ayrı ve üçlü sistem olarak analitik modelleri oluşturulmaktadır. İkinci aşamada iç ve dış yüzeyleri FDM'lerle kaplanmış metal silindirik kabukların temel bağıntıları, hareket ve deformasyon uygunluk denklemleri türetilmektedir. Temel denklemler çözülerek iç ve dış yüzeyleri fonksiyonel değişimli malzemelerle kaplanmış metal silindirik kabukların serbest titreşiminin boyutsuz frekans parametresi için analitik ifade bulunmaktadır. Özel durumda, elde edilen ifadeden pür FDM ve zenginleştirilmiş metalden oluşan silindirik kabukların serbest titreşiminin boyutsuz frekans parametreleri için ifadeler elde edilmektedir. Son olarak elde edilen ifadeler kullanılarak beş çeşit FD kaplamalı ve üç çeşit zenginleştirilmiş metalden oluşan silindirik kabukların serbest titreşiminin boyutsuz frekans parametresinin minimum değerlerine, hacim bileşenleri değişiminin, kabuk karakteristiklerinin, iç ve dış tabakaların kalınlıkları değişiminin etkileri sayısal olarak incelenmektedir. Bu çalışmanın geçerliliği için elde edilen sonuçlar literatürde sunulan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Sayısal analizler aşağıdaki sonuçların ortaya çıkmasını sağlamıştır:

- a.)  $h_m / h_{FD}$  oranı arttığında tüm çeşit içten ve dıştan FD kaplamalı silindirik kabukların boyutsuz frekans parametresi değerleri azalır, çevresel dalga sayıları ise sabit kalır.
- b.)  $h_m / h_{FD}$  oranı arttığında tüm çeşit FD/Metal/FD silindirik kabuklarda kompozisyonel profillerin boyutsuz frekans parametresi değerlerine etkisi azalır.
- c.) İçten ve dıştan FD kaplamalı silindirik kabukların boyutsuz titreşim frekansları uygun zenginleştirilmiş metal kabukların boyutsuz frekans parametresi değerleri ile kıyaslandığında kompozisyonel profilin en az etkisi FDC/SUS304/FDC kabukta, en fazla etki ise FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabukta ortaya çıkmaktadır.

- d.) FDA/SUS304/FDA, FDB/Ti-6Al-4V/FDB, FDC/SUS304/FDC, FDD/Ti-6Al-4V/FDD ve FDE/Ni/FDE silindirik kabukların boyutsuz frekans parametresi değerleri kendi aralarında kıyaslandığında en küçük değer FDA/SUS304/FDA kabukta en büyük değer ise FDB/Ti-6Al-4V/FDB kabukta olduğu gözlenmiştir.
- e.) FD/Metal/FD silindirik kabukların boyutsuz frekans parametre değerleri uygun metal kabuğun boyutsuz frekans parametresi değerleri ile karşılaştırıldığında kompozisyonel profillerin etkisi kaplama ve kabuğu oluşturan malzeme çeşitlerine göre önemli derecede değişmektedir.
- f.) R/h oranı artığında tüm çeşit içten ve dıştan FD kaplamalı silindirik kabukların boyutsuz frekans parametresi değerleri azalır, onlara karşı gelen çevresel dalga sayıları ise artar.
- g.) FD/Metal/FD silindirik kabukların boyutsuz frekans parametre değerlerine kompozisyonel profillerin etkisi bazı durumlarda çok önemli olup R/h oranına bağlı olarak az olsa da değişim göstermektedir.
- h.) L/R oranı artığında tüm çeşit içten ve dıştan FD kaplamalı silindirik kabukların boyutsuz frekans parametre değerleri ve onlara karşı gelen çevresel dalga sayıları azalır.
- i.) L/R oranı artığında tüm çeşit FD/Metal/FD silindirik kabukların boyutsuz frekans parametre değerlerine kompozisyonel profillerin etkisi az olsa da değişmektedir.
- j.) Hacim kesir indeksi d artığında pür FDM ve tüm çeşit içten ve dıştan FD kaplamalı silindirik kabukların boyutsuz frekans parametre değerleri artar, çevresel dalga sayısı ise sabit kalır.
- k.) Hacim kesir indeksi d artığında kompozisyonel profillerin pür FDM ve FD/Metal/FD silindirik kabukların boyutsuz frekans parametre değerlerine etkisi önemli derecede artmaktadır.
- l.) İçten ve dıştan FD kaplamalı silindirik kabukların boyutsuz frekans parametre değerleri pür FDM silindirik kabuklardan daha küçük olmaktadır.

## KAYNAKLAR

- Abrate, S., 1998. *Impact on Composite Structures*. Cambridge University Press, Cambridge UK.
- Adıgüzel, Ş., 2011. Burulma yükü etkisi altındaki fonksiyonel tabaka içeren üç tabakalı silindirik kabuğun burkulmasına Winkler zemin etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Amabili, M., 2008. *Nonlinear vibrations and stability of shells and plates*. Cambridge University Press, New York.
- Bao, G., Wang, L., 1995. Multiple cracking in functionally graded ceramic/metal coatings. *International Journal of Solids and Structures*, 32, 2853–2871.
- Baluragi, H., Gupta, R.K., Sinha, P.P., Ramesh Babu, N 2012. Development of functionally graded coating material for metallic thermal protection system of reusable launch vehicle. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 64, 471–481.
- Calladine, C.R., 1983. *Theory of Thin Shells*. Cambridge University Press, Cambridge.
- El-Mously, M., 2003. Fundamental natural frequencies of thin cylindrical shells: a comparative study. *Journal of Sound Vibration*, 264, 1167–1186.
- Freund, L.B., 1993. Stress distribution and curvature of a general compositionally graded semiconductor layer. *Journal of Crystal Growth*, 132, 341–344.
- Fukui, Y., 1991. Fundamental investigation of functionally gradient material manufacturing system using centrifugal force. *International Journal of Japan Society Mechanical Engineering*, 34, 144–148.
- Gontkevich, V.S., 1964. *Free Vibrations of Plates and Shells*. Naukovo Dumka, Kiev (in Russian)
- Gupta, N., 2007. A functionally graded syntactic foam material for high energy absorption under compression. *Materials Letters*, 61, 979–982.
- 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.
- Holt, J., Koizumi, M., Hirai, T., Munir, Z., 1992. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Functionally Gradient Materials. In *Ceramic Transactions* 34.
- Jin, Z.H., Batra, R.C., 1996. Some basic fracture mechanics concepts in functionally graded materials. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 44, 1221–1235.

- 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.
- Kiani, Y., Bagherizadeh, E., Eslami, M.R., 2012. Thermal and mechanical buckling of sandwich plates with FGM face sheets resting on the Pasternak elastic foundation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 226, 32–41.
- Kieback, B., Neubrand, A., Riedel, H., 2003. Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering A*, 362, 81–106.
- Koga, T., 1988. Effects of boundary conditions on the free vibrations of circular cylindrical shells. *AIAA Journal*, 26, 1387–1394.
- Koizumi, M., 1993. The concept of FGM. *Ceramic Transactions Functionally Graded Materials*, 34, 3–10.
- Koizumi, M., 1997. FGM activities in Japan. *Composites, Part B: Engineering*, 28, 1–4.
- Komanduri, R., Jahanmir, S., 1994. *Friction and Wear of Ceramics*. Marcel Dekker Inc.
- Konez, A., Alagöz, H., Topal, S., Gülgeç, M., 2005. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin üretim teknikleri ve kullanım alanları. *Mühendis ve Makine*, 46, 1–25.
- Kwon, P., Crimp, M., 1997. Automating the design process and powder processing of functionally gradient materials. *Composites and Functionally Graded Materials*, 80, 73–88.
- 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.
- Lee, Y., Erdoğan, F., 1998. Interface cracking of FGM coatings under steady-state heat flow. *Engineering Fracture Mechanics*, 59, 361–386.
- Leissa, A.W., 1973. *Vibration of Shells*. NASA SP-288.
- Li, S.R., Fu, X.H., Batra, R.C., 2010. Free vibration of three layered circular cylindrical shells with functionally graded middle layer. *Mechanics Research Communications*, 37, 577–580.
- Liew, K.M., Yang, J., Wu, Y.F., 2006. Nonlinear vibration of a coating-FGM-substrate cylindrical panel subjected to a temperature gradient. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195, 1007–1026.

- Loy, C.T., Lam, K.Y., Reddy J.N., 1999. Vibration of functionally graded cylindrical shells. *International Journal of Mechanical Science*, 41, 309–324.
- Malekzadeh, P., Fiouz, A.R., Sobhrouyan, M., 2012. Three-dimensional free vibration of functionally graded truncated conical shells subjected to thermal environment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 89, 210–221.
- Markworth, A.J., Ramesh, K.S., Parks, W.P., 1995. Modelling studies applied to functionally graded materials. *Journal of Material Science*, 30, 2183–2193.
- 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., 1996. The applications of functionally graded materials in Japan from structure to functional uses. *Materials Technology* 11, 230–236.
- Miyamoto, Y., Kaysser, W.A., Rabin, B.H., Kawasaki, A., Ford, R.G., 1999. *Functionally Graded Materials: Design, Processing, and Applications*. Kluwer, Massachusetts.
- Mumm, D.R., Evans, A.G., 2000. On the role of imperfections in the failure of a thermal barrier coating made by electron beam deposition. *Acta Materialia*, 48, 1815–1827.
- 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, New York.
- Obata, Y., Noda, N., 1994. Steady thermal stresses in a hollow circular cylinder and a hollow sphere of a functionally gradient material. *Journal of Thermal Stresses*, 17, 471–488.
- Öztürk, M., Erdoğan, F., 1995. Periodic surface cracking in an FGM coating. *Journal of Engineering Science*, 33, 2179–2871.
- Pan, E., Han, F., 2005. Exact solution for functionally graded and layered magneto-electro-elastic plates. *International Journal of Engineering Science*, 43, 321–339.
- Patel, B.P., Gupta, M.S., Loknath, M.S., Kadu, C.P., 2005. Free vibration analysis of a functionally graded elliptical cylindrical shells using higher-order theory. *Composite Structures*, 69, 259–270.

- Petit, F.S., Goward, G.W., 1983. Coatings for High Temperature Applications. Applied Science Publishers, 341p, London,.
- 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.
- Reddy, J.N., Chin, C.D., 1998. Thermo-mechanical analysis of functionally graded cylinders and plates. *Journal of Thermal Stresses*, 21, 593–626.
- Reddy, J.N., 2004. *Mechanics of Laminated Composite Plates and Shells: Theory and Analysis*, Second Ed, CRC Press.
- Sewall, J.L., Thompson, W.M., Pusey, C.G., 1971. An experimental and analytical vibration study of elliptical cylindrical shells. NASA TN D-6089.
- Shah, A.G., Mahmood, T., Naeem, M.N., Iqbal, Z., Arshad, S.H., 2010. Vibrations of functionally graded cylindrical shells based on elastic foundations. *Acta Mechanica*, 211, 293–307.
- Shen, H.-S., Li, S.-R., 2008. Postbuckling of sandwich plates with FGM face sheets and temperature-dependent properties. *Composites Part B Engineering*, 39, 332–344.
- Shen, H.S., 2009. *Functionally Graded Materials, Nonlinear Analysis of Plates and Shells*. CRC Press, Florida.
- Sheng, G.G., Wang, X., 2008. Thermal vibration, buckling and dynamic stability of functionally graded cylindrical shells embedded in an elastic medium. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27, 117–34.
- Shu, X., 2011. Thermal response of functionally graded piezoelectric coatings on sphere and cylinder shells. *Zhongguo Jixie Gongcheng/China Mechanical Engineering*, 22, 2993–3000.
- Soedel, W., 1980. A new frequency formula for closed circular cylindrical shells for a large variety of boundary conditions. *Journal of Sound and Vibration* 70, 209–217.
- 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., Deniz, A., Akcay, I.H., Yusufoglu, E., 2006. The vibration and stability of a three-layered conical shell containing a FGM layer subjected to axial compressive load. *Acta Mechanica*, 183, 129–144.

- Sofiyev, A.H., 2007. Vibration and stability of composite cylindrical shells containing a FG layer subjected to various loads. *Structural Engineering and Mechanics*, 27, 365–391.
- Sofiyev, A.H., Deniz, A., Avcar, M., Ozyigit, P., Tuglu, M., 2011. On the vibration of sandwich cylindrical shells with FGM face sheets on elastic foundations. *Proceedings of International Symposium on Advances in Applied Mechanics and Modern Information Technology*, Baku, Azerbaijan, 310-314.
- Sofiyev, A.H., Schnack, E., 2012. The vibration analysis of simply supported FGM truncated conical shells resting on two-parameter elastic foundations. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 19, 241–248.
- Suresh, S., Mortensen, A., 1998. *Fundamentals of Functionally Graded Materials: Processing and Thermomechanical behavior of Graded Metals and Metal-ceramic Composites*, IOM Communications Ltd., London.
- Suresh, S., Olsson, M., Padture, NP., Jitcharoen, J., 1999. Engineering the resistance to sliding-contact damage through controlled gradients in elastic properties at contact surfaces. *Acta Materialia*, 47, 3915–3926.
- Suresh, S., 2001. Graded materials for resistance to contact deformation and damage. *Science*, 292, 2447–2451.
- Szymczyk, W., 2005. Numerical simulation of composite surface coating as a functionally graded material. *Materials Science and Engineering A*, 412, 61-65.
- Tornabene, F., 2009. Free vibration analysis of functionally graded conical cylindrical shell and annular plate structures with a four-parameter power-law distribution. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 198, 2911–2935.
- Touloukian, YS., 1967. *Thermo physical properties of high temperature solid materials*. New York: Mcmillan.
- Vel, S.S., 2010. Exact elasticity solution for the vibration of functionally graded anisotropic cylindrical shells. *Composite Structures*, 92, 2712–2727.
- Volmir, A.S., 1972. *Nonlinear Dynamics of Plates and Shells*, Nauka, Moscow (in Russian).
- Wang, Z.X., Shen, H.S., 2011. Nonlinear analysis of sandwich plates with FGM face sheets resting on elastic foundations. *Composite Structures*, 93, 2521–2532.
- Weaver, W. Jr., Timoshenko, S.P., Young, D.H., 1990. *Vibration Problems in Engineering*. Fifth edition, New York: Willey.

- Weingarten, V.I., 1964a. Free vibration of thin cylindrical shells. *AIAA Journal*, 2, 717–722.
- Weingarten, V.I., 1964b. Free vibrations of multilayered cylindrical shells. *Experimental Mechanics*, 4, 200–205.
- Yamanouchi, M., Koizume, M., Hirai, T., Shiota, I., 1990. FGM-90, Proceedings of the First International Symposium on Functionally Gradient Materials, FGM Forum, Tokyo, Japan.
- Yang, J., Shen, H.S., 2003. Free vibration and parametric resonance of shear deformable functionally graded cylindrical panels. *Journal of Sound and Vibration*, 261, 871–893.
- Yildirim, B., Erdoğan, F., 2004. Edge crack problems in homogenous and FGM thermal barrier coatings under uniform thermal loading. *Journal of Thermal Stresses*, 27, 311–330.
- Yıldırım, B., 2004. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılmış kenar çatlaklı bir tabakada ısı şok kırılmasının sonlu elemanlar metodu ile incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19, 235–245.
- Zenkour, A.M., Alghamdi, N.A., 2010. Bending analysis of functionally graded sandwich plates under the effect of mechanical and thermal loads. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 17, 6, 419–432.
- Zerin Z, Sofiyev AH, Schnack E, Dorofeykaya NV, Bestelci U, Yıldız I, 2012. Buckling analysis of ceramic cylindrical with FG coating under lateral pressure, *International Construction Congress*, Isparta, Turkey, 104.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Uğur BESTELCİ  
Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1964  
Medeni Hali : Evli  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : ubestelci@gmail.com



### Eğitim Durumu

Lise : Isparta Şehit Ali İhsan Kalmaz Lisesi  
Lisans : Akdeniz Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği

### Mesleki Deneyim

İnşaat Mühendisi 1988-....

### Yayınları

Avey A., Zerin Z., Deniz A., Özyiğit P., Bestelci U., Burulmaya Maruz Tabakalı Fonksiyonel Değişimli Silindirik Kabukların Stabilitesi, İnşaat Mühendisliği'nde 100. yıl Kongresi, 22-24 Kasım, 2012, İstanbul, 14-16.

Zerin Z, Sofiyev AH, Schnack E, Dorofeyskaya NV, Bestelci U, Yıldız I, Buckling analysis of ceramic cylindrical with FG coating under lateral pressure, Abstract of International Construction Congress, 11–13 October 2012, Isparta, Turkey, 104.