

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BURULMA YÜKÜ ETKİSİ ALTINDAKİ FONKSİYONEL
TABAKA İÇEREN ÜÇ TABAKALI SİLİNDİRİK KABUĞUN
BURKULMASINA WINKLER ZEMİN ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Şeyda ADIGÜZEL

Danışman : Prof. Dr. Abdullah AVEY

YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA 2011

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
SİMGELER DİZİNİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Önemi.....	3
1.2. Tezin Amacı.....	5
1.3. Fonksiyonel Değişimli Malzemeler (FDM) Hakkında Genel Bilgi.....	6
1.3.1. FDM'lerin avantajları.....	7
1.3.2. FDM'lerin uygulama alanları.....	7
1.3.3. FDM'lerin üretim yöntemleri.....	9
1.3.4. FDM'ler için Mori-Tanaka modeli.....	9
1.4. Winkler Zemini ile İlgili Genel Bilgi.....	11
1.5. Kabuklar için Tanımlar ve Hesap Kabulleri.....	13
1.5.1. Kabukların stabilitesi.....	16
1.5.2. Stabilite kavramı.....	16
1.5.3. Galerkin yöntemi.....	19
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	21
2.1. FDM'lerin Özellikleri ve Uygulamaları ile İlgili Makale Özetleri.....	21
2.2. Burulma Yüküne Maruz Silindirik Kabukların Stabilitesi ile İlgili Makale Özetleri.....	26
2.3. Üç Tabakalı FDM Kabukların Titreşimi ve Stabilitesi ile İlgili Makale Özetleri.....	40
2.4. Elastik Zemin Üzerinde Bulunan Silindirik Kabukların Stabilitesi ve Titreşimi ile İlgili Makale Özetleri.....	45
2.5. Tez Konusu ile İlgili Literatürde Bulunan Önemli Kitaplardan Bazıları.....	54
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	59

3.1. Problemin Formülasyonu.....	59
3.2. FDM'nin Analitik Modellenmesi ve Grafikleri.....	61
3.3. FDM Tabaka İçeren Üç Katmanlı Silindirik Kabukların Temel Bağıntılarının Oluşturulması.....	71
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	82
4.1. Karşılaştırmalar.....	82
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	85
5.1. Sonuç ve Öneriler.....	118
6. KAYNAKLAR.....	121
ÖZGEÇMİŞ.....	129

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BURULMA YÜKÜ ETKİSİ ALTINDAKİ FONKSİYONEL TABAKA İÇEREN ÜÇ TABAKALI SİLİNDİRİK KABUĞUN BURKULMASINA WINKLER ZEMİN ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Şeyda ADIGÜZEL

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdullah AVEY

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 çözülmüş ve Winkler elastik zemini üzerinde bulunan FDM içeren üç tabakalı silindirik kabuğun kritik burulma yükü için analitik ifade elde edilmiştir. Winkler elastik zemini üzerinde bulunan tek tabakalı FDM ve homojen silindirik kabuklar için kritik burulma yükünün ifadeleri özel olarak elde edilmiştir. Ayrıca, elastik zemin etkisi dikkate alınmayan üç tabakalı ve tek tabakalı, FDM, metal veya seramik silindirik kabuklar için kritik burulma yükünün ifadesi özel olarak elde edilmektedir. Son olarak kritik burulma yüküne, fonksiyonel değişimli malzemenin farklı kompozisyonları ve hacim bileşenleri değişiminin, kabuk karakteristiklerinin, tabakaların kalınlıklarının değişiminin ve Winkler elastik zeminin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın geçerliliği için elde edilen sonuçlar literatürde sunulan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Winkler elastik zemin, fonksiyonel değişimli malzeme, silindirik kabuk, burulma, kritik yük

2011, 129 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE INVESTIGATION OF THE EFFECT OF A WINKLER FOUNDATION ON THE BUCKLING OF THREE LAYERED CYLINDRICAL SHELLS CONTAINING FUNCTIONALLY GRADED LAYER UNDER TORSION

Şeyda ADIGÜZEL

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

Supervisor: Prof. Dr. Abdullah AVEY

In this thesis the buckling problem of the three layered cylindrical shells containing a functionally graded layer, resting on a Winkler elastic foundation subjected to the torsion load is studied. Firstly, the analytical models of functionally graded materials (FGMs) are carried out and the graphical and numerical presentations of this model are given. Then, mathematical and graphical models of Winkler elastic foundation are presented. Later, the modified Donnell type stability and deformation compatibility equations of the three layered cylindrical shells containing an FGM layer are derived by taking into account the basic relations and the effects of the torsional load and Winkler elastic foundation. The basic equations are solved by using Galerkin method and analytical expression for the critical torsional load of the three layered cylindrical shell containing an FGM layer resting on the Winkler elastic foundation is obtained. The expressions of critical torsional load are obtained for the single-layer FGM and homogenous cylindrical shells resting on the Winkler elastic foundation, as a special case. Besides, the expression of the critical torsional load is obtained for the three-layer and single-layer, FGM, metal and ceramic cylindrical shells without elastic foundation, as a special case, also. Finally, the effects of variations of volume fractions, and different compositions of FGMs, shell characteristics, variations of the thickness of the layers and Winkler elastic foundation, on the critical torsional load are studied. Comparisons are made with the available studies in the open literature to validate this study.

Key words: Winkler elastic foundation, functionally graded materials, cylindrical shell, torsional load, critical load

2011, 129 pages

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında ve yürütülmesinde benden yardımlarını, desteğini ve sabrını esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren kıymetli hocam **Prof. Dr. Abdullah AVEY'e** sonsuz teşekkürü borç bilirim.

2289-YL-10 No'lu proje ile tez çalışmamı maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

108M322 No'lu TÜBİTAK projesinde vermiş oldukları burs desteği için TÜBİTAK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteğini benden hiç esirgemeyen, tez çalışmamda da beni destekleyip, yanımda olan ancak yakın zamanda yitirdiğim annem Gülçin ADIGÜZEL'e ve ailemin diğer tüm fertlerine en içten duygularıyla teşekkür eder, sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Şeyda ADIGÜZEL
ISPARTA, 2011

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. FDM tabaka içeren katmanlı silindirik kabuk Winkler zemini üzerinde ...	12
Şekil 1.2. Kabuk üzerinde x,y ve z eksenlerinin gösterimi.....	14
Şekil 1.3. Ağırlığı olan küreciğin denge durumları.....	16
Şekil 1.4. Basınca maruz çubuğun titreşimi.....	18
Şekil 3.1. a) Burulma yüküne maruz üç katmanlı silindirik kabukta koordinat sistemi, b) tabakaların diziliş şekli; (1) seramik, (2) FDM, (3) metal.....	60
Şekil 3.2. Elastik zemin üzerinde bulunan üç katmanlı silindirik kabuk burulma yükü etkisi altında.....	61
Şekil 3.3. Metal-FDM-Seramik'ten oluşan üç katmanlı sistemde FDM tabakanın değişik hacim kesir fonksiyonları için $E(\bar{z})/E_m$ boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi.....	64
Şekil 3.4. FDM tabakanın değişik hacim kesir fonksiyonları için E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi.....	65
Şekil 3.5a, b. FDM tabakanın değişik hacim kesir fonksiyonları için E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi.....	66
Şekil 3.6a, b. FDM tabakanın değişik hacim kesir fonksiyonları için E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi.....	67
Şekil 3.7. Hacim bileşeni doğrusal değiştiğinde, E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği.....	69
Şekil 3.8. Hacim bileşeni kuadratik değiştiğinde, E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği.....	69
Şekil 3.9. Hacim bileşeni kübik değiştiğinde, E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği.....	70
Şekil 3.10. Hacim bileşeni ters kuadratik, değiştiğinde E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği.....	70
Şekil 3.11. Hacim bileşeni üstel değiştiğinde, E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği.....	71
Şekil 5.1A.1. Zemin etkisi olmadığında Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m ³))......	88

Şekil 5.1A.2. Zemin etkisi altında Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	88
Şekil 5.1A.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	89
Şekil 5.1A.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	89
Şekil 5.2A.1. Zemin etkisi olmadığında Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün h/2a oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h = 100$, $L/R = 2$, $K_w = 5 \times 10^7$ (N/m ³)).....	92
Şekil 5.2A.2. Zemin etkisi altında Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün h/2a oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h = 100$, $L/R = 2$, $K_w = 5 \times 10^7$ (N/m ³)).....	92
Şekil 5.2A.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün h/2a oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h = 100$, $L/R = 2$, $K_w = 5 \times 10^7$ (N/m ³)).....	93
Şekil 5.2A.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün h/2a oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h = 100$, $L/R = 2$, $K_w = 5 \times 10^7$ (N/m ³)).....	93
Şekil 5.3A.1. Zemin etkisi olmadığında Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $R/h = 100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	97
Şekil 5.3A.2. Zemin etkisi altında Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $R/h = 100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	97
Şekil 5.3A.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $R/h = 100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	98
Şekil 5.3A.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına	

bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).	98
Şekil 5.4A.1. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda	
Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w oranına	
bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $L/R=2$).	100
Şekil 5.4A.2. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda	
Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w oranına	
bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $L/R=2$).	100
Şekil 5.4A.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda	
Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w oranına	
bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $L/R=2$).	101
Şekil 5.1B.1. Zemin etkisi olmadığında Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun	
kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$,	
$L/R = 2$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).	104
Şekil 5.1B.2. Zemin etkisi altında Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun	
kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$,	
$L/R = 2$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).	104
Şekil 5.1B.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda	
Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h	
oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$,	
$K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).	105
Şekil 5.1B.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda	
Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h	
oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$,	
$K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).	105
Şekil 5.2B.1. Zemin etkisi olmadığında Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun	
kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$,	
$R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m ³)).	108
Şekil 5.2B.2. Zemin etkisi altında Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun	
kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$,	
$R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m ³)).	108
Şekil 5.2B.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda	
Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$	

oranına bağlı dağılımı $h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m ³)).....	109
Şekil 5.2B.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m ³)).....	109
Şekil 5.3B.1. Zemin etkisi olmadığında Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	113
Şekil 5.3B.2. Zemin etkisi altında Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	113
Şekil 5.3B.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	114
Şekil 5.3B.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	114
Şekil 5.4B.1. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $L/R=2$).....	116
Şekil 5.4B.2. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $L/R=2$).....	116
Şekil 5.4B.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $L/R=2$).....	117

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Zemin katsayısının bazı değerleri.....	13
Çizelge 3.1. Seramik ve metaller için E (MPa) Young modülü, ν Poisson oranı ve ρ (kg/m ³) kütle yoğunluğunun sıcaklığa bağlı katsayıları (Reddy and Chin, 1998; Kitipornchai et al., 2004).....	68
Çizelge 4.1. Değişik uzunluklu kabukların kritik burulma yükü S_{kr}^{Hom} (MPa) değerlerinin karşılaştırılması ($E=14 \times 10^9$ N/m ² , $\nu=0.3$, $h=0.001$ m).....	82
Çizelge 4.2. Burulmaya ($\nu=0.3$) maruz homojen izotropik silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{kr}^{Hom} (psi) değerlerinin karşılaştırılması.....	83
Çizelge 4.3. Huang and Han (2010) çalışmasından elde edilen burkulma yükü S_{kr} (MPa) sonuçları ile tez çalışması sonuçlarının karşılaştırılması.....	84
Çizelge 5.1A. Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m ³))... 87	87
Çizelge 5.2A. Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün h/2a oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m ³)).....	91
Çizelge 5.3A. Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	96
Çizelge 5.4A. Ni/FDMA/Si ₃ N ₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w katsayısına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $L/R = 2$).....	99
Çizelge 5.1B. Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	103
Çizelge 5.2B. Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün h/2a oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m ³)).....	107
Çizelge 5.3B. Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w=1 \times 10^7$ (N/m ³)).....	112

Çizelge 5.4B. Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w katsayısına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $L/R = 2$, $R/h=100$).... 115

SİMGELER DİZİNİ

a_{ij}^k	Malzeme ve kabuk özelliğine bağlı katsayılar
B, B_1, B_2	Bulk modülleri
b_{ij}, c_{ij}	Malzeme ve kabuk özelliğine bağlı katsayılar
E	Efektif Young modülü
E_{fd} / E_m	FDM tabakanın Boyutsuz Young modülü
E_{0m}, E_{0s}	Pür metal ve pür seramiğin Young modülleri
E_m, E_s	FDM tabaka yüzeyinin Young modülleri
$E(\bar{z}), E_{Fd}$	Üç tabakalı kabuğun ve FDM tabakanın Young modülleri
e_x, e_y	Ox ve Oy doğrultularındaki normal deformasyon bileşenleri
e_{xy}	Referans yüzeydeki kayma deformasyonu
f_1	Parametre
G, G_1, G_2	Kayma modülleri
$h = h_1 + h_2$	Üç katmanlı kabuğun genel kalınlığı
$K_w (N/m^3)$	Elastik zemin katsayısı
k	1, 2, 3; tabaka sayısı
$\tilde{L}(x, y, y', y'', \dots)$	Diferansiyel operatör
M_x, M_y, M_{xy}	Moment bileşenleri
m_1	$\frac{\pi R}{L}$, parametre
N_x, N_y, N_{xy}	Kuvvet bileşenleri
N_x^0, N_y^0, N_{xy}^0	Başlangıç momentleri sıfır olduğunda membran kuvvetler
n	Çevre doğrultusunda dalga sayısı
Ox, Oy, Oz	Ana doğrultu, çevresel doğrultu ve bu iki eksene dik eksen
$Oxyz$	Orta yüzeyde seçilen koordinat sistemi
P	Malzeme özellikleri

P_s, P_m	FDM tabakanın seramik ve metal yüzeylerinin malzeme özellikleri
Q	Zemin tepki kuvveti
$Q_{ij}^k, i, j = 1, 2, 6$	Metal, seramik ve FDM özelliklerine bağlı nicelikler
R, L	Silindirik kabuğun yarıçapı ve uzunluğu
S	Burulma yükü
S_{kr}	FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun kritik burulma yükü
S_{krw}	Winkler zemin üzerinde bulunan FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun kritik burulma yükü
S_{kr}^{Hom}	Winkler zemin üzerinde bulunmayan tek tabakalı homojen silindirik kabuğun kritik burulma yükü
S_{krw}^{Hom}	Winkler zemin üzerinde bulunan tek tabakalı homojen silindirik kabuğun kritik burulma yükü
$T(K)$	300 Kelvin
V_1, V_2	Matris fazı ve takviye fazı
V_s, V_m	FDM' nin seramik ve metal hacim kesirleri
w	Orta yüzeye normal doğrultuda yer değiştirme
x / L	Boyutsuz uzunluk koordinatörü
x_1, x_2	İntegrasyon sınırları
$\bar{z} = z / h$	Boyutsuz kalınlık koordinatı
$\bar{z} = z / 2a$	FDM tabakanın kalınlık durumu için boyutsuz koordinat
$\varphi_i(x)$	x değişkenine bağlı fonksiyonları
η	$\frac{\pi R}{nL}$, parametre
ψ	Airy gerilme fonksiyonu
α_i	Aranan parametreler
γ	Dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı
ν	Efektif Poisson oranı

ν_m, ν_s	FDM tabaka yüzeyinin Poisson oranı
ξ_1, ξ_2	Genlikler
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}$	Kabuğun şekil değiştirme bileşenleri
ρ, ρ_1, ρ_2	Kütle yoğunluğu, matris fazı ve takviye fazının yoğunlukları
ν_{om}, ν_{os}	Pür metal ve seramiğin Poisson oranı
χ_{xy}	Referans yüzeyin burulması
χ_x, χ_y	Sırasıyla Ox ve Oy doğrultularındaki eğrilik değişimleri
$\sigma_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}, \sigma_{x,y}^{(k)}$	Tabakalardaki gerilme bileşenleri
$\nu(\bar{z}), \nu_{Fd}$	Üç tabakalı kabuğun ve FDM tabakanın Poisson oranı
λ	Parametre

1. GİRİŞ

Yeraltında ve gömülü olan yağ ve gaz boru hatları dış yüzeyinden elastik toprak ile ve iç yüzeyinden basınçlı akışkan ile sürekli olarak temas halindedirler. Benzer olarak, deniz altındaki yağ ve gaz boru hatları ve ısı dönüştürücü tüpleri her iki yüzeyden akışkanla temas halindedirler. Böyle boru hatları ve tüpler elastik zemindeki ince silindirik kabuklar olarak dikkate alınabilir. Katı ve sıvı yakıtla dolu roket ve füzeler elastik zemindeki silindirik kabuklar için diğer örneklerdir. Uzun araçlarındaki yumuşak ve hafif liflerle destekli dar kabuklar ve gemilerdeki kazan ve depolama tankları, elastik zemindeki silindirik kabuklar için başka örneklerdir. Arazi silahlarının kabukları da elastik bir zemindeki silindirik kabuklar gibi göz önüne alınabilir. Literatürde değişik zemin modelleri vardır, bu modellerden biri de Winkler zemin modelidir. Kumlu toprak ve sıvılar Winkler modeli ile sunulabilir (Hetenyi, 1955; Kerr, 1964; Vlasov and Leont'ev, 1966; Gorbunov–Possadov et al., 1984).

Elastik zemin üzerinde bulunan silindirik kabukların statik ve dinamik problemleri formülasyon ve çözüm esnasında ortaya çıkan matematiksel zorluklardan dolayı kiriş ve plaklarla ilgili çalışmalardan çok daha az sayıdadır. Elastik zemin üzerinde bulunan homojen silindirik kabukların mekanik davranışlarının incelenmesi ile ilgili açık literatürde bazı çalışmalar yer almaktadır (Bajenov, 1975; Paliwal et al., 1996; Naili and Oddou, 2000; Tj et al., 2006).

Fonksiyonel değişimli malzemeler (FDM'ler), 1980'lerde tasarlanmış mikroskobik heterojenik kompozitlerin yeni bir nesli; imalat sırasındaki malzeme bileşenlerinin hacim oranları, mikroyapı, gözenekli yapılarını vb. kontrol ederek, mekanik güçlülük ve termal iletkenliğin makroskobik malzeme bileşenlerinin uzaysal derecelendirilmesi ile oluşturulmuştur. Sonuç olarak, FDM'lerin küçük termal gerilmeler, gerilme konsantrasyonları, gerilme dalgalarının sönümü vs. gibi üstünlüklere sahip olması, onları geleneksel kompozitlere kıyasla daha avantajlı hale getirmektedir (Koizumi, 1993; 1997). Bu yüzden, FDM'ler, son yirmi yıl süresince, havacılık, mekanik, elektronik, optik, kimyasal, biyomedikal, nükleer ve inşaat mühendisliğini içeren modern endüstrilerde geniş uygulamalara sahiptirler.

Fonksiyonel değişimli malzemelerin özellikleri, üretim teknolojisi ve uygulamaları ile ilgili önemli kaynaklar mevcuttur (Reddy and Chin, 1998; Suresh and Mortensen, 1998; Miyamoto et al., 1999; Evans et al., 2001; Müller et al., 2003).

Silindirik kabukların burulma yükü etkisi altında statik ve dinamik burkulma davranışları ile ilgili uzun yıllardır teorik ve deneysel çalışmalar yapılmaktadır (Donnell, 1935; Nash, 1959; Tabiei and Simites, 1994; Mao and Lu, 1999; Sofiyev et al., 2003; Shen, 2008). Günümüzde pür FDM silindirik kabukların burulma yükü etkisi altında burkulma problemlerinin çözümü ile ilgili çok az sayıda olsa da bazı çalışmalar vardır (Batra, 2006; Shen, 2009a; Huang and Han, 2010).

Son on yılda yeni nesil kompozitlerden yapılmış boru ve füzelerin geniş ve kapsamlı uygulamalarında büyük ilerleme görölmektedir. Bu nedenle, elastik zemin üzerinde bulunan FDM'lerden oluşan silindirik kabukların titreşim ve burkulma davranışlarının incelenmesi mühendis araştırmacıların ilgi odağı olmuştur. Günümüzde elastik zemin üzerinde bulunan FDM silindirik kabukların mekanik davranışlarının incelenmesi ile ilgili bilim insanları bazı girişimlerde bulunmuşlardır (Sofiyev et al., 2004; 2011; Sheng and Wang, 2008; Shen, 2009b).

Ayrıca, son yıllarda FDM tabaka içeren katmanlı kabukların zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığında değişik yükler etkisi altında titreşim ve stabilite davranışlarının incelenmesi ile ilgili bazı önemli çalışmalar yapılmıştır (Sofiyev et al., 2007; 2011; Li et al., 2010).

Yapılan kapsamlı literatür taraması Winkler zemin üzerinde bulunan ve burulma yükü etkisi altında olan FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun burkulma probleminin henüz çalışılmadığını ortaya koymuştur. Tez çalışmasında söz konusu problemin çözümü için bir girişim yapılmıştır.

1.1. Tezin Önemi

Malzeme bilimi ve mühendisliğindeki son gelişmeler, her ortamda kullanılabilecek yapısal sistemler geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bu ihtiyaç fonksiyonel değişimli malzeme (FDM) olarak adlandırılan yeni bir malzeme sınıfını ortaya çıkarmıştır. Fonksiyonel değişimli malzemeler (FDM) kavramı, ilk olarak Japonya'nın Sendai bölgesinde 1984'te malzeme bilimciler tarafından termik duvarlı malzeme üretimi gerektiğinde gündeme gelmiştir (Koizumi, 1993; 1997). Bu malzemeler mikroskopik olarak homojen değildir ve makro seviyede malzeme özellikleri bir yüzeyden diğerine sürekli olarak değişmektedir. Bu özellik, genellikle kalınlık doğrultusunda malzeme bileşenlerinin hacim oranlarının sürekli olarak artması sonucu elde edilmiştir (Reddy and Chin, 1998; Suresh and Mortensen, 1998). Genellikle bu malzemeler toz metalürjisi yöntemleri, bulamaç yığını ve sinterleme yöntemi veya kimyasal buharlı depozisyon tekniklerinden biri kullanılarak seramik ve metal karışımından veya farklı metallerin kombinasyonlarından elde edilir (Miyamoto et al., 1999). Bu malzemeler, yüksek hızlı uzay araçlarında, turbo makinelerde ve nükleer ve kimyasal endüstrilerde çok geniş termal derecelenmelere ve yüksek ısılara karşı koymak için termal bariyer veya ısı kalkanı olarak tasarlanabilirler (Kieback et al., 2003). FDM'ler aynı zamanda katı yakıt hücrelerinde ve termo-elektrik veya termo-iyonik malzemeleri kullanan enerji dönüşüm sistemlerinde, tribolojide ve yarı iletken cihazlarda da kullanılmaktadır (Müller et al., 2003).

Tüneller, depolama tankları, basınç kapları, su boruları, boru hatları ve koruyucu kaplama boruları, iş ekipmanları ve diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanıldıklarından elastik ortamda silindirik kabukların statik ve dinamik etkileşimleri, güncel öneme sahip bir problemdir. Bazı durumlar için, silindirik kabuklar temelde toprak bir ortamda bulunur. Katı ve sıvı yakıtla dolu roket ve füzeler, elastik temeldeki silindirik kabukların bir başka örneğidir. Uzay araçları ve gemilerdeki kazanlar ve depolama tanklarındaki yumuşak ve hafif liflerin desteklediği dar kabuklar, elastik ortamda bulunan kabukların diğer örnekleridir (Bajenov, 1975; Paliwal et al., 1996; Shen, 2009b, c).

Matematiksel olarak, böyle problemler hem formülasyon hem de çözüm olarak epey karmaşıktır (elastisite teorisi ve kabuk teorisinin kullanımı, ortamın formülasyonu – kabuk ara yüzey koşulları, çözüm yöntemlerinin gelişmesi gibi). Bir yapı ve bir çevreleyici ortam arasındaki etkileşimi analiz etmek için farklı yaklaşımlar vardır. Kumlu toprak ve sıvılar Winkler modeli ile sunulmuştur (Hetenyi, 1955; Kerr, 1964; Vlasov and Leont'ev, 1966; Gorbunov–Possadov et al., 1984). Bu çalışmada Winkler elastik zemin modeli kullanılacaktır.

Silindirik kabukların burulma yükü etkisi altında burkulma problemlerinin çözümü, özellikle de çözüm fonksiyonunun seçimi ve matematiksel işlemlerin zorlukları diğer yükleme durumları, örneğin; eksenel basınç yükleme durumu, yanal ve hidrostatik basınç yükleme durumlarına kıyasla daha komplikedir. Bütün zorluklara rağmen son 75 yılda homojen silindirik kabukların burulma yükü etkisi altında statik ve dinamik burkulma davranışları ile ilgili yeteri kadar çalışmalar ortaya konulmuştur. Örneğin; eski çalışmalar (Donnell, 1935; Batdorf et al., 1947; Loo, 1954; Nash, 1957; 1959; Suer and Harris, 1959; Ekstrom, 1963; Soni et al., 1973; Yamaki and Matsuda, 1975), yakın geçmişte yapılan çalışmalar (Hui and Du, 1987; Tabiei and Simites, 1994; Huille et al., 1997; Wang and Chen, 1997; Hemed and Dhaliwal, 1998; Kim et al., 1999; Mao ve Lu, 1999; Lennon and Das, 2000; Tan, 2000; Park et al., 2001), son yıllarda yapılmış olan çalışmalar (Mao and Lu, 2002; Sofiyev et al., 2003; Bisagni and Cordisco, 2006; Zhang and Han, 2007; Shen 2008; 2009a; Shen and Xiang, 2008; Arghavan and Hematiyan, 2009; Li and Shen, 2009) olarak listelenebilir.

FDM'lerin diğer kompozitlere göre avantajları ve uygulama alanlarının genişliği, FDM'lerden oluşan silindirik kabukların burulma yükleme durumu için stabilite problemlerine olan ilgiyi artırmıştır (Batra, 2006; Shen, 2009a; Huang and Han, 2010).

Ayrıca, son yıllarda FDM tabaka içeren katmanlı kabukların zemin etkisi dikkate alınmadığında değişik yükler etkisi altında titreşim ve stabilite davranışlarının incelenmesi ile ilgili bazı önemli çalışmalar yapılmıştır (Li et al., 2005; 2010; Sofiyev,

2005; 2007; Wozniak, et al., 2005; Li and Batra, 2006; Sofiyev et al., 2006; 2008a; 2008b).

Son on yılda değişik kompozitlerden yapılmış boru ve füzelerin geniş ve kapsamlı uygulamalarında büyük gelişmeler görülmektedir. Bu da araştırmacıların dikkatinin, FDM silindirik kabuklar ile elastik zeminlerin etkileşimine odaklanmasını zorunlu kılmıştır. Değişik tür elastik zeminler üzerindeki FDM silindirik kabukların burkulma ve titreşim analizleri ile ilgili yayın sayısı epey sınırlıdır (Sofiyev et al., 2004; Sheng and Wang, 2008; Shen, 2009b, c; Shah et al., 2010; Sofiyev, 2010; Sofiyev et al., 2011).

FDM tabaka içeren üç tabakalı silindirik kabukların burulma yükü etkisi altındaki stabilite probleminin çözümü Winkler elastik zemin etkisi dikkate alındığında daha da karmaşık hale gelmektedir. Bu nedenle, Winkler elastik zemini üzerinde bulunan ve burulma yükü etkisi altındaki FDM tabaka içeren üç tabakalı silindirik kabukların kritik burulma yükü değerleri için doğru ve güvenilir bir analiz geliştirmek gerekmektedir. Tez çalışmasında bu önemli konu mercek altına alınmıştır.

1.2. Tezin Amacı

Bu çalışmada, Winkler elastik zemini üzerinde bulunan fonksiyonel değişimli tabaka içeren üç tabakalı silindirik kabuğun burulma yükü etkisi altında burkulma problemi ele alınmaktadır. Önce fonksiyonel değişimli malzemelerin analitik modelleri oluşturularak, bu modellerin grafiksel ve sayısal gösterimi sunulmaktadır. Sonra Winkler zemin modelinin matematiksel ve grafiksel modeli sunulmaktadır. Daha sonra FDM tabaka içeren üç tabakalı silindirik kabuğun temel bağıntıları, silindirik kabuğa etkiyen burulma yükü ve Winkler zemin etkisi dikkate alınarak stabilitenin diferansiyel denklemleri oluşturulmaktadır. Stabilite denklemleri karmaşık sınır koşulunda çözülerek ve Winkler elastik zemini üzerinde bulunan fonksiyonel değişimli malzeme içeren üç tabakalı silindirik kabuğun kritik burulma yükü için analitik ifade bulunmaktadır. Bu ifadeden Winkler elastik zemini üzerinde bulunan tek tabakalı FDM ve homojen silindirik kabuklar için kritik burulma yükünün

ifadeleri özel olarak elde edilmektedir. Ayrıca, bu ifadelerden elastik zemin etkisi dikkate alınmayan üç tabakalı ve tek tabakalı, FDM, metal veya seramik silindirik kabuklar için kritik burulma yükünün ifadesi özel olarak elde edilmektedir. Son olarak kritik burulma yüküne, fonksiyonel değişimli malzemenin farklı kompozisyonları ve hacim bileşenleri değişiminin, kabuk karakteristiklerinin, tabakaların kalınlıklarının değişiminin ve Winkler elastik zeminin etkileri incelenmektedir.

Bu çalışmanın geçerliliği için elde edilen sonuçlar literatürde sunulan çözümlerle karşılaştırılacaktır.

1.3. Fonksiyonel Değişimli Malzemeler (FDM) Hakkında Genel Bilgi

Fonksiyonel değişimli malzemeler (FDM) kavramı, ilk olarak Japonya'nın Sendai bölgesinde 1984'te malzeme bilimciler tarafından termik duvarlı malzeme üretimi gerektiğinde gündeme gelmiştir. Bu malzemelerin bileşim, mikro yapı, geçirgenlik ve diğer özelliklerindeki sürekli değişimler; mekanik dayanım ve termik iletkenlik olarak ortaya çıkmıştır. 1987'de, "Termik Gerilmenin Gevşemesi için Fonksiyonel Değişimli Malzemelerin Geliştirilmesi ile İlgili Temel Teknoloji Üzerine Araştırma" adlı ulusal bir proje başlatılmış ve 1992'de proje bittiğinde, SiC-C FDM için 300 mm kare kabuk ve 50 mm çaplı yarı küresel top örnekleri hazırlanmıştır. FDM kavramı, sadece çok yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin uygulamaya yönelik üretiminde değil, aynı zamanda çeşitli fonksiyonel değişimli malzemelerin geliştirilmesinde de ilgi çekici olmuştur. 1993'te, FDM'lerin daha da geliştirilmesi ve araştırılması için, "Fonksiyonel Değişimli Yapı ile Enerji Dönüşüm Malzemeleri Üzerine Araştırma" isimli ikinci bir ulusal proje başlatılmıştır. Bu program, enerji dönüşüm randımanının geliştirilmesine fonksiyonel değişimli yapı teknolojisini uygulama amacı taşımış ve proje 1997 yılına kadar sürmüştür (Koizumi, 1997).

Fonksiyonel değişimli malzemeler, toz metalürji yöntemleri kullanılarak iki veya daha fazla değişik malzemenin birleştirilmesi ile elde edilir. Hacim oranı bileşenleri dizilişinin değişimi sürecinde kompozisyonlar ve içyapıların sürekli değişikliğe

uğramasından dolayı yeni oluşan malzemenin, mekanik ve termik özellikleri fonksiyonel değişimler göstermektedir. Malzeme özellikleri kalınlık yönünde hacim kesitinde süreklilik kuralı dağılımına göre derecelenir. Fonksiyonel değişimli malzemeler ısıya dirençli olma özelliklerinden dolayı gelişmiş yapısal malzemeler arasında çok fazla ilgi görmektedir (Reddy and Chin, 1998; Suresh and Mortensen, 1998; Miyamoto et al., 1999; Mumm and Evans, 2000; Evans et al., 2001; Pitakthapanaphong and Busso, 2002; Kieback et al., 2003; Müller et al., 2003).

1.3.1. FDM'lerin avantajları

FDM'ler yüksek performanslı malzeme gruplarından oluşan yeni ve çağdaş bir sınıfı temsil etmekte olup birçok mekanik ve termal özellik ile paslanma ve aşınma dayanımı yönünden geleneksel inşaat malzemelerine ve kompozitlere göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu avantajlar;

- İstenilen mekanik özelliklerin yapım aşamasında sağlanabilmesi ve bundan dolayı uygulama alanlarının çok geniş olması FDM'lerin en önemli avantajıdır.
- Birbirine yapışmış iki yakınimsı malzemenin ara yüzeyinin içinde mekanik özelliklerin çok kuvvetli uyumsuzluğunun olduğu ve yüksek ısılarda ayrışma sonucunun ortaya çıkabileceği fiber-matriks kompozitlerin aksine, FDM'ler, yapısal bütünlüğünü devam ettirirken, yüksek sıcaklıkta işlevini sürdürme avantajına sahiptirler.
- Hacim oranı bileşenleri sürekli olarak değişen metal ve seramik karışımı kolaylıkla yapılabilir (Reddy and Chin, 1998; Suresh and Mortensen, 1998; Miyamoto et al., 1999).

1.3.2. FDM'lerin uygulama alanları

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.

Makine mühendisliğinde;

- Motorun sıcak bölümlerinde bulunan metalik elemanlarını soğutma gereksinimlerini azaltmak ve eleman ömrünü uzatmak için FDM kullanılır.
- Yakıt tüketimini azaltmak amacıyla düşük ısı atan dizel motor elemanlarında FDM'den oluşan ısıl bariyer kaplamalar kullanılır.
- FD kompozit karbit/çelik bağlantılı malzeme plastik üretimle delme, dökme, kalıplama kalemlerde uygulanır.
- Güç iletimi ve dağıtımı sisteminde devir frenleyici, bağlantı kesici ve yıldırım durdurucu içeren kompleks bir anahtar olan “Gaz Yalıtım Anahtarı” olarak kullanılır.

Savunma sanayisinde;

- Roketlerin çoğunun kullanıldıktan sonra atılması ve bunun da ülkelere pahalıya mâl olması, ülkelerin maliyeti azaltmaya ve yeni geri kullanımlı roketler üzerinde çalışmaya yönlendirmiştir. Şu anda Japonlara ait Obita mekiği FDM kullanılarak oluşturulmuş ve geri kullanımlıdır.
- FDM'ler seramik zırh ve termo-nükleer kıyafetler gibi savunma mekanizmalarında, insansız uçaklarda, Türksat uydularda vs. kullanılmaktadır.

Endüstriyel alanlarda;

- Hafif olduğu için ve alerjik özellik göstermediği için titanyum saatlerde kullanılmaktadır.
- Optoelektronik alanında; Luchina 10 Gbps'i aşan yüksek hızda bilgi iletim boyutu elde etmek ve iletimin hızını ayarlamak için plastik optik fiberlerde 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.

- Sürtünme veya normal gerilmelerden kaynaklanan yüzey çatlamasını geciktirmek için kullanılan FDM seramikler triboloji alanında uygulamaya örnek olabilir

(Bkz. Miyamoto et al., 1999; Mumm and Evans, 2000; Evans et al., 2001; Pitakthapanaphong and Busso, 2002; Müller et al., 2003; Kieback et al., 2003).

1.3.3. FDM'lerin üretim yöntemleri

FDM üretimi kuru ve yaş yöntemler olmak üzere iki ana grupta toplanır. Bu iki ana gruba giren yöntemler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Suresh and Mortensen, 1998):

1. Kuru Yöntem

- Toz Metalürjisi
- Plazma Spreyiyle Kaplama
- Pervane Kuru Karıştırma (IDB)

2. Yaş Yöntem

- Endüksiyonla Yığıma
- Slip Döküm

1.3.4. FDM'ler için Mori-Tanaka modeli

Mori-Tanaka modeli, iyi tanımlanmış sürekli matris ve süreksiz parçacıklı faza sahip derecelendirilmiş mikro yapı bölgesinde uygulanabilir. Bileşenlerin birbirleriyle etkileşimi göz önüne alınır. Genellikle takviye malzemesi olarak kullanılan küresel seramik parçacıkların boyutları, şekilleri ve yapıdaki dağılımları hakkında çok hassas bir bilgiye sahip olunmadığından efektif modülün hesaplanmasında takviye bileşenine ait hacim oranı dağılımından yararlanılır (Suresh and Mortensen, 1998; Kieback et al., 2003).

Bulk modülü (B) ve kayma modülü (G) arasında, Lamé sabiti λ ile tanımlanan, aşağıdaki bağıntı geçerlidir:

$$\lambda = B - \frac{2}{3}G \quad (1.1)$$

Bir noktadaki efektif kütle yoğunluğu “Karışım Kuralı” ile aşağıdaki gibi verilir:

$$\rho = \rho_1 V_1 + \rho_2 V_2 \quad (1.2)$$

Burada matris faz “1” indisi ile ve küresel parçacıklı takviye fazı “2” indisi ile gösterilir ve aşağıdaki koşul sağlanmaktadır:

$$V_1 + V_2 = 1 \quad (1.3)$$

İzotrop matris malzemesi içinde rastgele dağılımlı olan izotrop parçacıkların olduğu kabuğa uygulanan Mori-Tanaka modeli ile elde edilen efektif Bulk modülü B ve kayma modülü G aşağıda tanımlanmaktadır:

$$\frac{B - B_1}{B_2 - B_1} = V_2 / \left(1 + (1 - V_2) \frac{B_2 - B_1}{B_1 + (4/3)G_1} \right) \quad (1.4)$$

$$\frac{G - G_1}{G_2 - G_1} = V_2 / \left(1 + (1 - V_2) \frac{G_2 - G_1}{G_1 + f_1} \right) \quad (1.5)$$

Burada, B_1 , G_1 ve V_1 matris fazı olmak üzere, sırasıyla, Bulk modülü (hacimsel elastisite modülü), kayma modülü ve hacim oranına karşılık gelmektedir. Burada f_1 aşağıdaki ifadeden bulunur:

$$f_1 = G_1(9B_1 + 8G_1)/6(B_1 + 2G_1) \quad (1.6)$$

Matris faza ve takviye faza ait Bulk modülü ve kayma modülü tanımları aşağıda verilmektedir:

$$B_1 = \frac{E_1}{3(1-2\nu_1)} \quad B_2 = \frac{E_2}{3(1-2\nu_2)} \quad (1.7)$$

$$G_1 = \frac{E_1}{2(1+\nu_1)} \quad G_2 = \frac{E_2}{2(1+\nu_2)} \quad (1.8)$$

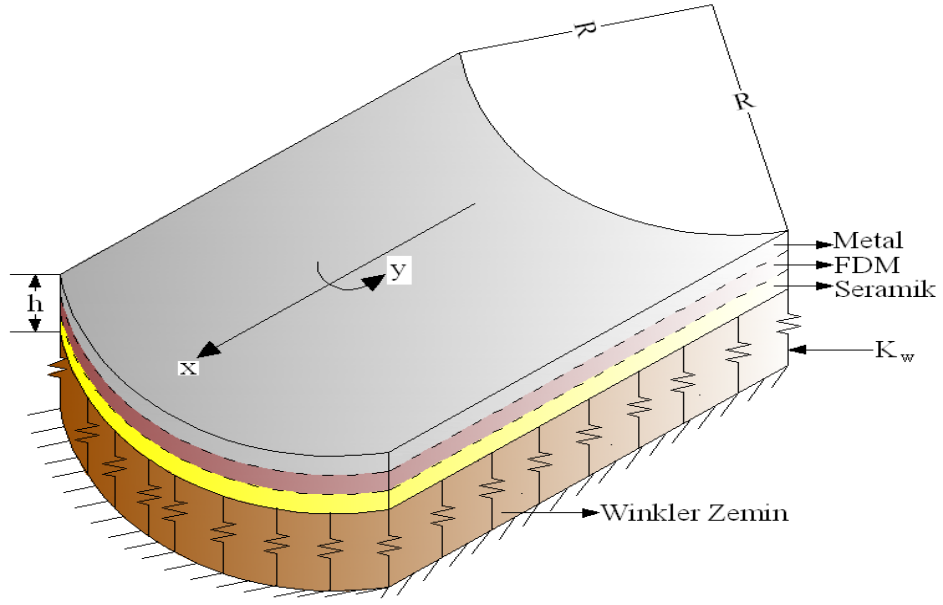
Kabuk kalınlığı boyunca Mori-Tanaka modeline göre değişen elastisite modülü ve Poisson oranının efektif değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$E = \frac{9BG}{3B + G} \quad (1.9)$$

$$\nu = \frac{3B - 2G}{2(3B + G)} \quad (1.10)$$

1.4. Winkler Zemini ile İlgili Genel Bilgi

Tüneller, depolama tankları, basınç kapları, su boruları, boru hatları ve koruyucu kaplama boruları, iş ekipmanları ve diğer uygulamalarda yaygın olarak kullanıldıklarından elastik ortamda bulunan kompozit silindirik kabukların statik ve dinamik etkileşimleri, güncel öneme sahip bir problemdir. Katı ve sıvı yakıtla dolu roket ve füzeler, elastik ortamda bulunan silindirik kabukların bir başka örneğidir. Uzay araçları ve gemilerdeki kazanlar ve depolama tanklarındaki yumuşak ve hafif liflerin desteklediği dar kabuklar, elastik ortamda bulunan kabukların diğer örnekleridir. Bir yapı ve bir çevreleyici ortam arasındaki etkileşimi analiz etmek için farklı yaklaşımlar vardır. Literatürde değişik zemin modelleri vardır, bu modellerden biri de Winkler elastik zemin modelidir. Kumlu toprak ve sıvılar Winkler modeli ile sunulabilir (Hetenyi, 1955; Kerr, 1964; Vlasov and Leont'ev, 1966; Jones and Xenophontos, 1977; Gorbunov–Possadov et al., 1984).



Şekil 1.1. FDM tabaka içeren katmanlı silindirik kabuk Winkler zemini üzerinde

Elastik zemine oturan kiriş, plak ve kabuk problemlerinin çözümünde matematiksel formülasyonu kolaylaştırmak için değişik kabuller yapılmaktadır. Winkler modelinde zeminin birbirine komşu olan noktalarında herhangi bir etkileşimin söz konusu olmadığı kabul edilmektedir. Diğer bir ifadeyle, zemin, aralarında etkileşim olmayan bir seri yaylarla temsil edilmektedir. Winkler tarafından önerilen idealleştirilmiş zemin ortamı modelinde, Q zemin etkilerinin, yapı elemanının (kiriş, plak veya kabuk) w çökmeleriyle orantılı olduğu, zemine etkileyen kuvvetlerin yalnız etkideği noktada şekil değiştirdiği kabul edilir. Bu durum Şekil 1.1’de gösterilmektedir.

Winkler modeli için aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır (Hetenyi, 1955; Kerr, 1964; Vlasov and Leont’ev, 1966; Gorbunov–Possadov et al., 1984).

$$Q = K_w w \quad (1.11)$$

Burada, Q zeminin tepki kuvveti, K_w (N/m^3) elastik zemin veya Winkler katsayısıdır.

Zemin katsayısının bazı değerleri Çizelge 1.1’de sunulmaktadır.

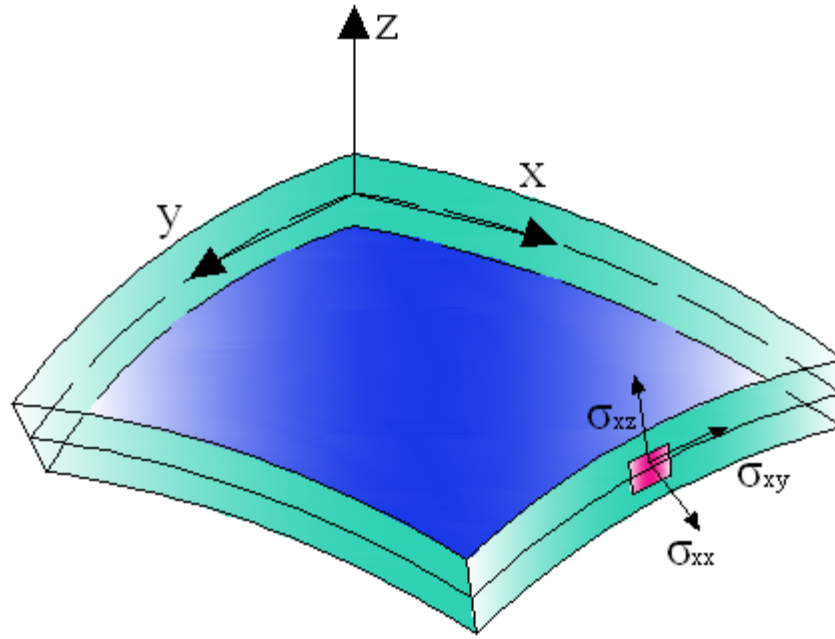
Çizelge 1.1. Zemin katsayısının bazı değerleri

Zemin Türü		K_s (N/m ³)
Kum (Kuru veya nemli)	Gevşek	$8 \times 10^6 \sim 2.5 \times 10^7$
	Orta	$2.5 \times 10^7 \sim 1.25 \times 10^8$
	Yoğun	$1.25 \times 10^8 \sim 3.75 \times 10^8$
Kum (Doygun)	Gevşek	$10^6 \sim 1.5 \times 10^7$
	Orta	$3.5 \times 10^7 \sim 4 \times 10^7$
	Yoğun	$1.3 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8$
Kil	Yumuşak	$1.2 \times 10^7 \sim 2.5 \times 10^7$
	Sert	$2.5 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7$
	Çok sert	$> 5 \times 10^7$

1.5. Kabuklar için Tanımlar ve Hesap Kabulleri

Aralarındaki h uzaklığı diğer boyutlarına göre çok küçük olan iki yüzeyle sınırlanan cisim kabuk olarak adlandırılır. Kabuk kalınlığını iki eşit kısma bölen yüzeye orta yüzey veya referans yüzey denir. Orta yüzey bazı nokta ve çizgiler hariç sürekli ve düzgün kabul edilir. Sabit kalınlıklı bir kabuğu ele aldığımızda orta yüzeye paralel olan ve kabuğun içinden geçen yüzeye orta yüzeye paralel yüzey denir. Orta yüzeyin herhangi bir noktasından ona indirilen normalden geçen düzlemin orta yüzeye kesişmesi normal kesit olarak adlanır. Kabuğun orta yüzeyinde ana eğrilerle çıkan eğrisel koordinat seti oluşturulur. Kabuk dış kuvvet ve momentlerle yüklenmiş olsun. Dış kuvvet ve momentler; kütleli, yüzeysel ve sınır kuvvetleri olabilir. Kütleli kuvvet olarak ağırlık kuvveti, kütleli moment olarak magnetik alanında ferro-magnetik malzemeden oluşan kabuğa etkiyen moment anlaşılır (Ogibalov and Koltunov, 1969).

Kabuk teorisinde hidrostatik yükler yüzeysel yükler olarak kabul edilebilir. Kabuk kenarlarına aktif dış kuvvetler, momentler ve reaksiyon kuvvetleri etkiyebilir. Bunların dışında kabuğa bir çizgi üzerinde yayılı yük veya münferit yük etkiyebilir. İki tanesi x eksenine ikisi de y eksenine paralel olan dört tane kesit geçirelim. Bu kesitler orta yüzeyi dolayısıyla da kabuk elemanını kesecektir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. Kabuk üzerinde x,y ve z eksenlerinin gösterimi

Elemana dış hacimsel ve yüzeysel kuvvetler etmektedir. Bu kuvvetler, kabuğun kesilip ayrılmış diğer kısmı doğrultusunda elemanın dikey kenarına etkileyen iç gerilmeleri dengeler. İç gerilmenin baş vektörü orta yüzeye teğet doğrultuda ise, baş moment sıfıra eşit ise gerilme zincirli gerilme olarak adlandırılır. Baş vektör sıfır ve baş moment sıfırdan farklı ise gerilme momenti olarak adlandırılır. Reel yapılarda zincirli ve momentli gerilmeler birlikte etmektedir. Yapıların emniyeti açısından moment gerilmeleri daha tehlikelidir. Kabukların hesabı ve yapımında onları yok etmek veya onların etkisini minimuma indirmek gerekir. Gerilme momentlerinin olmaması kabuk hesabını önemli derecede sadeleştirir.

Dış kuvvetler etkisi altında kabuğun noktaları yer değiştirme yapar ve orta yüzeye dik yöndeki yer değiştirme çökme veya sehim olarak da adlandırılır. Kabuk teorisinde amaç iç gerilme ve yer değiştirmelerin bulunmasıdır. Günümüzde bu problemlerin iki tane çözüm yöntemi vardır (Ogibalov and Koltunov, 1969):

- Birinci yöntemde kabuk üç boyutlu cisim olarak kabul edilir. Elastisite teorisinin uygun denklemleri orta yüzeyden kabuğun herhangi bir noktasına kadar olan

mesafesinin derecesine göre seri şeklinde aranır. Bu yöntem kesin olmasına rağmen çok zaman alır ve genelde ikinci yöntem tercih edilir.

- İkinci yöntemde bazı varsayımlar yapılarak, elastisite teorisinin üç boyutlu problemleri kabuktaki yükler sistemine statik eşdeğer olan, yük ve momentler sistemi ile yüklenmiş, orta yüzeyin deformasyon ve dengesinin iki boyutlu problemine dönüştürülür

Teorinin daha basit ve kullanışlı olan versiyonu Kirchhoff-Love varsayımına dayanır ve aşağıdaki şekilde formüle edilir:

- Deformasyona kadar kabuğun orta yüzeyine normal olan lif, deformasyon sonrası da orta yüzeye normal olur ve doğrusal şeklini korur.
- Orta yüzeye paralel olan alanlardaki normal gerilmeler diğer gerilmelere kıyasla göz önüne alınmayacak derecede küçük kabul edilir.

Kirchhoff-Love varsayımına göre oluşturulan teori yaklaşık teoridir. Bu varsayımın h/R mertebesinde hata payı vardır. Burada h , kabuğun kalınlığı, R , orta yüzeyin küçük boyutudur.

Pratikte kabukların hesabı aşağıdaki kabullere dayanır:

- a) Kabuk kalınlığının, kabuğun diğer boyutlarına göre küçük olduğu,
- b) Sehimler ve çökmelerin, kabuk kalınlığına kıyasla küçük olduğu,
- c) Şekil değişiminden önce ortalama yüzeye dik bir doğru üzerinde bulunan noktaların, şekil değiştirmeden sonra da deforme olmuş ortalama yüzeye dik olan doğru üzerinde olduğu,
- d) Ortalama yüzeye dik doğrultuda etki eden normal gerilmelerin ihmal edilebilecek mertebede olduğu varsayılır.

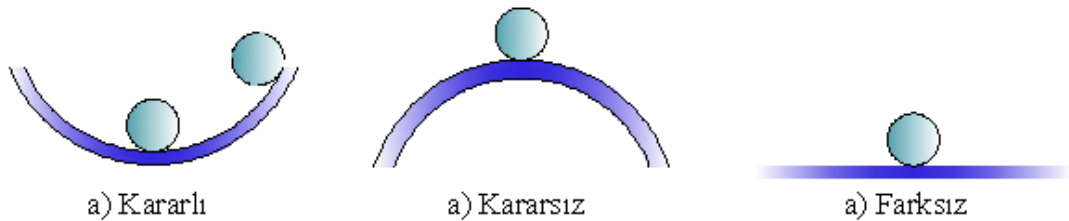
1.5.1. Kabukların stabilitesi

Taşıyıcı sistemlerin emniyet hesaplarında ince kalınlıklı kabukların burkulma emniyeti daha fazla önem kazanmaktadır. Şekil değiştirme ve eğrilikler arasındaki bağıntılar ile kuvvet ve moment bileşenlerini yer değiştirme bileşenlerine bağlayan bağıntıların yeteri kadar zor oluşumundan dolayı, kabukların stabilite sınırları, plaklara göre, daha zor bulunur. Kabukların denge denklemlerinde, etkileri genellikle önemsiz olan bir takım terimler bulunmasına rağmen stabilite problemlerinin çözümünde bunların ihmal edilmesi çok güçtür.

Kabukların stabilite sınırlarını bulmak için burkulma problemlerinin diferansiyel denklemleri oluşturulmalı ve tüm sınır şartları göz önüne alınarak integrallenmelidir. Bu durumda çözüm sadece belirli yüklerin (kritik yüklerin) etkisi altında mümkün olur. Bu yüklerin en küçüğü aranan burkulma yüküdür. Deforme olmuş kabuk elemanının denge şartlarını oluşturarak stabilitenin diferansiyel denklemleri elde edilir. Bu denklemler enerji yöntemiyle de elde edilebilir. Enerji yöntemi burkulma esnasında ortaya çıkan yer değiştirmelerin varyasyon probleminin kullanılmasını gerektirir. Bu problem ise kabuk burkulmasının diferansiyel denklemini verir. Enerji yöntemlerinden biri de Galerkin Yöntemidir (Wolmir, 1967).

1.5.2. Stabilite kavramı

Stabilite kavramına günlük hayatta sıkça rastlanmaktadır. Stabilite kavramını anlayabilmek için aşağıdaki örneği ele alalım. Şekil 1.3'te ağırlığı olan küreciğin dengesi 3 durumda gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Ağırlığı olan küreciğin denge durumları

Küreciğin Şekil 1.3'teki durumları birbirinden stabilitenin karakterine göre ayrılmaktadır. Küreciği şekildeki gibi denge durumundan çıkarıldıktan (kesik çizgi ile gösterilen durum) sonra kendi kendine bırakıldığında orta durum etrafında titreşim yapar (Wolmir, 1967).

Küreciğin 1. durumuna (a şıkkı) dengenin kararlı durumu denir. Kürecik 2. durumda denge durumundan uzaklaşır ve dengenin kararsız durumu denir (b şıkkı).

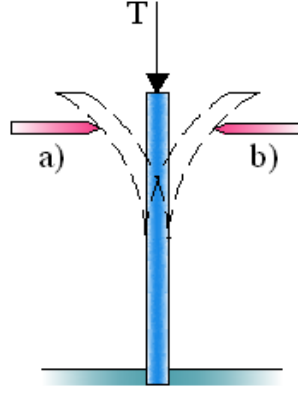
Bilindiği gibi küreciğin titreşim frekansı denge durumuna göre yüzeyin eğriliğine bağlı olup, bu eğrilik ne kadar büyük olursa titreşim frekansı o kadar küçük olur. Bu durum özellikle stabilitenin dinamik kriterleri için önem taşımaktadır.

Şekil 1.3'te (c şıkkı) eğri yüzeyin limit durumu yani düzlem göz önüne alınmıştır. Burada küreciğin herhangi bir durumu kararlıdır. Bu durum farksız denge durumu olarak adlandırılır.

Şimdi ise mukavemette bilinen bir problemi ele alalım. Bir ucu ankastre mesnet ile dikey şekilde tutulan esnek çubuğu ele alalım (Şekil 1.4).

Kabul edelim ki çubuğun serbest ucuna P basınç kuvveti etkimiş olsun. Kuvvetin küçük değerleri için çubuk sıkılacak, fakat doğrusal şekli değişmeyecektir. Çubuğun serbest ucu sağa veya sola çekilip bırakıldığında çubuk dikey durumu etrafında titreşim yapacaktır. Çubuğun bu denge durumu stabil veya kararlı denge durumudur. Titreşim frekansı basınç yükünün değerine bağlı olarak değişmektedir. Yük arttığında titreşim frekansı küçülecek ve yük kritik değerine ulaştığında küçük titreşim frekansı sıfıra eşit olacaktır. Dolayısıyla, çubuk farksız denge durumunda olacaktır. Dikkat edilirse söz konusu 2. durum için çubuğa hiç eğim verilmemiştir.

Bilindiği gibi çubuklar reel malzemelerden oluşturulmaktadır. Çok büyük olmayan eğimlerde (çökmelerde) çubuk plastik deformasyona maruz kalabilir ve dikey durumdan eğik duruma geçer ve o şekilde a ve b durumlarının herhangi birine gider ve orada kalır.



Şekil 1.4. Basınca maruz çubuğun titreşimi

Kabul edelim ki, çubuğa etkiyen yük kritik değerin üzerinde olsun. Bu durumda çubuğun dikey durumu önceki gibi dengede olacak fakat bu denge kararlı olmayacaktır. Bir başka deyişle herhangi tepkide eğim alacak ve dikey duruma geri dönemeyecektir. Çubuk için bu üç durum, kürecik için Bkz. Şekil 1.3'te sunulan üç duruma benzetilmektedir.

Elastik çubuk denge durumundan çıkarıldığında yeniden denge durumuna dönerse çubuğun bu durumuna denge durumu denir. Denge durumundan çıkarılan çubuğun değişik mukavemet kuvvetleri etkisi altında titreşimi sönümleşir. Dengenin başlangıç şeklinin kararsız olduğu ana karşılık gelen yüke kritik yük denir. Çubuğa kritik yüke eşit ve ondan daha büyük bir yük etkidiğinde çubukta boyuna eğilme oluşur. Kritik yük ötesi bölgede kararlılık denge şeklinin eğilmiş şekli olacaktır. Kritik noktadan sonra denge şekilleri dallanmaktadır (bifurkasyon). Bu durum denge şekilleri arasında kararlılığın değişimini karakterize etmektedir. Stabilité problemlerinde küçük yer değiştirmelerde genellikle farksız denge durumu dikkate alınır ve kritik yükün üst değeri bulunur. Büyük veya sonlu yer değiştirmelerde kritik ötesi durum incelenir ve kritik yükün alt değeri bulunur.

1.5.3. Galerkin yöntemi

Galerkin yöntemi bir varyasyon yöntemi olup diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılmaktadır. Kabul edelim ki aşağıdaki diferansiyel denklem verilmiş olsun:

$$\tilde{L}(x, y, y', y'', \dots) = 0 \quad (1.12)$$

(1.12) diferansiyel denkleminin çözümü aşağıdaki şekilde aranır:

$$y \approx y_n = \sum_i \alpha_i \phi_i(x) \quad (1.13)$$

Burada $\tilde{L}$, diferansiyel operatör; α_i , aranan parametreler ve $\phi_i(x)$ fonksiyonları x değişkenine doğrusal bağlı olup, statik ve kinematik sınır koşullarını sağlamaktadır (Wolmir, 1967).

(1.13) sistemi tam ve kapalı bir bölgeye ait olup (1.12) operatörünün bulunması içindir. Bunun için bir fonksiyon seçilir ve onun şartlı ekstremumu yazılır. Bu fonksiyon (1.12) diferansiyel denklemini sağlayan ekstremal değere sahip olur. Bu fonksiyonu elde etmek için (1.13) fonksiyonu (1.12) denkleminde yerine yazılır ve bu denklemin her iki tarafı $\phi_i(x)$ 'e çarpılarak x_1 'den x_2 'ye integrasyon yapılır.

$$\int_{x_1}^{x_2} \tilde{L}(x, y_n, y'_n, y''_n, \dots) \phi_i(x) dx = 0 \quad i=1,2,\dots,n \quad (1.14)$$

İntegrasyondan sonra n tane denklemden oluşan aşağıdaki sistem elde edilir:

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde tez çalışması ile ilgili, son yıllarda yayınlanmış fonksiyonel değişimli malzemelerden oluşmuş silindirik kabukların elastik ve elastik olmayan zemin üzerindeki stabilitesi ve burkulması ile ilgili çalışmaların kısa özetleri sunulmuştur. Bunun yanı sıra tez konusu ile ilgili kitaplar, teorik ve deneysel çalışmalardan da kısaca bahsedilmektedir.

2.1. FDM' lerin Özellikleri ve Uygulamaları ile İlgili Makale Özetleri

Erdogan ve Wu (1996) çalışmasında, statik olarak kendi dengelenmiş termal veya rezidüel(kalıntı) gerilme altındaki serbest elastik tabaka dikkate alınmıştır. Tabakanın fonksiyonel değişimli malzemeden oluştuğu varsayılmıştır, yani tabakanın termo-mekanik özellikleri kalınlık koordinatının sürekli fonksiyonları olarak farz edilmiştir. Tabaka, gömülü veya sınırlarına dik bir yüzey çatlakları içermektedir. Süperpozisyon yöntemi kullanılarak problem, çatlak yüzey çekmeleri sadece dış kuvvetler olan karmaşıklık problemine indirgenmiştir. Orijinal problemin boyutlar, geometri ve yükleme koşulları öyledir ki sonsuz tabaka için karmaşıklık problemi düzlem gerilme modu I çatlak problemi tarafından yakınsanabilir. Termal gerilme problemi için genel bir tartışmadan sonra, homojen olmayan ortam içersindeki çatlak problemi formüle edilmiştir. Derecelenmiş tabaka ve dikkate alınan ara yüzey bölgeleri uygulanarak, termo-mekanik özelliklerin kalınlık varyasyonunun monoton olduğu farz edilmiştir. Böylece Young modülü, termal genişleme katsayısı ve termal iletkenlik gibi fonksiyonların iki parametrelili eğri boyunca uygun üstel fonksiyonlar tarafından ifade edilebildiği belirtilmiştir. Genelleştirilmiş Cauchy çekirdeği ile çatlak problemi integral denkleme indirgenmiş ve sayısal olarak çözümlenmiştir. Termal gerilmeler, gerilme yoğunluğu faktörlerinin dağılımı hakkında örnek çözümler verildikten sonra gömülü ve yüzey çatlakları için sunulmuştur. Ayrıca, yakınında ve yüzeyinde sıkıştırmaya ve iç bölgede gerilme altında olan FDM tabakanın çatlak/temas problemi için sonuçlar dâhil edilmiştir.

Evans et al., (2001), termal bariyerlerin durabilitesinin, büyük oranlı burkulma ve kavlama ile sonuçlanan son çökmeden önce biriken birleşme olayları, yayılım ve çatlak çekirdeklenme dizisi tarafından yönetilmekte olduğunu belirtmişlerdir. Farklı üretim yaklaşımları ve yönetim senaryoları nedeniyle birçok özel mekanizma dâhil edilmiştir. Bu mekanizmalar anlaşılmaya başlanmıştır. Bu çalışmada, bu kavram ele alınmış ve durabilite, malzeme özellikleri ve çarpıcı morfolojik özellikler arasındaki ilişki sunulmuştur. Hatanın büyük oranda yakın iç yüzeyde amplifikasyon rolü yoluyla termal olarak oluşmuş oksitteki büyük artık basınçla ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bu amplifikasyon sonunda burkulan ve parçalanan TBC'den yayılan enerji salınımına neden olduğu belirtilmiştir.

Kaysser ve Ilschner (1995) çalışmasında, bireysel kurumların ve araştırmacıların çalışmalarını koordine eden ulusal Avrupa programları olmamasına rağmen, fonksiyonel değişimli malzeme prensiplerinin uygulamasının Avrupa'da yaygın olduğundan bahsedilmiştir. Bu çalışmada birçok alanda gerçekleştirilen araştırma proje örnekleriyle Avrupa'daki güncel araştırmalar özetlenmiştir. Avrupa'daki FDM çalışmalarıyla ilgili daha detaylı bilgiye Ocak 1994'te Laussane, İsviçre'de düzenlenen FDM'94 sempozyumunun bildirilerinden ulaşılabilir. Bu sempozyum Lausanne İsviçre Federal Teknoloji Enstitüsü, Malzeme Bölümü aracılığıyla B. Ilschner tarafından düzenlenmiştir.

Kieback et al., (2003) çalışmasında, geliştirme teknikleri alanındaki Alman öncelikli programı olan “Fonksiyonel Değişimli Malzemeler” in başarısı incelenmiştir. Metal eriyikleri içeren kullanılmış olan güç süreci ve teknikleri tanımlanmıştır ve değişimli polimer süreci alanındaki son gelişmeler göz önünde bulundurulmuştur. Öngörülebilir dereceli kusursuz kısımların üretimi için dereceli formülasyon, sinterleme ve kurutma modellemesinin önemi ve fonksiyonel değişimli malzemelerin gelişimine sayısal simülasyonların başarılı bir uygulamasının örnekleri verilmiştir.

Koizumi (1993) çalışmasında, fonksiyonel değişimli malzemeler (FDM) ile ilgili ilk genel düşüncenin 1984 yılında Japonya'da bir grup malzeme bilimcisi tarafından ısı geçirimini engelleyecek malzeme hazırlamak için ortaya atıldığı ve ısı yalıtımı ile

ilgili malzeme yapımında çok fazla ilgi gördüğü belirtilmiştir. Fonksiyonel Değişimli Malzeme kavramı (FDM) 1984 yılında Sendai bölgesindeki malzeme bilimciler tarafından termal bariyer malzemelerin hazırlanması için önerilmiştir. Bu malzemelerin bileşimindeki sürekli değişimler, mikro yapısı, porozitesi, vs. mekanik mukavemet ve termal iletkenlik gibi özelliklerde değişime sebep olduğu teyit edilmiştir.

Koizumi (1997) çalışmasında, fonksiyonel değişimli malzemelerin kompozisyon, mikro yapı, porozite vb.lerindeki sürekli değişimler mekaniksel güç ve termal iletkenlik dereceli benzer özelliklerinin sonuçları belirtilmiştir. 1987’de ulusal bir proje olan “Termal Gerilmeleri İyileştirmek için Fonksiyonel Değişimli Malzemelerin Geliştirilmesi için Temel Teknoloji Araştırmaları” incelenmeye başlanmıştır. 1992’de proje bittiğinde, SiC-C FDM 300 mm kare kabuk ve 50 mm çaplı yarım küresel kürelerin örnekleri koni uçları için hazırlanmıştır. FDM konsepti sadece süper dayanıklı malzemelerin pratiksel dizaynlarında değil ayrıca çeşitli fonksiyonel malzemelerin gelişiminde de ilgi alanı olmuştur. 1993’te ikinci ulusal proje olan araştırma ve geliştirme için “Fonksiyonel Değişimli Yapının Enerji Dönüştürme Malzemeleri Araştırması” başlatılmıştır. Bu program enerji dönüştürme yeterliliğinin gelişimine fonksiyonel değişimli yapıyı uygulamayı amaçlamıştır. Proje 1997 yılına kadar devam etmiştir.

Miyamoto et al., (1999) fonksiyonel değişimli malzemenin (FDM), malzeme özelliklerindeki ilgili değişimler sonucunda kompozisyon, yapı ve hacmin yavaş yavaş değiştiğini göstermişlerdir. FDM konseptinde birçok olasılık doğal olarak uygulandığında, malzemenin gelişeceği ve yeni fonksiyonlar yaratacağı beklenir. FDM’lerin ve uygulamalarının dizaynı, modellemesi, işletimi ve hesaplamasının ayrıntılı tanımı çalışmada belirtilmiştir.

Mumm ve Evans (2000), uzun termal etkilenme sonrasında termal bariyer kaplamalarının (TBC) özelliklerinin delaminasyonunu ve kalıntı sertleşmesini araştırmak için bir izlenim testi kullanmışlardır. Delaminasyon yörüngesi termal olarak oluşmuş (TGO) oksit kalınlığını değiştirmek için bulunmuştur. Küçük

kalınlıklarda TGO ve TBC arasında genellikle delaminasyon olduğu görülmüştür. 1100 °C’de 100 saat etkileşimden sonra geliştirilen kalın TGO’da delaminasyon TGO/bağ kaplama içyüzeyi arasında uzanır, fakat küçük oksit çevrelerde sınır kaplama içersine gömülüdür. 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.

Müller et al., (2003) çalışmasında, fonksiyonel özelliklerinin bir bileşenini içeren fonksiyonel malzemelerin prensipleri, hazırlanışı, karakterizasyonu ve uygulaması, sensörler ve termo-jeneratörlerde uygulanması için termoelektrik (TE) malzemelerdeki temel vurgu ile incelenmiştir. Sunulan fonksiyonel değişimli malzemelerin (FDM) uygulamasının başka örnekleri; alçak sıcaklık katsayılı kapasitörler için dielektrik ince-film yığınları, yakıt hücresi elektrotlarındaki mikrodalga-işlemcili yapı gradyentleri ve Peltier ısıtıcılar için bölgesel-erimeli değişimli $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ malzemelerdir. TE katı çözümlerindeki kompozisyonel gradyentlerin hazırlanması ve özellikleri $(\text{FeSi}_2, (\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3, \text{Mg}_2(\text{Si, Ge, Sn}), \text{PbTe})$ analiz edilmiştir. Fonksiyonel değişimli ve parçalanmış termoelektrik yapılar için bir teorik tasarım aracı, en uygun uzaysal kompozisyonel dağılımı tanımlamak için bir yerel seçim kriterine de yer verilmiştir.

Nie ve Batra (2010) çalışmasında, farklı sınır koşullarına maruz kalmış iç ve dış yüzeye sahip fonksiyonel değişimli boşluklu bir silindirin düzlemsel gerilme deformasyonları için kesin bir çözüm elde etmek için Airy gerilme fonksiyonu kullanılmıştır ve silindir bir izotropik ve sıkıştırılamayan doğrusal elastik bir malzemeden meydana gelmiştir. Yarıçap r ’nin bir güç yasası ya da bir üstel fonksiyonu olarak verilmiş olan kayma modülü için gerilmeler, hidrostatik basınç ve yer değiştirmeler için belirgin ifadeler elde edilmiştir. Tersine, silindirde önceden belirlenmiş bir varyasyona sahip olmak için radyal ve çember gerilmelerinin doğrusal bir kombinasyonu için kayma modülünün r ’li varyasyonu incelenmiştir, bu ters problem genellikle malzeme adaptasyonu olarak adlandırılmıştır. Tersine problemi her yerde pozitif çözümlerken kayma modülü bulunmuştur. Sonuçlar birkaç

problem için hesaplanmış ve grafiksel olarak sunulmuştur. İlk defa sıkıştırılmayan malzemeler için iki boyutlu problemleri analiz etmek için Airy gerilme fonksiyon yaklaşımının kullanıldığı görülmüştür. Bir fonksiyonel değişimli silindirin eksenel simetrik deformasyonları incelendiğinde, çember gerilmesi için silindir kalınlığı boyunca doğrusal olduğu kayma modülünün daha önceden tarafından incelenmiş olduğu gibi radyal koordinat r ye uygun olması gerektiği belirtilmiştir ve maksimum düzlemsel kayma gerilmesi için sürekli olan kayma modülün r^2 olarak değişmesi gerektiği belirtilmiştir. Basınç açısından maksimum düzlemsel kayma gerilmesi için ifadenin ve silindirin iç ve dış yüzeylerinin yarıçapının kayma modülü r^2 ye uygun olan tüm malzemeler için kapsamlı bir geçerli sonuç olduğu sunulmuştur. Boşluklu bir silindir için iç yüzey üzerinde yerleştirilmiş ve dış yüzey üzerinde teğet çekme gücüne maruz kalmış kalınlık doğrultusunda düzlemsel kayma gerilmesi dağılımının ayrıca kapsamlı olduğu ve yüzey çekiş gücü ve silindirin dış yarıçapı tarafından belirlenerek, kayma modülünün uzamsal varyasyonlarının bağımsız olduğu belirtilmiştir.

Pitakthapanaphong ve Busso (2002), termal yüklemeye maruz fonksiyonel değişimli tabaka içeren üç tabakalı genel sistemin davranışını açıklamak için tutarlı bir sistem önermişlerdir. Keyfi kompozisyon profilinin, FDM tabakası ile birbirine birleştirilmiş metal ve seramik tabakadan oluşan üç tabakalı sistemin termo-elastik ve termo-elastoplastik davranışını açıklamak için analitik ve yarı-analitik çözümler elde edilmiştir. Keyfi sıcaklık süreksiz şartlara maruz genel FDM sistemde gerilme dağılımlarının çözümleri sunulmuştur. Lokal elastoplastik FDM davranışının homojenleştirilmesi, onun özel fazları cinsinden, kendi tutarlı yaklaşım kullanılarak oluşturulmuştur. Bu çalışmada, FDM metal faz için kuvvet kanunu zorlama katılan davranış varsayılmıştır. FDM sistemlerindeki gerilme dağılımları, sonlu eleman analizinden elde edilen kesin sayısal çözümlerle karşılaştırılmış ve iyi sonuçlar ortaya çıkmıştır. Aynı zamanda, üç tabakalı sistemler için plastik şekil değiştirme için önerilen kritik sıcaklık süreksizleri için çözümler verilmiştir.

Pompe et al., (2003) çalışmasında, fonksiyonel değişimin, yaşayan dokunun karakteristik bir özelliği olduğundan bahsedilmiştir. Biyolojiden esinlenen

malzemeler, kemik yer değiştirmesi için implant imal etmede yeni yaklaşımlar ortaya çıkarmıştır. Fonksiyonel değişim prensibi kullanılarak yeni implant malzemeler için farklı yollar sunulmuştur. Bir yüzeyi güçlendirilmiş yüksek yoğunluklu polietilenle birleştirilmiş ultra-yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) içeren bir değişimli yapı inşa edilerek, diz noktası yer değiştirmesi için suni bir biomalzeme geliştirilmiştir.

Reddy ve Chin (1998), fonksiyonel değişimli silindir ve plakların dinamik termoelastik davranışını çalışmışlardır. Termomekanik iftleşme formülasyonda kullanılarak, formlasyonun bir sonlu eleman modeli geliştirilmiştir. Termal yüklemeye maruz fonksiyonel değişimli eksenel-simetrik silindirin ısı iletimi ve termo-elastik denklemleri çözülmüştür. Ayrıca, fonksiyonel değişimli bir plak için çapraz kayma gerilmeleri ve yönlerini hesaba katan, üç boyutlu ısı iletimi denklemi ile birleştirilen birinci mertebe kayma şekil değiştirme plak teorisi kullanılarak termo-elastik bir sınır değer problemi formüle edilmiştir. Tüm problemlerde bir seramik ve bir metalin hacim oranları, kuvvet kanunu dağılımı kullanılarak değiştirilmiştir. Malzemeler, Zirkonyum, Alüminyum, Silikon Nitrat, Ti6Al4V, paslanmaz elik ve Nikel içermektedir.

Touloukian (1967), yüksek sıcaklıklı katı malzemelerin termo fiziksel özellikleri araştırmasında 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 sunmuştur.

2.2. Burulma Yüküne Maruz Silindirik Kabukların Stabilitesi ile İlgili Makale zetleri

Arghavan ve Hametiyen (2009) alışmasında, gelişigüzel şekilli fonksiyonel derecelendirilmiş boşluklu tüplerin burulma analizleri için analitik bir formlasyon sunulmuştur. Ek olarak, poligonal şekilli olarak fonksiyonel değişimli boşluklu tüplerin burulma analizleri için göreceli basitleştirilmiş formüller sunulmuştur.

Çapraz kesimlerin bütün bölümlerinin kalınlıklarının benzer olduğu gösterilmiştir. Bir güç yasası dağılımına göre iki durum arasındaki rijitlik değişimlerinin kayma modüllerinin kalınlık genişliğinde sürekli olarak değiştiği belirlenmiştir. Prvetl'in gerilme fonksiyonu açısından temel denklemler, formülleri üretmek için kullanılmıştır. Formülasyonların doğruluğu ve verimliliğini göstermek için birkaç örnek sunulmuştur. Elde edilmiş sonuçlar doğru sonlu eleman çözümleriyle doğrulanmıştır. Bileşen malzemelerinin değişen kalınlık ve hacim kesirlerinin etkileri ayrıca incelenmiştir. Türetilmiş formüller ince, orta kalınlıklı duvarlı içi boş tüplerin analizleri için kullanışlı olmuştur.

Batdorf et al., (1947) çalışmasında, burulmaya maruz kalmış ince duvarlı silindirlerin kritik gerilmesi için bir teoriksel çözüm sunulmuştur. Sonuçlar birkaç basit formüller ve eğriler şeklinde çok kısa silindirlerin büyük yarıçaplarından uzun silindirlerin küçük yarıçaplarına silindir boyutlarının geniş bir aralığına uygulanabilen bir çalışma ortaya çıkarmıştır. Elde edilen sonuçlar daha önce yapılmış çalışmalarla iyi bir uyum göstermiştir.

Bisagni ve Cordisco (2006) çalışmasında, burkulma ve burkulma sonrası testlerden elde edilmiş deneysel veriler, üç kez kuvvetlendirilmiş kompozit silindirik kabuklar üzerindeki çökmeye kadar gerçekleştirilmiştir. Farklı yüzey ve kuvvetteki kabuklar açıkça burkulma sonrası alanlarda çalışmak için dizayn edilmiştir. Başlangıç geometrik kusurlarını ve kalınlık değişimlerini belirlemek yerine iç ve dış yüzeyler, testlerden önce incelenmiştir. Daha sonra, çöküş kadar bir pozisyon kontrol durumunu kullanarak test edilmiş kabuklar, eksenel sıkıştırma ve eğilme moment altındaki yer değiştirmeye ve dönmeye karşı burulmanın eksenel yük diyagramları testler sırasında gerçek zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. İlk burkulma yükü ve burkulma şeklinin değişimini gözlemlemek için beş adet lazer yer değiştirme sensörü kullanılmıştır. Test sonuçları bu yapıların güç kapasitesinin burkulma sonrası çeşitliliğinde çalıştığını göstermiştir. Gerçekten, ne başarısızlık mekanizmaları ne de herhangi başka tehlikeler burkulma sonrası aralıklarında görülmüştür. Öte yandan, çökmenin, kırılganlığın başarısızlığı nedeniyle ani ve yıkıcı olduğu belirtilmiştir.

Batra (2006) çalışmasında, malzeme modülü sadece eksenel doğrultuda değişen bir izotropik sıkıştırılabilir ya da bir izotropik sıkıştırılamayan doğrusal elastik malzemelerin her ikisinden oluşan dairesel silindirik bir kalıbın burulması analitiksel olarak incelenmiştir. Böylece her bir enine kesit, bir malzemedan oluşturulmuştur. Fakat bir enine kesitin malzemesi bitişik olanından farklıdır. Sıkıştırılamayan malzeme için sonuçlar biyolojik malzemelerin birleşiminden oluşmuş kauçuk benzeri silindirler ve silindirler ile ilgilidir. Sonuçlar ayrıca enine izotropik malzemeler için de elde edilmiştir.

Donnell (1935) çalışmasında, kararsız halde olan yuvarlak ince-duvarlı tüplerdeki burulma için bir teorik çözüm geliştirilmiştir. Bu teorinin sonuçları birkaç basit formülle ve bütün durumları kapsayan eğrilerle verilmiştir. Dengenin diferansiyel denklemleri daha önce bulunmuş olanlardan daha basit bir şekilde türetilmiştir ve gösterilmiş olan birçok kavram ihmal edilmiştir. Kalınlık-uzunluk oranı sıfır ve sonsuz iken iki uç durum için kesin çözüm elde edilmiştir ve ara durumlar için iyi bir tahmin elde edilmiştir. Teori, Donnell (1935) tarafından da gerçekleştirilmiş 50'ye yakın testin de bulunduğu bütün uygun deneylerle karşılaştırılmıştır. Deneysel başarısızlıkla dönme momenti her zaman teoriksek olarak yaklaşık %75 üzerinde minimum %60 daha küçüktür. Sapma biçimi olarak büyük oranda şekiller ve malzemeleri kapsayan teoriler ve deneylerle tahmin edilerek yaklaşık biçimde kontrol edilmiştir ve bu tutarsızlık makul gerçek tüplerde ilk dışmerkezliliğinden büyük ölçüde yüklenilen olduğu kabul edilmiştir.

Ekstrom (1963) çalışmasında, sonuçlar hem birbirinden ayrı, hem kombine yükler için, hidrostatik basınç ve burulma altında dairesel silindirik kabukların elastik burkulma davranışını belirlemek için yapılan bir dizi test için verilmiştir. Boyutsuz etkileşim eğrileri silindirlerin geometrik parametreleri açısından verilmiştir ve genel anlamda P ve T, sırasıyla boyutsuz kritik hidrostatik ve burulma yükleri olduğunda $P+T=1$ sonucu oluşmuştur.

Hemed ve Dhaliwal (1998) çalışmasında, farklı rijitlik modüllü iki malzemedan oluşmuş yarı-sonsuz bir kompozit elastik silindirik kabuğun burkulması dikkate

alınmıştır. Genel silindirik yüzeyde mükemmel bir birbirine bağlanma olduğu varsayılmıştır. Problem Fourier dönüştürmelerinin kullanımı vasıtasıyla çözülmüştür.

Huang ve Han (2010) çalışmasında, silindirik kabukların doğrusal olmayan büyük sapma teorilerinden uyarlanmış olan, büyük deformasyonların doğrusal olmayan gerilme-yer değiştirme ilişkilerini ve enerji yöntemini kullanarak burulma yükü altındaki fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik kabukların doğrusal olmayan burkulma problemleri incelenmiştir. Bileşen malzemelerin hacim kesirlerinin bir güç yasası dağılımına göre kabuk kalınlığı boyunca fonksiyonel derecelendirilmiş kabukların malzeme özelliklerinin düzgünce değiştiği görülmüştür. Bu arada sıcaklığa bağımlı malzeme özelliklerinin hesaba katılmasının temelinde, kabuğun kritik durumundaki harici termal ortamların çeşitli etkileri ayrıca incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, burulma altındaki fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik kabukların doğrusal olmayan burkulmasında harici termal ortamların, boyutsal parametrelerin ve homojen olmayan parametrelerin çeşitli etkilerini göstermiştir. Mevcut teoriksel sonuçlar literatürde var olan diğer sonuçlarca onaylanmıştır.

Hui ve Du (1987) çalışmasında, burulma etkisi altındaki simetrik olmayan enine yaklaştırılmış silindirik kabukların birincil burkulma sonrası durumları incelenmiştir. Koiter'in elastik stabilite teorisinde kullanılmış olan varsayımlar altında, yapının indirgenmiş Batdorf parametresinin (yaklaşık $4 \leq Z_H \leq 20.0$) kesin orta aralığında kusursuz duyarlı olduğu belirtilmiştir. Farklı malzeme bükülme-çekme çifti davranışına bağlı olarak (0° içeride, 90° dışarıda) iki tabakalı mesnetlendirilmiş silindirin (90° içeride, 0° dışarıda) konfigürasyonundan daha az duyarlı olduğu belirtilmiştir. Young modül oranının yüksek bir değerine bağlı olarak burulma burkulma yükündeki artış zorunlu olarak kusursuz duyarlılığın yüksek bir derecesi ile aynı oranda yapılmıştır. Bu çalışmada ilk olarak kusurlu şeklin burulma burkulma durumu ile aynı olduğu göz önünde bulundurulmuştur ve indirgenmiş Batdorf parametresi ve Young modülü oranını içeren kısa parametre değişimleri sunulmuştur.

Huile et al., (1997) çalışmasında, korozyon direncinin ve hafif ağırlığın önemli olduğu petro kimyasal endüstrilerde kompozit boruların kullanılmasından

bahsedilmiştir. Yapısal yüklemelerden gelişen burulma altındaki boru için burkulma yükünün hesaplanmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bu çalışmada burulmadaki kompozit boruların bir analitik modeli sunulmuştur. Boru duvar borularının, kinematikler ve temel ilişkilerini elde etmek için tabakalandırılmış anizotrop plak teorisi geliştirilmiştir. Çözümler uygun sınır koşullu Ritz yöntemini kullanarak elde edilmiştir. Mevcut çalışmanın sonuçları daha önceki araştırmaların analitiksel ve deneysel sonuçlarıyla karşılaştırıldığında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Kim et al., (1999) çalışmasında, burulma yükü altındaki ortotropik silindirik kabukların burkulma problemlerinin çözümü için bir üç boyutlu elastisite çözümü sunulmuştur. Temel diferansiyel denklemleri çözmek için kalınlık koordinatındaki bir dizi Legendre polinomları ile birlikte Galerkin yönteminin karışık bir formu uygulanmıştır. Varolan kabuk teorisi çözümlerinin doğruluğu her iki izotropik ve ortotropik silindirler için bir karşılaştırma çalışmasından belirlenmiştir. İzotropik silindirler için Donnell kabuk teorisinden uyarlanmış çözümler kritik yükler için konservatif olmayan değerleri tahmin etmek için bulunmuştur. Çevresel dalga sayısı arttıkça, kabuk teorisi çözümleri daha doğru değerler sağlamıştır. Kayma deformasyon teorisi elastisite çözümlerine yakın makul sonuçlar verirken, ortotropik silindirler için, klasik kabuk teorisi nispeten kalın ve kısa bir silindir için daha çok kritik yükler öngörmüştür. Detaylı veriler ayrıca kritik burkulma için izotropik, cam/epoksi ve grafit/epoksi için uzunluk oranları ve yarıçap oranları geniş bir yelpaze üzerinden sunulmuştur.

Khashba (1975) çalışmasında, silindirik kabuğun zamana bağlı doğrusal değişen burulma yükü etkisi altında burkulma problemini ele almış ve geometrik doğrusalsızlığı dikkate alarak kritik zaman parametresi değerlerini Runge-Kutta yöntemi kullanarak değişik kabuk karakteristikleri için sayısal olarak bulmuşlardır.

Lennon ve Das (2000) çalışmasında, sonlu eleman analizleri için silindiriksel sınır koşulları, burulma-yer değiştirme ve yarı eksenel bir yükseklikteki bir silindir kesiminin burkulması ve 360° dereceye bölünmüş çevresel bir açının formüle edilmesi gösterilmiştir. Sonlu eleman testleri klasik elastik burulma burkulma teorisine karşı analiz yöntemlerini doğrulamak için rijit olmayan elastik silindirler

üzerinde gerçekleştirilmiştir. Burulmadaki burkulma sonrası davranışlardaki rijitlik etkilerini incelemek için takviye kirişli silindir, halka ve takviye kirişli elastik-plastik limit noktası sonlu, eleman testleri gerçekleştirilmiştir. Bir rijitlendirilmiş boyuna kiriş silindiri elastik aralıktaki tepkisinin yüzey basıncı ve eksenel kuvvetin birçok kombinasyonlarına maruz kalmıştır ve daha sonra burulmadaki plastik çökmeye dirençteki yüzey basınç yüklerini ve eksenel etkileri incelemek için test edilmiştir.

Li et al., (2001) çalışmasında, bir burulma etkisi yüklenmesine maruz kalmış ve iki eş eksenli elastik birbirinden farklı homojen silindirler arasındaki bir fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme ara tabakasında konumlanmış bir silindirik çatlak problemi incelenmiştir. FDM ara tabakasının kayma modülünün ve kütle yoğunluğunun bu iki eş eksenli silindirler arasında sürekli olarak değiştiği varsayılmıştır. Karışık sınır değer problemi ilk olarak bir tekil integral denklemine Laplace ve Fourier integral dönüşümlerini uygulayarak Laplace alanında Cauchy tipi Kernel ile indirgenmiştir. Tekil integral denklem daha sonra sayısal olarak çözülmüştür ve dinamik gerilme yoğunluk faktörü (DSIF) ayrıca bir sayısal Laplace ters çevirim tekniğiyle elde edilmiştir. DSIF'in en üst değere hızla yükselmesi ve ardından azalması ve neredeyse salınım olmadan statik değer eğiliminde bulunduğu görülmüştür. Çatlağın yerinin etkisi, FDM ara tabaka kalınlığı ve bitişik malzeme özelliklerinin ilgili büyüklükleri incelenmiştir. Diğerleri arasında FDM eğimini arttırarak DSIF'in kolayca indirgenebileceği bulunmuştur.

Li ve Shen (2009) çalışmasında, burulmaya maruz kalmış sonlu uzunluktaki bir kayma deformasyonlu anizotrop tabakalandırılmış silindirik kabuk için burkulma sonrası analizler sunulmuştur. Kabuğun her bir tabakasının malzemesinin doğrusal elastik, anizotrop ve fiber güçlendirilmiş olduğu varsayılmıştır. Temel denklemler, uzama-burulma, uzama-bükülme ve bükülme-burulma çiftlerini içeren ve von Karman-Donnell tipi kinematik doğrusalsızlıklı klasik kabuk teorisinden uyarlanmıştır. Kabuğun doğrusal olmayan burkulma öncesi deformasyonları ve başlangıç geometrik kusurlarının her ikisi de hesaba katılmıştır. Burkulma yükleri ve burkulma sonrası denge yöntemlerini belirlemek için bir tekil pertürbasyon tekniği kullanılmıştır. Sayısal gösterimler kusursuz ve kusurlu, oldukça kalın, anizotrop

tabakalandırılmış kabukların burkulma sonrası tepkilerini kabuk parametrelerinin ve yükleme dizisinin farklı değerleri ile birlikte gösterilmiştir. Sonuçlar, kabuk burulmaya maruz kaldığında ortak bir basınç gerilmesi beraberinde bir kayma gerilmesi olduğunu doğrulamıştır. Bu çalışmada, burulma altındaki oldukça kalın tabakalandırılmış silindirik kabuk için burkulma sonrası denge yollarının karşılaştırılması incelenmiştir.

Li ve Lin (2010) çalışmasında, yanal basınca, hidrostatik basınca ve dış sıvı basıncına maruz kalmış sonlu uzunluktaki oldukça kalın anizotrop tabakalı silindirik bir kabuğun doğrusal olmayan burkulma ve burkulma sonrası davranışı sunulmuştur. Kabuğun her bir tabakasının malzemesinin doğrusal elastik, anizotrop ve fiber-güçlendirilmiş olduğu varsayılmıştır. Temel denklemler von Karman-Donnell tipi kinematik doğrusalsızlıklı ve uzama/burulma, uzama/bükülme ve bükülme/burulmalı yüksek dereceden kayma deformasyonlu kabuk teorisinden uyarlanmıştır. Kabuğun doğrusal olmayan burkulma öncesi deformasyonlar ve birincil geometrik kusurların her ikisi de hesaba katılmıştır. Burkulma basıncını ve burkulma sonrası denklik yollarını belirlemek için bir tekil pertürbasyon tekniği kullanılmıştır. Sayısal gösterimlerin kusursuz ve kusurlu, oldukça kalın anizotrop tabakalı silindirik kabukların kabuk parametrelerinin ve yükleme serilerinin farklı değerleri ile birlikte burkulma sonrası tepkileri ile ilgili olduğu belirtilmiştir. Sonuçlar, kabuk dış basınca maruz kaldığında ortak kayma gerilmeli dairesel bir gerilmenin olduğunu doğrulamıştır.

Loo (1954) çalışmasında, burulma ve eksenel basınç yükleri etkisi altındaki silindirlerin elastik burkulmasına geniş çökmelerin ve kusurların etkileri araştırılmıştır. Burulma burkulmasının silindirik kabuklar için temel bir problem olduğu belirtilmiştir. Burulma yüküne maruz kabuklarda temel konu olan burkulma modunun nasıl modelleneceği sorusuna yanıt aranmıştır.

Mao ve Lu (1999) çalışmasında, karışık sınır koşullarına maruz kalmış burulma altındaki çaprazlama tabakalandırılmış silindirik bir kabuk için yeni etkili bir yöntem geliştirilmiştir. Enine kayma, bir kayma düzeltme faktörü $5/69$ ile birlikte birinci

dereceden bir teori sayesinde hesaba katılmıştır. Karıştırılmış sınır koşulları yer değiştirmelerdeki koşulların yanı sıra kuvvetlerdeki koşulları içerir ve bu kuvvetler ve yer değiştirmeler temel bilinmeyenler olarak seçilmiştir. Diğer yer değiştirme ve kuvvetler, operatörlerden oluşmuş bir matrisi tersten alarak temel bilinmeyenler açısından açıklanmıştır. Temel bilinmeyenler açısından bükme denkleminin denklemleri, karıştırılmış sınır koşullarını sağlayan çift trigonometrik serilerle birlikte çözülmüştür. Elde edilmiş sayısal sonuçların literatürde verilmiş diğer sonuçlarla karşılaştırılması tamamen sabitlendirilmiş sınır koşullarından uyarlanarak verim olarak oldukça düşük burkulma yükleri ve tamamen sabitlendirilmiş sınır koşullarından az dairesel dalga sayısı ile birlikte kontrol edilmiştir. Verilmiş olan şekildeki eğriler, kabuğun uzunluk ve kalınlığı değiştiğinde iki çeşit sınır koşulları çeşitliliği arasında burkulma yüklerindeki farkı göstermiştir.

Mao ve Lu (2002) çalışmasında, burulma yükü altındaki silindirik kabukların elastik-plastik burkulması çeşitli sınır koşulları altındaki aşırı ince kabuk modeli ile analiz edilmiştir. Aşırı inceden kasıt, genel denge denklemlerinde burkulma analizleri için kullanılmış olan burulma kuvvetini içeren üç doğrusal olmayan terimlerdir. Donnell tipi sığ-kabuk teorisinde sadece bir benzer koşul unutulmamıştır. Kalın kelimesinin anlamı germe-gerilme etkenleri hesaplanırken $(1+z/R)$ faktörünün elde edilmesi olduğu belirtilmiştir. İnce-kabuk teorisinde yamuk benzeri şeklin enine kesitinden faktör sonuçları genellikle ihmal edilmiştir. Sınır koşulları için, yer değiştirmeler ve rotasyonlar açısından sadece konvensiyonel geometrik sınır koşulları değil ayrıca kuvvet ve momentler açısından mekaniksel sınır koşulları göz önünde bulundurulmuştur. Örneklerin sayısal sonuçları, bütün doğrusal olmayan terimlerin etkisi, $(1+z/R)$ faktörünün etkisi ve mekaniksel sınır koşullarının etkisi değerlendirilmiştir.

Nash (1957) çalışmasında, burulmaya maruz başlangıç kusurlu silindirik kabukların burkulması araştırılmıştır. Burulma burkulması silindirik kabuklar için temel problemidir. Burulma yüküne maruz kabuklarda temel konu burkulma modunun nasıl modelleneceğidir. Bu çalışmada şu çözüm önerilmiştir:

$$\bar{W} = W_1 \sin(\pi x / L) \sin(nY / R + knX / R) \quad (2.1)$$

$$\bar{W} = W_1 [1 - \cos(\pi x / L)] \sin(nY / R + knX / R) \quad (2.2)$$

Nash (1959), başlangıç kusuruna sahip olan ince kalınlıklı izotrop elastik silindirik kabuğun burulma yükü etkisi altındaki burkulma problemini deneysel olarak incelemiştir. Bu deneylerden elde edilen veriler ve sonuçlar kullanılarak tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Paimushin (2007) çalışmasında, çeşitli yükleme durumları altındaki silindirik kabuklar için denge problemlerinin çok sayıda makalede dikkate alınmasından bahsedilmiştir. Eksenel basınçtaki uzun silindirik kabuklar için, burkulma modundan biri tamamen kiriş eğilme modunda düz bir çubuğun klasik burkulma moduna benzerdir. Çok iyi bilinir ki kabukların zar teorisinin doğrusal olmayan ya da doğrusallaştırılmış denklemleri kullanılarak incelenebilir. Mevcut çalışmada, daha önceki bilinmeyen burulma, klasik olmayan, kiriş eğilme ve kiriş burulma-eğilme burkulma durumlarını açığa çıkarmaya izin veren eş zamanlı saf burulma ya da bükülme ile sıkıştırma ve dış basınç altındaki silindirik kabuklar için çeşitli denklemlerin kullanımı gösterilmiştir. Bu burkulma modlarının ikincisi eksenel sıkıştırma kuvvetleri eş zamanlı burulmalı kabukta şekillendirildiğinde gerçekleştirilmiştir ve üçüncüleri yalnız bükülme ile kombine edilmiş sıkıştırma altında gerçekleştirilmiştir. Klasik burkulma modlarından daha önceki, ikinci ve üçüncü burkulma modları ilgili uzun kabuklar için gerçekleştirilebilirken tanjant düzlemdeki küçük kesme rijitlikli ilgili kısa kabuklar için burulma ile ilgili burkulma durumları gerçekleştirilebilmiştir.

Park et al., (2001), geometriksel doğrusal olmayan sonlu element analizlerini kullanarak burulma etkisi altındaki kompozit silindirlerin burkulma analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Analizlerde her bir düğüm için altıncı derece serbestliğe sahip dokuz düğümlü deformasyon kabuk-elaman modeli kabul edilmiştir. Bir kompozit silindirin burkulma yükü geometriksel doğrusal olmayan deformasyon yöntemlerindeki bir bifürkasyon noktası için araştırılarak bulunmuştur. Karşılıklı burkulma durumları bifürkasyon noktasındaki öz değer analizlerinden elde edilmiştir.

Sayısal sonuçlar, izotropik ve daha çok kompozit silindirler için doğrusal çözümlerle iyi uyum göstermiştir, ancak bazı durumlarda büyük uyuşmazlıklar görülmüştür. Bu çalışma kompozit silindirlerin çeşitli tipleri için doğrusal olmayan ve doğrusal çözümler arasındaki burulma burkulma yüklerinin farklılıkları ve doğrusal olmayan yollardaki bifürkasyon noktasının uç noktasına odaklanmıştır.

Shen (2008) çalışmasında, anizotrop tabakalı ince kabukların burkulma ve burkulma sonrası için bir sınır tabaka teorisi geliştirilmiştir. Kabuğun her tabakasının malzemesinin düzgün elastik, anizotropik ve fiber güçlendirilmiş olduğu varsayılmıştır. Ayrıca çok iyi bilinen Von Karman doğrusal olmayan gerilme-yer değiştirme ilişkilerinin geçerli olduğu varsayılmıştır. Enine yer değiştirme ve gerilme fonksiyonu bağımsız değişken olarak temel denklemlerle birlikte doğrusal olmayan burkulma öncesi deformasyonları, burkulma sonrası aralığındaki büyük dönmeleri ve kabuğun birincil geometrik kusurlarını içeren bir sınır tabaka tipine dönüştürülmüştür. Kabuk parametrelerinin ve yükleme sekanslarının farklı değerleri ile eksenel yüklü, kusursuz ve kusurlu, anizotropik tabakalı silindirik kabuklar için burkulma sonrası analizler sunulmuştur. Burkulma yükleri ve burkulma sonrası denklik yollarını belirlemek için bir tekil pertürbasyon tekniği kullanılmıştır. Anizotropi, doğrusal olmayan burkulma öncesi deformasyonlar, aynı zamanda birincil geometrik kusurlar tarafından oluşturularak ortak etkiler incelenmiştir. Yeni bulgular anizotropik tabakalı silindirik kabuk eksenel sıkıştırmaya maruz kaldığında ortak kayma gerilmesi ve burulma ile birlikte bir sıkıştırma gerilmesi olduğunu göstermiştir ve önceden yayınlanmış bütün sonuçların yeniden incelenmeye ihtiyacı olduğu belirtilmiştir.

Shen ve Xiang (2008) çalışmasında, eksenel basınç ve burulmanın kombine yüklemesine maruz kalmış olan sonlu uzunluktaki anizotrop tabakalı silindirik bir kabuk için burkulma sonrası analizler sunulmuştur. Temel denklemler, uzama-burulma, uzama-bükülme ve bükülme-burulma çiftlerini içeren ve von Karman-Donnell tipi kinematik doğrusalsızlıklı klasik kabuk teorisinden uyarlanmıştır. Kabuğun doğrusal olmayan burkulma öncesi deformasyonları ve başlangıç geometrik kusurlarının her ikisi de hesaba katılmıştır. Sayısal gösterimlerde interaktif

burkulma yüklerini ve burkulma sonrası denge yollarını belirlemek için bir tekil pertürbasyon tekniği kullanılmıştır. Yük oranlı parametrelerin farklı değerleri için kusursuz ve kusurlu, anizotrop tabakalandırılmış silindirik kabukların burkulma sonrası tepkileriyle ilgili olarak incelenmiştir. Sonuçlar burkulma sonrası karakteristiklerinin önemli derecede yük oran parametresine bağlı olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, kombine yükleme durumları burkulma sonrası denge yöntemleri kararsız ve kabuk yapısının kusurlu-duyarlı olduğunu göstermiştir.

Shen (2009a) çalışmasında, termal ortamlardaki burulmaya maruz kalmış fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik bir kabuk için burkulma sonrası analizleri sunulmuştur. Isı iletimi ve sıcaklığa bağımlı malzeme özelliklerinin her ikisi de hesaba katılmıştır. Göz önünde bulundurulmuş sıcaklık alanının, kabuk yüzeyi üzerinde doğrusal bir dağılıma sahip olduğu ve kalınlık doğrultusunda değiştiği varsayılmıştır. Fonksiyonel değişimli malzemelerin malzeme özelliklerinin bileşenlerin hacim kesirleri açısından basit bir güç yasası dağılımına göre kalınlık doğrultusunda değiştiği ve sıcaklığa bağımlı olduğu varsayılmıştır. Temel denklemler von Karman-Donnell tipi kinematik doğrusalsızlıklı yüksek dereceden kayma deformasyon teorisinden uyarlanmıştır. Doğrusal olmayan burkulma öncesi deformasyonlar ve kabukların birincil geometrik kusurlarının her ikisi de hesaba katılmıştır. Burkulma yükü ve burkulma sonrası denklik yöntemlerini belirlemek için bir tekil pertürbasyon tekniği kullanılmıştır. Sayısal gösterimler burkulmanın burkulma sonrası davranışı, kusursuz ve kusurlu, termal alanların farklı durumları altındaki FDM silindirik kabuklar ile ilgilidir. Sonuçlar, burulmaya maruz kalmış FDM silindirik kabukların burkulma ve burkulma sonrası davranışlarında FDM'lerin hacim kesir dağılımlarında önemli bir etkiye sahip olduğunu açığa çıkarmıştır. Ayrıca bu çalışmada, burulma burkulma sonrası denge durumunun hafifçe kararlı olmadığı ve kabuk yapının hemen hemen kusura duyarsız olduğu kanıtlanmıştır.

Sofiyev et al., (2003) çalışmasında, zamanın kuvvet fonksiyonu olan burulma yükü altındaki ortotropik silindirik bir kabuğun burkulması incelenmiştir. İlk olarak dinamik stabilite ve uyumluluk denklemleri türetilmiştir. Bu denklemlere Galerkin yöntemi uygulayarak zamana bağımlı bir diferansiyel denkleme indirgenmiştir. Son

olarak, bu denklemlere Ritz tipi varyasyonel yöntemi uygulanarak, kritik dinamik ve statik burulma yükleri, uygun dalga sayıları, dinamik faktörler, kritik zaman analitik olarak bulunmuştur. Bu sonuçları kullanarak, burulma yükü ifadesindeki zamanın kuvvet varyasyonlarının, yükleme parametrelerinin etkileri, Young modülünün oranı ve kritik parametrelerdeki yarıçapın kalınlığa oranı sayısal olarak incelenmiştir

Sofiyev ve Schnack (2004) çalışmasında, zamanın doğrusal bir fonksiyonu gibi değişen burulma yüküne maruz kalmış fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden oluşmuş silindirik ince kabukların stabilitesi için bir formülasyon sunulmuştur. Özellikle hacim kesir güç yasası dağılımına göre kalınlık doğrultusunda derecelendirilmiştir. Değiştirilmiş Donnell tipi dinamik denge ve uyumluluk denklemleri elde edilmiştir. Yükleme hızının büyük değerlerini alan bu denklemlere Galerkin yönteminin uygulanmasından sonra Lagrange-Hamilton tipi prensiplerin uygulanması göz önünde bulundurulmuştur. Sonuçlar göstermiştir ki kritik burkulma parametreleri oluşturan malzemelerin çeşitliliğinin biçimlenmesi tarafından etkilenmiştir. Sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmak mevcut analizleri onaylamıştır.

Sofiyev (2005), zamanın bir güç fonksiyonu olan burulma yükü altında, kalınlık doğrultusundaki homojen olmayan malzeme ile ortotropik silindirik ince kabukların burulmasını dikkate almıştır. İlk olarak dinamik stabilite ve uyumluluk denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemlere Galerkin yöntemini uygulayarak daha sonra Ritz tipi varyasyonel yöntemi uygulayarak ve yükleme parametrelerinin büyük değerlerini göz önünde bulundurarak, analitik çözümler kritik parametre değerleri için elde edilmiştir. O sonuçları kullanarak, Young modülü ve yoğunluğun periyodik ve kuvvet varyasyonlarının etkileri, Young modülü varyasyonlarının oranı, burulma yük ifadelerinde yükleme parametreleri varyasyonları ve zamanın kuvveti ilgili hesaplamalar yolu ile incelenmiştir. Bütün bu faktörlerin sorudaki problemin kritik parametreler üzerindeki kayda değer etkilere katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Soni et al., (1973) çalışmasında, uzaklığı bir güç olarak değişen kalınlıklı konik ve silindirik kabukların serbest burulma titreşimleri incelenmiştir. Çözümler ikinci dereceden bir doğrusal diferansiyel denkleme bağlıdır. Temel denklemler her iki kenarından mesnetli kabuklar için çözülmüştür. Titreşimin ilk üç durumu için frekans parametrelerinin sayısal değerleri birkaç farklı terminal yarıçaplarının oranları için doğrusal ve paraboliksel değişen kalınlıklı kabuklar için hesaplanmıştır.

Suer ve Haris (1959) çalışmasında, burulma, dış yanal veya hidrostatik kombine yüklerine maruz ince duvarlı silindirlerin stabilitesi incelenmiştir. Çalışmanın konusu araştırmacıların ilgisini çeken önemli konuların başında gelmektedir.

Tabiei ve Simites (1994), burkulma yüklerinin hareketi altındaki tabakalandırılmış, dairesel silindirik kabukların kararsızlık problemlerini incelemişlerdir. Analizlerine kayma etkisinin göz önünde bulundurulduğu yüksek dereceden kayma deformasyon teorisinden uyarlanmıştır. Oldukça kalın kompozit kabuklar için burkulmanın elastik olduğu ve birincil geometrik kusurların geometrisiz olduğu varsayılmıştır. Denge denklemleri ve ilgili sınır koşulları varyasyonel yöntemle elde edilmiştir ve burkulma denklemleri de pertürbasyon tekniği ile elde edilmiştir. Üç teori (yüksek dereceden, birinci dereceden ve klasik) oldukça kalın, burulma yüklü, silindirik kabuklar için kritik koşulları tahmin ederken uygulanabilirliklerinin sıralamalarını belirlemek için kullanılmıştır. Yığılma serisi, yarıçap-kalınlık oranı ve uzunluk-yarıçap oranının burkulma yükü üzerine etkisi değerlendirilmiştir. Tipik bir grafit/epoksi malzeme için sayısal sonuçlar tablo ve grafik şeklinde sunulmuştur.

Tan (2000), klasik ince kabuk teorisi ve birinci dereceden kayma deformasyon kabuk teorisinden uyarlanmış, ince ve kalın kabukların değişikliğinin burulma burkulma yüklerini tahmin etmek için iki model geliştirmiştir. Bir kabuk dönüşümünün malzeme özellikleri, tabakalı kompozitlerin ve doğal koordinatların genel bir tipi olarak herhangi bir çeşit kinematik sınır koşulunun kesin olarak uygulanabildiği geometrisini belirlemek için tanımlanmıştır. Analizlerdeki kabuk dönüşümünün aksenel-simetrik özelliğini etkili kullanmak için, çoklu bir seviye alt yapılandırma tekniği her alt yapılandırma seviyesine katılmış bir alt yapıda kullanılmıştır. Böylece

gerçek hesaplamalarda problemin boyutu daima küçük tutulmuştur. Dairesel bir silindirin, bir konik kabuğun, bir eliptik hiperboloit kabuk ve bir elipsoit kabuğun burulma burkulma davranışları bu modeller kullanılarak incelenmiştir.

Tani (1981) çalışmasında, periyodik burulma altındaki mesnetlendirilmiş, kesik konik kabukların dinamik stabilitesi, Hsu sonuçlarıyla birlikte Galerkin yöntemi sayesinde analiz edilmiştir. Pratiksel önemin kararsızlık bölgeleri nispeten düşük frekans aralıkları için belirlenmiştir. Sayısal sonuçlar göstermiştir ki yalnızca periyodik burkulma altındaki sadece kararsızlık bölge kombinasyonlarının var olması fakat statik burkulmadaki kararsız bölge prensibi çok önemli hale gelmiştir. Kararsızlık bölgesinin ilgili aralığı, aynı dairesele daga sayısına sahip rezonansta eş zamanlı uyarılmış iki titreşim modunun dairesele faz farkına bağı olarak elde edilmiştir.

Wang ve Chen (1997) çalışmasında, elasto-plastik dairesele silindirik kabuğun dinamik burulma burkulması ve burkulma sonrası durumları incelenmiştir. Bodner-Partom temel ilişkilerinin kullanımı, mevcut visko-plastik problem bir ortotropik elastik problem olarak ele alınmıştır. Doğrusal olmayan büyük sapma teorisinden uyarlanmış olan, temel dinamik burkulma denklemi Runge-Kutta yöntemi sayesinde çözülmüştür ve kritik burkulma gerilmesi B-R kriteri sayesinde tanımlanmıştır. Mevcut çalışma sabit kayma gerilme oranlı yüklü dinamiksel kabuk için kusur duyarlılığı, gerilme oran duyarlılığı ve dinamik burkulma sonrası nitelikler üzerine odaklanmıştır. Sayısal sonuçlar göstermiştir ki kritik kayma gerilmesi ve kusur duyarlılığı gerilme oranının artışı ile artacaktır. Elastik burkulma gerilmesinin kusura karşı visko plastik burkulmadan daha çok duyarlı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca mevcut araştırma, bazı dinamik burkulma sonrası karakterleri açığa çıkarmıştır ve göstermiştir ki elastik burkulmada deformasyon hızına orantılı genlik fakat visko plastik burkulmadaki deformasyon hızına orantısızlık ile kabul titreşecektir. İlginç bir olgu olarak deformasyon hızı yeterince yüksek olduğunda dinamik visko-plastik burkulması olmadığı ve kabuğun çok küçük bir genlikle harmonik bir salınım ürettiği bulunmuştur.

Zhang ve Han (2007) çalışmasında, burkulmaya maruz kalmış kusurlu silindirik kabukların burkulma ve burkulma sonrası davranışları incelenmiştir. Temel denklemler Karman-Donnell tipi doğrusal olmayan diferansiyel denklemlerden uyarlanmıştır. Sınır koşullarını tam olarak sağlayan analitik çözümleri elde etmek için kabuk burkulmasının bir sınır tabaka teorisi uygulanmıştır. Burkulma yüklerini ve burkulma sonrası denge yollarını belirlemek için bir tekil pertürbasyon tekniği kullanılmıştır. Sayısal sonuçlar, mevcut teorinin silindirik kabukların burkulma sonrası yollarının oldukça iyi tahminler verdiğini göstermiştir. Silindirik kabukların burkulma ve burkulma sonrası davranışlarında geometrik parametrelerin etkileri analiz edilmiştir. Burulmaya maruz silindirik kabukların burkulma sonrası denge yollarının kararsız olduğu ve oldukça kısa kabukların çok yüksek burkulma sonrası denge yolları olduğu onaylanmıştır. Son olarak, silindirik kabukların burkulma ve burkulma sonrası davranışlarındaki birincil kusurların etkileri belirlenmiştir. Farklı birincil enine dönmeli kusurlu kabukların örneklendirilmiş sonuçları, aşırı derecede küçük kusurların aslında burkulma yüklerini azalttığını ve burkulma sonrası denge yollarını düşürdüğünü göstermiştir. Burulma altındaki silindirik kabukların burkulma ve burkulma sonrası oldukça kusurlu duyarlılığı ortaya çıkarmıştır. Ayrıca, etkiler büyük kusurları takip ederek daha da fazla hale gelmiştir.

2.3. Üç Tabakalı FDM Kabukların Titreşimi ve Stabilitesi ile İlgili Makale Özetleri

Feng et al., (2005) çalışmasında, fonksiyonel derecelendirilmiş bir malzemenin ara tabakası ve onun harici homojen silindiri arasındaki silindirik bir ara yüz çatlağının burulma etki problemi incelenmiştir. FDM ara tabakasının kayma modülü ve kütle yoğunluğunun, iki eş eksenli birbirine benzemeyen homojen elastik silindir olanlar arasında sürekli değiştiği varsayılmıştır. Karışık sınır değer problemleri Laplace ve Fourier integral dönüşümlerini kullanarak ve terfi yoğunluk fonksiyonunu tanımlayarak Laplace dönüşümü ile Cauchy tipi bir tekil integral denkleme indirgenmiştir. Tekil integral denklemi daha sonra sayısal olarak çözülmüş ve fiziksel alandaki dinamik gerilme yoğunluk faktörü (DSIF) ayrıca sayısal Laplace ters çözüm yöntemiyle elde edilmiştir. DSIF'nin pik notasına çok hızlı bir şekilde

yükseldiği ve daha sonra azalan bir büyüme ile salındığı ve statik değere benzeştiği görülmüştür ve her iki kırık geometrik konfigürasyon ve FDM ara tabakasının malzeme değişiminin DSIF üzerinde bütün önemli etkileri görülmüştür.

Li et al., (2010) çalışmasında, orta tabakası fonksiyonel değişimli malzemelerden oluşmuş, iç ve dış tabakaları benzer homojen malzemeden oluşmuş olan basit mesnetli bir üç tabakalı dairesel silindirik kabuğun serbest titreşimleri incelenmiştir. Trigonometrik fonksiyonlar açısından benzer şekilde sınır koşullarını sağlayan hızlı orta plak yer değiştirmeleri, geometrik ve malzeme parametreleri açısından hesaplanmış doğal frekanslar ve temel denklemleri elde etmek için Flugge kabuk teorisi türetilmiştir. Hesaplanmış sonuçlar, temel doğal frekansın yarıçap-kalınlık oranındaki artış ile birlikte azaldığını ve dış yüzeye orta yüzeydeki (ya da dış yüzeydeki) Young modülünün oranındaki artışla birlikte bir artma olduğu gözlenmiştir.

Li ve Batra (2005) çalışmasında, eksenel sıkıştırma yükü altındaki fonksiyonel derecelendirilmiş orta tabaka ile ince tabakalandırılmış bir silindirik kabuğun kritik burkulması sunulmuştur. Her iki iç ve dış tabakaların malzemeleri izotropik ve homojendir ve orta tabaka fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden oluşmuştur. Basit mesnetli sınır koşulu için kısmi diferansiyel denklemlerin sınır değer problemi için trigonometrik fonksiyonlar açısından çözümler varsayılmıştır. Tabaka bileşim parametrelerinin farklı değerleri için kritik burkulma yüklerinin sayısal sonuçları elde edilmiştir. Güncel hesaplamalardaki, orta tabakanın iki çeşit fonksiyonel derecelendirilmiş formu; doğrusal ve parabolik, göz önünde bulundurulmuştur. Burkulma yükleri ve yarıçap-kalınlık oranı arasındaki karakteristik ilişkiler malzeme parametrelerinin farklı değerleri için çizilmiştir. Burkulma yükü üzerindeki her iki geometrik ve malzeme bileşenlerinin etkileri ayrıca ayrıntılı olarak incelenmiştir. Sayısal sonuçlar, kritik burkulma durumlarının simetrik olduğunu ve yarıçap-kalınlık oranının artışı ile kritik yük düşüşü ve artışını göstermiştir. Uzunluk-yarıçap oranının artışının burkulma yükü üzerinde belli etkilere sahip olmadığı, fakat eksenel dalga sayısı artışı yaptıracağı belirtilmiştir.

Li ve Batra (2006) çalışmasında, eksenel sıkıştırma yükü altındaki basit bir mesnetlendirilmiş üç tabakalı dairesel silindirik kabuğun burkulması incelenmiştir. Kabuğun içteki ve dıştaki tabakalarının benzer homojen ve izotropik malzemeler içerdiği ve orta tabaka Young katsayısının kalınlık doğrultusunda iç tabakadaki malzeme için dış tabakaya kendi değerinden afine bir şekilde ya da parabolik şekilde değişen tüm izotropik fonksiyonel değişimli malzemelerden oluştuğu belirtilmiştir. Çözüm, kenarlarında deplasman tipi sınır koşulları aynı şekilde karşılayan trigonometrik fonksiyonlar açısından ifade edilmiştir. Geometrik parametrelerin farklı değerleri için burkulma yükleri ve orta tabakanın malzeme parametrelerindeki çeşitlilik hesaplanmıştır. Sayısal sonuçlar, dairesel koordinatlarda burkulma durumları, simetrik ve burkulma yükü yarıçap kalınlık oranındaki artışla birlikte azalır ve orta tabakanın Young katsayısının yaklaşık değerindeki artış ile birlikte artışlar olduğunu göstermiştir. Uzunluk yarıçap oranındaki artışın burkulma yüküne bir etkisi olmamış ve burkulan şekillerin eksenel dalga sayısı artmıştır.

Lopatin (1997) çalışmasında, halkalarla kuvvetlendirilmiş ve dış basınca maruz kalmış bir sandviç kompozit silindirik kabuğun burkulma problemi için bir çözüm sunulmuştur. Çözüm, halkaların farklı pozisyonlarını hesaba katarak kuvvetlendirilmiş kompozit kabuklar teorisi, kabuk ve halkalardaki enine kayma deformasyonu, tabakalandırılmış yapı ve kaplama malzemelerinin ortotropisine dayanarak elde edilmiştir. Kuvvetlendirilmiş kabuğun karışık durumu bir yarım zar modeli ile tanımlanmıştır. Yapının burkulma öncesi durumunun, burkulma öncesi bükme momentleri için göz önünde bulundurulmasıyla birlikte eksenel simetrik olduğu düşünülmüştür. Halkaların sadece kendi düzlemlerinde deforme olduğu varsayılmıştır ve halkalar ile kabuk arasındaki temas yükü kabuğun orta yüzeyinde uzanarak “Phe” eksen boyunca uygulanmıştır. “Dirac” delta fonksiyonu kabuk ve halkalar arasında hareket eden temas kuvvetlerinin dağılımının tanımı için kullanılmıştır. Örnek olarak, 5 m uzunluğunda, 1.25 m yarıçapında ve 0.12 m kalınlığındaki çeşitli sayılardaki halkalarla kuvvetlendirilmiş bir cam-epoksi yapı için kritik dış basınç elde edilmiştir.

Sofiyev et al., (2006), eksenel sıkıştırma yüküne maruz kalmış bir fonksiyonel değişimli malzeme tabakası içeren bir üç tabakalı konik kabuğun titreşim ve stabilitesi üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Fonksiyonel değişimli tabakanın malzeme özelliklerinin kabuğun kalınlığı boyunca sürekli olarak değiştiği varsayılmıştır. Özelliklerin çeşitliliği bileşenlerin hacim kesirleri açısından gelişigüzel bir dağılımı takip etmiştir. İlk olarak bir FDM tabakası içeren üç tabakalı kesik konik kabukların temel ilişkileri, dinamik stabilite ve uygunluk denklemleri elde edilmiştir. Galerkin yöntemi uygulanarak, bu denklemler bir çift zamana bağımlı diferansiyel denklemlere dönüştürülmüş ve kritik eksenel yük ve frekans parametreleri elde edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki kritik parametreler malzeme bileşenlerinin konfigürasyonları ve kabuk geometrisinin çeşidi tarafından etkilendirilmiştir. Sonuçların literatürde var olan diğer sonuçlarla karşılaştırması ile mevcut analizlerin geçerliliği onaylanmıştır.

Sofiyev (2007), seramik, FDM ve metalden oluşan üç tabakalı silindirik kabukların değişik yükler etkisi altında titreşim ve stabilite problemini ele almıştır. FD tabakanın elastik özelliklerinin kalınlık doğrultusunda sürekli değiştiği belirtilmiştir. 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 oranı değişiminin, malzeme profilinin, hacim oranları değişiminin, FDM tabakanın kalınlık değişiminin kritik parametrelere etkileri incelenmiştir.

Sofiyev et al., (2008a), doğrusal harici basınca maruz kalmış fonksiyonel değişimli bir tabaka içeren kapsamlı üç tabakalı kesik konik kabuğun stabilitesi üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Fonksiyonel değişimli tabakanın malzeme özelliklerinin kabuğun kalınlığı boyunca sürekli değiştiği varsayılmıştır. Özelliklerin çeşitliliği bileşenlerin hacim kesirleri açısından gelişigüzel bir dağılımı takip etmiştir. İlk olarak bir FD tabaka içeren üç tabakalı kesik konik kabukların temel ilişkileri, stabilite ve uyumluluk denklemleri elde edilmiştir. Daha sonra, Galerkin yöntemi uygulanarak, kritik harici basınç için kapalı çözüm formu elde edilmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki kritik parametreler, malzeme bileşenlerinin konfigürasyonları, FD

tabakanın kalınlık çeşitlilikleri ve kabuk geometrisinin çeşitliliğinden etkilenmiştir. Sonuçları literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırmak mevcut analizleri geçerli kılmıştır.

Sofiyev et al., (2008b), uzunluk koordinatına bağlı değişen doğrusal olmayan yanal basınca maruz kalmış fonksiyonel değişimli bir tabaka içeren ince üç tabakalı kesik konik kabukların stabilitesi üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Fonksiyonel değişimli tabakanın malzeme özelliklerinin kabuğun kalınlığı boyunca sürekli değiştiği varsayılmıştır ve özelliklerin çeşitliliği bileşenlerinin hacim kesirleri açısından gelişigüzel bir dağılımı takip etmiştir. Bundan başka, bir FDM tabaka içeren üç tabakalı kesik konik kabukların stabilite ve uygunluk denklemleri için temel ilişkiler elde edilmiştir. Galerkin yöntemi ile doğrulanmış bu denklemler, bir çift zamana bağımlı diferansiyel denkleme dönüştürülmüştür. Daha sonra, kritik doğrusal olmayan yanal basınç kesin olarak elde edilmiştir. Bu çalışmada, ayrıntılı bir parametrik çalışmanın sonucu, fonksiyonel değişimli tabakadaki kalınlık çeşitliliğinin etkilerini, yarıçap-kalınlık oranını, uzunluk-yarıçap oranını ve üç tabakalı, kesik, konik kabukların kritik parametrelerindeki malzeme oluşum ve malzeme profil içeriğini tanımlamak için rehberlik etmiştir. Son olarak sonuçlar, elde edilen değerlerin literatürde var olan diğer değerlerle doğrudan karşılaştırılarak onaylanmıştır.

Wozniak et al., (2005) çalışmasında, kabuk kalınlığı boyunca sürekli değişen makroskopik özelliklere sahip mikro tabakalı elastik kabuğun bir matematiksel 3D modeli geliştirilmiştir. İkinci olarak, türetilmiş model, burulmaya maruz kalmış bir silindirik FGL kabuktaki yerel titreşimlerin analizlerine uygulanmıştır.

Yamaki ve Matsuda (1975), burulmaya maruz kalmış mesnetlendirilmiş dairesel silindirik kabukların burkulma sonrası davranışı için kesin doğru çözümleri Galerkin prosedürünü Donnell temel denklemlerine uygulayarak elde etmişlerdir. Detaylı hesaplamalardan, burkulma sonrası ana karakteristikler, örneğin; burulma açısının bağlantısı, eksenel kısalma ve moment uygulanmış dönme kabuk geometrisinin geniş

bir aralığı için belirlenmiştir. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar literatürde bulunan diğer çalışmalarla iyi bir uyum göstermiştir.

2.4. Elastik Zemin Üzerinde Bulunan Silindirik Kabukların Stabilité ve Titreşimi ile İlgili Makale Özetleri

Avey vd. (2009), basit mesnetli, Winkler zemini üzerinde bulunan, seramik, fonksiyonel değişimli malzeme (FDM) ve metal tabakadan oluşan üç katmanlı kompozit silindirik kabukların üniform yanal dış basınç yükü etkisi altında burkulmasını incelemişlerdir. FDM özellikleri kalınlık doğrultusunda kuvvet fonksiyonu şeklinde değişmektedir. Elastik zemin üzerinde bulunan FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuklar için temel denklemler elde edilir. Galerkin yöntemi uygulanarak kritik yanal basınç yükü için analitik ifade elde edilir. Detaylı parametrik analiz yapılarak, Winkler zemini, malzeme kompozisyonu, hacim indeksi ve kabuk karakteristikleri değişiminin kritik yanal basınç yüküne etkisi incelenmektedir.

Civalek (2005), Winkler-Pasternak elastik zemini üzerine oturan iki kat kavisli yüzeysel kabukların doğrusal olmayan dinamik tepkisini kademeli ve sinusoidal yüklemeler için incelemiştir. Von Karman-Donnell tipi kabuk denklemlerinin dinamik benzerlikleri kullanılmıştır. Ankastre sabit ve basit mesnetlendirilmiş sabit sınır koşulları göz önünde bulundurulmuştur. Kabuğun temel doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemleri sırasıyla harmonik diferansiyel kareler (HDQ) ve sonlu farklar (FD) yöntemi kullanılarak uzay ve zaman alanına ayrıştırılmıştır. Sunulmuş HDQ-FD çift metodolojisinin doğruluğu sayısal örneklemelerle açıklanmıştır. Pasternak zemininin kayma parametresi G ve Winkler zemininin sertlik parametresi K 'nın kabuğun dinamik tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur. Mevcut çalışmadan, iki parametrelili elastik zemin üzerinde bulunan çift eğrilikli yüzeysel kabukların doğrusal olmayan analizleri için HDQ-FD metodolojisinin basit, etkili ve kesin bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Civalek (2008) çalışmasında, iki parametrelili zemine oturan kayma deformasyonlu plakların statik analizi için ayrık tekil konvolüsyon yöntemi sunulmuştur. Zemin parametrelerinin deformasyon üzerine etkisi incelenmiştir. Sayısal uygulama yapılmış ve elde edilen sonuçlar diğer analitik ve bazı sayısal çözüm yöntemlerinin verdiği sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Doğruoğlu vd. (1999), plak-zemin etkileşimi problemlerinde serbest titreşim ve stabilite analizi için bir karışık sonlu eleman çalışması sunmuşlardır. Bu amaca yönelik olarak geliştirilmiş olan fonksiyonelin üretilmesinde potansiyel operatör kavramlarından yararlanılmıştır. Stabilite analizinde doğrusal olmayan terimleri de içeren fonksiyonel artımsal formülasyon uygulanarak doğrusallaştırılmış ve ikinci varyasyonu alınarak geometrik matrisi verecek terime ulaşılmıştır. Serbest titreşim ve stabilite probleminin sonuçta bir öz değer problemine dönüştüğü bulunmuştur. Zemin, Winkler ve Pasternak modellemeleri ile simüle edilmiştir. Dört düğüm noktalı toplam on altı serbestlik dereceli plak karışık sonlu elemanı kullanılarak elde edilen sayısal değerler analitik çalışmalar ile doğrulanmıştır. Özgün örnek olarak Pasternak zemin-plak etkileşiminde serbest titreşim ve stabilite problemleri incelenmiş ve tartışılmıştır.

Elishakoff ve Tang (1988) çalışmasında, elastik zemin üzerinde bulunan ortotrop dairesel plaklar Rayleigh'in yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Bu yöntemin bir değişliği ilk olarak Rayleigh tarafından önerilmiş ve tamsayı olmayan üstün kullanması üzerine kurulmuş, kararsız çarpanı içeren değişik biçimle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar bilgisayara uyarlanarak elde edilmiştir.

Golovko et al., (2007) çalışmasında, elastik bir zemin üzerindeki silindirik bir kabuk için dinamik bir problem formüle edilmiştir. Bu problemin çözümü için bir sayısal algoritma ana hatlarıyla belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

Birçok pratiksel uygulamalarda, ince kabuklar zeminle veya diğer katılarla iletişim içindedir. Benzer durumlar silindirik hacimli zemin depolama silolarında, yer üstünde ve yer altında sıvı depolama tankları, yer altı boru hatlarında, sıvı yakıtla

doldurulmuş balistik füzelerde ve betonla kaplanmış çelik boru şeklinde sütunlarda ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, birçok çalışmada elastik zeminler üzerindeki kabukların analizleri ve davranışları incelenmiştir. Ancak, zemin davranışının genel olarak doğrusal olmamasına rağmen doğrusal olmayan elastik zeminler üzerindeki kabuklarda çok az uygulanmıştır. Luo ve Teng (1998), doğrusal olmayan elastik zeminler üzerindeki kabukların devirlerinin burkulma analizleri için sınırlı bir eleman formülasyonu sunmuştur. Çok yönlü bir zemin modeli elde etmek için, zemin tepki-yer değiştirme ilişkisi belli bir sayıdaki ayırık veri noktaları tarafından gösterilmiştir (bu çalışmadaki Ayırık-Nokta ya da DP modelinden yararlanılmıştır). Polinomlar gibi herhangi belirli doğrusal olmayan fonksiyonlar bu modelin özel durumları gibi muamele edilmiş ve doğru olarak yeterli büyüklükteki sayılardaki veri noktaları tarafından gösterilmiştir. Mevcut analizlerin geçerliliği ve kapasitesi sayısal karşılaştırmalar sayesinde ispat edilmiştir. Çalışma ayrıca, gelecekteki diğer kaynaklardan kriter sonuçları olarak kullanılabilen doğrusal olmayan elastik zemin üzerindeki kabukların burkulması için doğrulanmış sayısal sonuçların ilk durumlarını sunmuştur.

Mohamed et al., (1996) çalışmasında, doğrusal elastik zemin üzerinde bulunan çatlak sığ küresel kabuk için elasto statik problem incelenmiştir. Problem, doğrusallaştırılmış bir yüzeysel kabuk teorisinin sınırlarıyla birlikte homojen izotropik bir malzeme için formüle edilmiştir. İntegral dönüştürmeler ve asimptotik analizlerin kullanımından yararlanılarak problem, bir çift tekil integral denklemlerinin çözümüne indirgenmiştir. Gerilme dağılımı, çatlak uç etrafında, elastisite çözümlerine benzer olarak elde edilmiştir. Sayısal sonuçlar, elastik mesnetlerin ihmal edildiği önceki çalışmalarla iyi bir uyum göstermiştir. Kabuk eğiminin etkileri ve gerilme şiddeti faktörü üzerindeki alt zemin tepki modülü verilmiştir.

Naili ve Oddou (2000) çalışmasında, geniş bir dışsal ortamda gömülmüş ince bir tüpten oluşan silindirik bir kabuğun yanal yüzeyinin uniform bir dış basınca maruz kalması incelenmiştir. Böyle bir yapının burkulma basıncı, iç tüp duvarının, düşük bükülgen durumu ile ilgili olarak, teoriksel olarak asimptotik yöntemle dayalı olarak

analiz edilmiştir. Teoriksel sonuçlar bir köpük içine yerleştirilmiş elastik bir tüpte gerçekleştirilmiş bir sıkıştırma testinden elde edilmiş deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Euler basıncının ve birleştirilmiş burkulma durum içeriğinin büyük ölçüde her iki tüp ve çevreleyen ortamın akışsal ve geometriksel parametrelerine bağlı olduğu bulunmuştur.

Nath et al., (1987), düzgün dağılmış kademeli ve sinüsoidal yüklemelere maruz kalmış ve iki parametrelili elastik alt zeminde mesnetlendirilmiş, dikdörtgensel formdaki iki kat kavisli sığ küresel bir kabuğun oldukça büyük dinamik tepkisini incelemişlerdir. Hareketin Von Karman-Donnell tipi doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemleri kullanılmıştır ve Houbolt zaman teknikleri ve sonlu farklılıkları kullanılarak çözülmüştür. İki sınır koşulu düşünülerek kabuk tepkisinin oldukça büyük genliğindeki elastik altzeminin kütlesi ve rijitliğin etkisi incelenmiştir.

Ng ve Lam (1999) çalışmasında, elastik zemin üzerinde bulunan silindirik kabukların dinamik stabilite analizleri için bir formülasyon sunulmuştur. Bu çalışmada bir problem değil, harmonik eksenel yükleme kadar iyi zemin etkilerini içeren hareketin kısmi diferansiyel denklemlerinin bir normal-durum genişlemesi, Bolotin yöntemi kullanılarak analiz edilmiş stabilite Mathieu-Hill denklemlerini veren bir sistem incelenmiştir. Mevcut çalışma, enine, uzunlamasına ve dairesel durumlar için silindirik kabukların kararsızlık bölgelerindeki elastik zemin etkilerini incelemiştir.

Nie et al., (2009), elastik zemin üzerinde bulunan elastiksel kısıtlanmış kusurlu, ortotropik, yüzeysel küre biçiminde kabukların doğrusal olmayan burkulması için bir asimptotik çözüm üretmişlerdir. Kabuğun harici basıncı ve merkezsiz sapması arasında bir analitik ve belli bir ilişki asimptotik yenileme yöntemini kullanarak boyutsuz formda sunulmuştur. Çözüm, ortotropik ve malzeme parametrelerinin etkilerini, geometrik kusuru, zeminin Young ve kayma modulünün ve kenar kısıtlama katsayılarını dâhil etmiştir. Genişletilmiş bir parametrik çalışma benzer yapılarıdaki deformasyon ve burkulması için geliştirilmiştir. Bazı özel durumlar için mevcut verilerle karşılaştırmalar ortaya çıkan çözümün hesaplamada kesin doğru

olduğunu göstermiştir. Mevcut çözümün ortotropik, kusurlu, yüzeysel küre biçiminde kabukların doğrusal olmayan deformasyon ve burkulma davranışını değerlendirmek için kullanılabileceği ayrıca belirtilmiştir.

Elastik bir ortamla bağlantı içindeki bir ince dairesel silindirik kabuğun serbest titreşimlerini Paliwal et al., (1996), membran teorisi kullanarak incelemiştir. Elastik ortamların tepkisi Winkler/Pasternak modelleri ile temsil edilmiştir. Boyutsuz frekans parametrelerini ve eksenel dalga parametrelerini içeren dinamik karakteristikler gösterilmiştir. Diğer iki titreşim durum frekansları yani burulma ve boylamsal olanlar neredeyse etkilenmemiş kalırken zemin modül değeri (K)'nın önemli ölçüde radyal titreşim durum frekansını etkilediği tespit edilmiştir. En küçük boyuna durum frekanslarında ve burulma durum frekansları üzerinde bir dereceye kadar doğrusal olmayan kayma modül parametresi $\bar{G}$ 'nin etkisinin radyal titreşim durum frekanslarında daha belirgin olduğu ayrıca tespit edilmiştir.

Paliwal ve Pandey (1998) çalışmasında, elastik bir zemin üzerinde bulunan ince dairesel silindirik bir kabuk için frekans denklemi, Sveers'in birinci dereceden kabuk teorisi kullanılarak ve öz değer frekansları hesaplanarak geliştirilmiştir. Bu öz frekanslar eksenel dalga parametresine karşı oluşturulmuştur. Öz frekanslardaki eksenel dalga parametresinin, dairesel dalga sayısının, boyutsuz kalınlık ve zemin parametrelerinin etkileri incelenmiştir. Zemin modülünün başlıca radyal öz frekans durumunu etkilediği ve burulma ve boyuna durumlar üzerinde etkisi olmadığı bulunmuştur. Diğer bir taraftan, titreşimlerin teğetsel durumlarının yanı sıra kayma modüllerinin radyal durum frekansı üzerindeki etkisi daha belirgin olmasına rağmen radyal etkiye sahip olduğu bulunmuştur.

Shah et al., (2010) çalışmasında, ince fonksiyonel derecelendirilmiş fonksiyonel kabukların titreşim frekansları üzerinde üstel hacim kesir yasası etkileri incelenmiştir. Kabuk kalınlık doğrultusundaki malzeme özellikleri üstel yasalarla birlikte uyum içinde derecelendirilmiştir. Gerilme-yer değiştirme ve eğilme-yer değiştirme ilişkileri için tanımlar Love'un ince kabuk teorisinden alınmıştır. Rayleigh-Ritz yaklaşımı kabuk öz frekans denklemini türetmek için kullanılmıştır.

Karakteristik kiriş fonksiyonlarında eksenel durum bağımlılığı varsayılmıştır. Kabukların doğal frekanslarının hacim kesir bileşenlerine bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçlar, mevcut metodolojinin uygunlu için literatürdeki diğer uygun sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Shen (2009b) çalışmasında, termal ortamlarda eksenel sıkıştırma yüküne maruz kalmış büyük elastik dış ortamda bulunan sonlu uzunluktaki kayma deformasyonlu fonksiyonel değişimli silindirik bir kabuğun burkulma sonrası tepkileri incelenmiştir. Çevreleyen elastik ortam, sadece sıkıştırmaya tepki veren gerilimsiz Pasternak zemini olarak modellenmiştir. Burkulma sonrası analizler von Karman-Donnell tipi kinematik doğrusalsızlıklı yüksek dereceden kayma deformasyon kabuk teorisinden uyarlanmıştır. Sıcaklığa bağımlı olan termal etkiler ve fonksiyonel değişimli malzemelerin malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağımlı olduğu varsayılmıştır. Doğrusal olmayan burkulma öncesi deformasyonlar ve kabuğun birincil geometrik kusurlarının her ikisi de hesaba katılmıştır. Tekrarlanan planların kabukların burkulma sonrası davranışlarını belirlemek için bir tekil pertürbasyon tekniği kullanılmıştır ve kabuk ve elastik zemin arasındaki iletişim bölgesindeki şekil üzerindeki hiçbir varsayımı kullanmaksızın sayısal sonuçları elde etmek için geliştirilmiştir. Sayısal sonuçlar, ayrıca karşılaştırmalar için konvensiyonel elastik zeminli FDM kabuklar için burkulma sonrası sonuçları elde edilmiş olan gerilimsiz Pasternak zemininin elastik ortam tarafından çevrelenmiş FDM kabukların burkulma sonrası davranışları grafikler ve tablolar şeklinde incelenmiştir. Sonuçlar, zemin sertliği oldukça büyük olduğunda, termal ortamlardaki eksenel sıkıştırmaya maruz kalmış kabukların burkulma sonrası tepkilerinde yanal baskının çok önemli etkisi olduğunu göstermiştir.

Shen (2009c) çalışmasında, termal ortamlarda dış basınca maruz kalmış ve büyük bir dış elastik ortamda bulunan sonlu uzunluktaki anizotrop tabakalı silindirik kabuğun burkulma sonrası tepkisi üzerine incelemeler sunulmuştur. Çevreleyen elastik ortam sadece sıkıştırmada tepki gösteren gerilimsiz bir Pasternak zemin olarak modellenmiştir. Temel denklemler von Karman-Donnell kinematik doğrusalsızlıklı yüksek dereceden kayma deformasyon kabuk teorisinden uyarlanmıştır ve

genişleme-burulma, genişleme-bükülme ve bükülme-burulma çiftlerini içermiştir. Termal etkiler ayrıca incelenmiştir ve malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılmıştır. Doğrusal olmayan burkulma öncesi deformasyonlar ve kabuğun birincil geometrik kusurlarının her ikisi de hesaba katılmıştır. Kabukların burkulma sonrası davranışlarını belirlemek için bir tekil pertürbasyon tekniği kullanılmıştır ve kabuk ve elastik zemin arasındaki iletişim bölgesindeki şekil üzerindeki hiçbir varsayımı kullanmaksızın sayısal sonuçları elde etmek için bir tekrarlanan plan geliştirilmiştir. Sayısal sonuçlar konvensiyonel elastik zeminler için karşılaştırmacı olarak elde edilmiş olan sonuçlardan Pasternak tipi gerilimsiz zeminin bir elastik ortam tarafından çevrelenmiş çaprazlama ve simetrik açısız tabakalandırılmış kabukların burkulma ve burkulma sonrası tepkileri ile ilgilidir. Sonuçlar, zemin sertliği oldukça büyük olduğunda, termal ortamlardaki eksenel sıkıştırmaya maruz kalmış kabukların burkulma sonrası tepkilerinde yanal baskıların çok önemli etkisi olduğunu göstermiştir.

Sheng ve Wang (2008), dönme ataletini ve enine kayma deformasyonunu dikkate alan birinci mertebeden kayma deformasyonu teorisine dayanan, elastik ortama gömülü fonksiyonel değişimli silindirik kabukların titreşim, burkulma ve dinamik stabilitesine, termal yükün etkisini incelemişlerdir. Sıcaklık dağılımını belirlemek için, kabuğun eni boyunca sıcaklık iletimi denklemi uygulanmıştır. Malzeme özelliklerinin, bileşenlerin hacim kesirlerinin terimleri şeklinde kuvvet kuralına göre en doğrultusunda derecelendiği varsayılmıştır. Hesaplamalar, malzeme bileşiminin, termal yüklemenin, statik eksenel yüklemenin, ortam rijitliğinin ve kabuk geometri parametrelerinin, titreşim, burkulma ve parametrik rezonans üzerine etkilerini tanımlamıştır. Bu makalede yer alan, elastik ortama gömülü fonksiyonel değişimli silindirik kabukların, termal titreşim, burkulma ve dinamik stabilite özellikleri ve bazı anlamlı ve enteresan sonuçlar, fonksiyonel değişimli yapıların termal ve mekanik yükler altında uygulanmasına ve dizaynına yararlı olabileceği belirtilmiştir.

Sofiyev et al., (2004) çalışmasında, bütün analitik prosedür elastik zemin üzerinde bulunan tabakalı homojen olmayan ortotropik ince dairesel silindirik kabukların serbest titreşim karakteristiklerini incelemek için, Karman tipi geometrik

doğrusalsızlık için hesaplama verilmiştir. İlk olarak, sınırlı deformasyonlar göz önünde tutularak, temel ilişkiler ve değiştirilmiş Donnell tipi stabilite denklemleri, kalınlık doğrultusunda sürekli parça parça değişen Young modülü, tabakalı ince ortotropik dairesel silindirik kabuklar için elde edilmiştir. Son denklemlere Galerkin yöntemi uygulanarak, yer değiştirme genliği için zamana bağlı bir diferansiyel denklem elde edilmiştir. Frekans, kabuk yer değiştirme genliğinin bir fonksiyonu olarak bu denklemden elde edilmiştir. Son olarak farklı durum sayıları için elastik zeminin, doğrusalsızlığın, homojen olmayışın, tabaka dizilişinin etkileri bulunmuştur. Bu sonuçlar tablolarda ve şekillerde verilmiştir. Mevcut analizler literatürde bulunan diğer analizlerle karşılaştırılarak geçerli kılınmıştır.

Sofiyev (2010) çalışmasında, fonksiyonel değişimli malzemelerden oluşan basit mesnetlendirilmiş kesik konik kabuğun burkulma analizleri sunulmuştur. FDM kesik konik kabuğunun eksenel basınç yüküne maruz kaldığı ve Winkler-Pasternak tipi elastik zeminler üzerinde bulunduğu belirtilmiştir. Fonksiyonel değişimli kabukların malzeme özelliklerinin kalınlık doğrultusunda sürekli olarak değiştiği varsayılmıştır. Düzenlenmiş Donnell tipi stabilite ve uyumluluk denklemleri Galerkin yöntemi ile çözülmüştür ve elastik zeminli ya da zeminsiz FDM kesik konik kabukların kritik eksenel yükü analitiksel olarak incelenmiştir. Özel bir durum olarak, elastik zeminli ya da zeminsiz homojen ve FDM silindirik kabuklar için uygun formüller elde edilmiştir. Son olarak, elastik zeminler üzerinde bulunan FDM kesik konik ve silindirik kabukların burkulmasındaki parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu parametrelerin; FDM'nin güç yasası ve üstel dağılımları, Winkler zemin modülü, Pasternak zemin modülü ve kabukların görünüş oranları oldukları belirtilmiştir.

Sofiyev et al., (2011), elastik zemin üzerinde bulunan kombine edilmiş eksenel gerilme, harici basınç yükü ve sabit hızlı halka şeklindeki sıkıştırma basıncına maruz kalmış sonsuz uzunluklu, homojen olmayan ortotropik silindirik kabuğun dinamik davranışı üzerine bir analitiksel çalışma sunmuştur. Problem silindirik kabukların titreşimlerinin temel teorisinde gerçekleştirilmiştir. Hareket eden yüklere maruz kalmış, Winkler ya da Pasternak elastik zeminleri üzerinde bulunan homojen ya da homojen olmayan ortotropik silindirik kabuklar için dinamik faktörler ve kritik hız,

maksimum statik ve dinamik yer deşiştirmeler için formüller elde edilmiştir. Parametrik bir alışma, Winkler ya da Pasternak zeminler, malzemelerin homojensizlik ve ortotropisi, yarıçapın kalınlığa oranı ve dinamik yer deşiştirmelerde hareket eden yüklerin hızı, silindirik kabuklar için dinamik faktörler ve kritik değerler gibi çeşitli parametrelerin etkilerini göstermek için gerçekleştirilmiştir.

Tj et al., (2006), elastik ortamda bulunan silindirik kabukların serbest titreşimlerini sonlu eleman yönteminden uyarlanarak belirlemişlerdir. Kabuklar silindirik sonlu elemanlara ayrıklaştırılmıştır ve zeminin çevresel yönde dağılımı Fourier serilerinin genişlemesi ile belirlenmiştir. Mevcut formölasyonun her iki çevresel ve boylamsal doğrultuda zeminlerdeki doğrusalsızlığını göz önünde bulundurmak için kolayca uygulanabileceği belirtilmiştir. Mevcut yöntemin konverjans sorunları açıklanmıştır. Çeşitli kabuk geometrileri ve zemin parametreleri için doğal frekans ve durumun sayısal sonuçları doğrusal titreşimlerdeki kabuk karakteristiklerinin daha belirgin bir hale getirmek için sunulmuştur. Zemin ve kabuğun ilgili rijitlik oranı tartışılmıştır. Elastik zemin üzerinde bulunan kısmi uzaklaştırılmış kabuklar için serbest titreşim analizlerinin sonuçları ayrıca sunulmuştur.

Vlasov'un iki parametrelili zemin modelinin alternatif varyasyonel ifadesi sunulmuştur. Bu formölasyon Vlasov modelin temelini oluşturan ve önceden farz edilen, dikey deformasyon profilinin mevcut biçimi için özenli bir kuramsal temel sağlar. Bu çalışmada ayrıca Vlasov modelin deneysel araştırması sunulmuştur (Jones ve Xenophontos,1977).

Zhou et al., (2006) alışmasında, elastik zemin üzerinde bulunan kalın dairesel plakların üç boyutlu titreşim karakteristikleri incelenmiştir. Analiz üç boyutlu küçük gerilmeler, doğrusal ve kesin elastisite teorisi üzerine kurulmuştur. Zemin modeli Pasternak olarak tanımlanmıştır. Plak-zemin sisteminin frekans denklemini türetmek için, elastik zeminin potansiyel enerjisiyle plağın gerilme enerjisi dikkate alınarak Ritz yöntemi kullanılmıştır. Chebyshev polinomlar serisi her bir yöndeki yer değiştirme bileşenlerine uygun fonksiyonlar olarak benimsenmiş sınır koşulları

tarafından çarpılmıştır. Karşılaştırma çalışmaları bu çalışmanın doğruluk ve kesinliğini ispatlamıştır. Bu da göstermiştir ki bu çalışma hızlı yakınsama oranına, kararlı sayısal işleme ve yüksek bir doğruluğa sahiptir. Elastik zemin üzerinde bulunan kalın dairesel plakların dinamik davranışı üzerine yapılan araştırmalar, kalınlık-yarıçap oranı, zemin rijitliği parametreleri ve sınır koşulları ile ilgili çeşitli sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Sonuçlar ilk defa açıklanmıştır ve ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Bazı önemli sonuçlara varılmıştır.

2.5. Tez konusu ile ilgili Literatürde Bulunan Önemli Kitaplardan Bazıları

Amabili (2008), kabuk ve plakların doğrusal olmayan titreşim ve stabilitelerinin hem teorik hem de deneysel durumlarını incelemiştir. Bu kitap araştırmacılar, profesyoneller, öğrenciler ve eğitimciler için önemli bir kaynaktır. Uzman araştırmacılar, bu kitapta, sıvı yapı etkileşimli kabukların ileri problemlerini içeren, kabuk ve plakların doğrusal olmayan titreşim ve stabilitesi ile ilgili en yeni gelişmeleri bulacaklardır. Profesyoneller bu kitapta, geleneksel ve modern malzemelerden oluşan kabuk ve plakların tasarımı için birçok pratik kavram, diyagram ve sayısal sonuçlar bulacaklardır. Derin bir matematiksel altyapıya ihtiyaç duymadan, dinamik kararsızlık, dallanma ve kaos gibi kompleks fenomenleri anlayabileceklerdir. Lisans öğrencileri neredeyse tüm mevcut teorileri basit form içersinde toplayan, kabuk ve plakların doğrusal mekaniği hakkında doğrusal olmayan dinamiğe giriş ve sıvı-yapı etkileşim problemlerini içeren kabuk ve plakların doğrusal olmayan titreşim ve stabilitesi üzerine bir eser bulacaklardır.

Bajenov (1975), elastik ortamda bulunan silindirik kabukların bükülme davranışlarını incelemiştir. Elastik ve visko-elastik ortamda bulunan silindirik kabukların analitik modelleri oluşturulmuş ve değişik sınır ve yükleme durumları için çeşitli problemler çözülmüştür. Ayrıca elastik ve visko-elastik ortamları karakterize eden katsayıların değerleri de sunulmaktadır.

Bogdanovich (1987), kitabında geniş yelpazede ortotrop silindirik kabukların dinamik probleminden; serbest ve parametrik titreşim, boyuna darbede eksenel simetrik ve eksenel olmayan simetrik deformasyonlar sabit olmayan dış basınç yükü

etkisi altında eksenel olmayan deformasyonlar ele alınmıştır. Kitapta aynı zamanda ortotrop kabukların doğrusal olmayan temel denklemleri çıkarılmakta, statik ve dinamik problemlerimin çözümü ve analizler sunulmaktadır. Kitapta geometrik doğrusal olmayan ve başlangıç kusuruna sahip silindirik kabukların çözüm yöntemleri ana hattı oluşturur. Bu yöntemlere dayanarak tabakalı kompozit kabukların eksenel basınç yükü etkisi altında dinamik problemleri çözülmüştür.

Gorbunov-Posadov et al., (1984), doğrusal deformasyon davranışına sahip yarı uzay veya tabaka üzerinde bulunan yapıların en önemli tiplerinin hesaplanması için pratik öneriler ve tablolar sunmuşlardır. İncelenen yapının durumunun kısaca değerlendirilmesi, tasarımcılara uygun hesaplama yönteminin seçilmesi olanağını sağlar. Büyük açıklıklı temellerin analizi için mevcut bilgisayar programları hakkında bilgiler verilmiştir. Doğrusal olmayan zemin ve doğrusal olmayan davranışa sahip yapı malzemeleri için gelişen hesaplama teknikleri incelenmiştir. Bu baskı, yeni veri ve teorik sonuçlar içermektedir. Daha önce fazla tahmin edilen güvenlik faktörleri düzenlenmiştir. Kitap mühendisler, tasarımcılar ve araştırmacılar için yararlıdır. Ayrıca, bu kitap inşaat mühendisliği öğrencilerine kılavuz olarak sunulabilir.

Hetenyi (1955), literatürde çok iyi bilinen elastik zemine oturan kirişler hakkındaki ilk kitaplardan biridir ve elastik kirişlerin analizleri ele alınmıştır. Elastik mesnet, kirişlerin uzunluğu boyunca sürekli olarak dağılmış, zemin olarak adlandırılan bir yük taşıyıcı ortam tarafından desteklenmiştir. Mesnetin benzer koşullarının büyük bir çeşitlilik içinde olan teknik problemlerde bulunabileceği belirtilmiştir. Bu problemlerden bazıları, kiriş ve zeminin benzerliği, mevcut zemin yapılarındaki gibi ya da demiryolu hatlarında olduğu gibi kolayca belirlenebilmiştir. Diğer problemler, bu teoremin uygulamasının muhtemelen en verimli alanını oluşturmuştur, kiriş ve zemin konsepti daha çok bir özet yapısında olmuştur. Bu kitabın matematiksel gösterimi, küçük bir sapma hiperbolik fonksiyonlar için diğer alışılmış gösterimlerde kullanılmış olan önemli başlangıç belgelerindeki var olan uygulamalardan oluşturulmuştur. Çözümlerin genellikle uzun görünebilmesi ve bazen trigonometrik ve hiperbolik fonksiyonların kafa karıştırıcı kombinasyonlarının karışık görünmesi

nedeninden bu ihtiyaçlar doğmuştur. Bu yüzden, bu iki tip fonksiyonlar arası gösterimlerdeki farklılığın üzerinde durmak için oldukça aranan bir hale gelmiştir ve etkili bir yol olduğu görölmüştür.

Kerr (1964), elastik ve visko elastik zemin modelleri üzerinde incelemelerde bulunmuştur. Bütün durumlarda zeminlerin izotermal koşullarda bulunduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada, elastik zemin üzerinde bulunan kirişler ve plakların analizlerinde basitliğinden ötürü yaygın olarak kullanılan Winkler modelinden bahsedilmiştir. Ayrıca, toprak davranışını sunabilecek olan elastik ve visko elastik modeller kritikselsel olarak belirlenmiştir.

Vinson ve Sierakowski (1986), kompozit yapılar ve ürünlerinin 1986'daki ilk yayımından beri son derece geliştiğinden bahsetmişlerdir. Klasik 1986 yayımının yeni baskısı kompozit yapılar ve ürünlerin dizayn ve analizlerinde kompozit malzeme kullanımı için mekaniğin çeşitli alanlarındaki mühendislik okuyucularının eğitimi için yazılmıştır. Alanlar üretim, mikro mekanik özellikler, yapısal dizayn, birleşme yerleri ve bağlanma ve kompozit dizayn felsefesini tanıtmaya daha çok ihtiyaç içeren alanlarla ilgilidir.

Ogibalov ve Koltunov (1969), monografide plak ve kabuk şekilli ince yapı elemanlarının pratik hesabı ve teorilerini içermektedir. Değişik özelliklere sahip elastik ve elastik olmayan malzemelerden oluşan plak ve kabukların doğrusal ve doğrusal olmayan teorisi sistemli şekilde sunulmaktadır. Düzgün sınır değer problemler formüle edilmiş ve değişik yöntemlerle çözümleri bulunmuştur. Kitapta aynı zamanda, izotrop ve anizotrop plak ve kabukların doğrusal ve doğrusal olmayan (fiziksel ve geometrik) formülasyonda; eğilme, stabilite ve titreşim problemleri ele alınmıştır. Daha tipik problemlerin çözümlerinin ve deney sonuçlarının analizleri yapılmıştır. Kitap elastik ve elastik olmayan malzemelerden oluşan plak ve kabukların stabilitesi ile ilgili çok sayıda özgün sonuçlar içermektedir.

Reddy (2004), kitabında tabakalı kompozit plakların değişik sınır koşulları, değişik yükler etkisi altında, kayma şekil değiştirme ve geometrik doğrusal olmama koşulları

dikkate alınarak çok sayıda problem çözmüş, grafik ve çizelgeler sunmuştur. Bölüm 1-3'te bazı matematiksel girişler, anizotrop elastisitenin denklemleri, virtüel iş ve varyasyonel yöntemler incelenmiştir. Bölüm 4'te kompozit malzemelerin ortak terimleri tanıtılmıştır daha sonra tabaka, gerilme ve deformasyon dönüşümlerinin temel denklemleri ele alınmıştır. Bölüm 5'te klasik ve birinci mertebe kayma deformasyonlu tabakalı plakların hareket denklemlerinin türetilmesi sunulmuş ve seçilen tabakaların tabaka rijitlik karakteristikleri tartışılmıştır. Bölüm 6, klasik ve birinci mertebe kayma deformasyon teorilerinin silindirik eğilmede tabakalı kirişler ve plak şeritlere uygulanmasını içermektedir. Bölüm 7'de özel ortotropik dikdörtgen tabakaların klasik tabakalı plak teorisini kullanan analiziyle ilgilenilmiştir. Burada malzeme anizotropluğunun, tabakalanma şemasının ve plak en-boy oranının eğilme dönmesi ve gerilmeye olan etkileri, burkulma yükleri, titreşim frekansları ve süreksiz davranışlar tartışılmıştır. Bölüm 8 ve 9'da klasik ve birinci mertebe kayma deformasyonlu plak teorileri için sırasıyla Navier ve Levy çözüm yaklaşımlarını temel alan dikdörtgen tabakaların süreksiz davranışları, doğal titreşim, burkulma ve eğilme için analitik çözümler sunulmuştur. Bölüm 10'da kompozit tabakaların sonlu eleman analizi incelenmiştir. Klasik tabakalı plak teorisini ve birinci mertebe kayma deformasyonlu kabuk teorisine dayanan tek boyutlu(kiriş ve plak şeritler için) ve iki boyutlu(plaklar) sonlu elemanlar yöntemleri tartışılmıştır ve sayısal örnekler sunulmuştur. Bölüm 11 ve 12'de sırasıyla yüksek mertebeden (üçüncü mertebe) tabaka teorileri ve tabaka yöntem teorisi sunulmuştur. Sonlu elemanlar yöntemi ve analitik modeller tartışılmıştır. Son olarak bölüm 13'te kompozit tabakaların geometrik olarak doğrusal olmayan analizi incelenmiştir. Von-Karman doğrusal olmamaya sahip tabakalı plakların yer değiştirme sonlu eleman modelleri türetilmiştir ve bazı tipik problemler için sayısal sonuçlar sunulmuştur.

Suresh ve Mortensen (1998), fonksiyonel değişimli malzemelerle ilgili ilk ve çok önemli bir kitaptır. Bu kitapta fonksiyonel değişimli malzemelerin yapım yöntemleri ve termo ve mekanik davranışları sunulmuştur. Ayrıca seramik-metal kompozitlerin davranışları da bu kitapta ele alınmıştır.

Vlasov ve Leont'ev (1966), kitabı İngilizceye de çevrilmiş (orijinali Rusçadır) ve elastik zemine oturan kiriş, plak ve kabuklar ile ilgili temel bilgiler içermektedir.

Elastik zemin üzerindeki üç boyutlu kompleks yapılar var olan yöntemlerle analiz edilememişlerdir. Bir zemin modelinin varsayımı, ayrık bağlantılı olmayan halkaların bir sistemi olarak düşünülmüştür, böylece elastik zeminler üzerindeki yapıların analizlerini oldukça basitleştirmek, genellikle doğru olmayan sonuçlar doğurmuştur. Diğer bir yandan, yarı sonsuz boşluklu bir elastik izotropiğin varsayımı doğal bir zeminin fiziksel özellikleri olarak tanımlanmıştır. Yüksek oranda doğruluğu elde edebilmek için toprağın elastik-plastik deformasyonu göz önünde bulundurulmalıdır. Burada önerilmiş olan teori, birçok problemin çözümünün pratiksel öneminin integralleri tablolardan bulunabilen sıradan diferansiyel denklemleri çözerek indirgendiği sunulmuştur. Matematiksel yöntemlerin basitliği ve matematiksel yöntemin açıklığı bu teoriyi oldukça uygun kılmıştır, sadece elastik zemin üzerindeki kiriş ve plakların temel problemleri değil, ayrıca çeşitli kompleks problemler teorisinin desteği ile çözülebileceği belirtilmiştir. Bu problemler kabuk analizlerini, temel zemin deformasyonu ve eklentili enine yüklerin hesaba katılmasını ve elastik zemin üzerindeki yapıların dinamik ve stabilite problemlerini içermiştir. Sunulmuş olan teori yatay ya da eğik tekil ve çoklu tabakalardaki gerilmeleri belirlemek için uygulanabilir. Yapılan çalışmalar, elde edilen bulgular mühendislik pratiklerinde ve ileri araştırmalarda kullanılabilir.

Volmir (1967), kitabında demir çubuklar, plaklar, kabuklar, kirişler ve farklı şekil ve dizaynlardaki çerçeve yapılar gibi çeşitli yapısal elementlerin stabilitesini incelemiştir. Hidro elastisite ve aero elastisitenin kesin problemlerine vurgu yapılmıştır. Dinamik stabilitenin kriteri, başlangıç kusuru, eksantrik sıkıştırma, dinamik programlama ve analog bilgisayarların kullanımı incelenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Problemin formülasyonunda Love'nin birinci mertebe yaklaşım teorisi kullanılmaktadır. Silindirik kabuk üç tabakadan; metal, seramik ve FDM tabakalardan oluşmaktadır. Tabakalar arasındaki değme koşulu salt bağlanma koşulu olup bu koşul tüm kabuk için yer değiştirmelerin aynı olmasını ve tabakaların birinin diğerine basıncının göz önüne alınmamasını sağlamaktadır. Bu koşullar tüm tabakaların bir bütün olarak Hooke kuralına tabi olmasını sağlamaktadır. Hooke kuralına göre fonksiyonel değişimli malzeme içeren üç tabakalı silindirik kabuğun gerilme-yer değiştirme bağıntıları oluşturulmaktadır. Donnell–Mushtari–Vlasov (DMV) varsayımları ve doğrusal gerilme-yerdeğiştirme bağıntıları kullanılarak fonksiyonel değişimli malzeme içeren üç tabakalı silindirik kabuğun kuvvet ve moment bileşenleri bulunmaktadır. FDM tabaka içeren üç tabakalı silindirik kabuk kenarlardan burulma yükü etkisi altında olduğu varsayılmaktadır. Donnell teorisi kullanılarak Winkler elastik zemini üzerinde bulunan fonksiyonel değişimli malzeme içeren üç tabakalı silindirik kabuğun çökmesine (yer değiştirme) ve Airy gerilme fonksiyonuna bağlı deformasyon uygunluk ve değiştirilmiş Donnell tipi stabilite denklemleri çıkarılmaktadır.

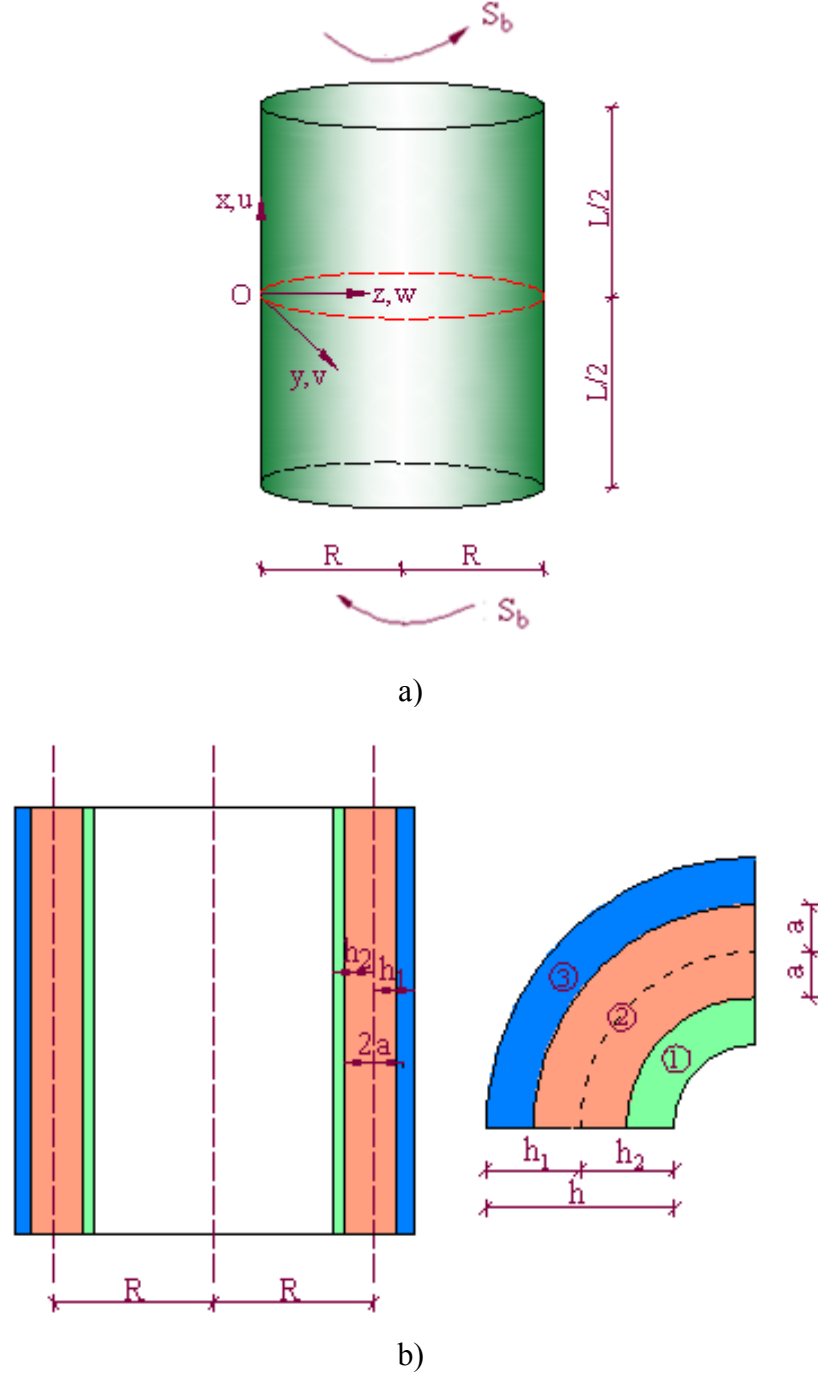
Çökme ve Airy gerilme fonksiyonuna bağlı deformasyon uygunluk ve değiştirilmiş Donnell tipi stabilite denklemleri Galerkin yöntemi uygulanarak karışık sınır koşulu için çözülmektedir.

Elde edilen öz değerlere değişik faktörlerin etkilerini kanıtlamak için sayısal hesaplar yapılacaktır. Sayısal hesaplarda Maple 14 bilgisayar programı kullanılmaktadır.

3.1. Problemin Formülasyonu

Burulma yüküne maruz, FDM tabaka içeren ince kalınlıklı kompozit malzemeden oluşan üç katmanlı silindirik kabuk Şekil 3.1'de sunulmaktadır. Koordinat sistemi üç katmanlı silindirik kabuğun referans yüzeyinde ve kabuk uzunluğunun orta noktasında seçilmiştir. Ox eksenine ana doğrultuda, Oy eksenine çevresel doğrultuda, Oz eksenine ise söz konusu iki eksene dik olarak yönelmektedir (Şekil 3.1a). Üç katmanlı

kabuk üç farklı malzemeden oluşan katmanlardan oluşmaktadır. Üç tabakalı silindirik kabuğun orta tabakası FDM'den, alttaki tabaka pür seramik ve üstteki tabaka pür metalden oluşmaktadır. Üç katmanlı kabuğun genel kalınlığı $h = h_1 + h_2$ ve ortadaki tabakanın kalınlığı $2a$ 'dır (Şekil 3.1b).

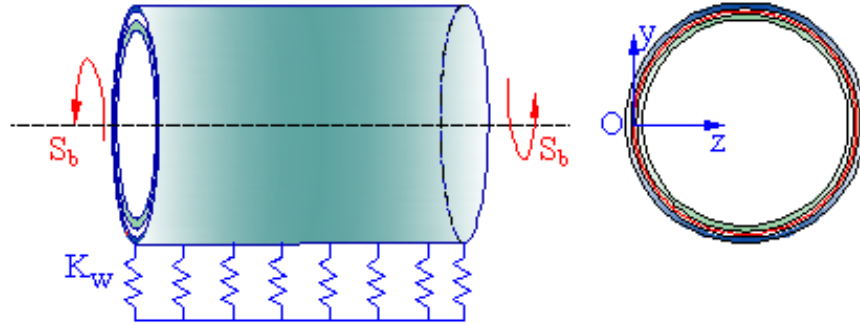


Şekil 3.1. a) Burulma yüküne maruz üç katmanlı silindirik kabukta koordinat sistemi, b) tabakaların diziliş şekli; (1)seramik, (2)FDM, (3)metal

Silindirik kabuk elastik zemin üzerinde bulunmakta ve zemin için Winkler modeli kullanılmaktadır (Şekil 3.2). Elastik zeminin reaksiyon kuvveti aşağıdaki gibidir (Hetenyi, 1955; Kerr, 1964; Vlasov and Leont'ev, 1966; Jones and Xenophontos, 1977; Gorbunov–Possadov et al., 1984):

$$Q = K_w w \quad (3.1)$$

Burada, Q bir alandaki kuvvet, K_w (N/m^3) elastik zemin katsayısı ve w referans yüzeye normal doğrultuda yer değiştirme olup kabuk kalınlığından çok küçüktür.



Şekil 3.2. Elastik zemin üzerinde bulunan üç katmanlı silindirik kabuk burulma yükü etkisi altında

3.2. FDM'nin Analitik Modellenmesi ve Grafikleri

Son birkaç yılda değişik mühendislik alanlarında uygulanan üç katmanlı sistemlerde fonksiyonel değişimli malzemeler (FDM'ler) sık kullanılmaktadır. Buna göre üçlü sistem içinde FDM'lerin matematik modellenmesi çok önemlidir. FDM'ler matematiksel modellendiğinde malzeme özelliklerinin hem ısıya hem de konuma bağlı olması dikkate alınmalıdır (Bkz. Genel bilgilerde 2.1. FDM'ler Hakkında Genel Bilgi). Bu, bileşenlerin sıcaklığa bağlı özellikleriyle birleştirilmiş sertleşme parametreleri için karışımların basit bir kuralı kullanılarak elde edilmiştir. Hacim oranı, uzay koordinatlarının bir fonksiyonu olup, bileşenlerin özellikleri, sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Bu fonksiyonların kombinasyonu, FDM özelliklerinin gerçekliğini artırır ve aşağıdaki gibi ifade edilir (Touloukian, 1967; Koizumi, 1997; Reddy and Chin, 1998):

$$P = P_s V_s + P_m V_m \quad (3.2)$$

Burada P_s ve P_m , FDM tabakanın seramik ve metal yüzeylerinin ısıya bağlı malzeme özellikleri; V_s ve V_m , FDM'nin seramik ve metal hacim bileşenleri olup şu bağıntı sağlanır:

$$V_s + V_m = 1 \quad (3.3)$$

Fonksiyonel değişimli malzemenin yerel efektif malzeme özellikleri FDM malzeme özelliklerinin analitik modeli Mori-Tanaka yöntemi ile oluşturulur (Bkz. Genel bilgilerde 1.3.4. FDM'ler için Mori-Tanaka modeli hakkında bilgi). Bu yöntem ile malzeme bilimcilerinin elde ettiği bağıntıları kullanarak Reddy and Chin (1998), Pitakthapanaphong and Busso (2002), Reddy (2004) ve diğer çalışmalarda seramik hacim bileşeni için önerilen aşağıdaki çeşitli ifadeler bu çalışmada kullanılacaktır:

$$1. \text{ Doğrusal: } V_s = \frac{z+a}{2a} \quad (3.4)$$

$$1. \text{ Kuadratik: } V_s = \left(\frac{z+a}{2a} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$3. \text{ Ters Kuadratik: } V_s = 1 - \left(\frac{a-z}{2a} \right)^2 \quad (3.6)$$

$$4. \text{ Kübik: } V_s = 3 \left(\frac{z+a}{2a} \right)^2 - 2 \left(\frac{z+a}{2a} \right)^3 \quad (3.7)$$

Homojen katmanlarla FDM tabakanın temas yüzeylerinde seramik hacim bileşeni V_s aşağıdaki bağıntıyı sağlar (Pitakthapanaphong and Busso, 2002; Li and Batra, 2006):

$$V_s = \begin{cases} 0 & z = -a \text{ ise} \\ 1 & z = a \text{ ise} \end{cases} \quad (3.8)$$

(3.2) ve (3.3) bağıntıları kullanılarak FDM içeren üç katmanlı sistemde malzeme özellikleri iki şık şeklinde sunulmaktadır (Sofiyev, 2007; Li et al., 2010). Üç katmanlı silindirik kabuğun orta katmanında FDM tabaka, kenar katmanlarında pür metal ve pür seramik olduğunda; Young modülü ve Poisson oranı şu şekilde sunulmaktadır:

$$E(\bar{z}) = \begin{cases} E_{0m} & -h_1 \leq z \leq -a \\ E_{fd}(\bar{z}) = E_m + (E_s - E_m)V_s & -a \leq z \leq a \\ E_{0s} & a \leq z \leq h_2 \end{cases} \quad \text{ise} \quad (3.9a)$$

$$\nu(\bar{z}) = \begin{cases} \nu_{0m} & -h_1 \leq z \leq -a \\ \nu_{fd}(\bar{z}) = \nu_m + (\nu_s - \nu_m)V_s & -a \leq z \leq a \\ \nu_{0s} & a \leq z \leq h_2 \end{cases} \quad \text{ise} \quad (3.9b)$$

FDM tabakanın özelliklerinin kuvvet fonksiyonunun yanı sıra üstel fonksiyon şeklinde de değiştiği birçok çalışma ile kanıtlanmıştır. Bu durumda FDM tabakanın malzeme özellikleri aşağıdaki bağıntıları sağlamaktadır (Erdogan and Wu, 1996):

$$E_{fd}(\bar{z}) = E_m e^{(\bar{z}+0.5)\ln(E_s/E_m)}, \quad (3.10)$$

$$\nu_{fd}(\bar{z}) = \nu_m e^{(\bar{z}+0.5)\ln(\nu_s/\nu_m)}$$

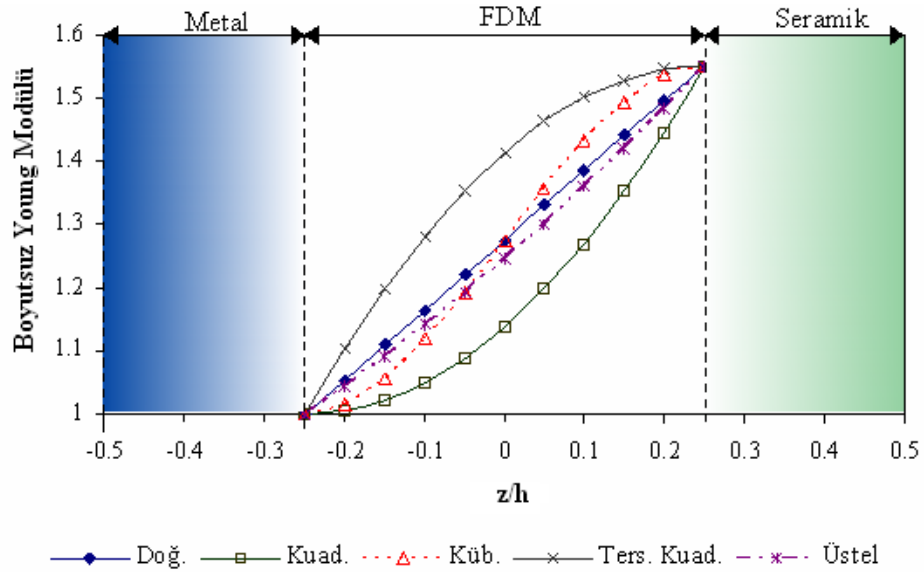
Burada E_m , ν_m , E_s , ν_s sırasıyla, FDM tabaka yüzeyinin Young modülleri ve Poisson oranları, E_{0m} , ν_{0m} ve E_{0s} , ν_{0s} sırasıyla, pür metal ve seramiğin Young modülü ve Poisson oranlarıdır.

Üç katmanlı silindirik kabuğunun orta katmanında FDM-üstel tabaka, kenar katmanlarında pür metal ve pür seramik olduğunda; Young modülü ve Poisson oranı, şu şekilde sunulmaktadır:

$$E(\bar{z}) = \begin{cases} E_{0m} & -h_1 \leq z \leq -a \\ E_{fd}(\bar{z}) = E_m e^{(\bar{z}+0.5)\ln(E_s/E_m)} & -a \leq z \leq a \\ E_{0s} & a \leq z \leq h_2 \end{cases} \quad \text{ise} \quad (3.11a)$$

$$v(\bar{z}) = \begin{cases} v_{0m} & -h_1 \leq z \leq -a \\ v_{fd}(\bar{z}) = v_m e^{(\bar{z}+0.5)\ln(v_s/v_m)} & -a \leq z \leq a \\ v_{0s} & a \leq z \leq h_2 \end{cases} \quad \text{ise} \quad (3.11b)$$

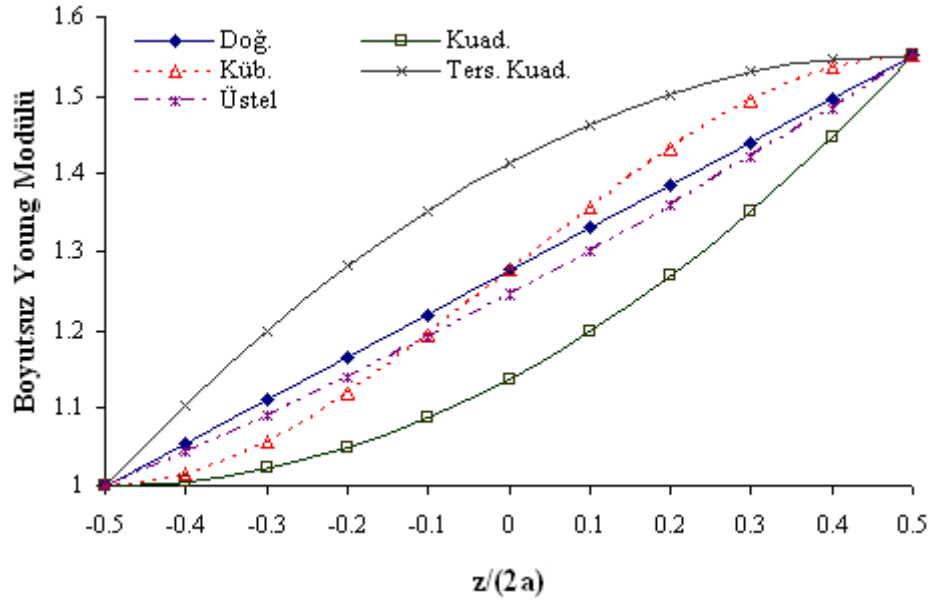
Metal-FDM-Seramik'ten oluşan üç katmanlı sistemde FDM tabakanın hacim kesir fonksiyonu doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel olarak değiştiğinde boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi Şekil 3.3'te sunulmaktadır. Yatay eksen FDM tabakanın kalınlık durumunu ($\bar{z} = z/h$), dikey eksen ise boyutsuz Young modülünün değişimini göstermektedir.



Şekil 3.3. Metal-FDM-Seramik'ten oluşan üç katmanlı sistemde FDM tabakanın değişik hacim kesir fonksiyonları için $E(\bar{z})/E_m$ boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi

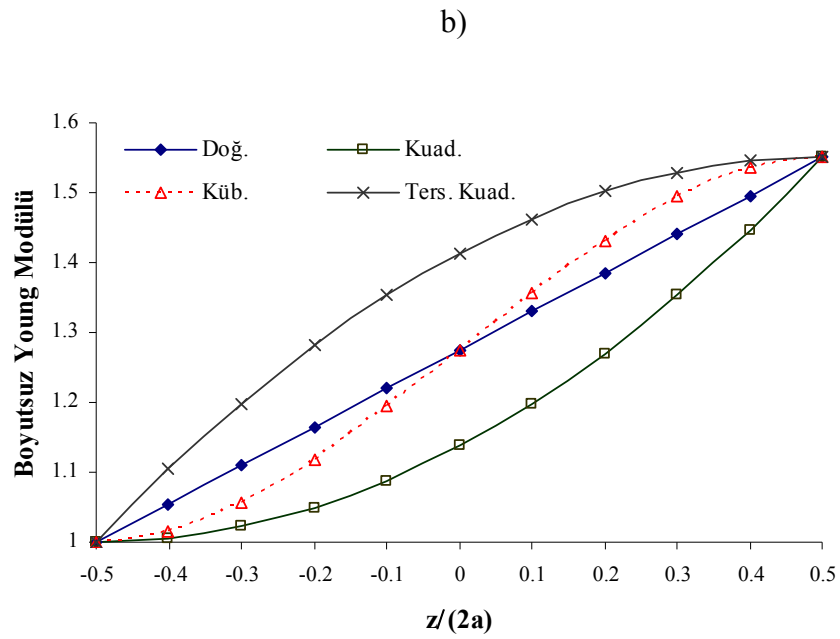
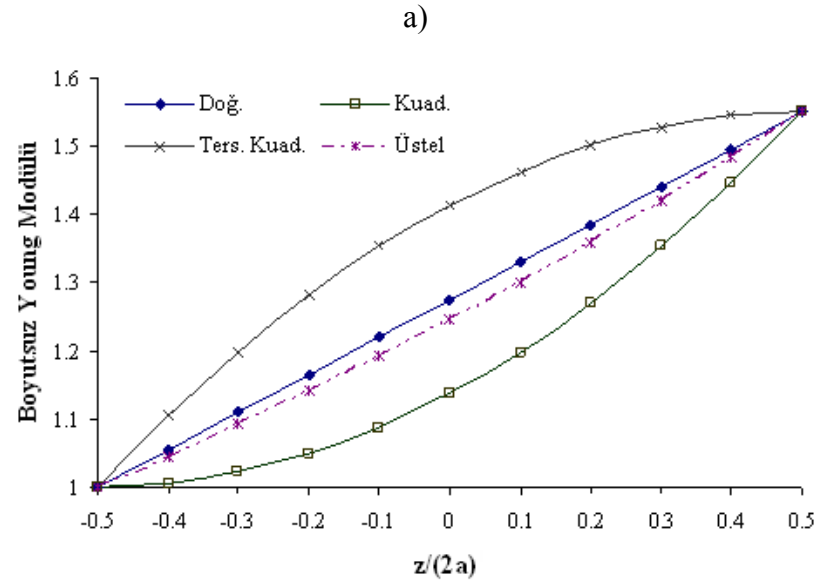
FDM tabakanın hacim kesir fonksiyonu doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel şekilde değiştiğinde, boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi Şekil 3,4'te sunulmaktadır. Yatay eksen FDM tabakanın kalınlık durumunu

($\bar{z} = z/2a$), dikey eksen ise boyutsuz Young modülünün değişimini göstermektedir. Malzemenin yoğunluğu ve Poisson oranı için de benzer grafikler çizilebilir. FDM tabakanın alt yüzeyi pür seramikten oluşur ve hacim oranı bileşeni FDM tabakanın alt yüzeyinden üst yüzeyine doğru sürekli azalır. Üst yüzey tamamen metalden oluşur (Li and Batra, 2006; Sofiyev et al., 2007; 2009).



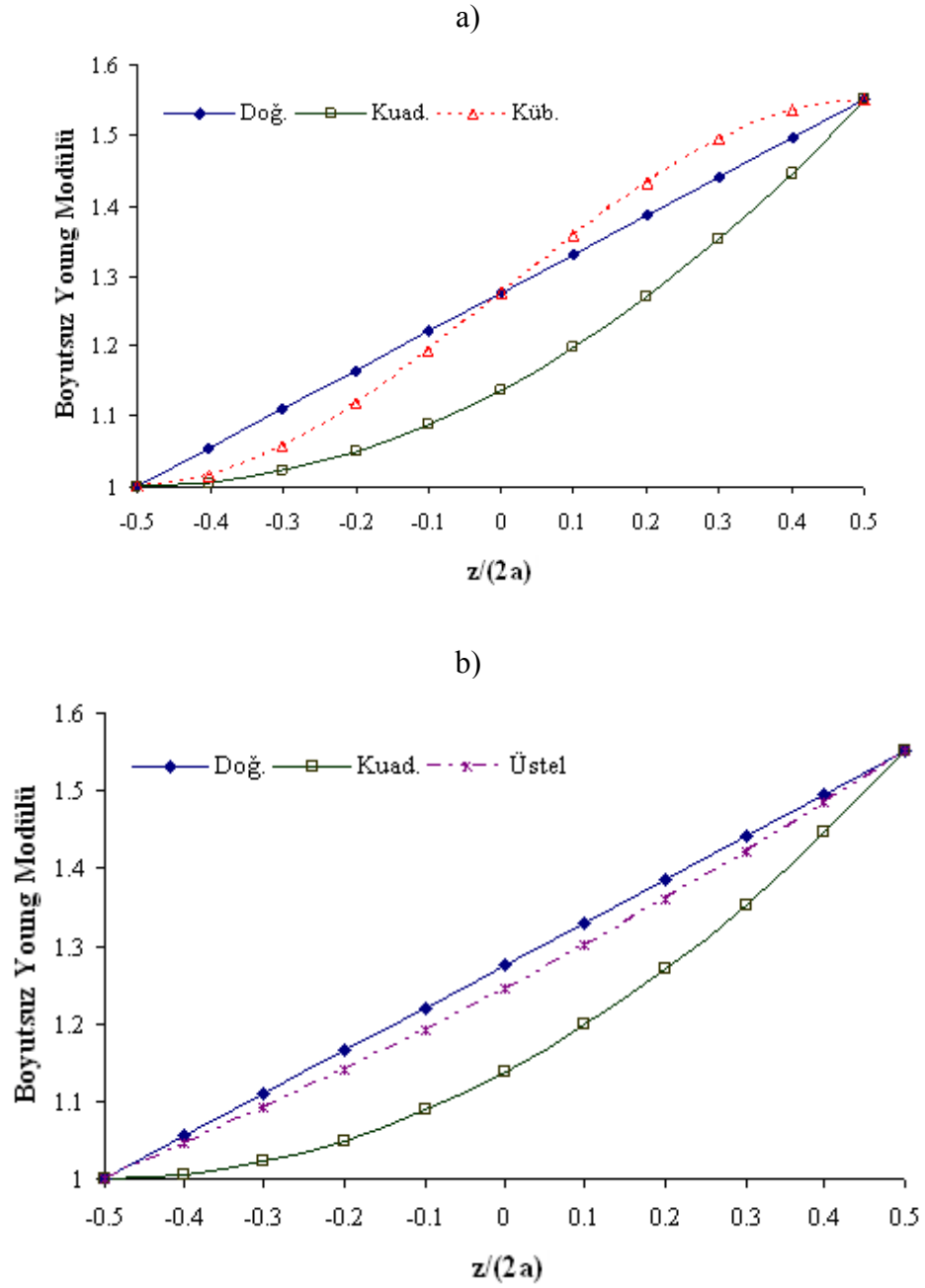
Şekil 3.4. FDM tabakanın değişik hacim kesir fonksiyonları için E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi

FDM tabakanın hacim kesir fonksiyonu doğrusal, kuadratik, ters kuadratik ve üstel şekilde değiştiğinde boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi Şekil 3.5a'da sunulmaktadır. FDM tabakanın hacim kesir fonksiyonu doğrusal, kuadratik, ters kuadratik ve kübik değiştiğinde boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi Şekil 3.5b'de sunulmaktadır.



Şekil 3.5a, b. FDM tabakanın değişik hacim kesir fonksiyonları için E_{fd}/E_m boyutsuz Young modulünün kalınlık koordinatına göre değişimi

FDM tabakanın hacim kesir fonksiyonu doğrusal, kuadratik ve kübik değiştiğinde boyutsuz Young modulünün kalınlık koordinatına göre değişimi Şekil 3.6a'da sunulmaktadır. FDM tabakanın hacim kesir fonksiyonu doğrusal, kuadratik ve üstel değiştiğinde boyutsuz Young modulünün kalınlık koordinatına göre değişimi Şekil 3.6b'de sunulmaktadır.



Şekil 3.6a, b. FDM tabakanın değişik hacim kesir fonksiyonları için E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün kalınlık koordinatına göre değişimi

Fonksiyonel değişimli silindirik kabukların analizi iki tip seramik ve metal kombinasyonlar için yapılacaktır. Birinci grup malzemeler; Ni /Si₃N₄ veya FDMA ile ifade edilen Nikel ve Silikon Nitrat'ın karışımıdır. İkinci grup ise, Ti6Al4V/ZrO₂ veya FDMB ile ifade edilen Titanyum ve Zirkonyum'un bir kombinasyonudur.

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

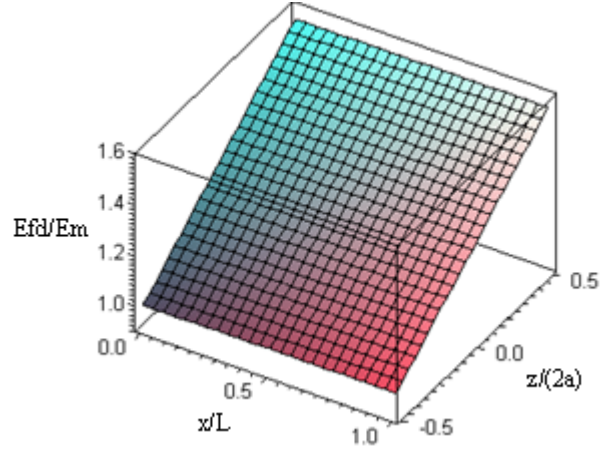
$$P = P_0 [P_{-1} T^{-1} + 1 + P_1 T + P_2 T^2 + P_3 T^3] \quad (3.12)$$

Burada P_{-1} ; P_0 ; P_1 ; P_2 ; P_3 katsayıları sıcaklık fonksiyonları olup, Kelvin ile ifade edilirler ve malzeme bileşenleri için tektirler (Touloukian, 1967). Çizelge 3.1’de malzeme özellikleri $T(K)=300K$ ’de değerlendirilmiştir.

Çizelge 3.1. Seramik ve metaller için E (MPa) Young modülü ve ν Poisson oranının sıcaklığa bağlı katsayıları (Reddy and Chin, 1998; Kitipornchai et al., 2004)

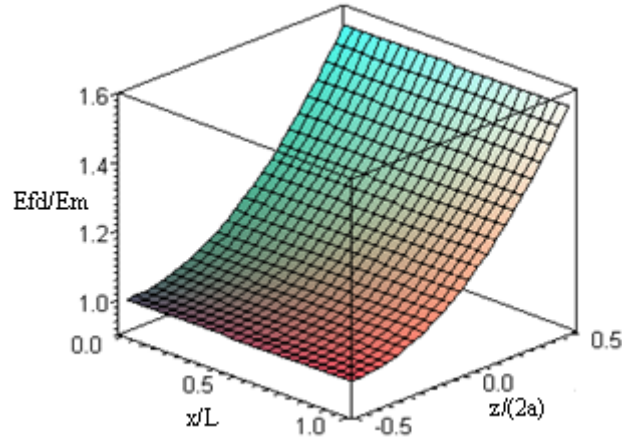
Katsayılar	Si ₃ N ₄		Ni	
	E _s	ν_s	E _m	ν_m
P ₀	3.4843×10^5	0.24	2.2395×10^5	0.31
P ₋₁	0	0	0	0
P ₁	-3.07×10^{-4}	0	-2.794×10^{-4}	0
P ₂	2.160×10^{-7}	0	-3.998×10^{-9}	0
P ₃	-8.946×10^{-11}	0	0	0
P	3.2227×10^5	0.24	2.05098×10^5	0.31
	ZrO ₂		Ti6Al4V	
	E _s	ν_s	E _m	ν_m
P ₀	2.4427×10^5	0.2882	1.2256×10^5	0.2884
P ₋₁	0	0	0	0
P ₁	-1.371×10^{-3}	1.133×10^{-4}	-4.586×10^{-4}	1.121×10^{-4}
P ₂	1.214×10^{-6}	0	0	0
P ₃	-3.681×10^{-9}	0	0	0
P	1.68063×10^5	0.298	1.056982×10^5	0.2981

FDM tabaka içeren kompozit silindirik kabuklarda değişik kompozisyonel profiller için E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün $\bar{z} = z/2a$ boyutsuz kalınlık koordinatına göre değişimi üç boyutlu olarak çizilmiş ve Şekil 3.7-3.11’de sunulmaktadır. Şekillerin çiziminde eksenler üzerinde E_{fd}/E_m , x/L ve $z/2a$ sembolleri kullanılmıştır. Hacim bileşeni doğrusal değiştiğinde, yani $V = \bar{z} + 0.5$ olduğunda $E_{fd}/E_m = (E_s/E_m - 1)(\bar{z} + 0.5) + 1$ boyutsuz Young modülünün $\bar{z} = z/2a$ boyutsuz kalınlık koordinatına göre değişiminin üç boyutlu grafiği çizilmiş ve Şekil 3.7’de sunulmuştur.



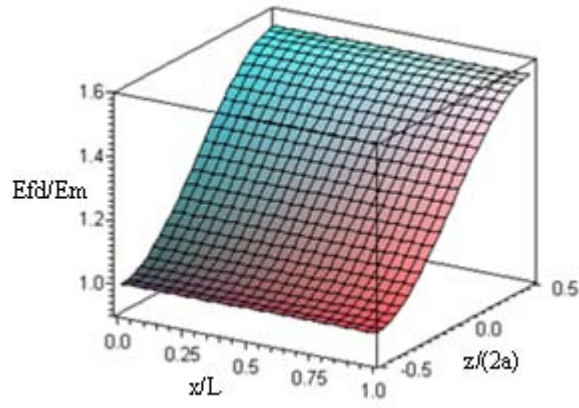
Şekil 3.7. Hacim bileşeni doğrusal değiştiğinde E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği

Hacim bileşeni kuadratik değiştiğinde, yani $V = (\bar{z} + 0.5)^2$ olduğunda $E_{fd}/E_m = (E_s/E_m - 1)(\bar{z} + 0.5)^2 + 1$ boyutsuz Young modülünün $\bar{z} = z/2a$ boyutsuz kalınlık koordinatına göre değişiminin üç boyutlu grafiği çizilmiş ve Şekil 3.8’de sunulmuştur.



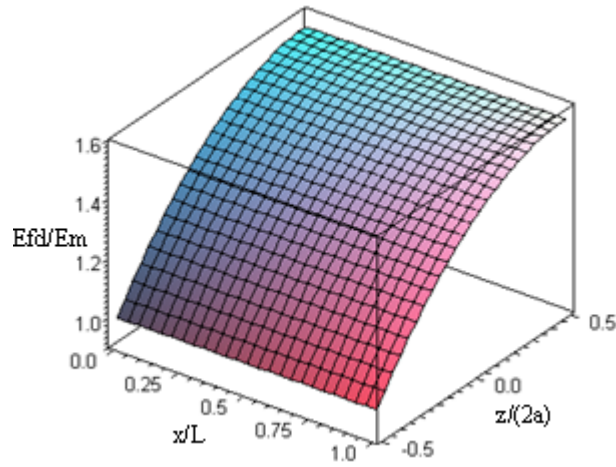
Şekil 3.8. Hacim bileşeni kuadratik değiştiğinde, E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği

Hacim bileşeni kübik değiştiğinde, yani $V(\bar{z}) = 3(\bar{z} + 0.5)^2 - 2(\bar{z} + 0.5)^3$ olduğunda $E_{fd}/E_m = (E_s/E_m - 1)[3(\bar{z} + 0.5)^2 - 2(\bar{z} + 0.5)^3]$ boyutsuz Young modülünün $\bar{z} = z/2a$ boyutsuz kalınlık koordinatına göre değişiminin üç boyutlu grafiği çizilmiş ve Şekil 3.9’da sunulmuştur.



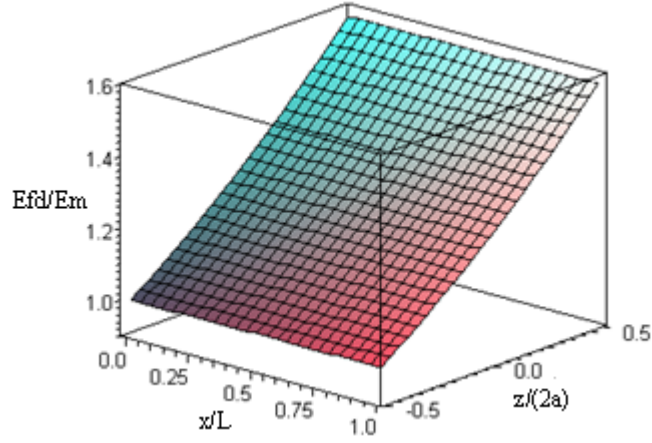
Şekil 3.9. Hacim bileşeni kübik değiştiğinde, E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği

Hacim bileşeni ters kuadratik değiştiğinde, yani $V(\bar{z}) = 1 - (0.5 - \bar{z})^2$ olduğunda, $E_{fd}/E_m = (E_s/E_m - 1)[1 - (0.5 - \bar{z})^2] + 1$ boyutsuz Young modülünün $\bar{z} = z/2a$ boyutsuz kalınlık koordinatına göre değişiminin üç boyutlu grafiği çizilmiş ve Şekil 3.10’da sunulmuştur.



Şekil 3.10. Hacim bileşeni ters kuadratik değiştiğinde, E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği

Hacim bileşeni üstel değiştiğinde, $E_{fd}/E_m = e^{(\bar{z}+0.5)\ln(E_s/E_m)}$ boyutsuz Young modülünün $\bar{z} = z/2a$ boyutsuz kalınlık koordinatına göre değişiminin üç boyutlu grafiği çizilmiş ve Şekil 3.11’de sunulmaktadır.



Şekil 3.11. Hacim bileşeni üstel değiştiğinde, E_{fd}/E_m boyutsuz Young modülünün üç boyutlu grafiği

3.3. FDM Tabaka İçeren Üç katmanlı Silindirik Kabukların Temel Bağlılıklarının Oluşturulması

İnce kabuk teorisi kullanarak FDM tabaka içeren üç tabakalı silindirik kabuk için gerilme-deformasyon bileşenleri arasındaki bağıntılar;

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x^{(k)} \\ \sigma_y^{(k)} \\ \sigma_{xy}^{(k)} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11}^{(k)} & Q_{12}^{(k)} & 0 \\ Q_{12}^{(k)} & Q_{22}^{(k)} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66}^{(k)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} \quad (3.13)$$

şeklinde yazılır (Reddy, 2004). Burada, $\sigma_x^{(k)}, \sigma_y^{(k)}, \sigma_{xy}^{(k)}$ tabakalardaki gerilme bileşenleri, $k = 1, 2, 3$ olup tabaka sayısını göstermekte; $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_{xy}$ kabuğun şekil değiştirme bileşenleri; $Q_{ij}^{(k)}$, $i, j = 1, 2, 6$ metal, seramik ve FDM özelliklerine bağlı nicelikleri içermekte olup aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$Q_{11}^{(1)} = Q_{22}^{(1)} = \frac{E_{0m}}{1 - \nu_{0m}^2}, \quad Q_{12}^{(1)} = \frac{\nu_{0m} E_{0m}}{1 - \nu_{0m}^2}, \quad Q_{66}^{(1)} = \frac{E_{0m}}{1 + \nu_{0m}}$$

$$Q_{11}^{(2)} = Q_{22}^{(2)} = \frac{E_{fd}(\bar{z})}{1 - [\nu_{fd}(\bar{z})]^2}, \quad Q_{12}^{(2)} = \frac{\nu_{fd}(\bar{z}) E_{fd}(\bar{z})}{1 - [\nu_{fd}(\bar{z})]^2}, \quad Q_{66}^{(2)} = \frac{E_{fd}(\bar{z})}{1 + \nu_{fd}(\bar{z})} \quad (3.14)$$

$$Q_{11}^{(3)} = Q_{22}^{(3)} = \frac{E_{0s}}{1 - \nu_{0s}^2}, \quad Q_{12}^{(3)} = \frac{\nu_{0s} E_{0s}}{1 - \nu_{0s}^2}, \quad Q_{66}^{(3)} = \frac{E_{0s}}{1 + \nu_{0s}}$$

Kirchhoff-Love varsayımına göre referans yüzeyden z uzaklığındaki yüzeyin deformasyonu (Koltunov, 1969; Amabili, 2008);

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_x + z\chi_x \\ e_y + z\chi_y \\ e_{xy} + z\chi_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

şeklindedir. Burada e_x ve e_y üç katlı kabuğun referans yüzeyindeki Ox ve Oy doğrultularındaki normal deformasyon bileşenleri, e_{xy} referans yüzeydeki kayma deformasyonu; χ_x ve χ_y sırasıyla Ox ve Oy doğrultularındaki eğrilik değişimleri ve χ_{xy} referans yüzeyin burulması olup şu tanımlar geçerlidir:

$$\chi_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \quad \chi_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, \quad \chi_{xy} = -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \quad (3.16)$$

N_x, N_y, N_{xy} , kuvvet bileşenleri aşağıdaki ifadelerden bulunur (Volmir, 1967):

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^3 \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \sigma_x^{(k)} \\ \sigma_y^{(k)} \\ \sigma_{xy}^{(k)} \end{bmatrix} dz \quad (3.17)$$

M_x, M_y, M_{xy} , moment bileşenleri aşağıdaki ifadelerden bulunur (Volmir, 1967; Reddy, 2004):

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^3 \int_{z_k}^{z_{k+1}} \begin{bmatrix} \sigma_x^{(k)} \\ \sigma_y^{(k)} \\ \sigma_{xy}^{(k)} \end{bmatrix} z dz \quad (3.18)$$

(3.15) ifadesi (3.13) bağıntısında yerine yazılıp elde edilen ifadeler (3.17) ve (3.18) bağıntılarında yerine yazıldığında FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun en kesitindeki kuvvet ve moment bileşenlerinin deformasyon ve eğriliklerle ifadeleri;

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^0 e_x + a_{12}^0 e_y + a_{11}^1 \chi_x + a_{12}^1 \chi_y \\ a_{12}^0 e_x + a_{11}^0 e_y + a_{12}^1 \chi_x + a_{11}^1 \chi_y \\ a_{66}^0 e_{xy} + a_{66}^1 \chi_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}^1 e_x + a_{12}^1 e_y + a_{11}^2 \chi_x + a_{12}^2 \chi_y \\ a_{12}^1 e_x + a_{11}^1 e_y + a_{12}^2 \chi_x + a_{11}^2 \chi_y \\ a_{66}^1 e_{xy} + a_{66}^2 \chi_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

şeklini alır. Burada, aşağıdaki tanımlar geçerlidir:

$$a_{11}^{k_1} = \frac{E_{0m}}{1 - \nu_{0m}^2} \int_{-h_1}^{-a} z^{k_1} dz + \int_{-a}^a z^{k_1} \frac{E_{fd}(\bar{z})}{1 - [\nu_{fd}(\bar{z})]^2} dz + \frac{E_{0s}}{1 - \nu_{0s}^2} \int_a^{h_2} z^{k_1} dz \quad (3.21a)$$

$$a_{12}^{k_1} = \frac{\nu_{0m} E_{0m}}{1 - \nu_{0m}^2} \int_{-h_1}^{-a} z^{k_1} dz + \int_{-a}^a z^{k_1} \frac{\nu_{fd}(\bar{z}) E_{fd}(\bar{z})}{1 - [\nu_{fd}(\bar{z})]^2} dz + \frac{\nu_{0s} E_{0s}}{1 - \nu_{0s}^2} \int_a^{h_2} z^{k_1} dz \quad (3.21b)$$

$$a_{66}^{k_1} = \frac{E_{0m}}{1 + \nu_{0m}} \int_{-h_1}^{-a} z^{k_1} dz + \int_{-a}^a z^{k_1} \frac{E_{fd}(\bar{z})}{1 + \nu_{fd}(\bar{z})} dz + \frac{E_{0s}}{1 + \nu_{0s}} \int_a^{h_2} z^{k_1} dz \quad (3.21c)$$

N_x, N_y, N_{xy} , kuvvet bileşenleriyle Airy gerilme fonksiyonu $\bar{\psi} = \psi/h$ arasındaki bağıntı şu şekildedir:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 \psi}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

(3.16) ve (3.22) bağıntıları göz önüne alınarak (3.19) ifadelerinden referans yüzeydeki e_x, e_y, e_{xy} deformasyon bileşenleri için şu ifadeler elde edilir:

$$\begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + b_{12} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - b_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - b_{14} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ b_{12} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + b_{11} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - b_{14} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - b_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ -b_{31} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - b_{32} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$b_{11} = a_{11}^0 L_0^{-1}, \quad b_{12} = -a_{12}^0 L_0^{-1}, \quad b_{13} = (a_{12}^0 a_{12}^1 - a_{11}^1 a_{11}^0) L_0^{-1}, \quad b_{14} = (a_{12}^0 a_{11}^1 - a_{12}^1 a_{11}^0) L_0^{-1}, \quad (3.24)$$

$$b_{31} = \frac{1}{a_{66}^0}, \quad b_{32} = -\frac{a_{66}^1}{a_{66}^0}, \quad L_0 = a_{11}^0 a_{11}^0 - a_{12}^0 a_{12}^0$$

(3.16) ve (3.23) bağıntıları (3.20) ifadelerinde yerine yazıldığında;

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + c_{12} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - c_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - c_{14} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ c_{12} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + c_{11} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - c_{14} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - c_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \\ c_{31} \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} - c_{32} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

ifadeleri elde edilir. Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$c_{11} = a_{11}^1 b_{11} + a_{12}^1 b_{12}, \quad c_{12} = a_{11}^1 b_{12} + a_{12}^1 b_{11}, \quad c_{13} = a_{11}^1 b_{13} + a_{12}^1 b_{14} + a_{11}^2, \quad (3.26)$$

$$c_{14} = a_{11}^1 b_{14} + a_{12}^1 b_{13} + a_{12}^2, \quad c_{31} = a_{66}^1 b_{61}, \quad c_{32} = a_{66}^1 b_{62} + a_{66}^2$$

Winkler zemini üzerinde bulunan FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun stabilite denklemleri aşağıdaki gibidir (Wolmir, 1967; Sheng and Wang, 2008):

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{xy}}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial N_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + \frac{N_y}{R} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\ + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - K_w w &= 0 \end{aligned}$$

Winkler elastik zemini üzerinde bulunan FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun deformasyon uygunluk denklemi ise şu şekildedir (Sheng and Wang, 2008):

$$\frac{\partial^2 e_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 e_y}{\partial x^2} - 2 \frac{\partial^2 e_{xy}}{\partial x \partial y} = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (3.28)$$

Doğrusal kabuk teorisi kullanıldığında Winkler elastik zemini üzerinde bulunan FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun denge denklemlerinden birinci ve ikincisi denklige dönüşür ve üçüncü denklem aşağıdaki şekli alır (Bkz. Pflüger; 1957):

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M_x}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{xy}}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 M_y}{\partial y^2} + \frac{N_y}{R} + N_x^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2 N_{xy}^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \\ + N_y^0 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - K_w w = 0 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Burada N_x^0, N_y^0, N_{xy}^0 başlangıç momentlerin sıfır olması durumunda x ve y doğrultularında ve Oxy referans yüzeyinde membran kuvvetlerdir.

(3.19) bağıntıları (3.20) ifadesinde yerine yazılıp elde edilen ifadeler (3.13) ve (3.21) ile birlikte katmanlı silindirik kabuğun stabilite ve uygunluk denklemlerinde (3.29)'da yerine yazıldığında, bazı işlemlerden sonra aşağıdaki matris şeklinde diferansiyel denklemler elde edilir:

$$\begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi \\ w \end{bmatrix} = 0 \quad (3.30)$$

Burada L_{ij} diferansiyel operatör olup şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned}
L_{11} &= c_{12} \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2(c_{11} - c_{31}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + c_{12} \frac{\partial^4}{\partial y^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\
L_{12} &= -c_{13} \frac{\partial^4}{\partial x^4} - 2(c_{14} + c_{32}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} - c_{13} \frac{\partial^4}{\partial y^4} + N_x^0 \frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2N_{xy}^0 \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} + N_y^0 \frac{\partial^2}{\partial y^2} - K_w \\
L_{21} &= b_{11} \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2(b_{12} + b_{31}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + b_{11} \frac{\partial^4}{\partial y^4} \\
L_{22} &= -b_{14} \frac{\partial^4}{\partial x^4} - 2(b_{13} - b_{32}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} - b_{14} \frac{\partial^4}{\partial y^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2}{\partial x^2}
\end{aligned} \tag{3.31}$$

(3.30) denklemleri Winkler elastik zemini üzerinde bulunan FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun stabilite denklemi aşağıdaki gibidir:

Kabul edelim ki FDM tabaka içeren üç katmanlı kompozit silindirik kabuk S uniform burulma yükü etkisi altında olsun (Bkz. Şekil 3.1):

$$N_x^0 = 0, \quad N_y^0 = 0, \quad N_{xy}^0 = -Sh \tag{3.32}$$

(3.32) ifadeleri (3.30) denklemlerinde yerine yazıldığında şu şekle dönüşür:

$$\begin{cases} L_{11}\Psi + L_{12}w = 0 \\ L_{21}\Psi + L_{22}w = 0 \end{cases} \tag{3.33}$$

Burada şu tanım geçerlidir:

$$\begin{aligned}
L_{11} &= c_{12} \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2(c_{11} - c_{31}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + c_{12} \frac{\partial^4}{\partial y^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \\
L_{12} &= -c_{13} \frac{\partial^4}{\partial x^4} - 2(c_{14} + c_{32}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} - c_{13} \frac{\partial^4}{\partial y^4} - 2Sh \frac{\partial^2}{\partial x \partial y} - K_w \\
L_{21} &= b_{11} \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2(b_{12} + b_{31}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + b_{11} \frac{\partial^4}{\partial y^4} \\
L_{22} &= -b_{14} \frac{\partial^4}{\partial x^4} - 2(b_{13} - b_{32}) \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} - b_{14} \frac{\partial^4}{\partial y^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2}{\partial x^2}
\end{aligned} \tag{3.34}$$

Pratikte, ankastre sınır koşulları ile mukayesede karmaşık sınır koşulları gerçeği daha iyi ifade etmektedir. Bu problemde de sınır koşulları karmaşık sınır koşulları olarak ele alınmaktadır. Karmaşık sınır koşulları için (3.33) diferansiyel denklemler sisteminin çözümü aşağıdaki gibi aranır (Volmir, 1967):

$$w = \xi_1 \sin \frac{\pi x}{L} \sin \frac{n(y + \gamma x)}{R}, \quad \psi = \xi_2 \sin \frac{\pi x}{L} \sin \frac{n(y + \gamma x)}{R} \tag{3.35}$$

Burada, n çevre doğrultusunda dalga sayısı, γ dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı, ξ_1 ve ξ_2 bilinmeyen genliklerdir. (3.35) ifadeleri $x = \pm \frac{L}{2}$ olduğunda $w = \psi = 0$ koşullarını sağlar. Diğer yandan;

$$\left. \frac{\partial w}{\partial x} \right|_{x=\pm \frac{L}{2}} = \pm \frac{\gamma n}{R} \xi_1 \cos \frac{n}{R} \left(y \pm \gamma \frac{L}{2} \right) \tag{3.36}$$

$$\left. \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right|_{x=\pm \frac{L}{2}} = \mp \xi_1 \left(\frac{\pi^2}{L^2} + \frac{\gamma^2 n^2}{R^2} \right) \sin \frac{n}{R} \left(y \pm \gamma \frac{L}{2} \right) \tag{3.37}$$

$$\left. \frac{\partial \psi}{\partial x} \right|_{x=\pm \frac{L}{2}} = \pm \frac{\gamma n}{R} \xi_2 \cos \frac{n}{R} \left(y \pm \gamma \frac{L}{2} \right) \tag{3.38}$$

$$\left. \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} \right|_{x=\pm \frac{L}{2}} = \mp \xi_2 \left(\frac{\pi^2}{L^2} + \frac{\gamma^2 n^2}{R^2} \right) \sin \frac{n}{R} \left(y \pm \gamma \frac{L}{2} \right) \quad (3.39)$$

elde edilir. Yani, w yerdeğiştirmesi ve ψ gerilme fonksiyonu ne mafsalsal, ne de ankastre koşulunu sağlamamaktadır. Fakat;

$$\int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)_{x=\pm \frac{L}{2}} dy = \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_{x=\pm \frac{L}{2}} dy = 0 \quad (3.40)$$

$$\int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)_{x=\pm \frac{L}{2}} dy = \int_0^{2\pi} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \right)_{x=\pm \frac{L}{2}} dy = 0 \quad (3.41)$$

koşulları sağlanır. Böylece her iki koşul aynı zamanda integral anlamda sağlanır. (3.35) ifadeleri aşağıdaki şekle dönüştürülebilir:

$$w = \frac{1}{2} \xi_1 \left\{ \cos \frac{n}{R} [y + (\gamma - \eta)x] - \cos \frac{n}{R} [y + (\gamma + \eta)x] \right\} \quad (3.42)$$

$$\Psi = \frac{1}{2} \xi_2 \left\{ \cos \frac{n}{R} [y + (\gamma - \eta)x] - \cos \frac{n}{R} [y + (\gamma + \eta)x] \right\} \quad (3.43)$$

Burada, $\eta = \frac{\pi R}{nL}$ tanımı geçerlidir. (3.35) ifadelerini (3.33) denklemlerinde yerine yazıp Galerkin yöntemi uygulayalım:

$$\int_{-L/2}^{L/2} \int_0^{2\pi R} [L_{11}\psi + L_{12}w] \sin \frac{\pi x}{L} \sin \frac{n(y + \gamma x)}{R} dx dy = 0 \quad (3.44)$$

$$\int_{-L/2}^{L/2} \int_0^{2\pi R} [L_{21}\psi + L_{22}w] \sin \frac{\pi x}{L} \sin \frac{n(y + \gamma x)}{R} dx dy = 0$$

İntegrallemeden sonra elde edilen denklemlerden ξ_2 değişkeni yok edildiğinde Winkler zemini üzerinde bulunan FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun kritik burulma yükü için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\begin{aligned}
S_{krw} = & \frac{1}{2hn^2\gamma R^2} \left\{ \left[R(\gamma^2 n^2 + m_1^2) - c_{12}(m_1^4 + n^4 + 6m_1^2 n^2 \gamma^2 + n^4 \gamma^4) \right. \right. \\
& \left. \left. - 2(c_{11} - c_{13})(n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) \right] \right. \\
& \times \frac{b_{14}(m_1^4 + n^4 + 6m_1^2 n^2 \gamma^2 + \gamma^4 n^4) + 2(b_{13} - b_{32})(n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) + (\gamma^2 n^2 + m_1^2)R}{b_{11}(m_1^4 + n^4 + 6m_1^2 n^2 \gamma^2 + \gamma^4 n^4) + 2(b_{12} + b_{31})(n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2)} R \\
& \left. + c_{13}(6m_1^2 n^2 \gamma^2 + m_1^4 + n^4 + \gamma^4 n^4) + 2(c_{14} + c_{32})(n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) + K_w R^4 \right\} \quad (3.45)
\end{aligned}$$

Burada şu tanım geçerlidir:

$$m_1 = \frac{\pi R}{L} \quad (3.46)$$

Özel halde (3.45) ifadesinde $K_w=0$ olarak dikkate alındığında FDM tabaka içeren üç katmanlı silindirik kabuğun kritik burulma yükü için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\begin{aligned}
S_{kr} = & \frac{1}{2hn^2\gamma R^2} \left\{ \left[R(\gamma^2 n^2 + m_1^2) - c_{12}(m_1^4 + n^4 + 6m_1^2 n^2 \gamma^2 + n^4 \gamma^4) \right. \right. \\
& \left. \left. - 2(c_{11} - c_{13})(n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) \right] \right. \\
& \times \frac{b_{14}(m_1^4 + n^4 + 6m_1^2 n^2 \gamma^2 + \gamma^4 n^4) + 2(b_{13} - b_{32})(n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) + (\gamma^2 n^2 + m_1^2)R}{b_{11}(m_1^4 + n^4 + 6m_1^2 n^2 \gamma^2 + \gamma^4 n^4) + 2(b_{12} + b_{31})(n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2)} R \\
& \left. + c_{13}(6m_1^2 n^2 \gamma^2 + m_1^4 + n^4 + \gamma^4 n^4) + 2(c_{14} + c_{32})(n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) \right\} \quad (3.47)
\end{aligned}$$

(3.45) ifadesinde $V_s=1$ olduğunda ve üst tabaka seramik olarak dikkate alındığında pür seramik, $V_s =0$ olduğunda ve alt tabaka metal olarak dikkate alındığında pür metalden oluşan ve Winkler zemini üzerinde bulunan tek tabakalı homojen silindirik kabuğun kritik burulma yükü için aşağıdaki ifade özel olarak elde edilir:

$$S_{krw}^{Hom} = \frac{1}{12n^2\gamma} \frac{E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{R} \right)^2 \left\{ \left[\frac{6(1-\nu^2)R}{Eh^3} (\gamma^2 n^2 + m_1^2) + (n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) \right] + 2(6m_1^2 n^2 \gamma^2 + m_1^4 + n^4 + \gamma^4 n^4) + (n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) + K_w R^4 \right\} \quad (3.48)$$

(3.45) ifadesinde, sırasıyla $K_w=0$, $V_s =0$ olduğunda pür metal ve $K_w=0$, $V_s =1$ olduğunda ise pür seramikten oluşan ve Winkler zemini üzerinde bulunmayan tek tabakalı homojen silindirik kabuğun kritik burulma yükü için aşağıdaki ifade özel olarak elde edilir:

$$S_{kr}^{Hom} = \frac{1}{12n^2\gamma} \frac{E}{(1-\nu^2)} \left(\frac{h}{R} \right)^2 \left\{ \left[\frac{6(1-\nu^2)R}{Eh^3} (\gamma^2 n^2 + m_1^2) + (n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) \right] + 2(6m_1^2 n^2 \gamma^2 + m_1^4 + n^4 + \gamma^4 n^4) + (n^4 \gamma^2 + m_1^2 n^2) \right\} \quad (3.49)$$

Kritik burulma burkulma yükünün minimum değerlerini bulmak için (3.45)-(3.49) ifadeleri (n, γ) parametrelerine göre minimize edilir. Sayısal hesaplarda Maple 14 bilgisayar programı kullanılmaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Karşılaştırmalar

Bu kısımda, zemin etkisi dikkate alınmadığında pür metal ve pür FDM ‘den oluşan tek tabakalı silindirik kabukların kritik burulma yükü için tez çalışmasında elde edilen değerler literatürde bulunan uygun değerlerle karşılaştırılarak tez çalışmasının doğruluğu teyit edilmiştir.

Çizelge 4.1’de değişik uzunluğa sahip pür metalden oluşan silindirik kabuğun kritik burkulma yükü S_{kr}^{Hom} (MPa) için tez çalışmasında elde edilen değerler, Mao and Lu (2002), çalışmasında elde edilen değerlerle karşılaştırılmaktadır. Mao and Lu (2002), çalışmasında sınır koşulu bizim çalışmamızda olduğu gibidir. Kabuk ölçüleri ve malzeme özellikleri Mao and Lu (2002), çalışmasından alınmıştır. Tüm durumlar için kritik burulma yükü değerleri arasında uyum olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.1. Değişik uzunluklu kabukların kritik burulma yükü S_{kr}^{Hom} (MPa) değerlerinin karşılaştırılması ($E=14 \times 10^9$ N/m², $\nu=0.3$, $h=0.001$ m)

R/h	L/R	Mao and Lu (2002)	Tez çalışması
100.5	4.02	16.93(6)	14.89 (6,0.25)
100.5	10.05	10.4(4)	9.34(4,0.16)
20.5	4.098	117.6(4)	117.63(4,0.38)

Çizelge 4.2’de homojen izotrop malzemedan oluşan tek tabakalı silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{kr}^{Hom} (psi) için tez çalışmasında elde edilen değerler, Nash (1959), çalışmasındaki deney sonuçları ve Shen (2009), çalışmasındaki elde edilen uygun teorik değerler ile karşılaştırılmıştır. Kabuk karakteristikleri ve malzeme özellikleri Çizelge 4.2 içerisinde sunulmuştur. Kabuk ölçüleri ve malzeme özellikleri Shen (2009), çalışmasından alınmıştır. Çizelge 4.2’den görüldüğü gibi tez

çalışmasında kritik burulma yükü için elde edilen değerin Nash (1959), deney çalışmasında elde edilen değerden %4 küçük, Shen (2009), çalışmasındaki değerin ise deney değerinden %3.7 büyük olduğu görülmektedir. Aradaki farkın, Shen (2009), çalışmasında kritik burulma yükünün γ 'nın (dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı) hangi değerinde elde edildiğini göstermemesinden kaynaklanmaktadır. Tez çalışmasında kritik burulma yükünün minimum değerini bulmak için (n, γ) parametrelerine göre minimize yapılmıştır. Tez çalışmasında $m=1$ olarak dikkate alınmıştır.

Çizelge 4.2. Burulmaya ($\nu=0.3$) maruz homojen izotropik silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{kr}^{Hom} (psi) değerlerinin karşılaştırılması

Kaynaklar	E (psi)	L (in)	R (in)	h (in)	Deney	Teorik (m,n, γ)
Nash (1959)	28×10^6	38	4	0.0172	6590	-
Shen (2009)					-	6835(1,2)
Tez Çalışması					-	6321(1,4,0.1)

Çizelge 4.3'te fonksiyonel değişimli malzemeden oluşan tek tabakalı silindirik kabuğun kritik burkulma yükü için tez çalışmasında elde edilen değerler, Huang and Han (2010), çalışmasındaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Fonksiyonel değişimli malzeme olarak seramik-metal karışımı, yani ZrO_2 ve Ti6Al4V malzemelerinin karışımı olan fonksiyonel değişimli malzeme kullanılmıştır (Bkz. Çizelge 3.1). Kabuk ölçüleri ve malzeme özellikleri Huang and Han (2010), çalışmasından alınmıştır. Tüm durumlar için kritik burulma yükü değerleri arasında iyi uyum olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.3. Huang and Han (2010), çalışmasından elde edilen burkulma yükü

S_{kr}^{FDM} (MPa) sonuçları ile tez çalışması sonuçlarının karşılaştırılması

	Huang and Han (2010)		
R/h	L/R=1(n, γ)	L/R=1.5(n, γ)	L/R=2(n, γ)
200	119.27 (12,0.42)*	95.43 (11,0.40)	81.70 (10,0.37)
300	70.84 (14,0.41)	56.52 (12,0.35)	48.61 (11,0.33)
400	48.90 (15,0.39)	39.25 (13,0.33)	33.82 (12,0.31)
500	36.78 (16,0.36)	29.61 (14,0.32)	25.58 (13,0.30)
	Tez çalışması		
200	124.38 (11,0.35)	98.13 (10,0.3)	83.67 (8,0.24)
300	73.33 (13,0.33)	58.12 (11,0.27)	49.86 (9,0.22)
400	50.51 (14,0.3)	40.29 (12,0.25)	34.44 (10,0.21)
500	37.92 (15,0.29)	30.33 (12,0.22)	25.93 (11,0.2)

* Parantez içerisindeki sayılar, burkulma durumunda (n, γ) belirtir

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Sayısal hesaplarda Maple 14 bilgisayar programı kullanılmaktadır.

Sayısal analizlerde, Ni/FDMA/Si₃N₄ ve Ti6Al4V/FDDB/ZrO₂ iki değişik yapıya sahip üç katmandan oluşan kompozit silindirik kabuklar kullanılmaktadır. Orta tabakada fonksiyonel değişimli malzeme olarak metal-seramik karışımı olan iki FDM malzeme, yani Ni-Si₃N₄'ten oluşan FDMA ve Ti6Al4V-ZrO₂'den oluşan FDDB malzemeleri kullanılmıştır. Alt tabakada pür seramik, yani Silikon-Nitrit (Si₃N₄) veya Zirkonyum-oksit (ZrO₂) kullanılmaktadır. Üst tabakada pür metal, yani Nikel (Ni) veya Titanyum-Aloy (Ti6Al4V) malzemeler kullanılmaktadır. Pür metal (Ni veya Ti6Al4V), pür seramik (Si₃N₄ veya ZrO₂) FDMA ve FDDB'lerin özellikleri Çizelge 3.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 5.1A'da Winkler elastik zemini üzerinde bulunan ve bulunmayan, Ni/FDMA/Si₃N₄ katmanlarından oluşan kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{krw} (MPa) ve S_{kr} (MPa) değerlerinin $50 \leq R/h \leq 200$ aralığında R/h oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Zemin etkisi dikkate alınmadığı durumlarda, üç katmanlı silindirik kabuklarda R/h oranının artmasına bağlı olarak kritik burulma yükü değerleri azalır, çevresel dalga sayısı ise artmaktadır. Dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} , 0.24 ile 0.38 arasında değişmekte olup genelde R/h arttığında azalmaktadır. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Si₃N₄ seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler R/h=50 için, sırasıyla (-%17.79), (-%18.91), (-%17.83), (-%16.68), (-%18.14) ve R/h=200 için, sırasıyla (-%17.81), (-%19.20), (-%17.83), (-%16.54), (-%18.35) olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Ni metal kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler R/h=50 için, sırasıyla (+%24.21), (+%22.51), (+%24.14), (+%25.87), (+%23.68) ve R/h=200 için, sırasıyla (+%24.74), (+%22.63), (+%24.71), (+%26.66), (+%23.92) olup R/h oranına bağlı olmadığı görülmüştür.

Zemin etkisi dikkate alındığı durumlarda, R/h oranı arttığında zeminsiz duruma benzer olarak üç katmanlı silindirik kabuğun kritik burulma yükü değeri azalır, çevresel dalga sayısı ise artmaktadır. Dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} ise 0.31 ile 0.56 arasında değişmekte olup genelde R/h arttığında azalmaktadır. Winkler zemin etkisi dikkate alındığı durumda, R/h oranı arttığında kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmaktadır. Örneğin; elastik zemin üzerindeki doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Si_3N_4 seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler R/h=50 için, sırasıyla (-%17.65), (-%18.78), (-%17.69), (-%16.55), (-%18.02) ve R/h=200 için, sırasıyla (-%14.47), (-%15.43), (-%14.51), (-%13.53), (-%14.77) olduğu tespit edilmiştir. Elastik zemin üzerindeki doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür metal Ni kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, R/h=50 için, sırasıyla (+%23.96), (+%22.27), (+%23.90), (+%25.62), (+%23.42) ve R/h=200 için, sırasıyla (+%19.01), (+%17.69), (+%18.96), (+%20.32), (+%18.59) olduğu tespit edilmiştir.

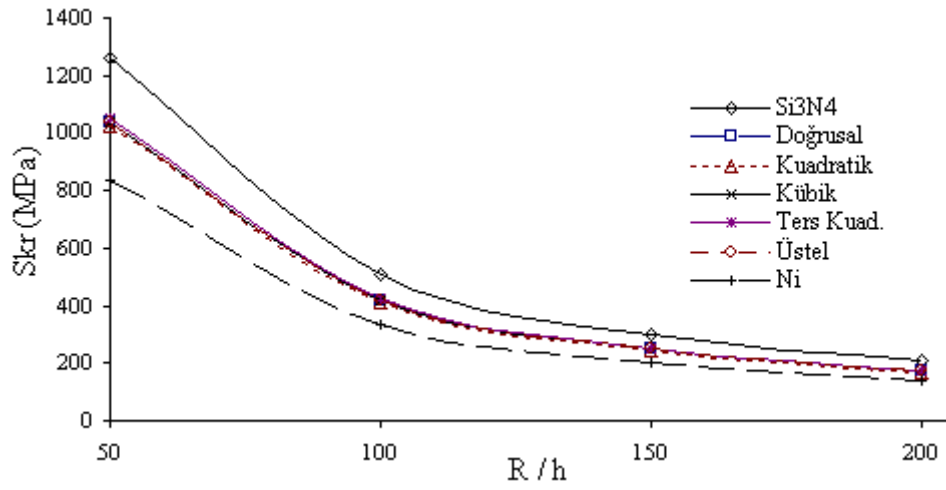
Yapılan analizler, elastik zemin üzerindeki silindirik kabukların kritik burulma yükü değerlerine kompozisyonel profillerin kendi aralarındaki etkilerinin azaldığı görülmektedir.

Winkler zemini üzerinde bulunan seramik, doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik, üstel ve metal profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, zeminsiz kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, R/h=50 için, sırasıyla (+%0.73), (+%0.90), (+%0.89), (+%0.90), (+%0.89), (+%0.88), (+%1.09) ve R/h=200 için, sırasıyla (+%34.76), (+%40.23), (+%41.05), (+%40.20), (+%39.62), (+%40.66), (+%46.98) olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla R/h oranı arttığında kritik burulma yüküne Winkler zemin etkisi artmaktadır.

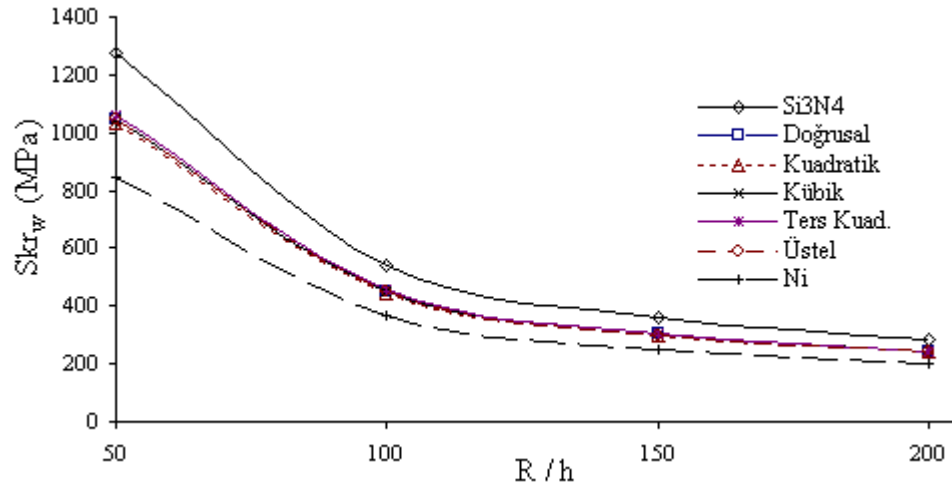
Çizelge 5.1A. Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))

Ni/FDMA/Si ₃ N ₄				
	Si ₃ N ₄	Doğrusal	Kuad.	Kübik
R/h	S _{kr} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
50	1264.03(0.37,6)	1039.22(0.37,6)	1025.02(0.38,6)	1038.69(0.37,6)
100	508.83(0.3,7)	418.38(0.3,7)	412.05(0.3,7)	418.22(0.3,7)
150	302.70(0.28,8)	248.89(0.28,8)	245.12(0.28,8)	248.80(0.28,8)
200	210.95(0.24,8)	173.38(0.24,8)	170.45(0.24,8)	173.34(0.24,8)
R/h	Ters Kuad.	Üstel	Ni	
50	1053.18(0.37,6)	1034.78(0.38,6)	836.69(0.38,6)	
100	424.64(0.3,7)	416.13(0.3,7)	336.13(0.3,7)	
150	252.57(0.27,8)	247.55(0.28,8)	199.95(0.28,8)	
200	176.05(0.26,9)	172.24(0.24,8)	138.99(0.24,8)	
	Si ₃ N ₄	Doğrusal	Kuad.	Kübik
R/h	S _{krw} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
50	1273.32(0.38,6)	1048.53(0.38,6)	1034.16(0.38,6)	1048.02(0.38,6)
100	542.13(0.31,7)	451.55(0.32,7)	444.87(0.32,7)	451.42(0.32,7)
150	359.00(0.33,9)	302.48(0.34,9)	298.74(0.34,9)	302.37(0.34,9)
200	284.27(0.34,10)	243.13(0.37,11)	240.42(0.37,11)	243.02(0.37,11)
R/h	Ters Kuad.	Üstel	Ni	
50	1062.56(0.37,6)	1043.92(0.38,6)	845.83(0.38,6)	
100	458.02(0.31,7)	449.07(0.32,7)	368.69(0.32,7)	
150	306.19(0.34,9)	301.23(0.34,9)	251.17(0.35,9)	
200	245.80(0.37,11)	242.27(0.37,11)	204.29(0.38,11)	

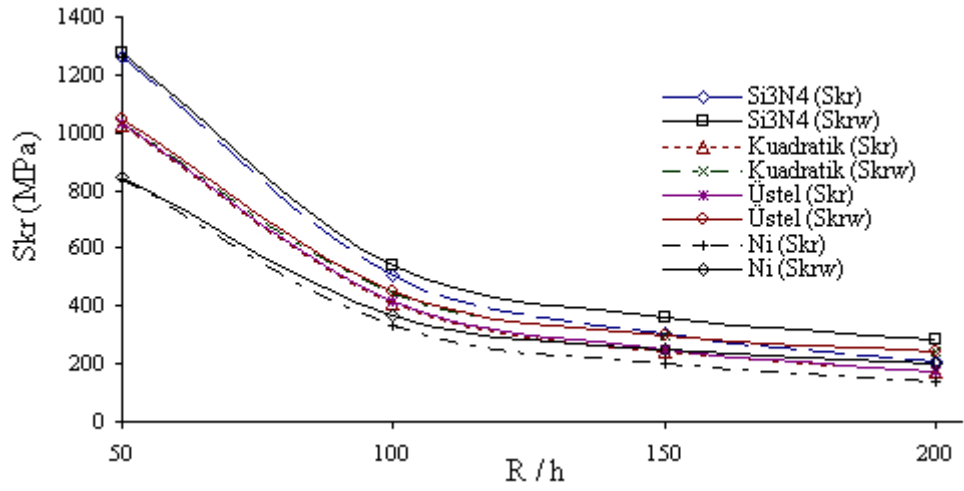
Çizelge 5.1A'daki veriler kullanılarak Şekil 5.1A.1-5.1A.4'te elastik zemin üzerinde bulunan ve bulunmayan Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Şekil 5.1A.1-5.1A.4'ten görüldüğü gibi R/h oranının, elastik zemin etkisi ve kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi önemli olup dikkate alınması gerekmektedir.



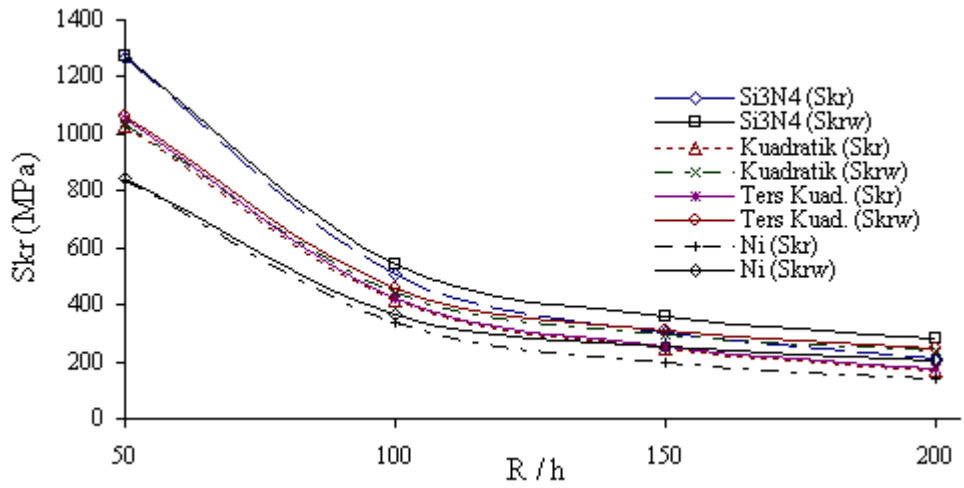
Şekil 5.1A.1. Zemin etkisi olmadığında Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.1A.2. Zemin etkisi altında Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.1A.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.1A.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))

Çizelge 5.2A'da Winkler zemini üzerinde bulunan ve bulunmayan, Ni/FDMA/Si₃N₄ katmanlarından oluşan kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{krw} (MPa) ve S_{kr} (MPa) değerlerinin $h/2a$ oranına, yani kabuk kalınlığının FDM kalınlığına oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, üç katmanlı silindirik kabuklarda $h/2a$ oranı arttığında kritik burulma

yükü değerleri artar, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} ise yaklaşık olarak sabit kalır.

Winkler zemin etkisi dikkate alınmadığı durumda, $h/2a$ oranı arttığında kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmaktadır. Örneğin; doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Si_3N_4 seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (-%22.61), (-%26.68), (-%22.64), (-%18.57), (-%25.32) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (-%16.63), (-%17.03), (-%16.64), (-%16.23), (-%16.76) olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Ni metal kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (+%17.15), (+%10.99), (+%17.10), (+%23.27), (+%13.04) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (+%26.20), (+%25.59), (+%26.20), (+%26.81), (+%26.01) olduğu tespit edilmiştir.

Winkler zemin etkisi dikkate alındığı durumda da, $h/2a$ oranı arttığında kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmakta, fakat etki yüzdesi farkı olmaktadır. Örneğin; Winkler zemini üzerinde bulunan doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Si_3N_4 seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (-%19.06), (-%22.47), (-%19.11), (-%15.70), (-%21.32) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (-%14.03), (-%14.35), (-%14.04), (-%13.71), (-%14.13) olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Ni metal kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (+%13.40), (+%8.62), (+%13.34), (+%18.11), (+%10.23) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (+%20.45), (+%20.00), (+%20.44), (+%20.89), (+%20.31) olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan analizler, elastik zemin üzerindeki kabukların kritik burulma yükü değerlerine kompozisyonel profillerin kendi aralarındaki etkilerinin azaldığı görülmektedir.

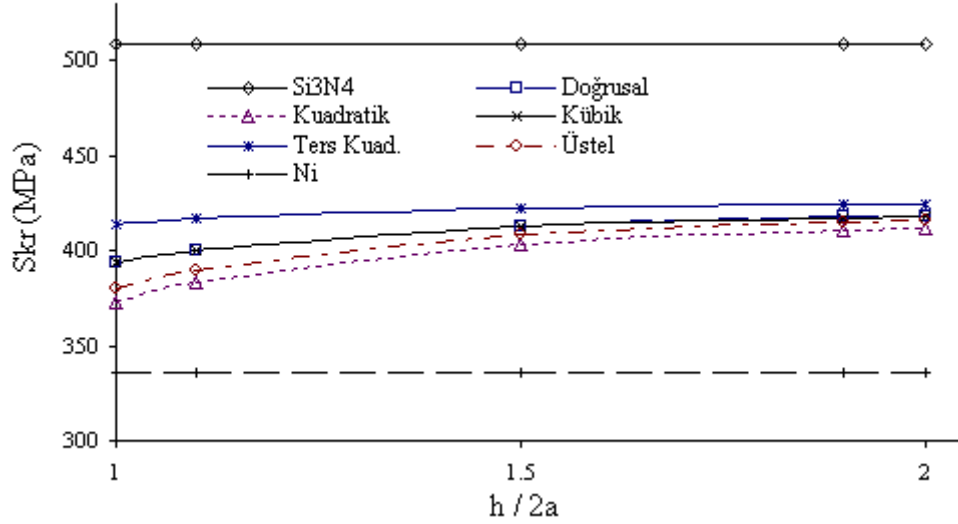
$h/2a$ oranı arttığında kritik burulma yüküne Winkler zemin etkisi artmaktadır. Örneğin; Winkler zemini üzerinde bulunan seramik, doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik, üstel ve metal profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, zeminsiz kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (+%25.84), (+%31.61), (+%33.07), (+%31.59), (+%30.27), (+%32.59), (+%35.97) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (+%25.84), (+%29.76), (+%29.91), (+%29.76), (+%29.62), (+%29.81), (+%35.97) olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 5.2A. Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R=2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))

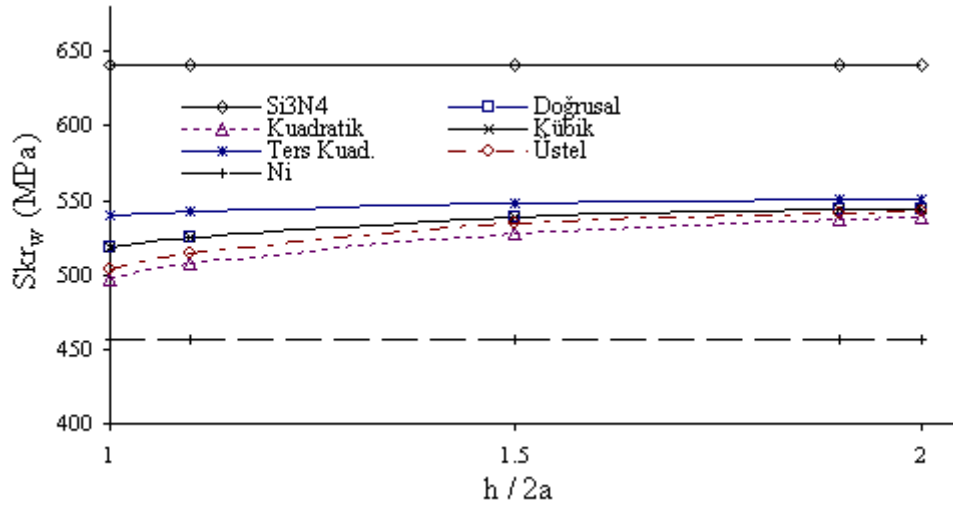
Ni/FDMA/Si ₃ N ₄				
	Si ₃ N ₄	Doğrusal	Kuad.	Kübik
$h/2a$	S_{kr} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
1	508.83(0.3,7)	393.78(0.3,7)	373.07(0.3,7)	393.61(0.3,7)
1.1		400.28(0.3,7)	383.14(0.3,7)	400.05(0.3,7)
1.5		412.87(0.3,7)	403.03(0.3,7)	412.64(0.3,7)
1.9		417.64(0.3,7)	410.83(0.3,7)	417.48(0.3,7)
2		418.38(0.3,7)	412.05(0.3,7)	418.22(0.3,7)
5		424.21(0.3,7)	422.16(0.3,7)	424.18(0.3,7)
$h/2a$	Ters Kuad.	Üstel	Ni	
1	414.36(0.3,7)	379.97(0.3,7)	336.13(0.3,7)	
1.1	417.30(0.3,7)	390.10(0.3,7)		
1.5	422.63(0.3,7)	408.64(0.3,7)		
1.9	424.39(0.3,7)	415.16(0.3,7)		
2	424.64(0.3,7)	416.13(0.3,7)		
5	426.25(0.3,7)	423.55(0.3,7)		
	Si ₃ N ₄	Doğrusal	Kuad.	Kübik
$h/2a$	S_{krw} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
1	640.31(0.38,8)	518.25(0.39,8)	496.43(0.4,8)	517.97(0.39,8)
1.1		525.23(0.39,8)	507.24(0.4,8)	524.91(0.39,8)
1.5		538.67(0.39,8)	528.54(0.4,8)	538.39(0.39,8)
1.9		543.70(0.39,8)	536.76(0.39,8)	543.50(0.39,8)
2		544.47(0.39,8)	538.03(0.39,8)	544.28(0.39,8)
5		550.47(0.39,8)	548.41(0.39,8)	550.43(0.39,8)
$h/2a$	Ters Kuad.	Üstel	Ni	
1	539.80(0.39,8)	503.79(0.4,8)	457.02(0.4,8)	
1.1	542.99(0.39,8)	514.67(0.4,8)		
1.5	548.70(0.39,8)	534.44(0.39,8)		
1.9	550.58(0.39,8)	541.28(0.39,8)		
2	550.85(0.39,8)	542.28(0.39,8)		
5	552.50(0.39,8)	549.82(0.39,8)		

Çizelge 5.2A'daki veriler kullanılarak Şekil 5.2A.1-5.2A.4'te elastik zemin üzerinde bulunan ve bulunmayan Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Şekil 5.2A.1-5.2A.4'ten görüldüğü gibi FDMA'dan oluşan kabuk kalınlığı değişiminin, elastik zemin etkisi

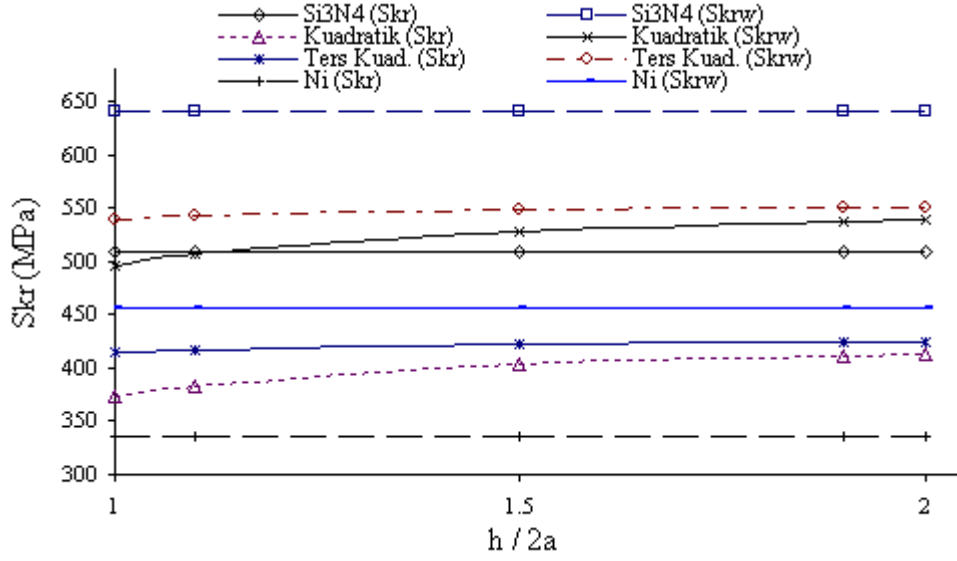
ve kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi önemli olup dikkate alınması gerekmektedir.



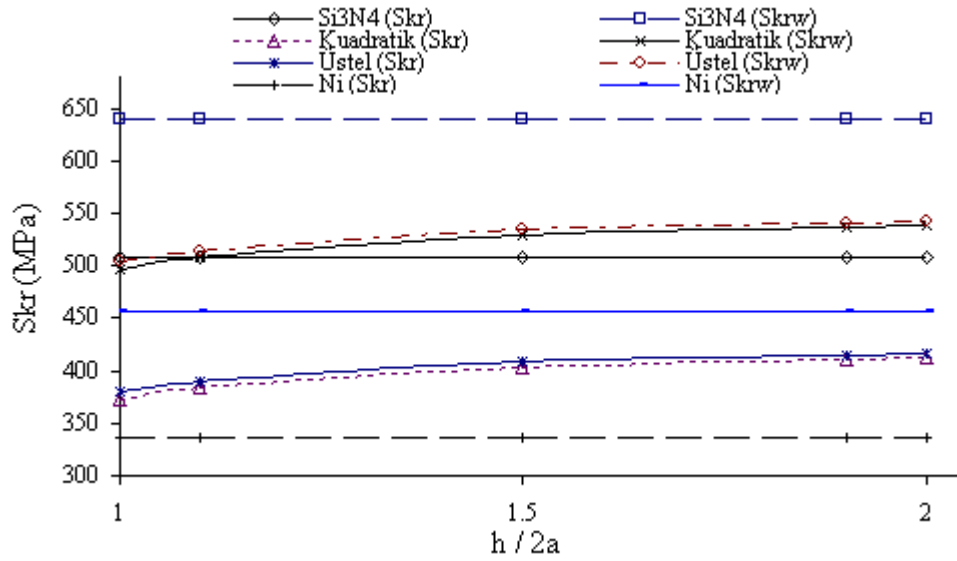
Şekil 5.2A.1. Zemin etkisi olmadığında Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.2A.2. Zemin etkisi altında Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.2A.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.2A.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))

Çizelge 5.3A'da Winkler zemini üzerinde bulunan ve bulunmayan, Ni/FDMA/Si₃N₄ katmanlarından oluşan kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{krw} (MPa) ve S_{kr} (MPa) değerlerinin $0.50 \leq L/R \leq 10$ aralığında L/R oranına bağlı değişimi

sunulmaktadır. Dolayısıyla bu tabloda kısa, yani $0.50 \leq L/R \leq 1.0$ eşitsizliğini sağlayan, orta uzunluklu, yani $1 < L/R \leq 4$ eşitsizliğini sağlayan ve uzun, yani $4 < L/R \leq 10$ eşitsizliğini sağlayan silindirik kabukların burulma burkulması ele alınmıştır. Zemin etkisi dikkate alınmadığı durumlarda, her üç çeşit silindirik kabuklarda L/R oranının artışına bağlı olarak kritik burulma yükü değerleri, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} , azalmaktadır. γ_{kr} , 0.12 ile 0.58 arasında değişmektedir. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Si_3N_4 seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler; $L/R=0.50$ için, sırasıyla (-%17.82), (-%18.83), (-%17.87), (-%16.82), (-% 18.09); $L/R=3$ için, sırasıyla (-%17.78), (-%19.01), (-%17.81), (-%16.56), (-%18.21) ve $L/R=10$ için, sırasıyla (-%17.84), (-%19.32), (-%17.86), (-%16.38), (-%18.44) olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Ni metal kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler; $L/R=0.5$ için, sırasıyla (+%23.89), (+%22.37), (+%23.81), (+%25.41), (+%23.49); $L/R=3$ için, sırasıyla (+%24.44), (+%22.58), (+%24.39), (+%26.29), (+%23.79) ve $L/R=10$ için, sırasıyla (+%24.88), (+%22.64), (+%24.86), (+%27.11), (+%23.98) olmaktadır. Dolayısıyla, L/R oranının değişimi kompozisyonel profillerin etkisini değiştirmemektedir.

Zemin etkisi dikkate alındığı durumlarda, L/R oranı arttığında zeminsiz duruma benzer olarak üç katmanlı silindirik kabuğun kritik burulma yükü değeri burulma yükü değerleri, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} , azalmaktadır. γ_{kr} , 0.23 ile 0.59 arasında değişmektedir. Winkler zemin etkisi dikkate alındığında, L/R oranı arttığında kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmaktadır. Örneğin; elastik zemin üzerindeki doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Si_3N_4 seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler; $L/R=0.50$ için, sırasıyla (-%17.73), (-%18.74), (-%17.78), (-%16.73), (-%18.00); $L/R=3$ için, sırasıyla (-%15.80), (-%16.97), (-%15.82), (-%14.63), (-%16.24) ve $L/R=10$ için, sırasıyla (-%13.65), (-%14.62), (-%13.68), (-%12.70), (-%14.00) olduğu tespit edilmiştir.

Elastik zemin üzerindeki doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür metal Ni kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler; $L/R=0.50$ için, sırasıyla (+%23.71), (+%22.20), (+%23.63), (+%25.21), (+%23.31); $L/R=3$ için, sırasıyla (+%20.79), (+%19.10), (+%20.75), (+%22.46), (+%20.16) ve $L/R=10$ için, sırasıyla (+%16.98), (+%15.67), (+%16.94), (+%18.27), (+%16.51) olduğu tespit edilmiştir.

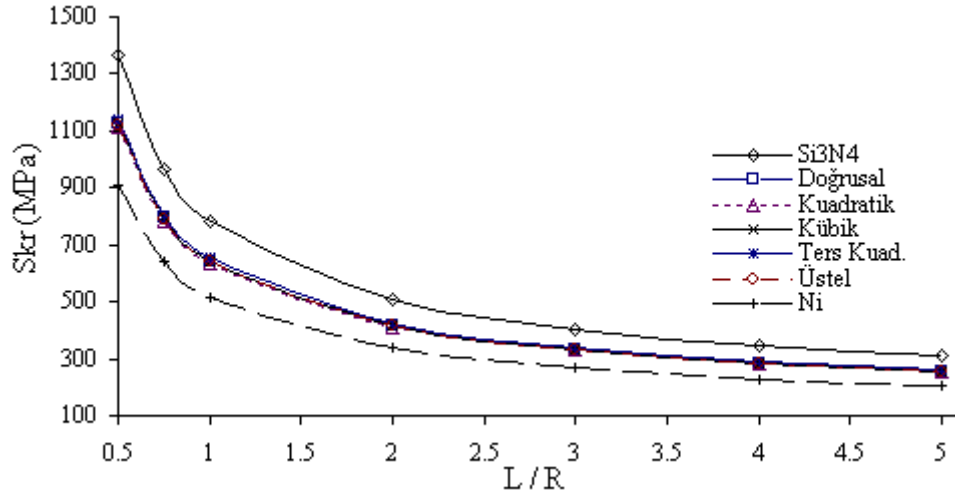
Winkler zemini üzerinde bulunan seramik, doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik, üstel ve metal profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, zeminsiz kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler; $L/R=0.50$ için, sırasıyla (+%0.52), (+%0.63), (+%0.64), (+%0.63), (+%0.62), (+%0.63), (+%0.78); $L/R=3$ için, sırasıyla (+%13.22), (+%15.94), (+%16.06), (+%15.96), (+%15.83), (+%15.95), (+%19.45) ve $L/R=10$ için, sırasıyla (+%64.26), (+%72.63), (+%73.83), (+%72.61), (+%71.48), (+%73.20), (+%84.30) olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, L/R oranı arttığında kritik burulma yüküne Winkler zemin etkisi artmaktadır.

Çizelge 5.3A. Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $R/h = 100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))

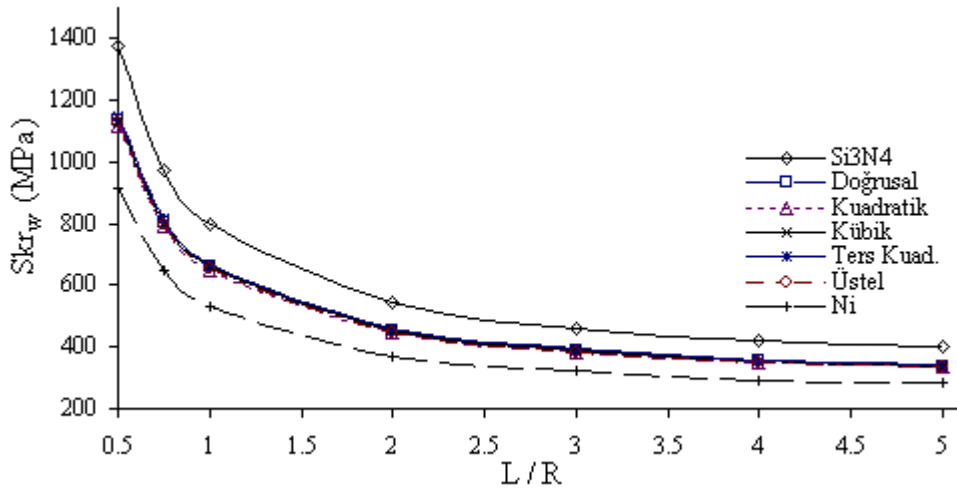
Ni/FDMA/Si ₃ N ₄				
	Si ₃ N ₄	Doğrusal	Kuad.	Kübik
L/R	S _{kr} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
0.5	1369.84(0.58,11)	1125.75(0.58,11)	1111.87(0.58,11)	1125.03(0.58,11)
0.75	965.60(0.49,10)	793.86(0.49,10)	783.10(0.49,10)	793.46(0.49,10)
1	783.44(0.42,9)	644.17(0.42,9)	634.73(0.43,9)	643.90(0.42,9)
2	508.83(0.3,7)	418.38(0.3,7)	412.05(0.3,7)	418.22(0.3,7)
3	405.84(0.25,6)	333.69(0.25,6)	328.70(0.25,6)	333.56(0.25,6)
4	347.16(0.2,5)	285.39(0.21,5)	280.70(0.21,5)	285.31(0.21,5)
5	312.21(0.2,5)	256.71(0.2,5)	252.91(0.21,5)	256.59(0.2,5)
10	220.21(0.12,3)	180.92(0.12,3)	177.67(0.12,3)	180.89(0.12,3)
L/R	Ters Kuad.	Üstel	Ni	
0.5	1139.48(0.58,11)	1122.05(0.58,11)	908.64(0.58,11)	
0.75	804.52(0.49,10)	790.50(0.49,10)	639.33(0.49,10)	
1	653.46(0.42,9)	640.93(0.43,9)	517.86(0.43,9)	
2	424.64(0.3,7)	416.13(0.3,7)	336.13(0.3,7)	
3	338.641(0.25,6)	331.94(0.25,6)	268.15(0.25,6)	
4	289.87(0.2,5)	283.60(0.21,5)	228.90(0.21,5)	
5	260.28(0.2,5)	255.40(0.21,5)	206.34(0.21,5)	
10	184.14(0.12,3)	179.61(0.12,3)	144.87(0.12,3)	
	Si ₃ N ₄	Doğrusal	Kuad.	Kübik
L/R	S _{krw} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
0.5	1376.93(0.59,11)	1132.83(0.59,11)	1118.94(0.59,11)	1132.11(0.59,11)
0.75	975.81(0.49,10)	804.07(0.49,10)	793.23(0.5,10)	803.66(0.49,10)
1	797.84(0.43,9)	658.56(0.43,9)	649.08(0.43,9)	658.30(0.43,9)
2	542.13(0.31,7)	451.55(0.32,7)	444.87(0.32,7)	451.42(0.32,7)
3	459.48(0.27,6)	386.89(0.27,6)	381.49(0.27,6)	386.79(0.27,6)
4	418.29(0.27,6)	353.08(0.27,6)	348.66(0.27,6)	352.95(0.27,6)
5	400.42(0.27,6)	338.37(0.27,6)	334.37(0.27,6)	338.23(0.27,6)
10	361.72(0.23,5)	312.33(0.24,5)	308.85(0.24,5)	312.24(0.24,5)
L/R	Ters Kuad.	Üstel	Ni	
0.5	1146.56(0.59,11)	1129.12(0.59,11)	915.69(0.59,11)	
0.75	814.73(0.49,10)	800.65(0.5,10)	649.40(0.5,10)	
1	667.96(0.43,9)	655.29(0.43,9)	532.14(0.44,9)	
2	458.02(0.31,7)	449.07(0.32,7)	368.69(0.32,7)	
3	392.24(0.27,6)	384.87(0.27,6)	320.31(0.28,6)	
4	357.46(0.27,6)	351.56(0.27,6)	293.72(0.28,6)	
5	342.33(0.27,6)	337.07(0.27,6)	282.11(0.28,6)	
10	315.77(0.24,5)	311.09(0.24,5)	267.00(0.25,5)	

Çizelge 5.3A'daki veriler kullanılarak Şekil 5.3A.1-5.3A.4'te elastik zemin üzerinde bulunan ve bulunmayan Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma

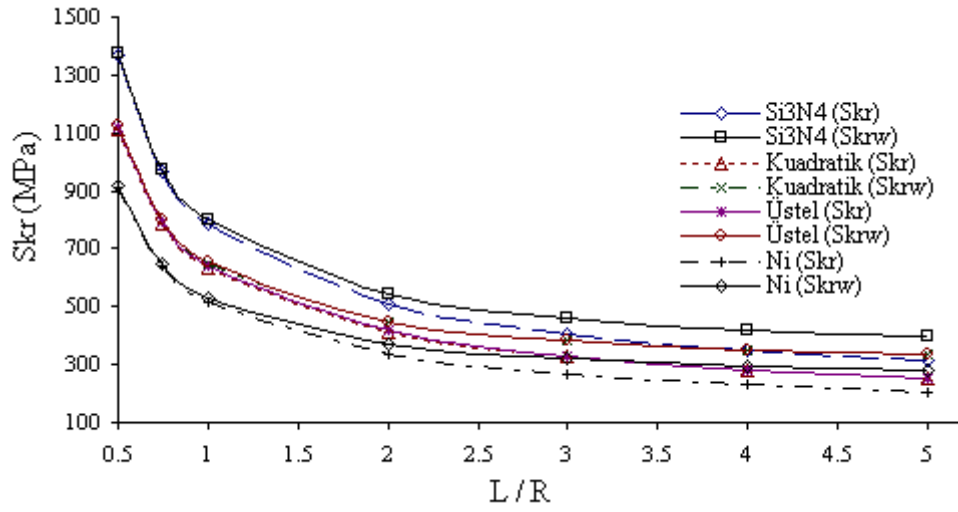
yükünün L/R oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Şekil 5.3A.1–5.3A.4’ten görüldüğü gibi L/R oranının değişiminin, elastik zemin etkisi ve kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi önemli olup dikkate alınması gerekmektedir.



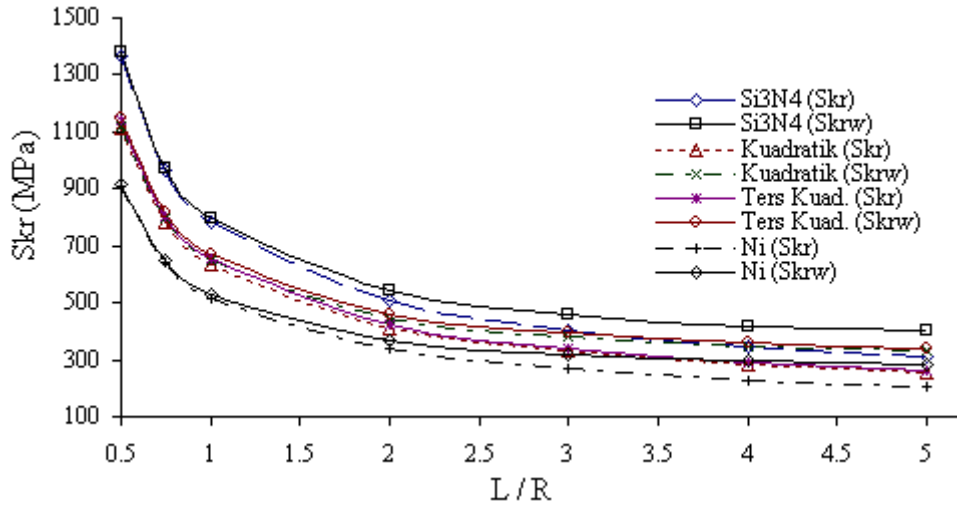
Şekil 5.3A.1. Zemin etkisi olmadığında Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $R/h = 100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.3A.2. Zemin etkisi altında Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $R/h = 100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.3A.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $R/h = 100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.3A.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $R/h = 100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))

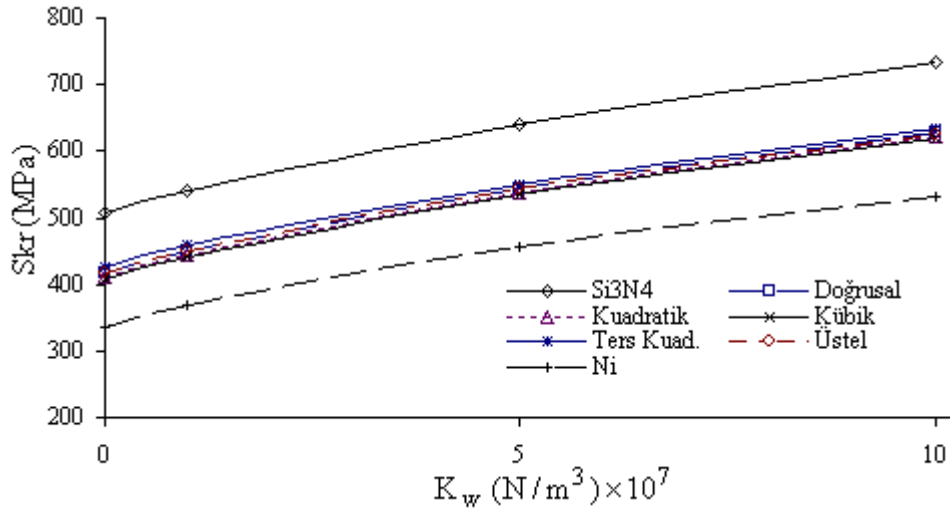
Çizelge 5.4A’da Winkler zemini üzerinde bulunan ve bulunmayan, Ni/FDMA/Si₃N₄ katmanlarından oluşan kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{krw} (MPa) ve S_{kr} (MPa) değerlerinin K_w katsayısına göre dağılımı sunulmaktadır. Zemin

katsayısı $K_w = 0; 1 \times 10^7; 5 \times 10^7; 1 \times 10^8$ (N/m³) kullanılarak kritik burulma yükünün değerleri bulunmuştur. K_w arttığında kritik burulma yükü, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} değerleri artar. Dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} ise 0.3 ile 0.49 arasında değişmektedir. Winkler zemini üzerinde bulunan seramik, doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik, üstel ve metal profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, zeminsiz kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, zemin katsayısı $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³) için, sırasıyla (+%6.54), (+%7.93), (+%7.97), (+%7.98), (+%7.86), (+%7.92), (+%9.69), $K_w = 5 \times 10^7$ (N/m³) için, sırasıyla (+%25.84), (+%30.14), (+%30.57), (+%30.79), (+%29.72), (+%30.32), (+%35.97) ve $K_w = 1 \times 10^8$ (N/m³) için, sırasıyla (+%44.09), (+%49.95), (+%50.68), (+%51.04), (+%49.26), (+%50.29), (+%58.09) olduğu tespit edilmiştir.

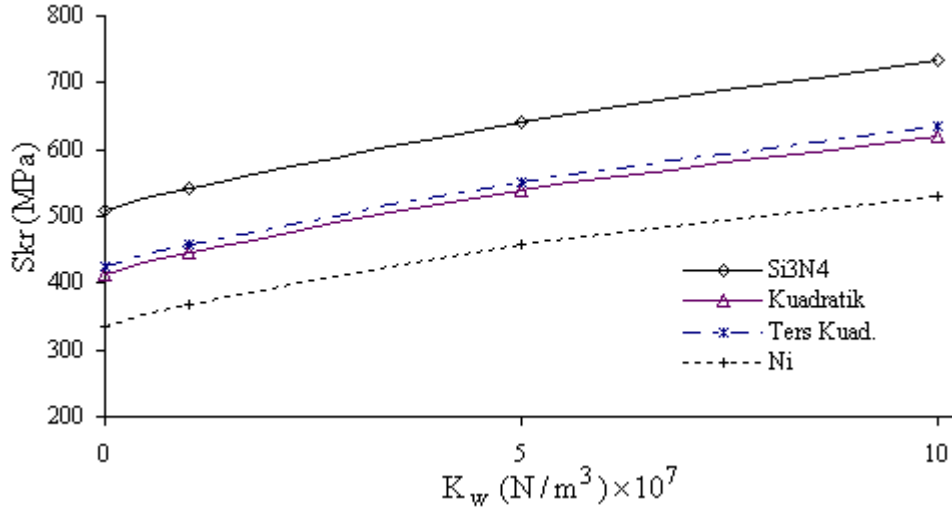
Çizelge 5.4A. Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w katsayısına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $R/h = 100$)

Ni/FDMA/Si ₃ N ₄				
	Si ₃ N ₄	Doğrusal	Kuad.	Kübik
K_w (N/m ³)	S_{kr} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
0	508.83(0.3,7)	418.38(0.3,7)	412.05(0.3,7)	408.98(0.3,7)
1×10^7	542.13(0.31,7)	451.55(0.32,7)	444.87(0.32,7)	441.61(0.32,7)
5×10^7	640.31(0.38,8)	544.47(0.39,8)	538.03(0.39,8)	534.92(0.39,8)
1×10^8	733.15(0.44,9)	627.38(0.45,9)	620.88(0.45,9)	617.73(0.46,9)
K_w (N/m ³)	Ters Kuad.	Üstel	Ni	
0	424.64(0.3,7)	416.13(0.3,7)	336.13(0.3,7)	
1×10^7	458.02(0.31,7)	449.07(0.32,7)	368.69(0.32,7)	
5×10^7	550.85(0.39,8)	542.28(0.39,8)	457.02(0.4,8)	
1×10^8	633.80(0.45,9)	625.41(0.45,9)	531.39(0.47,9)	

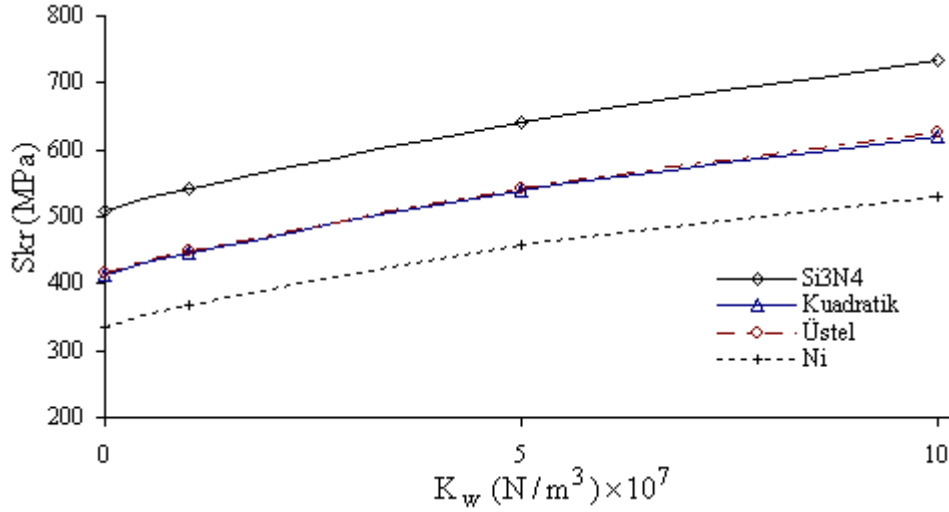
Çizelge 5.4A'daki veriler kullanılarak Şekil 5.4A.1-5.4A.4'te elastik zemin üzerinde bulunan ve bulunmayan Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w katsayısına göre dağılımı sunulmaktadır. Şekil 5.4A.1-5.4A.4'ten elastik zemin etkisinin kritik burulma yüküne etkisinin önemli olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.4A.1. Zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w değişimine bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $L/R=2$, $R/h=100$)



Şekil 5.4A.2. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w değişimine bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $L/R=2$, $R/h=100$)



Şekil 5.4A.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ni/FDMA/Si₃N₄ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w değişimine bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $L/R=2$, $R/h=100$)

Çizelge 5.1B’de Winkler elastik zemini üzerinde bulunan ve bulunmayan, Ti6Al4V/FDMD/ZrO₂ katmanlarından oluşan kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{krw} (MPa) ve S_{kr} (MPa) değerlerinin $50 \leq R/h \leq 200$ aralığında R/h oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Zemin etkisi dikkate alınmadığı durumlarda, üç katmanlı silindirik kabuklarda R/h oranının artışına bağlı olarak kritik burulma yükü değerleri azalır, çevresel dalga sayısı ise artmaktadır. Dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} , 0.24 ile 0.38 arasında değişmekte olup genelde R/h arttığında azalmaktadır. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür ZrO₂ seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $R/h=50$ için, sırasıyla (-%32.80), (-%33.78), (-% 32.95), (-% 31.83), (-% 32.50) ve $R/h=200$ için, sırasıyla (-%33.04), (-%34.19), (-% 33.16), (-% 31.89), (-% 32.89) olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür Ti6Al4V metal kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $R/h=50$ için, sırasıyla (+%33.92), (+%31.97), (+%33.63), (+%35.85), (+%34.53) ve $R/h=200$ için, sırasıyla (+%33.47), (+%31.18), (+%33.22), (+%35.75), (+%33.76) olup R/h oranına bağlı olmadığı görülmüştür.

Zemin etkisi dikkate alındığı durumlarda, R/h oranı arttığında zeminsiz duruma benzer olarak üç katmanlı silindirik kabuğun kritik burulma yükü değeri azalır, çevresel dalga sayısı ise artmaktadır. Dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} ise 0.32 ile 0.43 arasında değişmekte olup genelde R/h arttığında azalmaktadır. Winkler zemin etkisi dikkate alındığı durumda, R/h oranı arttığında kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmaktadır. Örneğin; elastik zemin üzerindeki doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür ZrO_2 seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler R/h=50 için, sırasıyla (-%32.47), (-%33.44), (-% 32.62), (-% 31.51), (-% 32.17) ve R/h=200 için, sırasıyla (-%26.42), (-%27.26), (-% 26.54), (-% 25.59), (-% 26.21) olduğu tespit edilmiştir. Elastik zemin üzerindeki doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür metal Ti6Al4V kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, R/h=50 için, sırasıyla (+%33.25), (+%31.34), (+%32.97), (+%35.15), (+%33.84) ve R/h=200 için, sırasıyla (+%24.83), (+%23.41), (+%24.64), (+%26.25), (+%25.18) olduğu tespit edilmiştir.

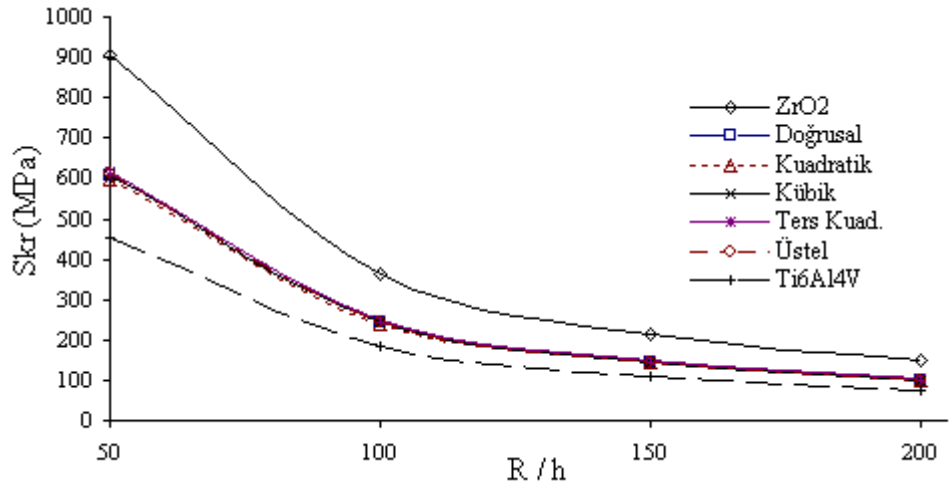
Yapılan analizler, elastik zemin üzerindeki kabukların kritik burulma yükü değerlerine kompozisyonel profillerin kendi aralarındaki etkilerinin azaldığı görülmektedir.

Winkler zemini üzerinde bulunan seramik, doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik, üstel ve metal profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, zeminsiz kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, R/h=50 için, sırasıyla (+%1.01), (+%1.51), (+%1.52), (+%1.51), (+%1.48), (+% 1.50), (+%2.02) ve R/h=200 için, sırasıyla (+%44.45), (+%58.73), (+%59.66), (+%58.78), (+%57.83), (+%58.83), (+%69.71) olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla R/h oranı arttığında kritik burulma yüküne Winkler zemin etkisi artmaktadır.

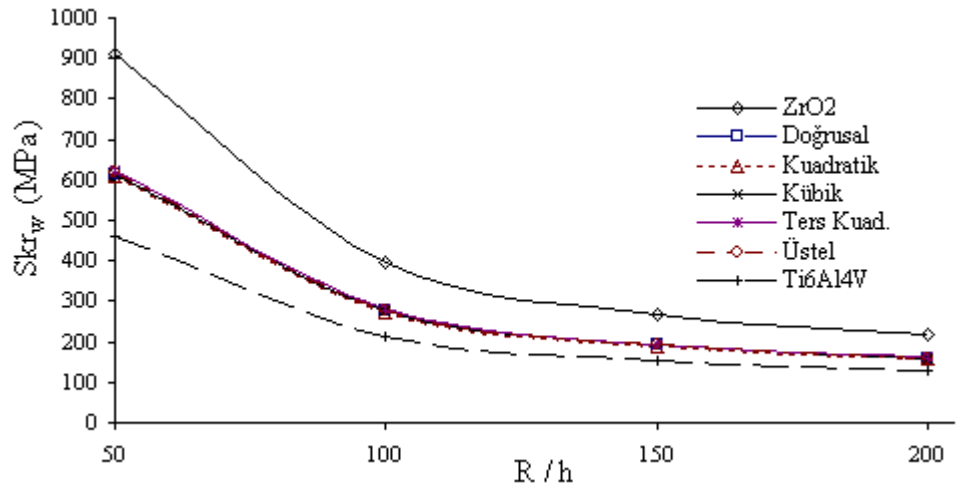
Çizelge 5.1B. Ti6Al4V/FDMB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))

Ti6Al4V/FDMB/ZrO ₂				
	ZrO ₂	Doğrusal	Kuad.	Kübik
R/h	S _{kr} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
50	903.44(0.38,6)	607.11(0.38,6)	598.28(0.38,6)	605.79(0.38,6)
100	363.18(0.3,7)	243.67(0.31,7)	239.77(0.31,7)	243.18(0.31,7)
150	216.05(0.28,8)	144.97(0.28,8)	142.69(0.28,8)	144.67(0.28,8)
200	150.31(0.24,8)	100.65(0.24,8)	98.92(0.24,8)	100.46(0.24,8)
R/h	Ters Kuad.	Üstel	Ti6Al4V	
50	615.87(0.38,6)	609.85(0.38,6)	453.33(0.38,6)	
100	247.49(0.3,7)	244.46(0.31,7)	182.24(0.3,7)	
150	147.23(0.28,8)	145.48(0.28,8)	108.41(0.28,8)	
200	102.37(0.24,8)	100.87(0.24,8)	75.41(0.24,8)	
	ZrO ₂	Doğrusal	Kuad.	Kübik
R/h	S _{krw} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
50	912.57(0.38,6)	616.25(0.38,6)	607.39(0.39,6)	614.93(0.38,6)
100	395.94(0.32,7)	275.75(0.33,7)	271.65(0.33,7)	275.28(0.33,7)
150	268.14(0.35,9)	192.87(0.36,9)	190.45(0.36,9)	192.55(0.36,9)
200	217.13(0.38,11)	159.76(0.4,11)	157.94(0.4,11)	159.51(0.4,11)
R/h	Ters Kuad.	Üstel	Ti6Al4V	
50	625.01(0.38,6)	618.98(0.39,6)	462.47(0.38,6)	
100	279.82(0.33,7)	276.39(0.33,7)	213.06(0.37,8)	
150	195.27(0.36,9)	193.41(0.36,9)	152.77(0.4,10)	
200	161.57(0.4,11)	160.21(0.4,11)	127.98(0.43,12)	

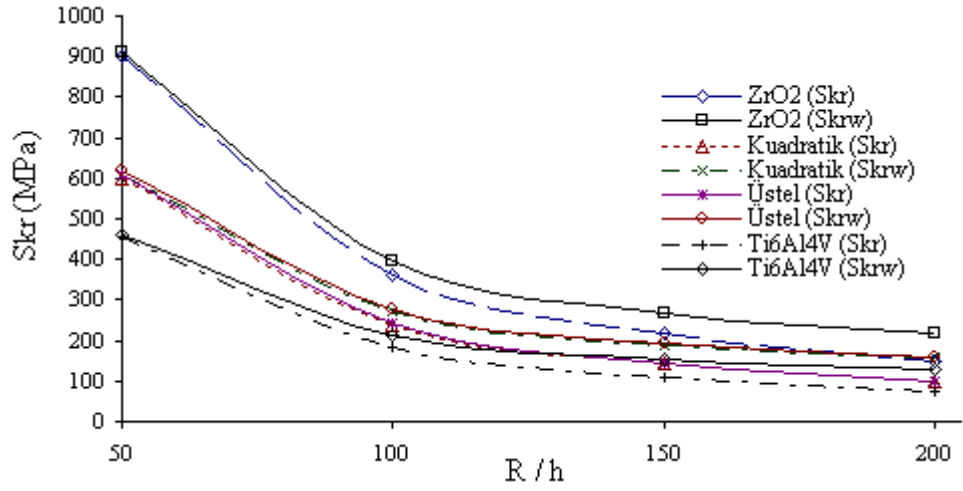
Çizelge 5.1B'deki veriler kullanılarak Şekil 5.1B.1-5.1B.4'te elastik zemin üzerinde bulunan ve bulunmayan Ti6Al4V/FDMB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Şekil 5.1B.1-5.1B.4'ten görüldüğü gibi R/h oranının, elastik zemin etkisi ve kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi önemli olup dikkate alınması gerekmektedir.



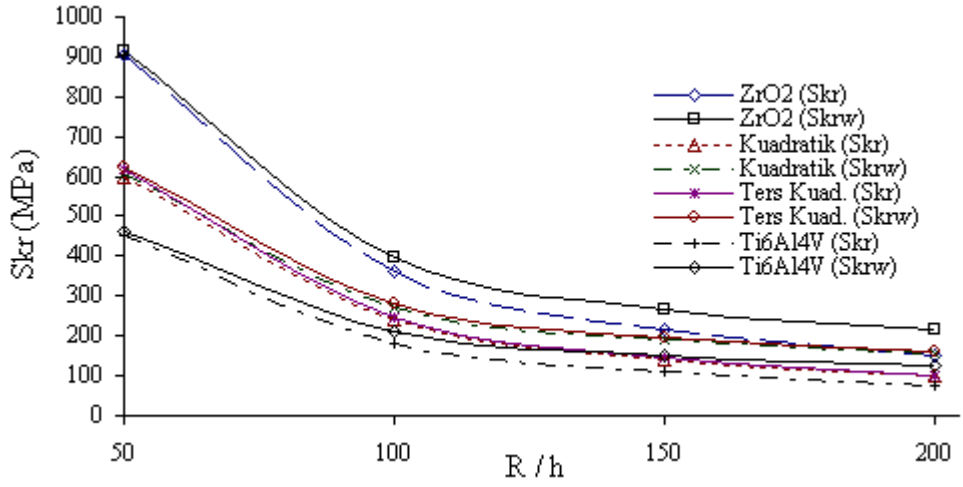
Şekil 5.1B.1. Zemin etkisi olmadığında Ti6Al4V/FDDB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.1B.2. Zemin etkisi altında Ti6Al4V/FDDB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.1B.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.1B.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))

Çizelge 5.2B’de Winkler zemini üzerinde bulunan ve bulunmayan, Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 katmanlarından oluşan kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{krw} (MPa) ve S_{kr} (MPa) değerlerinin $h/2a$ oranına, yani kabuk kalınlığının FDM kalınlığına oranına bağlı değişimi sunulmaktadır. Zemin etkisi

dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, üç katmanlı silindirik kabuklarda $h/2a$ oranı arttığında kritik burulma yükü değerleri artar, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} ise yaklaşık olarak sabit kalır.

Winkler zemin etkisi dikkate alınmadığı durumda, $h/2a$ oranı arttığında kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmaktadır. Örneğin; doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür ZrO_2 seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (-%44.37), (-%47.57), (-%44.65), (-%41.18), (-%45.21) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (-%30.35), (-%30.70), (-%30.37), (-%29.99), (-%30.36) olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür $Ti6Al4V$ metal kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (+%10.86), (+%4.49), (+%10.30), (+%17.22), (+%9.19) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (+%38.81), (+%38.10), (+%38.76), (+%39.51), (+%38.79) olduğu tespit edilmiştir.

Winkler zemin etkisi dikkate alındığı durumda da, $h/2a$ oranı arttığında kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmakta, fakat etki yüzdesi farklı olmaktadır. Örneğin; Winkler zemini üzerinde bulunan doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür ZrO_2 seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (-%37.10), (-%39.85), (-%37.38), (-%34.40), (-%37.80) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (-%24.94), (-%25.21), (-%24.97), (-%24.69), (-%24.92) olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür $Ti6Al4V$ metal kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (+%8.23), (+%3.51), (+%7.76), (+%12.88), (+%7.04) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (+%29.15), (+%28.7), (+%29.11), (+%29.60), (+%29.19) olduğu tespit edilmiştir.

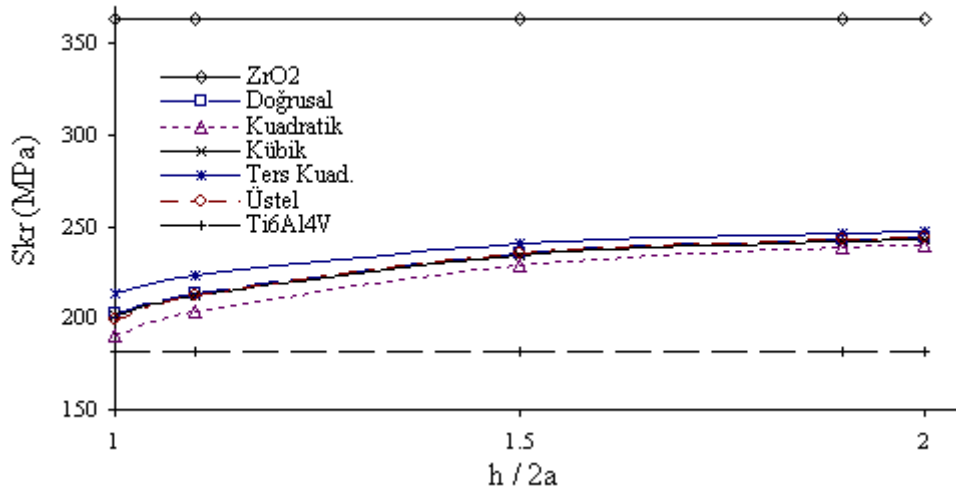
Yapılan analizler, elastik zemin üzerindeki kabukların kritik burulma yükü değerlerine kompozisyonel profillerin kendi aralarındaki etkilerinin azaldığı görülmektedir.

$h/2a$ oranı arttığında kritik burulma yüküne Winkler zemin etkisi artmaktadır. Örneğin; Winkler zemini üzerinde bulunan seramik, doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik, üstel ve metal profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, zeminsiz kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, $h/2a=1$ için, sırasıyla (%33.78), (%51.26), (%53.49), (%51.38), (%49.21), (%51.89), (%54.94) ve $h/2a=5$ için, sırasıyla (%33.78), (%44.16), (%44.40), (%44.17), (%43.93), (%44.22), (%54.94) olduğu tespit edilmiştir.

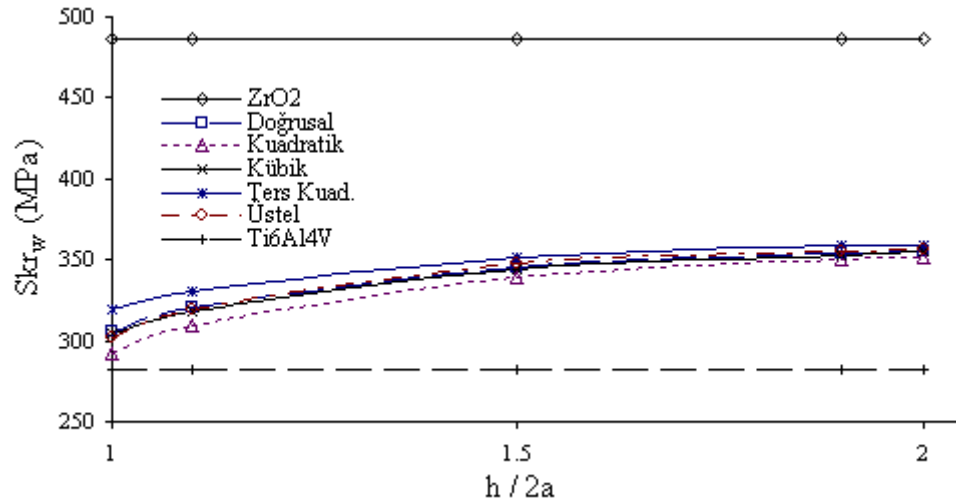
Çizelge 5.2B. Ti6Al4V/FDDB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))

Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂				
	ZrO ₂	Doğrusal	Kuad.	Kübik
$h/2a$	S_{kr} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
1	363.18(0.3,7)	202.04(0.3,7)	190.42(0.3,7)	201.01(0.3,7)
1.1		213.71(0.31,7)	203.91(0.3,7)	212.66(0.3,7)
1.5		234.92(0.31,7)	229.04(0.31,7)	234.14(0.31,7)
1.9		242.52(0.31,7)	238.33(0.31,7)	241.98(0.31,7)
2		243.67(0.31,7)	239.77(0.31,7)	243.18(0.31,7)
5		252.97(0.3,7)	251.67(0.3,7)	252.88(0.3,7)
$h/2a$	Ters Kuad.	Üstel	Ti6Al4V	
1	213.62(0.3,7)	198.99(0.3,7)	182.24(0.3,7)	
1.1	223.39(0.3,7)	212.72(0.31,7)		
1.5	240.75(0.3,7)	235.91(0.31,7)		
1.9	246.63(0.3,7)	243.38(0.31,7)		
2	247.49(0.3,7)	244.46(0.31,7)		
5	254.25(0.3,7)	252.93(0.3,7)		
	ZrO ₂	Doğrusal	Kuad.	Kübik
$h/2a$	S_{krw} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
1	485.88(0.4,8)	305.60(0.45,9)	292.28(0.46,9)	304.28(0.45,9)
1.1		319.93(0.45,9)	308.91(0.46,9)	318.56(0.45,9)
1.5		345.43(0.45,9)	339.16(0.46,9)	344.41(0.45,9)
1.9		354.05(0.45,9)	349.71(0.45,9)	353.34(0.45,9)
2		355.30(0.45,9)	351.28(0.45,9)	354.66(0.45,9)
5		364.68(0.44,9)	363.41(0.44,9)	364.57(0.44,9)
$h/2a$	Ters Kuad.	Üstel	Ti6Al4V	
1	318.75(0.45,9)	302.24(0.46,9)	282.37(0.46,9)	
1.1	330.77(0.45,9)	319.27(0.46,9)		
1.5	351.63(0.45,9)	347.26(0.45,9)		
1.9	358.34(0.44,9)	355.58(0.45,9)		
2	359.27(0.44,9)	356.72(0.45,9)		
5	365.94(0.44,9)	364.78(0.44,9)		

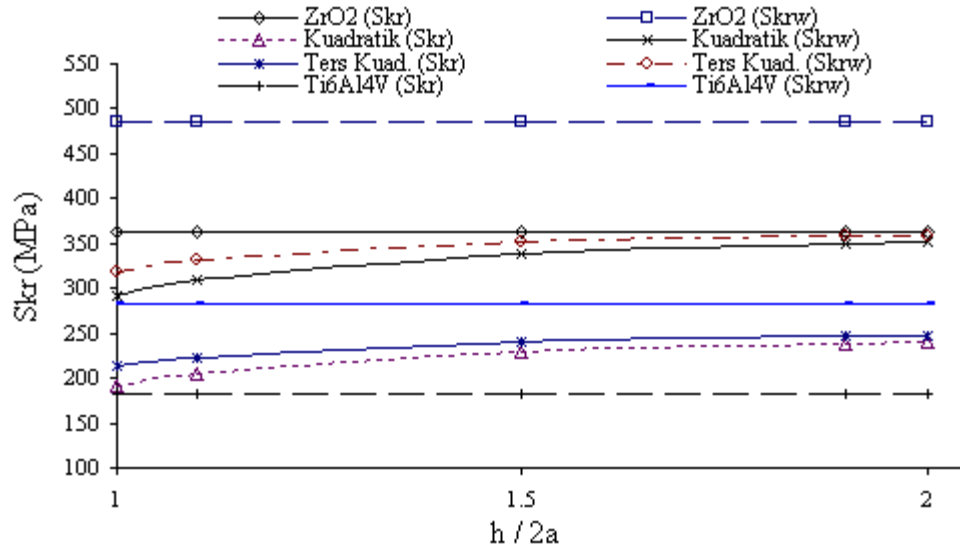
Çizelge 5.2B’deki veriler kullanılarak Şekil 5.2B.1-5.2B.4’te elastik zemin üzerinde bulunan ve bulunmayan Ti6Al4V/FDMB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Şekil 5.2B.1-5.2B.4’ten görüldüğü gibi FDMB’den oluşan kabuk kalınlığı değişiminin, elastik zemin etkisi ve kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi önemli olup dikkate alınması gerekmektedir.



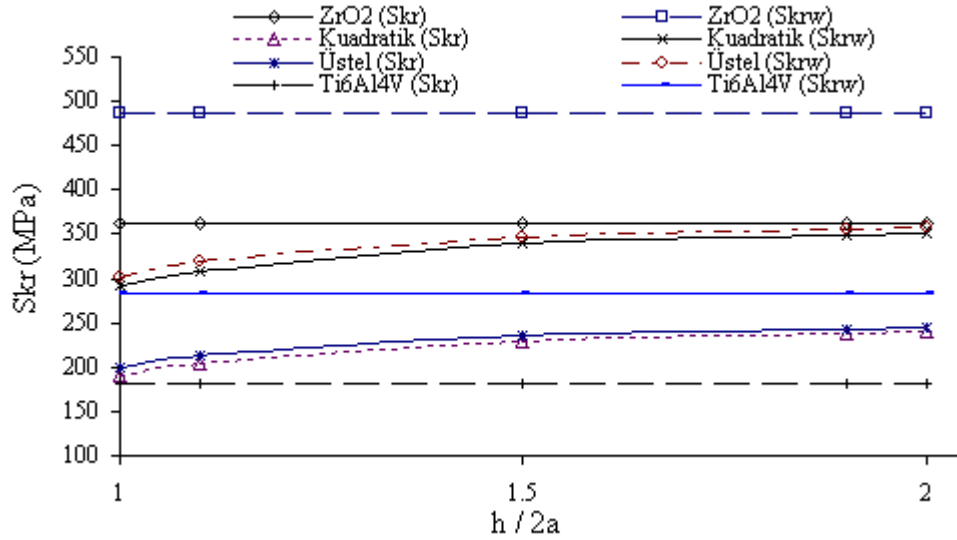
Şekil 5.2B.1. Zemin etkisi olmadığında Ti6Al4V/FDMB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.2B.2. Zemin etkisi altında Ti6Al4V/FDMB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R = 2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.2B.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDDB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R=2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.2B.4. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDDB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün $h/2a$ oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $R/h=100$, $L/R=2$, $K_w=5 \times 10^7$ (N/m³))

Çizelge 5.3B’de Winkler zemini üzerinde bulunan ve bulunmayan, Ti6Al4V/FDDB/ZrO2 katmanlarından oluşan kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{krw} (MPa) ve S_{kr} (MPa) değerlerinin $0.50 \leq L/R \leq 10$ aralığında L/R

oranına bağılı değişimi sunulmaktadır. Dolayısıyla bu tabloda kısa, yani $0.50 \leq L/R \leq 1.0$ eşitsizliğini sağlayan, orta uzunluklu, yani $1 < L/R \leq 4$ eşitsizliğini sağlayan ve uzun, yani $4 < L/R \leq 10$ eşitsizliğini sağlayan silindirik kabukların burulma burkulması ele alınmıştır. Zemin etkisi dikkate alınmadığı durumlarda, her üç çeşit silindirik kabuklarda L/R oranının artışına bağlı olarak kritik burulma yũkũ değerleri, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} , azalmaktadır. γ_{kr} , 0.12 ile 0.58 arasında değişmektedir. Doğrusal, kuadratik, kũbik, ters kuadratik ve ũstel profilili silindirik kabukların kritik burulma yũkleri, pũr ZrO₂ seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yũkũne etkiler; L/R=0.50 için, sırasıyla (-%32.68), (-%33.57), (-% 32.84), (-% 31.80), (-% 32.30); L/R=3 için, sırasıyla (-%32.89), (-%33.95), (-% 33.03), (-% 31.85), (-% 32.66) ve L/R=10 için, sırasıyla (-%33.12), (-%34.33), (-% 33.24), (-% 31.91), (-% 33.03) olduğu tespit edilmiştir. Doğrusal, kuadratik, kũbik, ters kuadratik ve ũstel profilili silindirik kabukların kritik burulma yũkleri, pũr Ti6Al4V metal kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yũkũne etkiler; L/R=0.5 için, sırasıyla (+%34.15), (+%32.38), (+%33.84), (+%35.91), (+%34.91); L/R=3 için, sırasıyla (+%33.75), (+%31.62), (+% 33.47), (+% 35.81), (+% 34.20) ve L/R=10 için, sırasıyla (+%33.29), (+%30.87), (+%33.06), (+%35.70), (+%33.48) olmaktadır. Dolayısıyla, L/R oranının değişimi kompozisyonel profillerin etkisini değiştirmemektedir.

Zemin etkisi dikkate alındığı durumlarda, L/R oranı arttığında zeminsiz duruma benzer olarak üç katmanlı silindirik kabuğun kritik burulma yũkũ değeri burulma yũkũ değerleri, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} , azalmaktadır. γ_{kr} , 0.24 ile 0.59 arasında değişmektedir. Winkler zemin etkisi dikkate alındığı durumda, L/R oranı arttığında kompozisyonel profillerin kritik burulma yũkũne etkisi azalmaktadır. Örneğin; elastik zemin ũzerindeki doğrusal, kuadratik, kũbik, ters kuadratik ve ũstel profilili silindirik kabukların kritik burulma yũkleri, pũr ZrO₂ seramik kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yũkũne etkiler; L/R=0.50 için, sırasıyla (-%32.45), (-%33.34), (-% 32.61), (-% 31.58), (-% 32.07); L/R=3 için, sırasıyla (-%29.50), (-%30.41), (-%29.63), (-%28.60), (-%29.24) ve L/R=10 için, sırasıyla (-

%26.48), (-%27.32), (-%26.60), (-%25.64), (-%26.24) olduğu tespit edilmiştir. Elastik zemin üzerindeki doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik ve üstel profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, pür metal Ti6Al4V kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler; $L/R=0.50$ için, sırasıyla (+%33.67), (+%31.92), (+% 33.36), (+% 35.40), (+% 34.42); $L/R=3$ için, sırasıyla (+%28.22), (+%26.56), (+%27.98), (+%29.85), (+%28.70) ve $L/R=10$ için, sırasıyla (+%24.20), (+%22.77), (+%23.99), (+%25.62), (+%24.59) olduğu tespit edilmiştir.

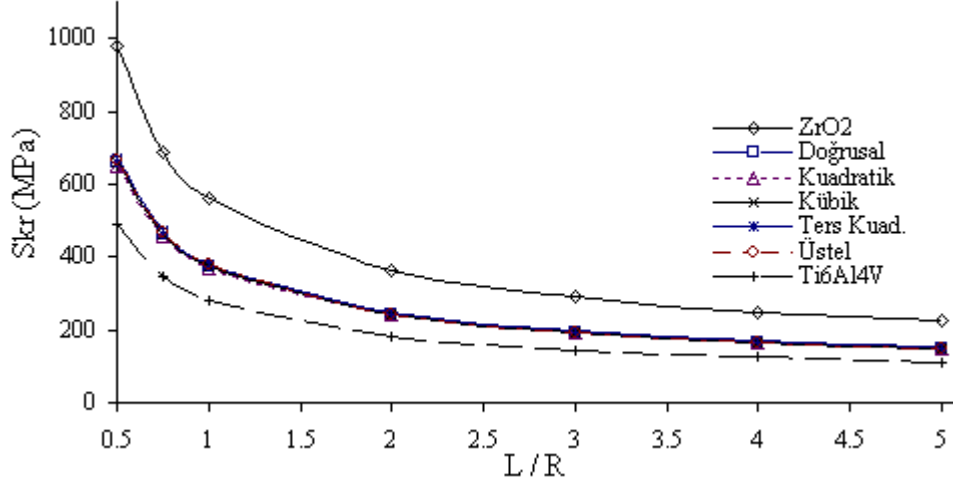
Winkler zeminini üzerinde bulunan seramik, doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik, üstel ve metal profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, zeminsiz kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler; $L/R=0.50$ için, sırasıyla (+%0.72), (+%1.07), (+%1.08), (+%1.07), (+%1.05), (+%1.06), (+%1.43); $L/R=3$ için, sırasıyla (+%18.16), (+%24.12), (+%24.50), (+% 24.15), (+%23.79), (+%24.17), (+%29.48) ve $L/R=10$ için, sırasıyla (+%79.97), (+%97.86), (+%99.19), (+%97.88), (+%96.56), (+%98.21), (+%112.35) olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, L/R oranı arttığında kritik burulma yüküne Winkler zemin etkisi artmaktadır.

Çizelge 5.3B. Ti6Al4V/FDDB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N / m³))

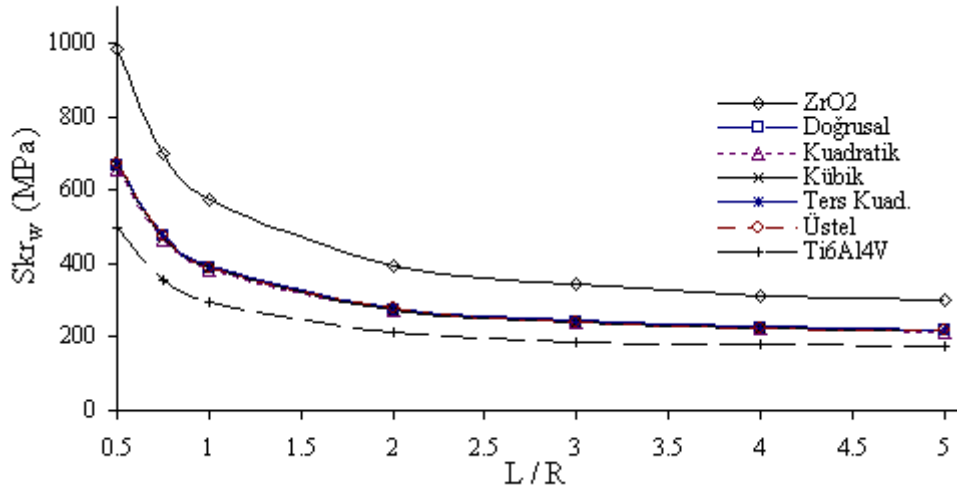
Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂				
	ZrO ₂	Doğrusal	Kuad.	Kübik
L/R	S _{kr} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
0.5	980.38(0.58,11)	659.95(0.58,11)	651.23(0.58,11)	658.41(0.58,11)
0.75	690.24(0.49,10)	463.99(0.49,10)	457.34(0.5,10)	462.96(0.49,10)
1	559.42(0.43,9)	375.55(0.43,9)	369.79(0.43,9)	374.76(0.43,9)
2	363.18(0.3,7)	243.67(0.31,7)	239.77(0.31,7)	243.18(0.31,7)
3	289.71(0.25,6)	194.43(0.25,6)	191.34(0.26,6)	194.03(0.25,6)
4	247.48(0.21,5)	165.81(0.21,5)	163.02(0.21,5)	165.50(0.21,5)
5	222.91(0.21,5)	149.62(0.21,5)	147.31(0.21,5)	149.31(0.21,5)
10	156.75(0.12,3)	104.83(0.12,3)	102.93(0.12,3)	104.65(0.12,3)
L/R	Ters Kuad.	Üstel	Ti6Al4V	
0.5	668.60(0.58,11)	663.69(0.58,11)	491.94(0.58,11)	
0.75	470.57(0.49,10)	466.17(0.5,10)	346.35(0.49,10)	
1	381.26(0.43,9)	376.99(0.43,9)	280.71(0.43,9)	
2	247.49(0.3,7)	244.46(0.31,7)	182.24(0.3,7)	
3	197.43(0.25,6)	195.08(0.26,6)	145.37(0.25,6)	
4	168.58(0.21,5)	166.23(0.21,5)	124.18(0.21,5)	
5	151.91(0.21,5)	150.18(0.21,5)	111.85(0.21,5)	
10	106.73(0.12,3)	104.98(0.12,3)	78.65(0.12,3)	
	ZrO ₂	Doğrusal	Kuad.	Kübik
L/R	S _{krw} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
0.5	987.43(0.59,11)	666.99(0.59,11)	658.26(0.59,11)	665.44(0.59,11)
0.75	700.35(0.5,10)	474.01(0.5,10)	467.34(0.5,10)	472.99(0.5,10)
1	573.77(0.44,9)	389.72(0.44,9)	383.91(0.44,9)	388.94(0.44,9)
2	395.94(0.32,7)	275.75(0.33,7)	271.65(0.33,7)	275.28(0.33,7)
3	342.32(0.28,6)	241.33(0.32,7)	238.21(0.33,7)	240.88(0.32,7)
4	313.38(0.28,6)	226.42(0.29,6)	223.49(0.29,6)	226.07(0.29,6)
5	300.76(0.28,6)	218.06(0.29,6)	215.38(0.29,6)	217.72(0.29,6)
10	282.11(0.24,5)	207.42(0.29,6)	205.03(0.29,6)	207.08(0.29,6)
L/R	Ters Kuad.	Üstel	Ti6Al4V	
0.5	675.63(0.59,11)	670.72(0.59,11)	498.97(0.59,11)	
0.75	480.63(0.5,10)	476.17(0.5,10)	356.41(0.5,10)	
1	395.49(0.44,9)	391.11(0.44,9)	294.90(0.44,9)	
2	279.82(0.33,7)	276.39(0.33,7)	213.06(0.37,8)	
3	244.40(0.32,7)	242.24(0.32,7)	188.22(0.33,7)	
4	229.32(0.29,6)	226.94(0.29,6)	179.68(0.33,7)	
5	220.73(0.29,6)	218.65(0.29,6)	175.14(0.3,6)	
10	209.79(0.29,6)	208.08(0.29,6)	167.01(0.3,6)	

Çizelge 5.3B'deki veriler kullanılarak Şekil 5.3B.1-5.3B.4'te elastik zemin üzerinde bulunan ve bulunmayan Ti6Al4V/FDDB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma

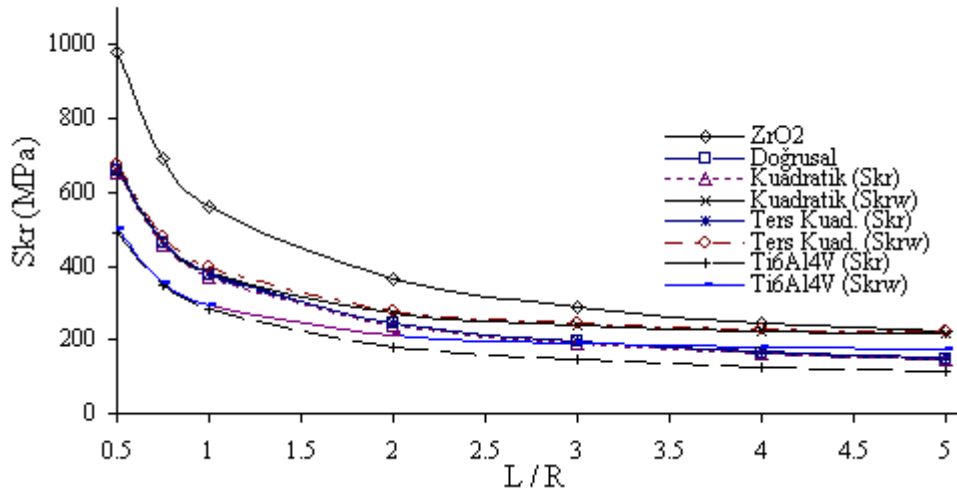
yükünün L/R oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Şekil 5.3B.1-5.3B.4'ten görüldüğü gibi L/R oranının değişiminin, elastik zemin etkisi ve kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi önemli olup dikkate alınması gerekmektedir.



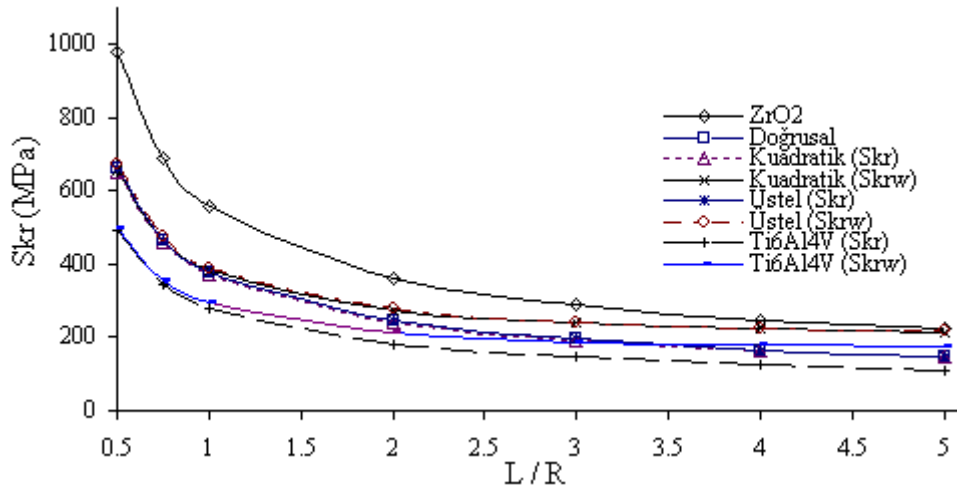
Şekil 5.3B.1. Zemin etkisi olmadığında Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.3B.2. Zemin etkisi altında Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³))



Şekil 5.3B.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m^3))



Şekil 5.3B.1 Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün L/R oranına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m^3))

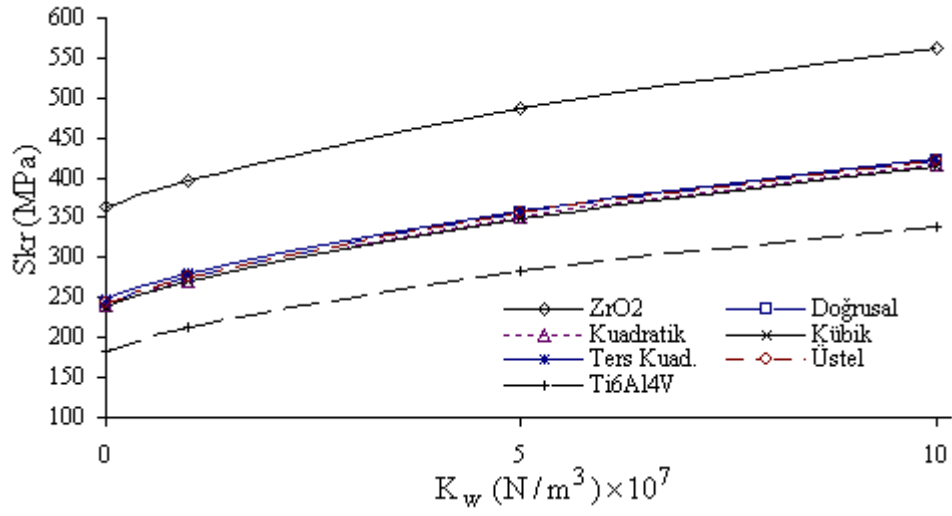
Çizelge 5.4B’de Winkler zemini üzerinde bulunan ve bulunmayan, Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 katmanlarından oluşan kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükü S_{krw} (MPa) ve S_{kr} (MPa) değerlerinin K_w katsayısına göre dağılımı sunulmaktadır. Zemin katsayısı $K_w = 0; 1 \times 10^7; 5 \times 10^7; 1 \times 10^8$ (N/m^3) kullanılarak

kritik burulma yükünün değerleri bulunmuştur. K_w arttığında kritik burulma yükü, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} değerleri artar. Dalgaların x eksenini doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} ise 0.3 ile 0.53 arasında değişmektedir. Winkler zemini üzerinde bulunan seramik, doğrusal, kuadratik, kübik, ters kuadratik, üstel ve metal profilli silindirik kabukların kritik burulma yükleri, zeminsiz kabuğun uygun değerleri ile kıyaslandığında kritik burulma yüküne etkiler, zemin katsayısı $K_w = 1 \times 10^7$ (N/m³) için, sırasıyla (+%9.02), (+%13.17), (+%13.30), (+%13.35), (+%13.06), (+%13.06), (+%16.91), $K_w = 5 \times 10^7$ (N/m³) için, sırasıyla (+%33.78), (+%45.81), (+%46.51), (+%46.85), (+%45.17), (+%45.92), (+%54.94) ve $K_w = 1 \times 10^8$ (N/m³) için, sırasıyla (+%55.08), (+%72.56), (+%73.49), (+%73.91), (+%71.70), (+%72.49), (+%85.86) olduğu tespit edilmiştir.

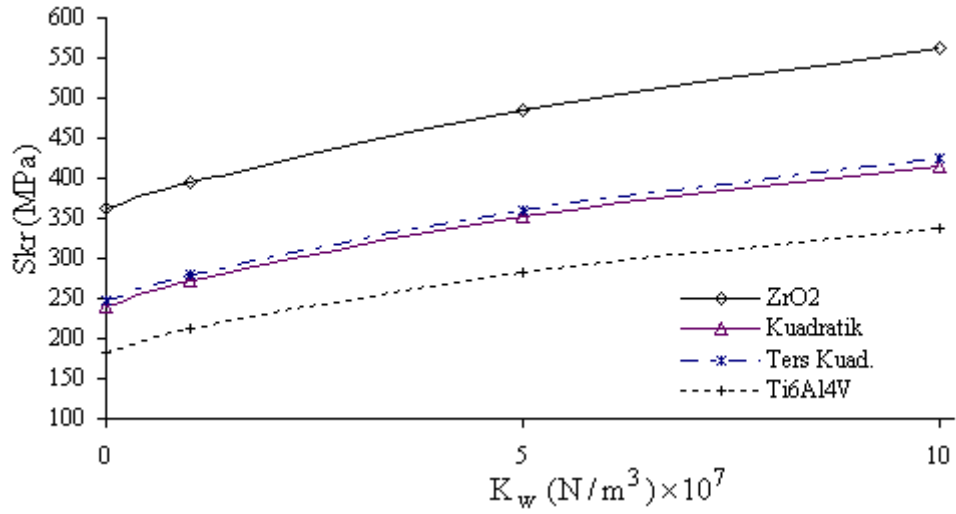
Çizelge 5.4B. Ti6Al4V/FDDB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w katsayısına bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $L/R = 2$, $R/h = 100$)

Ti6Al4V/FDDB/ZrO ₂				
	ZrO ₂	Doğrusal	Kuad.	Kübik
K_w (N/m ³)	S_{kr} (MPa) ve (γ_{kr}, n_{kr})			
0	363.18(0.3,7)	243.67(0.31,7)	239.77(0.3,7)	238.06(0.31,7)
1×10^7	395.94(0.32,7)	275.75(0.33,7)	271.65(0.33,7)	269.84(0.33,7)
5×10^7	485.88(0.4,8)	355.30(0.45,9)	351.28(0.45,9)	349.59(0.45,9)
1×10^8	563.21(0.46,9)	420.47(0.5,9)	415.97(0.5,9)	414.02(0.51,9)
K_w (N/m ³)	Ters Kuad.	Üstel	Ti6Al4V	
0	247.49(0.3,7)	244.46(0.31,7)	182.24(0.3,7)	
1×10^7	279.82(0.33,7)	276.39(0.33,7)	213.06(0.37,8)	
5×10^7	359.27(0.44,9)	356.72(0.45,9)	282.37(0.46,9)	
1×10^8	424.94(0.50,9)	421.66(0.50,9)	338.71(0.53,10)	

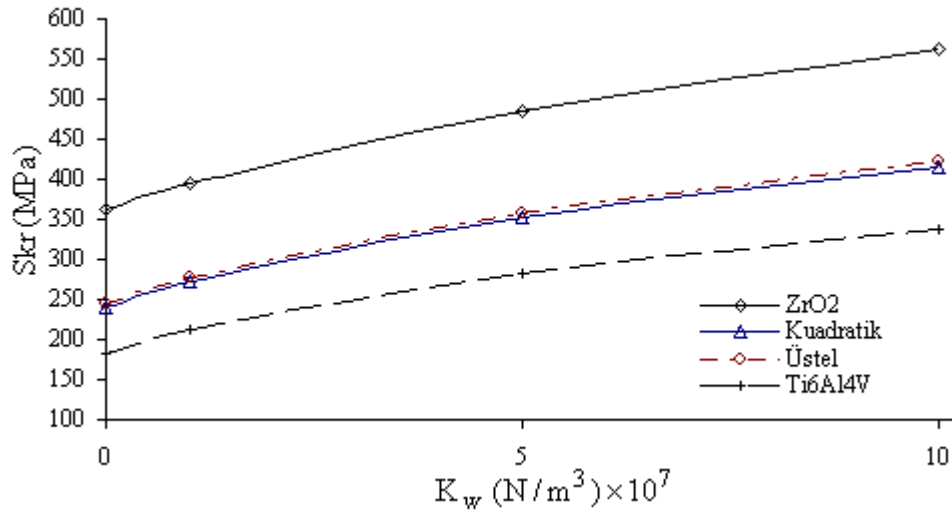
Çizelge 5.4B'deki veriler kullanılarak Şekil 5.4B1-5.4B.4'te elastik zemin üzerinde bulunan ve bulunmayan Ti6Al4V/FDDB/ZrO₂ silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w oranına bağlı dağılımı sunulmaktadır. Şekil 5.4B1-5.4B.4'ten elastik zemin etkisinin kritik burulma yüküne etkisinin önemli olduğu açıkça görülmektedir.



Şekil 5.4B.1. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w değişimine bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $L/R=2$)



Şekil 5.4B.2. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDMB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w değişimine bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a=4$, $R/h=100$, $L/R=2$)



Şekil 5.4B.3. Zemin etkisinin dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda Ti6Al4V/FDDB/ZrO2 silindirik kabuğunun kritik burulma yükünün K_w değişimine bağlı dağılımı ($h/h_1 = h/h_2 = 2$, $h/a = 4$, $R/h = 100$, $L/R = 2$)

Ni-FDMA-Si₃N₄ ve Ti6Al4V-FDDB-ZrO₂ üç tabakalı silindirik kabukların kritik burulma yükü değerleri kıyaslandığında, Ni-FDMA-Si₃N₄ kabuklarda kritik burulma yükü değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür. Ayrıca, Ni-FDMA-Si₃N₄ ve Ti6Al4V-FDDB-ZrO₂ silindirik kabuklarını sırasıyla Si₃N₄ ve ZrO₂ seramik silindirik kabuklar ile kıyasladığımızda kritik burulma yüküne etkinin yüzde olarak Ti6Al4V-FDDB-ZrO₂'de daha fazla olduğu görülmüştür. Ni-FDMA-Si₃N₄ ve Ti6Al4V-FDDB-ZrO₂ üç tabakalı silindirik kabukların kritik burulma yükü değerleri kıyaslandığında Ni-FDMA-Si₃N₄ kabukların kritik burulma yükü değerlerine FDMA'nın etkisinin daha belirgin olduğu saptanmıştır.

5.1. Sonuç ve Öneriler

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) 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 çözülmüş ve Winkler elastik zemini üzerinde bulunan FDM içeren üç tabakalı silindirik kabuğun kritik burulma yükü için analitik ifade elde edilmiştir. Winkler elastik zemini üzerinde bulunan tek tabakalı FDM ve homojen silindirik kabuklar için kritik burulma yükünün ifadeleri özel olarak elde edilmiştir. Ayrıca, elastik zemin etkisi dikkate alınmayan üç tabakalı ve tek tabakalı, FDM, metal veya seramik silindirik kabuklar için kritik burulma yükünün ifadesi özel olarak elde edilmektedir. Son olarak kritik burulma yüküne, fonksiyonel değişimli malzemenin farklı kompozisyonları ve hacim bileşenleri değişiminin, kabuk karakteristiklerinin, tabakaların kalınlıklarının değişiminin ve Winkler elastik zeminin etkileri incelenmiştir. Bu çalışmanın geçerliliği için elde edilen sonuçlar literatürde sunulan çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Sayısal analizler aşağıdaki sonuçların ortaya çıkmasını sağlamıştır:

- a.) Zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, üç katmanlı silindirik kabuklarda R/h oranı arttığında kritik burulma yükü değerleri azalır, çevresel dalga sayısı ise artmaktadır.
- b.) Dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} , R/h arttığında azalmaktadır.
- c.) Elastik zemin üzerindeki kabukların kritik burulma yükü değerlerine kompozisyonel profillerin kendi aralarındaki etkilerinin azaldığı görülmektedir.

- d.) R/h oranı arttığında kritik burulma yüküne Winkler zemin etkisi artmaktadır.
- e.) R/h oranı arttığında, Winkler zemin etkisi dikkate alındığı durumda, kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmakta, zemin etkisi dikkate alınmadığında ise söz konusu etki R/h oranından bağımsız olmaktadır.
- f.) Zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, üç katmanlı silindirik kabuklarda $h/2a$ oranı arttığında kritik burulma yükü değerleri artar, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} ise yaklaşık olarak sabit kalır.
- g.) $h/2a$ oranı arttığında, Winkler zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmakta, fakat etki yüzdesi farklı olmaktadır.
- h.) $h/2a$ oranı arttığında kritik burulma yüküne Winkler zemin etkisi artmaktadır.
- i.) Elastik zemin katsayısı K_w arttığında kritik burulma yükü, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} değerleri artar.
- j.) Dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} değerlerinin birden küçük olduğu saptanmıştır.
- k.) Zemin etkisi dikkate alındığı ve alınmadığı durumlarda, L/R oranı arttığında üç katmanlı silindirik kabuğun kritik burulma yükü değeri burulma yükü değerleri, çevresel dalga sayısı ve dalgaların x eksenine doğrultusu ile oluşturduğu açının tanjantı γ_{kr} , azalmaktadır.
- l.) Zemin etkisi dikkate alınmadığında L/R oranının değişimi kompozisyonel profillerin etkisini değiştirmemekte, Winkler zemin etkisi dikkate alındığı durumda ise L/R oranı arttığında kompozisyonel profillerin kritik burulma yüküne etkisi azalmaktadır.
- m.) L/R oranı arttığında kritik burulma yüküne Winkler zemin etkisi artmaktadır.
- n.) Ni-FDMA-Si₃N₄ ve Ti6Al4V-FDDB-ZrO₂ üç tabakalı silindirik kabukların kritik burulma yükü değerleri kıyaslandığında Ni-FDMA-Si₃N₄ kabuklarda kritik burulma yükü değerlerinin daha büyük olmaktadır.
- o.) Ni-FDMA-Si₃N₄ ve Ti6Al4V-FDDB-ZrO₂ silindirik kabuklar sırasıyla Si₃N₄ ve ZrO₂ seramik silindirik kabuklar ile kıyasladığımızda kritik burulma yüküne etkinin yüzde olarak Ti6Al4V-FDDB-ZrO₂'de daha fazladır.

- p.) Ni-FDMA-Si₃N₄ ve Ti6Al4V-FDDB-ZrO₂ üç tabakalı silindirik kabukların kritik burulma yükü değerleri kıyaslandığında Ni-FDMA-Si₃N₄ kabukların kritik burulma yükü değerlerine FDMA'nın etkisi daha belirgindir.
- q.) Kompozisyonel profillerin kritik burulma yükü değerlerine etkisi çok önemli olup pür metal ve pür seramik kabuklarla kıyaslandığında değişiklikler göstermektedir.
- r.) Kompozisyonel profiller doğrusal ve kübik olduğunda kritik burulma yükünün değerleri yaklaşık aynı olmaktadır.
- s.) Kompozisyonel profiller kuadratik veya ters kuadratik değiştiğinde kritik burulma yükü değerlerine etki diğer durumlardan daha fazla olmaktadır.
- t.) Kompozisyonel profil üstel değiştiğinde kritik burulma yükü değerleri kuadratik durum ile ters kuadratik durum arasında değişmektedir.

Gelecekte ele alınan problemin değişik zemin modelleri ve geometrik doğrusal olmayan durum göz önüne alınarak çözümü incelenecektir.

6. KAYNAKLAR

- Amabili, M., 2008. Nonlinear vibrations and stability of shells and plates. Cambridge University Press.
- Arghavan, S., Hematiyan, M.R., 2009. Torsion of functionally graded hollow tubes. *European Journal of Mechanics A-Solids*, 28, 551-559.
- Avey, A., Avcar, M., Özyiğit P., Adıgözel, Ş., 2009. Elastik zemin üzerinde bulunan fonksiyonel değişimli tabaka içeren katmanlı silindirik kabukların uniform yanal basınç yükü etkisi altında burkulması. XVI. Ulusal Mekanik Kongre Kitabı, 259-267, Kayseri, Türkiye.
- Bajenov, V.A., 1975, The bending of the cylindrical shells in an elastic medium. Kiev, Visha Shkola. (in Russian).
- Batdorf, S.B., Stein, M., Schildcrout, M., 1947. Critical stress of thin-walled cylinders in torsion. The National Advisory Committee for Aeronautics, Technical note no: 1344.
- Batra, R.C., 2006. Torsion of a functionally graded cylinder. *The Journal of American Institute of Aeronautics and Astonautics*, 44, 1363-1365.
- Bisagni, C., Cordisco, P., 2006. Post-buckling and collapse experiments of stiffened composite cylindrical shells subjected to axial loading and torque. *Composite Structures*, 73, 138-149.
- Bogdanovich, A.F., 1987. Nonlinear dynamic problems of cylindrical composite shells. Riga, Zinathe, (in Russian).
- Civalek, O., 2005. Geometrically nonlinear dynamic analysis of doubly curved isotropic shells resting on elastic foundation by a combination of harmonic differential quadrature-finite difference methods. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 82, 470-479.
- Civalek, O., 2008. Static analysis of shear deformable rectangular plates on Winkler-Pasternak foundation. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 25, 380-386.
- Doğruoğlu, A.N., Omurtag, M.H., Kadioğlu, F., 1999. Elastik zemin-plak etkileşiminde serbest titreşim ve stabilite analizi için karışık Se formülasyonu. *Teknik Dergi*, 10, 1, 1891-1908.
- Donnell, L.H., 1935. Stability of thin-walled tubes under torsion. California Institute of Technology.

- Ekstrom, R.E., 1963. Buckling of cylindrical shells under combined torsion and hydrostatic pressure. *Experimental Mechanics*, 3, 192–197.
- Elishakoff, I., Tang, J., 1988. Buckling of polar orthotropic circular plates on elastic foundation by computerized symbolic algebra. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 68, 2, 229-247.
- Erdogan, F., Wu, B.H., 1996. Crack problem in functionally graded material layers under thermal stresses. *Journal of Thermal Stresses*, 19, 237–265.
- Evans, A.G., Mumm, D.R., Hutchinson, J.W., Meier G.H., Pettit F.S., 2001. Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings. *Progress in Materials Science*, 46, 505–53.
- Feng, W.J., Su, R.K.L., Jiang, Z.Q., 2005. Torsional impact response of a cylindrical interface crack between a functionally graded interlayer and a homogeneous cylinder. *Composite Structures*, 68, 203-209.
- Golovko, K.G., Lugovoi, P.Z., Meish, V.F., 2007. Solution of axisymmetric dynamic problems for cylindrical shells on an elastic foundation. *International Applied Mechanics*, 43, 1390-1395.
- Gorbunov–Possadov, M.I., Malikova, T.A., Solomin, V.I., 1984. Design of structures on elastic foundation, Third edition, revised and completed, Gos. Izd. Lit. po Stroit I Arkh. (Strojizdat), Moscow, USSR
- Hemed, H.K., Dhaliwal, R.S., 1998. Torsion of an infinite composite elastic cylindrical shell. *Acta Mechanica*, 130, 135-141.
- Hetenyi, M., 1955. Beams on elastic foundation. The University of Michigan Press. Michigan, USA., 358p.
- Huang, H.W., Han, Q., 2010. Nonlinear buckling of torsion-loaded functionally graded cylindrical shells in thermal environment. *European Journal of Mechanics A-Solids*, 29, 42-48.
- Hui, D., Du, I.H.Y., 1987. Initial post buckling behavior of imperfect, antisymmetric cross-ply cylindrical-shells under torsion. *Journal of Applied Mechanics-Transactions*, 54, 174-180.
- Huile, A., Yang, C., Pang, S.S., 1997. Buckling analysis of thick-walled composite pipe under torsion. *Journal of Pressure Vessel Technology-Transactions*, 119, 111-121.

- Jones, R., Xenophontos, J., 1977. The Vlasov foundation model. *International Journal of Mechanical Sciences*, 19, 317–323.
- Khashba, G.H., 1975. Behavior of circular cylindrical shell under dynamic torsion. *Review of Theory of Plates and Shells*, Moscow, Nauka, 704–707, (in Russian).
- Kaysser, W.A., Ilchner, B., 1995. FGM research activities in Europe. *Materials Research Society Bulletin*, 20, 22–26.
- Kerr, A.D., 1964. Elastic and visco-elastic foundation models. *Journal of Applied Mechanics*, 31, 491–498.
- Kieback, B., Neubrand, A., Riedel, H., 2003. Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering A*, 362, 81–106.
- Kim, Y.S., Kardomateas, G.A., Zureick, A., 1999. Buckling of thick orthotropic cylindrical shells under torsion. *Journal of Applied Mechanics-Transactions*, 66, 41-50.
- Koizumi, M., 1993. The concept of FGM. *Ceramic Transactions*, 34, 3–10.
- Koizumi, M., 1997. FGM activities in Japan. *Composites Part B: Engineering*, 28, 1-4.
- Lennon, R.F., Das, P.K., 2000. Torsional buckling behaviour of stiffened cylinders under combined loading. *Thin-Walled Structures*, 38, 229-245.
- Li, C., Weng, G.J., Duan, Z., 2001. Dynamic behavior of a cylindrical crack in a functionally graded interlayer under torsional loading. *International Journal of Solids and Structures*, 38, 7473-7485.
- Li, S.R., Batra, R.C., 2005. Buckling of a laminated cylindrical shell with functionally graded middle layer under axial compressive load. *Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Mechanics*, 1-2, 796-800.
- Li, S.R., Batra, R.C., 2006. Buckling of axially compressed thin cylindrical shells with functionally graded middle layer. *Thin-Walled Structures*, 44, 1039-1047.
- Li, Z.M., Shen, H.S., 2009. Buckling and postbuckling analysis of shear deformable anisotropic laminated cylindrical shells under torsion. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 16, 46-62.

- 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.
- Loo, T.T., 1954. Effects of large deflections and imperfections on the elastic buckling of cylinders under torsion and axial compression. *Proceedings of the Second USA National Congress on Applied Mechanics*, 345-357.
- Lopatin, A.V., 1997. Buckling of a sandwich composite cylindrical shell stiffened by rings under external pressure. *Mechanics of Composite Materials*, 33, 172-178.
- Luo, Y.F., Teng, J.G., 1998. Stability analysis of shells of revolution on nonlinear elastic foundations. *Computers and Structures*, 69, 499-511.
- Mao, R.J., Lu, C.H., 1999. Buckling analysis of a laminated cylindrical shell under torsion subjected to mixed boundary conditions. *International Journal of Solids and Structures*, 36, 3821-3835.
- Mao, R.J., Lu, G., 2002. A study of elastic-plastic buckling of cylindrical shells under torsion. *Thin-Walled Structures*, 40, 1051-1071.
- Miyamoto, Y., Kaysser, W.A., Rabin, B.H., Kawasaki, A., Ford, R.G., 1999. *Functionally graded materials: desing, processing and applications*. Boston, Kluwer Academic Publishers, MA:Kluwer Academic Publishers.
- Mohamed, S.A., Bichir, S., Matbuly, M.S., Nassar, M., 1996. Analytical solution of cracked shell resting on elastic foundation. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 9, 306-319.
- 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, 1815-27.
- Müller, E., Drašar, C., Schilz, J., Kaysser, W.A., 2003. Functionally graded materials for sensor and energy applications. *Materials Science and Engineering A*, 362, 17-39.
- Naili, S., Oddou, C., 2000. Buckling of a short cylindrical shell surrounded by an elastic medium. *Journal of Applied Mechanics-Transactions*, 67, 212-214.
- Nash, W.A., 1957. Buckling of initially imperfect cylindrical shells subjected to torsion. *Journal of Applied Mechanics*, 24, 125-130.

- Nash, W.A., 1959. An experimental analysis of the buckling of thin initially imperfect cylindrical shells subject to torsion. *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis*, 16, 55-68.
- Nath, Y., Mahrenholtz, O., Varma, K.K., 1987. Non-linear dynamic response of a doubly curved shallow shell on an elastic foundation. *Journal of Sound and Vibration*, 112, 53-61.
- Ng, T.Y., Lam, K.Y., 1999. Effects of elastic foundation on the dynamic stability of cylindrical shells. *Structural Engineering and Mechanics*, 8, 193-205.
- Nie, G.H., Chan, C.K., Yao, J.C., He, X.Q., 2009. Asymptotic solution for nonlinear buckling of orthotropic shells on elastic foundation. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 47, 1772-1783.
- Nie, G.J., Batra, R.C., 2010. Material tailoring and analysis of functionally graded isotropic and incompressible linear elastic hollow cylinders. *Composite Structures*, 92, 265-274.
- Ogibalov, P.M., Koltunov, M.A., 1969. *Plates and Shells*, Moscow State University, (in Russian).
- Paliwal, D.N., Pandey, R.K., Nath, T., 1996. Free vibrations of circular cylindrical shell on Winkler and Pasternak foundations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 69, 79-89.
- Paliwal, D.N., Pandey, R.K., 1998. The free vibration of a cylindrical shell on an elastic foundation. *Journal of Vibration and Acoustics-Transactions*, 120, 63-71.
- Paimushin, V.N., 2007. Torsional, flexural, and torsional-flexural buckling modes of a cylindrical shell under combined loading. *Mechanics of Solids*, 42, 437-446.
- Park, H.C., Cho, C.M., Choi, Y.H., 2001. Torsional buckling analysis of composite cylinders. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 39, 951-955.
- Pitakthapanaphong, S., Busso, E.P., 2002. Self-consistent elastoplastic stress solutions for functionally graded material systems subjected to thermal transients. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 50, 695-716.

- Pompe, W., Worchorch, H., Epple, M. Friess, W., Gelinsky, M., Greil, P., Hempel, U., Scharnweber, D., Schulte, K., 2003. Functionally graded materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering*, 362, 40-60.
- Pflüger, A., 1970. Elastostatik'in stabilite problemleri. Çev. Tameroğlu, S., Cinemre, V., Özbek, T., Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul , 579s., (Türkçe).
- Reddy, J.N., Chin, C.D., 1998. Thermo-mechanical analysis of functionally graded cylinders and plates. *Journal of Thermal Stresses*, 21, 593-602.
- Reddy, J.N., 2004. *Mechanics of laminated composite plates and shells: theory and analysis*. Second Edition, CRC Press, 821p.
- 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., Xiang, Y., 2008. Buckling and postbuckling of anisotropic laminated cylindrical shells under combined axial compression and torsion. *Composite Structures*, 84, 375-386.
- Shen, H.S., 2008. Boundary layer theory for the buckling and postbuckling of an anisotropic laminated cylindrical shell, Part III: Prediction under torsion. *Composite Structures*, 82, 371-381.
- Shen, H.S., 2009a. Torsional buckling and postbuckling of FGM cylindrical shells in thermal environments. *International Journal Of Non-Linear Mechanics*, 44, 644-657.
- Shen, H.S., 2009b Post-buckling of shear deformable FGM cylindrical shells surrounded by an elastic medium. *International Journal of Mechanical Sciences*, 51, 372-383.
- Shen, H.S., 2009c. Post-buckling of internal-pressure-loaded laminated cylindrical shells surrounded by an elastic medium. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 44, 439-458.
- 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.
- Sofiyev, A.H., Ay, Z., Sofuyev, A., 2003. The dynamic buckling of an orthotropic cylindrical thin shell under torsion varying as a power function of time. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 16, 81-87.

- Sofiyev, A.H., Schnack, E., 2004. The stability of functionally graded cylindrical shells under linearly increasing dynamic torsional loading. *Engineering Structures*, 26, 1321-1331.
- Sofiyev, A.H., Keskin, S.N., Sofiyev, Ali H., 2004. Effects of elastic foundation on the vibration of laminated non-homogeneous orthotropic circular cylindrical shells. *Shock and Vibration*, 11, 89-101.
- Sofiyev, A.H., 2005. The torsional buckling analysis for cylindrical shell with material non-homogeneity in thickness direction under impulsive loading. *Structural Engineering and Mechanics*, 19, 231-236.
- Sofiyev, A.H., Deniz, A., Akcay, H., Yusufoglu, E., 2006. The vibration and stability of a three-layered conical shell containing an 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., Aksogan, O., Schnack, E., Avcar, M., 2008a. The stability of a three-layered composite conical shell containing a FGM layer subjected to external pressure. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 15, 461-466.
- Sofiyev, A.H., Zerin, Z., Korkmaz, A., 2008b. The stability of a thin three-layered composite truncated conical shell containing an FGM layer subjected to non-uniform lateral pressure. *Composite Structures*, 85, 105-115.
- Sofiyev A.H., 2010. The buckling of FGM truncated conical shells subjected to axial compressive load and resting on Winkler-Pasternak foundations. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 87, 753-761.
- Sofiyev, A.H., Halilov, H.M., Kuruoglu, N., 2011. Analytical solution of the dynamic behavior of non-homogenous orthotropic cylindrical shells on elastic foundations under moving loads. *Journal of Engineering Mathematics*, 69, 359-371.
- Soni, S.R., Jain, R.K., Prasad, C., 1973. Torsional vibrations of shells of revolution of variable thickness. *Journal of Acoustic Society of America*, 53, 1445-1447.
- Suer, H.S., Harris, L.A., 1959. The stability of thin-walled cylinders under combined torsion and external lateral or hydrostatic pressure. *Journal of Applied Mechanics*, 26, 138-140.
- Suresh, S., Mortensen, A., 1998. *Fundamentals of functionally graded materials: processing and thermo-mechanical behavior of graded metals and metal-ceramic composites*. IOM Communications Ltd., London.

- Tabiei, A., Simitses, G.J., 1994. Buckling of moderately thick laminated cylindrical shells under torsion. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 32, 639-647.
- Tan, D.Y., 2000. Torsional buckling analysis of thin and thick shells of revolution. *International Journal of Solids and Structures*, 37, 3055-3078.
- Tani, J., 1981. Dynamic stability of truncated conical shells under pulsating torsion. *Journal of Applied Mechanics*, 48, 391-399.
- Tj, H.G., Mikami, T., Kanie, S., Sato, M., 2006. Free vibration characteristics of cylindrical shells partially buried in elastic foundations. *Journal of Sound and Vibrations*, 290, 785–793.
- Touloukian, Y.S., 1967. Thermophysical properties of high temperature solid materials. New York: Macmillan, 1, 770-1021.
- Vlasov, V.Z., Leont'ev, N.N., 1966. Beams, Plates and Shells on Elastic foundations. Translated from Russian to English by Barouch, A, Israel Program for scientific translations, Jarusalem.
- Vinson, J.R., Sierakowski, R.L., 1986. The behavior of structures composed of composite material. Dordrecht, The Netherlands, Martinus-Nijhoff, Inc.
- Volmir, A. S., 1967. The Stability of Deformable Systems, Nauka, Moscow, (in Russian).
- Wang, D.Y., Chen, T.Y., 1997. Impact buckling and post-buckling of elasto-viscoplastic cylindrical shell under torsion. *China Ocean Engineering*, 11, 43-52.
- Wozniak, C., Rychlewska, J., Wierzbicki, E., 2005. Modelling and analysis of functionally graded laminated shells. *Shell Structures: Theory and Applications*, 187-190.
- Yamaki, N., Matsuda, K., 1975. Postbuckling behavior of circular cylindrical shells under torsion. *Archive of Applied Mechanics (Ingenieur-Archiv)*, 45, 79-89.
- Zhang, X., Q., Han, Q., 2007. Buckling and postbuckling behaviors of imperfect cylindrical shells subjected to torsion. *Thin-Walled Structures*, 45, 1035-1043.
- Zhoua, D., Lob, S.H., Aub, F.T.K., Cheung, Y.K., 2006. Three-dimensional free vibration of thick circular plates on Pasternak foundation. *Journal of Sound and Vibration*, 292, 726–741.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Şeyda ADIGÜZEL
Doğum Yeri ve Yılı : Ağrı-1988
Medeni Hali : Bekâr
Yabancı Dili : İngilizce



Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise : Erzurum Anadolu Lisesi 2001-2004
Üniversite : Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü 2004-2008

Yayınları (SCI ve diğer makaleler):

- 1- Sofiyev A.H., Avcar M., Ozyigit P., Adigozel S., The free vibration of non-homogeneous truncated conical shells on a Winkler foundation, International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), 1(1), 34-41, 2009.
- 3- Avey A., Avcar M., Özyiğit P., Adıgözel Ş., Elastik zemin üzerinde bulunan fonksiyonel değişimli tabaka içeren katmanlı silindirik kabukların uniform yanal basınç yükü etkisi altında burkulması, XVI. Ulusal Mekanik Kongresi, 22-26 Haziran, 2009, KAYSERİ.