

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

**İKİ PARAMETRELİ ELASTİK ZEMİN ÜZERİNDEKİ FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ SİLİNDİRİK KABUKLARIN BURULMA YÜKÜ
ETKİSİ ALTINDA STABİLİTESİ**

Remzi YENİALP

**Danışman
Prof. Dr. Abdullah AVEY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2022**



© 2022[Remzi YENİALP]

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Önemi	2
1.2. Tezin Amacı	4
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1. Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Malzemelerin Oluşumu, Modellenmesi ve Uygulamalarına İlişkin Kaynak Özetleri.....	6
2.2. Burulmaya Maruz Homojen Kabukların Stabilitesine İlişkin Kaynak Özetleri	18
2.3. Burulmaya Maruz Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Kabukların Stabilitesine İlişkin Kaynak Özetleri.....	21
2.4. Elastik Zemine Oturan Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Kabukların Burulma Yüğü Etkisi Altındaki Stabilitesine İlişkin Kaynak Özetleri.....	33
2.5. Tez Konusuna İlişkin Bazı Kitapların Özetleri	41
3. MATERYAL VE YÖNTEM	45
3.1. Problemin Formülasyonu	45
3.2. FDM'lerin Matematiksel Modellenmesi ve Görseller	46
3.3. Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Malzemelerden Oluşan Silindirik Kabukların Temel Bağlıntılarının Oluşturulması.....	56
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	62
4.1. Temel Denklemlerinin Çözümü ve Kritik Burkulma Yüğü'nün Bulunması.....	62
4.2. Karşılaştırmalar	65
4.3. Sayısal Analizler.....	67
5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR	122
KAYNAKLAR	127
ÖZGEÇMİŞ	135

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İKİ PARAMETRELİ ELASTİK ZEMİN ÜZERİNDEKİ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ SİLİNDİRİK KABUKLARIN BURULMA YÜKÜ ETKİSİ ALTINDA STABİLİTESİ

Remzi YENİALP

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Abdullah AVEY

Tez çalışmasında, iki parametrelî elastik zemin üzerindeki fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FDM) malzemelerden oluşan silindirik kabukların burulma yükü etkisi altında stabilite probleminin çözümü ele alınmaktadır. Önce, Donnell tipi kabuk teorisi kullanılarak FDM'lerden oluşan silindirik kabukların doğrusal temel bağıntıları oluşturulmaktadır. Bu bağıntılar ve iki parametrelî elastik zeminin matematiksel ifadesi kullanılarak burulma yüküne maruz FDM'lerden oluşan silindirik kabukların temel kısmi türevli diferansiyel denklemleri türetilmektedir. Somut sınır koşulları için temel denklemlere Galerkin yöntemi uygulanarak, iki parametrelî elastik zemin üzerindeki FDM'lerden oluşan silindirik kabukların kritik burulma yükü için kapalı çözüm elde edilmektedir. Ayrıca, iki parametrelî elastik zemin üzerindeki FDM'lerden oluşan silindirik kabukların kritik momenti için de kapalı çözüm elde edilmektedir. Elde edilen formüller kullanılarak sayısal hesaplar yapılarak, iki parametrelî elastik zeminin, FDM çeşitlerinin ve hacim kesir oranının kritik burulma yüküne ve kritik burulma momentine etkilerine ilişkin nitel ve nicel analizler gerçekleştirilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, silindirik kabuk, burulma yükü, stabilite, kritik burulma yükü, iki parametrelî elastik zemin, kritik burulma momenti

2022, 135 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

STABILITY OF FUNCTIONALLY GRADED CYLINDRICAL SHELLS ON TWO-PARAMETER ELASTIC FOUNDATION SUBJECTED TO TORSIONAL LOAD

Remzi YENİALP

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

Supervisor: Prof. Dr. Abdullah AVEY

In this thesis, the solution of the stability problem of cylindrical shells made of functionally graded (FGM) materials resting on two-parameter elastic foundation under the torsional load is discussed. First, by using Donnell type shell theory, linear basic relations of cylindrical shells composed of FGMs are formed. Using these relations and the mathematical expression of two parameter elastic foundation, basic differential equations of FGM cylindrical shells subjected to torsional load are derived. By applying the Galerkin method to the basic equations for concrete boundary conditions, a closed form solution is obtained for the critical torsion load of cylindrical shells made of FGMs on the two-parameter elastic foundation. In addition, a closed form solution is obtained for the critical moment of the cylindrical shells made of FGMs on the two-parameter elastic foundation. By making numerical calculations using these analytical formulas, qualitative and quantitative analyzes are carried out regarding the effects of two-parameter elastic foundation, types of FGM and volume fraction ratio on the critical torsion load and critical torsion moment.

Keywords: Functionally graded materials, cylindrical shell, torsional load, stability, critical torsional load, two-parameter elastic foundation, critical torsional moment

2022, 135 pages

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması döneminde, temel denklemlerin türetilmesi ve çözümü dahil tüm aşamalarda destek, yapıcı öneri ve düzenlemeleriyle bana yardımcı olan tez danışmanım, saygıdeğer hocam, Sayın Prof. Dr. Abdullah AVEY'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

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

Remzi YENİALP
ISPARTA, 2022

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. İki parametrelili elastik zemin üzerine oturan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeden oluşan silindirik kabuk ve koordinat sistemi	45
Şekil 3.2. Hacim fraksiyon indeksi (a) $k = 1$ ve (b) $k = 2$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının iki boyutlu gösterimi.....	49
Şekil 3.3. Hacim fraksiyon indeksi (a) $k = 3$ ve (b) $k = 4$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının iki boyutlu gösterimi.....	50
Şekil 3.4. Hacim fraksiyon indeksi (a) $k = 0.25$ ve (b) $k = 0.5$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının iki boyutlu gösterimi	50
Şekil 3.5. Hacim fraksiyonu üstel olarak değiştiğinde oranının iki boyutlu gösterimi.....	51
Şekil 3.6. Hacim fraksiyon indeksi $k = 1$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi	52
Şekil 3.7. Hacim fraksiyon indeksi $k = 2$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi	52
Şekil 3.8. Hacim fraksiyon indeksi $k = 3$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi	53
Şekil 3.9. Hacim fraksiyon indeksi $k = 4$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi	54
Şekil 3.10. Hacim fraksiyon indeksi $k = 0.25$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi	54
Şekil 3.11. Hacim fraksiyon indeksi $k = 0.5$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ boyutsuz etkin Young modülünün üç boyutlu gösterimi.....	55
Şekil 3.12. Hacim fraksiyonu üstel olarak değiştiğinde $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi.....	55
Şekil 4.1. Hacim fraksiyonu üstel olarak değiştiğinde $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi.....	74
Şekil 4.2. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri	80
Şekil 4.3. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si ₃ N ₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri	85
Şekil 4.4. Zeminsiz/zeminli FDM ₁ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R / h oranına bağlı değişimleri.....	88
Şekil 4.5. Zeminsiz/zeminli FDM ₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri	90
Şekil 4.6. Zeminsiz/zeminli FDM ₁ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri	95
Şekil 4.7. Zeminsiz/zeminli FDM ₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri	101
Şekil 4.8. Zeminsiz/zeminli FDM ₁ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri	106

Şekil 4.9. Zeminsiz/zeminli FDM ₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri	111
Şekil 4.10. Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM ₁ ve FDM ₂ 'den meydana gelen kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükünün L / R 'ye bağlı değişimi	115
Şekil 4.11. Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM ₁ ve FDM ₂ kompozit silindirik kabukların kritik burulma momentinin L / R ye bağlı değişimi	117
Şekil 4.12. Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM ₁ ve FDM ₂ silindirik kabukların kritik burulma yükünün R / h oranına bağlı değişimi	119
Şekil 4.13. Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM ₁ ve FDM ₂ silindirik kabukların kritik burulma momentinin R / h oranının artışına bağlı değişimi	121



ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeleri oluşturan bileşenlerin özellikleri	47
Çizelge 4.1. FDM'lerden oluşan silindirik kabukların burulma burkulma yükünün değerleri ile literatürdeki değerlerin karşılaştırılması.....	66
Çizelge 4.2. Silindirik kabukların kritik burulma yükünün R/h ve L/R oranlarına bağlı dağılımı ve karşılaştırmalar	67
Çizelge 4.3. SUS304/Si ₃ N ₄ ve Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların kritik burulma yükünün (S_{kr}) elastik zemin katsayıları K_1 ve K_2 'ye bağlı değişimleri.....	69
Çizelge 4.4. SUS304/Si ₃ N ₄ ve Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların kritik burulma momentinin (M_{kr}) elastik zemin katsayıları K_1 ve K_2 'ye bağlı değişimleri	72
Çizelge 4.5. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si ₃ N ₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin a/R oranına bağlı değişimleri	74
Çizelge 4.6. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si ₃ N ₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri	77
Çizelge 4.7. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri	79
Çizelge 4.8. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri	82
Çizelge 4.9. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si ₃ N ₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri	84
Çizelge 4.10. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si ₃ N ₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri	87
Çizelge 4.11. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri	90
Çizelge 4.12. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri	93
Çizelge 4.13. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si ₃ N ₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri	95
Çizelge 4.14. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si ₃ N ₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri.....	98
Çizelge 4.15. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri	100
Çizelge 4.16. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri.....	103
Çizelge 4.17. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si ₃ N ₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri	105
Çizelge 4.18. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si ₃ N ₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri.....	108

Çizelge 4.19. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri	110
Çizelge 4.20. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO ₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R / h oranına bağlı değişimleri.....	113



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$a_{pqi}, b_{pqi}, c_{pqi}$	FDM özelliklerine bağlı katsayılar
$E^{fd}(\bar{x}), \nu^{fd}(\bar{x}z)$	FDM'lerin etkin Young Modülü ve Poisson oranı
E^c, E^m	Sırasıyla FDM'lerin seramik ve metal yüzeylerinin Young modülleri
$e_{ij}(i, j = 1, 2)$	Referans yüzeydeki defoemasyonlar
f_1, f_2	Çökme ve Airy gerilme fonksiyonlarının genlikleri
FDM	Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme
FDM ₁	Seramik (Silikon nitrat) ve metal (Si ₃ N ₄ / SUS304) karışımından oluşmuş silindirik kabuk tipi
FDM ₂	Titanyum alaşımı ve zirkonyum oksit (Ti6Al4V/ZrO ₂) karışımından oluşmuş silindirik kabuk tipi
$F_i(i = 0, 1, \dots, 3)$	T (Kelvin) sıcaklığına bağlı katsayılar
h	Silindirik kabuğun kalınlığı
k	Hacim fraksiyon indeksi
K_1	Elastik zeminin taban reaksiyon katsayısı
K_2	Elastik zeminin kayma modülü
L	Silindirik kabuğun uzunluğu
$M_{ij}(i, j = 1, 2)$	Moment bileşenleri
M_{kr}	FDM ₁ ve FDM ₂ kabukların kritik burulma momenti
N	İki parametrelili zeminin birim alandaki tepki kuvveti
$N_{11}^0, N_{12}^0, N_{22}^0$	Momentsiz durumda membran kuvvetlerdir
n	Çevresel yönünde dalga sayısı
$N_{ij}(i, j = 1, 2)$	Kuvvet bileşenleri
$Q_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, 6)$	FDM malzemeden oluşan silindirik kabukların özelliklerine bağlı katsayılar
q	Dalgaların x_1 eksenine ile oluşturduğu açının tanjantı
R	Silindirik kabukların yarıçapı
S	Uniform pür burulma yükü
S_{kr}	Kritik burulma yükü
Si_3N_4	Silikon nitrat
SUS304	Paslanmaz çelik
$T(K)$	Sıcaklık katsayısı
V_c, V_m	Seramik ve metal fazların hacim fraksiyonları
ZrO_2	Zirkonyum oksit
w	Referans yüzeye normal doğrultuda içe doğru yönelik yer değiştirme
x_1, x_2, x_3	Koordinat eksenleri
$\bar{x}_1 = x_1 / L$	Boyutsuz uzunluk koordinatı
$\bar{x}_3 = x_3 / h$	Boyutsuz kalınlık koordinatı

$\varepsilon_{ij} (i, j = 1, 2)$

ν^c, ν^m

λ

$\tau_{ij} (i, j = 1, 2)$

Φ

Deformasyon bileşenleri

FDM'nin seramik ve metal yüzeyinin Poisson oranları

Kabuk uzunluğu, yarıçapı ve dalga sayısına bağlı
parametre

Gerilme bileşenleri

Airy gerilme fonksiyonu



1. GİRİŞ

Son yıllarda, yeni nesil kompozit malzeme sınıfı olarak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler), üstün mekanik özelliklere sahip olmaları nedeniyle inşaat, makine, havacılık ve diğer endüstrilerde dikkate değer bir ilgi kazanmıştır. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler Japonya'daki bir grup malzeme bilimcisi tarafından malzeme arayüzlerindeki özelliklerde uyumsuzluk gösteren lamine kompozit malzemelere alternatif olarak önerilmiştir (Koizumi, 1993). FDM'ler, belirli uygulamalar için arzu edilen özelliklere sahip olacak şekilde bilerek tasarlanmış yeni nesil kompozit malzemelerdir. FDM silindirik kabuklar, füzyon reaktörleri, depolama tankları, basınçlı kaplar, havacılık ve motor endüstrilerindeki genel aşınma ve korozyona dayanıklı kaplamalar dahil olmak üzere çalışma koşullarının ağır olduğu uygulamalarda sıkı olarak kullanılan yapı elemanlarından biridir. Bu nedenle, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerden oluşan silindirik kabukların stabilite ve titreşim analizleri pratik uygulamalar için çok önemlidir. Çoğu çalışmalar, eksenel veya dış yüklere maruz kalan FDM silindirik kabuklarının titreşim ve stabilite analizine odaklanmıştır (Shen, 2009a). Burulma yükü etkisi altında dairesel kabukların stabilite problemlerinin çözümü diğer basınç yüklerine, örneğin eksenel, dış ve hidrostatik basınç yüklerine kıyasla daha komplikedir. Bu nedenle burulma yükü etkisi altında FDM silindirik kabukların stabilite problemi diğer yükler etkisi altındaki stabilite problemlerine kıyasla çok az araştırılmaktadır.

FDM silindirik kabuklar, genellikle çalışma süreleri boyunca elastik ortamlarda bulunmakta ve çeşitli dış basınç yüklerine maruz kalmaktadır. Bu nedenle, FDM silindirik kabukların farklı dış basınç yükleri altındaki stabilite davranışlarının elastik ortamların etkisi göz önüne alınarak değerlendirilmesi mühendis ve bilim insanları için kilit bir konudur. Tez çalışmasında, burulma yüküne maruz iki parametrelili elastik zemin üzerindeki fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik kabukların stabilite davranışları araştırılmaktadır.

1.1. Tezin Önemi

FDM'ler, kademeli ve sürekli değişken bir kimyasal bileşim, mikroyapı ve malzeme özelliklerine sahip iki veya daha fazla bileşen fazından oluşan gelişmiş kompozitler sınıfıdır. Başlangıçta bir grup Japon bilim insanı tarafından 1984'te uzay mekiğinde agresif termal şok ortamının ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla tanıtılmıştır (Koizumi, 1993). O zamandan beri, FDM'lerin düzlem içi ve enine gerilmelerin kalınlık boyunca potansiyel olarak azaltılması, gelişmiş bir kalıntı gerilme dağılımı, gelişmiş termal özellikler, daha yüksek kırılma tokluğu ve azaltılmış gerilme yoğunluğu faktörleri gibi olağanüstü avantajları nedeniyle, FDM'lere hem akademik hem de mühendislik topluluklarında çok dikkat edilmektedir (Lannutti, 1994; Zuiker ve Dvorak, 1994; Kawasaki ve Watanabe, 1997; Leushake vd., 1997; Grujicic ve Zhang, 1998; Jackson vd., 1999; Lambros vd., 1999; Park vd., 2000; Wan vd., 2001; Ruigang vd., 2002; Kieback vd., 2003; Watanabe vd., 2003; Lee vd., 2005; Shen 2009a). FDM'lerin çeşitli yönleri ile ilgili bir dizi inceleme çalışmaları yıllar içinde yayınlanmıştır (Zoltan ve Bela, 2012; Thai ve Kim, 2015; Dai vd., 2016; Torres vd., 2016; Sofiyev, 2019; Cho vd., 2020; Lee vd., 2020; Li vd., 2020; Madan ve Bhowmick, 2020; Pelz vd., 2020; Sale vd., 2020; Suethao vd., 2020; Sun vd., 2020; Vlasov ve Volkov-Bogorodsky, 2020; Vasavi vd., 2021; Madan ve Bhowmick, 2021; Miteva ve Bouzekova-Penkova, 2021).

Mühendislik yapılarında ve bileşenlerinde burulma, eğilme, uzama ve kayma gibi ana yükleme modlarından biridir. Homojen ve heterojen dairesel kabukların burulma problemleri için analitik ve sayısal çözümler, kabukların burulmada yüksek mukavemet ve sertliğe sahip olması nedeniyle birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve bu ilgi halen devam etmektedir (Donnell, 1933; Ekstrom, 1963; Wang vd., 1992; Harding ve Louca, 1994; Walker vd., 1997; Tan, 2000; Mao ve Lu, 2002; Sofiyev, 2003; Sofiyev vd., 2003; Zhang ve Gengshu, 2004; Xu vd., 2010; Shakourivd, 2016). Modern havacılık, deniz, nükleer ve savunma endüstrilerinde ve basınçlı kaplarda, su kanallarında, boru hatlarında, muhafaza borularında ve diğer uygulamalarda kullanılan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden oluşan silindirik kabukların burulma yüklemelerindeki stabilite analizi, FDM'lerin pratik kullanımındaki temel problemlerden biri olabilir. Burulma yüküne maruz kalan silindirik kabukların stabilite ve titreşim problemlerinin çözümü, diğer yükleme durumlarına (eksenel yük,

yanal veya hidrostatik basınçlar) kıyasla daha komplike olduğu bilinmektedir (Volmir, 1967). Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden oluşan silindirik kabukların burulma yüklemelerindeki stabilitesi ile ilgili bazı çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Sofiyev ve Schnack, 2004; Sofiyev, 2005; Batra, 2006; Sofiyev, 2007; Arghavan ve Hematiyan, 2009; Shen, 2009b; Huang ve Han, 2010; Dung ve Hoa, 2013; Sun vd., 2013; Huang vd., 2014; Shen, 2014; Thai ve Kim, 2015; Huang vd., 2016; Mehralian ve Tadi Beni, 2016; Th  ng ve Nguyen-Thoi, 2016; Th  ng ve Duc, 2017; Pezeshky vd., 2018; Couto ve Vila Real, 2019; Nam ve Phuong, 2019; Rege ve Pavlou, 2019; Sahmani vd., 2019; Sofiyev, 2019; Sun vd., 2019; Soltani ve Asgarian, 2020). Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin oluşumu, termal ve mekanik özellikleri, uygulamaları ve onlardan oluşan yapı elemanlarının statik ve dinamik davranışları hakkında kapsamlı bilgiler Shen (2009a) kitabında bulunabilir.

FDM yapısal elemanlar çeşitli ortamlarda (tüneller, depolama tankları, basınçlı kaplar, su kanalları, boru hatları ve muhafaza boruları, proses ekipmanları ve diğ  er uygulamalar) kullanıldığından, elastik ortamların onların davranışları üzerindeki etkileri güvenlik açısından çok önemlidir. Elastik zeminlerin yapısını daha iyi tanımlayan ve daha sık kullanılan modellerden biri, iki parametrelili elastik zemin modeli veya Pasternak elastik zemin modelidir (Pasternak, 1954). İki parametrelili elastik zemin modelinin özel durumu, birbirine değmeyen paralel yaylar sistemi olarak tanımlanan tek parametrelili elastik zemin modeli veya Winkler elastik zemin modeli olarak adlandırılır (Kerr, 1964; Bajenov, 1975). Bu modellere ek olarak, diğ  er zemin modelleri hakkında temel bilgiler ve bunların yapısal elemanlarla etkileşimleri Vlasov ve Leontiev (1960) kitabında sunulmaktadır. Değişik elastik zeminler üzerine oturan FDM silindirik kabukların stabilite analizi üzerine bazı araştırmalar açık literatürde yayınlanmıştır (Sheng ve Wang, 2008; Shen, 2009c Shen vd., 2010; Sofiyev, 2010; Adigüzel, 2011; Bagherizadeh vd., 2011, Najafov vd., 2013; Dung ve Hoa 2015a ve 2015b; Ninh vd., 2015; Dung ve Nguyen Thi, 2016; Dung ve Minh Vuong, 2016; Ninh ve Bich, 2016; Duc ve Thiem, 2017; Nam vd., 2018; Nam vd., 2019; Minh Vuong ve Duc, 2019; Sofiyev ve Kuruoglu, 2013; Sofiyev vd., 2013; Babaei, 2019).

Malzeme gradyanı ve iki parametrelili elastik zemin etkileri göz önüne alındığında, burulmaya maruz kabukların stabilitesinin karmaşıklığı önemli ölçüde artmaktadır.

Yapılan kaynak taraması, iki parametrelili elastik zemin üzerine oturan ve burulma yüküne maruz kalan FDM silindirik kabuklarının stabilitesinin henüz yeteri kadar araştırılmadığını ortaya koymaktadır. Tez çalışmasında, bu sorunun çözümü için bir girişimde bulunulmaktadır. İki parametrelili elastik zemin üzerine oturan FDM silindirik kabukların temel denklemleri türetilmektedir. İki parametrelili elastik zemin üzerine oturan FDM silindirik kabuklar için kritik burulma yükü için formül elde edilmektedir. Son olarak silindirik kabuk parametrelerinin varyasyonlarının, malzeme gradyanını karakterize eden parametrelerin, iki parametrelili zeminin sertlik ve kayma modülünün kritik burulma yükü üzerindeki etkileri detaylı olarak araştırılmaktadır.

1.2. Tezin Amacı

Tez çalışmasında, burulma yüküne maruz iki parametrelili elastik zemin üzerindeki fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik kabukların stabilite davranışları araştırılmaktadır. İlk önce, konu ile ilgili kapsamlı kaynak taraması yapılarak tez çalışmasının literatürdeki yeri ve avantajları özetlenmektedir. Ardından problem formüle edilerek modellemeler yapılmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin matematiksel modelleri oluşturulduktan sonra Maple 14 programı kullanılarak iki ve üç boyutlu grafikleri çizilmektedir. Elastik zemin etkisi, iki parametrelili elastik zemin modeli şeklinde modellenmektedir (Pasternak, 1954). İki parametrelili elastik zemin modeli matematiksel olarak tanımlanmaktadır ve AutoCAD kullanarak çizimleri yapılmaktadır. Burulma yükü fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik kabuğun kenarlarına etkimektedir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden oluşan silindirik kabukların iki parametrelili elastik zemin ile etkileşimi görsel ve analitik olarak tasarlanmaktadır. Bir sonraki aşamada, Donnell kabuk teorisi kullanılarak, FDM silindirik kabukların doğrusal temel bağıntıları oluşturulmaktadır. Daha sonra bu bağıntılar ve iki parametrelili elastik zeminin matematiksel ifadesi kullanılarak burulma yüküne maruz FDM silindirik kabukların temel stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri türetilmektedir. Temel denklemlerin oluşumunda, Donnell tipi kabuk teorisi ve Kirchhoff-Love varsayımı kullanılmaktadır. Somut sınır koşulları için yer değiştirme ve Airy gerilme fonksiyonu için yaklaşım fonksiyonları seçilerek, stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri Galerkin yöntemi uygulanarak cebirsel denklemler sistemine

dönüştürölmektedir. Cebirsel denklemler sisteminden iki parametrelili elastik zemin üzerindeki FDM silindirik kabukların kritik burulma yükü için formöl elde edilmektedir. Elde edilen formölde özel olarak zeminsiz ortamlardaki FDM silindirik kabukların kritik burulma yükü için formöl bulunmaktadır. Kritik burulma yükünün minimum değeri lerinin bulunması için Maple 14 programı kullanılmaktadır. Tez çalışmasında, önerilen formölasyonun güvenilirliğı ve doğruluğı literatürdeki mevcut sonuçlarla karşılaştırılarak teyit edilmektedir. Son olarak silindirik kabuk karakteristiklerine, FDM tiplerine, hacim kesir oranının değışimine ve iki parametrelili zeminin sertlik katsayılarına bağı olarak yapısal tepkilerin hassasiyetini kontrol etmeyi amaçlayan sistematik bir araştırma yapılmaktadır.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu bölümde, tez çalışmasına ilişkin konuların, örneğin, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin oluşumu ve uygulamalarına, zemin üzerinde bulunan ve zemin etkisinin dikkate alınmadığı durumlarda homojen ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerden oluşan silindirik kabukların burulma yükü etkisi altındaki stabilitesine ilişkin çalışmaların özetleri sunulmaktadır. Bunların yanı sıra stabilite ve kabuk teorilerine ait kitapların özetleri yer almaktadır.

2.1. Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Malzemelerin Oluşumu, Modellenmesi ve Uygulamalarına İlişkin Kaynak Özetleri

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.

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.

Lannutti (1994) makalesinde, $\text{NiAlAl}_2\text{O}_3$ FDM'ler mükemmel termal şok özellikleri ve yüksek sıcaklıklarda ve gerilimlerde yumuşak, tırtıklı arıza gösterir. Bununla birlikte, basit katmanlı yapılar her zaman oda sıcaklığı derecesi kadar eğrilikten muzdariptir. Bileşik mimari tasarım için kılavuzlar geliştirmek için daha önce deneylerle iyi bir uyum sağladığı gösterilen artık gerinim minimizasyon modeli kullanılır. NiAl içeriğindeki kademeli değişiklikleri kullanan sezgisel zeminli yapılar

o kadar kullanışlı olmayabilir. Kompozit uygulamalar ve gelecekteki tasarım ihtiyaçları tartışılır.

Zuiker ve Dvorak (1994) makalesinde, orijinal biçiminde, Mori-Tanaka yöntemi, fazlardaki yerel alanların ortalamalarından, tekdüze genel gerilimlere, gerinim veya sıcaklık değişikliklerine maruz kalan istatistiksel olarak homojen kompozit malzemelerin sabit genel özelliklerini tahmin eder. Büyük toplam gerilim ve/veya sıcaklık gradyanlarını ve değişken takviye yoğunluğuna sahip fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeleri içeren uygulamalara izin vermek için yöntem burada doğrusal olarak değişken genel ve yerel alanlara genişletilir. Bu, yöntemin değişken takviye yoğunluğuna sahip istatistiksel olarak homojen olmayan malzemelere uygulanmasına yönelik ilk adım olarak, sabit genel özelliklere sahip istatistiksel olarak homojen katıların temsili hacimleri için yapılır. Doğrusal ve sabit alan yaklaşımlarının, küçük temsili hacimler için genel özelliklerin farklı tahminlerini sağladığı, ancak büyük hacimler için neredeyse aynı tahminler sağladığı gösterilmiştir.

İyileştirilmiş termal bariyer kaplamaları, motor çalışma verimliliğinin artmasına neden olabilir. Önemli bir sorun, çok katmanlı sistemlerin yüksek sıcaklıklarda termal olarak kararlı olmamasıdır. İnterdifüzyon, oksidasyon ve sinterleme gibi olaylar kaplamanın ömrünü sınırlandırır. Ömürleri uzatmak ve/veya servis sıcaklıklarını arttırmak için kaplama-substrat sistemlerinde çeşitli modifikasyonlar yapılabilir. Bazı çözümler, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme konseptinin kullanımını içerir. Bu yazıda, termal bariyer kaplama sistemlerinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler için potansiyel uygulamalar tartışılmakta ve en son teknolojiye genel bir bakış sağlayan araştırma sonuçları özetlenmektedir (Leushake vd., 1997).

Kawasaki ve Watanabe (1997) makalesinde, kademeli yapılar, eski günlere ait sıradan mühendislik malzemelerinde bulunabilir; bununla birlikte, arzu edilen fonksiyonları ve özellikleri elde etmek için bir malzemedeki kasıtlı kompozisyon ve/veya mikro yapı gradyanını uyarlamaya başlanmışsa, malzeme bir Fonksiyonel Gradyanlı Malzeme (FGM) olarak bilinir. FGM, kimyasal, biyokimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler üzerinde gradyan kullanarak birçok alanda uygulamalar için

büyük bir potansiyele sahiptir. Bu makale, termal stres gevşeme fonksiyonunun rolünün vurgulandığı termal bariyer malzemeleri üzerine yapılan büyük araştırma çalışmalarına özel atıfta bulunarak FGM kavramını kısaca açıklamaktadır. Bu tür FGM'nin toz metalurjik işlemesi, son faaliyetler temelinde gözden geçirilir.

Grujicic ve Zhang (1998) makalesinde, ABAQUS ticari sonlu eleman paketine bir Voronoi hücre sonlu elemanlar yöntemi (VHSEY) uygulanmış ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin (FDM'ler) mikro yapıya bağlı etkili elastik özelliklerini (Young modülü ve Poisson oranı) belirlemek için kullanılmıştır. VHSEY'i FDM'ye uygulamadan önce, FDM'nin mikro yapısı aşağıdaki gibi idealleştirilmiştir. FDM'deki iki materyalden herhangi birinin düşük hacimli fraksiyonlarında, mikro yapı, sürekli bir matris içine gömülü ayrı partiküllerden oluşacak şekilde alınır. İki materyalin hacim fraksiyonlarının karşılaştırılabilir olduğu FDM bölgesinde, mikroyapı materyallerin iç içe geçmiş kümelerinden oluşacak şekilde alınır. Ek olarak, her iki tip mikro yapı için, FDM'deki gözenekliliği hesaba katmak için boşluk kapanımları eklenir. VHSEY'in Ni/MgO ve Ni₃Al/TiC'ye uygulanması, yaygın olarak kullanılan Eshelby'nin eşdeğer dahil etme yöntemi ve kendi kendine tutarlı yöntem tarafından tahmin edilen değerlerden deneysel değerlerle önemli ölçüde daha iyi uyum içinde olan etkin elastik özelliklerin değerlerini vermiştir.

Bu çalışmada yazarlar, model fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin (FDM'ler) tasarımını, üretimini ve testini açıklamaktadır. Homojen olmayan özellik varyasyonları, seçici ultraviyole (UV) ışınması yoluyla malzeme özellikleri değiştirilerek oluşturulmuştur. UV ışığı altında hızlı bozunması nedeniyle FDM'leri yapmak için poli (etilen ko-karbon monoksit) (ECO) seçildi. Işınlanan ECO, artan ışınlama süresi ile daha sert, daha güçlü ve daha kırılğan hale gelir. Yazarlar, bir dizi gerilim testi yoluyla, UV maruziyet süresinin bir fonksiyonu olarak kullanılan belirli ECO'nun mekanik davranışını karakterize etmektedirler. Ayrıca, maruz kalma süresi kontrol edilerek, sürekli ve ayrı ayrı değişen mekanik özelliklere sahip numuneler üretilmiştir. Elde edilen derecelendirilmiş malzemeler, 150 mm genişliğinde bir numunede yaklaşık 160 MPa ila 250 MPa arasında değişen bir Young modülü ve genişlik üzerinde yaklaşık yüzde 900 ila yüzde 10 arasında değişen bir kırılmaya kadar olan bir gerinim sergilemektedir. Mikrosertlik ölçümleri, ayrı ayrı ve sürekli

değişen mekanik özellikler arasındaki farkları belirlemek için kullanılmıştır (Lambros vd., 1999).

Katı Serbest Biçimli İmalat (KSBI) süreçleri, yerel olarak kontrol edilen bileşime sahip parçalar üretme yeteneğini göstermiştir. Sınırdaki, üç boyutlu (3B) Baskı gibi işlemler, 100 µm'lik bir uzunluk ölçeğinde kompozisyon kontrolüne sahip parçalar oluşturabilir. Bu potansiyelden yararlanmak için, Parçaları Yerel Kompozisyon Kontrolü ile modellemek, değiştirmek ve işlemek için yeni yöntemler geliştirilmelidir. Bir parçanın geometrisini, topolojisini ve kompozisyonunu modellemeye yönelik bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu yaklaşım, katı modelin alt bölgelere bölünmesine ve her bölge ile analitik kompozisyon harmanlama fonksiyonlarının ilişkilendirilmesine dayanmaktadır. Bu harmanlama işlevleri, model boyunca bileşimi, KSBI makinesi için mevcut olan birincil malzemelerin karışımları olarak tanımlar. Bir parçanın yüzeyinden uzaklığın bir fonksiyonu olarak kompozisyonun belirtilmesi gibi, mesafe fonksiyonlarına dayalı tasarım araçları da tanıtılmaktadır. Son olarak, maksimum ve minimum konsantrasyonları sınırlayan tasarım kurallarının rolü tartışılmıştır (Jackson vd., 1999).

Toz metalurjisi ve seramik alanındaki fonksiyonel gradyan malzemeler (FGM'ler) veya iletişim için dereceli indeksli plastik optik fiberler (ID-POF'ler) gibi bazı uygulamalar için uzamsal olarak değişen özelliklere sahip nesneler genellikle arzu edilir. FGM'ler durumunda, kompozit malzemelerin malzeme bileşimi uzamsal olarak değişebilirken, ID-POF'lar durumunda kırılma indisi radyal yönde sürekli olarak değişir. Bu tür nesnelerin kendine özgü özelliği nedeniyle, çok özel işlevlere sahip olabilirler. Bir optik fiber, belirli bir kırılma indisi profiline sahip olduğunda, daha yüksek bant genişliği iletişimlerine karşılık gelen, birim zaman başına daha fazla optik sinyal iletebilir. Mekansal olarak değişen özelliklere sahip nesneler kavramı, çeşitli uygulamalar için büyük bir potansiyele sahipken, en büyük engel, fabrikasyon tekniklerinin sınırlı mevcudiyeti olmuştur. FGM'ler için "santrifüj döküm" ve ID-POF'lar için "arayüz-jel polimerizasyon tekniği" gibi bazı yöntemler mevcut olsa da bunların yetenekleri hala sınırlıdır ve daha fazla geliştirme gerektirmektedir. Bu yazıda, radyal olarak değişen özelliklere sahip silindirik nesneler için yeni bir üretim yöntemi deneysel bir onayla tanıtılmaktadır. Bu

yöntemin ID-POF'lar üretebildiği gösterilmiş olsa da uygulanabilirliği ID-POF'lar ile sınırlı olmayabilir (Park vd., 2000).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin (FDM) plazma püskürtülmesi için bir simülasyon ve görselleştirme sistemi sunmaktadır. Plazma gazı akışı ve kimyası için iyi doğrulanmış bir modeli içeren yakın zamanda değiştirilmiş CFD kodu LAVA-P kullanılmaktadır. Parçacık hareketi ve yörüngesi, sürüklenmeyi ana itici güç olarak kabul ederek bir Lagrange formülasyonu içinde tanımlanır ve parçacık-alev etkileşimi için yakın zamanda geliştirilmiş bir model kullanılarak parçacık erimesi, buharlaşması ve yeniden katılaşması düşünülür. Yüksek sıcaklıklı plazma ile ilişkili sürekli olmayan ve değişken özellik etkilerine ek olarak, partikül buharlaşmasının partikül momentumu ve ısı transferi üzerindeki etkileri de dikkate alınır. Çok çeşitli boyut dağılımları için NiCrAlY ve ZrO₂ tozları için hesaplamalar yapılır. Güç seviyelerinin ve H₂'nin akış hızının plazma akış alanı ve dolayısıyla parçacık hızı ve sıcaklığı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Öngörülen hız ve sıcaklık alanları, benzer püskürtme koşulları altındaki ölçümlerle uyumludur. Özel bir kurum içi yerleşik süreç animasyonu ve görselleştirme algoritması yardımıyla, enjektör sayısı, enjektör konumu ve enjeksiyon hızı gibi toz enjeksiyon koşulları araştırılır ve belirli bir farklı dağılıma sahip kaplamalar elde etmek için türler optimize edilebilir (Wan vd., 2001).

Kademeli yapı konseptini işlenebilir Si₃N₄ seramiklerin tasarımına uygulayan, işlenebilir seramik kompozitlerin yeni bir tasarım yöntemi önerildi. Silisyum nitrür / heksagonal bor nitrür (h-BN) fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler), toz katmanlama yöntemi kullanılarak altıgen BN miktarının hizalanmasını değiştirerek 2 saat boyunca 1750 °C'de sıcak presleme ile imal edilmiştir. Si₃N₄/h-BN kompozitinin geliştirilmiş işlenebilirliği, katmanlı yapı altıgen BN'nin eklenmesine bağlanabilir. Altıgen BN, c eksenine dik olan mükemmel bölünme düzlemlerine sahiptir. İşleme kolaylığı, kristal kenetlenme derecesine bağlıdır; dolayısıyla h-BN kristallerinin hacim içeriği ve bunların en boy oranı işlenebilirliği etkiler. Böyle bir tasarım, kompozitin işlenebilirliğini iyileştirebilir ve aynı zamanda Si₃N₄ seramiğin mekanik özelliklerinden çok fazla ödün vermemesini sağlayabilir. Sıcak presleme sinterleme sırasında h-BN ve β -Si₃N₄ dokusu gözlemlenmiştir (Ruigang vd., 2002).

Alman öncelik programı “Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM)” nin işleme teknikleri alanındaki başarılarına genel bir bakış sunulmaktadır. Metal eriyiklerini içeren yerleşik toz prosesleri ve teknikleri açıklanmakta ve dereceli polimer işleme alanındaki son gelişmeler göz önünde bulundurulmaktadır. Mikroyapıda tahmin edilebilir gradyanlara sahip hatasız parçaların üretimi için gradyan oluşumu, sinterleme ve kurutmanın modellenmesinin önemi tartışılmış ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin işlenmesinde sayısal simülasyonların başarılı bir şekilde uygulanmasına ilişkin örnekler verilmiştir (Kieback vd., 2003).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin (FDM'ler) araştırmalarındaki son faaliyetler, derecelendirilmiş mikro yapı ve fonksiyonlar için üretim tekniklerine vurgu yapılarak gözden geçirilmiştir. Araştırma faaliyetleri, tasarlanan işlevleri karşılayan kademeli yapıların işlenmesine odaklanmıştır. FDM'lerin pratik uygulamalarının birkaç örneği, bu tür malzeme için tipik olan fabrikasyon yaklaşımlarını göstermek için bu yazıda anlatılmıştır. Makalenin geri kalanı, Japonya Eğitim Bakanlığı tarafından desteklenen yakın zamanda tamamlanmış bir ulusal projeyi özetlemeye ayrılmıştır. FDM'lerle ilgili fizik, kimya, tıp bilimi ve biyoloji gibi çeşitli alanlardaki araştırma ve gelişmeler kısaca gözden geçirilmektedir (Watanabe vd., 2003).

Gaz türbini uygulamalarında kullanılan termal bariyer kaplamalar için fonksiyonel olarak derecelendirilmiş metal-seramik kompozit mikro yapılar oluşturma kavramını araştırmaktadır. Termomekanik bir perspektiften bakıldığında, bu konsept, termal bariyer kaplamalarının ömrünü ve güvenilirliğini önemli ölçüde iyileştirme imkânı sunar. Bununla birlikte, önceki araştırmalar, bazı metal-seramik kompozit mikro yapıların sergilediği oksidatif kararsızlık nedeniyle ilerlemenin bir şekilde sınırlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu çalışma, gerçekçi uygulama ortamları için kimyasal olarak kararlı, ancak mekanik olarak dayanıklı, kademeli metal-seramik mikro yapıların hazırlanmasıyla ilgili bazı malzeme kriterlerini ve araştırma konularını ele almaktadır (Lee vd., 2005).

Zoltan ve Bela (2012) makalesinde, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM) mukavemete karşı aşınma mukavemeti veya elastikliğe karşı sertlik gibi

çeşitli makroskopik, tipik olarak çelişen özellikleri birleştirir. Yüksek oranlarda intermetal bileşikleri içeren bileşimlerin kullanımı, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapılar üretilerek genişletilebilir. Bu makale, statik ve santrifüj döküm durumunda %20 Ni ile ötektik bir Al-Ni alaşımında intermetal fazın boşaltılmasını teorik olarak ve deneysel tespitler aracılığıyla analiz eder. Deneysel testler, dönmenin santrifüjlü döküm parçalarının yarıçapı boyunca fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler elde etme olasılığını doğrulamıştır.

Biyomedikal uygulamalar (farklı eklem ve diş restorasyonlarında yer alan kortikal ve trabeküler kemiklerin değiştirilmesi) için potansiyel olarak uygun olan radyal dereceli gözenekli titanyum silindirler, toz metalurjisi tekniklerine dayanan yeni bir tek eksenli ve sıralı sıkıştırma cihazı ile geliştirilmiştir. Silindirlerin makroyapısal, mikroyapısal ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. Elde edilen mikro yapı, titanyum implantların en önemli dezavantajlarından birini, yani stres-koruyucu fenomene bağlı kemik erimesini çözmek için yeni bir biyo-ilham/biyo-mimetik yaklaşımdır. Ek olarak, geliştirilen cihazın, geleneksel toz metalurjisi imalatında yapısal bütünlüğü basit, ekonomik ve tekrarlanabilir bir şekilde özelleştirmede benzersiz avantajlara sahip olduğu kanıtlanmıştır (Torres vd., 2016).

"Parametrik uzayda asimptotik ortalama" olarak adlandırılan, hızlı salınan yarı periyodik katsayılara sahip diferansiyel denklemlerin asimptotik bir ortalaması geliştirilmiştir. Düzgün değişen mikro yapılara sahip yapısal olarak heterojen termoelastik ortama karşılık gelen denklem sistemi dikkate alınır. Bu tür malzemeler genellikle fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler olarak kabul edilir. Termoelastik denklem sisteminin katsayılarına "hızlı" ve "yavaş" şeklinde iki tür değişken eklenerek bunların tanımlaması yapılır. Hızlı değişkenler, periyodik düzenlemelerini oluşturan homojensizliklerin geometrisini tanımlar. Ek değişkenler, inklüzyonların periyodik yapısının düzgün bir uzaysal varyasyonunu tanımlamaya, yani önerilen yaklaşım içinde fonksiyonel olarak derecelendirilmiş özelliklere sahip çeşitli malzemeleri tanımlamaya izin verir. Ek olarak, katsayılar, boşlukta belirli bir düzenli dağılıma sahip olan sıcaklığa da bağlı olabilir. Bu bağımlılığın ayrı parametrede oluşturulması pratikte önemli olduğu için anlamlıdır. Asimptotik ortalamanın, ele alınan denklem sisteminin katsayıları için düzgün olmayan periyodik bağımlılıklarını hızlı değişkenlerin fonksiyonları aracılığıyla parametrik

olarak çözdüğü gösterilmiştir. Bu tür yapısal olarak heterojen malzemeler için iki seviyeli model sistemi ortalamanın bir sonucu olarak formüle edilir ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ve termal olarak bağlı olanlar dahil olmak üzere termomekanik özelliklerin doğru tanımlanmasına yönelik bir algoritma bulunabilir. Papkovich-Neuber teorisine dayalı birleşik sayısal-analitik blok yöntemi, rastgele yapılara sahip düşük seviyeli problemler için önerilmiştir (Vlasov ve Volkov-Bogorodsky, 2020).

Çoklu malzeme lazer tozu yatak füzyonu (ÇMLTYF), eklemeli imalatın uygulama aralığını genişleten yakın zamanda geliştirilmiş bir teknolojidir. Birbirine benzemeyen malzeme etkileşimlerini deneyimleyen ÇMLTYF sürecindeki fiziksel olaylar daha karmaşıktır. Bu çalışmada, tek izli ÇMLTYF eriyik havuzu davranışını simüle etmek için orta ölçekli bir hesaplama akışkan dinamiği modeli geliştirilmiştir. IN718/Cu10Sn toz yataklarının erime özellikleri araştırılmıştır. Karışık bir IN718/Cu10Sn toz yatağının eritilmesinde, farklı metallerin termal-fiziksel özelliklerindeki, özellikle erime noktaları, lazer ışını soğurma gücü ve termal farklılıklar nedeniyle, artan Cu10Sn fraksiyonu ile eriyik havuzunun sıcaklığının azaldığı gösterilmiştir. Erimiş Cu10Sn ve eritilmemiş veya kısmen erimiş In718'e sahip birbirine benzemeyen tozların karıştırıldığı toz yatağı üzerinde, katılaşmış bir yolun kenarında sert bir lehim bölgesi oluşturulur, bu da yol boyutlarında dalgalanmalara neden olur. Karıştırılmamış farklı toz yatakları için, lazer noktası farklı tozların ara yüzeyiyle örtüşürse asimetrik bir eriyik havuzu ve katılaşmış iz oluşur. Birden çok yollu eritme işleminde tarama aralığının, birbirine benzemeyen karışık bir toz yatağı üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Hat boyutlarındaki önemli dalgalanma nedeniyle, kapak aralığının adaptif olarak ayarlanması gerektiğini ve yetersiz hatlar arası füzyonu önlemek için erimiş bölgenin genişliğinden daha az olması gerektiği belirtilir (Sun vd., 2020).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler) geniş bir araştırma alanıdır ve bugün malzeme bilimi ve mühendisliği toplumunda büyük ilgi görmektedir. Son yıllarda, FDM'lerin üretim yöntemlerinde dikkate değer gelişmeler yaşandı. FDM'ler, gelenekselden ileri düzeye kadar birçok iyi bilinen işleme tekniği kullanılarak üretilebilir. Bu araştırma, FDM'ler için üretim yöntemlerine genel bir bakış sağlamakta ve böylece 30 yılı aşkın bir süredir mevcut literatüre dayalı olarak

bu yöntemlerin temel zorluklarını ve güçlü yanlarını açıklamaktadır. Ayrıca, bu eleştirel inceleme, bu malzemelerin düzgün bir şekilde tasarımı ve üretimi için gerekli araştırma için çeşitli uygulamaların ve gelecekteki eğilimlerin kapsamlı bir özetini verir. Mevcut makalenin beklenen bulguları, FDM'ler için gelecekteki üretim ve analiz araştırmaları için bir kilometre taşı olarak kabul edilebilir ve bu kapsamda araştırmacılar, tasarımcılar ve üreticiler için faydalıdır (Saleh vd., 2020).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler) ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapılar (FDY'ler), kendine özgü özellikleri ve avantajları olan özel gelişmiş kompozit türleridir. Bu makale, çok yönlü fonksiyonel özelliklere sahip gradyan bileşenleri imal edebilen fonksiyonel olarak derecelendirilmiş katmanlı imalatın (FDKİ) tasarım kriterlerini gözden geçirmektedir. Geleneksel geometrik tabanlı tasarım konseptleri, FDKİ için sınırlı potansiyele sahiptir ve farklı yerlerde belirli derecelendirilmiş özelliklere sahip gradyan bileşenleri geliştirmek için çok ölçekli tasarım konseptlerine (geometrik modellemeden mikro yapısal tasarıma kadar) ihtiyaç vardır. FDM'ler ve FDY'ler, havacılık, otomotiv, biyomedikal implantlar, optoelektronik cihazlar, enerji emici yapılar, jeolojik modeller ve ısı eşanjörleri dahil olmak üzere daha geniş bir endüstriyel sektör ve uygulama yelpazesi için büyük ilgi görmektedir. Bu derleme, FDM'lerin ve FDY'lerin tasarımı ve oluşturulması açısından gelecekteki araştırmalar için çeşitli fabrikasyon fikirlerine ve önerilerine genel bir bakış sunar ve çok çeşitli bilimsel alanlardan yararlanır. Çok ölçekli fonksiyonel kademeli eklemeli imalat (FDKİ) tasarımı gözden geçirilir ve FDKİ teknolojilerinin son durumu ve biyomedikal implantlar, optoelektronik cihazlar, enerji soğuran yapılar, jeolojik modeller ve ısı eşanjörlerindeki çok işlevlilikler ve potansiyel uygulamalar özetlenir. FDM / FDY'nin tasarımı ve oluşturulması açısından gelecekteki araştırmalar için çeşitli fabrikasyon önerilerine genel bir bakış da sunulmakta ve çok çeşitli bilimsel alanlardan yararlanmaktadır (Li vd., 2020).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş MWCNT-HA kompozitleri, hetero-agregasyon ve kıvılcım plazma sinterleme (KPS) işlemi ile üretilmiştir. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş MWCNT-HA kompozitleri, HA matrisindeki MWCNT'leri ayrıştırmak için 1373 K'da hava koşullarında basınçsız olarak sinterlenmiştir. Sonuç olarak, yapısal olarak derecelendirilmiş gözenekli hidroksiapatit (HA), gradyan

olarak dahil edilmiş çok duvarlı karbon nanotüplerin (MWCNT'ler) hacimce %0-5 oranında eklenmesi ve ardından ayrıştırılmasıyla başarılı bir şekilde üretilmiştir. Numunenin mikroyapısı ve Raman spektrumları, HA matrisinde hiçbir MWCNT bulunmadığını açıkça göstermiştir. Ayrıca, yapısal olarak derecelendirilmiş gözenekli HA'nın gözenek ve tane boyutu, artan MWCNT içerikleri ile azalmıştır. Süzölmüş MWCNT'lerin MWCNT ayrışması ile üretilen CO₂ gazı için bir gaz giderme yolu oluşturması ve ayrıca HA'nın tane büyümesini engellemesi beklenmektedir. Sonuçlar, bu gelişmiş, katmanlı, yapı kontrollü, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş MWCNT-HA kompozitlerinin ve yapısal olarak derecelendirilmiş gözenekli HA kompozitlerinin, çeşitli yeni ve zorlu yapısal ve biyomalzeme uygulamaları için umut verici olduğunu göstermektedir (Cho vd., 2020).

Madan ve Bhowmick (2020) makalesinde, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, istenilen uygulamalara göre farklı malzemelerin derecelendirildiği özel kompozit sınıfıdır. Derecelendirme varyasyonuna bağlı olarak ister sürekli ister kesikli olsun, üretim süreçleri kategorilere ayrılır. Toz metalurjisi prosesi, lineer, hiperbolik, üssel vb. gibi her türlü derecelendirmenin verilmesine izin veren, ayrı malzeme varyasyonu üretmenin bir yoludur. Bu incelemenin amacı, katı hal prosesleri kullanılarak üretilen farklı malzeme kombinasyonlarına ve bunların P/M sürecinde sıkıştırma yükü ve sinterleme sıcaklığı gibi ilgili parametreler ve kıvılcım plazma sinterleme (KPS) durumunda sinterleme sıcaklığı, basıncı ve bekleme süresi hakkında genel bir bakışı vermektir. KPS işlemi ile çok daha kısa sürede yüksek bağıl yoğunluğa ulaşılır. Farklı malzeme kombinasyonları için farklı olan, istenen özellikleri ve hatasız ürünü elde etmek için işleme parametrelerinin ayarlanması zorunludur. Okuyucuların işlevsel gereksinimlerine göre seçtikleri malzemeyi belirlemelerine yardımcı olacak, uygulamalarıyla birlikte malzeme kombinasyonu verilmiştir. Çoğunlukla P/M kullanılarak üretilen metal-seramik dereceli malzeme kombinasyonları ile ilgili literatür mevcuttur ve sonuçları, saf formdaki malzemelere kıyasla sertlik, eğilme mukavemeti, elektriksel iletkenlik, tokluk ve tribolojik faydalar gibi gelişmiş mekanik özellikler gösterir.

Polimer köpükler, otomotiv endüstrisinde yapısal parçalar, inşaatta yalıtım, sandviç kompozitler için çekirdek malzemeler ve şiltelerde yastıklama gibi çeşitli uygulamaları bulunan önemli bir mühendislik malzemesi sınıfıdır. Üretilen bu

köpüklerin büyük çoğunluğu gözeneklilik ve yapısal özellikler bakımından homojendir. Buna karşılık, hücre malzemeler de doğada her yerde bulunurken, doğa yoğunlukla heterojen köpükler, örneğin bambu gibi selülozik bitki gövdeleri veya bir insan uyluk kemiği üretir. Bu tür tasarlanmış gözeneklilik dağılımına (dereceli yoğunluk yapısı) sahip olan köpükler, faydalı özellik gradyanlarına sahiptir ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş köpükler olarak adlandırılırlar. İşlevsel olarak derecelendirilmiş polimer köpükler, polimer köpük teknolojisinde ortaya çıkan önemli yeniliklerden biridir. Enerji emilimi, malzemenin daha verimli kullanımına ve kasklar ya da doku onarıcı iskeleler gibi belirli uygulamalar için daha iyi tasarım özelliklerinde iyileştirme sağlarlar. Burada, polimer köpükler için temel işleme parametrelerine genel bir bakışın ardından, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş polimer köpüklerin işlenmesindeki son gelişmeler ve bunların ortaya çıkan yapıları ile özellikleri araştırılmaktadır. İşlemler, köpüğün oluşturduğu farklı yüzey malzemelerinin kullanılması kadar basit, mikro akışkanların kullanılması kadar karmaşık olabilir. Ayrıca, uygulama bazında gözenek dağılımının (tam) kontrolüne ve uyarlanmasına izin veren uygulanabilir jenerik süreçlerin geliştirilmesi olan, gelecekteki araştırmalarda ele alınması gereken temel zorlukların altı çizilmektedir (Suethao vd., 2020).

Selüloz, kitin ve pektin, dünyada en bol bulunan doğal malzemelerden üçüdür. Buna rağmen, bu biyopolimerlerle büyük ölçekli eklemeli üretim yalnızca sınırlı uygulamalarda kullanılır ve sıklıkla kapsamlı arıtma işlemlerine veya plastik katkı maddelerine dayanır. Biyopolimerlerin çok malzemeli üç boyutlu baskısı için dijital üretim ve tasarım yaklaşımında yeni gelişmeler sunulmaktadır. Spesifik olarak, hesaplamalı ve dijital imalat iş akışımız- sıralı çok malzemeli eklemeli imalat- sadece tek bir ekstrüder kullanarak sürekli dereceli geçiş bölgelerine sahip biyopolimer kompozitlerin yapımını sağlar. Bu yöntem, milimetreden metreye kadar değişen uzunluk ölçeklerinde yapılar üretmek için uygulanmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak oluşturulan malzemeler arasındaki geçiş bölgeleri, aynı bileşimin homojen karışımları ile karşılaştırılabilir mekanik özellikler göstermiştir. Hesaplamalı bir iş akışı ve fiziksel sistem desteği, çok çeşitli potansiyel uygulamalarla yeni ve esnek birçok malzemeli eklemeli üretim şekli sunmaktadır (Lee vd., 2020).

Zırh, motor bileşenleri ve aşındırıcı, korozyon ve yüksek sıcaklık ortamları için aşınan parçalar dahil olmak üzere birçok uygulamada gelişmiş seramikler gereklidir. Bu malzemelerdeki heterojen yapılanma, yapısal işlevsellik için hayati önem taşıyan hasar toleransını iyileştiren dışsal mekanizmaların kilidini açma potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte, geleneksel seramik tozu işleme ve şekillendirme teknikleri, tasarım alanını kimyasal olarak homojen mikro yapılara sahip basit geometrilerle sınırlar. Bu nedenle, özel kompozisyon ve mezo yapıya sahip çok fazlı karbür numuneleri imal etmek için doğrudan mürekkep yazımı (DMY) ile katkı maddesi imalatı uygulanmıştır. Seramik partikül süspansiyonlarından oluşan birden fazla mürekkebin tek bir nozul aracılığıyla aynı anda ekstrüzyonuna ve karıştırılmasına izin vermek için özel bir DMY sistemi geliştirilmiştir. Mükemmel mekanik özelliklerinden dolayı bu çalışma için bor karbür (B₄C) ve silisyum karbür (SiC) seçilmiştir. Sulu B₄C ve SiC mürekkepleri hacimce %47,5 seramik içeriğine yüklenmiş ve verim-psödoplastik davranış göstermektedir. Karbür mürekkepler benzer reolojik davranış (akma gerilimi ve viskozite) sergileyecek şekilde karakterize edilip modifiye edilmiş ve ayrı ya da sürekli bileşim varyasyonlu B₄C-SiC parçaları üretmek için kullanılmıştır. Örnekler 35 MPa ve 1950 °C'de sıcak preslenerek 20–23 GPa sertlik (Knoop) değerleri ile neredeyse tam yoğunluk sağlamaktadır. Aktif sıralı karıştırma yoluyla elde edilen özel heterojenlik, mikroyapısal karakterizasyonla ortaya çıkar. Farklı bileşimli numunede gözlenen çatlama, termal olarak indüklenen artık gerilimin sonucudur ve analitik hesaplamalarla açıklanmaktadır (Pelz vd., 2020).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme (FDM) araştırmalarındaki son gelişmelere genel bir bakış sunulmaktadır. Makale ayrıca, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin üretimi ve modellemesinin geliştirilmesi üzerine bilimsel alanda yürütülen temel araştırmaları kapsamaktadır. Mevcut çalışmanın mantığı, FDM'lerin malzeme seçimi, işleme teknikleri, analitik modelleme ve uygulamalarını vurgulamaktır. Bununla birlikte, bu malzemelerin bilimsel ve teknolojik alanların çeşitli yönleri konusunda geliştirilmesiyle ilgili zorluklar ele alınmıştır (Vasabi vd., 2021).

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler) şu anda endüstri ve bilim tarafından büyük ve sürekli artan bir ilgi konusudur ve avantajları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu avantajlar, benzersiz özelliklerinden ve endüstri,

bilim ve günlük yaşamın çeşitli alanlarındaki birçok gerçek ve potansiyel uygulamalarından kaynaklanmaktadır. Bu literatür inceleme yazısında, kısaca FDM'lerin bazı özelliklerine ve havacılık ve ilgili endüstrilerde FDM'nin mevcut ve genişleyen gelecekteki uygulamalarına odaklanılacaktır. Eleştirel bir tartışma sunulmaktadır. Bu alandaki çalışmaların gelecekteki olası genişlemesi değerlendirilmektedir (Miteva ve Bouzekova-Penkova, 2021)

2.2. Burulmaya Maruz Homojen Kabukların Stabilitesine İlişkin Kaynak Özetleri

Donnell (1933) raporunda, duvarların kararsız hale geldiği yuvarlak ince duvarlı bir boru üzerindeki burulma için teorik bir çözüm geliştirilmiştir. Bu teorelin sonuçları, tüm durumları kapsayan birkaç basit formül ve eğri ile verilmektedir. Dengenin diferansiyel denklemleri, daha önce bulunandan daha basit bir biçimde türetilmiştir, birçok ögenin ihmal edilebileceği gösterilmiştir.

Ekstrom (1963) çalışmasında hem bireysel hem de birleşik yükler için hidrostatik basınç ve burulma altında dairesel silindirik kabukların elastik burkulma davranışını belirlemek için yapılan bir dizi test için sonuçlar verilmiştir. Boyutsuz etkileşim eğrileri, silindirlerin geometrik parametreleri açısından sunulur ve genel olarak, $P+T=1$ parabolünü takip eder; burada P ve T sırasıyla boyutsuz kritik hidrostatik ve burulma yükleridir.

Elastik silindirik kabukların burulma burkulması için deneysel fenomen ve teorik analiz verilmiştir. Deneye göre, kabuk daha uzun olduğunda burkulma sonrası deformasyonun tüm uzunluğu işgal etmediği anlaşılmıştır. Teorik hesaplamada sadece normal yer değiştirme sınır koşulu dikkate alınır. Mevcut hesaplama sonuçlarını Yamakis teorisinin doğru sonucu ve mevcut deneyin sonuçları ile karşılaştırarak, eksenel ve çevresel sınır koşulunun etkisinin daha az önemli olduğu gösterilmiştir (Wang vd., 1992).

Harding ve Louca (1994) makalesinde, açık deniz platformlarında bulunanlara tipik geometrik özelliklerle dış basınca maruz kalan silindirik kabuklardaki halka takviyelerinin burulma davranışına ilişkin sonuçları sunmaktadır. Çok çeşitli

sertleştirilmiş kabuk geometrileri ve farklı takviye şekilleri için tepe yükler, boşaltma eğrileri ve kritik burkulma yükleri dahil olmak üzere yük sapma eğrilerini elde etmek için tam bir doğrusal olmayan sonlu eleman paketi kullanılmıştır. Başlangıç kusurunun, sertleştirici narinliğinin ve halka aralığının etkileri araştırılmıştır. Sunulan sonuçlar, mevcut sınırlı deneysel sonuçlar ve mevcut tasarım kodları ile karşılaştırıldı ve araştırılan faktörler hakkında bir tartışma verildi.

Simetrik olarak lamine edilmiş bir kabuğun çok amaçlı tasarımı, eksenel ve burulma burkulma yüklerinin maksimizasyonu olarak tanımlanan hedeflerle elde edilir. Kat açısı, optimize edici değişken olarak alınır ve performans indeksi, tasarım probleminin Pareto optimal çözümlerini elde etmek için bireysel hedeflerin ağırlıklı toplamı olarak formüle edilir. Tek amaçlı tasarım sonuçları elde edilir ve çok amaçlı tasarımıyla karşılaştırılır. Ağırlıklandırma faktörlerinin optimal tasarım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Optimal fiber açısının ve performans indeksinin silindir uzunluğuna, yarıçapına ve duvar kalınlığına bağımlılığını gösteren sonuçlar verilmiştir (Walker vd., 1997).

Tan (2000) çalışmasında, klasik ince kabuk teorisine ve birinci dereceden kesme deformasyon kabuk teorisine dayanarak, bu yazıda ince ve kalın dönüş kabuklarının burulma burkulma yüklerini tahmin etmek için iki model geliştirilmiştir. Bir devrim kabuğunun malzeme özelliği, genel bir lamine kompozit türü olarak tanımlanır ve her türlü kinematik sınır koşulunun tam olarak uygulanabileceği geometrisini tanımlamak için doğal koordinatlar kullanılır. Analizde bir devrim kabuğunun eksen simetrik özelliğini etkin bir şekilde kullanmak için, her bir alt yapı seviyesinde sadece bir alt yapının yer aldığı çok seviyeli bir alt yapı tekniği kullanılır, böylece gerçek hesaplamada problemin boyutu her zaman çok küçük tutulur. Dairesel bir silindirin, bir konik kabuğun, bir eliptik hiperboloid kabuğun ve bir elipsoid kabuğun burulma burkulma davranışları bu modeller kullanılarak incelenmiştir.

Mao ve Lu (2002) makalesinde silindirik kabukların burulma altında elastik-plastik burkulması, çeşitli sınır koşulları altında derin bir kalın kabuk modeli ile analiz edilmiştir. 'Derin' kelimesi, genel denge denklemlerinde burulma kuvvetini içeren üç doğrusal olmayan terimin hepsinin burkulma analizi için tutulduğu anlamına gelir. Ancak Donnell tipi sığ kabuk teorisinde, bu tür terimlerden sadece biri korunur.

'Kalın' kelimesi, gerinimlerin ve stres sonuçlarının hesaplanmasında faktörün $(1+z/R)$ korunduğu anlamına gelir. Bu faktör, enine kesitin yamuk benzeri şeklinden kaynaklanır ve genellikle ince kabuk teorisinde ihmal edilir. Sınır koşulları için, sadece yer değiştirmeler ve dönmeler cinsinden olan geleneksel geometrik sınır koşulları değil, aynı zamanda kuvvetler ve momentler cinsinden olan mekanik sınır koşulları da dikkate alınır. Sunulan örneklerde, kritik burulma değerlerine doğrusal olmayan terimlerin etkisi, $(1+z/R)$ faktörünün etkisi ve mekanik sınır koşullarının etkisi değerlendirir.

Zhang ve Gengshu (2004) bu makalede, ince duvarlı elemanların eğilme-burulma burkulma teorisini kurmak için şu anda mevcut teknikleri özetlemektedir. Mevcut tüm yöntemlerin toplam potansiyellerinde doğrusal olmayan bir yük potansiyeli oluşturduğu, ancak katı bir yapının kararlılığı için klasik varyasyon ilkesine dayalı olarak böyle bir yük potansiyelinin dahil edilmemesi gerektiği bulunmuştur. Bu durum, mono-simetrik kesitli kirişlerin burkulma teorilerinde yaygın olarak referans verilen bazı monograflar arasında bir tutarsızlığa yol açmıştır. Bu makale, klasik varyasyon ilkesine ve ince duvarlı kabuklar teorisine dayanan ince duvarlı elemanların eğilme-burulma burkulması için yeni bir teori sunmaktadır. Doğrusal olmayan yük potansiyeli dahil edilmemiştir, ancak yeni bir terim: daha önceki ince duvarlı elemanlar teorilerinde ihmal edilmiş olan enine gerilimlerden doğrusal olmayan gerinim enerjisi eklenmiştir. Doğrusal olmayan yük potansiyelinin katkıya eşdeğer olmadığı bulunmuştur. Yukarıda belirtilen tutarsızlığa neden olan mono-simetrik kesitli kirişler için enine gerilmelerin hesaplanması. Karşılaştırma, pratikte karşılaşılan çoğu durumda önerilen teori ile geleneksel teorisinin aynı olduğunu göstermektedir.

Bu makalede, burulma altında silindirik kabuğun yerel burkulması tartışılmaktadır. Kesme dalgasının yayılımını analiz etmek için Hamilton sistemi yaklaşımı kullanılır. Bu sistemde kritik burulma yükleri ve burkulma modları, artan mertebelerin özdeğerleri ve özçözümleri problemine indirgenmiştir. Burkulma modları, yerel burulma burkulma modları ve helisel burkulma modları olmak üzere iki türe ayrılır. Kısa süreli kayma dalgası yayılımı için yerel burulma burkulması kolayca meydana gelir. Aksine, dalga daha uzun bir süre boyunca yayıldığında sarmal burkulma

modları ortaya çıkar ve bu modlar birinci dereceden özçözümüne karşılık gelir (Xu vd., 2010).

Basit mesnetli sınır koşulları ile üniform burulma altında genellikle lamine konik kabukların burkulması incelenmiştir. Kabuğun potansiyel gerinim enerjisini elde etmek için Donnel tipi gerinim yer değiştirme ilişkileri kullanılır ve burulma tarafından yapılan dış işi elde etmek için membran stabilite denklemi uygulanır. Ana denklemleri çözmek için Ritz yöntemi kullanılır ve kritik burkulma yükleri elde edilir. Sonuçların doğruluğu, diğer araştırmalar ve sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Koninin laminasyon sırası, yarı tepe açısı ve uzunluk-yarıçap oranının etkileri değerlendirilmiş ve iki tip laminasyon sırası için mod şekilleri sunulmuştur. Bir tasarım kriteri bulmak için, iki tip laminasyon dizisi için laminasyon açılarının ve yarı tepe açısının konik kabukların burulma burkulması üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Shakouri vd., 2016).

2.3. Burulmaya Maruz Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Kabukların Stabilitesine İlişkin Kaynak Özetleri

Bu araştırmanın konusu, ortotropik silindirik ince kabukların zamanın bir güç fonksiyonu olan burulma altında burkulmasını incelemektir. Önce dinamik kararlılık ve uyumluluk denklemleri elde edilir. Bu denklemler daha sonra Galerkin yöntemi kullanılarak değişken katsayılı zamana bağlı diferansiyel denkleme indirgenir. Son olarak, kritik dinamik ve statik yükleme, karşılık gelen dalga sayıları, dinamik faktörler, kritik zaman ve kritik dürtü, Ritz tipi varyasyon yöntemi uygulanarak analitik olarak bulunur. Bu sonuçlar kullanılarak, burulma yükü ifadesindeki zamanın gücünün, yükleme parametresinin, Young modülünün oranının ve yarıçapın kalınlığa oranının kritik parametreler üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Bu faktörlerin, başlıktaki problemin kritik parametreleri üzerinde kayda değer etkileri olduğu görülmektedir (Sofiyev vd., 2003).

Sofiyev (2003) çalışmasında, zamanın bir güç fonksiyonu olan çapraz katlı lamine ortotropik kompozit silindirik ince kabukların yükler altında burulma burkulmasını ele almaktadır. İlk önce modifiye Donnell tipi dinamik kararlılık ve uyumluluk denklemleri elde edilir. Bu denklemler daha sonra Galerkin yöntemi kullanılarak

değişken katsayılı zamana bağlı diferansiyel denkleme indirgenir. Kritik parametreler, Ritz tipi varyasyon yöntemi uygulanarak analitik olarak bulunur. Teorik çözümlere göre sayısal analizler yapılır.

Sofiyeve ve Schnack (2004) bu çalışmada, zamanın doğrusal bir fonksiyonu olarak değişen burulma yüklemesine maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemedan (FDM) yapılmış silindirik ince kabukların stabilitesi için bir formülasyon sunulmaktadır. Özellikler, hacim oranı güç yasası dağılımına göre kalınlık yönünde derecelendirilir. Değiştirilmiş Donnell tipi dinamik kararlılık ve uyumluluk denklemleri elde edilmiştir. Galerkin yöntemi uygulandıktan sonra bu denklemlere Lagrange-Hamilton tipi prensibi uygulanarak, büyük yükleme hızı değerleri dikkate alınarak kritik burulma parametre değerleri için analitik çözümler elde edilmiştir. Sonuçlar, kritik burulma parametrelerinin, bileşen malzeme varyasyonlarının konfigürasyonlarından etkilendiğini göstermektedir. Sonuçların literatürdekilerle karşılaştırılması mevcut analizi doğrular.

Sofiyeve (2005) bu çalışmada, zamanın bir güç fonksiyonu olan burulma altında kalınlık yönünde malzeme homojenliği olmayan ortotropik silindirik ince kabukların burkulmasını ele almaktadır. Önce dinamik kararlılık ve uyumluluk denklemleri elde edilir. Galerkin yöntemi uygulanarak bu denklemlere Ritz tipi varyasyon yöntemi uygulanarak ve yükleme parametrelerinin büyük değerleri dikkate alınarak kritik parametre değerleri için analitik çözümler elde edilir. Bu sonuçları kullanarak, Young modülünün ve yoğunluğunun periyodik ve güç değişimlerinin, Young modül değişimlerinin oranının, yükleme parametreleri değişimlerinin ve burulma yükü ifade değişimlerindeki zamanın gücünün etkileri ilgili hesaplamalar yoluyla incelenmiştir. Tüm bu faktörlerin, söz konusu problemin kritik parametreleri üzerinde kayda değer etkilere katkıda bulunduğunu sonucuna varılmıştır.

Batra (2006) bu çalışmasında, malzeme modülleri yalnızca eksenel yönde değişen izotropik sıkıştırılabilir veya izotropik sıkıştırılamaz doğrusal elastik malzemedan yapılmış dairesel silindirik bir çubuğun burulması analiz edildi. Sıkıştırılabilir ve sıkıştırılamaz doğrusal izotropik malzeme için kurucu bağıntı, sonsuz küçük gerinim tensörü ve Lamé sabitlerine bağlı olarak Cauchy gerilme tensörleri tarafından verildi. Silindirik malzeme izotropik ve sıkıştırılabilir, izotropik ve sıkıştırılamaz, enine

izotropik ve sıkıştırılabilir ve enine izotropik ve sıkıştırılmaz için analitik çözümler bulundu. Sabitler, belirli bir kesitte bükülme açısını veya maksimum kesme gerilmesini optimize etmek için belirlendi. Sonuçlar, herhangi bir enine kesitin bükülme açısının, eksenel yönde kesme modülünün yaklaşık olarak değiştirilmesiyle ayarlanabileceğini göstermektedir.

Çeşitli yüklere maruz kalan seramik, FDM ve metal tabakalardan oluşan kompozit silindirik kabuklar için titreşim ve kararlılık analizi incelenmiştir. FD tabakasının malzeme özellikleri, seramik ve metal hacim fraksiyonları açısından basit bir güç dağılımına göre kalınlık yönünde sürekli olarak değişir. Değiştirilmiş Donnell tipi kararlılık ve uyumluluk denklemleri elde edilir. Galerkin yöntemi uygulanarak kritik parametreler için analitik çözümler elde edilir. FD katmanının kalınlık değişimlerinin, yarıçap-kalınlık oranının, uzunluk-yarıçap oranının, malzeme bileşiminin ve malzeme profili indeksinin üç katmanlı silindirik kabukların kritik parametreleri üzerindeki etkilerini incelemek için ayrıntılı parametrik çalışmalar yapılmıştır. Sonuçların literatürdekilerle karşılaştırılması mevcut analizi doğrular (Sofiyev, 2007).

İsteğe bağlı şekle sahip, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş içi boş boruların burulma analizi için analitik bir formülasyon sunulmuştur. Ayrıca, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş çokgen şekilli içi boş boruların burulma analizi için nispeten daha basit formüller sunulmaktadır. Kesitin tüm bölümlerinin kalınlıkları aynıdır. Sertliğin kesme modülü, bir güç yasası dağılımına göre iki faz arasındaki kalınlık boyunca sürekli olarak değişir. Formülleri türetmek için Prandtl'ın stres fonksiyonu cinsinden geçerli denklemler kullanılır. Formülasyonun doğruluğunu ve etkinliğini göstermek için birkaç örnek sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, doğru sonlu eleman çözümleriyle doğrulanır. Değişen kalınlık ve bileşen malzemelerin hacim fraksiyonunun etkileri de araştırılmaktadır. Türetilmiş formüller, ince ila orta kalınlıkta duvarlı içi boş tüplerin analizi için faydalı olabilir (Arghavan ve Hematiyan 2009).

Termal ortamlarda burulmaya maruz kalan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik bir kabuk için bir burkulma sonrası analizi sunulmuştur. Hem ısı iletimi hem de sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri dikkate alınır. Göz önüne alınan sıcaklık

alanının, kabuk yüzeyi üzerinde düzgün bir dağılım olduğu ve kalınlık yönünde değiştiği varsayılmaktadır. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin (FDM'ler) malzeme özelliklerinin, bileşenlerin hacim fraksiyonları cinsinden basit bir kuvvet kanunu dağılımına göre kalınlık yönünde derecelendirildiği ve sıcaklığa bağlı olduğu varsayılır. Ana denklemler, von Kármán-Donnell tipi kinematik doğrusal olmayan bir yüksek dereceli kayma deformasyon teorisine dayanmaktadır. Kabuğun doğrusal olmayan ön burkulma deformasyonları ve başlangıçtaki geometrik kusurları hesaba katılır. Burkulma yükünü ve burkulma sonrası denge yollarını belirlemek için tekil bir pertürbasyon tekniği kullanılır. Sayısal çizimler, farklı termal alan kümeleri altında büküm, mükemmel ve kusurlu, FDM silindirik kabukların burkulma sonrası davranışıyla ilgilidir. Sonuçlar, FDM'lerin hacim oranı dağılımının, burulmaya maruz kalan FDM silindirik kabuklarının burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca burulma sonrası burulma denge yolunun zayıf bir şekilde kararsız olduğunu ve kabuk yapısının neredeyse kusurlu-duyarsız olduğunu doğrularlar (Shen, 2009).

Silindirik kabukların doğrusal olmayan büyük sapma teorisine dayanan bu makale, enerji yöntemini ve büyük deformasyonun doğrusal olmayan gerinim-yer değiştirme ilişkilerini kullanarak burulma yükü altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik kabukların doğrusal olmayan burkulma problemini ele almaktadır. İşlevsel olarak derecelendirilmiş kabukların malzeme özellikleri, bileşen malzemelerin hacim fraksiyonunun bir güç yasası dağılımına göre kabuk kalınlığı boyunca düzgün bir şekilde değişir. Bu arada, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri dikkate alınarak, dış termal ortamın kabuğun kritik durumu üzerindeki çeşitli etkileri de araştırılmıştır. Sayısal sonuçlar, homojen olmayan parametrenin, boyutsal parametrelerin ve dış termal ortamın, burulma altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik kabukların doğrusal olmayan burkulması üzerindeki çeşitli etkilerini göstermektedir. Mevcut teorik sonuçlar literatürdekiler tarafından doğrulanmıştır (Huang ve Han, 2010).

Dung ve Hoa (2013) bu makalede, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş rijitleştirilmiş ince dairesel silindirik kabukların lineer olmayan burkulma ve burkulma sonrası problemlerini analitik yaklaşımla sadece burulma altında çözmek için sunulmuştur. Kabuklar, içlerine takılan halkalar ve kirişler ile güçlendirilir ve

kabuk ve stifnerlerin malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde sürekli olarak derecelendirildiği varsayılır. Von Karman anlamında geometrik doğrusalsızlık ile bulaşmış rijitleştirici tekniğine ve klasik kabuk teorisine dayalı teorik formülasyonlar türetilmiştir. Yaklaşık üç terimli sehim çözümü daha doğru seçilir ve kritik yük ve burkulma sonrası burulma yükü-sehim eğrilerinin bulunması için açık ifade verilir. Çeşitli parametrelerin etkileri ve sertleştiricilerin kabuğun stabilitesi üzerindeki etkileri gösterilmiştir.

Hamilton ilkesine dayalı olarak, termal bir ortamda fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik kabukların burulma çatallanma burkulmasını incelemek için yeni bir doğru çözüm metodolojisi geliştirilmiştir. İşlevsel olarak derecelendirilmiş malzemelerin (FDM'ler) etkin özelliklerinin, kabuğun kalınlık koordinatının yanı sıra ortam sıcaklığının işlevleri olduğu varsayılır. Donnell'in kabuk teorisini uygulayarak, özdeğerlerin ve özvektörlerin sırasıyla ilgili kabuğun kritik yükleri ve burkulma modları olarak çözüldüğü alt mertebeden Hamiltonian kanonik denklemleri kurulur. Birleşik düzlem içi ve enine sınır koşulları, boyutsuz geometrik parametreler, FDM parametreleri ve değişen termal çevre dahil olmak üzere çeşitli yönlerin etkileri ayrıntılı olarak tartışılmaktadır. Sonuçlar, düzlem içi aksenal kenar desteklerinin burkulma yükleri üzerinde belirli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Öte yandan, enine sınır koşulları yalnızca çok kısa kabukları etkiler. Artan termal yükler ile malzeme hacim oranı kritik gerilmeler üzerinde farklı bir etkiye sahiptir. Termal burulma burkulmasına dayanacak optimize edilmiş FDM karışımlarının, bu yazıda incelenen malzemeler arasında Si₃N₄/SUS304 ve Al₂O₃/SUS304 olduğu sonucuna varılmıştır (Sun vd., 2013).

Bu çalışmada, elastoplastik fonksiyonel derecelendirilmiş dairesel silindirik kabukların burulma yükleri altında burkulma davranışlarını analiz etmek için yarı analitik bir çözüm sunulmaktadır. Malzeme özellikleri, güç yasası dağılımına göre kabuk kalınlığı boyunca düzgün bir şekilde değişir ve malzemelerin çok doğrusal bir sertleşme elastoplastisitesi analize dahil edilir. Ritz enerji yöntemi ve hem akış hem de deformasyon kurucu teorileri, burkulma hükümet denklemini ve burkulma kritik durumunu geliştirmeye yardımcı olur. Kritik yükü ve burkulma modu parametrelerini türetmek için yinelemeli bir algoritmaya başvurulur. Sayısal sonuçlar, FDM'lerin bileşen dağılımının, boyutsal parametrelerin ve elastoplastik

malzeme özelliklerinin çeşitli etkilerini ortaya koymaktadır. Bu arada, malzeme akışı etkisinin elastoplastik FDM silindirik kabuklarının burkulması üzerindeki etkileri tartışılmaktadır (Huang vd., 2014).

Termal ortamlarda burulmaya tabi tutulan tek duvarlı karbon nanotüpler (TDKNT'ler) ile güçlendirilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş kompozit silindirik bir kabuk için bir burkulma sonrası analizi sunulmaktadır. Burulma altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş karbon nanotüple güçlendirilmiş kompozit (FD-KNTGK) kabuklar için çok ölçekli model önerilmiştir. Burkulma yükünü ve burkulma sonrası denge yolunu belirlemek için iki aşamalı bir pertürbasyon yaklaşımıyla birlikte tekil bir pertürbasyon tekniği kullanılır. Sayısal çizimler, mükemmel ve kusurlu FD-KNTGK silindirik kabukların farklı termal çevre koşulları altındaki burulma burkulması ve burkulma sonrası davranışlarıyla ilgilidir. Bu çalışmada özel bir durum olan düzgün dağılmış KNTGK kabuğunun sonuçları, FD-KNTGK kabuğunun sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, doğrusal fonksiyonel dereceli takviyelerin, takviye simetrik bir dağılıma sahip olduğunda, burulma altındaki kabuğun burkulma sonrası mukavemetinin yanı sıra burkulma torkunu da artırabileceğini göstermektedir. Sonuçlar, karbon nanotüp hacim oranının, burulma altındaki KNTGK kabuklarının burkulma yükü ve burkulma sonrası davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Shen, 2014).

Thai ve Kim (2015) bu yazıda, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş plakaların ve kabukların modellenmesi ve analizi için çeşitli teorilerin kapsamlı bir incelemesi sunulmaktadır. İnceleme, mekanik ve termal yükler altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş plakaların ve kabukların küresel tepkilerini tahmin etmek için geliştirilen teorik modellere ayrılmıştır. Bu gözden geçirme, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş plakaların ve kabukların modellenmesinde yaygın olarak kullanıldıkları için klasik plaka teorisi, birinci dereceden kayma deformasyon teorisi, yüksek dereceli kesme deformasyon teorileri, basitleştirilmiş teoriler ve karma teoriler dahil eşdeğer tek katmanlı teorilere odaklanmaktadır. Ayrıca, üç boyutlu elastisite çözümlerinin ve birleşik bir formülasyonun geliştirilmesine ilişkin literatürün kapsamlı bir incelemesi de sunulmaktadır.

Birleştirilmiş eksenel ve burulma yükleri altında fonksiyonel olarak dereceli malzemelerden (FDM'ler) yapılmış silindirik kabukların elastoplastik burkulma problemini çözmek için yarı analitik bir prosedür sunulmaktadır. Elastoplastik özelliklerin, bir hacim kesri olan Tamura-Tomota-Ozawa (TTO) modeli çerçevesinde FDM'lerin kurucu ilişkisinin formülasyonu için J2 deformasyon teorisinde tanıtılan güç yasası dağıtım kuralına göre düzgün bir şekilde değiştiği varsayılmaktadır. Tabanlı malzeme modeli. Kritik durum, Ritz yöntemi ile çıkarılır. Düzgün ön burkulma gerinimi varsayılarak, elastoplastik iç kuvvetin ve malzeme ile ilgili tüm yapısal parametrelerin entegrasyonunda kullanılan elastoplastik arayüzün analitik konumunu belirlemek için çift eksenli bir stres durumu analizi yapılır. Son olarak, tam elastoplastik kritik yükü bulmak için yinelemeli bir prosedür benimsenmiştir. Sayısal sonuçlar, homojen olmayan parametrenin ve bileşenlerinin elastoplastik malzeme özelliklerinin malzemelerin stabilite bölgesi ve plastik akış bölgesi üzerindeki etkilerini göstermektedir (Huang vd., 2016).

Mehralian ve Tadi Beni (2016) çalışmasında, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) silindirik kabuğun boyuta bağlı burulma burkulma davranışı, kabuk modeli kullanılarak değiştirilmiş çift stres teorisi temelinde araştırılmıştır. FD nanokabuğunun malzeme özellikleri, güç yasası dağılımına göre kalınlık yönü boyunca değişiklik olarak kabul edilir. Von Karman geometrik doğrusalsızlık ile modifiye çift stres kabuğu teorisi teorik formülasyonlar oluşturmak için kullanılır. Ana denklemler ve sınır koşulları, minimum potansiyel enerji ilkesi kullanılarak türetilir. Özel bir durum olarak, basit mesnetli ve kenetlenmiş FD silindirik kabuğun burulma burkulması GDQ yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Daha sonra, uzunluk ölçeği parametresi, uzunluk ve kalınlık gibi geometrik parametrelerin yanı sıra FD silindirik kabuğun malzeme özelliği gradyan indeksinin kritik burulma burkulma momenti üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Thăng ve Nguyen-Thoi (2016) çalışmasında, sertleştirilmiş silindirik kabuklar, modern mühendislik yapılarında, özellikle uçaklarda, petrol ileten boru hatlarında, uzay aracı endüstrisinde ve okyanus mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek yapı performanslarına yönelik artan talepler nedeniyle, bu makale, burulma yükü altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) kaplamalara sahip silindirik kabukların doğrusal olmayan burkulması üzerindeki rijitleştiricilerin etkisini

sunmaktadır. Silindirik kabuk, harici eksenel sertleştiricilerle güçlendirilmiştir. Malzeme özelliklerinin kalınlık yönü boyunca sürekli değiştiği varsayılmaktadır. Silindirik kabuklar için denge ve kararlılık denklemleri, klasik kabuk teorisi (KKT) ve von-Karman doğrusal olmayan kinematik ilişkiler kullanılarak elde edilir. Analitik yaklaşım, Galerkin prosedürü ve Airy stres işlevi kullanılarak, elde edilen denklemler, kritik burkulma yükleri ve yük-sehim ilişkisi için kapalı form ifadesini elde etmek için kullanılır. FD kaplamalı silindirik kabuğun doğrusal olmayan burkulma davranışı üzerindeki takviye sayısı, hacim oranı üssü, metal tabakanın kalınlığı ve geometrik parametrelerin etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Thăng ve Duc (2017) bu çalışmada, kordonlarla güçlendirilmiş silindirik kabuklar, depolama tankları, füze, denizaltı gövdesi, petrol ileten boru hattı vb. gibi modern mühendislik yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu makalede, silindirik bir kabuğun termomekanik burkulma ve fonksiyonel olarak burkulma sonrası davranışları, dereceli (FD) kaplamalar analitik bir yaklaşımla incelenir. Silindirik kabuk, termal ortamda burulma yükü altında dış kirişlerle güçlendirilmiştir. FD kaplama katmanlarının, seramik ve metal fazların birleştirilmesiyle fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerden (FDM) yapıldığı ve kabuğun çekirdeğinin homojen malzemeden yapıldığı varsayılmaktadır. Von-Karman varsayımlarına dayanan klasik kabuk teorisi, ince silindirik kabuğu modellemek için kullanılır. Galerkin'in prosedürü ve Airy gerilme fonksiyonu kullanılarak, basit mesnetli kabukların kritik burkulma yükü ve burkulma sonrası yük-sehim eğrileri için kapalı form çözümünü elde etmek için ana denklemler çözülebilir. Ayrıca, kirişler, sıcaklık alanı, malzeme hacim fraksiyon indeksi, metal tabakanın kalınlığı vb. birçok önemli parametrik çalışma incelemeye alınmaktadır. Sayısal örneklerle göre, dış sicimlerin kabukların termomekanik burkulma ve burkulma sonrası davranışlarına önemli ölçüde etkisi olduğu ortaya konmuştur.

Bu çalışmada Gerber sistemlerinin burulma mukavemeti üzerindeki ağ distorsiyonunun etkisini araştırmıştır. Bu amaca yönelik olarak, distorsiyonel ve distorsiyonel olmayan yanal burulma burkulma analizi için iki sonlu eleman formülasyonunda birtakım modifikasyonlar yapılmıştır. Bozulma formülasyonu, ağı ince bir plaka olarak ve flanşları Gjelsvik üyeleri olarak ele almakta ve yük yüksekliği etkilerini yakalamaktadır. Bozulmayan formülasyon, Vlasov kiriş

kinematiğine dayanmakta ve rijitlik matrislerinin pozitif kesinliğini korurken, kayma merkezinden kaymış yanal kısıtlamaların uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Her iki model de kabuk sonlu eleman çözümlerine karşı doğrulandı ve daha sonra Gerber kirişleri için moment gradyan katsayıları geliştirmek, ağ bozulma etkilerini değerlendirmek ve çeşitli yanal çaprazlama senaryolarının elastik yanal burulma burkulma mukavemeti üzerindeki etkisini ölçmek için kullanılmıştır. Ağ deformasyonunun önemsiz olduğu düşünülen haddelenmiş basit mesnetli kirişlerin aksine, bu çalışma ağ deformasyonunun Gerber kirişlerinin yanal burulma burkulma mukavemetini büyük ölçüde etkilediğini göstermiştir (Pezeshky vd., 2018).

Bu çalışmada, yüzey gerilimi etkilerinin varlığında silindirik nanokabukların doğrusal olmayan burulma burkulma ve burkulma sonrası özelliklerini tanımlayabilen boyuta bağlı bir kabuk modeli geliştirilmiştir. Bu amacı gerçekleştirmek için, Von Karman geometrik doğrusalsızlık ile birlikte Gurtin-Murdoch elastisite teorisi, birinci dereceden kesme deformasyonu kabuk teorisine uygulanır. Nanokabuğun serbest yüzeylerindeki denge koşullarını sağlamak için kütlelerin normal gerilim bileşeni için kalınlık boyunca doğrusal bir değişim göz önünde bulundurulur. Sanal çalışma prensibi aracılığıyla, enine yer değiştirme ve Havalı gerilme fonksiyonunun bağımsız değişkenler olarak kabul edildiği klasik olmayan yönetici diferansiyel denklemler oluşturulur. Daha sonra, doğrusal olmayan ön burkulma deformasyonları ve büyük burkulma sonrası şekil değiştirmeler ile bağlantılı olarak yüzey geriliminin etkisini içeren bir sınır tabaka teorisi kullanılır. Daha sonra, boyuta bağlı kritik burulma burkulma yüklerini ve ilgili burkulma sonrası denge yollarını elde etmek için geliştirilmiş bir pertürbasyon tekniğine dayanan verimli bir çözüm metodolojisi kullanılır. Minimum burkulma sonrası yüke ulaştıktan sonra burulma yükünün önemli bir artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca, sehimin yüksek değerlerinde yüzey gerilmesinin etkisinin ihmal edilebilir hale geldiği ortaya çıkmıştır (Sahmani vd., 2019).

Couto ve Vila Real (2019) bu yazıda, kaynaklı I-şekilli ince kesitli kirişlerin yanal-burulma burkulması üzerindeki kusurların etkisini belirlemek için sayısal bir araştırma yapılmıştır. Gerdirilmemiş kirişlerin burkulma direnci, malzeme ve geometrik kusurlar dahil olmak üzere doğrusal olmayan kabuk eleman tabanlı FE analizi ile hesaplanır. Global ve plaka kusurlarının yanı sıra artık gerilmelere karşı

duyarlılık, literatürde mevcut olan geometrik kusurların farklı genlikleri ve şekilleri ve artık gerilmelerin dağılımları için sunulmaktadır. Bu çalışmada özetlenen tavsiyeler, gelecekteki sayısal simülasyonlarda bu parametrelerin seçimine yardımcı olacak ve diğer yazarların ince kesitli kirişler için yapılan çalışmalar bağlamındaki gözlemlerini genişletecektir. Sayısal sonuçların Kuzey Amerika tasarım kodu AISC360-16 ve Avrupa tasarım kodu Eurocode 3'ün tahminleriyle karşılaştırılması, AISC360-16'nın kiriş direnci için bir üst sınır ve Eurocode 3'ün bir alt sınır sağladığını göstermektedir. Bunun başlıca nedeni, artık gerilmelerin incelenen kirişler üzerindeki yük taşıma kapasitesinde daha büyük bir etkiye sahip olmasıdır. Bu nedenle, bu bulguların, söz konusu tasarım kodlarında gelecekteki gelişmeleri ve değişiklikleri teşvik etmesi beklenmektedir. Son olarak, bu araştırma, özellikle artık gerilmeler durumunda, kusurların daha gerçekçi tanımlanması ihtiyacını da desteklemektedir ve konuyla ilgili daha kapsamlı bir deneysel mücadeleyi haklı çıkarmaktadır.

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FD) çok katmanlı grafen trombosit takviyeli kompozit (ÇKGTTK) silindirik kabukların burulma çatallanma burkulması için kesin çözümler elde edilmiştir. Beş tip grafen trombosit (GPL) dağılımı dikkate alınır ve GPL'lerin dağılım profilini ayarlamak için bir eğim faktörü tanımlanır. Donnell'in kabuk teorisi çerçevesinde ve simplektik matematik yardımıyla, bir dizi alt mertebeden Hamiltonian kanonik denklemler kurulur ve analitik olarak çözülür. Sonuç olarak, GPLRC kabuklarının kritik burkulma yükleri ve karşılık gelen burkulma modu şekilleri elde edilir. Geometrik parametreler, sınır koşulları ve malzeme özellikleri gibi çeşitli faktörlerin burulma burkulma davranışları üzerindeki etkileri araştırılmış ve detaylı olarak tartışılmıştır (Sun vd., 2019).

Nam ve Phuong (2019) makalesinde, termal etki altında von Karman büyük sapma doğrusalsızlıkları ile sandviç fonksiyonel dereceli silindirik kabukların doğrusal olmayan burulma burkulma ve burkulma sonrası burkulmalarının analitik bir yöntemle araştırılmasıdır. Kabuk kabuğu, kiriş, dairesel halka ve spiral takviyeler ile takviye edilmiştir, kabuk kabuğunun ve takviyelerin malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca sürekli değiştiği varsayılmaktadır. Ortogonal takviyelere kıyasla silindirik bir kabuğun burkulma yük taşıma kapasitesi üzerindeki spiral takviyelerin çok büyük etkisi, sayısal araştırmalarda açıkça kanıtlanmıştır. Donnell kabuk teorisine ve spiral

takviyelerin hem termal hem de mekanik terimleri için geliştirilmiş bulaşmış takviye tekniğine dayalı olarak, kabuğun denge denklemleri bu yazıda oluşturulmuştur. Galerkin yöntemi kullanılarak burkulma sonrası eğriler ve kritik burkulma yükleri elde edilir. Sıcaklık değişiminin, rijitleştiricilerin, malzeme ve boyutsal parametrelerin lineer olmayan burulma burkulması ve kabuğun burkulma sonrası üzerindeki etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir.

Nam ve Phuong (2019) makalesinde, termal etki altında von Karman büyük sapma doğrusalsızlıkları ile sandviç fonksiyonel dereceli silindirik kabukların doğrusal olmayan burulma burkulma ve burkulma sonrası burkulmalarının analitik bir yöntemle araştırılmasıdır. Kabuk kabuğu, kiriş, dairesel halka ve spiral takviyeler ile takviye edilmiştir, kabuk kabuğunun ve takviyelerin malzeme özelliklerinin kalınlık boyunca sürekli değiştiği varsayılmaktadır. Ortogonal takviyelere kıyasla silindirik bir kabuğun burkulma yük taşıma kapasitesi üzerindeki spiral takviyelerin çok büyük etkisi, sayısal araştırmalarda açıkça kanıtlanmıştır. Donnell kabuk teorisine ve spiral takviyelerin hem termal hem de mekanik terimleri için geliştirilmiş bulaşmış takviye tekniğine dayalı olarak, kabuğun denge denklemleri bu yazıda oluşturulmuştur. Galerkin yöntemi kullanılarak burkulma sonrası eğriler ve kritik burkulma yükleri elde edilir. Kabuğun doğrusal olmayan burulma burkulması ve burkulma sonrası burkulması üzerindeki sıcaklık değişimi, rijitleştiriciler, malzeme ve boyut parametrelerinin etkileri sayısal olarak analiz edilmiştir.

Rege ve Pavlou (2019) çalışmasında boru şeklindeki elemanların veya çevresel duvar boyunca çatlaklar içeren boruların yapısal bütünlüğünü değerlendirmek için, gerilme yoğunluk faktörü çözümlerine ihtiyaç vardır. Gerilim ve eğilme için gerilim yoğunluğu faktörleri mevcut olsa da bu bileşenler torka da maruz kalabilse de burulma durumu için birkaç çözüm mevcuttur. Bu yazıda, bu geometri için gerilim ve burulma altında gerilim şiddeti faktörlerini hesaplamak için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Kabuk elemanları, yer değiştirme ekstrapolasyonu tekniği aracılığıyla ince kabuklar için sonuçları hesaplamak için kullanılır. Hesaplanan sonuçlar, sıg kabuk teorisine dayanan burulma yüklemesi için mevcut analitik çözümün, ince kabuklardaki uzun çatlaklar için korunumsuz olduğunu göstermektedir. Sıg kabuk teorisi genel olarak uzun çatlaklara uygulanamaz ve bu

nedenle mevcut çalışma, şu anda mevcut olandan daha geniş bir aralıkta çatlak uzunlukları için çözümler sunabilmektedir.

Sofiyev (2019) bu çalışmasında, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin (FDM'ler), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş konik kabukların (FDKK'ler), fonksiyonel olarak derecelendirilmiş katmanlı konik kabukların (FDKKK'ler) ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş sandviç-koniklerin titreşim ve burkulması hakkında kapsamlı bir literatür incelemesini sağlamaktır. Tasarımda saf FDKK'lerde ve FDKKK'lerde karşılaşılan çeşitli problemler için metodolojik çözümler, örneğın doğrusal ve doğrusal olmayan (DO) titreşim ve çeşitli yükler altında stabilite ve farklı ortamın etkileri sunulmaktadır. İncelemeye dahil edilen FDM yapılarının örnekleri nükleer, uzay ve deniz mühendisliğı, elektronik ve biyomedikal alanlardaki geniş bir uygulama yelpazesini kapsamaktadır.

Soltani ve Asgarian (2020) çalışmasında, eksenel olarak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış ve düzgün yayılı bir yüke maruz bırakılmış, basit mesnetli ağı ve/veya flanşla konik I-kirişlerin yanal burkulma analizi gerçekleştirilir. Kiriş malzemesinin özellikleri, üstel veya kuvvet yasasına göre, bileşen malzemelerin hacim oranına bağılı olarak kiriş eksenı boyunca sürekli olarak değişir. Yanal yer değıştirme ve burulma açısı arasındaki bağlantı göz önüne alındığında, Vlasov ince duvarlı kiriş teorisi ile birlikte enerji yöntemi ile denge denklemleri türetilir. Serbest eğrilmeye sahip basit mesnetli kirişler için denge denklemleri sistemi, büküm açısında bir diferansiyel denkleme dönüştürölür. Diferansiyel kareleme yöntemi daha sonra elde edilen dördüncü mertebeden diferansiyel denklemini değıışken katsayılarla sayısal olarak çözmek ve yanal burkulma yüklerini belirlemek için kullanılır. Son olarak, farklı parametrelerin- malzeme özelliklerinin eksenel değıışimi, sivrilme oranları ve yük eksantriklikleri- dikkate alınan kirişlerin yanal stabilitesi üzerindeki etkisini incelemek için sayısal bir örnek düşünölmüştür. Bu makalenin sayısal sonuçları, eksenel olarak fonksiyonel olarak derecelendirilmiş prizmatik olmayan I-kirişler üzerinde pimli-sabitlenmiş uç koşulları ile ilgili gelecekteki çalışmalar için karşılaştırma ölçütü olarak kullanılabilir.

2.4. Elastik Zemine Oturan Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Kabukların Burulma Yüğü Etkisi Altındaki Stabilitesine İlişkin Kaynak Özetleri

Birinci dereceden kayma deformasyon teorisine (BDDT) dayanan, elastik bir ortama gömülü fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik kabukların titreşim, statik ve dinamik stabilite üzerindeki termal yükün etkisi üzerine bir araştırmanın sonucudur. Sıcaklık dağılımını belirlemek için kabuğun genişliği boyunca bir ısı iletim denklemi uygulanır. Malzeme özelliklerinin, bileşenlerin hacim fraksiyonları cinsinden bir kuvvet yasasına göre genişlik boyunca dağılımla derecelendirildiği varsayılır. Hesaplamalar, malzeme bileşiminin etkileri, termal yükleme, statik eksenel yükleme, orta sertlik ve kabuk geometrisi parametrelerinin titreşim, burkulma ve parametrik rezonans üzerindeki etkileri anlatılmaktadır. Elastik bir ortama gömülü fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik kabukların termal titreşim, burkulma ve dinamik stabilitesinin yeni özellikleri ve bu makaledeki bazı anlamlı ve ilginç sonuçlar, termal ve mekanik yükler altında fonksiyonel olarak derecelendirilmiş yapıların uygulanması ve tasarımı için faydalıdır (Sheng, 2008).

Büyük bir dış elastik ortama gömülü ve termal ortamlarda eksenel basınç yüklerine maruz kalan, sonlu uzunlukta, kayma ile deforme olabilen, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik bir kabuğun burkulma sonrası tepkisi üzerine bir çalışma sunmaktadır. Çevreleyen elastik ortam, yalnızca sıkıştırmada tepki veren gerilimsiz Pasternak zemini olarak modellenmiştir. Bükülme sonrası analizi, von Kármán-Donnell tipi kinematik doğrusalsızlık ile yüksek dereceli kesme deformasyonu kabuk teorisine dayanmaktadır. Isı iletiminden kaynaklanan termal etkiler de dahil edilmiştir ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin (FDM'ler) malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılır. Kabuğun doğrusal olmayan ön burkulma deformasyonları ve başlangıçtaki geometrik kusurları hesaba katılır. Kabukların burkulma sonrası tepkisini belirlemek için tekil bir pertürbasyon tekniği kullanılmış ve kabuk ile elastik ortam arasındaki temas bölgesinin şekli üzerinde herhangi bir varsayım kullanılmadan sayısal sonuçlar elde etmek için yinelemeli bir şema geliştirilmiştir. Gerilimsiz Pasternak zeminden oluşan elastik bir ortamla çevrelenen FDM kabuklarının burkulma sonrası davranışını incelemek için sayısal çözümler çizelge ve grafik formlarda sunulur ve bu sayede geleneksel elastik zeminlere sahip FDM kabukları için burkulma sonrası sonuçlar da karşılaştırma

amacıyla elde edilir. Sonuçlar, tek taraflı kısıtlamanın, zemin rijitliği yeterince büyük olduğunda, termal ortamlarda eksenel sıkıştırmaya maruz kalan kabukların burkulma sonrası tepkileri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Shen, 2009).

Büyük bir dış elastik ortama gömülü ve termal ortamlarda iç basınca maruz kalan, sonlu uzunlukta, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik bir kabuğun burkulma sonrası tepkisi üzerine bir çalışma sunmaktadır. Çevreleyen elastik ortam, yalnızca sıkıştırmada tepki veren gerilimsiz Pasternak zemini olarak modellenmiştir. Bükülme sonrası analizi, von Kármán-Donnell tipi kinematik doğrusalsızlık ile yüksek dereceli kesme deformasyonu kabuk teorisine dayanmaktadır. Isı iletiminden kaynaklanan termal etkiler de dahil edilmiştir ve fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin (FDM'ler) malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılır. Kabuğun doğrusal olmayan ön burkulma deformasyonları ve başlangıçtaki geometrik kusurları hesaba katılır. Kabukların burkulma sonrası tepkisini belirlemek için tekil bir pertürbasyon tekniği kullanılmış ve kabuk ile elastik ortam arasındaki temas bölgesinin şekli üzerinde herhangi bir varsayım kullanılmadan sayısal sonuçlar elde etmek için yinelemeli bir şema geliştirilmiştir. Pasternak tipi gerilimsiz elastik zeminden oluşan elastik bir ortamla çevrelenen FDM kabuklarının burkulma sonrası davranışını incelemek için sayısal çözümler çizelge ve grafik formlarda sunulur ve bu sayede geleneksel elastik zeminler için sonuçlar karşılaştırmacı olarak elde edilir. Sonuçlar, tek taraflı kısıtlamanın, zemin rijitliği yeterince büyük olduğunda, termal ortamlarda iç basınca maruz kalan kabukların burkulma sonrası tepkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Shen vd., 2010).

Sofiyev (2010) bu çalışmada, Pasternak tipi elastik bir zemin üzerine oturan ve eksenel uzama yükleri ve hidrostatik basınca maruz kalan FDM dairesel tepesi kesik konik ve silindirik kabukların burkulma analizi incelenmiştir. Elastik zeminli veya zeminsiz FDM kesik konik kabukların kritik birleşik yükleri analitik olarak bulunmuştur. Elastik zeminli ve zeminsiz FDM silindirik kabuklar için uygun formüller özel bir durum olarak bulunur. Formülasyonun doğruluğunu ve etkinliğini göstermek için birkaç örnek sunulmuştur.

Adigüzel (2011) yüksek lisans tezinde, Winkler elastik zemin üzerinde bulunan FDM katman içeren sandviç silindirik kabukların burulma yükü etkisi altında burkulma problemini klasik kabuk teorisi çerçevesinde ele almıştır. Klasik kabuk teorisi çerçevesinde FDM içeren üç tabakalı silindirik kabuğun kritik burulma yükü için analitik ifade elde edilmiştir. Son olarak kritik burulma yüküne, FDM'nin farklı kompozisyonları ve hacim bileşenleri değişiminin, kabuk karakteristiklerinin, tabakaların kalınlıklarının değişiminin ve Winkler elastik zeminin etkileri incelenmiştir.

Bir dış elastik ortama gömülen ve birleşik eksenel ve radyal basınç yüklerine maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme silindirik kabuğun mekanik burkulması incelenmiştir. Malzeme özelliklerinin, bileşen malzemelerin hacim fraksiyonunun bir güç yasası dağılımına göre kabuk kalınlığı boyunca düzgün bir şekilde değiştiği varsayılmaktadır. Teorik formülasyonlar, enine kesme şekil değiştirmeleri dikkate alınarak daha yüksek dereceli kesme deformasyon kabuk teorisine (YDDT) dayalı olarak sunulmaktadır. FDM'lerin silindirik kabuklarının doğrusal olmayan gerinim-yer değiştirme ilişkileri kullanılarak, ana denklemler türetilir. Elastik zemin, Winkler modeline kayma katmanı eklenerek elde edilen Pasternak modeli iki parametre ile modellenmiştir. Sınır koşulu basit mesnetli olarak kabul edilir. Mevcut çalışmanın yeniliği, elastik ortamla çevrili FDM silindirik kabukların kritik mekanik burkulma yükleri için kapalı form çözümleri elde etmektir. Kabuk geometrisinin, hacim oranı üssünün ve zemin parametrelerinin kritik burkulma yükü üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sayısal sonuçlar, elastik zeminin kritik burkulma yükü üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır (Bagherizadeh vd., 2011).

Elastik ortamda fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) ortotropik silindirik kabukların burulma titreşimi ve stabilite problemleri Galerkin yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Pasternak modeli, elastik ortamın silindirik kabuk üzerindeki reaksiyonunu tanımlamak için kullanılır. Karışık sınır koşulları dikkate alınır. Ortotropik silindirik kabuğun malzeme özellikleri ve yoğunluğunun, kalınlık yönünde üssel olarak değiştiği varsayılmaktadır. Pasternak tipi elastik zemin üzerine oturan burulma yükü altındaki FD ortotropik silindirik kabuğun temel denklemleri türetilmiştir. Elastik zeminler üzerine oturan FD ortotropik silindirik kabuğun kritik burulma yükü ve boyutsuz burulma frekansı parametresi için ifadeler elde edilmiştir.

Kabuk parametrelerinin varyasyonlarının, malzeme gradyanının derecesini, ortotropisini, zemin rijitliğini ve zeminin kesme alt zemin modülünü karakterize eden üstel faktörün kritik burulma yükü ve boyutsuz burulma frekansı parametresi üzerindeki etkileri incelenmiştir (Najafov vd., 2013).

Elastik ortamda homojen olmayan ortotropik kompozit silindirik kabukların burulma stabilitesi problemi Galerkin yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Winkler modeli, elastik ortamın silindirik kabuk üzerindeki reaksiyonunu tanımlamak için kullanılır. Karışık sınır koşulları dikkate alınır. Kabuk parametrelerinin varyasyonlarının, homojen olmama, ortotropi ve zemin rijitliğinin kritik burulma yükü üzerindeki etkileri incelenmiştir (Sofiyev vd., 2013).

Sofiyev ve Kuruoglu (2013) bu çalışmada, elastik bir ortamla çevrili fonksiyonel derecelendirilmiş (FD) kaplamalı silindirik kabuğun burulma titreşimi ve burkulma analizi incelenmiştir. FD kaplamaların malzeme özelliklerinin, bileşenlerin hacim fraksiyonları açısından basit bir güç yasası dağılımına göre kalınlık yönünde derecelendirildiği varsayılır. Kabuk-zemin etkileşimini tanımlamak için iki parametrelili bir zemin modeli veya Pasternak zemin modeli kullanılır. Temel denklemler Galerkin yöntemi kullanılarak türetilmiş ve çözülmüş ve Pasternak elastik zemin üzerine oturan FD kaplamalı silindirik kabuğun boyutsuz burulma burkulma yükü ve boyutsuz burulma frekansı parametresi ifadeleri elde edilmiştir. Son olarak, boyutsuz burulma burkulma yükü ve boyutsuz burulma frekansı parametresi üzerindeki geometrik parametrelerin, FD kaplamaların hacim oranı dağılımının ve zemin rijitliklerinin etkileri tartışılmıştır. Mevcut sonuçlar, özel bir durum için mevcut verilerle karşılaştırılır.

Analitik bir yaklaşıma dayalı olarak, burulma altında elastik bir ortamla çevrili fonksiyonel olarak derecelendirilmiş sertleştirilmiş toroidal kabuk parçalarının doğrusal olmayan burkulma ve burkulma sonrası problemleri araştırılmıştır. Halkalar ve kirişler kabuğa tutturulur ve kabuğun malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde sürekli olarak derecelendirildiği varsayılır. Teorik formülasyonlar oluşturmak için von Kármán anlamında geometrik doğrusal olmayan klasik kabuk teorisi ve yaylı takviye tekniği uygulanır. Üç terimli yaklaşık sapma çözümü daha doğru seçilir ve kritik yük ve burkulma sonrası burulma yük-sehim eğrilerini bulmak için açık ifade

verilir. Geometrik parametrelerin etkileri ve stifnerlerin kabuğun stabilitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır (Ninh vd., 2015).

Bu çalışmada, zamana bağlı burulma yükü altında elastik bir ortamla çevrili fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (FDM) ince dairesel silindirik kabukların doğrusal olmayan dinamik davranışını analiz etmek için yarı analitik bir yöntem önerilmektedir. Kabuk, kabuğun iç yüzeyine tutturulmuş, yakın aralıklı bir ortogonal FDM takviye sistemi ile sertleştirilir. Elastik ortamın, Pasternak tarafından önerilen iki parametrelili elastik zemin modelini takip ettiği varsayılmaktadır. Sertleştirilmiş silindirik kabuklar için temel ilişkiler ve yönetim denklemleri, von Karman geometrik doğrusal olmayanlığa sahip Donnell kabuk teorisi ve yaylı takviye tekniği kullanılarak türetilmiştir. Doğrusal olmayan burkulma şeklini daha doğru bir şekilde değerlendirmek için üç terimli bir sapma fonksiyonu kullanılır. Galerkin yöntemi kullanılır. Kritik dinamik burulma yükü, dördüncü dereceden Runge–Kutta yöntemi ve Budiansky–Roth kriteri kullanılarak bulunur. Hesaplamalara dayanarak, kabuğun dinamik burkulma davranışı üzerindeki rijitleştirici, zeminler, malzeme ve boyutsal parametrelerin etkilerini araştırdık (Dung ve Hoa 2015a).

Bu çalışmanın temel amacı, termal ortamlarda ve burulma yükü altında elastik zeminlerle çevrili fonksiyonel derecelendirilmiş rijitleştirilmiş ince dairesel silindirik kabukların doğrusal olmayan burkulma ve burkulma sonrası burkulmalarını analitik yaklaşımla araştırmaktır. Kabuklar, kabuk ve takviyelerin malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde sürekli olarak derecelendirildiği varsayıldığı, yakın aralıklı halkalar ve kirişlerle takviye edilir. Elastik ortam, Pasternak tarafından önerilen iki parametrelili elastik zemin modeli olarak kabul edilmiştir. Von Karman geometrik doğrusalsızlık ve yaymalı rijitleştiriciler tekniği ile klasik kabuk teorisine dayalı olarak, ana denklemler türetilmiştir. Üç terimli sehim çözümlü Galerkin yöntemi kullanılarak, kritik burulma yükü ve burkulma sonrası yük-sehim eğrilerini bulmak için kapalı form elde edilmiştir. Sıcaklık, stifner, zemin, malzeme ve boyutsal parametrelerin etkileri analiz edilir (Dung ve Hoa 2015b).

Dung ve Hoa (2015) bu araştırmada, elastik zeminlerle çevrili ve zamana bağlı burulma yükü altında FDM ince dairesel silindirik kabukların doğrusal olmayan dinamik davranışını analiz etmek için yarı analitik bir yöntem sunmaktadır. Kabuk,

kabuğun iç yüzeyine tutturulan yakın aralıklı ortogonal FDM stifner sistemi ile rijitleştirilir. Elastik bir ortam, Pasternak tarafından önerilen iki parametrelili elastik zemin modeli olarak kabul edilmiştir. Sertleştirilmiş silindirik kabuklar için temel ilişkiler ve yönetim denklemleri, Donnell kabuk teorisi ve von Karman geometrik doğrusalsızlık ve yaymalı rijitleştiriciler tekniği kullanılarak türetilmiştir. Doğrusal olmayan bir burkulma şekli dikkate alınarak üç terimli sehim fonksiyonu daha doğru seçilmiştir. Galerkin yöntemi kullanılır. Kritik dinamik burulma yükü dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi ve Budiansky-Roth kriteri kullanılarak bulunur. Bazı hesaplamalar yapılarak, kabuğun dinamik burkulma davranışı üzerinde stifner, zeminler, malzeme ve boyutsal parametrelerin etkileri incelenmiştir.

Dung ve Minh Vuong (2016) bu çalışmasında, sertleştirilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş ince toroidal kabuk parçalarının dinamik burulma burkulması üzerine analitik bir yaklaşımla doğrusal olmayan analiz incelenmiştir. Kabuk, ısı ortamında ve zamana bağlı burulma yükü altında, iç stifnerlerle güçlendirilmiş ve elastik zeminlerle çevrelenmiştir. Ana denklemler, von Kármán geometrik doğrusalsızlık, Stein ve McElman varsayımı, bulaşmış takviye tekniği ve Galerkin yöntemi ile Donnell kabuk teorisine dayalı olarak türetilmiştir. Üç terimli bir sapma fonksiyonu seçilmiştir. Düzgün sıcaklık artışı ve doğrusal olmayan sıcaklık iletim yasasının termal parametreleri açık bir biçimde bulunur. Statik kritik burulma yükünü belirlemek için kapalı biçimli bir ifade elde edilir. Dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemi ve Budiansky-Roth kriteri ile kritik bir dinamik burulma yükü bulunur. Kabukların dinamik tepkileri üzerinde rijitleştiriciler, zeminler, malzeme ve boyutsal parametrelerin etkileri göz önünde bulundurulmuştur.

Dung ve Nguyen Thi (2016) çalışmasında, Von Kármán geometrik doğrusalsızlığı ile Reddy'nin üçüncü dereceden kesme deformasyon plakası teorisini (KDPT) kullanan bu çalışma, düzlem içi maruz kalan elastik zeminler üzerindeki eksantrik olarak sertleştirilmiş fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme (ES-FDM) plakalarının burkulma ve burkulma sonrası davranışları hakkında analitik bir çözüm sunar. Basınç yükleri veya termal yükler veya termo-mekanik yükler. Plakalar, yakın aralıklı FDM takviyeleri ile güçlendirilir. Plaka ve stifnerlerin malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılır. Smeared stifner tekniğine ve KDPT'ye dayalı teorik formülasyonlar türetilmiştir. Termal parametrelerin ifadeleri analitik biçimde

bulunur. Galerkin yöntemi uygulanarak kritik burkulma yükünü belirlemek ve burkulma sonrası mekanik ve termal yük-sehim eğrilerini analiz etmek için ifadeler elde edilir. Sıcaklığa bağlı plaka malzeme özellikleri durumu için iki yinelemeli algoritma sunulmaktadır. Termal eleman, FDM stifnerleri, geometrik ve malzeme parametreleri, ilk kusur ve zeminin etkileri düşünülmüş ve tartışılmıştır. Mevcut sonuçları referanslardakilerle karşılaştırarak, mevcut çalışmanın doğruluğu teyit edilir.

Ninh ve Bich (2016) bu makalesinde, termal ortamda Pasternak elastik zemin ile çevrili seramik fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme (S-FDM-M) ile sertleştirilmiş silindirik kabuğun doğrusal olmayan burulma burkulması ve burkulma sonrası burkulması incelenmiştir. S-FDM-M silindirik kabuk, kabuğun malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde sürekli olarak derecelendirildiği varsayıldığı halka ve kiriş takviye sistemi ile güçlendirilmiştir. Klasik kabuk teorisine dayalı teorik formülasyonlar, von Karman anlamında geometrik doğrusal olmama ve yaymalı rijitleştiriciler tekniği ile türetilmiştir. Üç terimli yaklaşık sapma çözümü daha doğru seçilir ve kritik yük ve burkulma sonrası burulma yükü-sehim eğrilerini bulmak için açık ifade verilir. Geometrik parametrelerin, sıcaklığın, stifnerlerin ve elastik zeminin etkileri incelenmiştir.

Duc ve Thiem (2017) bu makalede, termal ortamlarda, eksenel basınç yüküne maruz kalan ve içi elastik zeminlerle doldurulmuş, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden (FDM) yapılmış, eksantrik olarak sertleştirilmiş kusurlu dairesel silindirik kabukların analitik yöntemle dinamik analizini sunmaktadır. Kabuklar, termal elemanlar dikkate alınarak FDM kirişleri ve halkaları ile güçlendirilmiştir. Sertleştirilmiş kabuklar için yer değiştirme bileşenleri cinsinden kararlılık denklemleri, üçüncü mertebeden kayma deformasyon teorisi ve yaylı rijitleştiriciler tekniği kullanılarak türetilmiştir. Doğal frekans, doğrusal olmayan frekans-genlik eğrisi ve doğrusal olmayan dinamik yanıtı belirlemek için kapalı form ifadeleri şu şekilde elde edilir: Galerkin yöntemi ve dördüncü derece Runge-Kutta yöntemi kullanılarak. Sertleştiricilerin, zeminlerin, kusurların, malzeme ve boyut parametrelerinin önceden var olan eksenel sıkıştırma ve termal yükün kabukların dinamik tepkileri üzerindeki etkileri göz önünde bulundurulur.

Burulma yükleri ve termal yük altında izotropik malzemeden yapılmış halka, kiriş ve/veya spiral sertleştiricilerle güçlendirilmiş Çok katmanlı fonksiyonel dereceli (FDM) silindirik kabukların doğrusal olmayan burkulma ve burkulma sonrası davranışı analitik bir yaklaşımla önerilmiştir. İnce kabuk üç katmandan oluşur: izotropik katman – FDM katmanı – izotropik katman ve Pasternak tipi elastik zemin ile çevrilidir. Ana denklemler, von Kármán-Donnell tipi geometrik doğrusal olmayanlığa sahip Donnell kabuk teorisine dayanır ve Lekhnitskii'nin spiral takviyeler için bulaşmış rijitleştiriciler tekniğinin geliştirilebilirliğini birleştirir. Bu yazıda mekanik ve termal yüklerin etkileri ele alınmıştır. Kabuk, zemin ve stifnerlerin spiral stifner sayısı, açılı stifnerleri, sıcaklık değişimi ve hacim fraksiyon indeksi sayısal olarak incelenmiştir. Ortogonal takviyelere kıyasla, spiral takviyelerin kabuğun burkulma davranışı üzerinde çok büyük bir etkisi sayısal sonuçlarda onaylanmıştır (Nam vd., 2018).

Bu makale, termal ortamda ve burulma yükü altında Pasternak elastik zeminler üzerine oturan ortogonal stifnerlerle güçlendirilmiş fonksiyonel dereceli gözenekli dairesel silindirik kabukların lineer olmayan burkulmasını ve burkulma sonrası burkulmasını analitik bir yaklaşımla incelemektedir. Kabuklar, kabuk ve takviyelerin malzeme özelliklerinin kalınlık yönünde sürekli olarak derecelendirildiği varsayıldığı, yakın aralıklı kirişler ve halkalarla takviye edilir. Von Karman geometrik doğrusalsızlık ve yaymalı rijitleştirici tekniği ile klasik kabuk teorisine dayalı olarak, ana denklemler türetilmiştir. Galerkin yöntemi ile üç terimli sehim çözümü kullanılarak, kritik yük ve burkulma sonrası yanıtı bulmak için kapalı form elde edilir. Gözeneklilik katsayısı, malzeme, sıcaklık, boyutsal parametreler, stifner ve zeminin etkileri analiz edilir (Nam vd., 2019).

Mevcut araştırma, doğrusal olmayan elastik bir zemin üzerine oturan kavisli bir kirişin (kemer) küçük ve büyük genlikli serbest titreşimleri ile ilgilidir. Kemer, özelliklerin kalınlık boyunca derecelendirildiği, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir malzemeden yapılmıştır. Kemerdeki üniform sıcaklık yükselmesi de dikkate alınır ve malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olduğu varsayılır. Kemerin hâkim hareket denklemleri, çekiş serbest sınır koşullarını ve von Kármán tipi doğrusal olmayanlığı karşılayan daha yüksek dereceli bir kemer teorisi kullanılarak oluşturulmuştur. Kemerin yöneten denklemler, iki aşamalı pertürbasyon tekniği

kullanılarak, sabitlenmiş bir kemer durumunda çözülmüştür. Açıklık ortası sapmanın bir fonksiyonu olarak kemerin doğrusal olmayan frekanslarını tahmin etmek için kapalı form ifadeleri verilmiştir. Bu çalışmanın sayısal sonuçları, elastik zemin üzerinde düz FDM kirişler durumu için doğrulanmıştır. Daha sonra, güç yasası indeksi, elastik zemin katsayıları, uzunluk-kalınlık oranı, uzunluk-yarıçap oranı ve sıcaklık etkilerinin etkilerini araştırmak için yeni sayısal sonuçlar verilmiştir (Babaei, 2019).

Minh Vuong ve Duc (2019) bu makalede, termal bir ortamda elastik zeminlerle çevrili ve burulma yüküne maruz kalan FDM toroidal kabuk segmentlerinin doğrusal olmayan burkulması ve burkulması sonrası analitik bir yöntemle incelenmiştir. Von Karman anlamında geometrik doğrusal olmayan Reddy'nin üçüncü dereceden kesme deformasyon kabuk teorisine (TSDT) dayanarak, yöneten denklemler türetilmektedir. Galerkin yöntemi ve bir gerilme fonksiyonu kullanılarak, kritik burulma yükü ve burkulma sonrası yük-sehim eğrilerinin belirlenmesi için kapalı form ifadeleri elde edilir. Geometrik şekil, malzeme özellikleri, sıcaklık alanı ve zemin parametrelerinin kabukların stabilitesi üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

2.5. Tez Konusuna İlişkin Bazı Kitapların Özetleri

Kerr (1964) makalesi, bir dizi zemin modelin eleştirel bir çalışmasının yanı sıra ilgili bazı fikirlerin daha da geliştirilmesini içermektedir. Diğer zemin modellerinin yanı sıra, Pasternak zeminin "genelleştirilmiş" zemin için mekanik bir model olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda, düzlem geriliminde veya düzlem gerilmesinde Pasternak zemini için çekirdeğin Wieghardt'ın üstel çekirdeği ile aynı olduğu ve üç boyutlu durum için çekirdeğin değiştirilmiş bir Bessel fonksiyonu olduğu da gösterilmiştir. Ayrıca, Wieghardt tarafından ortaya konulan ve Pflanz tarafından daha da ayrıntılı olarak açıklandığı gibi, klasik plak teorisinde sürekli bir zemin üzerine oturan sonlu bir kiriş veya plak probleminin "çözümünün" doğru olmadığı ve bu tür problemlerin izin verilen herhangi bir yük dağılımı için çözülebildiği gösterilmiştir. Makale boyunca, söz konusu fiziksel problemlerin uygun matematiksel formülasyonuna vurgu yapılmıştır.

Vlasov ve Leont'ev (1966), kitabı elastik zemin üzerinde bulunan yapısal sistemlerin davranışları ile ilgili kapsamlı bir eserdir. Zemin modeli olarak, ayrık bağlantılı olmayan halkaların bir seti gibi ele alınarak yapı-zemin etkileşiminin basit hale indirgenmesine rağmen yeteri kadar doğru olmayan sonuçlar verdiği vurgulanmıştır. Kitapta, gerçekçi sonuçların elde edebilmesi için toprağın elastik-plastik deformasyonu göz önüne alınmasının şart olduğu sonucuna varılmıştır. Kitapta, birçok teorik problemin çözümünün adi diferansiyel denklemlerin çözümüne indirgenmesi önerilmiştir. Önerilen matematiksel yöntemlerle, sadece elastik zemin üzerindeki kiriş ve plakların davranışları değil, aynı zamanda çeşitli kompleks problemlerin çözülebileceği belirtilmiştir. Kabuk yapıların analizlerinde, zemin deformasyonun yanı sıra eklentili enine yüklerin hesaba katılmasının gerekliliği vurgulanmıştır. Kitapta yer alan pratik problemlerin çözümü ve bulgular mühendislerin pratik uygulamalarında ve bilimsel araştırmalarda kullanılabilir.

Volmir (1967) kitabı farklı şekil ve tasarımlardaki çubuklar, plakalar, kabuklar, kirişler ve çerçeveler gibi çeşitli yapısal elemanların stabilitesini ele almaktadır. Belirli hidroelastisite ve aeroelastisite problemlerini ana hatlarıyla incelemektedir. Dinamik kararlılık kriterleri, başlangıç kusurları, eksantrik sıkıştırma problemleri, dinamik programlama ve analog bilgisayarların kullanımları ile tartışılmıştır.

Ogibalov ve Koltunov (1969) kitabı, değişik şekilli plak ve kabukların davranışlarına ilişkin detaylı bilgiler ve çözüm yöntemleri içermektedir. Lineer ve lineer olmayan teoriler kullanılarak yapısal sistemlerin titreşim, stabilite ve eğilme problemleri formüle edilmiş ve çeşitli sınır değer problemleri farklı metotlarla çözümlenerek analizler yapılmıştır. Ayrıca, fiziksel ve geometrik lineer olmama dikkate alınarak anisotrop yapısal sistemlerin stabilite ve titreşim problemlerinin çözümü kitapta sunulmuştur. Kitapta bazı deneysel sonuçlara yer verilmiş ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunlara ilaveten, kitapta elastik olmayan yapısal sistemlerin burkulmasına ilişkin bazı özgün sonuçlar yer almaktadır.

Morlowe ve Suchinsky (1972) monografide silindirik kabukların burulma yükü etkisi altında burkulma problemini ele almıştır. Burulmaya maruz laminat kabukların tasarımı ve optimum mukavemeti için test çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler değişik malzemeler için detaylı olarak tartışılmıştır.

Bajenov (1975), elastik ve visko elastik ortamlarda silindirik kabukların stabilite problemlerinin çözümünü sunmuştur. Kitapta silindirik kabuk- zemin etkileşiminin analitik modelleri ve değişik sınır koşulları ve yükleme durumları için bazı problemlerin çözümleri yer almaktadır. Ayrıca, kitapta elastik ve visko-elastik ortamların özelliklerini karakterize eden çeşitli katsayıların değerleri belirlenmiştir.

Gorbunov-Posadov vd. (1984) kitabı elastik bir zemin üzerindeki ana yapı türlerini hesaplamak için pratik öneriler ve çizelgeler içermektedir. Kitapta bina ve yapıların temelleri, rıhtım tabanları, kanallar, asansörler, endüstriyel binaların zeminleri vb zemin türleri ile ilgili detaylı analizler yapılmıştır. Modern zemin mekaniğinden yeni bilgiler verilerek, araştırma ve tasarım organizasyonlarının bilimsel ve mühendislik çalışanları için zemin temellerinin ve temellerin doğrusal olmayan deformasyonlar alanında betonarme teorisi, büyük boyutlu plakaların hesaplanması için bilgisayar yazılımı kullanılarak bir metodoloji açıklanmıştır.

Suresh ve Mortensen (1998) monografisi, metal-seramik kompozitlerde termoelastik ve termoplastik deformasyonun temellerine genel bir bakışla başlamaktadır. Karışım yaklaşımları kuralı, ortalama alan teorileri, kristal plastisite modelleri, ayırık dislokasyon modelleri ve kompozitlerin kurucu fazlarının sürekli sonlu eleman formülasyonları dahil olmak üzere çeşitli yaklaşımlar tartışılmış ve bu yaklaşımların önemi ve sınırlamaları vurgulanmıştır. Daha sonra, derecelendirilmiş malzemelerin termomekanik analizlerine özgü konular ele alınmıştır. Dereceli çok tabakaların termal, elastik ve plastik deformasyonu için modeller daha sonra termomekanik performans için 'tasarım diyagramları' geliştirme stratejileriyle birlikte klasik kiriş ve plaka teorileri bağlamında sunulmuştur. Kademeli çok tabakalardaki büyük deformasyona bağlı olarak istikrarsızlığın başlangıcını ve ani şekil değişikliklerini yöneten koşulları belirleme yöntemleri de sağlanmıştır. Makroskopik süreklilik analizlerini, von Mises tipi ve kristal plastisite teorilerini çağırان hesaplama modellerine başvurarak gerçek mikroyapısal dağılımların mikromekanik simülasyonlarının tartışmaları takip eder. Daha sonra, bu tür modellerin geçerliliğini değerlendirmek için deneysel yöntemler, metal-seramik konsantrasyonlarında gradyanlara sahip model sistemlerdeki sıcaklık gezintilerinden kaynaklanan indüklenmiş iç gerilmelerin ve termal gerilmelerin tipik sonuçlarıyla birlikte incelenmiştir.

Amabili (2008) kitabı, doğrusal olmayan titreşimlerin hem teorik hem de deneysel yönlerini, ayrıca kabuk ve plakların kararlılık davranışını araştırmaktadır. Kitapta akışkan-yapı etkileşimli gelişmiş kabuk problemleri de dahil olmak üzere doğrusal olmayan titreşimler, kabuk ve plakların stabilitesine ilişkin son gelişmeler yer almaktadır. Geleneksel ve gelişmiş malzemelerden oluşan kabuk ve plakların tasarımı için yararlı olan birçok pratik kavram, diyagram ve sayısal sonuçlar kitapta yer almaktadır. Dinamik kararsızlık, çatallanma ve kaos gibi karmaşık olayları kapsamlı bir matematiksel altyapıya ihtiyaç duymadan anlaşılmaktadır. Kitapta kabuk ve plakaların doğrusal olmayan mekaniği üzerine, hemen hemen tüm mevcut teorileri kapsayan bilgiler sunulmaktadır. Ayrıca, doğrusal olmayan dinamiğe giriş ve doğrusal olmayan titreşimlerle ilgili son teknoloji ve akışkan-yapı etkileşim problemleri dahil olmak üzere kabukların ve plakaların stabilitesi üzerine problemlerin çözümü sunulmaktadır.

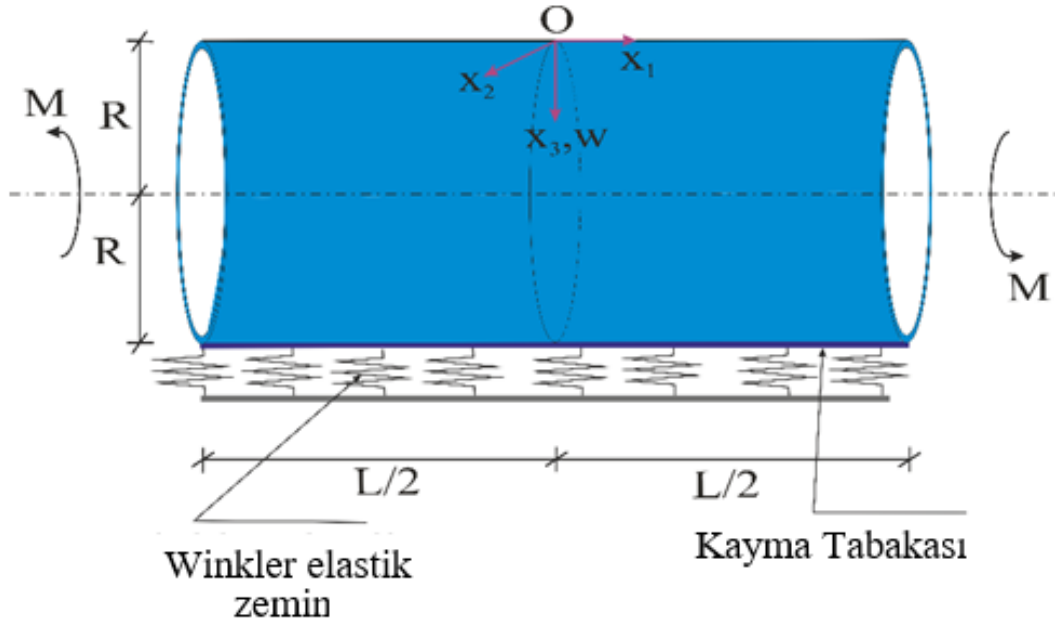
Shen (2009a) kitabı FDM'lerden oluşan yapı sistemlerinin stabilite ve titreşimi ile ilgili il kapsamlı çalışma olup beş bölümden oluşur. Başlangıçta havacılık uygulamaları ve füzyon reaktörleri için termal bariyer malzemeleri olarak tasarlanan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler (FDM'ler) artık aşırı yüksek sıcaklık ortamlarında yapısal bileşenler olarak yaygın şekilde kullanıldığı kitabın giriş kısmında belirtilmiştir. Bölüm 1'de, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin ve yapıların modellenmesi, Bölüm 2 ve 3' te ise kayma deformasyonlu FDM'lerden oluşan plakaların doğrusal olmayan burkulması ve burkulma ötesi davranışları araştırılmaktadır. Bölüm 4 ve 5, kayma deformasyonlu FDM'lerden oluşan plakaların doğrusal olmayan titreşimine ve kayma deformasyon teorisi kapsamında FDM'lerden oluşan kabuklarının burkulma ötesi sonuçlarının karıştırılmasına adanmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Problemin Formülasyonu

Şekil 1’ de sunulan, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeden oluşturulan kalınlığı h , yarıçapı R ve uzunluğu L olan silindirik kabuk iki parametrelili elastik zemin üzerinde olup kenarlardan burulma yüküne maruz kalmaktadır. $Ox_1x_2x_3$ koordinat sistemi kabuğun orta yüzeyinin orta noktasında seçilmiştir ve Ox_1 eksenini ana doğrultuda, Ox_2 eksenini çevresel doğrultuda, Ox_3 eksenini ise diğer iki eksenin bulunduğu yüzeye normal olup içe doğru yönelmiştir (Şekil 3.1). Seçilen koordinat sisteminde, sıg kabuklar aşağıdaki gibi üç boyutlu Γ bölgesi olarak tanımlanır:

$$\Gamma = \{x_1, x_2, x_3 : (x_1, x_2, x_3) \in [0, a] \times [0, 2\pi R] \times [-t/2, t/2]\}$$



Şekil 3.1. İki parametrelili elastik zemin üzerine oturan fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeden oluşan silindirik kabuk ve koordinat sistemi

Literatürde kabuk-zemin etkileşimine ilişkin önemli yayınların mevcut olmasına rağmen, onların büyük çoğunluğu Winkler zemini üzerinde bulunan çeşitli plak ve

kabukların davranışları ile ilgilidir. Winkler elastik zemin modelinin gerçeği iyi yansıtmaması nedeniyle araştırmacılar farklı zemin modellerinin oluşumu için girişimler yapmışlardır. Bu girişimlerden biri iki parametrelili zemin modelinin ortaya çıkmasını sağlamıştır (Pasternak, 1954). İki parametrelili elastik zemin modeli, sıkıştırılamayan dikey elemanlardan oluşan yayların uçları üzerine kayma tabakası adlandırılan ince bir tabaka konularak elde edilmektedir (Bkz., Şekil 3.2). İki parametrelili elastik zemin modelinde, kayma tabakası sonlu kalınlığa sahip olmayıp, sadece zeminin davranışını karakterize etmek için kullanılmaktadır (Pasternak, 1954; Kerr, 1964; Vlasov ve Leont'ev, 1966; Gorbunov–Possadov vd., 1984).

Tez çalışmasında, İki parametrelili elastik zemin modeli kullanılmaktadır (Şekil 3.2). İki parametrelili elastik zemin modelinin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir (Pasternak, 1954; Kerr, 1964; Vlasov and Leont'ev, 1966; Bajenov, 1975; Gorbunov–Possadov et al., 1984):

$$N = K_1 w - K_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right) \quad (3.1)$$

Burada, N iki parametrelili zeminin birim alandaki tepki kuvveti, K_1 (N/m^3) elastik zeminin taban reaksiyon katsayısı, K_2 elastik zeminin kayma modülüdür ve w kabuk kalınlığından çok küçük olup referans yüzeye normal doğrultuda içe doğru yönelik yer değiştirmedir. (3.1) bağıntısından görüldüğü gibi $K_2 = 0$ ise iki parametrelili elastik zeminin modeli Winkler elastik zemin modeline dönüşür (Şekil 3.1).

3.2. FDM'lerin Matematiksel Modellenmesi ve Görseller

İlk önce, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerin matematiksel modellenmesini sunalım. FDM'ler genellikle termal bariyer yapıları olarak kullanıldığından yüksek sıcaklıklara maruz kalmaktadırlar. Kurucu unsurun malzeme özellikleri farklı sıcaklıklarda değiştiğinden dolayı yapı özelliklerinin sıcaklığa bağımlılığının hesaba katılması gerekir. Araştırmalarda tipik bir F_i özelliğinin T (K)

sıcaklığına bağlı lineer olmayan değişimi yaygın olarak şu şekilde ifade edilmektedir (Bkz., Touloukian, 1967): $F_i = F_0 (F_{-1}T^{-1} + 1 + F_1T + F_2T^2 + F_3T^3)$

Burada F_0 , F_{-1} , F_1 , F_2 , ve F_3 sembolleri T (Kelvin) sıcaklığına bağlı katsayıları olup Çizelge 1'de sunulmaktadır. Ayrıca, F_0 , F_{-1} , F_1 , F_2 , ve F_3 katsayıları her malzeme için benzersizdir.

Çizelge 3.1. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeleri oluşturan bileşenlerin özellikleri

Katsayılar	Si ₃ N ₄		SUS304	
	E^c (Pa)	ν^c	E^m (Pa)	ν^m
F_0	3.4843×10^{11}	0.24	2.0104×10^{11}	0.3262
F_{-1}	0	0	0	0
F_1	-3.07×10^{-4}	0	-3.079×10^{-4}	-2.002×10^{-4}
F_2	2.160×10^{-7}	0	-6.534×10^{-7}	3.797×10^{-7}
F_3	-8.946×10^{-11}	0	0	0
F	3.2227×10^{11}	0.24	2.07788×10^{11}	0.317756
	ZrO ₂		Ti6Al4V	
	E^c (Pa)	ν^c	E^m (Pa)	ν^m
F_0	2.4427×10^{11}	0.2882	1.2256×10^{11}	0.2884
F_{-1}	0	0	0	0
F_1	-1.371×10^{-3}	1.133×10^{-4}	-4.586×10^{-4}	1.121×10^{-4}
F_2	1.214×10^{-6}	0	0	0
F_3	-3.681×10^{-9}	0	0	0
F	1.68063×10^{11}	0.298	1.056982×10^{11}	0.2981

Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler modellendiğinde onların etkin malzeme özellikleri hem ısıya hem de konuma bağlı olabilir. Hacim fraksiyonu, sadece kalınlık koordinatının bir fonksiyonu olup, bileşenlerin etkin özellikleri ise sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Bu fonksiyonların kombinasyonu, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzeme özelliklerini oluşturur ve söz konusu özelliklerin aşağıdaki gibi ifade edilmesine olanak sağlar (Touloukian, 1967; Koizumi, 1993; Suresh ve Mortensen, 1998):

$$F^{fd} = (F^c - F^m)V^c + F^m \quad (3.2)$$

Burada, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemenin seramik ve metal yüzeylerinin özellikleri sırasıyla F^c ve F^m ile, seramik hacim fraksiyonun ise V^c ile gösterilmektedir. Ayrıca seramik hacim fraksiyonu V^c ve metal hacim fraksiyonu V^m arasında aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$V^c + V^m = 1 \quad (3.3)$$

Basit bir kuvvet kuralı takip edilerek, silindirik kabuğun malzeme bileşiminin, iç yüzey seramik açısından zengin ve dış yüzey metal açısından zengin olacak şekilde, bileşenlerin hacim fraksiyonlarının kalınlık boyunca sürekli ve yumuşak bir şekilde değiştiğini varsayalım. Bu varsayım, seramik hacim fraksiyonunun matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilmesini sağlar (Bkz., Shen, 2009a):

$$V^c = (\bar{x}_3 + 0.5)^k \quad (3.4)$$

Burada k hacim fraksiyon indeksi olup malzeme dağılımını tanımlayan negatif olmayan bir sayıdır.

Denklem (3.2) ve (3.4) 'den FDM'lerden oluşan silindirik kabuğun etkin özellikleri, yani etkin Young modülü $E^{fd}(\bar{x}_3)$ ve etkin Poisson oranı $\nu^{fd}(\bar{x}_3)$ aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$E^{fd}(\bar{x}_3) = E^m + (E^c - E^m)V^c, \nu^{fd}(\bar{x}_3) = \nu^m + (\nu^c - \nu^m)V^c \quad (3.5)$$

FDM'lerden oluşan silindirik kabuğun etkin özelliklerinin üstel fonksiyon olarak da değiştiği bilinmektedir. Bu durumda FDM'lerden oluşan silindirik kabuğun etkin malzeme özellikleri aşağıdaki bağıntıları sağlamaktadır (Shen, 2009a):

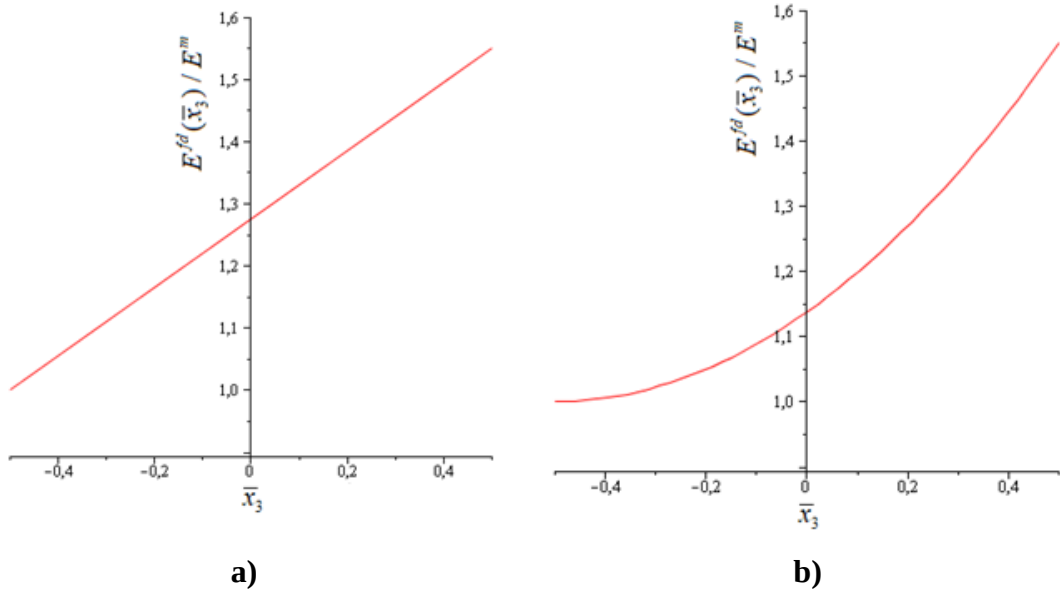
$$E^{fd}(\bar{x}_3) = E^m e^{(\bar{x}_3 + 1/2) \ln(E^c/E^m)}, \nu^{fd}(\bar{x}_3) = \nu^m e^{(\bar{x}_3 + 1/2) \ln(\nu^c/\nu^m)} \quad (3.6)$$

Şekil 3.2-3.12' de, FDM'lerden oluşan silindirik kabukların hacim fraksiyonu kuvvet ve üstel fonksiyonlar olarak değiştiğinde boyutsuz etkin elastisite modülünün kalınlık

koordinatına bağlı dağılımının iki ve üç boyutlu topolojisi Maple 14 yazılım programı kullanılarak çizilmiştir.

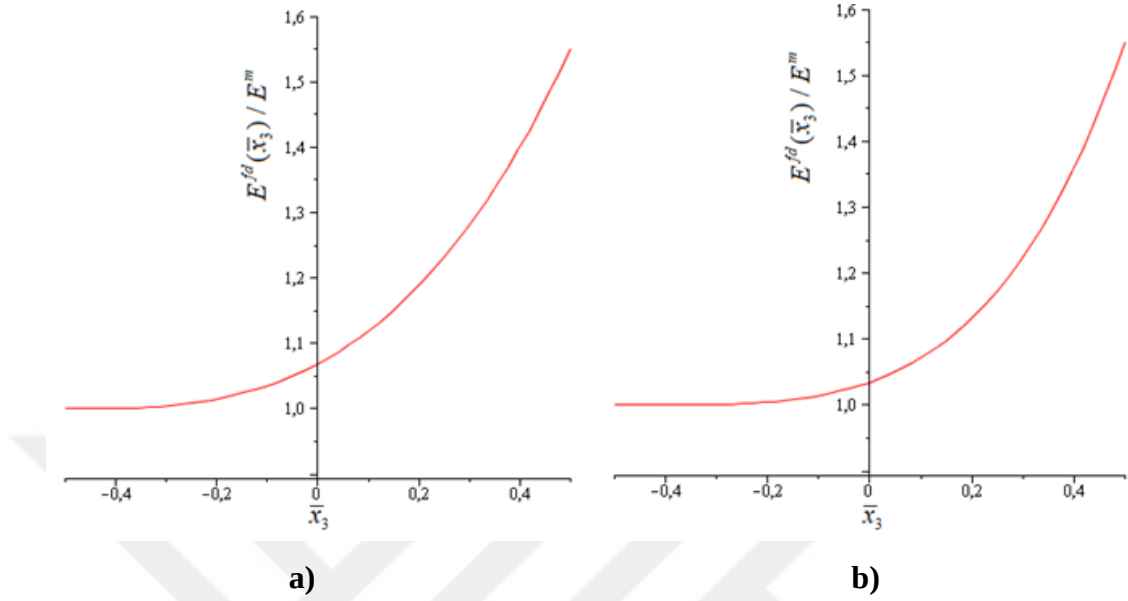
Önce $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS304}$ karışımından yani silikon nitrat ve paslanmaz çelik karışımından oluşan FDM'lerden oluşan silindirik kabuklarda, boyutsuz kalınlık koordinatı $-0.5 \leq \bar{x}_3 \leq 0.5$ aralığında değiştiğinde, $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ boyutsuz etkin elastisite modülünün veya etkin elastisite modülünün metalin elastisite modülüne oranı, hacim fraksiyon indeksi $k=1,2,3,4,5$ ve 10 için ve hacim fraksiyonu üstel olarak değiştiğinde Maple 14 programı kullanılarak iki boyutlu olarak Şekil 3.2-3.5'de sunulmaktadır. Tüm şekillerde dikey eksen etkin izotropik elastisite modülünün metalin elastisite modülüne oranını, yani $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranını, yatay eksen ise FDM'lerden oluşan kabuğun boyutsuz kalınlık koordinatına, yani $\bar{x}_3 = x_3 / h$ oranına bağlı değişimini göstermektedir.

Hacim fraksiyon indeksi için (3.4) bağıntısında (a) $k=1$ ve (b) $k=2$ için dikkate alındığında, $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranının $\bar{x}_3$ koordinatına bağlı dağılımı iki boyutlu olarak Şekil 3.2'de Maple 14 programı kullanılarak çizilmiştir.



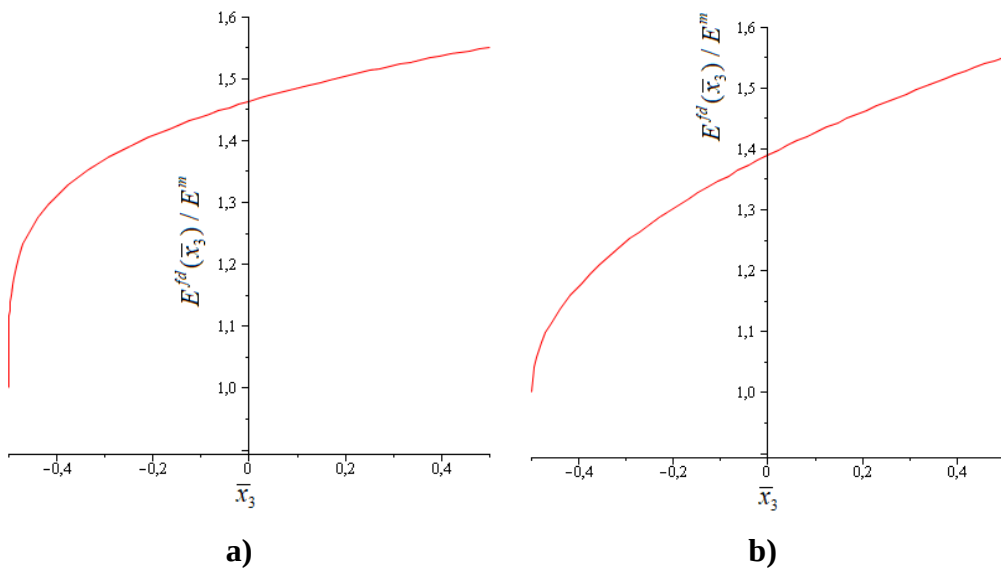
Şekil 3.2. Hacim fraksiyon indeksi (a) $k=1$ ve (b) $k=2$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranının iki boyutlu gösterimi

Hacim fraksiyon indeksi için (3.4) bağıntısında (a) $k = 3$ ve (b) $k = 4$ için dikkate alındığında, $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının $\bar{x}_3$ boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımı iki boyutlu olarak Şekil 3.3’de Maple 14 programı kullanılarak çizilmiştir.



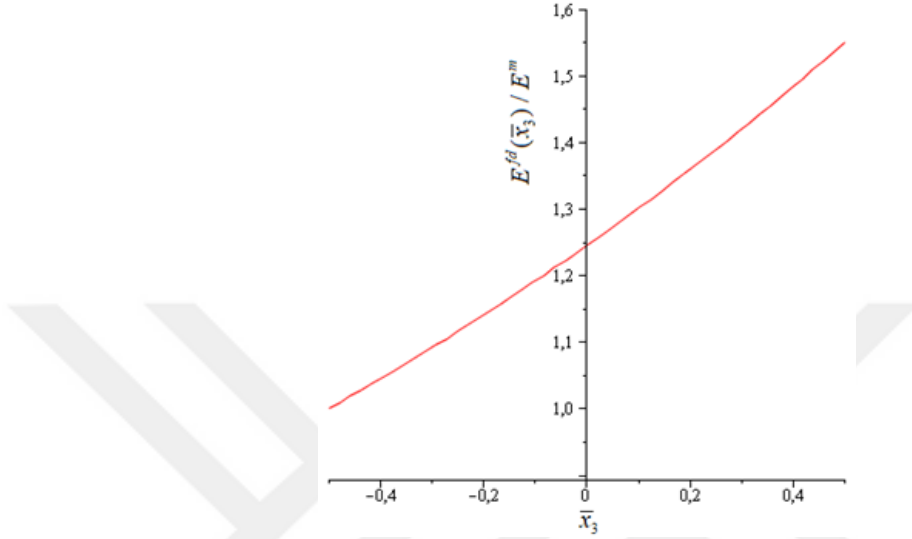
Şekil 3.3. Hacim fraksiyon indeksi (a) $k = 3$ ve (b) $k = 4$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının iki boyutlu gösterimi

Hacim fraksiyon indeksi için (3.4) bağıntısında (a) $k = 0.25$ ve (b) $k = 10$ için dikkate alındığında $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının $\bar{x}_3$ koordinatına bağlı dağılımı iki boyutlu olarak Şekil 3.4’de Maple 14 programı kullanılarak gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Hacim fraksiyon indeksi (a) $k = 0.25$ ve (b) $k = 10$ için $E^{fd}(\bar{x}_3) / E^m$ oranının iki boyutlu gösterimi

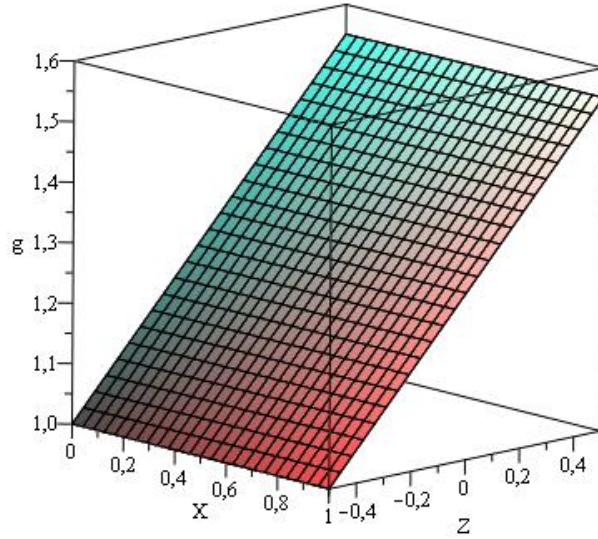
Hacim fraksiyonu üstel olarak değiştiğinde yani etkin Young modülünün metalin Young modülüne oranı $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m = e^{(\bar{x}_3+1/2)\ln(E^c/E^m)}$ şeklinde ifade edildiğinde $\bar{x}_3$ koordinatına bağlı dağılımı iki boyutlu olarak Şekil 3.5’de Maple 14 programı kullanılarak gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Hacim fraksiyonu üstel olarak değiştiğinde $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranının iki boyutlu gösterimi

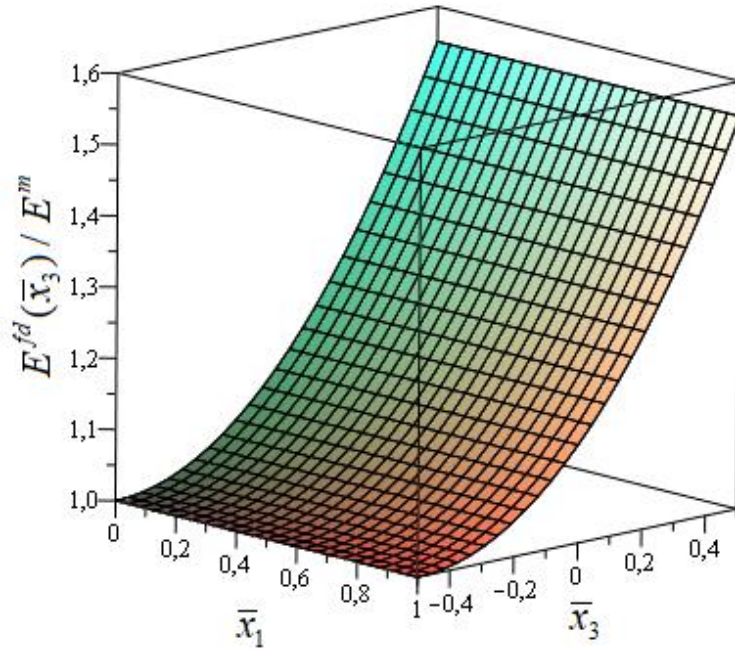
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SUS304}$ karışımından yani silikon nitrat ve paslanmaz çelik karışımından oluşan FDM silindirik kabuklarda, boyutsuz kalınlık koordinatı $-0.5 \leq \bar{x}_3 \leq 0.5$ aralığında ve boyutsuz uzunluk koordinatı $0 \leq \bar{x}_1 \leq 1$ aralığında değiştiğinde, $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ boyutsuz etkin elastisite modülünün veya etkin elastisite modülünün metalin elastisite modülüne oranı, hacim fraksiyon indeksi $k = 0.25, 0.5, 1, 2, 3, 4$ için ve hacim fraksiyonu üstel olarak değiştiğinde Maple 14 programı kullanılarak üç boyutlu olarak Şekil 3.6-3.12’de sunulmaktadır. Tüm şekillerde eksenler üzerinde $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$, $\bar{x}_1 = x_1/L$ ve $\bar{x}_3 = x_3/h$ sembolleri kullanılmaktadır.

Hacim fraksiyon indeksi için (3.4) bağıntısında $k=1$ dikkate alındığında, yani $V^c = \bar{x}_3 + 1/2$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m = (E^c/E^m - 1)(\bar{x}_3 + 1/2) + 1$ oranının $\bar{x}_3$ koordinatına bağlı dağılımı Maple 14 programı kullanılarak üç boyutlu olarak Şekil 3.6’da gösterilmektedir.



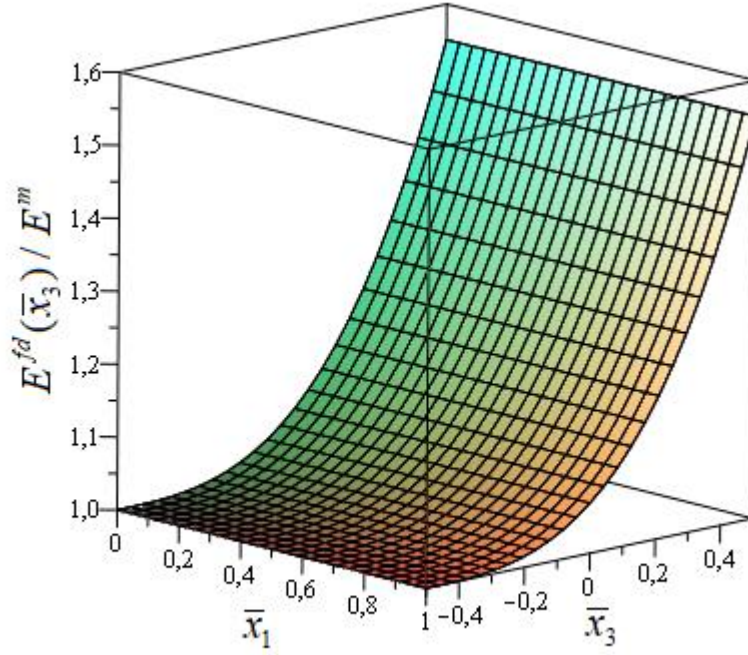
Şekil 3.6. Hacim fraksiyon indeksi $k=1$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi

Hacim fraksiyon indeksi için (3.4) bağıntısında $k=2$ dikkate alındığında, yani $V^c = (\bar{x}_3 + 1/2)^2$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m = (E^c/E^m - 1)(\bar{x}_3 + 1/2)^2 + 1$ oranının $\bar{x}_3$ koordinatına bağlı dağılımı Maple 14 programı kullanılarak üç boyutlu olarak Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



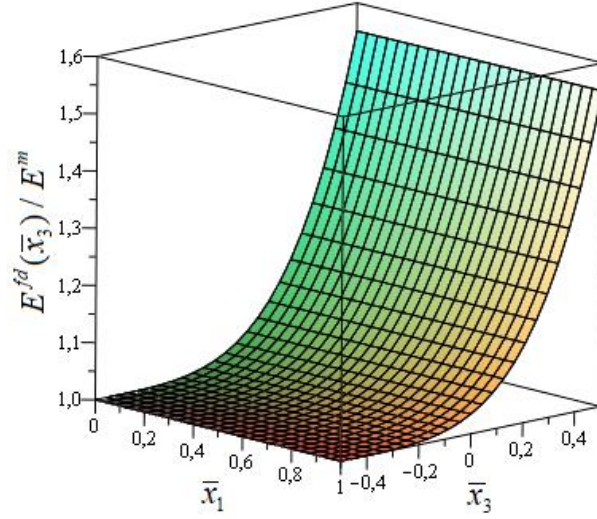
Şekil 3.7. Hacim fraksiyon indeksi $k=2$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi

Hacim fraksiyon indeksi için (3.4) bağıntısında $k = 3$ dikkate alındığında, yani hacim fraksiyonu $V^c = (\bar{x}_3 + 1/2)^3$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m = (E^c/E^m - 1)(\bar{x}_3 + 1/2)^3 + 1$ oranının $\bar{x}_3$ boyutsuz kalınlık koordinatına bağlı dağılımı üç boyutlu olarak Şekil 3.8’de Maple 14 programı kullanılarak çizilmiştir.



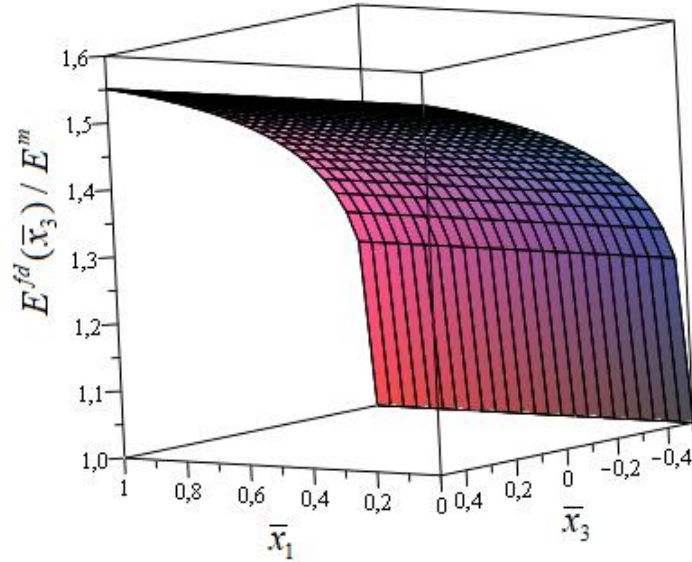
Şekil 3.8. Hacim fraksiyon indeksi $k = 3$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi

Hacim fraksiyon indeksi için (3.4) bağıntısında $k = 4$ dikkate alındığında, yani $V^c = (\bar{x}_3 + 1/2)^4$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m = (E^c/E^m - 1)(\bar{x}_3 + 1/2)^4 + 1$ oranının $\bar{x}_3$ koordinatına bağlı dağılımı üç boyutlu olarak Şekil 3.9’da Maple 14 programı kullanılarak gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Hacim fraksiyon indeksi $k = 4$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi

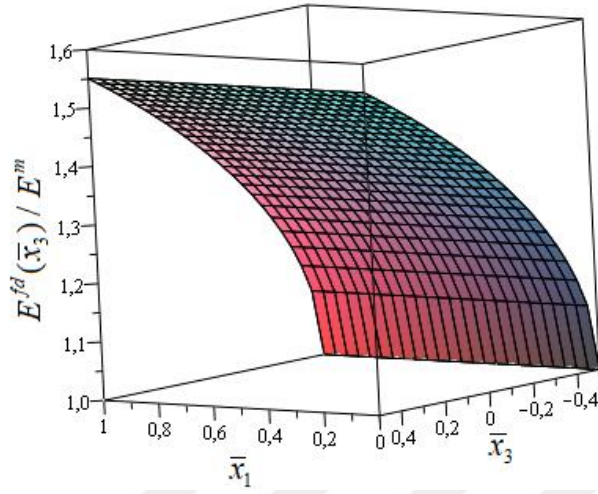
Hacim fraksiyon indeksi için (3.4) bağıntısında $k = 0.25$ dikkate alındığında, yani $V^c = (\bar{x}_3 + 1/2)^{0.25}$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m = (E^c/E^m - 1)(\bar{x}_3 + 1/2)^{0.25} + 1$ oranının $\bar{x}_3$ koordinatına bağlı dağılımı üç boyutlu olarak Şekil 3.10'da Maple 14 programı kullanılarak gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Hacim fraksiyon indeksi $k = 0.25$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi

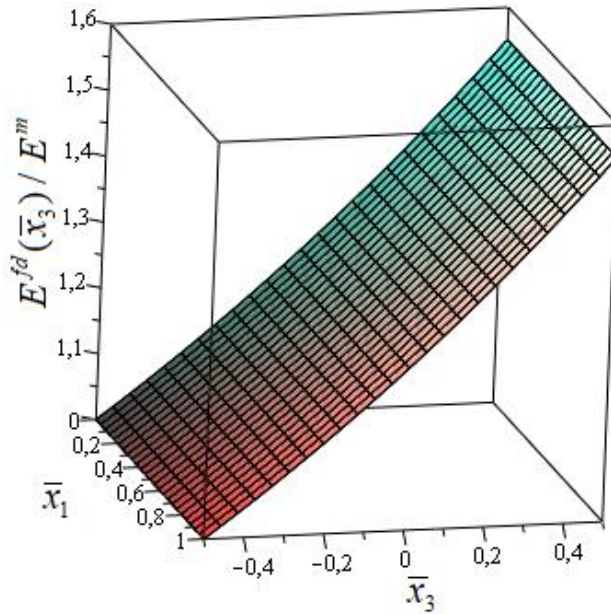
Hacim fraksiyon indeksi için (3.4) bağıntısında $k = 0.5$ dikkate alındığında, yani $V^c = (\bar{x}_3 + 1/2)^{0.5}$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m = (E^c/E^m - 1)(\bar{x}_3 + 1/2)^{0.5} + 1$ oranının $\bar{x}_3$

koordinatına bağlı dağılımı üç boyutlu olarak Şekil 3.11’de Maple 14 programı kullanılarak gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Hacim fraksiyon indeksi $k = 0.5$ için $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ boyutsuz etkin Young modülünün üç boyutlu gösterimi

Hacim fraksiyonu üstel olarak değiştiğinde yani etkin Young modülünün metalin Young modülüne oranı $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m = e^{(\bar{x}_3 + 1/2)\ln(E^c/E^m)}$ şeklinde ifade edildiğinde $\bar{x}_3$ koordinatına bağlı dağılımı üç boyutlu olarak Şekil 3.12’de Maple 14 programı kullanılarak gösterilmektedir.



Şekil 3.12. Hacim fraksiyonu üstel olarak değiştiğinde $E^{fd}(\bar{x}_3)/E^m$ oranının üç boyutlu gösterimi

3.3. Fonksiyonel Olarak Derecelendirilmiş Malzemelerden Oluşan Silindirik Kabukların Temel Bağıntılarının Oluşturulması

Kirchoff-Love varsayımı dikkate alındığında, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerden oluşan silindirik kabukların temel bağıntılar aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Shen, 2009)

$$\begin{bmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{11} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Burada, $\tau_{ij}(i, j=1,2)$ ve $\varepsilon_{ij}(i, j=1,2)$ gerilme ve deformasyon bileşenleri olup $Q_{ij}(i, j=1,2,,6)$ fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemedan oluşan silindirik kabukların özelliklerine bağlı katsayılar olup aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$Q_{11} = \frac{E^{fd}(\bar{x}_3)}{1 - [\nu^{fd}(\bar{x}_3)]^2}, \quad Q_{12} = \frac{\nu^{fd}(\bar{x}_3)E^{fd}(\bar{x}_3)}{1 - [\nu^{fd}(\bar{x}_3)]^2}, \quad Q_{66} = \frac{E^{fd}(\bar{x}_3)}{1 + \nu^{fd}(\bar{x}_3)} \quad (3.8)$$

Silindirik kabuğun herhangi noktasındaki deformasyon bileşenleri ile orta yüzeydeki deformasyon bileşenleri ve eğrilik değişimleri arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi yazılabilir (Ogibalov ve Koltunov, 1969; Amabili, 2008):

$$\varepsilon_{11} = e_{11} - x_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2}, \quad \varepsilon_{22} = e_{22} - x_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2}, \quad \varepsilon_{12} = e_{12} - 2x_3 \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_{12}} \quad (3.9)$$

Burada $e_{ij}(i, j=1,2)$ FDM'den oluşan silindirik kabuğun referans yüzeyindeki deformasyon bileşenleridir.

Bilindiği gibi $N_{ij}(i, j=1,2)$ kuvvet bileşenleri gerilme bileşenleri ile aşağıdaki integrallerle ifade edilir (Volmir, 1967):

$$\begin{bmatrix} N_{11} \\ N_{12} \\ N_{22} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} dx_3 \quad (3.10)$$

Benzer şekilde $M_{ij}(i, j=1,2)$ moment bileşenleri gerilme bileşenleri ile aşağıdaki integrallerle ifade edilir (Ogibalov ve Koltunov; Morlowe ve Suchinsky, 1972; Amabili, 2008):

$$\begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{12} \\ M_{22} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \tau_{11} \\ \tau_{22} \\ \tau_{12} \end{bmatrix} x_3 dx_3 \quad (3.11)$$

(3.9) bağıntısı (3.7)' de ikame edilerek, elde edilen ifadeler (3.10) ve (3.11) bağıntılarına ikame edildiğinde, FDM'den üretilen silindirik kabukların kuvvet ve moment bileşenleri, orta yüzeydeki deformasyon bileşenleri ve eğrilik değişimleri ile aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{110}e_{11} + a_{120}e_{22} - a_{111} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - a_{121} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \\ a_{120}e_{11} + a_{110}e_{22} - a_{121} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - a_{111} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \\ a_{660}e_{12} - a_{661} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{111}e_{11} + a_{121}e_{22} - a_{112} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - a_{122} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \\ a_{121}e_{11} + a_{111}e_{22} - a_{122} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - a_{112} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \\ a_{661}e_{12} - 2a_{662} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Burada, kullanılan semboller aşağıdaki bağıntıları içerir:

$$\begin{aligned} a_{11i} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E^{fd}(\bar{x}_3)}{1 - [\nu^{fd}(\bar{x}_3)]^2} dx_3, \quad a_{12i} = \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\nu^{fd}(\bar{x}_3) E^{fd}(\bar{x}_3)}{1 - [\nu^{fd}(\bar{x}_3)]^2} dx_3, \\ a_{66i} &= \int_{-h/2}^{h/2} \frac{E^{fd}(\bar{x}_3)}{2[1 + \nu^{fd}(\bar{x}_3)]} dx_3 \quad (i = 0, 1, 2) \end{aligned} \quad (3.14)$$

N_{ij} (i, j=1,2) kuvvet bileşenleri ve Airy gerilme fonksiyonu Φ arasında aşağıdaki gibi bir ilişki kullanılmaktadır (Amabili, 2008):

$$\begin{bmatrix} N_{11} \\ N_{22} \\ N_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2} \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2} \\ -\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial x_2} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

(3.12) bağıntılar sisteminden e_{ij} (i, j=1,2) çekilerek, (3.15) elde edilen bağıntılara ikame edildiğinde, aşağıdaki matris denklemler seti elde edilir:

$$\begin{bmatrix} e_{11} \\ e_{22} \\ e_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2} + b_{12} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - b_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - b_{14} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \\ b_{12} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2} + b_{11} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - b_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - b_{14} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \\ -b_{31} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial x_2} - b_{32} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned} b_{11} &= a_{110} / \Delta, \quad b_{12} = a_{120} / \Delta, \quad b_{13} = (a_{120} a_{121} - a_{111} a_{110}) / \Delta, \\ b_{14} &= (a_{120} a_{111} - a_{121} a_{110}) / \Delta, \quad b_{31} = 1 / a_{660}, \\ b_{32} &= -a_{661} / a_{660}, \quad \Delta = (a_{110}^2 - a_{120}^2) \end{aligned} \quad (3.17)$$

(3.16) bağıntıları (3.13)'e ikame edildiğinde, Airy gerilme fonksiyonu ve çökme fonksiyonuna bağlı moment bileşenlerinin ifadeleri şu şekle dönüşür:

$$\begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{22} \\ M_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2} + c_{12} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - c_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - c_{14} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \\ c_{12} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_2^2} + c_{11} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - c_{13} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - c_{14} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \\ -c_{31} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial x_2} - c_{32} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

ifadeleri elde edilir. Burada, şu tanımlar geçerlidir:

$$\begin{aligned} c_{11} &= a_{111} b_{11} + a_{121} b_{12}, \quad c_{12} = a_{111} b_{12} + a_{121} b_{11} \\ c_{13} &= a_{111} b_{13} + a_{121} b_{11} + a_{112}, \quad c_{14} = a_{111} b_{14} + a_{121} b_{13} + a_{122}, \\ c_{31} &= a_{661} b_{61}, \quad c_{32} = a_{661} b_{62} + a_{662}, \end{aligned} \quad (3.19)$$

Pasternak elastik zemini üzerindeki, FDM'lerden oluşan silindirik kabukların genel halde stabilite denklemleri Hamilton prensibi uygulanarak aşağıdaki gibi elde edilir (Wolmir,1967; Sheng and Wang, 2008):

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial N_{12}}{\partial x_2} &= 0, \quad \frac{\partial N_{21}}{\partial x_1} + \frac{\partial N_{22}}{\partial x_2} = 0, \\ \frac{\partial^2 M_{11}}{\partial x_1^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial^2 M_{22}}{\partial x_2^2} + \frac{N_{22}}{R} + N_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + 2N_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} \\ + N_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} - K_1 w + K_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (3.20)$$

Lineer kabuk teorisi çerçevesinde, FDM'lerden oluşan silindirik kabukların deformasyon uygunluk denklemi aşağıdaki gibi türetilmektedir (Ogibalov ve Koltunov, 1969):

$$\frac{\partial^2 e_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 e_{22}}{\partial x_1^2} - 2 \frac{\partial^2 e_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} = -\frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} \quad (3.21)$$

Lineer kabuk teorisi çerçevesinde, iki parametrelili elastik zemin üzerindeki FDM'lerden oluşan silindirik kabukların stabilite denkleminin üçüncüsü aşağıdaki şekle dönüşür (Bkz., Volmir, 1967):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 M_{11}}{\partial x_1^2} + 2 \frac{\partial^2 M_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} + \frac{\partial^2 M_{22}}{\partial x_2^2} + \frac{N_{22}}{R} + N_{11}^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + 2N_{12}^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} + N_{22}^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \\ & -K_1 w + K_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.22)$$

Burada $N_{11}^0, N_{12}^0, N_{22}^0$, başlangıç momentler sıfıra eşit olduğunda x_1 ve x_2 eksenleri doğrultularında referans yüzeydeki membran kuvvetlerdir.

(3.15) bağıntılarında ikinci terim ile birlikte (3.18) bağıntıları (3.22)' ye ve (3.16) ifadeleri (3.21) deformasyon uygunluk denkleminde ikame edildiğinde, matematiksel işlemler sonrası iki parametrelili elastik zemin üzerindeki FDM'lerden oluşan silindirik kabukların stabilite ve deformasyon uygunluk denklemleri aşağıdaki kısmi diferansiyel denklemlere dönüşür:

$$c_{12} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} + 2(c_{12} - c_{31}) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + c_{12} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_2^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - c_{13} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} - 2(c_{14} + c_{32}) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} - c_{13} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} \quad (3.23)$$

$$+ \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + N_{11}^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + 2N_{12}^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} + N_{22}^0 \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} - K_1 w + K_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right) = 0$$

$$b_{11} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} + 2(b_{12} + b_{31}) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + b_{11} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_2^4} - b_{14} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} - 2(b_{13} - b_{32}) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} - b_{14} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} = 0 \quad (3.24)$$

FDM'lerden oluşan silindirik kabuğa etkiyen aksenal ve dış basınç yükleri göz ardı ederek, kabuğun S uniform pür burulma yükü etkisi altında olduğunu varsayalım (Bkz. Şekil 3.1):

$$N_{11}^0 = 0, N_{12}^0 = -Sh, N_{22}^0 = 0 \quad (3.25)$$

(3.24) ifadeleri (3.23) temel diferansiyel denklemlerinde dikkate alındığında, aşağıdaki şekle dönüşür:

$$\begin{aligned} & c_{12} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} + 2(c_{12} - c_{31}) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + c_{12} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_2^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - c_{13} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} - 2(c_{14} + c_{32}) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} - c_{13} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} \\ & + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - 2Sh \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} - K_1 w + K_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3.26)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Temel Denklemlerinin Çözümü ve Kritik Burkulma Yükünün Bulunması

Burulma durumunda, kabuğun burkulmasına, çembere düzenli olarak yerleştirilmiş, silindirik kabuğun ana doğrultusuna bilinen bir açıyla eğimli olan dalgaların oluşumunun eşlik edeceği varsayılmaktadır. Bu nedenle, çökme ve Airy gerilme fonksiyonları aşağıdaki şekilde aranır (Sofiyev, 2003; Sofiyev ve Schnack, 2004):

$$w = f_1 \sin \frac{\pi x_1}{L} \sin \frac{n(x_2 + qx_1)}{R}, \quad \Phi = f_2 \sin \frac{\pi x_1}{L} \sin \frac{n(x_2 + qx_1)}{R} \quad (4.1)$$

Burada, n çevre doğrultusunda dalga sayısı olup q dalgaların x_1 eksenine ile oluşturduğu açının tanjantıdır, f_1 ve f_2 ise sırasıyla çökme ve Airy gerilme fonksiyonlarının bilinmeyen genliklerdir. (4.1) yaklaşım fonksiyonları $x_1 = \pm \frac{L}{2}$ için $w = 0$ ve $\Phi = 0$ sınır koşullarını sağlaması gerekir. Bunu kontrol edelim:

$$\left. \frac{\partial w}{\partial x_1} \right|_{x_1 = \pm \frac{L}{2}} = \pm \frac{qn}{R} f_1 \cos \frac{n}{R} (x_2 \pm qL/2) \quad (4.2)$$

$$\left. \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} \right|_{x_1 = \pm \frac{L}{2}} = \mp f_1 \left(\frac{\pi^2}{L^2} + \frac{q^2 n^2}{R^2} \right) f_1 \sin \frac{n}{R} (x_2 \pm qL/2) \quad (4.3)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \right|_{x_1 = \pm \frac{a}{2}} = \pm \frac{qn}{R} f_2 \cos \frac{n}{R} (x_2 \pm qL/2) \quad (4.4)$$

$$\left. \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} \right|_{x_1 = \pm \frac{L}{2}} = \mp f_2 \left(\frac{\pi^2}{L^2} + \frac{q^2 n^2}{R^2} \right) f_1 \sin \frac{n}{R} (x_2 \pm qL/2) \quad (4.5)$$

Görüldüğü gibi w yer değiştirmesi ve Φ Airy gerilme fonksiyonu ne mafsalsal ne de ankastre sınır koşullarını sağlamamaktadır. Fakat aşağıdaki integrallerin hesabından görüleceği gibi her iki sınır koşulları integral anlamda sağlanmaktadır:

$$\int_0^{2\pi R} \left(\frac{\partial w}{\partial x_1} \right)_{x_1=\pm 0.5L} dx_2 = \int_0^{2\pi R} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} \right)_{x_1=\pm 0.5L} dx_2 = 0 \quad (4.6)$$

$$\int_0^{2\pi R} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} \right)_{x_1=\pm 0.5L} dx_2 = \int_0^{2\pi R} \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} \right)_{x_1=\pm 0.5L} dx_2 = 0 \quad (4.7)$$

Şimdi matematiksel işlemlerin kolaylığı için (4.1) yaklaşım fonksiyonlarını aşağıdaki şekle dönüştürelim:

$$w = 0.5 f_1 \left\{ \cos \frac{n[x_2 + (q - \lambda)x_1]}{R} - \cos \frac{n[x_2 + (q + \lambda)x_1]}{R} \right\} \quad (4.8)$$

$$\Phi = 0.5 f_2 \left\{ \cos \frac{n[x_2 + (q - \lambda)x_1]}{R} - \cos \frac{n[x_2 + (q + \lambda)x_1]}{R} \right\}$$

Burada, $\lambda = \frac{\pi R}{nL}$ tanımı geçerlidir.

(3.24) ve (3.26) denklemlerine, yani deformasyon uygunluk ve stabilite denklemlerine, $\Lambda = \{(x_1, x_2) : -0.5L \leq x_1 \leq 0.5L, 0 \leq x_2 \leq 2\pi R\}$ bölgesinde ağırlık fonksiyonuna çarparak, Galerkin yöntemi uygulayalım:

$$\int_{-0.5L}^{0.5L} \int_0^{2\pi R} \left[c_{12} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} + 2(c_{12} - c_{31}) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + c_{12} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_2^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - c_{13} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} \right. \\ \left. - 2(c_{14} + c_{32}) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} - c_{13} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} - 2St \frac{\partial^2 w}{\partial x_1 \partial x_2} \right. \quad (4.9)$$

$$\left. - K_1 w + K_2 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial x_2^2} \right) \right] \sin \frac{\pi x}{L} x_1 \sin \frac{n(x_2 + qx_1)}{R} dx_2 dx_1 = 0$$

$$\int_{-0.5L}^{0.5L} \int_0^{2\pi R} \left[b_{11} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^4} + 2(b_{12} + b_{31}) \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} + b_{11} \frac{\partial^4 \Phi}{\partial x_2^4} - b_{14} \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^4} - 2(b_{13} - b_{32}) \frac{\partial^4 w}{\partial x_1^2 \partial x_2^2} \right. \\ \left. - b_{14} \frac{\partial^4 w}{\partial x_2^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 w}{\partial x_1^2} \right] \sin \frac{\pi x_1}{L} \sin \frac{n(x_2 + qx_1)}{R} dx_2 dx_1 = 0 \quad (4.10)$$

(4.9) ve (4.10) denklemlerinden, integrallemeden sonra f_2 genliği yok edilerek, iki parametrelili elastik zemin üzerindeki FDM'den oluşan silindirik kabukların kritik burulma yükü için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$S_{kr} = \frac{1}{2tn^2 q R^2} \left\{ \left[R(q^2 n^2 + \alpha^2) - c_{12}(\alpha^4 + n^4 + 6\alpha^2 n^2 q^2 + n^4 q^4) - 2(c_{11} - c_{13})(n^4 q^2 + \alpha^2 n^2) \right] \right. \\ \times \frac{b_{14}(\alpha^4 + n^4 + 6\alpha^2 n^2 q^2 + q^4 n^4) + 2(b_{13} - b_{32})(n^4 q^2 + \alpha^2 n^2) + (q^2 n^2 + \alpha^2)R}{b_{11}(\alpha^4 + n^4 + 6\alpha^2 n^2 q^2 + q^4 n^4) + 2(b_{12} + b_{31})(n^4 q^2 + \alpha^2 n^2)} \quad (4.11) \\ \left. + c_{13}(6\alpha^2 n^2 q^2 + \alpha^4 + n^4 + q^4 n^4) + 2(c_{14} + c_{32})(n^4 q^2 + \alpha^2 n^2) + [K_1 + K_2(q^2 n^2 + \alpha^2 + n^2)]R^2 \right\}$$

Burada şu sembol kullanılmıştır: $\alpha = \frac{\pi R}{L}$.

(4.11)'den aşağıdaki özel durumlar elde edilir;

(4.11) ifadesinde $K_2 = 0$ olduğunda, Winkler zemini üzerindeki FDM'den oluşan silindirik kabukların kritik burulma yükü için ifade elde edilir.

(4.11) ifadesinde $K_1 = K_2 = 0$ olduğunda, FDM'den oluşan silindirik kabukların kritik burulma yükü için ifade elde edilir.

(4.11) ifadesinde $V^c = 1$ olduğunda zenginleştirilmiş seramikten, $V^m = 1$ olduğunda ise zenginleştirilmiş metalden oluşan ve iki parametrelili elastik zemini üzerinde bulunan homojen silindirik kabukların kritik burulma yükü için ifadeler özel olarak elde edilir.

(4.11) ifadesinde, $K_1 = K_2 = 0$, $V^c = 1$ olduğunda zenginleştirilmiş seramikten, $V^m = 1$ olduğunda ise zenginleştirilmiş metalden oluşan homojen silindirik kabukların kritik burulma yükü için ifadeler özel olarak elde edilir.

(4.11) ifadesi (q, n) parametrelerine göre minimize edildiğinde kritik burulma yükünün minimum değerleri bulunur. Sayısal hesaplarda Maple 14 yazılım programı kullanılmaktadır.

İki parametrelili elastik zemin üzerindeki FDM'den oluşan silindirik kabukların kritik burulma momenti aşağıdaki ifadeden bulunur:

$$M_{kr} = 2\pi R^2 h S_{kr} \quad (4.12)$$

4.2. Karşılaştırmalar

Bu alt bölümde, iki parametrelili elastik zeminin etkisi dikkate alınmadığında, FDM'den oluşan silindirik kabukların burulma burkulma yükünün değerleri literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılarak tez çalışmasının doğruluğu doğrulanmıştır.

Çizelge 4.1'de, FDM'lerden oluşan ($k=1$) silindirik kabukların değişik L/R ve R/h oranları için burulma burkulma yükünün değerleri Huang ve Han (2010) çalışmasındaki sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Seramik-metal karışımından oluşan

FDM, zirkonyum (ZrO_2) ve titanyum-alaşım ($Ti6Al4V$) karışımından ibarettir. Metal (ZrO_2) ve seramik ($Ti6Al4V$) malzemelerinin Young modülü ve Poisson oranı şu şekildedir: $E^c = 1.68063 \times 10^{11}$ Pa, $E^m = 1.05698 \times 10^{11}$ (Pa), $\nu^c = 0.297996$ ve $\nu^m = 0.298099$. FDM'lerden oluşan silindirik kabukların kalınlığı $h = 0.001$ m olup diğer veriler Çizelge 4.1' de sunulmaktadır (Huang ve Han, 2010) çalışmasından alınmıştır. Parantez içerisindeki sayılar, burulma burkulmasında (n, q) değerlerini göstermektedir. Bu iki çalışmada, kritik burulma yükünün minimum değerleri farklı (q, n) için elde edilmiş olmasına rağmen, kritik burulma yükünün değerleri iyi bir uyum içindedir.

Çizelge 4.1. FDM'lerden oluşan silindirik kabukların burulma burkulma yükünün değerleri ile literatürdeki değerlerin karşılaştırılması

	$S_{kr} / 10^6$ (Pa), (q, n)		
	Huang and Han (2010)		
R/h	$L/R=1$	$L/R=1.5$	$L/R=2$
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		
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)

Çizelge 4.2'de farklı L/R ve R/h oranları için homojen silindirik kabukların kritik burulma burkulma yükünün tez çalışmasındaki değerleri Mao and Lu (2002) makalesinin sonuçları ile mukayese edilmektedir. Malzeme özellikleri ve kabuk parametreleri $E^m = 1.4 \times 10^{10}$ Pa, $\nu^m = 0.3$, $h = 0.01$ m, $L/R = 10.05$ ve 4.098 olup Mao and Lu (2002) makalesinden alınmıştır. Çizelge 4.1' den görüldüğü gibi tez çalışmasında kritik burulma yükü için elde edilen değerlerle Mao and Lu (2002) makalesindeki değerler uyum içindedir.

Çizelge 4.2. Silindirik kabukların kritik burulma yükünün R/h ve L/R oranlarına bağlı dağılımı ve karşılaştırmalar

R/h	L/R	Mao and Lu (2002)	Tez çalışması
$S_{kr}/10^6$ (Pa)			
100.5	10.05	10.4 (4)	9.34 (4,0.16)
20.5	4.098	117.6 (4)	117.63 (4,0.38)

4.3. Sayısal Analizler

Sayısal analizlerde, FDM₁ ve FDM₂' den oluşan iki değişik yapıya sahip silindirik kabuk kullanılmaktadır. Fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemeler, metal ve seramiğin karışımı olup, Si₃N₄ ve SUS304'ten oluşan heterojen malzeme FDM₁ ve Ti6Al4V ve ZrO₂'den oluşan heterojen malzeme FDM₂ olarak adlandırılmaktadır. Bu heterojen malzemelerin ve bileşenlerinin mekanik özellikleri Çizelge 3.1' de sunulmaktadır.

Sayısal hesaplarda Maple 14 bilgisayar programı kullanılmaktadır.

Çizelge 4.3'de iki parametrelili elastik zemin üzerindeki FDM₁' den oluşan silindirik kabukların kritik burulma yükü S_{kr} (MPa) değerlerinin ve zemin etkisinin dikkate alınmadığı durumdaki kritik burulma yükü değerlerinin K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı dağılımı sunulmaktadır.

Sayısal analizlerde, SUS304/Si₃N₄ ve Ti6Al4V /ZrO₂ gibi iki değişik yapıya sahip üç katmandan oluşan kompozit silindirik kabuklar kullanılmaktadır. Orta tabakada fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme olarak metal-seramik karışımı olan iki FDM malzeme, yani SUS304 VE Si₃N₄'ten oluşan FDM₁ ve Ti6Al4V/ZrO₂'den oluşan FDM₂ malzemeleri kullanılmıştır. Alt tabakalarda pür seramik (Si₃N₄ ve ZrO₂) ve üst tabakalarda pür metal (SUS304 ve Ti6Al4V) malzemeler kullanılmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ ve Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların kritik burulma yükünün (S_{kr}) elastik zemin katsayıları K_1 ve K_2 'ye bağlı değişimleri Çizelge

4.3’de sunulmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme olarak üstel değişimli malzeme dikkate alınmaktadır. Diğer parametrik veriler olarak $R/h=100$ ve $L/R=2$ dikkate alınmaktadır.

Çizelge 4.3’den de görüleceği gibi, her iki kompozit silindirik kabuğun S_{kr} değerleri K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak artmaktadır. K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak, n dalga sayıları hemen hemen sabit kalırken q değerleri 0.3 ile 0.41 arasındaki değişmekte olup genel olarak artış göstermektedir. SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuğun S_{kr} değerleri Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukunkilerden daha büyük olurken kompozit kabuklar arasındaki bu S_{kr} değeri farkı K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak artmaktadır. Kompozit silindirik kabukların en büyük S_{kr} değerleri pür seramik için ve en küçük S_{kr} değerleri ise pür metal için elde edilmektedir.

FDM durumları pür seramikle karşılaştırıldığında, zeminsiz kompozit silindirik kabukların FDM₁ ve FDM₂ etkileri sırasıyla (-%18.6) ve (-%20.7) olmaktadır. Bu etkiler K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Örneğin, $K_2=0$ olduğunda K_1 katsayısının 0’dan 2×10^7 ’ye artışına bağlı olarak FDM₁ etkisi (%1.7) ve FDM₂ etkisi (%2.7) azalmaktadır. Ayrıca, $K_1=1 \times 10^7$ ve K_2 katsayısının 0’dan 1.4×10^5 ’e artışına bağlı olarak FDM₁ ve FDM₂ etkileri yaklaşık olarak (%0.8) azalmaktadır. FDM durumları pür metalle karşılaştırıldığında zeminsiz kompozit silindirik kabukların FDM₁ ve FDM₂ etkileri sırasıyla (%22.4) ve (%26.1) olmaktadır. Bu etkiler K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Örneğin, $K_2=0$ olduğunda K_1 katsayısının 0’dan 1.5×10^7 ’ye artışına bağlı olarak FDM₁ etkisi (%2.8) ve FDM₂ etkisi (%4.1) azalmaktadır. Ayrıca, $K_1=1.3 \times 10^7$ ve K_2 katsayısının 0’dan 1.4×10^5 ’e artışına bağlı olarak FDM₂ etkisi (%2) azalırken FDM₁ etkisinin değişimi (%1)’den küçük olmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ ve Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklarının S_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi K_1 ve K_2 zemin katsayılarının artışına bağlı olarak

artmaktadır. Örneğin, $K_2=0$ olduğunda K_1 katsayısının 1×10^7 'den 2×10^7 'ye artışına bağlı olarak SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklarının S_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi pür seramik, FDM₁ ve pür metal durumlarında sırasıyla (%7.1)'den (%13.9)'a, (%8.6)'dan (%16.3)'e ve (%10.4)'ten (%18.9)'a artmaktadır. Aynı şekilde, Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklarının S_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi pür seramik, FDM₂ ve pür metal durumlarında sırasıyla (%12.9)'dan (%22.2)'ye, (%16)'dan (%26.4)'e ve (%18.8)'ten (%31.7)'ye artmaktadır. $K_1 = 2 \times 10^7$ olduğunda K_1 katsayısının 0.8×10^5 'ten 1.4×10^5 'e artışına bağlı olarak SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklarının S_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi pür seramik, FDM₁ ve pür metal durumlarında sırasıyla (%16.9)'dan (%18.9)'a, (%19.6)'dan (%22.1)'e ve (%22.9)'dan (%25.9)'a artmaktadır. Aynı şekilde, Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklarının S_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi pür seramik, FDM₂ ve pür metal durumlarında sırasıyla (%27.1)'dan (%30.8)'ye, (%32.6)'dan (%37.1)'e ve (%39.2)'den (%44.9)'a artmaktadır.

Çizelge 4.3. SUS304/Si₃N₄ ve Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların kritik burulma yükünün (S_{kr}) elastik zemin katsayıları K_1 ve K_2 'ye bağlı değişimleri

$S_{kr} / 100, (q, n), R / h = 100, L / R = 2$							
		FDM ₁			FDM ₂		
K_2	K_1	Si ₃ N ₄	Üstel	SUS304	ZrO ₂	Üstel	Ti6Al4V
0	0	4.706(0.3,7)	3.83(0.3,7)	3.13(0.3,7)	2.509(0.3,7)	1.99(0.3,7)	1.578(0.3,7)
0	1.0×10^7	5.039(0.31,7)	4.159(0.32,7)	3.455(0.32,7)	2.833(0.33,7)	2.308(0.37,8)	1.874(0.37,8)
	1.5×10^7	5.2(0.32,7)	4.318(0.33,7)	3.61(0.33,7)	2.96(0.37,8)	2.413(0.38,8)	1.977(0.38,8)
	2.0×10^7	5.359(0.33,7)	4.454(0.37,8)	3.722(0.37,8)	3.065(0.38,8)	2.515(0.39,8)	2.078(0.4,8)
0.8×10^5	1.0×10^7	5.184(0.32,7)	4.303(0.32,7)	3.596(0.33,7)	2.973(0.33,7)	2.435(0.38,8)	1.999(0.38,8)
	1.5×10^7	5.344(0.32,7)	4.458(0.33,7)	3.743(0.37,8)	3.087(0.38,8)	2.537(0.38,8)	2.1(0.39,8)
	2.0×10^7	5.499(0.33,7)	4.582(0.37,8)	3.847(0.38,8)	3.189(0.38,8)	2.638(0.39,8)	2.197(0.41,8)
1.1×10^5	1.0×10^7	5.238(0.32,7)	4.356(0.33,7)	3.649(0.33,7)	3.025(0.34,7)	2.481(0.38,8)	2.045(0.39,8)
	1.5×10^7	5.397(0.33,7)	4.511(0.33,7)	3.791(0.37,8)	3.133(0.38,8)	2.583(0.39,8)	2.145(0.4,8)
	2.0×10^7	5.548(0.37,8)	4.629(0.37,8)	3.894(0.38,8)	3.235(0.39,8)	2.683(0.4,8)	2.242(0.41,8)
1.4×10^5	1.0×10^7	5.292(0.32,7)	4.409(0.33,7)	3.701(0.33,7)	3.076(0.34,7)	2.528(0.38,8)	2.091(0.39,8)
	1.5×10^7	5.45(0.33,7)	4.564(0.33,7)	3.838(0.38,8)	3.18(0.38,8)	2.629(0.39,8)	2.19(0.4,8)
	2.0×10^7	5.595(0.37,8)	4.677(0.37,8)	3.941(0.38,8)	3.281(0.39,8)	2.728(0.4,8)	2.286(0.41,8)

SUS304/Si₃N₄ ve Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların kritik burulma momentinin (M_{kr}) elastik zemin katsayıları K_1 ve K_2 ’ye bağlı değişimleri Çizelge 4.4’de sunulmaktadır. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme olarak ters kuadratik değişimli malzeme dikkate alınmaktadır. Diğer parametrik veriler olarak $R/h=100$ ve $L/R=2$ dikkate alınmaktadır.

Çizelge 4.4’den de görüleceği gibi, her iki kompozit silindirik kabuğun M_{kr} değerleri K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak artmaktadır. K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak, n dalga sayıları hemen hemen sabit kalırken q değerleri 0.3 ile 0.41 arasındaki değişmekte olup genel olarak artış göstermektedir. Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuğun M_{kr} değerleri SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukunkilerden daha küçük olurken kompozit kabuklar arasındaki bu M_{kr} değeri farkı K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak artmaktadır. Kompozit silindirik kabukların en büyük M_{kr} değerleri pür seramik için ve en küçük M_{kr} değerleri ise pür metal için elde edilmektedir.

FDM durumları pür seramikle karşılaştırıldığında zeminsiz kompozit silindirik kabukların FDM₁ ve FDM₂ etkileri sırasıyla (-%9.8) ve (-%10.8) olmaktadır. Bu etkiler K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Örneğin, $K_1=0$ olduğunda K_2 katsayısının 0’dan 2×10^7 ’ye artışına bağlı olarak FDM₁ etkisi (%1.2) ve FDM₂ etkisi (%1) civarı azalmaktadır. Ayrıca, $K_1 = 2 \times 10^7$ ve K_2 katsayısının 0’dan 1.4×10^5 ’e artışına bağlı olarak FDM₁ ve FDM₂ etkileri yaklaşık olarak (%1.1) azalmaktadır. FDM durumları pür metalle karşılaştırıldığında zeminsiz kompozit silindirik kabukların FDM₁ ve FDM₂ etkileri sırasıyla (%35.5) ve (%42.4) olmaktadır. Bu etkiler K_1 ve K_2 katsayılarının artışına bağlı olarak azalmaktadır. Örneğin, $K_2=0$ olduğunda K_1 katsayısının 0’dan 1.5×10^7 ’ye artışına bağlı olarak FDM₁ etkisi (%4.3) ve FDM₂ etkisi (%7) azalmaktadır. Ayrıca, $K_1 = 1.5 \times 10^7$ ve K_2 katsayısının 0’dan 1.4×10^5 ’e artışına bağlı olarak FDM₁ etkisi (%1.5) ve FDM₂ etkisi (%3.6) azalmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ ve Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklarının M_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi K_1 ve K_2 zemin katsayılarının artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, $K_2=0$ olduğunda K_1 katsayısının 1×10^7 'den 2×10^7 'ye artışına bağlı olarak SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklarının M_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi pür seramik, FDM₁ ve pür metal durumlarında sırasıyla (%7.1)'den (%13.9)'a, (%7.9)'dan (%15.4)'e ve (%10.2)'ten (%18.8)'a artmaktadır. Aynı şekilde, Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklarının M_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi pür seramik, FDM₂ ve pür metal durumlarında sırasıyla (%12.7)'den (%22.2)'ye, (%14.2)'den (%23.4)'a ve (%19.2)'den (%32.3)'e artmaktadır. $K_1=1.5 \times 10^7$ olduğunda K_2 katsayısının 0.8×10^5 'ten 1.4×10^5 'e artışına bağlı olarak SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklarının M_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi pür seramik, FDM₁ ve pür metal durumlarında sırasıyla (%13.5)'ten (%15.5)'e, (%15)'ten (%17.2)'ye ve (%19.3)'ten (%22.3)'e artmaktadır. Aynı şekilde, Ti/ FDM₂/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklarının M_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi pür seramik, FDM₂ ve pür metal durumlarında sırasıyla (%22.8)'den (%26.6)'ya, (%24.8)'den (%29.1)'e ve (%33.3)'ten (%39.4)'e artmaktadır.

Çizelge 4.4. SUS304/Si₃N₄ ve Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların kritik burulma momentinin (M_{kr}) elastik zemin katsayıları K_1 ve K_2 'ye bağlı değişimleri

$M_{kr} / 100, (q, n), R / h = 100, L / R = 2$							
		FDM ₁			FDM ₂		
K_1	K_2	Si ₃ N ₄	$k = 0.50$	SUS304	ZrO ₂	$k = 0.50$	Ti6Al4V
0	0	0.296(0.3,7)	0.267(0.3,7)	0.197(0.3,7)	0.158(0.3,7)	0.141(0.3,7)	0.099(0.3,7)
0	1.0×10 ⁷	0.317(0.31,7)	0.288(0.32,7)	0.217(0.32,7)	0.178(0.33,7)	0.161(0.33,7)	0.118(0.37,8)
	1.5×10 ⁷	0.327(0.32,7)	0.298(0.32,7)	0.227(0.33,7)	0.186(0.37,8)	0.168(0.37,8)	0.124(0.38,8)
	2.0×10 ⁷	0.337(0.33,7)	0.308(0.36,8)	0.234(0.37,8)	0.193(0.38,8)	0.174(0.38,8)	0.131(0.4,8)
0.8×10 ⁵	1.0×10 ⁷	0.326(0.32,7)	0.297(0.32,7)	0.226(0.33,7)	0.187(0.33,7)	0.169(0.37,8)	0.126(0.38,8)
	1.5×10 ⁷	0.336(0.32,7)	0.307(0.33,7)	0.235(0.37,8)	0.194(0.38,8)	0.176(0.38,8)	0.132(0.39,8)
	2.0×10 ⁷	0.346(0.33,7)	0.316(0.37,8)	0.242(0.38,8)	0.2(0.38,8)	0.182(0.39,8)	0.138(0.41,8)
1.1×10 ⁵	1.0×10 ⁷	0.329(0.32,7)	0.3(0.32,7)	0.229(0.33,7)	0.19(0.34,7)	0.172(0.38,8)	0.129(0.39,8)
	1.5×10 ⁷	0.339(0.33,7)	0.31(0.33,7)	0.238(0.37,8)	0.197(0.38,8)	0.179(0.38,8)	0.135(0.4,8)
	2.0×10 ⁷	0.349(0.37,8)	0.319(0.37,8)	0.245(0.38,8)	0.203(0.39,8)	0.185(0.39,8)	0.141(0.41,8)
1.4×10 ⁵	1.0×10 ⁷	0.333(0.32,7)	0.304(0.32,7)	0.233(0.33,7)	0.193(0.34,7)	0.175(0.38,8)	0.131(0.39,8)
	1.5×10 ⁷	0.342(0.33,7)	0.313(0.33,7)	0.241(0.38,8)	0.2(0.38,8)	0.182(0.39,8)	0.138(0.4,8)
	2.0×10 ⁷	0.352(0.37,8)	0.322(0.37,8)	0.248(0.38,8)	0.206(0.39,8)	0.188(0.39,8)	0.144(0.41,8)

Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.5 ve Şekil 4.1'de $R / h = 100$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.5 ve Şekil 4.1'den de görüleceği gibi L / R oranının artışına bağlı olarak pür metal (SUS304) ve pür seramik (Si₃N₄) ile tüm FDM₁ durumlarında S_{kr} değerleri azalmaktadır. Pasternak ve Winkler zemin katsayıları şekiller üzerinde sunulmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n ve q parametresi de azalmaktadır. SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklar için en büyük S_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük S_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir.

FDM₁ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi L / R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₁ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en büyük FDM₁ etkileri $k = 1$ için en küçük FDM₁ etkileri ise $k = 0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k = 1$ için L / R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi Winkler zemini durumunda (-%16.3)'ten (-%14.6)'ya azalırken Pasternak zemini durumunda ise (-%16)'dan (-

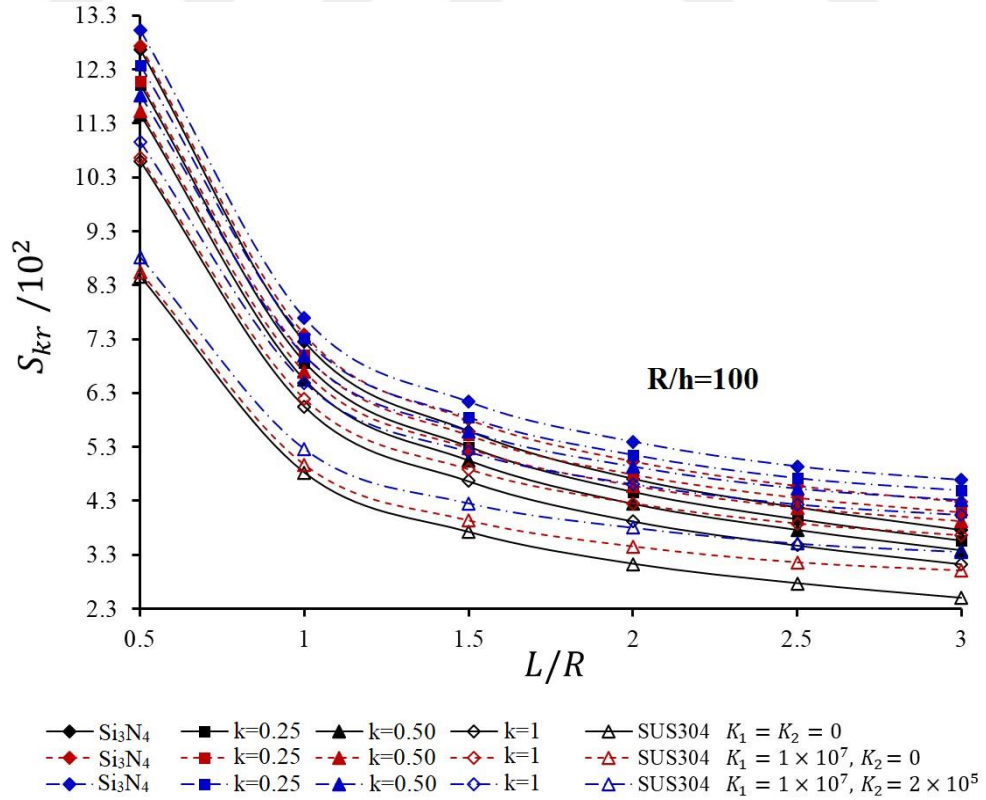
%13.9)'a azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (-%16.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=1$ ve $k=0.25$ durumları arasındaki en büyük FDM_1 etkisi farkı (%11) olarak, $k=1$ ve $k=0.5$ durumları arasındaki en büyük FDM_1 etkisi farkı (%7) olmaktadır.

FDM_1 durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM_1 durumlarında FDM_1 etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM_1 durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en küçük FDM_1 etkileri $k=1$ için en büyük FDM_1 etkileri ise $k=0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=0.25$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak S_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 etkisi Winkler zemini durumunda (%41.6)'dan (%36)'ya azalırken Pasternak zemini durumunda ise (%40.2)'den (%33.9)'a azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (%42) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=0.25$ ve $k=0.5$ durumları arasındaki en büyük FDM_1 etkisi farkı (%6.5) olarak, $k=0.25$ ve $k=1$ durumları arasındaki en büyük FDM_1 etkisi farkı (%17) olmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise pür seramikte elde edilmektedir. Örneğin, pür seramik kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%0.6)'dan (%14.2)'ye ve Pasternak zemini için (%2.8)'den (%25)'e artmaktadır. Pür seramik durumuyla $k=0.25$, $k=0.5$, $k=1$ ve pür metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%0.8), (%1.4), (%2.7) ve (%6.2) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir. Pür seramik durumuyla $k=0.25$, $k=0.5$, $k=1$ ve pür metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%1.3), (%2.4), (%4) ve (%9.4) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.5. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri

			FDM ₁			
	L / R	Si ₃ N ₄	$k = 0.25$	$k = 0.50$	$k = 1$	SUS304
$S_{kr}/100 (q,n)$	0.5	12.7(0.58,11)	12.01(0.58,11)	11.458(0.58,11)	10.593(0.58,11)	8.465(0.58,11)
	1	7.246(0.42,9)	6.867(0.42,9)	6.547(0.43,9)	6.048(0.43,9)	4.822(0.43,9)
	1.5	5.591(0.35,8)	5.299(0.35,8)	5.052(0.35,8)	4.667(0.35,8)	3.722(0.36,8)
	2	4.706(0.3,7)	4.46(0.3,7)	4.251(0.3,7)	3.926(0.3,7)	3.13(0.3,7)
	2.5	4.174(0.25,6)	3.954(0.25,6)	3.768(0.25,6)	3.479(0.26,6)	2.769(0.26,6)
	3	3.754(0.25,6)	3.557(0.25,6)	3.391(0.25,6)	3.132(0.25,6)	2.497(0.25,6)
$S_{kr}^w/100 (q,n)$	0.5	12.7(0.59,11)	12.08(0.59,11)	11.53(0.59,11)	10.66(0.59,11)	8.54(0.59,11)
	1	7.39(0.43,9)	7.011(0.43,9)	6.69(0.43,9)	6.191(0.43,9)	4.965(0.44,9)
	1.5	5.81(0.36,8)	5.517(0.36,8)	5.27(0.36,8)	4.884(0.37,8)	3.936(0.37,8)
	2	5.039(0.31,7)	4.792(0.31,7)	4.582(0.32,7)	4.255(0.32,7)	3.455(0.32,7)
	2.5	4.583(0.31,7)	4.361(0.31,7)	4.173(0.31,7)	3.881(0.31,7)	3.16(0.32,7)
	3	4.288(0.27,6)	4.09(0.27,6)	3.922(0.27,6)	3.661(0.27,6)	3.008(0.32,7)
$S_{kr}^{wp}/100 (q,n)$	0.5	13.0(0.59,11)	12.37(0.59,11)	11.81(0.59,11)	10.95(0.59,11)	8.82(0.6,11)
	1	7.691(0.44,9)	7.311(0.44,9)	6.99(0.44,9)	6.49(0.45,9)	5.261(0.45,9)
	1.5	6.137(0.37,8)	5.844(0.37,8)	5.595(0.38,8)	5.208(0.38,8)	4.257(0.39,8)
	2	5.4(0.32,7)	5.151(0.33,7)	4.94(0.33,7)	4.612(0.33,7)	3.804(0.34,7)
	2.5	4.943(0.32,7)	4.72(0.32,7)	4.531(0.32,7)	4.236(0.33,7)	3.509(0.33,7)
	3	4.691(0.28,6)	4.491(0.28,6)	4.318(0.32,7)	4.04(0.32,7)	3.355(0.33,7)



Şekil 4.1. Zeminsiz/zeminli FDM₁ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri

Zeminli/zeminsiz SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.6'de $L/R=2$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.6 ve Şekil 4.2'den de görüleceği gibi R/h oranının artışına bağlı olarak pür metal (SUS304) ve pür seramik (Si₃N₄) ile tüm FDM₁ durumlarında S_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n artarken $R/h < 125$ aralığında q parametresi de azalmaktadır. $R/h \geq 75$ olduğunda en büyük S_{kr} değerleri $k=0.25$ için elde edilirken diğer $R/h=50$ olduğunda en büyük S_{kr} değerleri pür seramik için ortaya çıkmaktadır. En küçük S_{kr} değerleri ise pür metal için elde edilmektedir.

FDM₁ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=0.25$ haricindeki FDM₁ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₁ etkisi $k=0.25$ haricindeki FDM₁ durumlarında azalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, zeminsiz durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%9.6) ve (-%16.7) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.2)'den (%21.8)'e artmakta ve sonra (%5.7)'ye azalmaktadır. Winkler zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%9.6)'dan (-%8.5)'e ve (-%16.4)'den (-%14.5)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.2)'den (%19.7)'ye artmakta ve sonra (%1.2)'ye azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%9.3)'ten (-%7.8)'e ve (-%15.9)'dan (-%13.4)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5)'ten (%18.5)'e artmakta ve sonra (%1.1)'e azalmaktadır.

FDM₁ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=0.25$ haricindeki FDM₁ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₁ etkisi $k=0.25$ haricindeki FDM₁ durumlarında azalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin,

zemsiz durumda S_{kr} değerleri zerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%36) ve (%25.6) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%42.2)'den (%83.7)'ye artmakta ve sonra (%58.9)'a azalmaktadır. Winkler zeminli durumda S_{kr} değerleri zerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%35.2)'den (%29.7)'ye ve (%25)'ten (%21.1)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%41.7)'den (%77.6)'ye artmakta ve sonra (%43.4)'e azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda S_{kr} değerleri zerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%33.9)'dan (%26.5)'e ve (%24.1)'den (%18.9)'a azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%40.2)'den (%72.3)'e artmakta ve sonra (%38.7)'ye azalmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pr metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h>50$ aralığında $k=0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=0.25$ olan FDM₁ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%0.8)'den (%14.7)'ye ve Pasternak zemini için (%3.7)'den (%26)'ya artmaktadır. $k=0.25$ durumuyla pr seramik, $k=0.5$, $k=1$ ve pr metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%5.1), (%6.6), (%3) ve (%12.4) olarak $R/h=150$ için elde edilmektedir. $k=0.25$ durumuyla pr seramik, $k=0.5$, $k=1$ ve pr metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%5.7), (%8.5), (%10.8) ve (%18.4) olarak $R/h=150$ için elde edilmektedir.

NOT: Tüm sonraki hesaplarda $K_1=10^7$ (N/m³), $K_2=2\times 10^5$ (N/m) olarak dikkate alınmaktadır.

Çizelge 4.6. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri

			FDM ₁			
	R/h	Si ₃ N ₄	$k=0.25$	$k=0.50$	$k=1$	SUS304
$S_{kr}/100 (q,n)$	50	11.691(0.37,6)	11.082(0.37,6)	10.567(0.37,6)	9.765(0.38,6)	7.793(0.38,6)
	75	6.898(0.31,6)	8.402(0.38,7)	6.226(0.31,6)	5.747(0.31,6)	4.574(0.31,6)
	100	4.706(0.3,7)	5.299(0.35,8)	4.251(0.3,7)	3.926(0.3,7)	3.13(0.3,7)
	125	3.562(0.27,7)	3.809(0.31,8)	3.215(0.27,7)	2.968(0.27,7)	2.362(0.27,7)
	150	2.8(0.28,8)	2.959(0.28,8)	2.529(0.28,8)	2.336(0.28,8)	1.862(0.28,8)
$S_{kr}^w/100 (q,n)$	50	11.784(0.38,6)	11.174(0.38,6)	10.659(0.38,6)	9.856(0.38,6)	7.884(0.38,6)
	75	7.135(0.35,7)	8.542(0.42,8)	6.464(0.36,7)	5.986(0.36,7)	4.809(0.36,7)
	100	5.039(0.31,7)	5.517(0.36,8)	4.582(0.32,7)	4.255(0.32,7)	3.455(0.32,7)
	125	3.971(0.32,8)	4.177(0.36,9)	3.624(0.33,8)	3.375(0.33,8)	2.766(0.34,8)
	150	3.352(0.34,9)	3.393(0.34,9)	3.068(0.34,9)	2.865(0.34,9)	2.366(0.35,9)
$S_{kr}^{wp}/100 (q,n)$	50	12.103(0.38,6)	11.493(0.38,6)	10.978(0.38,6)	10.175(0.38,6)	8.2(0.39,6)
	75	7.463(0.36,7)	8.843(0.43,8)	6.792(0.36,7)	6.312(0.37,7)	5.133(0.37,7)
	100	5.4(0.32,7)	5.844(0.37,8)	4.94(0.33,7)	4.612(0.33,7)	3.804(0.34,7)
	125	4.319(0.34,8)	4.498(0.38,9)	3.969(0.34,8)	3.718(0.34,8)	3.101(0.35,8)
	150	3.686(0.35,9)	3.727(0.36,9)	3.4(0.36,9)	3.194(0.36,9)	2.687(0.37,9)

Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.7 ve Şekil 4.2’de $R/h=100$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.7 ve Şekil 4.2’den de görüleceği gibi L/R oranının artışına bağlı olarak pür metal (Ti) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM₂ durumlarında S_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, n dalga sayısı $L/R>2$ aralığında sabit kalırken $L/R \leq 2$ aralığında ise azalmaktadır. q parametresi ise L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklar için azalırken zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklar için $L/R>2$ aralığında sabit kalmaktadır. FDM₂ kompozit silindirik kabuklar için en büyük S_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük S_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir. FDM₂ durumları kendi aralarında kıyaslandığında ise en büyük S_{kr} değerleri $k=0.25$ için en küçük S_{kr} değerleri ise $k=1$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₂ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en büyük FDM₂ etkileri $k=1$ için en küçük FDM₂ etkileri ise $k=0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=0.25$ için L/R ’nin 0.5’ten 3’e artışına bağlı olarak S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi Winkler zemini durumunda (-%5.9)’dan (-%5.1)’e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (-%5.6)’dan (-%4.6)’ya azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (-%5.9) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=0.25$ ve $k=0.5$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%5) olarak, $k=0.25$ ve $k=1$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%12) olmaktadır.

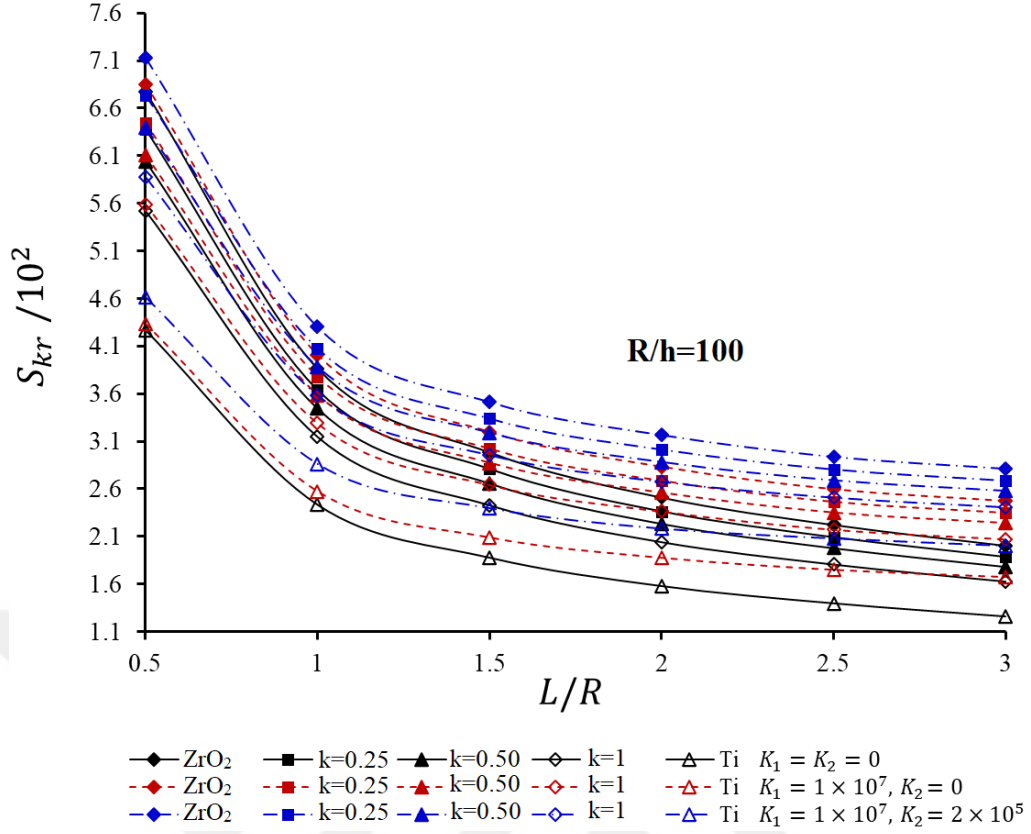
FDM₂ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en küçük FDM₂ etkileri $k=1$ için en büyük FDM₂ etkileri ise $k=0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=1$ için L/R ’nin 0.5’ten 3’e artışına bağlı olarak S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi Winkler zemini durumunda (%29)’dan (%24)’e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (%27.3)’ten (%20.5)’e azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (%29.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=1$ ve $k=0.25$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%19) olarak, $k=1$ ve $k=0.5$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%12) olmaktadır.

Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise pür seramikte elde edilmektedir. Örneğin, pür metal kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının 0.5’ten 3’e artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%1.6)’dan (%32.8)’e ve Pasternak zemini için (%8.2)’den (%59)’a artmaktadır. Pür metal durumuyla $k=0.25$, $k=0.5$, $k=1$ ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%8.2), (%7.3), (%5.6) ve (%9.3) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir. Pür metal durumuyla $k=0.25$, $k=0.5$, $k=1$ ve pür seramik

durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%16.3), (%14.4), (%11) ve (%18.3) olarak $L / R=3$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.7. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri

			FDM ₂			
	L / R	ZrO ₂	$k = 0.25$	$k = 0.50$	$k = 1$	Ti6Al4V
$S_{kr}/100 (q,n)$	0.5	6.777(0.58,11)	6.377(0.58,11)	6.041(0.58,11)	5.52(0.58,11)	4.263(0.58,11)
	1	3.865(0.43,9)	3.637(0.43,9)	3.445(0.43,9)	3.148(0.43,9)	2.431(0.43,9)
	1.5	2.983(0.36,8)	2.807(0.36,8)	2.659(0.36,8)	2.43(0.36,8)	1.876(0.36,8)
	2	2.509(0.3,7)	2.361(0.3,7)	2.236(0.3,7)	2.044(0.3,7)	1.578(0.3,7)
	2.5	2.221(0.26,6)	2.09(0.26,6)	1.98(0.26,6)	1.809(0.26,6)	1.397(0.26,6)
	3	2.002(0.25,6)	1.883(0.25,6)	1.784(0.25,6)	1.63(0.25,6)	1.259(0.25,6)
$S_{kr}^w/100 (q,n)$	0.5	6.848(0.59,11)	6.448(0.59,11)	6.111(0.59,11)	5.59(0.59,11)	4.333(0.59,11)
	1	4.008(0.44,9)	3.779(0.44,9)	3.587(0.44,9)	3.29(0.44,9)	2.572(0.45,9)
	1.5	3.197(0.37,8)	3.021(0.37,8)	2.873(0.37,8)	2.643(0.38,8)	2.088(0.38,8)
	2	2.833(0.33,7)	2.684(0.33,7)	2.559(0.33,7)	2.364(0.37,8)	1.874(0.37,8)
	2.5	2.596(0.32,7)	2.462(0.32,7)	2.349(0.32,7)	2.173(0.33,7)	1.748(0.33,7)
	3	2.473(0.32,7)	2.346(0.32,7)	2.239(0.32,7)	2.073(0.33,7)	1.672(0.33,7)
$S_{kr}^{wp}/100 (q,n)$	0.5	7.13(0.6,11)	6.73(0.6,11)	6.393(0.6,11)	5.872(0.6,11)	4.614(0.61,11)
	1	4.303(0.46,9)	4.074(0.46,9)	3.881(0.46,9)	3.583(0.46,9)	2.862(0.47,9)
	1.5	3.515(0.39,8)	3.338(0.39,8)	3.189(0.4,8)	2.957(0.4,8)	2.397(0.41,8)
	2	3.17(0.38,8)	3.014(0.38,8)	2.882(0.38,8)	2.678(0.39,8)	2.182(0.4,8)
	2.5	2.941(0.34,7)	2.805(0.34,7)	2.69(0.35,7)	2.512(0.35,7)	2.079(0.36,7)
	3	2.816(0.34,7)	2.687(0.34,7)	2.579(0.34,7)	2.411(0.35,7)	2.001(0.36,7)



Şekil 4.2. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.8 'de $L/R=2$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.8'den de görüleceği gibi R/h oranının artışına bağlı olarak pür metal (Ti6Al4V) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM₂ durumlarında S_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n ve q parametresi artmakta veya sabit kalmaktadır. $R/h \geq 75$ olduğunda en büyük S_{kr} değerleri $k=0.25$ için elde edilirken $R/h=50$ olduğunda en büyük S_{kr} değerleri pür seramik için ortaya çıkmaktadır. En küçük S_{kr} değerleri ise pür metal için elde edilmektedir.

FDM₂ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=0.25$ haricindeki FDM₂ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₂ etkisi $k=0.25$ haricindeki FDM₂ durumlarında azalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin,

zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%10.9) ve (-%18.6) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.9)'den (%21.1)'e artmakta ve sonra (%4.8)'e azalmaktadır. Winkler zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%10.7)'den (-%8.7)'ye ve (-%18.3)'ten (-%14.9)'a azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.8)'den (%17.9)'a artmakta ve sonra (%0.4)'e azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%10.2)'den (-%8)'e ve (-%17.4)'ten (-%13.9)'a azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.6)'dan (%15.9)'a artmakta ve sonra (%1.1)'e azalmaktadır.

FDM₂ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminli durumda $k=0.25$ haricindeki FDM₂ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₂ etkisi $k=0.25$ haricindeki FDM₂ durumlarında azalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%42) ve (%29.5) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%49.6)'dan (%92.5)'e artmakta ve sonra (%66.7)'e azalmaktadır. Winkler zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%40.8)'den (%32.4)'e ve (%28.8)'den (%23.4)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%48.5)'ten (%83.1)'e artmakta ve sonra (%44.5)'e azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%37.9)'dan (%27.9)'a ve (%26.8)'den (%19.7)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%45.1)'den (%73.1)'e artmakta ve sonra (%37.5)'e azalmaktadır.

Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h > 50$ aralığında $k=0.25$ için elde

edilmektedir. Örneğin, $k=0.25$ olan FDM₁ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%1.6)'dan (%25.7)'ye ve Pasternak zemini için (%6.9)'dan (%44.7)'ye artmaktadır. $k=0.25$ durumuyla pür seramik, $k=0.5$, $k=1$ ve pür metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%6.5), (%9.8), (%12.4) ve (%19.3) olarak $R/h=150$ için elde edilmektedir. $k=0.25$ durumuyla pür seramik, $k=0.5$, $k=1$ ve pür metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%8.7), (%13.6), (%17.4) ve (%30.7) olarak $R/h=150$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.8. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri

			FDM ₂			
	R/h	ZrO ₂	$k=0.25$	$k=0.50$	$k=1$	Ti6Al4V
$S_{kr}/100 (q,n)$	50	6.243(0.38,6)	5.875(0.38,6)	5.565(0.38,6)	5.085(0.38,6)	3.927(0.38,6)
	75	3.67(0.31,6)	4.443(0.39,7)	3.271(0.31,6)	2.989(0.31,6)	2.308(0.31,6)
	100	2.509(0.3,7)	2.807(0.36,8)	2.236(0.3,7)	2.044(0.3,7)	1.578(0.3,7)
	125	1.895(0.27,7)	2.016(0.31,8)	1.689(0.27,7)	1.544(0.27,7)	1.192(0.27,7)
	150	1.493(0.28,8)	1.565(0.28,8)	1.33(0.28,8)	1.216(0.28,8)	0.939(0.28,8)
$S_{kr}^w/100 (q,n)$	50	6.335(0.38,6)	5.966(0.38,6)	5.656(0.38,6)	5.176(0.38,6)	4.018(0.38,6)
	75	3.885(0.36,7)	4.58(0.42,8)	3.48(0.36,7)	3.194(0.36,7)	2.502(0.37,7)
	100	2.833(0.33,7)	3.021(0.37,8)	2.559(0.33,7)	2.364(0.37,8)	1.874(0.37,8)
	125	2.289(0.34,8)	2.336(0.38,9)	2.079(0.34,8)	1.93(0.35,8)	1.551(0.38,9)
	150	1.974(0.36,9)	1.967(0.39,10)	1.802(0.36,9)	1.679(0.39,10)	1.361(0.4,10)
$S_{kr}^{wp}/100(q,n)$	50	6.651(0.39,6)	6.282(0.39,6)	5.971(0.39,6)	5.491(0.39,6)	4.331(0.4,6)
	75	4.207(0.38,7)	4.875(0.44,8)	3.8(0.38,7)	3.513(0.38,7)	2.817(0.39,7)
	100	3.17(0.38,8)	3.338(0.39,8)	2.882(0.38,8)	2.678(0.39,8)	2.182(0.4,8)
	125	2.619(0.36,8)	2.645(0.4,9)	2.398(0.4,9)	2.238(0.4,9)	1.849(0.42,9)
	150	2.29(0.38,9)	2.265(0.41,10)	2.106(0.41,10)	1.972(0.42,10)	1.647(0.44,10)

Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.9 ve Şekil 4.3'de $R/h=100$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.9 ve Şekil 4.3'den de görüleceği gibi L/R oranının artışına bağlı olarak pür metal (SUS304) ve pür seramik (Si₃N₄) ile tüm FDM₁ durumlarında S_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n ve q parametresi de

azalmakta veya sabit kalmaktadır. SUS304/ Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklar için en büyük S_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük S_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir. FDM₁ durumları kendi aralarında kıyaslandığında ise en büyük S_{kr} değerleri $k=1$ için en küçük S_{kr} değerleri ise $k=3$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₁ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₁ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en büyük FDM₁ etkileri $k=3$ için en küçük FDM₁ etkileri ise $k=1$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=3$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi Winkler zemini durumunda (-%18.4)'ten (-%16.4)'e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (-%18)'den (-%15.7)'e azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (-%18.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=3$ ve $k=1$ durumları arasındaki en büyük FDM₁ etkisi farkı (%12) olarak, $k=3$ ve üstel değişim durumları arasındaki en büyük FDM₁ etkisi farkı (%10) olmaktadır.

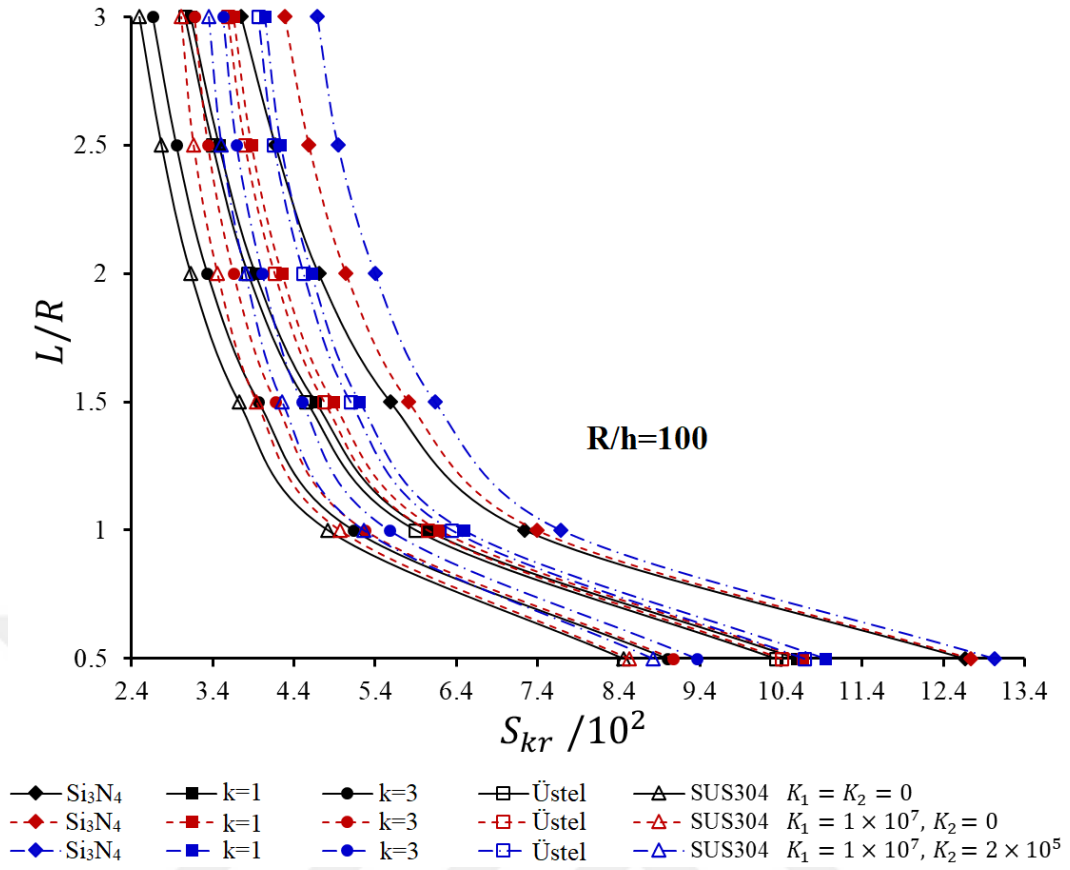
FDM₁ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₁ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en küçük FDM₁ etkileri $k=3$ için en büyük FDM₁ etkileri ise $k=1$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=1$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi Winkler zemini durumunda (%24.9)'dan (%21.7)'ye azalırken Pasternak zemini durumunda ise (%24.1)'den (%20.4)'e azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (%25) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=1$ ve $k=3$ durumları arasındaki en büyük FDM₁ etkisi farkı (%19) olarak, $k=1$ ve üstel değişim durumları arasındaki en büyük FDM₁ etkisi farkı (%3) olmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise pür seramikte elde edilmektedir. Örneğin,

pür metal kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%0.8)'den (%20.5)'e ve Pasternak zemini için (%4.2)'den (%34.4)'e artmaktadır. Pür metal durumuyla $k=1$, $k=3$, üstel değişim ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%3.6), (%0.8), (%3.2) ve (%6.2) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir. Pür metal durumuyla $k=1$, $k=3$, üstel değişim ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%5.4), (%1.6), (%4.8) ve (%9.4) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.9. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

			FDM ₁			
	L/R	Si ₃ N ₄	$k=1$	$k=3$	Üstel	SUS304
$S_{kr}/100 (q,n)$	0.5	12.67(0.58,11)	10.593(0.58,11)	9.003(0.58,11)	10.33(0.58,11)	8.465(0.58,11)
	1	7.246(0.42,9)	6.048(0.43,9)	5.132(0.43,9)	5.898(0.43,9)	4.822(0.43,9)
	1.5	5.591(0.35,8)	4.667(0.35,8)	3.961(0.36,8)	4.552(0.35,8)	3.722(0.36,8)
	2	4.706(0.3,7)	3.926(0.3,7)	3.331(0.3,7)	3.83(0.3,7)	3.13(0.3,7)
	2.5	4.174(0.25,6)	3.479(0.26,6)	2.948(0.26,6)	3.394(0.26,6)	2.769(0.26,6)
	3	3.754(0.25,6)	3.132(0.25,6)	2.657(0.25,6)	3.055(0.25,6)	2.497(0.25,6)
$S_{kr}^w/100 (q,n)$	0.5	12.741(0.59,11)	10.664(0.59,11)	9.074(0.59,11)	10.401(0.59,11)	8.536(0.59,11)
	1	7.39(0.43,9)	6.191(0.43,9)	5.275(0.44,9)	6.042(0.43,9)	4.965(0.44,9)
	1.5	5.81(0.36,8)	4.884(0.37,8)	4.176(0.37,8)	4.769(0.37,8)	3.936(0.37,8)
	2	5.039(0.31,7)	4.255(0.32,7)	3.657(0.32,7)	4.159(0.32,7)	3.455(0.32,7)
	2.5	4.583(0.31,7)	3.881(0.31,7)	3.343(0.32,7)	3.793(0.31,7)	3.16(0.32,7)
	3	4.288(0.27,6)	3.661(0.27,6)	3.179(0.28,6)	3.583(0.27,6)	3.008(0.32,7)
$S_{kr}^{wp}/100 (q,n)$	0.5	13.025(0.59,11)	10.947(0.59,11)	9.357(0.6,11)	10.685(0.59,11)	8.819(0.6,11)
	1	7.691(0.44,9)	6.49(0.45,9)	5.572(0.45,9)	6.341(0.45,9)	5.261(0.45,9)
	1.5	6.137(0.37,8)	5.208(0.38,8)	4.497(0.38,8)	5.093(0.38,8)	4.257(0.39,8)
	2	5.4(0.32,7)	4.612(0.33,7)	4.009(0.34,7)	4.514(0.33,7)	3.804(0.34,7)
	2.5	4.943(0.32,7)	4.236(0.33,7)	3.693(0.33,7)	4.148(0.33,7)	3.509(0.33,7)
	3	4.691(0.28,6)	4.04(0.32,7)	3.528(0.33,7)	3.957(0.32,7)	3.355(0.33,7)



Şekil 4.3. Zeminsiz/zeminli SUS304/ Si_3N_4 kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

Zeminsiz/zeminli SUS304/ Si_3N_4 kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.10 ve Şekil 4.4’de $L/R=2$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.10 ve Şekil 4.4’den da görüleceği gibi R/h oranının artmasına bağlı olarak pür metal (SUS304) ve pür seramik (Si_3N_4) ile tüm FDM₁ durumlarında S_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n artarken q parametresi ise artmakta veya azalmaktadır. En büyük S_{kr} değerleri pür seramik için elde edilirken en küçük S_{kr} değerleri pür metal için ortaya çıkmaktadır. FDM₁ durumları kendi aralarında kıyaslandığında $R/h > 50$ aralığında en büyük S_{kr} değerleri $k=2$ için elde edilirken en küçük S_{kr} değerleri ise üstel değişim için ortaya çıkmaktadır. $R/h=50$ olduğunda ise en büyük S_{kr} değerleri $k=1$ için elde edilirken en küçük S_{kr} değerleri ise $k=2$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₁ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=2$ haricindeki FDM₁ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=2$ için önce azalıp sonra artmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₁ etkisi $k=2$ haricindeki FDM₁ durumlarında azalırken $k=2$ için önce azalıp sonra artmaktadır. Örneğin, zeminsiz durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%16.5) ve (-%18.7) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%24.9)'dan (-%3.7)'e azalmakta ve sonra (-%16.4)'e artmaktadır. Winkler zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%16.4)'ten (-%14.5)'e ve (-%18.4)'ten (-%16.3)'e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%24.7)'den (-%4.8)'e azalmakta ve sonra (-%17.4)'e artmaktadır. Pasternak zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%15.9)'dan (-%13.4)'e ve (-%17.9)'dan (-%15)'e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%24)'ten (-%4.9)'a azalmakta ve sonra (-%16)'ya artmaktadır.

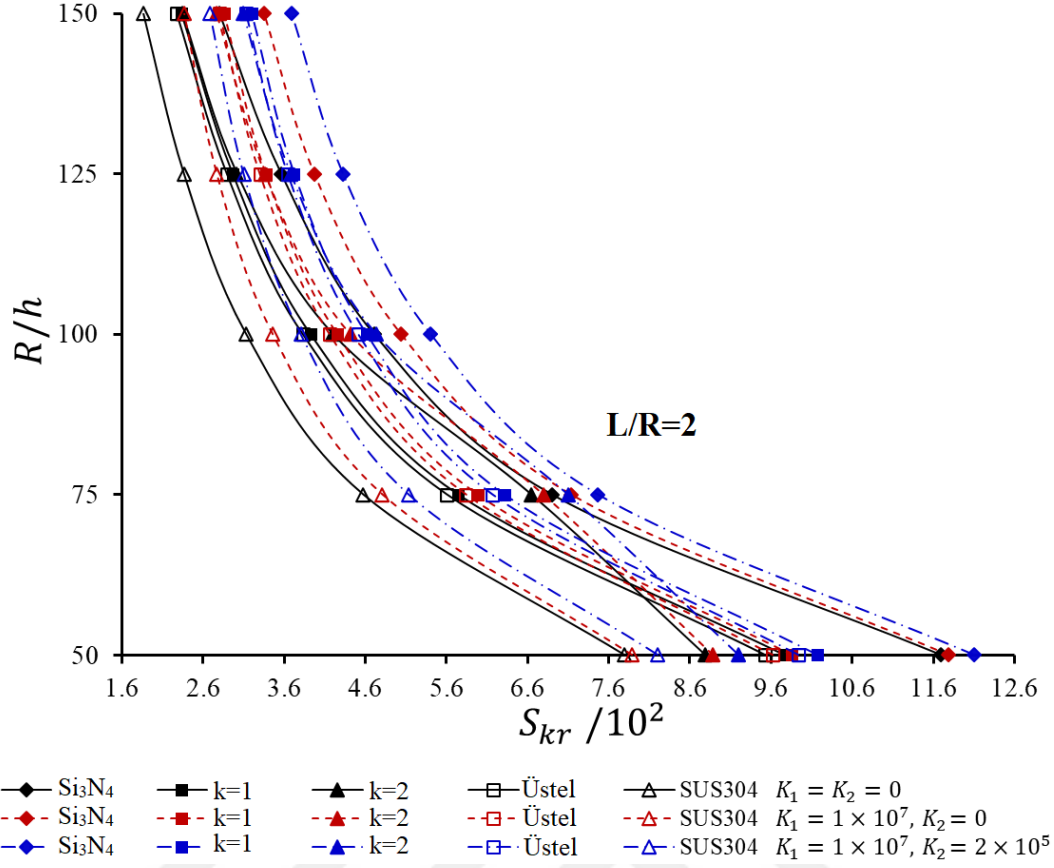
FDM₁ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=2$ haricindeki FDM₁ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=2$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₁ etkisi $k=2$ haricindeki FDM₁ durumlarında azalırken $k=2$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, zeminsiz durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%25.5) ve (%22.5) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%12.7)'den (%45.3)'e artmakta ve sonra (%25.7)'e azalmaktadır. Winkler zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%25)'den (%21.1)'e ve (%22)'den (%18.6)'ya azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%12.6)'dan (%41.2)'ye artmakta ve sonra (%17)'e azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla

(%24.1)'den (%18.9)'a ve (%21.2)'den (%16.6)'ya azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%12.1)'den (%38.2)'ye artmakta ve sonra (%15.2)'ye azalmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h > 50$ aralığında $k=2$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=2$ olan FDM₁ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%1)'den (%18.3)'e ve Pasternak zemini için (%4.7)'den (%32.3)'e artmaktadır. $k=2$ durumuyla $k=1$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%4.3), (%4.8) ve (%8.7) olarak $R/h=150$ için elde edilirken $k=2$ durumuyla pür seramik durumu arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi (%2) olarak $R/h=100$ 'de ortaya çıkmaktadır. $k=2$ durumuyla $k=1$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%4.4), (%5.2) ve (%12) olarak $R/h=150$ için elde edilirken $k=2$ durumuyla pür seramik durumu arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi (%1.9) olarak $R/h=100$ 'de ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.10. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri

			FDM ₁			
	R/h	Si ₃ N ₄	$k=1$	$k=2$	Üstel	SUS304
$S_{kr}/10^2 (q,n)$	50	11.691(0.37,6)	9.765(0.38,6)	8.786(0.38,6)	9.523(0.38,6)	7.793(0.38,6)
	75	6.898(0.31,6)	5.747(0.31,6)	6.644(0.39,7)	5.606(0.31,6)	4.574(0.31,6)
	100	4.706(0.3,7)	3.926(0.3,7)	4.198(0.36,8)	3.83(0.3,7)	3.13(0.3,7)
	125	3.562(0.27,7)	2.968(0.27,7)	3.015(0.31,8)	2.895(0.27,7)	2.362(0.27,7)
	150	2.8(0.28,8)	2.336(0.28,8)	2.34(0.28,8)	2.278(0.28,8)	1.862(0.28,8)
$S_{kr}^w/10^2 (q,n)$	50	11.784(0.38,6)	9.856(0.38,6)	8.877(0.38,6)	9.615(0.38,6)	7.884(0.38,6)
	75	7.135(0.35,7)	5.986(0.36,7)	6.791(0.39,7)	5.841(0.36,7)	4.809(0.36,7)
	100	5.039(0.31,7)	4.255(0.32,7)	4.413(0.37,8)	4.159(0.32,7)	3.455(0.32,7)
	125	3.971(0.32,8)	3.375(0.33,8)	3.366(0.37,9)	3.301(0.33,8)	2.766(0.34,8)
	150	3.352(0.34,9)	2.865(0.34,9)	2.769(0.35,9)	2.805(0.34,9)	2.366(0.35,9)
$S_{kr}^{wp}/10^2 (q,n)$	50	12.103(0.38,6)	10.175(0.38,6)	9.195(0.39,6)	9.934(0.38,6)	8.2(0.39,6)
	75	7.463(0.36,7)	6.312(0.37,7)	7.095(0.43,8)	6.168(0.37,7)	5.133(0.37,7)
	100	5.4(0.32,7)	4.612(0.33,7)	4.736(0.38,8)	4.514(0.33,7)	3.804(0.34,7)
	125	4.319(0.34,8)	3.718(0.34,8)	3.682(0.38,9)	3.644(0.34,8)	3.101(0.35,8)
	150	3.686(0.35,9)	3.194(0.36,9)	3.096(0.37,9)	3.133(0.36,9)	2.687(0.37,9)



Şekil 4.4. Zeminsiz/zeminli FDM₁ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri

Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.11 ve Şekil 4.5’de $R/h=100$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.11 ve Şekil 4.5’den de görüleceği gibi L/R oranının artışına bağlı olarak pür metal (Ti6Al4V) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM₂ durumlarında S_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n ve q parametresi de azalmakta veya sabit kalmaktadır. Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklar için en büyük S_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük S_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir. FDM₂ durumları kendi aralarında kıyaslandığında ise en büyük S_{kr} değerleri $k=1$ için en küçük S_{kr} değerleri ise $k=3$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₂ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en büyük FDM₂ etkileri $k=3$ için en küçük FDM₂ etkileri ise

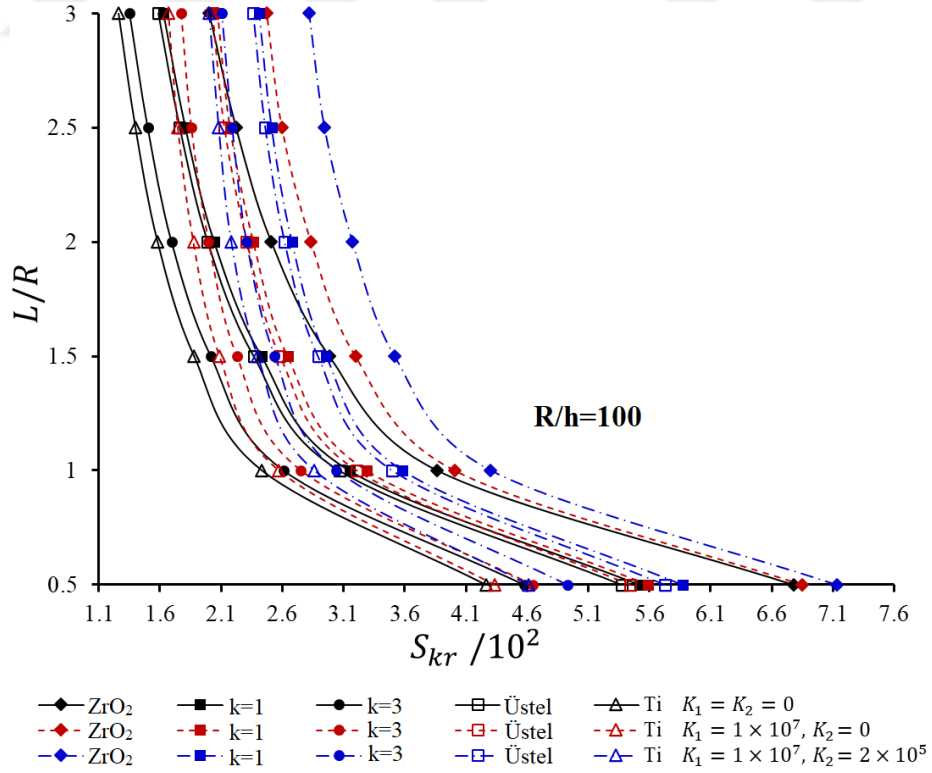
$k=1$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=3$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi Winkler zemini durumunda (-%32.1)'den (-%28.4)'e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (-%30.9)'dan (-%25.3)'e azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (-%32.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=3$ ve $k=1$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%14) olarak, $k=3$ ve üstel değişim durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%12) olmaktadır.

FDM₂ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en küçük FDM₂ etkileri $k=3$ için en büyük FDM₂ etkileri ise $k=1$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=1$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi Winkler zemini durumunda (%29)'dan (%24)'e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (%27.3)'ten (%20.5)'e azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (%29.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=1$ ve $k=3$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%22) olarak, $k=1$ ve üstel değişim durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%3.5) olmaktadır.

Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise pür seramikte elde edilmektedir. Örneğin, pür metal kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%1.6)'dan (%32.8)'e ve Pasternak zemini için (%8.2)'den (%59)'a artmaktadır. Pür metal durumuyla $k=1$, $k=3$, üstel değişim ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%9.3), (%5.6), (%1.7) ve (%5.1) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir. Pür metal durumuyla $k=1$, $k=3$, üstel değişim ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%18.3), (%11), (%3.3) ve (%10) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.11. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

			FDM ₂			
	L/R	ZrO ₂	$k=1$	$k=3$	Üstel	Ti6Al4V
$S_{kr}/100$ (q,n)	0.5	6.777(0.58,11)	5.52(0.58,11)	4.577(0.58,11)	5.375(0.58,11)	4.263(0.58,11)
	1	3.865(0.43,9)	3.148(0.43,9)	2.61(0.43,9)	3.065(0.43,9)	2.431(0.43,9)
	1.5	2.983(0.36,8)	2.43(0.36,8)	2.015(0.36,8)	2.366(0.36,8)	1.876(0.36,8)
	2	2.509(0.3,7)	2.044(0.3,7)	1.695(0.3,7)	1.99(0.3,7)	1.578(0.3,7)
	2.5	2.221(0.26,6)	1.809(0.26,6)	1.5(0.26,6)	1.762(0.26,6)	1.397(0.26,6)
	3	2.002(0.25,6)	1.63(0.25,6)	1.352(0.25,6)	1.587(0.25,6)	1.259(0.25,6)
$S_{kr}^w/100$ (q,n)	0.5	6.848(0.59,11)	5.59(0.59,11)	4.647(0.59,11)	5.445(0.59,11)	4.333(0.59,11)
	1	4.008(0.44,9)	3.29(0.44,9)	2.752(0.45,9)	3.207(0.44,9)	2.572(0.45,9)
	1.5	3.197(0.37,8)	2.643(0.38,8)	2.227(0.38,8)	2.579(0.38,8)	2.088(0.38,8)
	2	2.833(0.33,7)	2.364(0.37,8)	1.996(0.37,8)	2.308(0.37,8)	1.874(0.37,8)
	2.5	2.596(0.32,7)	2.173(0.33,7)	1.855(0.33,7)	2.124(0.33,7)	1.748(0.33,7)
	3	2.473(0.32,7)	2.073(0.33,7)	1.772(0.33,7)	2.027(0.33,7)	1.672(0.33,7)
$S_{kr}^{wp}/100$ (q,n)	0.5	7.13(0.6,11)	5.872(0.6,11)	4.928(0.61,11)	5.727(0.61,11)	4.614(0.61,11)
	1	4.303(0.46,9)	3.583(0.46,9)	3.043(0.47,9)	3.5(0.46,9)	2.862(0.47,9)
	1.5	3.515(0.39,8)	2.957(0.4,8)	2.537(0.41,8)	2.892(0.4,8)	2.397(0.41,8)
	2	3.17(0.38,8)	2.678(0.39,8)	2.306(0.4,8)	2.62(0.39,8)	2.182(0.4,8)
	2.5	2.941(0.34,7)	2.512(0.35,7)	2.188(0.36,7)	2.462(0.35,7)	2.079(0.36,7)
	3	2.816(0.34,7)	2.411(0.35,7)	2.104(0.36,7)	2.364(0.35,7)	2.001(0.36,7)



Şekil 4.5. Zeminsiz/zeminli FDM₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.12’de $L/R=2$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.12’den da görüleceği gibi R/h oranının artışına bağlı olarak pür metal (Ti6Al4V) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM₂ durumlarında S_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n artarken q parametresi ise artmakta veya azalmaktadır. En büyük S_{kr} değerleri pür seramik için elde edilirken en küçük S_{kr} değerleri pür metal için ortaya çıkmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında kıyaslandığında $R/h > 50$ aralığında en büyük S_{kr} değerleri $k=2$ için elde edilirken en küçük S_{kr} değerleri ise üstel değişim için ortaya çıkmaktadır. $R/h=50$ olduğunda ise en büyük S_{kr} değerleri $k=1$ için elde edilirken en küçük S_{kr} değerleri ise $k=2$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₂ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=2$ haricindeki FDM₂ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=2$ için önce azalıp sonra artmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₂ etkisi $k=2$ haricindeki FDM₂ durumlarında azalırken $k=2$ için önce azalıp sonra artmaktadır. Örneğin, zeminsiz durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50’den 150’ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%18.6) ve (-%20.7) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%27.8)’den (-%7.1)’e azalmakta ve sonra (-%19.6)’ya artmaktadır. Winkler zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50’den 150’ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%18.3)’ten (-%14.9)’a ve (-%20.4)’ten (-%16.8)’e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%27.4)’ten (-%9)’e azalmakta ve sonra (-%20.2)’ye artmaktadır. Pasternak zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50’den 150’ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%17.4)’dan (-%13.9)’a ve (-%19.5)’ten (-%15.5)’e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%26.2)’den (-%9)’a azalmakta ve sonra (-%18.5)’e artmaktadır.

FDM₂ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=2$ haricindeki

FDM₂ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=2$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₂ etkisi $k=2$ haricindeki FDM₂ durumlarında azalırken $k=2$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%29.5) ve (%26) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%17.7)'den (%47.7)'e artmakta ve sonra (%27.8)'e azalmaktadır. Winkler zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%28.8)'den (%23.4)'e ve (%25.5)'ten (%20.7)'ye azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%14.4)'ten (%41.4)'e artmakta ve sonra (%15.7)'ye azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%26.8)'den (%19.7)'ye ve (%23.7)'den (%17.5)'e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%13.4)'ten (%36)'ya artmakta ve sonra (%13.4)'e azalmaktadır.

Ti6Al4V / ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h > 50$ aralığında $k=2$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=2$ olan FDM₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%2)'den (%31.3)'e ve Pasternak zemini için (%9)'dan (%55.6)'ya artmaktadır. $k=2$ durumuyla $k=1$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%6.8), (%7.4) ve (%13.7) olarak $R/h=150$ için elde edilirken $k=2$ durumuyla pür seramik durumu arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi (%3.1) olarak $R/h=100$ 'de ortaya çıkmaktadır. $k=2$ durumuyla $k=1$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%6.6), (%7.9) ve (%19.8) olarak $R/h=150$ için elde edilirken $k=2$ durumuyla pür seramik durumu arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi (%2.5) olarak $R/h=50$ 'de ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.12. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri

			FDM ₂			
	R/h	ZrO ₂	$k=1$	$k=2$	Üstel	Ti6Al4V
$S_{kr}/100 (q,n)$	50	6.243(0.38,6)	5.085(0.38,6)	4.506(0.38,6)	4.951(0.38,6)	3.927(0.38,6)
	75	3.67(0.31,6)	2.989(0.31,6)	3.408(0.39,7)	2.91(0.31,6)	2.308(0.31,6)
	100	2.509(0.3,7)	2.044(0.3,7)	2.153(0.36,8)	1.99(0.3,7)	1.578(0.3,7)
	125	1.895(0.27,7)	1.544(0.27,7)	1.546(0.31,8)	1.503(0.27,7)	1.192(0.27,7)
	150	1.493(0.28,8)	1.216(0.28,8)	1.2(0.28,8)	1.184(0.28,8)	0.939(0.28,8)
$S_{kr}^w/100 (q,n)$	50	6.335(0.38,6)	5.176(0.38,6)	4.597(0.38,6)	5.043(0.38,6)	4.018(0.38,6)
	75	3.885(0.36,7)	3.194(0.36,7)	3.537(0.43,8)	3.114(0.36,7)	2.502(0.37,7)
	100	2.833(0.33,7)	2.364(0.37,8)	2.365(0.38,8)	2.308(0.37,8)	1.874(0.37,8)
	125	2.289(0.34,8)	1.93(0.35,8)	1.851(0.38,9)	1.888(0.35,8)	1.551(0.38,9)
	150	1.974(0.36,9)	1.679(0.39,10)	1.575(0.4,10)	1.642(0.39,10)	1.361(0.4,10)
$S_{kr}^{wp}/100 (q,n)$	50	6.651(0.39,6)	5.491(0.39,6)	4.911(0.4,6)	5.357(0.39,6)	4.331(0.4,6)
	75	4.207(0.38,7)	3.513(0.38,7)	3.83(0.44,8)	3.432(0.38,7)	2.817(0.39,7)
	100	3.17(0.38,8)	2.678(0.39,8)	2.677(0.4,8)	2.62(0.39,8)	2.182(0.4,8)
	125	2.619(0.36,8)	2.238(0.4,9)	2.153(0.41,9)	2.193(0.4,9)	1.849(0.42,9)
	150	2.29(0.38,9)	1.972(0.42,10)	1.867(0.43,10)	1.935(0.42,10)	1.647(0.44,10)

Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.13 ve Şekil 4.6’da $R/h=100$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.13 ve Şekil 4.6’dan da görüleceği gibi L/R oranının artışına bağlı olarak pür metal (SUS304) ve pür seramik (Si₃N₄) ile tüm FDM₁ durumlarında M_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n ve q parametresi de sabit kalmakta veya azalmaktadır. SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklar için en büyük M_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük M_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir. FDM₁ durumları kendi aralarında kıyaslandığında ise en büyük M_{kr} değerleri $k=0.25$ için en küçük M_{kr} değerleri ise $k=1$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₁ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₁ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en büyük FDM₁ etkileri $k=1$ için en küçük FDM₁ etkileri ise $k=0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=0.25$ için L/R ’nin 0.5’ten 3’e artışına

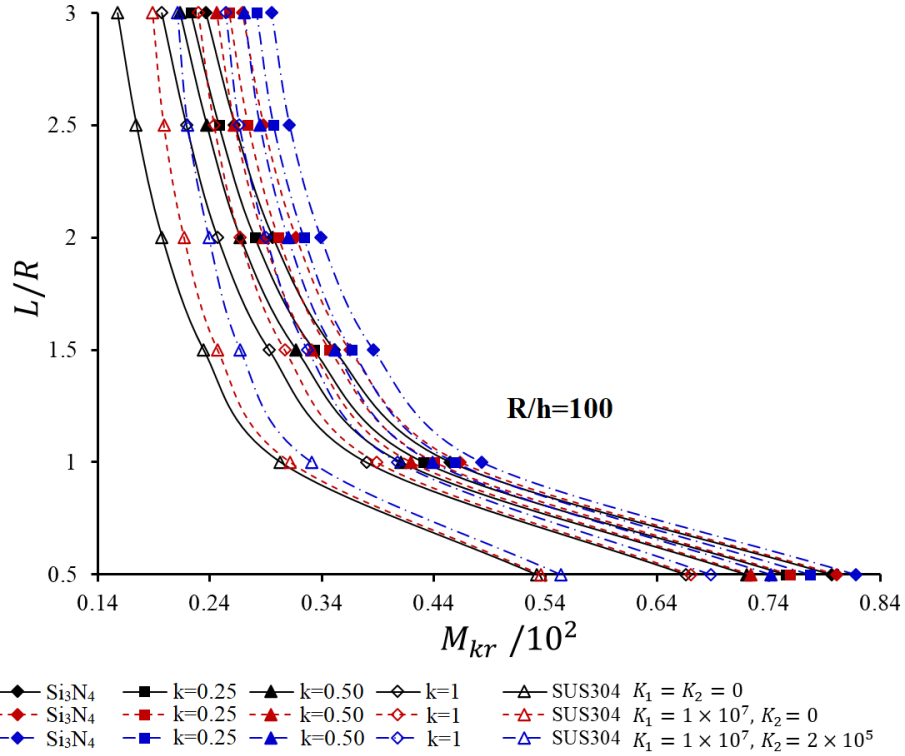
bağlı olarak M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 etkisi Winkler zemini durumunda (-%5.3)'ten (-%4.5)'e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (-%5)'ten (-%4.4)'e azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (-%5.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=0.25$ ve $k=1$ durumları arasındaki en büyük FDM_1 etkisi farkı (%11) olarak, $k=0.25$ ve $k=0.5$ durumları arasındaki en büyük FDM_1 etkisi farkı (%4.2) olmaktadır.

FDM_1 durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM_1 durumlarında FDM_1 etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM_1 durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en küçük FDM_1 etkileri $k=1$ için en büyük FDM_1 etkileri ise $k=0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=1$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 etkisi Winkler zemini durumunda (%25)'ten (%21.7)'ye azalırken Pasternak zemini durumunda ise (%24.2)'den (%30.4)'e azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (%26) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=1$ ve $k=0.25$ durumları arasındaki en büyük FDM_1 etkisi farkı (%17) olarak, $k=1$ ve $k=0.5$ durumları arasındaki en büyük FDM_1 etkisi farkı (%10) olmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise pür seramikte elde edilmektedir. Örneğin, pür metal kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%0.8)'den (%20.4)'e ve Pasternak zemini için (%4.1)'den (%34.4)'e artmaktadır. Pür metal durumuyla $k=0.25$, $k=0.5$, $k=1$ ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%5.8), (%4.9), (%3.6) ve (%6.4) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir. Pür metal durumuyla $k=0.25$, $k=0.5$, $k=1$ ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%7.9), (%7.2), (%5.5) ve (%9.4) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.13. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

			FDM ₁			
	L/R	Si ₃ N ₄	$k=0.25$	$k=0.50$	$k=1$	SUS304
$M_{kr}/100 (q,n)$	0.5	0.796(0.58,11)	0.755(0.58,11)	0.72(0.58,11)	0.666(0.58,11)	0.532(0.58,11)
	1	0.455(0.42,9)	0.431(0.42,9)	0.411(0.43,9)	0.38(0.43,9)	0.303(0.43,9)
	1.5	0.351(0.35,8)	0.333(0.35,8)	0.317(0.35,8)	0.293(0.35,8)	0.234(0.36,8)
	2	0.296(0.3,7)	0.28(0.3,7)	0.267(0.3,7)	0.247(0.3,7)	0.197(0.3,7)
	2.5	0.262(0.25,6)	0.248(0.25,6)	0.237(0.25,6)	0.219(0.26,6)	0.174(0.26,6)
	3	0.236(0.25,6)	0.223(0.25,6)	0.213(0.25,6)	0.197(0.25,6)	0.157(0.25,6)
$M_{kr}^v/100 (q,n)$	0.5	0.801(0.59,11)	0.759(0.59,11)	0.724(0.59,11)	0.67(0.59,11)	0.536(0.59,11)
	1	0.464(0.43,9)	0.441(0.43,9)	0.42(0.43,9)	0.389(0.43,9)	0.312(0.44,9)
	1.5	0.365(0.36,8)	0.347(0.36,8)	0.331(0.36,8)	0.307(0.37,8)	0.247(0.37,8)
	2	0.317(0.31,7)	0.301(0.31,7)	0.288(0.32,7)	0.267(0.32,7)	0.217(0.32,7)
	2.5	0.288(0.31,7)	0.274(0.31,7)	0.262(0.31,7)	0.244(0.31,7)	0.199(0.32,7)
	3	0.269(0.27,6)	0.257(0.27,6)	0.246(0.27,6)	0.23(0.27,6)	0.189(0.32,7)
$M_{kr}^{wp}/100 (q,n)$	0.5	0.818(0.59,11)	0.777(0.59,11)	0.742(0.59,11)	0.688(0.59,11)	0.554(0.6,11)
	1	0.483(0.44,9)	0.459(0.44,9)	0.439(0.44,9)	0.408(0.45,9)	0.331(0.45,9)
	1.5	0.386(0.37,8)	0.367(0.37,8)	0.352(0.38,8)	0.327(0.38,8)	0.267(0.39,8)
	2	0.339(0.32,7)	0.324(0.33,7)	0.31(0.33,7)	0.29(0.33,7)	0.239(0.34,7)
	2.5	0.311(0.32,7)	0.297(0.32,7)	0.285(0.32,7)	0.266(0.33,7)	0.22(0.33,7)
	3	0.295(0.28,6)	0.282(0.28,6)	0.271(0.32,7)	0.254(0.32,7)	0.211(0.33,7)



Şekil 4.6. Zeminsiz/ zeminli FDM₁ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.14'de $L/R=2$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.14'den da görüleceği gibi R/h oranının artışına bağlı olarak pür metal (SUS304) ve pür seramik (Si₃N₄) ile tüm FDM₁ durumlarında M_{kr} değerleri artmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n artarken $R/h < 125$ aralığında q parametresi de azalmaktadır. $R/h \geq 75$ olduğunda en büyük M_{kr} değerleri $k=0.25$ için elde edilirken $R/h=50$ olduğunda en büyük M_{kr} değerleri pür seramik için ortaya çıkmaktadır. En küçük M_{kr} değerleri ise pür metal için elde edilmektedir.

FDM₁ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=0.25$ haricindeki FDM₁ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₁ etkisi $k=0.25$ haricindeki FDM₁ durumlarında azalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, zeminsiz durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%9.6) ve (-%16.7) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.2)'den (%21.8)'e artmakta ve sonra (%5.7)'ye azalmaktadır. Winkler zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%9.6)'dan (-%8.5)'e ve (-%16.4)'den (-%14.5)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.2)'den (%19.7)'ye artmakta ve sonra (%1.2)'ye azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%9.3)'ten (-%7.8)'e ve (-%15.9)'dan (-%13.4)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5)'ten (%18.5)'e artmakta ve sonra (%1.1)'e azalmaktadır.

FDM₁ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=0.25$ haricindeki FDM₁ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₁ etkisi $k=0.25$ haricindeki FDM₁ durumlarında azalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin,

zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%36) ve (%25.6) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%42.2)'den (%83.7)'ye artmakta ve sonra (%58.9)'a azalmaktadır. Winkler zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%35.2)'den (%29.7)'ye ve (%25)'ten (%21.1)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%41.7)'den (%77.6)'ye artmakta ve sonra (%43.4)'e azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%33.9)'dan (%26.5)'e ve (%24.1)'den (%18.9)'a azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%40.2)'den (%72.3)'e artmakta ve sonra (%38.7)'ye azalmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h > 50$ aralığında $k=0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=0.25$ olan FDM₁ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%0.8)'den (%14.7)'ye ve Pasternak zemini için (%3.7)'den (%26)'ya artmaktadır. $k=0.25$ durumuyla pür seramik, $k=0.5$, $k=1$ ve pür metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%5.1), (%6.6), (%3) ve (%12.4) olarak $R/h=150$ için elde edilmektedir. $k=0.25$ durumuyla pür seramik, $k=0.5$, $k=1$ ve pür metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%5.7), (%8.5), (%10.8) ve (%18.4) olarak $R/h=150$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.14 Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri

			FDM ₁			
	R/h	Si ₃ N ₄	$k=0.25$	$k=0.50$	$k=1$	SUS304
$M_{kr}/10 (q,n)$	50	1.836(0.37,6)	1.741(0.37,6)	1.66(0.37,6)	1.534(0.38,6)	1.224(0.38,6)
	75	2.438(0.31,6)	2.969(0.38,7)	2.2(0.31,6)	2.031(0.31,6)	1.617(0.31,6)
	100	2.957(0.3,7)	3.33(0.35,8)	2.671(0.3,7)	2.467(0.3,7)	1.967(0.3,7)
	125	3.497(0.27,7)	3.74(0.31,8)	3.156(0.27,7)	2.914(0.27,7)	2.319(0.27,7)
	150	3.958(0.28,8)	4.183(0.28,8)	3.575(0.28,8)	3.302(0.28,8)	2.632(0.28,8)
$M_{kr}^w/10 (q,n)$	50	1.851(0.38,6)	1.755(0.38,6)	1.674(0.38,6)	1.548(0.38,6)	1.238(0.38,6)
	75	2.522(0.35,7)	3.019(0.42,8)	2.285(0.36,7)	2.115(0.36,7)	1.7(0.36,7)
	100	3.166(0.31,7)	3.466(0.36,8)	2.879(0.32,7)	2.674(0.32,7)	2.171(0.32,7)
	125	3.898(0.32,8)	4.101(0.36,9)	3.558(0.33,8)	3.314(0.33,8)	2.715(0.34,8)
	150	4.738(0.34,9)	4.796(0.34,9)	4.337(0.34,9)	4.051(0.34,9)	3.345(0.35,9)
$M_{kr}^{wp}/10 (q,n)$	50	1.901(0.38,6)	1.805(0.38,6)	1.724(0.38,6)	1.598(0.38,6)	1.288(0.39,6)
	75	2.638(0.36,7)	3.125(0.43,8)	2.401(0.36,7)	2.231(0.37,7)	1.814(0.37,7)
	100	3.393(0.32,7)	3.672(0.37,8)	3.104(0.33,7)	2.898(0.33,7)	2.39(0.34,7)
	125	4.24(0.34,8)	4.416(0.38,9)	3.896(0.34,8)	3.651(0.34,8)	3.045(0.35,8)
	150	5.21(0.35,9)	5.269(0.36,9)	4.806(0.36,9)	4.515(0.36,9)	3.799(0.37,9)

Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.15 ve Şekil 4.7’de $R/h=100$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.15 ve Şekil 4.7’den de görüleceği gibi L/R oranının artmasına bağlı olarak pür metal (Ti6Al4V) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM₂ durumlarında M_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n $L/R>2$ aralığında sabit kalırken $L/R \leq 2$ aralığında ise azalmaktadır. q parametresi ise L/R oranının artmasına bağlı olarak zeminsiz Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklar için azalırken zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklar için $L/R>2$ aralığında sabit kalmaktadır. Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklar için en büyük M_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük M_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir. FDM₂ durumları kendi aralarında kıyaslandığında ise en büyük M_{kr} değerleri $k=0.25$ için en küçük M_{kr} değerleri ise $k=1$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₂ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en büyük FDM₂ etkileri $k=1$ için en küçük FDM₂ etkileri ise $k=0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=1$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi Winkler zemini durumunda (-%18.4)'ten (-%16.1)'e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (-%17.6)'dan (-%14.7)'ye azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (-%18.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=1$ ve $k=0.5$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı yaklaşık (%8) olarak, $k=0.25$ ve $k=1$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı yaklaşık (%12) olarak elde edilmektedir.

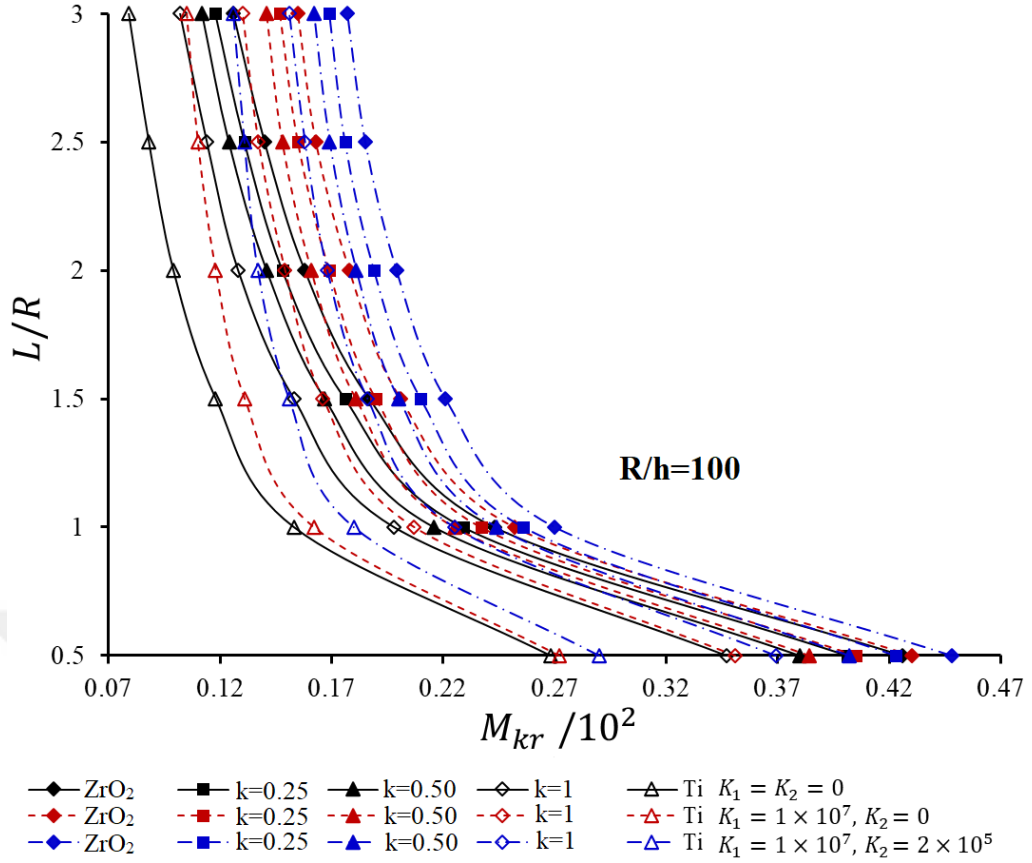
FDM₂ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en küçük FDM₂ etkileri $k=1$ için en büyük FDM₂ etkileri ise $k=0.25$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=0.25$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi Winkler zemini durumunda (%48.9)'dan (%40)'a azalırken Pasternak zemini durumunda ise (%45.9)'dan (%34.1)'e azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (%49.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=0.25$ ve $k=0.5$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı yaklaşık (%8) olarak, $k=0.25$ ve $k=1$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı yaklaşık (%20) olarak elde edilmektedir.

Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise pür seramikte elde edilmektedir. Örneğin, pür metal kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%1.5)'ten (%32.9)'a ve Pasternak zemini için (%8.2)'den (%59.5)'e artmaktadır. Pür metal durumuyla $k=0.25$, $k=0.5$, $k=1$ ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%8.3), (%7), (%5.5) ve (%9.9) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir. Pür metal durumuyla $k=0.25$, $k=0.5$, $k=1$ ve pür seramik

durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%16.3), (%14.9), (%11.5) ve (%19) olarak $L / R=3$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.15. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L / R oranına bağlı değişimleri

			FDM ₂			
	L / R	ZrO ₂	$k = 0.25$	$k = 0.50$	$k = 1$	Ti6Al4V
$M_{kr}/100 (q,n)$	0.5	0.426(0.58,11)	0.401(0.58,11)	0.38(0.58,11)	0.347(0.58,11)	0.268(0.58,11)
	1	0.243(0.43,9)	0.229(0.43,9)	0.216(0.43,9)	0.198(0.43,9)	0.153(0.43,9)
	1.5	0.187(0.36,8)	0.176(0.36,8)	0.167(0.36,8)	0.153(0.36,8)	0.118(0.36,8)
	2	0.158(0.3,7)	0.148(0.3,7)	0.141(0.3,7)	0.128(0.3,7)	0.099(0.3,7)
	2.5	0.14(0.26,6)	0.131(0.26,6)	0.124(0.26,6)	0.114(0.26,6)	0.088(0.26,6)
	3	0.126(0.25,6)	0.118(0.25,6)	0.112(0.25,6)	0.102(0.25,6)	0.079(0.25,6)
$M_{kr}^w/100 (q,n)$	0.5	0.43(0.59,11)	0.405(0.59,11)	0.384(0.59,11)	0.351(0.59,11)	0.272(0.59,11)
	1	0.252(0.44,9)	0.237(0.44,9)	0.225(0.44,9)	0.207(0.44,9)	0.162(0.45,9)
	1.5	0.201(0.37,8)	0.19(0.37,8)	0.181(0.37,8)	0.166(0.38,8)	0.131(0.38,8)
	2	0.178(0.33,7)	0.169(0.33,7)	0.161(0.33,7)	0.149(0.37,8)	0.118(0.37,8)
	2.5	0.163(0.32,7)	0.155(0.32,7)	0.148(0.32,7)	0.137(0.33,7)	0.11(0.33,7)
	3	0.155(0.32,7)	0.147(0.32,7)	0.141(0.32,7)	0.13(0.33,7)	0.105(0.33,7)
$M_{kr}^{wp}/100 (q,n)$	0.5	0.448(0.6,11)	0.423(0.6,11)	0.402(0.6,11)	0.369(0.6,11)	0.29(0.61,11)
	1	0.27(0.46,9)	0.256(0.46,9)	0.244(0.46,9)	0.225(0.46,9)	0.18(0.47,9)
	1.5	0.221(0.39,8)	0.21(0.39,8)	0.2(0.4,8)	0.186(0.4,8)	0.151(0.41,8)
	2	0.199(0.38,8)	0.189(0.38,8)	0.181(0.38,8)	0.168(0.39,8)	0.137(0.4,8)
	2.5	0.185(0.34,7)	0.176(0.34,7)	0.169(0.35,7)	0.158(0.35,7)	0.131(0.36,7)
	3	0.177(0.34,7)	0.169(0.34,7)	0.162(0.34,7)	0.151(0.35,7)	0.126(0.36,7)



Şekil 4.7. Zeminsiz/zeminli FDM₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.16'da $L/R=2$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.16'dan da görüleceği gibi R/h oranının artışına bağlı olarak pür metal (Ti6Al4) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM₂ durumlarında M_{kr} değerleri artmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n ve q parametresi artmakta veya sabit kalmaktadır. $R/h \geq 75$ olduğunda en büyük M_{kr} değerleri $k=0.25$ için elde edilirken $R/h=50$ olduğunda en büyük M_{kr} değerleri pür seramik için ortaya çıkmaktadır. En küçük M_{kr} değerleri ise pür metal için elde edilmektedir.

FDM₂ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=0.25$ haricindeki FDM₂ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₂ etkisi $k=0.25$ haricindeki FDM₂ durumlarında azalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin,

zemsiz durumda M_{kr} değerleri zerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%10.9) ve (-%18.6) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.9)'den (%21.1)'e artmakta ve sonra (%4.8)'e azalmaktadır. Winkler zeminli durumda M_{kr} değerleri zerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%10.7)'den (-%8.7)'ye ve (-%18.3)'ten (-%14.9)'a azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.8)'den (%17.9)'a artmakta ve sonra (%0.4)'e azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda M_{kr} değerleri zerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (-%10.2)'den (-%8)'e ve (-%17.4)'ten (-%13.9)'a azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (-%5.6)'dan (%15.9)'a artmakta ve sonra (%1.1)'e azalmaktadır.

FDM₂ durumu pr metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zemsiz durumda $k=0.25$ haricindeki FDM₂ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₂ etkisi $k=0.25$ haricindeki FDM₂ durumlarında azalırken $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, zemsiz durumda M_{kr} değerleri zerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%42) ve (%29.5) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%49.6)'dan (%92.5)'e artmakta ve sonra (%66.7)'e azalmaktadır. Winkler zeminli durumda M_{kr} değerleri zerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%40.8)'den (%32.4)'e ve (%28.8)'den (%23.4)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%48.5)'ten (%83.1)'e artmakta ve sonra (%44.5)'e azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda M_{kr} değerleri zerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=0.5$ ve $k=1$ için sırasıyla (%37.9)'dan (%27.9)'a ve (%26.8)'den (%19.7)'e azalırken $k=0.25$ olduğunda ise önce (%45.1)'den (%73.1)'e artmakta ve sonra (%37.5)'e azalmaktadır.

Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pr metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h>50$ aralığında $k=0.25$ için elde

edilmektedir. Örneğin, $k=0.25$ olan FDM₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%1.6)'dan (%25.7)'ye ve Pasternak zemini için (%6.9)'dan (%44.8)'e artmaktadır. $k=0.25$ durumuyla pür seramik, $k=0.5$, $k=1$ ve pür metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%6.5), (%9.8), (%12.4) ve (%19.3) olarak $R/h=150$ için elde edilmektedir. $k=0.25$ durumuyla pür seramik, $k=0.5$, $k=1$ ve pür metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%8.7), (%13.6), (%17.4) ve (%30.7) olarak $R/h=150$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.16. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri

			FDM ₂			
	R/h	ZrO ₂	$k=0.25$	$k=0.50$	$k=1$	Ti6Al4V
$M_{kr}/10$ (q,n)	50	0.981(0.38,6)	0.923(0.38,6)	0.874(0.38,6)	0.799(0.38,6)	0.617(0.38,6)
	75	1.297(0.31,6)	1.57(0.39,7)	1.156(0.31,6)	1.056(0.31,6)	0.816(0.31,6)
	100	1.577(0.3,7)	1.764(0.36,8)	1.405(0.3,7)	1.284(0.3,7)	0.992(0.3,7)
	125	1.861(0.27,7)	1.979(0.31,8)	1.658(0.27,7)	1.515(0.27,7)	1.17(0.27,7)
	150	2.11(0.28,8)	2.212(0.28,8)	1.881(0.28,8)	1.719(0.28,8)	1.327(0.28,8)
$M_{kr}^w/10$ (q,n)	50	0.995(0.38,6)	0.937(0.38,6)	0.888(0.38,6)	0.813(0.38,6)	0.631(0.38,6)
	75	1.373(0.36,7)	1.619(0.42,8)	1.23(0.36,7)	1.129(0.36,7)	0.884(0.37,7)
	100	1.78(0.33,7)	1.898(0.37,8)	1.608(0.33,7)	1.485(0.37,8)	1.177(0.37,8)
	125	2.247(0.34,8)	2.294(0.38,9)	2.041(0.34,8)	1.895(0.35,8)	1.523(0.38,9)
	150	2.791(0.36,9)	2.781(0.39,10)	2.547(0.36,9)	2.373(0.39,10)	1.924(0.4,10)
$M_{kr}^{wp}/10$ (q,n)	50	1.045(0.39,6)	0.987(0.39,6)	0.938(0.39,6)	0.863(0.39,6)	0.68(0.4,6)
	75	1.487(0.38,7)	1.723(0.44,8)	1.343(0.38,7)	1.241(0.38,7)	0.996(0.39,7)
	100	1.992(0.38,8)	2.097(0.39,8)	1.811(0.38,8)	1.682(0.39,8)	1.371(0.4,8)
	125	2.571(0.36,8)	2.596(0.4,9)	2.354(0.4,9)	2.197(0.4,9)	1.815(0.42,9)
	150	3.237(0.38,9)	3.203(0.41,10)	2.977(0.41,10)	2.788(0.42,10)	2.329(0.44,10)

Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.17 ve Şekil 4.8'de $R/h=100$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.17 ve Şekil 4.8'den de görüleceği gibi L/R oranının artışına bağlı olarak pür metal (SUS304) ve pür seramik (Si₃N₄) ile tüm FDM₁ durumlarında M_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n ve q parametresi de

azalmakta veya sabit kalmaktadır. SUS304/ FDM₁/ Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklar için en büyük M_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük M_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir. FDM₁ durumları kendi aralarında kıyaslandığında ise en büyük M_{kr} değerleri $k=1$ için en küçük M_{kr} değerleri ise $k=3$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₁ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₁ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en büyük FDM₁ etkileri $k=3$ için en küçük FDM₁ etkileri ise $k=1$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=1$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi Winkler zemini durumunda (-%16.4)'ten (-%14.5)'e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (-%15.9)'dan (-%13.9)'a azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (-%16.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=1$ ve $k=3$ durumları arasındaki en büyük FDM₁ etkisi farkı (%13) olarak, $k=1$ ve üstel değişim durumları arasındaki en büyük FDM₁ etkisi farkı (%2) olarak elde edilmektedir.

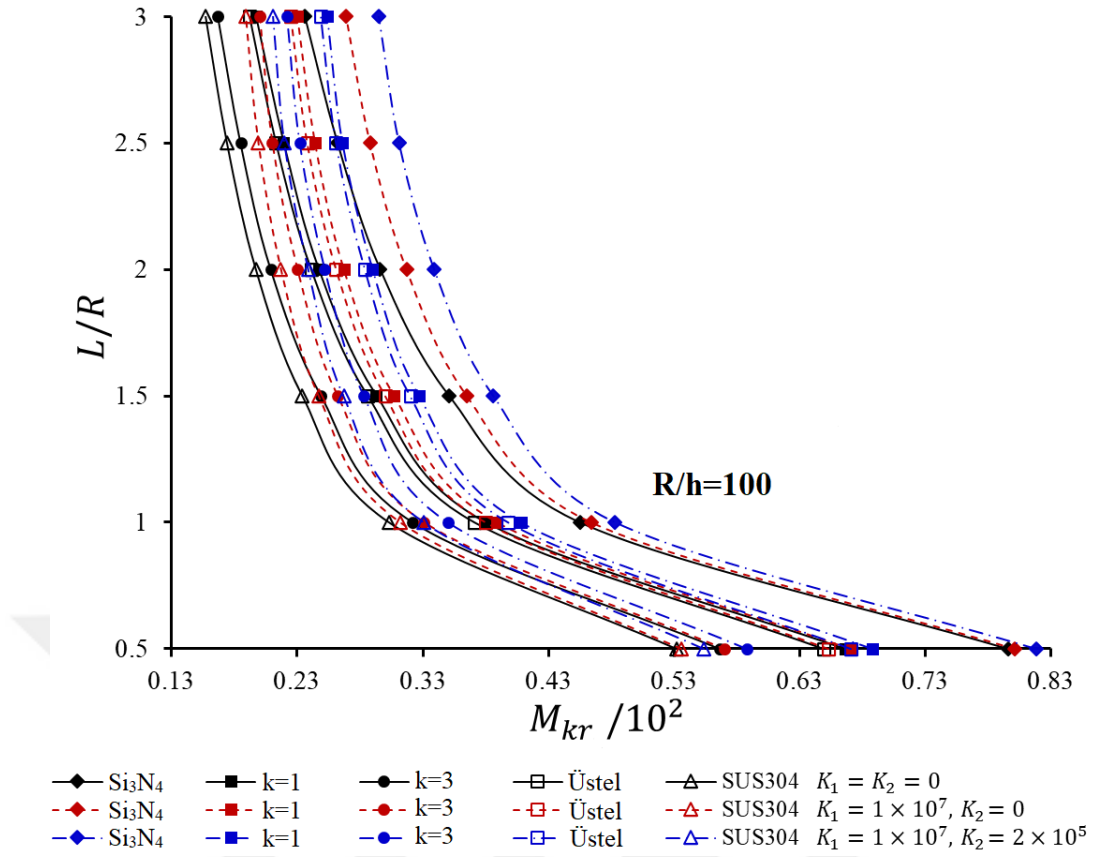
FDM₁ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₁ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en küçük FDM₁ etkileri $k=3$ için en büyük FDM₁ etkileri ise $k=1$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=3$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi Winkler zemini durumunda (%6.3)'ten (%5.8)'e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (%6.1)'den (%5.2)'ye azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (%6) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=3$ ve $k=1$ durumları arasındaki en büyük FDM₁ etkisi farkı (%19) olarak, $k=3$ ve üstel değişim durumları arasındaki en büyük FDM₁ etkisi farkı (%16) olarak elde edilmektedir.

SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri

pür metalde en küçük zemin etkileri ise pür seramikte elde edilmektedir. Örneğin, pür metal kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%0.8)'den (%20.4)'e ve Pasternak zemini için (%4.1)'den (%34.4)'e artmaktadır. Pür metal durumuyla $k=1$, $k=3$, üstel değişim ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%3.6), (%0.6), (%3.2) ve (%6.4) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir. Pür metal durumuyla $k=1$, $k=3$, üstel değişim ve pür seramik durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%5.5), (%1.5), (%4.7) ve (%9.4) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.17. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

			FDM ₁			
	L/R	Si ₃ N ₄	$k=1$	$k=3$	Üstel	SUS304
$M_{kr}/100 (q,n)$	0.5	0.796(0.58,11)	0.666(0.58,11)	0.566(0.58,11)	0.649(0.58,11)	0.532(0.58,11)
	1	0.455(0.42,9)	0.38(0.43,9)	0.322(0.43,9)	0.371(0.43,9)	0.303(0.43,9)
	1.5	0.351(0.35,8)	0.293(0.35,8)	0.249(0.36,8)	0.286(0.35,8)	0.234(0.36,8)
	2	0.296(0.3,7)	0.247(0.3,7)	0.209(0.3,7)	0.241(0.3,7)	0.197(0.3,7)
	2.5	0.262(0.25,6)	0.219(0.26,6)	0.185(0.26,6)	0.213(0.26,6)	0.174(0.26,6)
	3	0.236(0.25,6)	0.197(0.25,6)	0.167(0.25,6)	0.192(0.25,6)	0.157(0.25,6)
$M_{kr}^w/100 (q,n)$	0.5	0.801(0.59,11)	0.67(0.59,11)	0.57(0.59,11)	0.653(0.59,11)	0.536(0.59,11)
	1	0.464(0.43,9)	0.389(0.43,9)	0.331(0.44,9)	0.38(0.43,9)	0.312(0.44,9)
	1.5	0.365(0.36,8)	0.307(0.37,8)	0.262(0.37,8)	0.3(0.37,8)	0.247(0.37,8)
	2	0.317(0.31,7)	0.267(0.32,7)	0.23(0.32,7)	0.261(0.32,7)	0.217(0.32,7)
	2.5	0.288(0.31,7)	0.244(0.31,7)	0.21(0.32,7)	0.238(0.31,7)	0.199(0.32,7)
	3	0.269(0.27,6)	0.23(0.27,6)	0.2(0.28,6)	0.225(0.27,6)	0.189(0.32,7)
$M_{kr}^{wp}/100 (q,n)$	0.5	0.818(0.59,11)	0.688(0.59,11)	0.588(0.6,11)	0.671(0.59,11)	0.554(0.6,11)
	1	0.483(0.44,9)	0.408(0.45,9)	0.35(0.45,9)	0.398(0.45,9)	0.331(0.45,9)
	1.5	0.386(0.37,8)	0.327(0.38,8)	0.283(0.38,8)	0.32(0.38,8)	0.267(0.39,8)
	2	0.339(0.32,7)	0.29(0.33,7)	0.252(0.34,7)	0.284(0.33,7)	0.239(0.34,7)
	2.5	0.311(0.32,7)	0.266(0.33,7)	0.232(0.33,7)	0.261(0.33,7)	0.22(0.33,7)
	3	0.295(0.28,6)	0.254(0.32,7)	0.222(0.33,7)	0.249(0.32,7)	0.211(0.33,7)



Şekil 4.8. Zeminsiz/zeminli FDM₁ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.18’de $L/R=2$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.18’den de görüleceği gibi R/h oranının artışına bağlı olarak pür metal (SUS304) ve pür seramik (Si₃N₄) ile tüm FDM₁ durumlarında M_{kr} değerleri artmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n artarken q parametresi ise artmakta veya azalmaktadır. En büyük M_{kr} değerleri pür seramik için elde edilirken en küçük M_{kr} değerleri pür metal için ortaya çıkmaktadır. FDM₁ durumları kendi aralarında kıyaslandığında $R/h > 50$ aralığında en büyük M_{kr} değerleri $k=2$ için elde edilirken en küçük M_{kr} değerleri ise üstel değişim için ortaya çıkmaktadır. $R/h=50$ olduğunda ise en büyük M_{kr} değerleri $k=1$ için elde edilirken en küçük M_{kr} değerleri ise $k=2$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₁ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=2$ haricindeki

FDM₁ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=2$ için önce azalıp sonra artmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₁ etkisi $k=2$ haricindeki FDM₁ durumlarında azalırken $k=2$ için önce azalıp sonra artmaktadır. Örneğin, zeminsiz durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%16.5) ve (-%18.7) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%24.9)'dan (-%3.7)'e azalmakta ve sonra (-%16.4)'e artmaktadır. Winkler zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%16.4)'ten (-%14.5)'e ve (-%18.4)'ten (-%16.3)'e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%24.7)'den (-%4.8)'e azalmakta ve sonra (-%17.4)'e artmaktadır. Pasternak zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%15.9)'dan (-%13.4)'e ve (-%17.9)'dan (-%15)'e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%24)'ten (-%5)'e azalmakta ve sonra (-%16)'ya artmaktadır.

FDM₁ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₁ durumlarında FDM₁ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=2$ haricindeki FDM₁ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=2$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₁ etkisi $k=2$ haricindeki FDM₁ durumlarında azalırken $k=2$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, zeminsiz durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%25.5) ve (%22.5) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%12.8)'den (%45.2)'ye artmakta ve sonra (%25.7)'e azalmaktadır. Winkler zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%25)'den (%21.1)'e ve (%22)'den (%18.6)'ya azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%12.6)'dan (%41.2)'ye artmakta ve sonra (%17)'e azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%24.1)'den (%18.9)'a ve (%21.2)'den (%16.6)'ya azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%12.1)'den (%38.2)'ye artmakta ve sonra (%15.2)'ye azalmaktadır.

SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h > 50$ aralığında $k=2$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=2$ olan FDM₁ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%1)'den (%18.4)'e ve Pasternak zemini için (%4.6)'dan (%32.3)'e artmaktadır. $k=2$ durumuyla $k=1$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%4.3), (%4.8) ve (%8.7) olarak $R/h=150$ için elde edilirken $k=2$ durumuyla pür seramik durumu arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi (%2) olarak $R/h=100$ 'de ortaya çıkmaktadır. $k=2$ durumuyla $k=1$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%4.4), (%5.2) ve (%12) olarak $R/h=150$ için elde edilirken $k=2$ durumuyla pür seramik durumu arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi (%1.9) olarak $R/h=100$ 'de ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.18. Zeminsiz/zeminli SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri

			FDM ₁			
	R/h	Si ₃ N ₄	$k=1$	$k=2$	Üstel	SUS304
$M_{kr}/10 (q,n)$	50	1.836(0.37,6)	1.534(0.38,6)	1.38(0.38,6)	1.496(0.38,6)	1.224(0.38,6)
	75	2.438(0.31,6)	2.031(0.31,6)	2.348(0.39,7)	1.981(0.31,6)	1.617(0.31,6)
	100	2.957(0.3,7)	2.467(0.3,7)	2.638(0.36,8)	2.406(0.3,7)	1.967(0.3,7)
	125	3.497(0.27,7)	2.914(0.27,7)	2.96(0.31,8)	2.842(0.27,7)	2.319(0.27,7)
	150	3.958(0.28,8)	3.302(0.28,8)	3.308(0.28,8)	3.221(0.28,8)	2.632(0.28,8)
$M_{kr}^w/10 (q,n)$	50	1.851(0.38,6)	1.548(0.38,6)	1.394(0.38,6)	1.51(0.38,6)	1.238(0.38,6)
	75	2.522(0.35,7)	2.115(0.36,7)	2.4(0.39,7)	2.065(0.36,7)	1.7(0.36,7)
	100	3.166(0.31,7)	2.674(0.32,7)	2.773(0.37,8)	2.613(0.32,7)	2.171(0.32,7)
	125	3.898(0.32,8)	3.314(0.33,8)	3.304(0.37,9)	3.241(0.33,8)	2.715(0.34,8)
	150	4.738(0.34,9)	4.051(0.34,9)	3.915(0.35,9)	3.965(0.34,9)	3.345(0.35,9)
$M_{kr}^{wp}/10 (q,n)$	50	1.901(0.38,6)	1.598(0.38,6)	1.444(0.39,6)	1.56(0.38,6)	1.288(0.39,6)
	75	2.638(0.36,7)	2.231(0.37,7)	2.507(0.43,8)	2.18(0.37,7)	1.814(0.37,7)
	100	3.393(0.32,7)	2.898(0.33,7)	2.976(0.38,8)	2.836(0.33,7)	2.39(0.34,7)
	125	4.24(0.34,8)	3.651(0.34,8)	3.615(0.38,9)	3.578(0.34,8)	3.045(0.35,8)
	150	5.21(0.35,9)	4.515(0.36,9)	4.377(0.37,9)	4.429(0.36,9)	3.799(0.37,9)

Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.19 ve Şekil 4.9'da $R/h=100$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.19 ve Şekil 4.9'dan de görüleceği gibi L/R oranının artışına bağlı olarak pür metal (Ti6Al4V) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM₂ durumlarında M_{kr} değerleri azalmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n ve q parametresi de azalmakta veya sabit kalmaktadır. Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklar için en büyük M_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük M_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir. FDM₂ durumları kendi aralarında kıyaslandığında ise en büyük M_{kr} değerleri $k=1$ için en küçük M_{kr} değerleri ise $k=3$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₂ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en büyük FDM₂ etkileri $k=3$ için en küçük FDM₂ etkileri ise $k=1$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=1$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi Winkler zemini durumunda (-%18.4)'ten (-%16.1)'e azalırken Pasternak zemini durumunda ise (-%17.6)'dan (-%14.7)'ye azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise yaklaşık (-%18) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=1$ ve $k=3$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%14) olarak, $k=1$ ve üstel değişim durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı (%2) olarak elde edilmektedir.

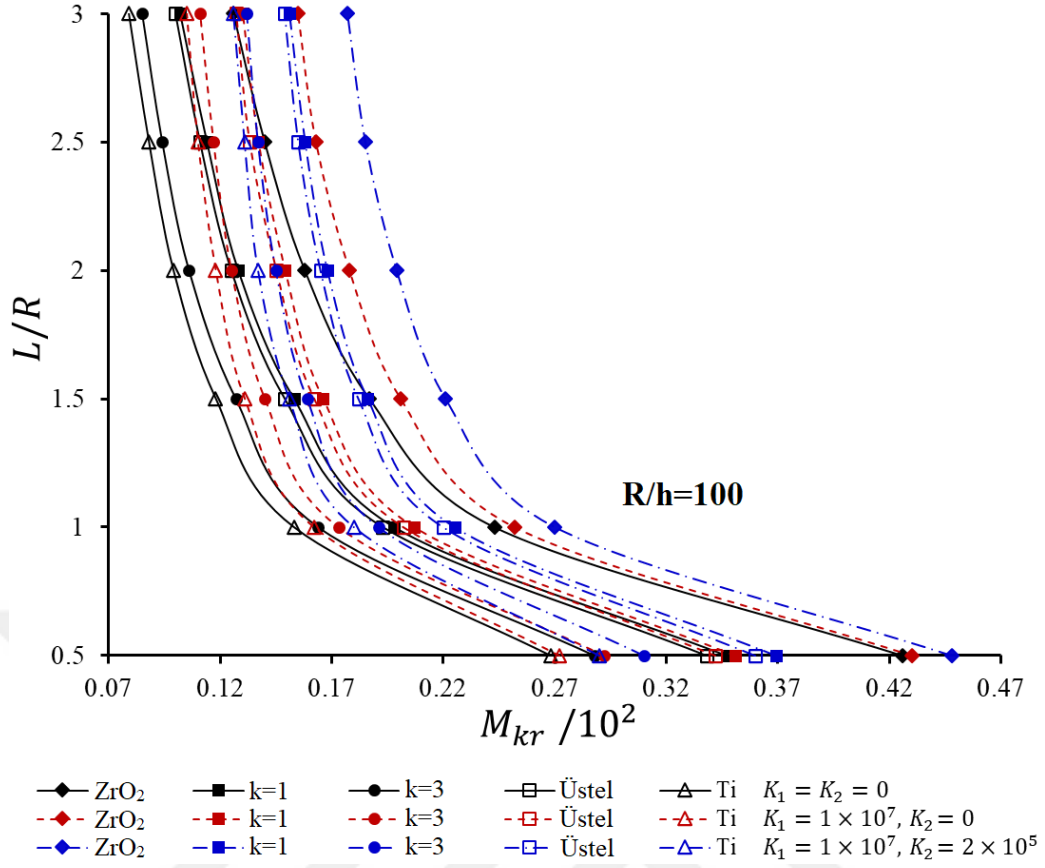
FDM₂ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en küçük FDM₂ etkileri $k=3$ için en büyük FDM₂ etkileri ise $k=1$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=3$ için L/R 'nin 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi Winkler zemini durumunda (%7.4)'ten (%5.7)'ye azalırken Pasternak zemini durumunda ise (%6.9)'dan (%4.8)'e azalmaktadır. Zeminsiz durumda ise (%7.5) olarak hemen hemen sabit kalmaktadır. $L/R=3$ olduğunda $k=3$ ve $k=1$ durumları arasındaki en büyük FDM₂ etkisi farkı

(%22) olarak, $k=3$ ve üstel değişim durumları arasındaki en büyük FDM_2 etkisi farkı (%19) olarak elde edilmektedir.

Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise pür seramikte elde edilmektedir. Örneğin, pür seramik kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%0.9)'dan (%23)'e ve Pasternak zemini için (%5.2)'den (%40.5)'e artmaktadır. Pür seramik durumuyla $k=1$, $k=3$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (4.4), (%7.6), (%4) ve (%9.9) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir. Pür seramik durumuyla $k=1$, $k=3$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%7.6), (%14.8), (%8.5) ve (%19) olarak $L/R=3$ için elde edilmektedir.

Çizelge 4.19. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

			FDM ₂			
	L/R	ZrO ₂	$k=1$	$k=3$	Üstel	Ti6Al4V
$M_{kr}/100 (q,n)$	0.5	0.426(0.58,11)	0.347(0.58,11)	0.288(0.58,11)	0.338(0.58,11)	0.268(0.58,11)
	1	0.243(0.43,9)	0.198(0.43,9)	0.164(0.43,9)	0.193(0.43,9)	0.153(0.43,9)
	1.5	0.187(0.36,8)	0.153(0.36,8)	0.127(0.36,8)	0.149(0.36,8)	0.118(0.36,8)
	2	0.158(0.3,7)	0.128(0.3,7)	0.106(0.3,7)	0.125(0.3,7)	0.099(0.3,7)
	2.5	0.14(0.26,6)	0.114(0.26,6)	0.094(0.26,6)	0.111(0.26,6)	0.088(0.26,6)
	3	0.126(0.25,6)	0.102(0.25,6)	0.085(0.25,6)	0.1(0.25,6)	0.079(0.25,6)
$M_{kr}^w/100 (q,n)$	0.5	0.43(0.59,11)	0.35(0.59,11)	0.29(0.59,11)	0.34(0.59,11)	0.27(0.59,11)
	1	0.252(0.44,9)	0.207(0.44,9)	0.173(0.45,9)	0.202(0.44,9)	0.162(0.45,9)
	1.5	0.201(0.37,8)	0.166(0.38,8)	0.14(0.38,8)	0.162(0.38,8)	0.131(0.38,8)
	2	0.178(0.33,7)	0.149(0.37,8)	0.125(0.37,8)	0.145(0.37,8)	0.118(0.37,8)
	2.5	0.163(0.32,7)	0.137(0.33,7)	0.117(0.33,7)	0.133(0.33,7)	0.11(0.33,7)
	3	0.155(0.32,7)	0.13(0.33,7)	0.111(0.33,7)	0.127(0.33,7)	0.105(0.33,7)
$M_{kr}^{wv}/100 (q,n)$	0.5	0.448(0.6,11)	0.369(0.6,11)	0.31(0.61,11)	0.36(0.61,11)	0.29(0.61,11)
	1	0.27(0.46,9)	0.225(0.46,9)	0.191(0.47,9)	0.22(0.46,9)	0.18(0.47,9)
	1.5	0.221(0.39,8)	0.186(0.4,8)	0.159(0.41,8)	0.182(0.4,8)	0.151(0.41,8)
	2	0.199(0.38,8)	0.168(0.39,8)	0.145(0.4,8)	0.165(0.39,8)	0.137(0.4,8)
	2.5	0.185(0.34,7)	0.158(0.35,7)	0.137(0.36,7)	0.155(0.35,7)	0.131(0.36,7)
	3	0.177(0.34,7)	0.151(0.35,7)	0.132(0.36,7)	0.149(0.35,7)	0.126(0.36,7)



Şekil 4.9. Zeminsiz/zeminli FDM₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin L/R oranına bağlı değişimleri

Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri Çizelge 4.20’de $L/R=2$ için sunulmaktadır. Çizelge 4.20’den de görüleceği gibi R/h oranının artışıyla birlikte pür metal (Ti6Al4V) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM₂ durumlarında M_{kr} değerleri artmaktadır. Ayrıca, dalga sayısı n artarken q parametresi ise artmakta veya azalmaktadır. En büyük M_{kr} değerleri pür seramik için elde edilirken en küçük M_{kr} değerleri pür metal için ortaya çıkmaktadır. FDM₂ durumları kendi aralarında kıyaslandığında $R/h > 50$ aralığında en büyük M_{kr} değerleri $k=2$ için elde edilirken en küçük M_{kr} değerleri ise üstel değişim için ortaya çıkmaktadır. $R/h=50$ olduğunda ise en büyük M_{kr} değerleri $k=1$ için elde edilirken en küçük M_{kr} değerleri ise $k=2$ için ortaya çıkmaktadır.

FDM₂ durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi R/h oranının artışıyla birlikte zeminsiz durumda $k=2$ haricindeki

FDM₂ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=2$ için önce azalıp sonra artmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₂ etkisi $k=2$ haricindeki FDM₂ durumlarında azalırken $k=2$ için önce azalıp sonra artmaktadır. Örneğin, zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%18.6) ve (-%20.7) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%27.8)'den (-%7.2)'ye azalmakta ve sonra (-%19.6)'ya artmaktadır. Winkler zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%18.3)'ten (-%15)'e ve (-%20.4)'ten (-%16.8)'e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%27.4)'ten (-%9)'e azalmakta ve sonra (-%20.2)'ye artmaktadır. Pasternak zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (-%17.4)'dan (-%13.9)'a ve (-%19.4)'ten (-%15.5)'e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (-%26.2)'den (-%8.9)'a azalmakta ve sonra (-%18.5)'e artmaktadır.

FDM₂ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm FDM₂ durumlarında FDM₂ etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminli durumda $k=2$ haricindeki FDM₂ durumlarında hemen hemen sabit kalırken $k=2$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Zeminli durumlarda ise FDM₂ etkisi $k=2$ haricindeki FDM₂ durumlarında azalırken $k=2$ için önce artıp sonra azalmaktadır. Örneğin, zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%29.5) ve (%26) olarak yaklaşık olarak sabit kalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%14.8)'den (%47.6)'ya artmakta ve sonra (%27.8)'e azalmaktadır. Winkler zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%28.8)'den (%23.4)'e ve (%25.5)'ten (%20.7)'ye azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%14.4)'ten (%41.4)'e artmakta ve sonra (%15.8)'e azalmaktadır. Pasternak zeminli durumda M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₂ etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak $k=1$ ve üstel değişim için sırasıyla (%26.9)'dan (%19.7)'ye ve (%23.8)'den (%17.4)'e azalırken $k=2$ olduğunda ise önce (%13.4)'ten (%36)'ya artmakta ve sonra (%13.3)'e azalmaktadır.

Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. En büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h > 50$ aralığında $k=2$ için elde edilmektedir. Örneğin, $k=2$ olan FDM₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak Winkler zemini için (%2)'den (%31.3)'e ve Pasternak zemini için (%9)'dan (%55.6)'ya artmaktadır. $k=2$ durumuyla $k=1$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi sırasıyla (%6.7), (%7.5) ve (%13.7) olarak $R/h=150$ için elde edilirken $k=2$ durumuyla pür seramik durumu arasındaki en büyük Winkler zemini etkisi (%3) olarak $R/h=100$ 'de ortaya çıkmaktadır. $k=2$ durumuyla $k=1$, üstel değişim ve pür metal durumları arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi sırasıyla (%6.6), (%7.9) ve (%19.9) olarak $R/h=150$ için elde edilirken $k=2$ durumuyla pür seramik durumu arasındaki en büyük Pasternak zemini etkisi (%2.4) olarak $R/h=50$ 'de ortaya çıkmaktadır.

Çizelge 4.20. Zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin R/h oranına bağlı değişimleri

			FDM ₂			
	R/h	ZrO ₂	$k=1$	$k=2$	Üstel	Ti6Al4V
$M_{kr}/10 (q,n)$	50	0.981(0.38,6)	0.799(0.38,6)	0.708(0.38,6)	0.778(0.38,6)	0.617(0.38,6)
	75	1.297(0.31,6)	1.056(0.31,6)	1.204(0.39,7)	1.029(0.31,6)	0.816(0.31,6)
	100	1.577(0.3,7)	1.284(0.3,7)	1.353(0.36,8)	1.25(0.3,7)	0.992(0.3,7)
	125	1.861(0.27,7)	1.515(0.27,7)	1.518(0.31,8)	1.476(0.27,7)	1.17(0.27,7)
	150	2.11(0.28,8)	1.719(0.28,8)	1.696(0.28,8)	1.673(0.28,8)	1.327(0.28,8)
$M_{kr}^w/10 (q,n)$	50	0.995(0.38,6)	0.813(0.38,6)	0.722(0.38,6)	0.792(0.38,6)	0.631(0.38,6)
	75	1.373(0.36,7)	1.129(0.36,7)	1.25(0.43,8)	1.101(0.36,7)	0.884(0.37,7)
	100	1.78(0.33,7)	1.485(0.37,8)	1.486(0.38,8)	1.45(0.37,8)	1.177(0.37,8)
	125	2.247(0.34,8)	1.895(0.35,8)	1.817(0.38,9)	1.854(0.35,8)	1.523(0.38,9)
	150	2.791(0.36,9)	2.373(0.39,10)	2.227(0.4,10)	2.322(0.39,10)	1.924(0.4,10)
$M_{kr}^{wp}/10 (q,n)$	50	1.045(0.39,6)	0.863(0.39,6)	0.771(0.4,6)	0.842(0.39,6)	0.68(0.4,6)
	75	1.487(0.38,7)	1.241(0.38,7)	1.354(0.44,8)	1.213(0.38,7)	0.996(0.39,7)
	100	1.992(0.38,8)	1.682(0.39,8)	1.682(0.4,8)	1.646(0.39,8)	1.371(0.4,8)
	125	2.571(0.36,8)	2.197(0.4,9)	2.114(0.41,9)	2.153(0.4,9)	1.815(0.42,9)
	150	3.237(0.38,9)	2.788(0.42,10)	2.639(0.43,10)	2.735(0.42,10)	2.329(0.44,10)

Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM_1 ve FDM_2 'den meydana gelen kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükünün (S_{kr}) L/R oranının artışına bağlı değişimi Şekil 4.10'da $R/h=100$ değeri için sunulmaktadır. Şekil 4.10'dan de görüleceği üzere tam metal (SUS304 ve Ti) ve tam seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) ile üstel değişimli FDM durumlarında L/R oranının artışına bağlı olarak S_{kr} değerlerinin azaldığı görülmektedir. Zeminsiz/zeminli SUS304/ Si_3N_4 kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerleri zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ ZrO_2 kompozit silindirik kabuklarınkinden daha büyük olmaktadır. Her iki silindirik kabuk arasındaki bu S_{kr} değer farkı L/R oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır.

Üstel değişimli FDM durumları ile pür seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) durumlarıyla kıyaslandığında S_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 ve FDM_2 etkileri L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. Örneğin, S_{kr} değerleri üzerindeki FDM_2 etkisi zeminsiz durumda (-%20.7) ile sabit kalırken Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla (-%20.5)'ten (-%18)'e ve (-%19.7)'den (-%16.1)'e azalmaktadır. S_{kr} değerleri üzerindeki en büyük FDM_1 ve FDM_2 etki farkı zeminsiz, Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla yaklaşık (%2.2), (%2) ve (%1.7) olarak $L/R=0.5$ 'te ortaya çıkmaktadır. Üstel değişimli FDM durumları ile pür metal (SUS304 ve Ti6Al4V) durumlarıyla kıyaslandığında S_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 ve FDM_2 etkileri L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. Örneğin, S_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 etkisi zeminsiz durumda (%22) ile sabit kalırken Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla (%21.9)'dan (%19)'a ve (%21.2)'den (%17.9)'a azalmaktadır. S_{kr} değerleri üzerindeki en büyük FDM_1 ve FDM_2 etki farkı zeminsiz, Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla yaklaşık (%4), (%3.8) ve (%3) olarak $L/R=0.5$ 'te ortaya çıkmaktadır.

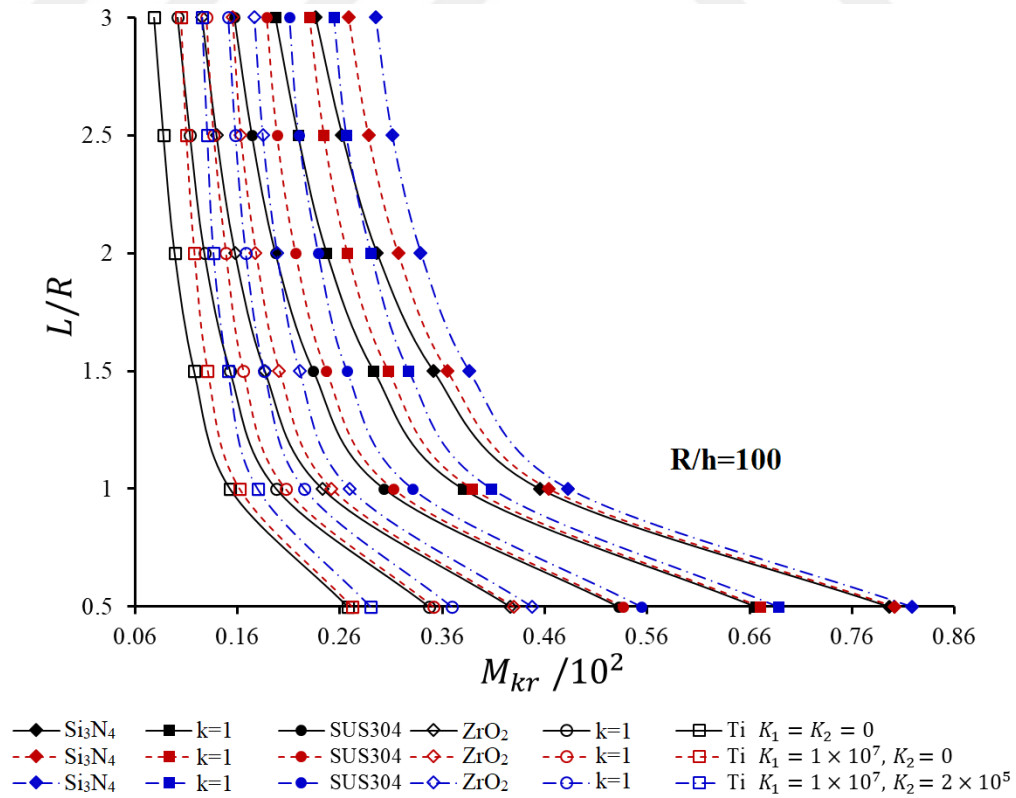
FDM_1 ve FDM_2 'den meydana gelen kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır.

Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM_1 ve FDM_2 'den meydana gelen kompozit silindirik kabuğun kritik burulma momentinin (M_{kr}) L/R oranının artışına bağlı değişimi Şekil 4. 11'de $R/h=100$ değeri için sunulmaktadır. Şekil 4.11'den de görüleceği üzere tam metal (SUS304 ve Ti6Al4V) ve tam seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) ile $k=1$ olan FDM durumlarında L/R oranının artışına bağlı olarak M_{kr} değerlerinin azaldığı görülmektedir. Zeminsiz/zeminli SUS304/ Si_3N_4 kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerleri zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ ZrO_2 kompozit silindirik kabuklarından daha büyük olmaktadır. Her iki silindirik kabuk arasındaki bu M_{kr} değer farkı L/R oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır.

$k=1$ olan FDM durumları ile pür seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) durumlarıyla kıyaslandığında M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 ve FDM_2 etkileri L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. Örneğin, M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 etkisi zeminsiz durumda (-%16) ile hemen hemen sabit kalırken Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla (-%16.4)'ten (-%14.5)'e ve (-%15.9)'dan (-%13.9)'a azalmaktadır. M_{kr} değerleri üzerindeki en büyük FDM_1 ve FDM_2 etki farkı zeminsiz, Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla yaklaşık (%2.2), (%2) ve (%1.7) olarak $L/R=0.5$ 'te ortaya çıkmaktadır. $k=1$ olan FDM durumları ile pür metal (SUS304 ve Ti6Al4V) durumlarıyla kıyaslandığında M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 ve FDM_2 etkileri L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. Örneğin, M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_2 etkisi zeminsiz durumda (%29) ile hemen hemen sabit kalırken Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla (%29)'dan (%23.8)'e ve (%27.2)'den (%19.8)'e azalmaktadır. M_{kr} değerleri üzerindeki en büyük FDM_1 ve FDM_2 etki farkı zeminsiz, Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla yaklaşık (%4.3), (%4) ve (%3.1) olarak $L/R=0.5$ 'te ortaya çıkmaktadır.

FDM_1 ve FDM_2 'den meydana gelen kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak

artmaktadır. Örneğin, SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki Winkler zemini etkisi L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak pür seramik, $k=1$ olan FDM ve pür metal için sırasıyla (%0.6)'dan (%14)'e, (%0.6)'dan (%16.8)'e ve (%0.8)'den (%20.4)'e artmaktadır. Aynı şekilde, M_{kr} değerlerinin üzerindeki Pasternak zemini etkisi L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak pür seramik, $k=1$ olan FDM ve pür metal için sırasıyla (%2.8)'den (%25)'e, (%3.3)'ten (%28.9)'a ve (%4.1)'den (%34.4)'e artmaktadır. Ti6Al4V/ ZrO₂ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklarındakinden daha büyük olmaktadır. İki kompozit silindirik kabuk arasındaki elastik zemin etkisi farklı L/R oranın artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, iki kompozit silindirik kabuk arasındaki Winkler zemini etkisi farklı L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak pür seramik, $k=1$ olan FDM ve pür metal için sırasıyla (%9), (%10.7) ve (%12.5) artmaktadır. İki kompozit silindirik kabuk arasındaki Pasternak zemini etkisi farklı L/R oranının 0.5'ten 3'e artışına bağlı olarak pür seramik, $k=1$ olan FDM ve pür metal için sırasıyla (%15.5), (%19.1) ve (%25.1) artmaktadır.



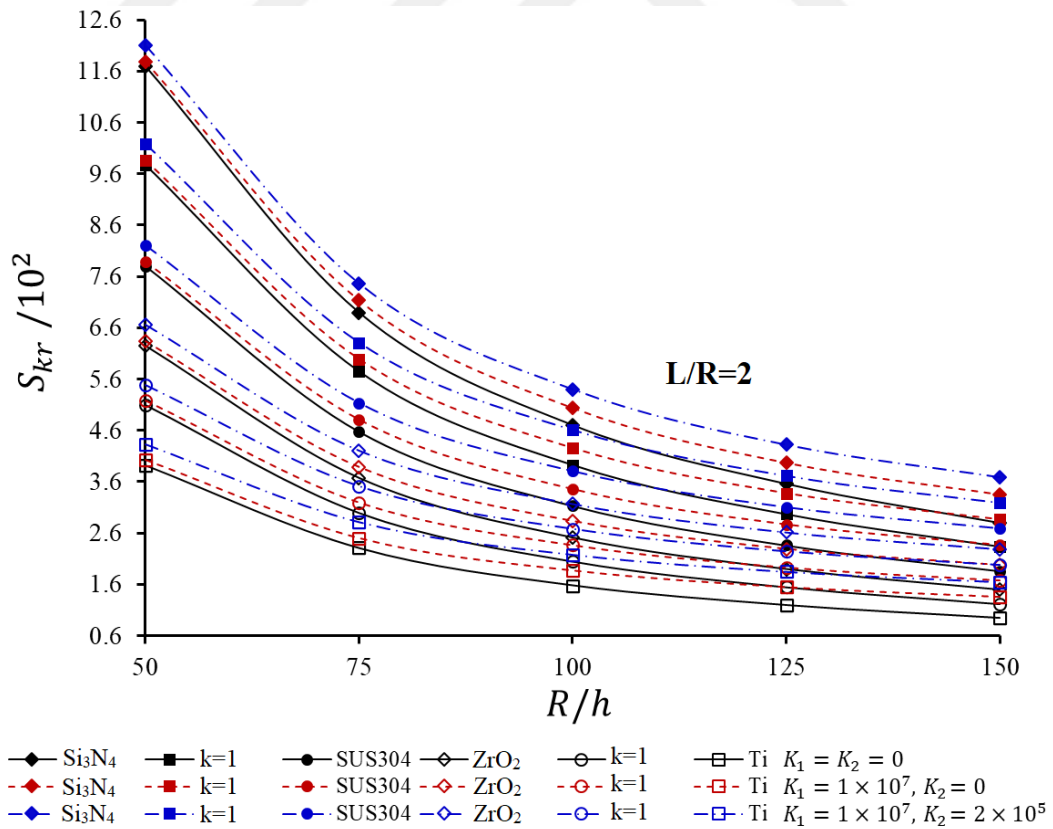
Şekil 4.11. Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM₁ ve FDM₂ kompozit silindirik kabukların kritik burulma momentinin L/R ye bağlı değişimi

Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM_1 ve FDM_2 'den meydana gelen kompozit silindirik kabuğun kritik burulma yükünün (S_{kr}) R/h oranının artışına bağlı değişimi Şekil 4.12'de $L/R=2$ değeri için sunulmaktadır. Şekil 4.12'den da görüleceği üzere tam metal (SUS304 ve Ti6Al4V) ve tam seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) ile $k=1$ olan FDM durumlarında R/h oranının artışına bağlı olarak S_{kr} değerlerinin azaldığı görülmektedir. Zeminsiz/zeminli SUS304/ Si_3N_4 kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerleri zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ ZrO_2 kompozit silindirik kabuklarındakinden daha büyük olmaktadır. Her iki silindirik kabuk arasındaki bu S_{kr} değer farkı R/h oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır.

$k=1$ olan FDM durumları ile pür seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) durumlarıyla kıyaslandığında S_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 ve FDM_2 etkileri R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. Örneğin, S_{kr} değerleri üzerindeki FDM_2 etkisi zeminsiz durumda (-%18.5) ile sabit kalırken Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla (-%18.3)'ten (-%14.9)'a ve (-%17.4)'ten (-%13.9)'a azalmaktadır. S_{kr} değerleri üzerindeki en büyük FDM_1 ve FDM_2 etki farkı zeminsiz, Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla yaklaşık (%2.1), (%1.9) ve (%1.5) olarak $R/h=50$ 'de ortaya çıkmaktadır. $k=1$ olan FDM durumları ile pür metal (SUS304 ve Ti6Al4V) durumlarıyla kıyaslandığında S_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 ve FDM_2 etkileri R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. Örneğin, S_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 etkisi zeminsiz durumda (%25) ile sabit kalırken Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla (%25)'ten (%21.1)'e ve (%24.1)'den (%18.9)'a azalmaktadır. S_{kr} değerleri üzerindeki en büyük FDM_1 ve FDM_2 etki farkı zeminsiz, Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla yaklaşık (%4.2), (%3.8) ve (%2.7) olarak $R/h=50$ 'de ortaya çıkmaktadır.

FDM_1 ve FDM_2 'den meydana gelen kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, Ti6Al4V/ ZrO_2 kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki

Winkler zemini etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak pür seramik, $k=1$ olan FDM ve pür metal için sırasıyla (%1.5)'ten (%32.2)'ye, (%1.8)'den (%38.1)'e ve (%2.3)'ten (%44.9)'a artmaktadır. Aynı şekilde, S_{kr} değerlerinin üzerindeki Pasternak zemini etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak pür seramik, $k=1$ olan FDM ve pür metal için sırasıyla (%6.5)'ten (%53.4)'e, (%8)'den (%62.2)'ye ve (%10.3)'ten (%75.4)'e artmaktadır. SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi Ti/FDM₂/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklarından daha küçük olmaktadır. İki kompozit silindirik kabuk arasındaki elastik zemin etkisi farkı R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, iki kompozit silindirik kabuk arasındaki Winkler zemini etkisi farkı R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak pür seramik, $k=1$ olan FDM ve pür metal için sırasıyla (%11.8), (%14.5) ve (%16.7) artmaktadır. İki kompozit silindirik kabuk arasındaki Pasternak zemini etkisi farkı R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak pür seramik, $k=1$ olan FDM ve pür metal için sırasıyla (%18.7), (%21.7) ve (%26) artmaktadır.



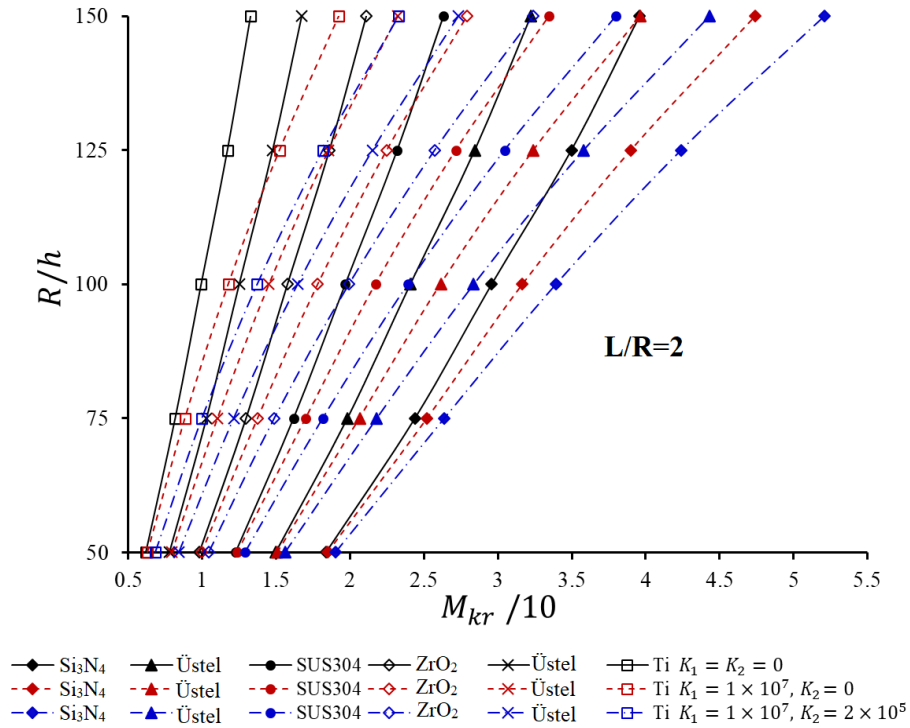
Şekil 4.12. Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM₁ ve FDM₂ silindirik kabukların kritik burulma yükünün R/h oranına bağlı değişimi

Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM_1 ve FDM_2 'den meydana gelen kompozit silindirik kabuğun kritik burulma momentinin (M_{kr}) R/h oranının artışına bağlı değişimi Şekil 4.13'de $L/R=2$ değeri için sunulmaktadır. Şekil 4.13'den de görüleceği üzere tam metal (SUS304 ve Ti6Al4V) ve tam seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) ile üstel değişimli FDM durumlarında R/h oranının artışına bağlı olarak M_{kr} değerlerinin arttığı görülmektedir. Zeminsiz/zeminli SUS304/ Si_3N_4 kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerleri zeminsiz/zeminli Ti6Al4V/ ZrO_2 kompozit silindirik kabuklarından daha büyük olmaktadır. Her iki silindirik kabuk arasındaki bu M_{kr} değer farkı R/h oranının artışına bağlı olarak artmaktadır.

Üstel değişimli FDM durumları ile pür seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) durumlarıyla kıyaslandığında M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 ve FDM_2 etkileri R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. Örneğin, M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 etkisi zeminsiz durumda (-%18.5) ile sabit kalırken Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla (-%18.4)'ten (-%16.3)'e ve (-%17.9)'dan (-%15)'e azalmaktadır. M_{kr} değerleri üzerindeki en büyük FDM_1 ve FDM_2 etki farkı zeminsiz, Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla yaklaşık (%2.2), (%2) ve (%1.5) olarak $R/h=50$ 'de ortaya çıkmaktadır. Üstel değişimli FDM durumları ile pür metal (SUS304 ve Ti6Al4V) durumlarıyla kıyaslandığında M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_1 ve FDM_2 etkileri R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır. Örneğin, M_{kr} değerleri üzerindeki FDM_2 etkisi zeminsiz durumda (%26) ile sabit kalırken Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla (%25.5)'ten (%20.7)'ye ve (%23.8)'den (%17.4)'e azalmaktadır. M_{kr} değerleri üzerindeki en büyük FDM_1 ve FDM_2 etki farkı zeminsiz, Winkler zemini ve Pasternak zemini durumlarında sırasıyla yaklaşık (%3.9), (%3.5) ve (%2.7) olarak $R/h=50$ 'de ortaya çıkmaktadır.

FDM_1 ve FDM_2 'den meydana gelen kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak

artmaktadır. Örneğin, SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki Winkler zemini etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak pür seramik, üstel değişimli FDM ve pür metal için sırasıyla (%0.8)'den (%19.7)'ye, (%0.9)'dan (%23.1)'e ve (%1.1)'den (%27.1)'e artmaktadır. Aynı şekilde, M_{kr} değerlerinin üzerindeki Pasternak zemini etkisi R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak pür seramik, üstel değişimli FDM ve pür metal için sırasıyla (%3.5)'ten (%31.6)'ya, (%4.3)'ten (%37.5)'e ve (%5.2)'den (%44.3)'e artmaktadır. Ti6Al4V/ ZrO₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklarınkinden daha büyük olmaktadır. İki kompozit silindirik kabuk arasındaki elastik zemin etkisi farkı R/h oranın artışına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin, iki kompozit silindirik kabuk arasındaki Winkler zemini etkisi farkı R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak pür seramik, üstel değişimli FDM ve pür metal için sırasıyla (%12), (%14.8) ve (%16.8) artmaktadır. İki kompozit silindirik kabuk arasındaki Pasternak zemini etkisi farkı R/h oranının 50'den 150'ye artışına bağlı olarak pür seramik, üstel değişimli FDM ve pür metal için sırasıyla (%18.8), (%22) ve (%26.2) artmaktadır.



Şekil 4.13. Zeminsiz/zeminli durumlarda FDM₁ ve FDM₂ silindirik kabukların kritik burulma momentinin R/h oranının artışına bağlı değişimi

5. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bu çalışmada, iki parametrelili elastik zemin üzerindeki fonksiyonel olarak derecelendirilmiş (FDM) malzemelerden oluşan silindirik kabukların burulma yükü etkisi altında stabilite problemini çözümü ele alınmaktadır. Önce, Donnell tipi kabuk teorisi kullanılarak FDM'lerden oluşan silindirik kabukların doğrusal zemin bağıntıları oluşturulmaktadır. Bu bağıntılar ve iki parametrelili elastik zeminin matematiksel ifadesi kullanılarak burulma yüküne maruz FDM'lerden oluşan silindirik kabukların temel kısmi türevli diferansiyel denklemleri türetilmektedir. Somut sınır koşulları için temel denklemlere Galerkin yöntemi uygulanarak, iki parametrelili elastik zemin üzerindeki FDM'lerden oluşan silindirik kabukların kritik burulma yükü için kapalı çözüm elde edilmektedir. Ayrıca, iki parametrelili elastik zemin üzerindeki FDM'lerden oluşan silindirik kabukların kritik momenti için de kapalı çözüm elde edilmektedir

Sayısal analizler aşağıdaki sonuçların ortaya çıkmasını sağlamıştır:

- a.) FDM₁ ve FDM₂ silindirik kabukların kritik burulma ve kritik moment değerleri zemin katsayılarının artışına bağlı olarak artmakta iken, n dalga sayıları hemen hemen sabit kalırken q değerleri 0.3 ile 0.41 arasındaki değişmekte olup genel olarak artış göstermektedir.
- b.) SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuğun kritik burulma ve moment değerleri Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabukunkilerden daha büyük olurken kompozit kabuklar arasındaki S_{kr} değeri farkı zemin katsayılarının artışına bağlı olarak artmaktadır.
- c.) FDM₁ ve FDM₂ silindirik kabukların en büyük S_{kr} ve M_{kr} değerleri pür seramik için ve en küçük değerleri ise pür metal için elde edilmektedir.
- d.) Pür metal (SUS304) ve pür seramik (Si₃N₄) ile tüm hacim kesir oranları için FDM₁ kabukların S_{kr} değerleri, n dalga sayısı ve q parametresi L/R oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır.
- e.) Tüm hacim kesir oranları için FDM₁ kabuklar kendi aralarında kıyaslandığında en büyük S_{kr} değerleri $k=0.25$ 'de en küçük S_{kr} değerleri ise $k=1$ 'de ortaya çıkmaktadır.

- f.) Tüm hacim kesir oranları için FDM_1 durumu pür seramik durumuyla karşılaştırıldığında, tüm durumlarda FDM_1 etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır.
- g.) SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerleri üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmakta olup en büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise pür seramikte elde edilmektedir.
- h.) Pür metal (SUS304), pür seramik (Si₃N₄) ve tüm hacim kesir oranları için FDM_1 kabuklarda, R/h oranının artışına bağlı olarak S_{kr} değerleri azalırken, dalga sayısı n artar, fakat $R/h < 125$ aralığında q parametresi azalmaktadır.
- i.) En büyük S_{kr} değerleri $R/h \geq 0.75$ olduğunda $k=0.25$ için elde edilirken, $R/h = 50$ olduğunda en büyük S_{kr} değerleri pür seramik için ortaya çıkmakta iken, en küçük S_{kr} değerleri ise pür metal için elde edilmektedir.
- j.) FDM_1 durumu pür seramik ve pür metalle durumuyla karşılaştırıldığında, tüm hacim kesir oranları için FDM_1 etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda $k=0.25$ hariç hemen hemen sabit kalırken, $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır.
- k.) Zemin etkisinin varlığında R/h arttığında FDM_1 etkisi $k=0.25$ hariç azalırken, $k=0.25$ için önce artıp sonra azalmaktadır.
- l.) SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmakta olup en büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h > 50$ aralığında $k=0.25$ için elde edilmektedir.
- m.) L/R oranının artışına bağlı olarak pür metal (Ti6Al4V) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM_2 durumlarında S_{kr} değerleri azalmakta iken n dalga sayısı $L/R > 2$ aralığında sabit kalır ve $L/R \leq 2$ aralığında azalmaktadır.
- n.) Zemin etkisi dikkate alınmadığında, Ti6Al4V/ZrO₂ kompozit silindirik kabuklar için q parametresi L/R oranının artışına bağlı olarak azalırken zeminin varlığında $L/R > 2$ aralığında sabit kalmaktadır.

- o.) FDM₂ kabuklarla pür seramik kabuklar karşılaştırıldığında, tüm hacim kesir oranları için FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır.
- p.) Tüm hacim kesir oranları için FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en büyük FDM₂ etkileri $k=1$ için en küçük etkileri ise $k=0.25$ için elde edilmektedir.
- q.) FDM₂ durumu pür metal durumuyla karşılaştırıldığında, tüm durumlarda FDM₂ etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda hemen hemen sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır.
- r.) FDM₂ durumları kendi aralarında mukayese edildiğinde en küçük FDM₂ etkileri $k=1$ için en büyük FDM₂ etkileri ise $k=0.25$ için elde edilmektedir.
- s.) R/h oranının artışına bağlı olarak pür metal (Ti6Al4V) ve pür seramik (ZrO₂) ile tüm FDM₂ kabuklarda S_{kr} değerleri azalmakta iken dalga sayısı n ve q parametresi artmakta veya sabit kalmaktadır.
- t.) $R/h \geq 0.75$ olduğunda en büyük S_{kr} değerleri $k=0.25$ için elde edilirken $R/h=50$ olduğunda en büyük S_{kr} değerleri pür seramik için en küçük S_{kr} değerleri ise pür metal için elde edilmektedir.
- u.) R/h oranının artışına bağlı olarak SUS304 ve Si₃N₄ ile tüm FDM₁ durumlarında S_{kr} değerleri azalmakta iken dalga sayısı n artarken q parametresi ise düzensiz değişmektedir.
- v.) SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi R/h oranının artışına bağlı olarak artmakta olup en büyük zemin etkileri pür metalde en küçük zemin etkileri ise $R/h > 50$ aralığında $k=2$ için elde edilmektedir.
- w.) Tüm hacim kesir oranları için FDM₂ kabuk seramik kabukla kıyaslandığında en büyük FDM₂ etkileri $k=3$ için en küçük FDM₂ etkileri ise $k=1$ için elde edilmekte olup, pür metalle mukayesede bu etkilerin tersi olur.
- x.) SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabuklar için en büyük M_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük M_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir.
- y.) FDM₁ durumları kendi aralarında kıyaslandığında ise en büyük M_{kr} değerleri $k=0.25$ için en küçük M_{kr} değerleri ise $k=1$ için ortaya çıkmaktadır.

- z.) R/h oranının artışına bağlı olarak SUS304 ve Si_3N_4 ile tüm FDM₁ durumlarında M_{kr} değerleri artmakta iken dalga sayısı n artarken $R/h < 125$ aralığında q parametresi azalmaktadır.
- aa.) $R/h \geq 0.75$ olduğunda en büyük M_{kr} değerleri $k=0.25$ için elde edilirken $R/h=50$ olduğunda en büyük M_{kr} değerleri pür seramikte, en küçük M_{kr} değerleri ise pür metal kabukta elde edilmektedir.
- bb.) L/R oranının artışına bağlı olarak pür metal (Ti6Al4V) ve pür seramik (ZrO_2) kabukla ile tüm hacir kesir oranı için FDM₂ kabuklar için M_{kr} değerleri azalmakta iken dalga sayısı n ve q parametresi ise azalmakta veya sabit kalmaktadır.
- cc.) Ti6Al4V/ ZrO_2 kompozit silindirik kabuklar için en büyük M_{kr} değerleri pür seramikte ve en küçük M_{kr} değerleri ise pür metalde elde edilmektedir.
- dd.) Tüm hacim fraksiyonları için FDM₂ kabuklar kendi aralarında kıyaslandığında ise en büyük M_{kr} değerleri $k=1$ için en küçük M_{kr} değerleri ise $k=3$ için ortaya çıkmaktadır.
- ee.) Üstel değişimli FDM kabuklar pür seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) kabuklarla kıyaslandığında S_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ ve FDM₂ etkileri L/R oranının artışına bağlı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır.
- ff.) Ti6Al4V/ ZrO_2 kompozit silindirik kabukların S_{kr} değerlerinin üzerindeki Winkler ve Pasternak zemini etkileri L/R oranının artışına bağlı olarak pür seramik kabuk, üstel değişimli FDM₂ kabuk ve pür metal kabuk için artmaktadır.
- gg.) Zeminsiz veya zeminli SUS304/ Si_3N_4 kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerleri Ti6Al4V/ ZrO_2 kompozit silindirik kabuklarından daha büyük olmaktadır ve her iki silindirik kabuk arasındaki M_{kr} değer farkı L/R oranının artışına bağlı olarak azalmaktadır.
- hh.) FDM₁ ve FDM₂ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki elastik zemin etkisi L/R oranının artışına bağlı olarak artmaktadır.
- ii.) Hacim kesir oranı üstel olarak değişen FDM kabukla pür seramik (Si_3N_4 ve ZrO_2) kabuklar kıyaslandığında M_{kr} değerleri üzerindeki FDM₁ ve FDM₂

etkileri R/h oranının artışına bağı olarak zeminsiz durumda yaklaşık olarak sabit kalırken zeminli durumlarda ise azalmaktadır.

- jj.) SUS304/Si₃N₄ kompozit silindirik kabukların M_{kr} değerlerinin üzerindeki Winkler ve Pasternak zeminlerinin etkisi R/h oranının artışına bağı olarak pür seramik, üstel değışimli FDM₁ ve pür metal için artmaktadır.

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



KAYNAKLAR

- Adıgüzel, Ş., 2011. Burulma Yüğü Etkisi Altındaki Fonksiyonel Tabaka İçeren Üç Tabakalı Silindirik Kabuğun Burkulmasına Winkler Zemin Etkisinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 1-129.
- 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 Mechanics A-Solids, 28, 551–559.
- Babaei, H., Kiani, Y., Eslami, M. R., 2019. Large Amplitude Free Vibration Analysis of Shear Deformable FGM Shallow Arches on Nonlinear Elastic Foundation. Thin-Walled Structures, 144, 106237.
- Bagherizadeh, E., Kiani, Y., Eslami, M.R. 2011. Mechanical Buckling of Functionally Graded Material Cylindrical Shells Surrounded by Pasternak Elastic Foundation. Composite Structures, 93, 3063–3071.
- Bajenov, V.A., 1975, The bending of the cylindrical shells in an elastic medium. Kiev, Visha Shkola. (in Russian).
- Batra, R.C., 2006. Torsion of a Functionally Graded Cylinder. American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal, 44, 1363–1365.
- Cho, S., Kim, J., Lee, S.-B., Choi, M., Kim, D.-H., Jo, I., Kwon, H., Kim, Y. 2020. Fabrication of Functionally Graded Hydroxyapatite and Structurally Graded Porous Hydroxyapatite by Using Multi-Walled Carbon Nanotubes. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 139, 106138.
- Couto, C., Vila Real, P. 2019. Numerical Investigation on the Influence of Imperfections in the Lateral-Torsional Buckling of Beams with Slender I-Shaped Welded Sections. Thin-Walled Structures, 145, 106429.
- Donnell, L.H. 1933. Stability of Thin-Walled Tubes under Torsion. Naca Technical Report, 479.
- Duc, N., Thiem, H. 2017. Dynamic Analysis of Imperfect FGM Circular Cylindrical Shells Reinforced by FGM Stiffener System Using Third Order Shear Deformation Theory in Term of Displacement Components. Latin American Journal of Solids and Structures, 14, 2534-2570.
- Dung, D., Hoa, L. 2013. Research on Nonlinear Torsional Buckling and Post-Buckling of Eccentrically Stiffened Functionally Graded thin Circular Cylindrical Shells. Composites Part B: Engineering, 51, 300–309.

- Dung, D., Hoa, L. 2015a. A Semi-Analytical Approach to Analyze the Nonlinear Dynamic Torsional Buckling of Stiffened FGM Circular Cylindrical Shells Surrounded by Elastic Medium. *Applied Mathematical Modelling*, 39, 6951-6967.
- Dung, D., Hoa, L. 2015b. Nonlinear Torsional Buckling and Postbuckling of Eccentrically Stiffened FGM Cylindrical Shells in Thermal Environment. *Composites Part B: Engineering*, 69, 378-388.
- Dung, D., Minh Vuong, P. 2016. Nonlinear Analysis on Dynamic Buckling of Eccentrically Stiffened Functionally Graded Material Toroidal Shell Segment Surrounded by Elastic Foundations in Thermal Environment and Under Time-Dependent Torsional Loads. *Applied Mathematics and Mechanics*, 37, 835-860.
- Dung, D., Nguyen Thi, N. 2016. Buckling and Postbuckling Nonlinear Analysis of Imperfect FGM Plates Reinforced by FGM Stiffeners with Temperature-Dependent Properties Based on TSDT. *Acta Mechanica*, 227, 2377-2401.
- Ekstrom, R.E. 1963. Buckling of Cylindrical Shells Under Combined Torsion and Hydrostatic Pressure. *Experimental Mechanics*, 3, 192–197.
- 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
- Grujicic, M., Zhang, Y. 1998. Determination of effective elastic properties of functionally graded materials using Voronoi cell finite element method. *Materials Science and Engineering: A*, 251, 64-76.
- Harding, J., Louca, L.A. 1994. Torsional Buckling of Ring-Stiffeners in Cylindrical Shells Subjected to External Pressure. *Proceedings of The Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 104, 219-230.
- Huang, H.W., Han, Q., 2010. Nonlinear Buckling of Torsion–Loaded Functionally Graded Cylindrical Shells in Thermal Environment. *European Journal Mechanics A-Solids*, 29, 42–48.
- Huang, H., Chen, B., Han, Q. 2014. Investigation on Buckling Behaviors of Elastoplastic Functionally Graded Cylindrical Shells Subjected to Torsional Loads. *Composite Structures*, 118, 234–240.
- Huang, H., Zhang, Y., Han, Q. 2016. Inelastic Buckling of FGM Cylindrical Shells Subjected to Combined Axial and Torsional Loads. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 17, 1771010.
- Jackson, T., Liu, H., Patrikalakis, N., Sachs, E.M., Cima, M. 1999. Modeling and Designing Functionally Graded Material Components for Fabrication with Local Composition Control. *Materials & Design*, 20, 63-75.

- Kawasaki, A., Watanabe, R. 1997. Concept and P/M Fabrication of Functionally Gradient Materials. *Ceramics International*, 23, 73-83.
- 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.
- Koizumi, M., 1993. The Concept of FGM *Ceramic Transactions. Ceramic Transactions: Functionally Gradient Materials*, 34, 3–10.
- Lambros, J., Santare, M., Li, H., Sapna, G. 1999. A Novel Technique for The Fabrication of Laboratory Scale Model Functionally Graded Materials. *Experimental Mechanics*, 39, 184-190.
- Lannutti, J. 1994. Functionally Graded Materials: Properties, Potential and Design Guidelines. *Composites Engineering* 4, 81-94.
- Lee, W., Stinton, D., Berndt, C., Erdogan, F., Lee, Y.D., Mutasim, Z. 2005. The Concept of Functionally Graded Materials for Advanced Thermal Barrier Coating Applications. *Journal of the American Ceramic Society*, 79, 3003-3012.
- Lee, N., Weber, R., Kennedy, J., Van Zak, J., Smith, M., Duro-Royo, J., Oxman, N. 2020. Sequential Multimaterial Additive Manufacturing of Functionally Graded Biopolymer Composites. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 7, 205-215.
- Leushake, U., Krell, T., Schulz, U. 1997. Graded Thermal Barrier Coating Systems for Gas Turbine Applications. *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik*, 28, 391-394.
- Li, Y., Feng, Z., Hao, L., Huang, L., Xin, C., Wang, Y., Bilotti, E., Essa, K., Zhang, H., Li, Z., Yan, F., Peijs, T. 2020. Advanced Materials Technologies A Review on Functionally Graded Materials and Structures via Additive Manufacturing: from Multi-scale Design to Versatile Functional Properties. *Advanced Materials Technologies*, 5, 1900981.
- Madan, R., Bhowmick, S. 2020. A Review on Application of FGM Fabricated Using Solid-State Processes. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 6, 608-619.
- Mao, R.J., Lu, G., 2002. A study of elastic-plastic buckling of cylindrical shells under torsion. *Thin-Walled Structures*, 40. 1051-1071.

- Mehralian, F., Tadi Beni, Y. 2016. Size-Dependent Torsional Buckling Analysis of Functionally Graded Cylindrical Shell. *Composites Part B: Engineering*, 94, 11-25.
- Minh Vuong, P., Duc, N. 2019. Nonlinear Buckling and Postbuckling of a FGM Toroidal Shell Segment Under a Torsional Load in a Thermal Environment Within Reddy's Third-Order Shear Deformation Shell Theory. *Mechanics of Composite Materials*, 55, 1-16.
- Miteva, A., Bouzekova-Penkova, A. 2021. Module for Wireless Communication in Aerospace Vehicles. *Aerospace Research in Bulgaria* 33, 195-209.
- Morlowe, D.E., Suchinsky, G.F., 1974. Torsional buckling of composite cylindrical shells. National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center Hampton, Virginia.
- Najafov, M., Sofiyev, A.H., Kuruoglu, N. 2013. Torsional Vibration and Stability of Functionally Graded Orthotropic Cylindrical Shells on Elastic Foundations. *Meccanica*, 48, 829-840.
- Nam, V., Nguyen-Thoi, T., Hoa, L. 2019. Buckling and Postbuckling of Porous Cylindrical Shells with Functionally Graded Composite Coating under Torsion in Thermal Environment. *Thin-Walled Structures*, 144, 106253.
- Nam, V., Nguyen-Thoi, T., Hoa, L. 2019. Buckling and Postbuckling of Porous Cylindrical Shells with Functionally Graded Composite Coating under Torsion in Thermal Environment. *Thin-Walled Structures*, 144, 106253.
- Nam, V., Phuong, N. 2019. Nonlinear buckling and postbuckling of sandwich FGM cylindrical shells reinforced by spiral stiffeners under torsion loads in thermal environment. *Acta Mechanica*, 230, 3183-3204.
- Nam, V., Phuong, N. 2019. Nonlinear buckling and postbuckling of sandwich FGM cylindrical shells reinforced by spiral stiffeners under torsion loads in thermal environment. *Acta Mechanica*, 230, 3183-3204.
- Ninh, D., Bich, D., Bui, H. 2015a. Torsional Buckling and Post-Buckling Behavior of Eccentrically Stiffened Functionally Graded Toroidal Shell Segments Surrounded by An Elastic Medium. *Acta Mechanica*, 226, 3501-3519.
- Ninh, D.G., Bich, D.H., Bui, H.K. 2015b. Torsional Buckling and Post-Buckling Behavior of Eccentrically Stiffened Functionally Graded Toroidal Shell Segments Surrounded by An Elastic Medium. *Acta Mechanica*, 226, 3501-3519.
- Ninh, D. and Bich, D. 2016. Nonlinear Torsional Buckling and Post-Buckling of Eccentrically Stiffened Ceramic Functionally Graded Material Metal Layer Cylindrical Shell Surrounded by Elastic Foundation Subjected to Thermo-Mechanical Load. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 18, 712-738.

- Nam, V., Phuong, N., Minh, K., Hiều, P. 2018. Nonlinear Thermo-Mechanical Buckling and Post-Buckling of Multilayer FGM Cylindrical Shell Reinforced by Spiral Stiffeners Surrounded by Elastic Foundation Subjected to Torsional Loads. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 72, 393-406.
- Ogibalov, P.M., Koltunov, M.A., 1969. *Plates and Shells*, Moscow State University, (in Russian).
- Park, C., Lee, B., Walker, J., Choi, W.Y. 2000. A New Processing Method for the Fabrication of Cylindrical Objects with Radially Varying Properties. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 39, 79-83.
- Pelz, J., Ku, N., Shoulders, W., Meyers, M., Vargas-Gonzalez, L. 2020. Multi-Material Additive Manufacturing of Functionally Graded Carbide Ceramics via Active, in-line Mixing. *Additive Manufacturing* 37, 101647.
- Pezeshky, P., Sahraei, A., Mohareb, M. 2018. Distortional Lateral Torsional Buckling Analysis of Beams with Overhangs. *Journal of Structural Engineering*, 145, 04018266.
- Rege, K., Pavlou, D. 2019. Stress Intensity Factors for Circumferential Through-Wall Cracks in Thin-Walled Cylindrical Shells Subjected to Tension and Torsion. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 42, 1062-1074.
- Ruigang, W., Wei, P., Jian, C., Mengning, J., Fang, M. 2002. Fabrication and characterization of machinable Si₃N₄/h-BN functionally graded materials. *Materials Research Bulletin*, 37, 1269–1277.
- Sahmani, S., M. Fattahi, A., Ahmed, N. 2019. Nonlinear Torsional Buckling and Postbuckling Analysis of Cylindrical Silicon Nanoshells Incorporating Surface Free Energy Effects. *Microsystem Technologies*, 25, 3533-3546.
- Saleh, B., Jiang, J., Fathi, R., Al-hababi, T., Xu, Q., Wang, L., Song, D., Ma, A. 2020. 30 Years of Functionally Graded Materials: an Overview of Manufacturing Methods, Applications and Future Challenges. *Composites Part B Engineering*, 201, 108376.
- Shakouri, M., Sharghi, H., Kouchakzadeh, M. 2016. Torsional buckling of generally laminated conical shell. *Meccanica*, 52, 1051-1061.
- Shen, H.S., 2009a. *Functionally Graded Materials, Nonlinear Analysis of Plates and Shells*. CRC Press, Florida.
- Shen, H.S. 2009b. Torsional Buckling and Postbuckling of FGM Cylindrical Shells in Thermal Environments. *International Journal of Non-linear Mechanics*, 44, 644-657.

- Shen, H.S. 2009c. Postbuckling of Shear Deformable FGM Cylindrical Shells Surrounded by an Elastic Medium. *International Journal of Mechanical Sciences*, 51, 372–383.
- Shen, H.S., Yang, J., Kitipornchai, S. 2010. Postbuckling of Internal Pressure Loaded FGM Cylindrical Shells Surrounded by an Elastic Medium. *European Journal Mechanics A-Solids*, 29, 448–460.
- Shen, H.-S. 2014. Torsional Postbuckling of Nanotube-Reinforced Composite Cylindrical Shells in Thermal Environments. *Composite Structures*, 116, 477–488.
- 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, 117–134.
- Sofiyev, A.H. 2003. Torsional buckling of cross-ply laminated orthotropic composite cylindrical shells subject to dynamic loading. *European Journal of Mechanics- A/Solids*, 22, 943-951.
- 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 an International Journal*, 19, 231–236.
- Sofiyev, A.H. 2007. Vibration and Stability of Composite Cylindrical Shells Containing a FG Layer Subjected to Various Loads. *Structural Engineering and Mechanics*, 27, 365-391.
- Sofiyev, A.H. 2010. Buckling Analysis of FGM Circular Shells Under Combined Loads and Resting on the Pasternak Type Elastic Foundation. *Mechanics Research Communications*, 37, 539–544.
- Sofiyev, A.H., 2019. Review of Research on the Vibration and Buckling of the FGM Conical Shells. *Composite Structures*, 211, 301-317.
- Sofiyev, A.H., Ay, Z. and 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., Kuruoglu, N. 2013. Torsional vibration and buckling of the cylindrical shell with functionally graded coatings surrounded by an elastic medium. *Composites Part B: Engineering*, 45, 1133-1142.
- Sofiyev A.H., Deniz A., Avcar M., Ozyigit P., Omurtag M.H. 2013. Effects of the Non-Homogeneity and Elastic Medium on the Critical Torsional Load of the Orthotropic Cylindrical Shell. *Acta Physica Polonica A*, 123, 728-730.

- Soltani, M., Asgarian, B. 2020. Lateral-Torsional Stability Analysis of a Simply Supported Axially Functionally Graded Beam with a Tapered I-Section. *Mechanics of Composite Materials*, 56, 39-54.
- Suethao, S., Shah, D., Smitthipong, W. 2020. Recent Progress in Processing Functionally Graded Polymer Foams. *Materials*, 13, 4060.
- Sun, J., Xu, X. and Lim, C.W. 2013. Torsional Buckling of Functionally Graded Cylindrical Shells with Temperature-Dependent Properties. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 14, 1350048.
- Sun, J., Ni, Y., Hanyu, G., Zhu, S., Tong, Z., Zhou, Z. 2019. Torsional Buckling of Functionally Graded Multilayer Graphene Nanoplatelet-Reinforced Cylindrical Shells. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 20, 2050005.
- Sun, Z., Chueh, Y.-H., Li, L. 2020. Multiphase Mesoscopic Simulation of Multiple and Functionally Gradient Materials Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing Processes. *Additive Manufacturing*, 35, 101448.
- 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.
- Tan, D. 2000. Torsional Buckling Analysis of Thin and Thick Shells of Revolution. *International Journal of Solids and Structures*, 37, 3055-3078.
- Thai, H.T., Kim, S.E., 2015. A review of Theories for the Modeling and Analysis of Functionally Graded Plates and Shells. *Composite Structures*, 128, 70–86.
- Thắng, P., Nguyen-Thoi, T. 2016. Effect of stiffeners on nonlinear buckling of cylindrical shells with functionally graded coatings under torsional load. *Composite Structures*, 153, 654-661.
- Thắng, P., Duc, N. 2017. Thermomechanical Buckling and Post-Buckling of Cylindrical Shell with Functionally Graded Coatings and Reinforced by Stringers. *Aerospace Science and Technology*, 66, 392-401.
- Torres, Y., Trueba, P., Pavon Palacio, J., Chicardi, E., Kamm, P.H., García-Moreno, F., Rodriguez-Ortiz, J.A. 2016. Design, Processing and Characterization of Titanium with Radial Graded Porosity for Bone Implants. *Materials & Design*, 110, 179-187.
- Touloukian, Y.S., 1967. Thermophysical properties of high temperature solid materials. New York: Macmillan, 1, 770-1021.

- Vasavi, B., Raghavendra, D.G., Ojha, S., Acharya, s.K., Peddakondigalla, V.B., Mallampati, S., gara, D. 2021. State of the Art in Functionally Graded Materials. *Composite Structures*, 262, 113596.
- Vlasov, A.N., Volkov-Bogorodsky, D.B. 2020. Application of the Asymptotic Homogenization in a Parametric Space to the Modeling of Structurally Heterogeneous Materials. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 390, 113596.
- 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.
- Volmir, A. S., 1967. The Stability of Deformable Systems, Nauka, Moscow, (in Russian).
- Walker, M., Reiss, T. and Adali, S. 1997. Multiobjective Design of Laminated Cylindrical Shells for Maximum Torsional and Axial Buckling Loads. *Computers & Structures*, 62, 237-242.
- Wan, Y.P., Gupta, V., Deng, Q., Sampath, S., Prasad, V., Williamson, R., Fincke, J. 2001. Modeling and Visualization of Plasma Spraying of Functionally Graded Materials and Its Application to the Optimization of Spray Conditions. *Journal of Thermal Spray Technology*, 10, 382-389.
- Wang, D.-Y., Ma, H.-W. and Yang, G.-T. 1992. Studies on the torsional buckling of elastic cylindrical shells. *Applied Mathematics and Mechanics*, 13, 211-215.
- Watanabe, R., Nishida, T., Hirai, T. 2003. Present Status of Research on Design and Processing of Functionally Graded Materials. *Metals and Materials International*, 9, 513-519.
- Xu, X., Ma, J., Lim, C., Zhang, G. 2010. Dynamic Torsional Buckling of Cylindrical Shells. *Computers & Structures*, 88, 322-330.
- Zhang, L. and Gengshu, T. 2004. Flexural–torsional buckling of thin-walled beam members based on shell buckling theory. *Thin-Walled Structures*, 42, 1665-1687.
- Zoltan, K., Bela, V. 2012. Processing of Functionally Graded Aluminium Alloys. *Metalurgia International*, 17, 22-26.
- Zuiker, J., Dvorak, G. 1994. The Effective Properties of Functionally Graded Composites-I. Extension of The Mori-Tanaka Method to Linearly Varying Fields. *Composites Engineering*, 4, 19-35.