



**T.C.
AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜZGÜN OLMAYAN KALINLIKTAKİ FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ DİSKİN TERMAL YÜK ALTINDAKİ
GERİLME ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AYŞEGÜL ÖZGÜR

TEMMUZ

**DÜZGÜN OLMAYAN KALINLIKTAKİ FONKSİYONEL
DERECELENDİRİLMİŞ DİSKİN TERMAL YÜK ALTINDAKİ GERİLME
ANALİZİ**

Ayşegül ÖZGÜR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Danışman
Prof. Dr. İbrahim KELEŞ**

**AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2022

ETİK BEYAN

Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ayşegül ÖZGÜR

25/07/2022

DÜZGÜN OLMAYAN KALINLIKTAKİ FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ DİSKİN TERMAL YÜK ALTINDAKİ GERİLME ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Ayşegül ÖZGÜR

AMASYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEMmuz 2022

ÖZET

Bu çalışmada, doğrusal artan sıcaklık dağılımına maruz kalan fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden (FDM) yapılmış içi boş disklerin elastik gerilme çözümlerinde sayısal bir yaklaşım tanıtılmıştır. FDM diskinin elastisite modülü ve termal genleşme katsayısının farklı şekillerde radyal yönde değiştiği varsayılır ve ayrıca Poisson oranının sabit olduğu varsayılır. Farklı malzeme özellikleri ve sınır koşulları altında cismin davranışını yöneten diferansiyel denklemin değişken katsayılı bir denklem olmasına neden olur. Bazı basit dereceli malzemeler ve sınır koşulları dışında, bu tür denklemlerin analitik bir çözümünü üretmek pek mümkün değildir. Bu durumda problemlerin çözümü ancak sayısal yaklaşımlarla bulunabilir. Problemi çözmek için Tamamlayıcı Fonksiyonlar Metodu (TFM) kullanılmıştır. Yazılan eserlerden farklı malzeme modelleri kullanılmış ve bunlara karşılık gelen radyal, teğet ve eşdeğer gerilmeler ve radyal yer değiştirmeler hesaplanmıştır. Diskler için basit, etkili ve iyi yapılandırılmış çözüm adımları kolayca uygulanabilir.

Sayfa Adedi : 43
Anahtar kelimeler : Fonksiyonel Dereceli Malzemeler, Tamamlayıcı Fonksiyonlar
Metodu, İçi Boş Disk, Termal Gerilme Analizi
Danışman : Prof.Dr. İbrahim KELEŞ

STRESS ANALYSIS OF FUNCTIONALLY GRADED DISC
UNDER THERMAL LOAD

(M. Sc. Thesis)

AYŞEGÜL ÖZGÜR

AMASYA UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2022

ABSTRACT

In this study, a numerical approach to elastic stress solutions of hollow discs made of functionally graded materials (FGM) subjected to linear increasing temperature distribution is introduced. It is assumed that the modulus of elasticity and coefficient of thermal expansion of the FGM disk vary in the radial direction in different ways, and also the Poisson ratio is assumed to be constant. It causes the differential equation governing the behavior of the body under different material properties and boundary conditions to be an equation with variable coefficients. Except for some simple-order materials and boundary conditions, it is unlikely to produce an analytical solution of such equations. In this case, the solution of the problems can only be found by numerical approaches. Complementary Functions Method (TFM) was used to solve the problem. Different material models from the written works were used and the corresponding radial, tangential and equivalent stresses and radial displacements were calculated. Simple, effective and well-structured solution steps for disks can be easily implemented.

Number of pages : 43
Key words : Functionally Graded Materials, Complementary Functions
Method, Hollow Disc, Thermal Stress Analysis
Supervisor : Prof. Dr. İbrahim KELEŞ

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimimde ve akademik hayatımda bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen her alanda destek ve yardımlarını gördüğüm değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. İbrahim KELEŞ'e, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere gelmemde benden hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olan sevgili annem Nimet ÖZGÜR ve sevgili babam Ünal ÖZGÜR'e, her zaman bana moral motivasyon vererek destek sağlayan değerli teyzem Oya GENERERKAN'a ve ailemin tüm fertlerine sonsuz şükranlarımı sunarım.

Bu zorlu süreçte tecrübelerini, desteklerini ve yardımlarını esirgemeyen yoluma ışık tutan işverenlerim, Sayın Musa SÜLEYMANOĞLU, Sayın Adem YILMAZ, değerli mesai arkadaşlarım ve DOMAK POMPA MAK.SAN.A.Ş.'ye saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak iş hayatımda ve yüksek lisans eğitimimde bana destek olan, fedakarlık göstererek ablalığımı hiç esirgemeyen Sayın Gülcan AK KESİM'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
1.GİRİŞ.....	1
2.ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	3
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1. Malzeme Seçimi.....	9
3.1.1. Fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM).....	9
3.1.2. FDM'lerin kullanım alanları.....	10
3.1.2.1. Uzay ve hava taşımacılığı sektörü.....	10
3.1.2.2. Endsütriyel malzemeler.....	10
3.1.2.3. Günlük yaşamda kullanılan malzemeler.....	10
3.1.2.4. Optoelektronik.....	11
3.1.2.5. Biyomalzeme.....	11
3.1.2.6. Enerji, elektrik ve elektronik alanda kullanımı.....	11
3.1.3. FDM'lerin Üretim Yöntemleri.....	11
3.1.4. FDM'lerin Avantajları ve Dezavantajları.....	12
3.1.4.1. FDM'lerin avantajları.....	12
3.1.4.2. FDM'lerin dezavantajları.....	12
3.1.5. Seçilen Gradyan ve Malzeme Özellikleri.....	13

	Sayfa
3.1.5.1. Kuvvet yasası malzeme gradyanı.....	14
3.1.5.2. Üstel malzeme gradyanı.....	14
3.1.5.3. Trigonometrik malzeme gradyanı.....	15
3.1.5.4. Polinomial malzeme gradyanı.....	16
3.2 Yöntem.....	17
3.2.1. Diskin Termal Elastik Çözümünün Formülasyonu.....	17
3.2.2. Deplasman ve Gerilmelerin TFM ile Sayısal Çözümü.....	19
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	21
4.1. Önerilen Çözüm Yönteminin Doğrulanması.....	21
4.2. Sayısal Sonuçlar ve Tartışma.....	22
5. SONUÇLAR.....	35
KAYNAKLAR.....	36

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Disk boyutları ve malzeme özellikleri.....	21
Çizelge 4.2. Homojen disk için analitik çözümlerle TFM sonuçlarının harmanlanması.....	22



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Kuvvet yasası malzeme gradyanına göre elastisite modülü $E(x)$ 'in değişim grafiği.....	14
Şekil 3.2. Üstel malzeme gradyanına göre elastisite modülü $E(x)$ 'in değişimi.....	15
Şekil 3.3. Trigonometrik malzeme gradyanına göre elastisite modülü $E(x)$ 'in değişimi.....	16
Şekil 3.4. Polinomiye malzeme gradyanına göre elastisite modülü $E(x)$ 'in değişimi.....	17
Şekil 4.1. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca farklı sınır koşulları altında ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp) ile sıcaklık etkisiyle radyal gerilmelerin dağılımı.....	23
Şekil 4.2. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca farklı sınır koşulları altında ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp) ile sıcaklık etkisiyle teğetsel gerilmelerin dağılımı	24
Şekil 4.3. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca farklı sınır koşulları altında ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp) ile sıcaklık etkisiyle deplasman dağılımı.....	25
Şekil 4.4. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca farklı sınır koşulları altında ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp) ile sıcaklık etkisiyle eşdeğer gerilme (Von-Mises) dağılımı.....	26
Şekil 4.5. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle radyal gerilme dağılımı.....	27
Şekil 4.6. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle teğetsel gerilme dağılımı.....	28

Şekil

Sayfa

Şekil 4.7. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle deplasman dağılımı..	29
Şekil 4.8. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle eşdeğer gerilme (Von-Mises) dağılımı.....	30
Şekil 4.9. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle radyal gerilme dağılımı.....	31
Şekil 4.10. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle teğetsel gerilme dağılımı.....	32
Şekil 4.11. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle deplasman dağılımı..	33
Şekil 4.12. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle eşdeğer gerilme (Von-Mises) dağılımı.....	34

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, yanda açıklamaları verilmek üzere aşağıda listelenmiştir.

Simgeler	Açıklama
P_a	Alt kısmındaki malzeme özelliklerini
P_u	Üst kısmındaki malzeme özelliklerini
V_a	Alt kısımdaki hacimsel oran
V_v	Üst kısımdaki hacimsel oran
E	Elastisite modülü
P	Yoğunluk
L	Kiriş boyu
k_2	Üstel malzeme gradyanı kuvvet katsayısı
r_i	Disk iç yarıçapı
r_0	Disk dış yarıçapı
σ_r	Radyal gerilme
σ_θ	Teğetsel gerilme
F	Airy fonksiyonu
ε_r	Radyal yöndeki şekil değiştirme
ε_θ	Radyal yöndeki şekil değiştirme
ν	Poisson oranı
$T(r)$	Sıcaklık dağılımının boyutunu $(T_0 \left(\frac{r-r_i}{r_0-r_i}\right))$
$E(r)$	Elastisite modülü değişim formları $(E_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^n), (E_0 e^{nr})$
$\alpha(r)$	Termal genleşme katsayısının değişim formları $(\alpha_0 \left(\frac{r}{r_0}\right)^m), (\alpha_0 e^{mr})$

u	Radyal yer değiştirme
E_0	Nominal elastisite modülü
α_0	Nominal termal genleşme katsayısı,
T_0	Ortam sıcaklığı
n	İnhomojenlik parametresi keyfi deęerdir.
m	İnhomojenlik parametresi keyfi deęerdir.
σ_{vm}	Eşdeğer gerilme
y_o	Homojen olmayan çözüm
$y_1 \dots, y_n$	Standartlaştırılmış (homojen) çözümü

1. GİRİŞ

Gelişen teknolojinin sonucu olarak malzeme alanında farklı özellikleri bünyesinde barındıran ileri düzeyli malzemeler üretilerek kalite, güvenilirlik ve maliyeti düşük mühendislik tasarımları meydana getirilmektedir. Malzeme üretimindeki bu değişim tasarım ile uğraşan tasarım mühendislerinin de bakış açıları da farklılaşmıştır. Tasarım süreçlerini ciddi olarak etkileyen yeni malzeme sınıfı ortaya çıkmıştır ve fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM) olarak isimlendirilmiştir. Değişken kalınlıktaki FDM silindirik ve yüksek sıcaklıkların bu yapılar üzerindeki etkisi konusu giderek daha popüler hale geldi. Farklı geometrik yapıları sahip makine elemanlarının mühendislik alanındaki uygulamalarında özellikle silindirik FDM yapılarının uygulamaları, kullanılan metallerin ve metal alaşımlarının elastik davranış sergilediği havacılık-uzay, nükleer santraller, havacılık-denizcilik ve kimya sektörlerinde kullanımı artmıştır. FDM'ler, malzeme boyunca elastik ve termal özelliklerin sürekli dalgalanması olan alacalı malzemelerdir. Malzemelerin hacimli kısımlarının metodik olarak değiştirilmesiyle çeşitli özelliklere sahip bileşen malzemeler oluşturulur. FDM uygulamalarında kullanılan malzemeler ısıya dayanıklı, korozyona dayanıklı, erozyon ve yüksek kırılma tokluğudur. Bu nedenle, bu yapılar genellikle yüksek yoğunluklu ısı akışlarına maruz kaldıklarından ve önemli değişikliklere maruz kaldıklarından malzeme gereksinimleri oldukça ileri düzeydedir. Bu özellikleri nedeniyle, kalın cidarlı silindirik FDM yapılarının hassas ve doğru ısı transferi analizi, mühendislik tasarımı ve üretimi için bir gerekliliktir. FDM'ler, ilk uygulamaları olarak havacılık ve çeşitli reaktörler için hava akımı koruyucusu olarak oluşturuldu. Günümüzde termomekanik yükleme altında, volan, türbin gibi yüksek sıcaklıkta çalışma ortamları gibi makine elemanlarının bileşenleri genel olarak kullanılmaya başlanmıştır. FDM adı verilen heterojen malzemelerin kullanımı son zamanlarda artış göstermektedir. FDM'ler: İki bileşenden oluşan ve sürekli bir fonksiyonel yapı içinde yerine bağlı olarak değişen mekanik özelliklere sahip kompozit malzemelerdir. Mühendislik yapılarında sıklıkla kullanılan FGM'den yapılan yapılarda (silindirik kaplar, dairesel diskler, basınçlı kaplar, kirişler ve içi boş küreler gibi) termal gerilme analizi yapılmıştır(Jahromi et al. 2009, 2010; Tutuncu and Temel 2009; You et al. 2000; Zhong and Yu 2007). FDM'den beklenen özelliklerde malzeme olacak şekilde kullanılarak üretim yöntemlerinin yanında, bu malzemeyle tasarlanıp üretilen mühendislik uygulamaların sonuçlarının gerçekleştirilebilmesi nedeniyle sayısal yöntemleri de çalışılması gerekmektedir.

Bu çalışmada lineer olarak artan sıcaklık dağılımına maruz kalan içi boş FGM disklerinin sınır koşulları ile değerlendirilmesi olan, radyal, teğetsel, eşdeğer gerilmeler ve radyal yer değiştirme denklemleri türetilerek yeniden üretilmiştir. Kuvvet yasası, serbest durumlu üstel (fr-f) ve sabit-serbest (fx-f) sınır koşulları gibi iki farklı fonksiyon formu, yöneten denklem için uygulanır. Uzay koordinat sisteminde matematiksel olarak sistemi idare eden denklemler çoğunlukla değişken katsayılarından oluşur. Dolayısıyla bu durum iki nokta arasında sınır değer problemine işaret etmektedir. Bu tez çalışmasında, mevcut yazılı eserlerde geleneksel prosedürlerle çözülebilen, başlangıç değeri problemi olarak etkili bir analiz prosedürü olan tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi (TFM) kullanılmıştır(Aslan, Noori, and Temel 2018; Çelebi, Durmuş, and Baran 2018; Celebi, Yarimpabuc, and Tutuncu 2018; Tutuncu and Temel 2009). Bu çalışmada dördüncü sınıf Runga-Kutta (RK4) yöntemi kullanılmıştır. Sonuçları doğrulamak ve sayısal çözünürlüklerin birleşmesini gözlemlemek için homojen bir disk için analitik kıyaslama çözümleri kullanılır. Mevcut süreçte, sıralama noktalarının yeri rastgele seçilebilir. TFM, yazılı eserlerde teorik arka planı olan etkili ve temel bir çözümleme prosedürüdür(Jing et al. 2016; Khan, Naushad Alam, and Wajid 2016). Teknik, farklı yapısal mekanik problemlere sahip kavisli çubuklar(Roberts and Shipman 1979), kompozit kirişler(Agarwal 1982) ve silindirler (Yildirim 1997) gibi yapılarda etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Bu araştırmanın temel amacı, etkili ve doğru bir çözümleme tekniği göstermektir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Gamer'in çalışmalarının tam tersi uygulamalar yapılmıştır. Sabit olmayan kalınlıkta, içi boş ve sabit olmayan yoğunluklu diskler şekillendirilmiştir (Güven 1992, 1998). Gelişigüzel seçilmiş sabit olmayan kalınlık ve yoğunlukta hareketli disklerin elasto-plastik numerik çözümlemelerini yapmışlardır. Mühendislik alanında son zamanlarda yaygın şekilde kullanılan sistemler içerisinde dönen elemanları içerisinde bulunduran makinalar kullanılmaktadır. Örnek olarak; uzay araçları ve uygulamaları, elektrikli mutfak aletleri, gaz türbinleri, pompalar gibi makinalar kullanılmaktadır (Gruttmann and Wagner 2001; Ugral and Fenster 2003). En uygun tasarım için malzeme özelliklerindeki bileşen yapılarının heterojen olması istenilmeyen bir durum olsa bile kullanımı kaçınılmaz olmuştur. Sabit olmayan malzeme özellikleri ile kullanıldığı düzeneklerin çalışma sıcaklığının artmasıyla malzemeye ait korozyon, mukavemet, dayanıklılık gibi özelliklerin etkisi artmıştır (Alagöz, Gülgeç, and Konez 2004). Yapılan çalışmada kullanılan ısı bariyer sisteminde malzeme özellikleri homojen her yerinde aynı olan metal ve seramikler kullanılmıştır. Isıl genleşme katsayılarındaki farklılık sebebiyle birleşme noktalarında ısıl gerilmeler meydana gelerek çatlaklar ve kırılmalar oluşur. Isıl gerilmenin en yaygın olduğu bölge malzemenin ısıya ilk maruz kaldığı yüzey bölgesidir ve gerilme eksenel yönlü meydana gelmiştir (Alagöz et al. 2004). Hareketli disklerle alakalı olarak farklı sınır koşullarında ve açılarındaki diskler için birden fazla çalışma vardır. Değişen teknoloji ile beraber üstün özellikli malzemeler geliştirilmiştir. Bu kompozit malzeme grubunda var olan malzemelerden biri de FDM'lerdir. Üstün özellikli bu malzeme yapısının incelenmesi ile birlikte FDM'ler farklı boyut ve ilgi kazanmıştır (Eraslan and Akis 2006; Sugano et al. 2004; You et al. 2000).

FDM üretim yöntemlerini iki gruba ayırmak mümkündür; birinci üretim yöntemi kuru yöntem olarak tanımlanmaktadır ve toz metalürjisi, plazma spreyiyle kaplama, CVD fırını ile kaplama gibi yöntemler sıralanabilir, ikinci yöntem ise; yaş üretim yöntemi olarak tanımlanmaktadır ve endüksiyonla yığma, slip döküm, santrifüj döküm gibi yöntemler sıralanmaktadır. Aslında dönen diskler metallere veya alaşımlarından üretilmiştir. Bununla birlikte, bu dönen diskler aşırı mekanik veya termal yükleri taşıyamaz. Ayrıca, daha yüksek çalışma sıcaklığı durumları gibi bazı özel uygulamalar için, bu şiddetli ortam disk şeklindeki bileşenlerin çatlamasına ve bileşenlerin başarısız olma eğilimine neden olur (Singh, Uppal, and Uppal 2012). Ayrıca türbin rotorunda ısı, dış yüzeyden mile oradan da rulmanlara aktarılır ve bu da arıza ve eksikliğe yol açar. Isı transferinden kaçınarak

üstesinden gelinebilir. Dış yüzeyinde seramik, iç yüzeyinde metalce zengin FDM'den üretilen disk, ısı transferine karşı iyi bir seçim olabilir. Dış yüzeydeki seramiğin daha yüksek ısı direnci ısı transferini engellerken, iç yüzeydeki metal torkun neden olduğu gerilimi diskten mile daha güçlü bir yapının taşımasını sağlar (Bayat et al. 2008).

Son yayınlarda yanma sentezi, elektroforetik biriktirme, santrifüj yöntemleri, plazma püskürtme, lazer kaplama ve toz metalurjisi gibi bir dizi FDM üretim yöntemi başarıyla geliştirilmiş ve bildirilmiştir. Bunlar arasında, toz metalurjisi yöntemi, bileşim ve mikro yapı varyasyonlarının yanı sıra şekil oluşturma'nın çok çeşitli uygulamalarda kolayca kontrol edilebildiği FDM için en uygun yollardan biridir. Araştırmacılar, FDM ürünlerini imal etmek için toz metalurjisi tekniklerini kullanarak çeşitli malzeme kombinasyonları geliştirdiler. Bazı örnekler şunlardır: ZrO_2 -NiCr FGMs, Al_2O_3 - Al_2TiO_5 FGMs, Al- Al_2O_3 FGMs, Al-SiC FDM'ler (Singh et al. 2012). Doğrusal olmayan kalınlığa sahip diskler, daha spesifik olarak eksenden veya iç kenardan dış kenara doğru konik diskler, sabit disklerle kıyasla benzersiz avantajları sayesinde mevcut teknik uygulamalarda (türbin diskleri, volanlar, dişliler vb.) Yaygın olarak kullanılmaktadır. - hem azaltılmış ağırlık hem de daha düşük kütle atalet momenti açısından kalınlık diskleri ve ayrıca disk malzemesi mukavemetinin optimal bir şekilde kullanılmasını sağlayan yarıçap boyunca daha iyi bir gerilim dağılımı (Vullo and Vivio 2008). Gerilmelerin diskin kalınlığına göre değiştiğini varsayarsak, değişken kalınlığa sahip diskler teorisi, düzlem gerilme varsayımını karşıladıkları sürece sabit kalınlığa sahip diskler kadar iyi sonuçlar verebilir (Zenkour and Mashat 2011). Sabit yoğunluk ve kalınlıktaki dönen diskler için kesin kesin çözümler verdiler (Horgan and Chan 1999b, 1999a). Düzgün kalınlığa sahip dönen içi boş ve katı disklerdeki deformasyon ve gerilmeleri incelemek için işlevsel olarak derecelendirilmiş bir malzemeyi homojen olmayan bir ortotropik malzeme olarak modelledi (Durodola and Attia 2000). Analitik olarak sabit kalınlığa sahip üstel olarak derecelendirilmiş dönen dairesel diskleri inceledi (Zenkour 2005). Eğrisel olarak ortotropik dönen dairesel diskin elastik-plastik gerilme analizini, gerinimle sertleşen malzeme davranışı için analitik olarak araştırdı (Çallıoğlu, Topcu, and Tarakçılar 2006). Enine izotropi ve tekdüze kalınlığa sahip üstel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış dönen bir disk için üç boyutlu bir analitik çözüm önerdi (Chen, Ding, and Chen 2007). Sert kasalı ve farklı izotropik malzemelerden yapılmış yüzleri ve FDM'den yapılmış göbeği olan üç katmanlı sandviç dönen tek tip katı diskler için çalışmasını genişletti (Zenkour 2007, 2009). Basit güç kuralının bir fonksiyonu olarak izotropik disklerin hem elastikiyet modülünün hem de yoğunluğunun radyal olarak

değiştirdiğini varsayarak, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış dairesel dönen disklerin gerilme analizini gerçekleştirmiştir (Çallioğlu, Bektaş, and Sayer 2011). Düzgün basınçlı silindirik olarak anizotropik içi boş tekdüze bir diskin düzlem gerilme varsayımı altında elastik tepkisi için birleşik bir analiz önermiş ve denklemleri sayısal olarak sonlu farklar yöntemi ile çözmüştür (Lubarda 2012). Bir yoğunluk fonksiyonu ile dönen, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş içi boş polar ortotropik dairesel diskleri araştırmıştır (X-L Peng and Li 2012). İç ve dış basınca maruz kalan üstel olarak fonksiyonel derecelendirilmiş sabit disklerin elastik analizine hiper geometrik fonksiyonlar açısından kapalı form analitik bir çözüm vermiştir. Yukarıda listelenen çalışmalar, üniform kalınlığa sahip disklerin elastik analizi ile ilgiliydi (Nejad et al. 2013). Dairesel bir disk ve dairesel bir rijit şaft üzerine monte edilmiş bir disk için değişken kalınlığa sahip anizotropik halka diskleri döndürmek için analitik çözümler sundu (Murthy and Sherbourne 1970). Değişken kalınlık ve değişken yoğunluklu anizotropik dönen dairesel bir diskte gerilmeler ve yer değiştirme için kapalı form çözümler elde ettiler (Reddy and Srinath 1974). Değişken kalınlıktaki dairesel diskin döndürülmesi için değişken kalınlık ve sayısal çözüm ile katı diskin döndürülmesi için analitik ve sayısal çözümler sundu (Zenkour and Mashat 2010). Sabit serbest sınır koşullarına sahip radyal olarak FDM Alüminyum-Zirkonya disklerinin etkili malzeme özelliklerini tahmin etmek için üstel bir fonksiyon ve Mori-Tanaka şemasını kullandı (Bayat et al. 2011).

Von-Mises akma kriterini kullanarak sonlu fark yöntemi ile katlanarak değişken kalınlığa sahip ince bir döner halka şeklindeki disk için elastik-plastik gerilmeleri, gerilmeleri ve yer değiştirmeleri elde etmişlerdir (Sharma and Sanehlata 2013). FDM'lerin devamlı başkalaşan bileşimlerinde ayrı iki gereç kullanılır. Sıcaklık, boyut, şekil ve bileşim gibi faktörleri içerisinde bulundurarak yüksek mukavemet sağlayan seramikler ve düzenli atom yapısına sahip yoğunluğu nispeten fazla rijitliği sağlaması amacıyla metaller örnek verilebilirler (Noda 1999). Sayısal hesaplarda, feza aracının yerden 26000 metreyi aşkın yükseklikte uçuş yaparken farklı bölgelerinden sıcaklık ölçümü yapılmış 1033 K ve 2066 K değerlerine ulaşılmıştır. sıcaklık ölçümlerinin farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Değişken ve aşırı sıcaklık ortamlarına mukavemet edebilen gelişmiş malzeme özelliklerine sahip malzemeler araştırılmıştır (Lü, Lim, and Chen 2009). FDM'lerin kullanılışı Ulusal Havacılık Laboratuvarı'ndan Niino ve arkadaşlarının termal blokaj kaplamaları yapması ile Japonya'nın Sendai şehrinde teklif edilmiştir (Koizumi 1993; Mortensen and Suresh 1995). Malzeme dağılımı her yerinde eşit olmayan malzemeler için ısıyla yumuşayan plastik özellikleri

incelenmiştir (Tanigawa 1995b). Malzeme dağılımı her yerinde eşit olmayan malzeme özelliğine sahip plakalarda mono eksenli düzensiz ısı iletimi ve buna bağlı termal stres sorunlarını, termal özelliklere bağlı olduğu durum için araştırmalar yapmışlardır (Tanigawa 1995a; Tanigawa et al. 1996). Malzeme dağılımı her yerinde eşit olmayan malzeme özelliğine sahip levhalarda stresin azaltılması için malzeme bileşimini sistematik çözümleme çalışmalarının yapılmasıyla termal gerilmeleri incelemişlerdir (Tanigawa, Matsumoto, and Akai 1997). Levhadaki mono eksenli termal dağılımın etkisinde termal stres problemini Noda ilk çalışmasında çözmüştür. Değişik çatlak modelleri barındıran FDM'lerdeki termal gerilme yoğunluğu unsurları analitik ve sayısal olarak incelenmiştir. Yüksek termal yüklere sürekli uğradıklarında, FDM'lerde ciddi termal gerilmeler oluşmaktadır ve seramik tabanda çatlaklar meydana gelmeye başlar. Sabit ve sabit olmayan termal şartlar altında, farklı şekillerdeki FDM'lerde oluşan termal stres ve mekanik stres analizlerinde kullanılan 4 metot vardır. Birinci metot; malzeme özellikleri sabit kabul edilip FDM malzemenin birden çok katmanlı olduğu da sayılarak problem basit fonksiyonlarla çözümsenir. İkinci metot; üstel ve çok dereceli fonksiyonlar kullanılarak yapılan çözümsemelerdir. Üçüncü metot ise; karışıklık (perturbation) metodudur (Noda 1999).

İçi boş silindirlerin sabit termal şartlar altında termal stres ve gerinimleri incelenmiştir (Fukui, Yamanaka, and Wakashima 1993). Çalışmaların bir diğeri de Obata'nın FDM'den oluşturduğu içi boş silindir ve küre ile sabit termal stres durumlarını incelemesidir (Obata and Noda 1994). Yarıçaplar doğrultusunda yüklere uğrayan içi boş FDM'den oluşan silindirin termal ve mekanik stresleri incelenmiştir (Jabbari, Sohrabpour, and Eslami 2002). Malzeme özellikleri her yerinde eşit dağılmamış içi boş silindir, birden fazla farklı özelliklerde katman içeren silindir ve FDM'den oluşturulmuş silindirler üzerinde ısı karşısında nasıl davrandıkları hakkında analiz yapılmıştır ve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. FDM'den yapılmış silindirdeki dereceli değişim, teğetsel ve radyal yöndeki birim yer değiştirmelere oranla çeşitli farklar oluşturmuştur (Xiang, Shi, and Zhang 2006). Sabit olmayan termal stresler için farklı boyutlarda analizler oluşturulmaya başlanmıştır. Geometrik şekli dikdörtgen olan levhanın alt ve üst yüzeyindeki malzeme özellikleri termal yüklere zamandan bağımsız olmaksızın maruz kalmıştır. Malzeme özellikleri belirlenirken maruz kalacağı eksenel koordinat olarak derinlik fonksiyonları türetilmiştir (Vel and Batra 2003). FDM üzerindeki ayrılmalarla ilgili olarak sabit olarak artan veya sabit olarak azalan yöntemi kabulüyle ciddi çalışmalar yapılmıştır (Delale and Erdogan 1988). Ayrıca fonksiyonel derecelendirilmiş sabit durmayan disklere yönelik

çalışmalar bulunmaktadır ^[56]. Belirli mekanik yüklemelere maruz kalan malzemelerde bir süre sonra elastik uzamalar kalkar ve plastik uzamalar devam eder böyle malzeme özelliği gösteren tüplerde, ısının karşısında şekil değiştirme karakteri incelenmiştir. İlk olarak termoelastik ve termoplastik değişimler incelenirken, ısıya bağlı olarak malzeme özelliklerinin değiştiği varsayılarak fonksiyonlar türetilmiş ve çözümlemeler yapılmıştır. İkinci olarak, malzeme özellikleri ısıdan bağımsız malzeme özelliği varsayılarak fonksiyonlar türetilmiş ve karşılaştırma yapılmıştır. İncelemede ısıya bağlı ve ısıdan bağımsız özellikleri kabul edilerek fonksiyon oluşturulmuş malzemeler arasında ısının etkisinin artmasıyla fonksiyonların çözümü için önemli bir fark oluşturduğu saptanmıştır (Orcan and Eraslan 2001). Değişmeden üzerine katlanarak iç enerji üreten tüpteki kalıcı olmayan ve kalıcı olan şekil değişimleri, hasar kriteri olan Tresca kabulüyle ve ek olarak akma kuralı kullanılarak incelenmiştir. Yapılan çalışmada malzeme özelliği sıcaklığa bağlıdır ve akma dayanımı da bu şekilde kabul edilmiştir. Dış tabakada başlayan deformasyon ilk önce elastik değişim ile devam ederken merkez noktasında bir bölgede kalıcı deformasyon ile plastik bölge meydana getirmiştir (Orçan and Gülgeç 2001).

Değişen ve artan ısı üretimi ile doğrusal sertleşme özelliği gösteren bir silindirde plastik deformasyonlar incelenmiştir. Silindirin ekseninde plastik şekil değişimi gerçekleşmiş ve ısı altında tekrar aynı bölgede ikinci kez plastik şekil değişimi oluşmuştur. Buna bağlı olarak yüzeyde kalıcı deformasyonun tekrarlanmaması için ısı transfer katsayısı tetkik edilmiştir. Maruz kalınan termal yükün kaldırılması ile malzeme yüzeyinde kalan gerilmelerde tetkik edilmiştir (Eraslan and Orcan 2004). Bir diğer hasar kriteri olan Von Mises yöntemi ile düzgün olmayan, sertleşme gösteren, kalıcı şekil değiştiren radyal, simetrik düzeneklerin termal gerilmeleri oluşturulmuştur. Farklı sayısal yöntemler ile elastik-plastik malzeme özelliği gösteren silindir ve tüplerin stres problemleri incelenmiştir. Von Mises yöntemine ek olarak Tresca yöntemi de ele alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Stres ve şekil değişimlerinin üzerinde etkili olan ölçütlere ulaşabilmek için kararlaştırılmış analizler yapılmıştır. Kullanılan silindirin termal stres tahlili yapılırken silindirin iki tarafı da sabitlenmiş olarak kabul edilerek analitik çözümlemeler yapılmıştır (Eraslan and Argeso 2005).

FG dönen disklerin termo-elastik analizinin sayısal ve kesin çözümleri Arnab, İslam tarafından sunulmuştur (Arnab et al. 2014). Bir sandviç yapıdaki radyal yer değiştirme ve gerilmeler üzerindeki FG dönen katı diskler üzerindeki gradyan derecelendirmesinin etkisini

incelemiştir(Zenkour 2009). FGM'den yapılmış dönen kalın duvarlı silindirik kaplarda yüksek seviyeli kayma deformasyon teorisini çok katmanlı yöntem ile birleştirerek termal gerilmeleri hesaplamıştır(Çallıoğlu, Sayer, and Demir 2015). Sıcaklık dağılımı, açısal hız ve kalınlığın etkisi altında ince FGM disk şeklindeki için çekme gerilimi ve yer değiştirmeyi gösterdi(Sharma, Sharma, and Kumar 2013). Homojen olmayan malzeme parametrelerinin, belirli bir açısal hızda FG döner diskler (ve rotorlar) üzerindeki gerilim analizi üzerindeki gerilimler üzerindeki etkilerini inceledi(Durodola and Adlington 1997). Sonlu elemanlar yaklaşımını kullanarak, daha iyi termo-elastik özelliklere sahip olmak için belirli parametreleri uygun şekilde kontrol ederek dairesel serbest kuvvet homojenliğine sahip düzenli bir kesici veya taşıma diskinin tasarlanabileceğini göstermiştir(Go, Afsar, and Song 2010). Mindlin'in teorisini kullanarak, termal yükler altında homojen olmayan kalınlıktaki FG döner diskler üzerinde gerilim dağılımları yarattı(Hassani et al. 2012). FGM silindirindeki termal gerilmeleri analiz etti(Liew et al. 2003). FGM'den yapılmış ince bir eksenel simetrik döner serbest tekerlek tahriki için hacimsel termal yükler altında hacim bölümünün merkezkaç kuvveti ve güç yasası dağılımı ile yarı analitik bir çözünürlük analizi elde etti(Kordkheili and Naghdabadi 2007). Malzeme özellikleri keyfi olarak radyal olarak değişen FGM diskinin termo-elastik davranışını Fredholm integral denklemlerine dönüştürerek verimli bir yöntem geliştirmiştir(Peng and Li 2009). Hem güç kanunu hem de radyal homojenlik dikkate alınarak gradyanın FGM döner katı disklerdeki gerilim dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır(Xu-Long Peng and Li 2012). FG plakalarının ve kabuklarının termo-elastik analizi için bir sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir(Naghdabadi and Hosseini Kordkheili 2005). Yük optimizasyonu ile tasarlanan termo-elastik yüke bağlı FGM diskinin bir tasarımı önerilmiştir(Khorsand and Tang 2018).

3. MATERİYAL VE YÖNTEM

3.1. Malzeme Seçimi

3.1.1. Fonksiyonel dereceli malzemeler (FDM)

Demir çağında; toplumların alet yapımında ve özellikle silah yapımında kullandıkları temel malzeme demirdir. Zamanla teknolojinin de gelişmesiyle birlikte malzeme alaşımları ön plana çıkmıştır. Metal alaşımları dayanıklılıkları ve uygulama alanına göre fiziksel ve kimyasal olarak üretilebilmektedirler. Metal alaşımları günümüzde kullanımı geniş alanlara sahiptir. Modern çağdaki çevresel, ekonomik vb. faktörler ile mevcut malzemelerden daha iyi özelliklere sahip malzemelerin üretilmesi bilim insanlarını ve mühendislerinin çalışma alanını oluşturmuştur. Bu çalışmalar doğrultusunda kompozit malzemeler geliştirilmiştir.

FDM'lerin çıkış yolculuğu 1984 senelerinde Japonya'da yüksek dayanıklılık gerektiren uzay araçları arasında gidip gelebilmek için üretilmesi gereken proje kapsamında üstün özellikli malzeme olan FDM'lerin gelişmesini sağlamıştır. Endüstriyel sektörde kullanım alanının genişlemesiyle birlikte metal alaşımların seramik gibi maddeler ile birleştirilmesi gereken karmaşık düzenler ortaya çıkmıştır. Bu durumda malzeme yapısındaki gerilmelerin düzensiz olması ile bu birleşimler yapılırken malzemenin aralarına geçiş katmanlarının getirilmesi gerektiği düşünülmüştür. Bu durumların yaşanmasıyla beraber üstün özellikli kompozit malzeme olan FDM'lerin kullanımı ve gelişimi hız kazanmıştır. Kompozit malzemelerin temel amacı iki malzemenin iyi yanlarını alarak daha iyi bir malzeme oluşturmayı hedeflemektir. Bu malzemeler yüksek mukavemet, ısıl dayanıklılık, ısıl iletkenlik, hafiflik, titreşim absorbe etme ve sürtünme kayıplarına direnç ile fayda etmeyi istemektedir. FDM'lerin tanımı kısaca şöyledir; alaşım yapılan iki farklı malzemenin geçişleri arasındaki değişken yapıda heterojen özellikte olan malzemedir. Özellikle son dönemlerde teknolojiye alaşımlarında yetersiz oldukları durumlarda kompozit malzemelerin kullanımı ile çözümler üretilmeye başlanmıştır. FDM'lerde en çok kullanılan alaşım modeli; metal ve seramiğin bir araya gelmesidir. Metalin; ısı ve elektriği iletme, yoğunluğunun nispeten fazla olması, yüksek mukavemet değerine sahip olması, kısa mesafeli düzenli atom dizilişine sahip olması (kristal yapı), bileşik oluşturmadan alaşım yapabilmeleri gibi özelliklerinin seramiğin ısı ve oksitliğe direnme özellikleriyle birleşmesiyle kompozit özellikte malzeme yapısı oluşmuştur.

3.1.2. FDM'lerin kullanım alanları

Malzeme bilimi modern teknolojinin gelişmesiyle beraber ilerlemiştir. Özellikle bazı sektörel alanlarda ısı dayanıklılığı ve yüksek mukavemetin aynı anda istendiği durumlar oluşmuştur. Bu özelliklere sahip ve homojen yapıda malzeme bulunamamasından dolayı farklı fonksiyonlara sahip metal-seramik bileşimli malzeme olan FDM'ler günümüzde ihtiyaç duyduğumuz aletlerin yapımı, sağlık sektörü, uzay ve hava taşımacılığı sektörü, medikal malzeme sektörü, biyoteknoloji sektörü gibi endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır.

3.1.2.1. Uzay ve hava taşımacılığı sektörü

Isıl direnç ve ısı iletkenliğini yüksek değerlerine sahip olan FDM'ler uzay araçları için proje amaçlı ortaya çıkmıştır. Bu özellikleriyle nedeniyle sağlam, dayanıklı ve hafif olmalarınıda eklersek FDM'ler halen motor ve roketlerin en dış kısmında mühendislerin ilk tercihidir (Özarslan 2011).

FDM yapısı gereği ve farklı enerji kullanım ihtiyacından dolayı roketler, motorun dış duvarında FDM ile üretim yapılmakla birlikte, Kibo'da test aygıtı olarak FDM bir fişek şeklinde ve geri kullanılabilir bir roket motorunda kullanmıştır(Konez et al. 2005).

3.1.2.2. Endüstriyel malzemeler

Yaygın olarak piyasada kullanılan malzemeler için FDM geliştirilmesi de önemli hususlardandır. Örneğin; yüksek ısı direnç ve yağlama özelliğini bünyesinde barındıran FDM'ler kesici kalemlerde kuru kesimi mümkün hale getirmiştir. Tribolojik olarak yüzey çatlaklarını geciktirmek için seramikler ve özellikle endüstriyel malzemelerde kullanılan FDM'ler ayrı bir öneme sahiptir.(Ersan 2008).

Endüstride kullanılan seramiklerin tamamının özelliklerinin istenilen şekilde olması mümkün değildir. Seramiklerde istenilen özellik olan ısı dayanıklılığı, mukavemet ve yüksek kırılma tokluğu gibi malzeme özelliklerinin düşük maliyet ile üretilmesini FDM'ler imkan sağlamıştır.

3.1.2.3. Günlük yaşamda kullanılan malzemeler

Endüstriyel malzemelerin yanı sıra günlük yaşantımızda kullandığımız hafif ve antialerjik

özelliğinden dolayı FDM kullanılan saatler, aşınmalara direncinden dolayı tercih edilen beyzbol sporunda kullanılan ayakkabılarda FDM tercih edilmekte ve bu uygulamalarda ilerleme gösterilmiştir(Konez et al. 2005). Ayrıca diğer spor malzemeleri olan golf takımlarında, tenis racketlerinde, kayak malzemelerinde de kullanılmaktadır.

3.1.2.4. Optoelektronik

Optoelektronik aletler, elektriği ışıığa ya da ışığı elektriğe dönüştürülmesi için ışığın yarı iletken malzemeler içerisinde gerçekleştirmesi için FDM kullanılmaktadır. Optoelektronik malzemeler için elastikiyeti korumak için malzemenin ölçüleri değişmesi için FDM teknolojisi kullanılmaktadır(Konez et al. 2005).

3.1.2.5. Biyomalzeme

Bilindiği gibi insan vücudunda bazı hasarlar meydana gelebilmektedir. Bu hasarları giderebilmek için kemik ve kıkırdak yapısına uygun dış dokunun sert iç dokunun gözenekli ve uyumlu olması gerekmektedir. Bu ihtiyacı gelişen teknoloji ile fonksiyonel dereceli malzemeler giderebilmektedir. FDM'lerin yapısı gereği insan dokusundan feyz alınarak çalışılmıştır(Konez et al. 2005).

3.1.2.6. Enerji, elektrik ve elektronik alanda kullanımı

FDM'ler yapısal olarak heterojen ve dereceli katmanlı bir yapıya sahiptir. Derecelendirilmiş ve katmanlı olması sayesinde nano tüplerin yapımında, elektrot yapımında, optik fiber yapımında ve yarı iletkenler gibi malzeme üretiminde kullanılır. Ayrıca enerji alanında özellikle termal bariyer dediğimiz metallerin üzerinin kaplanmasında kullanılarak endüstride önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.

3.1.3. FDM'lerin Üretim Yöntemleri

FDM'lerin üretimi teknoloji ile paralel şekilde gelişmiştir. FDM'lerin üretiminde aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır;

- Plazma Sprey Kaplama Yöntemi
- Atmosferik Plazma Sprey Kaplama Yöntemi
- Vakum Plazma Sprey Kaplama Yöntemi
- Elektrik Art Sprey Kaplama Yöntemi

- Alev Sprey Yöntemi
- Toz ile Alev Sprey Yöntemi
- Tel ile Alev Sprey Yöntemi
- Yüksek Hızlı Oksi Yakıt Spreyleme
- Soğuk Sprey Kaplama Yöntemi

3.1.4. FDM'lerin Avantajları ve Dezavantajları

3.1.4.1. FDM'lerin avantajları

Metal ve metal alaşımlı malzemelerin sıcaklıkla temas ettiği bölgelerde kullanımı malzeme yüzeyi ve yapısal özelliklerinde olumsuz sonuçlar doğurmuştur. Yüksek ısıya maruz kalan yüzeyde kırılma, çatlama, genişleme katsayılarının arasındaki farkın büyümesi gibi olumsuzluklara çözüm olarak termal koruma tabakası oluşturacak şekilde ısıya dayanıklı seramik malzeme kaplaması yapılmaktadır.

Isıl blokaj olarak homojen seramik kaplamalar tercih edilir. Tasarımı düşünülen malzemede ısı gerilme ve çatlakların oluşmasının nedeni malzemenin kendi yapısındaki yüksel ısı genleşme katsayısının ve seramik kaplamanın farklı olmasına dayanır(Tunca 2009). Aşınmaya dirençli olan seramik bazlı bir kaplama malzemesi ile kaplanmış yüksek hız çeliğine, tokluk ve mekanik özelliklerinden yararlanarak seramik malzeme sayesinde sertlik ve sıcaklık oksidasyon direnci de oluturulur. FDM ile kaplanmış malzeme ise geleneksel kompozit malzemelerden daha iyi sonuçlar vermektedir. Böylelikle FDM'ler ile kaplanmış parçalar abrazyon aşınmaya, korozyona, termal şoklara daha yüksek dirençlere sahip olur.

3.1.4.2. FDM'lerin dezavantajları

FDM'ler teoride mükemmel olsalar da pratikte bazı sorunları vardır. Çok fazla sıcaklığa maruz kalınan şartlarda, oksijen kaplamayı aşarak sistemin altında bulunan tabakalara ilerler ve burada alüminyum ile reaksiyon girer. Meydana gelen reaksiyon sonucu FDM ile metal arasında alumina adı verilen kırılgan bir tabaka meydana gelir. Metal ile FDM arasındaki sürekliliği engelleyen bu kırılgan tabaka çatlayabilir ve kaplama malzemesi dökülebilir (Piren 2012).

Kaplamalar, çoğunlukla kolonlar şeklinde üretilirler. Bu üretim şekli kaplamanın izotropikliğini bozarak, ortotropik kaplama haline gelir (Piren 2012). FDM’ler üretim metotları sebebiyle küçük boyutta üretilmektedir. Maksimum 200 cm civarındadırlar (Piren 2012).

3.1.5. Seçilen Gradyan ve Malzeme Özellikleri

Fonksiyonel dereceli malzemeler yapı olarak iki farklı malzeme grubunun birbiriyle farklı teknikler kullanarak birleştirilmesi yeni malzeme özelliklerinden üstün kompozit malzeme oluşturulmasıdır. Örneğin; bu malzemeler birbiriyle tabaka tabaka kaplanma veya tabletlerin sinterlenmesi ile oluşturulur. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin kullanıldığı alanlarda üretilen parçaların malzeme özelliklerine göre yönelimlerinin yani malzeme boyunca değişimi üç yönlü olarak ele alınabilir. Ele alacağımız örnek kiriş olsun; FDM kiriş olarak türbin kanatları, kaldırma kolları veya robot kolları gösterilebilir. Değişim kirişin boyunca, enince veya her iki yönünde olabilir. Bu değişim üç değişik türde ele alınabilir.

$\mathbf{x} = (x, y, z)$ kartezyen koordinatlar x eksenel doğrultu olmak üzere literatürde FDM kirişlerde karşımıza çıkan malzeme gradyanları sırasıyla $\hat{x}$, $\hat{z}$ ve $\hat{x}-\hat{z}$ yönünde $P_x(\hat{x})$, $P_z(\hat{z})$ ve $P_{x\hat{z}}(\hat{x}, \hat{z})$ olarak verilmektedir. Bu malzeme gradyanlarından $P_z(\hat{z})$ araştırmacılar tarafından sıklıkla ele alınmıştır. İki malzemeden meydana gelen bir kirişte malzeme özellikleri $\hat{z}$ yönünde değişime sahip olduğunda $P_z(\hat{z})$, iki malzemenin hacimsel oranlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi verilmiştir (Alshorbagy, Eltaher, and Mahmoud 2011; Kadoli, Akhtar, and Ganesan 2008; Ke, Yang, and Kitipornchai 2010; Şimşek 2009, 2010a, 2010b; Şimşek and Kocatürk 2009).

$$P_z(\hat{z}) = P_a V_a + P_u V_u, \quad V_a + V_u = 1 \quad (3.1)$$

Burada P_a ve P_u kirişin sırasıyla alt ve üst kısmındaki malzeme özelliklerini, V_a ve V_u ise hacimsel oranlarını Denklem (3.1)’de gösterilmektedir. $V_a = (\frac{z}{h} + \frac{1}{2})^k$ kesit alanının alt kısmındaki malzemenin hacimsel oranının değişimini göstermek üzere literatürde yaygın olarak kullanılan Kuvvet Yasası malzeme gradyanı Denklem (3.2)’deki gibidir (Alshorbagy et al. 2011; Kadoli et al. 2008; Ke et al. 2010; Şimşek 2009, 2010a, 2010b; Şimşek and Kocatürk 2009).

$$P_{\hat{z}}(\hat{z}) = (P_a - P_u) \left(\frac{\hat{z}}{h} + \frac{1}{2} \right)^k + P_u \quad (3.2)$$

Burada h kirişin yüksekliği, k pozitif kuvvet sayısıdır.

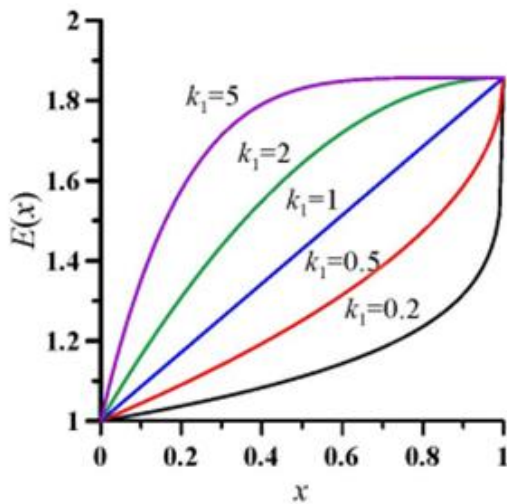
3.1.5.1. Kuvvet yasası malzeme gradyanı

Literatürde $\hat{z}$ yönünde olduğu gibi $\hat{x}$ yönünde de kuvvet yasası malzeme gradyanı yaygın olarak kullanılmaktadır (Alshorbagy et al. 2011; Kumar, Mitra, and Roy 2015; Şimşek, Kocatürk, and Akbaş 2012). Değişim fonksiyonları Denklem (3.3.) ve (3.4)'teki gibi verilmiştir.

$$\hat{E}(\hat{x}) = (E_0 - E_1) \left(1 - \frac{\hat{x}}{L} \right)^{k_1} + E_1 \quad (3.3)$$

$$\hat{\rho}(\hat{x}) = (\rho_0 - \rho_1) \left(1 - \frac{\hat{x}}{L} \right)^{k_1} + \rho_1 \quad (3.4)$$

Burada k_1 , $\hat{x}$ yönündeki malzeme gradyanına ait kuvvet yasası pozitif kuvvet katsayısıdır. E_0 ve ρ_0 sırasıyla kirişin başlangıç ucundaki elastisite modülü ve malzeme yoğunluğudur. E_1 ve ρ_1 ise kirişin bitiş ucundaki elastisite modülü ve malzeme yoğunluğudur. L kirişin boyudur.



Şekil 3.1. Kuvvet yasası malzeme gradyanına göre elastisite modülü $E(x)$ 'in değişim grafiği.

Şekil 3.1’de kuvvet yasası malzeme gradyanına göre elastisite modülünün değişimi verilmiştir. Burada boyutsuz elastisite modülü değişim fonksiyonu $E(x) = \frac{\hat{E}(\hat{x})}{E_0}$ ve boyutsuz konum bileşeni $x = \frac{\hat{x}}{L}$ olarak tanımlanmıştır.

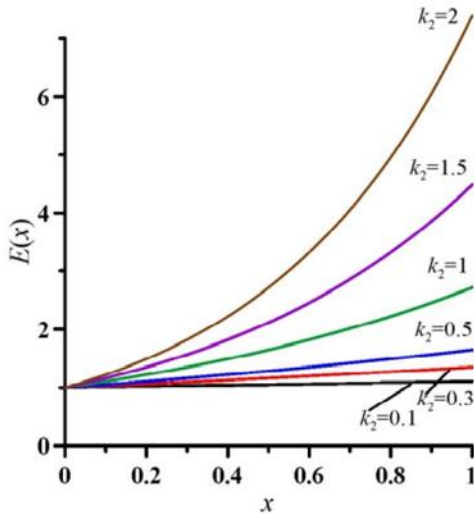
3.1.5.2. Üstel malzeme gradyanı

Üstel malzeme gradyanında kırışı meydana getiren iki malzeme arasında üstel fonksiyona göre değişim kabul edilmiştir. Malzeme özelliklerinin kırışın $\hat{x}$ yönünde üstel malzeme gradyanına göre değişim fonksiyonları Denklem (3.5) ve (3.6) ile verilmiştir (Akgöz and Civalek 2013; Ke et al. 2010; Kumar et al. 2015; Li, Kang, and Wu 2013; Yılmaz, Girgin, and Evran 2013).

$$\hat{E}(\hat{x}) = E_0 e^{k_2 \frac{\hat{x}}{L}} \quad (3.1.5)$$

$$\hat{\rho}(\hat{x}) = \rho_0 e^{k_2 \frac{\hat{x}}{L}} \quad (3.2)$$

Burada k_2 , üstel malzeme gradyanı kuvvet katsayısıdır.



Şekil 3.2. Üstel malzeme gradyanına göre elastisite modülü $E(x)$ ’in değişimi.

Şekil 3.2’de k_2 katsayısının farklı değerleri için boyutsuz elastisite modülünün değişimini veren fonksiyon çizilmiştir.

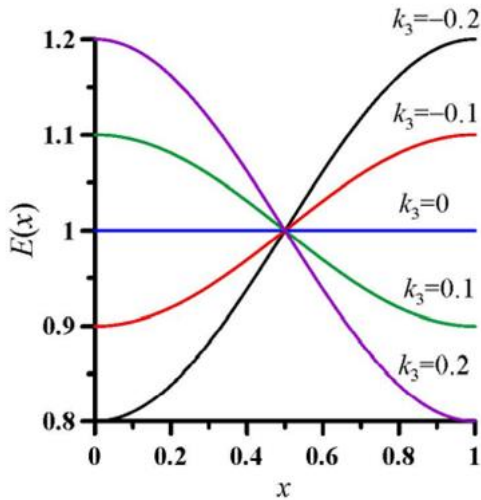
3.1.5.3. Trigonometrik malzeme gradyanı

Trigonometrik malzeme gradyanında kirişi meydana getiren iki malzeme arasında trigonometrik fonksiyona göre değişim kabul edilmiştir. Kirişin $\hat{x}$ yönünde trigonometrik malzeme gradyanına göre malzeme özelliklerinin değişim fonksiyonları Denklem (3.7) ve (3.8)'deki gibi verilmiştir (Hein and Feklistova 2011; Huang and Li 2010).

$$\hat{E}(\hat{x}) = E_0 [1 + k_3 \cos(\pi \frac{\hat{x}}{L})] \quad (3.3)$$

$$\hat{\rho}(\hat{x}) = \rho_0 [1 + k_4 \cos(\pi \frac{\hat{x}}{L})] \quad (3.4)$$

Burada k_3 ve k_4 boyutsuz trigonometrik malzeme gradyanı katsayılarıdır. Sayısal hesaplamaların bazıları yapılırken k_3 ve k_4 'in arasında $k_3 = k_4$ ilişkisine ilaveten $k_3 = 4k_4$ ilişkisi de dikkate alınmıştır (Huang and Li 2010).



Şekil 3.3. Trigonometrik malzeme gradyanına göre elastisite modülü $E(x)$ 'in değişimi.

k_3 katsayısının farklı değerleri için elastisite modülünün değişimini veren fonksiyonlar Şekil 3.3'de çizilmiştir.

3.1.5.4. Polinomiye malzeme gradyanı

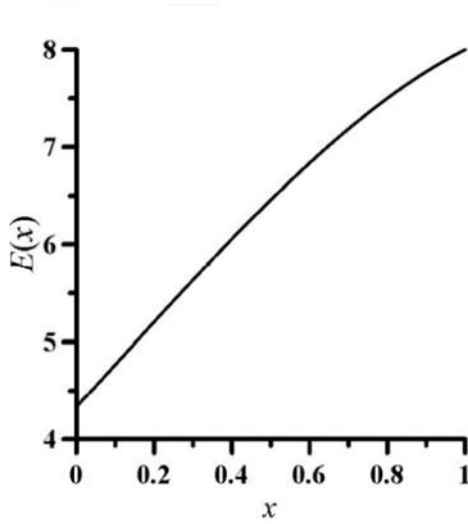
Kirişin $\hat{x}$ yönünde polinomiye malzeme gradyanına göre malzeme özelliklerinin değişim fonksiyonları denklem (3.9) ve (3.10)'daki gibi verilmiştir (Kumar et al. 2015; Rajasekaran

2013).

$$\hat{E}(\hat{x}) = E_0 \left[\frac{13}{3} + \frac{13}{3} \frac{\hat{x}}{L} + \frac{1}{3} \left(\frac{\hat{x}}{L} \right)^2 - \left(\frac{\hat{x}}{L} \right)^3 \right] \quad (3.5)$$

$$\hat{\rho}(\hat{x}) = \rho_0 \left(1 + \frac{\hat{x}}{L} \right) \quad (3.6)$$

Verilen polinomiye malzeme gradyanına göre değişen elastisite modülü ve yoğunluk fonksiyonlarında görüldüğü üzere malzeme özellikleri belli bir polinoma göre değişmektedir. Polinomiye malzeme gradyanına göre elastisite modülü $E(x)$ 'in değişimini Şekil 3.4'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4. Polinomiye malzeme gradyanına göre elastisite modülü $E(x)$ 'in değişimi.

3.2.Yöntem

3.2.1. Diskin Termal Elastik Çözümünün Formülasyonu

Kalın duvarlı içi boş dairesel diskler için düzlem gerilme durumu için denge diferansiyel denklemi aşağıdaki biçimde ifade edilir.

$$r_i \leq r \leq r_o \quad \frac{d(\sigma_r)}{dr} - \frac{(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = 0 \quad (3.11)$$

iç yarıçap r_i , dış yarıçap r_o , radyal gerilme σ_r , çevresel gerilme σ_θ , teğetsel ve radyal

gerilmeler, Airy gerilme fonksiyonu cinsinden yazılabilir.

$$\sigma_r = \frac{F}{r} \quad \sigma_\theta = \frac{dF}{dr} \quad (3.12)$$

Elastik malzemeler için sıcaklığın etkisinde olan bir FGM diskinde meydana gelen şekil değiştirmeler ve gerilmeler arasındaki ilişkiler Hooke yasası ile açıklanabilir.

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E(r)} (\sigma_r - \nu \sigma_\theta) + \alpha(r) T(r) \quad (3.13)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E(r)} (\sigma_\theta - \nu \sigma_r) + \alpha(r) T(r) \quad (3.14)$$

burada $T(r)$ sıcaklık dağılımının boyutunu göstermektedir (Denklem 3.15) ve ν Poisson oranıdır.

Elastisite modülü $E(r)$ ve termal genleşme katsayısının $\alpha(r)$ değişim formları iki şekilde ele alınmış olup, disk boyunca radyal yönde, üstel fonksiyonu (Pwr) Denklem (3.16) ve eksponansiyel fonksiyonu (Exp) şeklinde değiştiği kabul edilerek Denklem (3.17)'de kullanılmıştır.

$$T(r) = T_0 \left(\frac{r - r_i}{r_o - r_i} \right) \quad (3.15)$$

$$E(r) = E_0 \left(\frac{r}{r_o} \right)^n \quad \alpha(r) = \alpha_0 \left(\frac{r}{r_o} \right)^m \quad (3.16)$$

$$E(r) = E_0 e^{nr} \quad \alpha(r) = \alpha_0 e^{mr} \quad (3.17)$$

burada E_0 ve α_0 nominal elastisite modülü ve termal genleşme katsayısı, T_0 ortam sıcaklığı ve n, m keyfi sabitlerdir ve n, m homojen bir disk için sıfıra eşdeğerdir. Gerinim-yer değiştirme ilişkisi Denklem (3.18)'de gösterilmiştir.

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r} \quad (3.18)$$

burada radyal yer değiştirme u ile temsil edilir. Deformasyon uyumluluk Denklem'i (3.19) Denklem (3.18)'den elde edilir.

$$\varepsilon_r = \frac{d}{dr}(r\varepsilon_\theta) \quad (3.19)$$

Denklem (3.11-3.14)'lerden yararlanarak Denklem (3.20) ve (3.21)'de verilen denge denklemleri oluşturulur.

$$F'' - F' \left(\frac{n-1}{r} \right) - F \frac{(1-nv)}{r^2} = \frac{\left(\frac{r}{r_o} \right)^{n+m} \left[1+m \left(\frac{r_i}{r} - 1 \right) \right] T_0 \alpha_0 E_0}{r_o - r_i} \quad (3.20)$$

$$F'' - F' \left(n - \frac{1}{r} \right) - F(1 - nrv) = \frac{(e)^{r(n+m)} [m(r_i - r) - 1] T_0 \alpha_0 E_0}{r_o - r_i} \quad (3.21)$$

Kırılma hipotezlerinden birisi olan Von-Mises hipotezine bağlı olarak aşağıda verilen eşdeğer gerilme formülü ile tanımlanır.

$$\sigma_{vm} = \sqrt{(\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_\theta + \sigma_\theta^2)} \quad (3.22)$$

Sınır koşulları diskin iç ve dış yarıçapına bağlı olarak Denklem (3.23)'de literatürdeki ifadesi ile serbest-serbest (fr-f) ve Denklem (3.24)'de ise sabit-serbest (fx-f) olarak seçilmiştir.

$$\sigma_r|_{r=r_i} = 0 \quad \text{ve} \quad \sigma_r|_{r=r_o} = 0 \quad (3.23)$$

$$u|_{r=r_i} = 0 \quad (3.24)$$

3.2.2. Deplasman ve Gerilmelerin TFM ile Sayısal özümü

Homojen olmayan yönetim denklemlerinin yapısı Denklem 3.20 ve 3.21'de gösterilmiştir. Burada F' ifadeler (Agarwal 1982)'ya göre alınan türevleri belirtir.

(n) mertebesinden ortak diferansiyel denklemlerin TFM (Tutuncu and Temel 2009) ile çözümü:

$$y(x) = y_o(x) + b_1 y_1(x) + \dots + b_n y_n(x) \quad (3.25)$$

Burada y_o homojen olmayan çözüm ve $y_1, \dots, y_n$ ise standartlaştırılmış (homojen) çözümü ifade etmektedir.

Denklem (3.20) ve (3.21) TFM uygulanarak elde edilen genel çözümü $[r_i, r_o]$ aralığı üzerinden şu şekilde verilir:

$$F(r) - F_0(r) = b_1 F_1(r) + b_2 F_2(r) \quad (3.26)$$

$$F'(r) - F'_0(r) = b_1 F'_1(r) + b_2 F'_2(r) \quad (3.27)$$

Denklem 3.26 ve (3.27)'nin TFM ile çözümü için dördüncü dereceden Runge-Kutta yöntemiyle (RK4) kullanılır. $r_i \leq r \leq r_o$ sınır aralığında adım aralığını $h = 0.001$ olarak hesaplanır. TFM sınır problemlerinin çözümünde kullanılması sebebi ile ilk olarak ikinci dereceden adi diferansiyel Denklem olan (3.21) no'lu denklemi birinci dereceden bir denkleme dönüştürmek gerekir. İkinci dereceden homojen olmayan adi diferansiyel denklemin homojen çözümünü birinci dereceden diferansiyel denkleme dönüştürmek için

$$F = Z_1 \quad F' = Z_2 \quad (3.28)$$

RK4'ün bir sonucu olarak b_1 ve b_2 , fr-f (3.23) ve fx-f (3.24) koşulları için aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$\begin{vmatrix} F_1(r_i) & F_2(r_i) \\ F_1(r_o) & F_2(r_o) \end{vmatrix} x \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -F_0(r_i) \\ -F_0(r_o) \end{vmatrix} \quad (3.29)$$

$$\begin{vmatrix} r_i F'_1(r_i) - v F_1(r_i) & r_i F'_2(r_i) - v F_2(r_i) \\ F_1(r_o) & F_2(r_o) \end{vmatrix} x \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} v F_0(r_i) - r_b F'_0(r_i) \\ -F_0(r_o) \end{vmatrix} \quad (3.30)$$

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

4.1. Önerilen Çözüm Yönteminin Doğrulanması

Homojen bir disk için mevcut çalışmanın notasyonları kullanılarak elde edilen analitik çözümler aşağıda verilmiştir. Elastisite modülü E ve Poisson oranı ν ile sembolize edilen çözümlerde radyal yer değiştirme şu şekildedir:

$$U = \frac{r}{\left[\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 - 1\right] \left[\frac{E(1+\nu)}{1-\nu^2}\right]} - \frac{r_0^2/r}{\left[\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 - 1\right] \left[\frac{E(\nu-1)}{1-\nu^2}\right]} \quad (4.1)$$

Radyal gerilme ifadesi

$$\sigma_r = \frac{1 - \left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 \left(\frac{r}{r_i}\right)^{-2}}{\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 - 1} \quad (4.2)$$

Teğetsel gerilme ifadesi ise

$$\sigma_\theta = \frac{1 + \left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 \left(\frac{r}{r_i}\right)^{-2}}{\left(\frac{r_0}{r_i}\right)^2 - 1} \quad (4.2)$$

Bir FDM'den yapılmış içi boş bir disk de Çizelge 4.1.'de disk boyutları ve malzeme özelliği gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Disk boyutları ve malzeme özellikleri

Parametre	Birim	Değer
r_i	mm	20
r_o	mm	100
E_0	GPa	200
α_0	1/°C	12x10 ⁻⁶
T_0	°C	300
ν	-	0.29

Çizelge 4.1.'de verilen disk boyutları ve malzeme özellikleri kullanılarak, kalınlık boyunca 9 noktada radyal, teğetsel gerilmeler ve radyal yer değiştirme değerleri hesaplanarak bu sonuçları analitik sonuçlarla karşılaştırmak için Çizelge 4.2.'de verilmiştir.

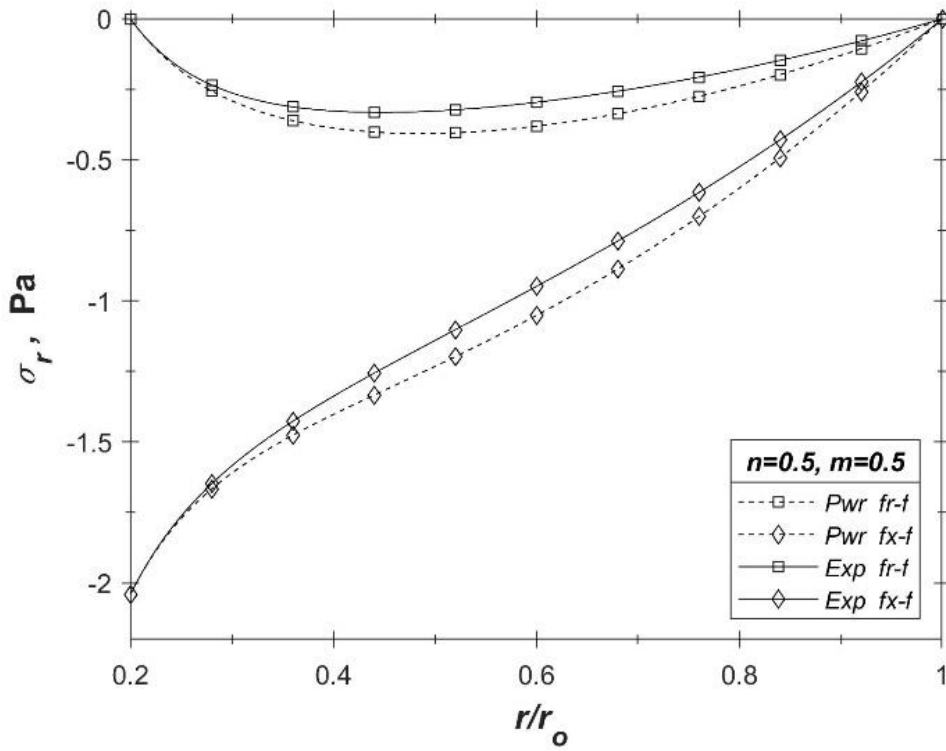
Çizelge 4.2. Homojen disk için analitik çözümlerle TFM sonuçlarının harmanlanması.

r/r_0	U		σ_r		σ_θ	
	TFM	Analitik	TFM	Analitik	TFM	Analitik
0.2	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	-1.0000000	-1.0000000
0.3	0.0001350	0.0001350	-0.2474747	-0.2474747	-0.5479797	-0.5479797
0.4	0.0003600	0.0003600	-0.2897727	-0.2897727	-0.3011362	-0.3011362
0.5	0.0006750	0.0006750	-0.2727272	-0.2727272	-0.1136362	-0.1136362
0.6	0.0010800	0.0010800	-0.2323232	-0.2323232	0.0505052	0.0505052
0.7	0.0015750	0.0015750	-0.1808905	-0.1808905	0.2036182	0.2036182
0.8	0.0021600	0.0021600	-0.1235795	-0.1235795	0.3508525	0.3508525
0.9	0.0028350	0.0028350	-0.0628505	-0.0628505	0.4946690	0.4946690
1.0	0.0036000	0.0036000	0.0000000	0.0000000	0.6363636	0.6363636

Çizelge 4.2. oluşturulurken FDM disk iç ve dış yarıçap arasında 9 nokta kullanılarak, homojen disk için yukarıdaki analitik karşılaştırma çözümlerinden elde edilen bulgular ile önerilen sayısal yöntem TFM ile listelenen nümerik sonuçların analitik çözümle iyi bir uyum içerisinde olduğu ve 9 kolokasyon noktasında en az yedi haneli hassasiyete sahip olduğu gözlemlenmiştir., analiz ederken TFM tarafından elde edilen iyi doğruluk ve etkinliği ortaya koymaktadır; Kalınlık boyunca sadece 9 noktada yapılan hesaplamalar kesin sayısal sonuçlar vermiştir.

4.2. Sayısal Sonuçlar ve Tartışma

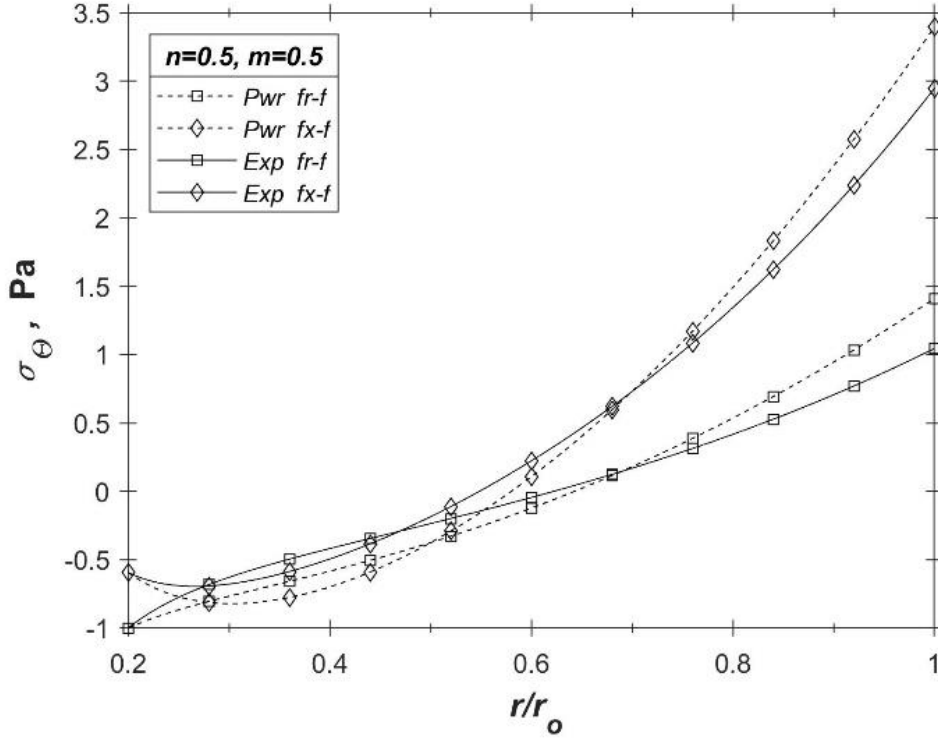
Şekil 4.1, hem Pwr hem de Exp'nin farklı sınır koşulları için kullanılan $n=0.5$, $m=0.5$ için termal yüklemenin neden olduğu yarıçapı boyunca FGM içi boş diskteki radyal gerilmeleri gösterir.



Şekil 4.1. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca farklı sınır koşulları altında ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp) ile sıcaklık etkisiyle radyal gerilmelerin dağılımı

Şekil 4.1. incelendiğinde FDM diskinin radyal gerilme dağılımı, fr-f sınır koşulları için hem Pwr hem de Exp formu alınarak elde edilen sonuçlardan diskin iç yarıçapından dış yarıçapına gidildikçe orta noktasına kadar arttığı buradan sonra azaldığı görülmektedir. Ayrıca diğer sınır koşulu olan fx-f için hem Pwr hem de Exp iç yarıçaptan dış yarıçapa gidildikçe ciddi oranda radyal gerilme değerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak radyal gerilme Pwr ve Exp formları kıyaslandığında Exp formda oluşan radyal gerilmenin iç cidardaki etkisinin dış cidara göre daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

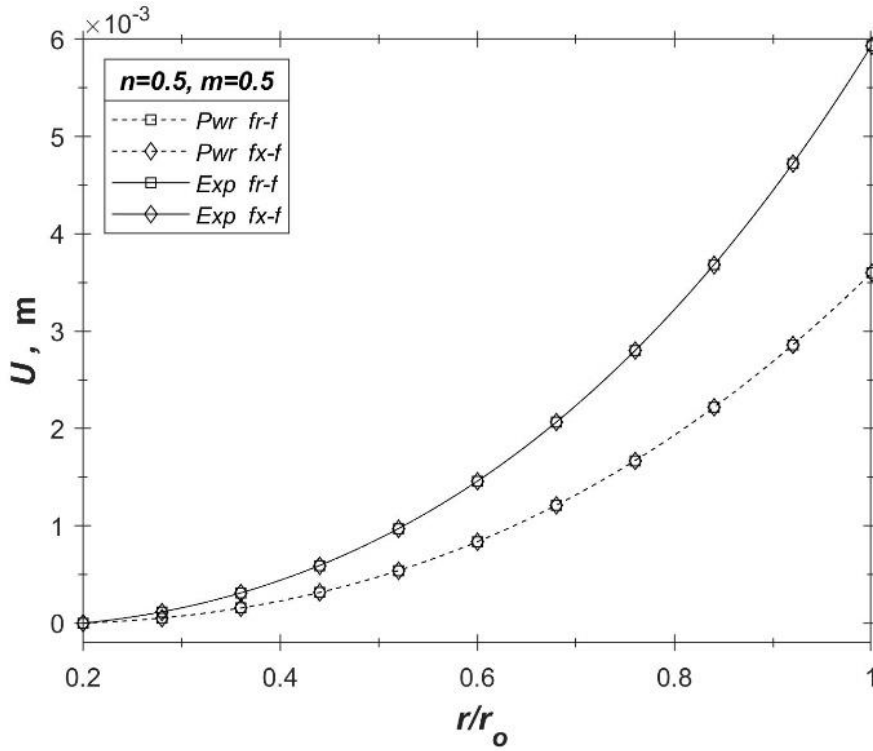
Şekil 4.2. hem Pwr hem de Exp'nin farklı sınır koşulları için kullanılan $n=0.5$, $m=0.5$ için termal yüklemenin neden olduğu yarıçapı boyunca FGM içi boş diskteki teğetsel gerilmeleri gösterir.



Şekil 4.2. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca farklı sınır koşulları altında ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp) ile sıcaklık etkisiyle teğetsel gerilmelerin dağılımı

Şekil 4.2. incelendiğinde FDM diskinin teğetsel gerilme dağılımı, her iki sınır koşulları için hem Pwr hem de Exp formu alınarak elde edilen sonuçlardan diskin iç yarıçapından dış yarıçapına gidildikçe arttığı görülmektedir. Ayrıca Pwr ve Exp formlar kıyaslandığında diskin dış cidarında en yüksek gerilme değerinin Pwr formun fx-f sınır koşulunda iken olduğu gözlemlenmiştir. Aynı sınır koşulları için Pwr ve Exp formlara göre incelendiğinde FDM diskin orta cidarına kadar farklılıklar gösterirken diskin dış cidarında Pwr forma ait teğetsel gerilme değerleri daha yüksektir. Buna ek olarak boyutsuz yarıçapın iç cidarında teğetsel gerilmeler negatif iken dış cidara doğru pozitif değerlere ulaşmakla beraber farklı sınır koşullarında ve aynı malzeme derecelendirme formları için boyutsuz yarıçapın hem orta noktasına hem de orta noktasından sonra bazı yarıçap değerlerinde çakıştığı görülmektedir.

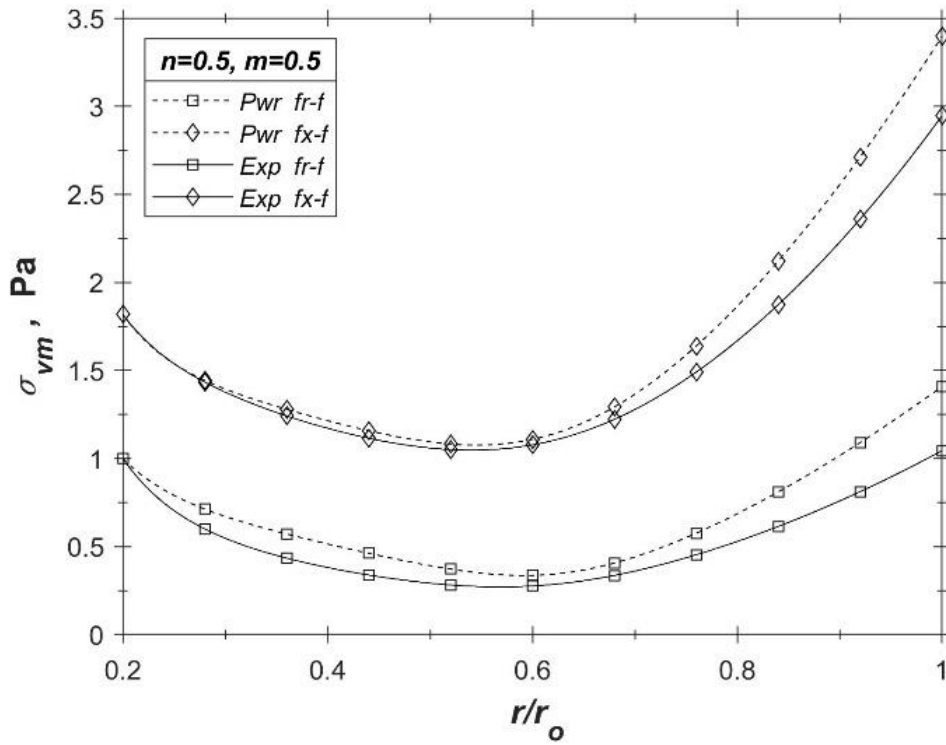
Şekil 4.3. hem Pwr hem de Exp'nin farklı sınır koşulları için kullanılan $n=0.5$, $m=0.5$ için termal yüklemenin neden olduğu yarıçapı boyunca FGM içi boş diskteki deplasman gösterir.



Şekil 4.3. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca farklı sınır koşulları altında ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp) ile sıcaklık etkisiyle deplasman dağılımı

Şekil 4.3. incelendiğinde FDM diskinin deplasman dağılımı, fr-f sınır koşulları için hem Pwr hem de Exp formu alınarak elde edilen sonuçlardan diskin iç yarıçapından dış yarıçapına gidildikçe arttığı görülmektedir. Ayrıca diğer her iki sınır koşulu için hem Pwr hem de Exp form durumunda deplasman dağılımı iç yarıçaptan dış yarıçapa gidildikçe birebir örtüştüğü gözlemlenmiştir. Buna ek olarak deplasman miktarı Pwr ve Exp formları kıyaslandığında Exp formda oluşan radyal deplasmanın daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

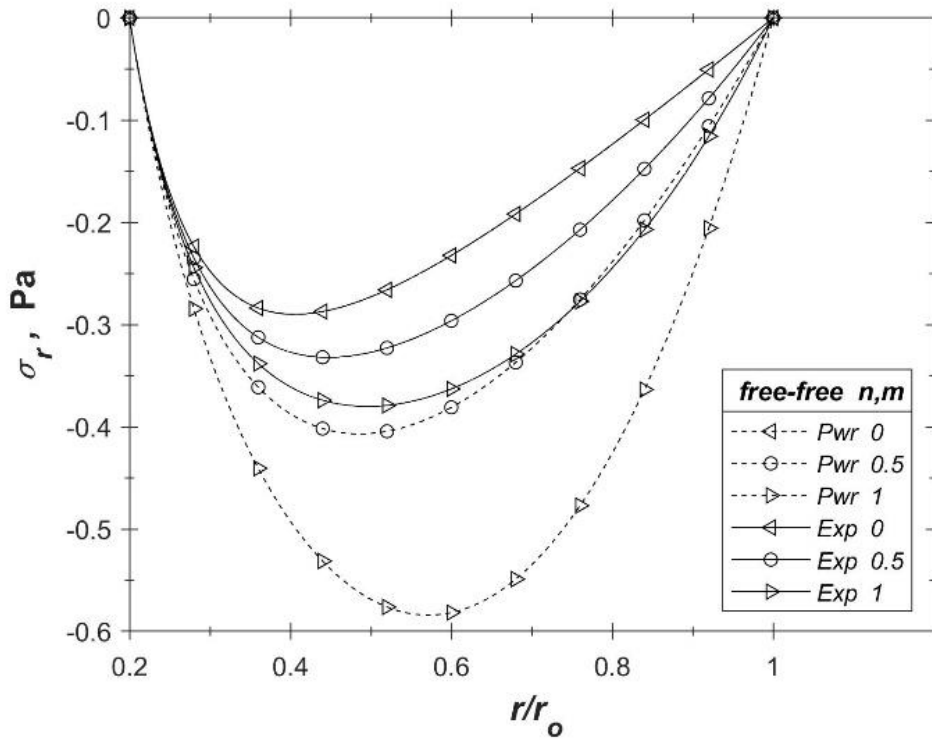
Şekil 4.4. hem Pwr hem de Exp'nin farklı sınır koşulları için kullanılan $n=0.5$, $m=0.5$ için termal yüklemenin neden olduğu yarıçapı boyunca FGM içi boş diskteki eşdeğer gerilmeyi gösterir.



Şekil 4.4. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca farklı sınır koşulları altında ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp) ile sıcaklık etkisiyle eşdeğer gerilme (Von-Misis) dağılımı

Şekil 4.4.'ten FDM diskinin eşdeğer gerilme dağılımı, gerek fr-f gerekse fx-f sınır koşulları için hem Pwr hem de Exp formu alınarak elde edilen sonuçlardan diskin iç yarıçapından dış yarıçapına gidildikçe cidar kalınlığını yarisına kadar azaldığı ve daha sonrasında dışa doğru gidildikçe arttığı görülmektedir. Ayrıca diğer her iki sınır koşulu için hem Pwr hem de Exp form durumunda cidar dış yarıçapına göre kıyaslandığında eşdeğer gerilme miktarı Pwr- fx-f sınır şartı için daha büyüktür. Buna ek olarak FDM içi boş diskin cidar kalınlığı boyunca Pwr seçildiğinde eşdeğer gerilme Exp forma göre daha yüksektir.

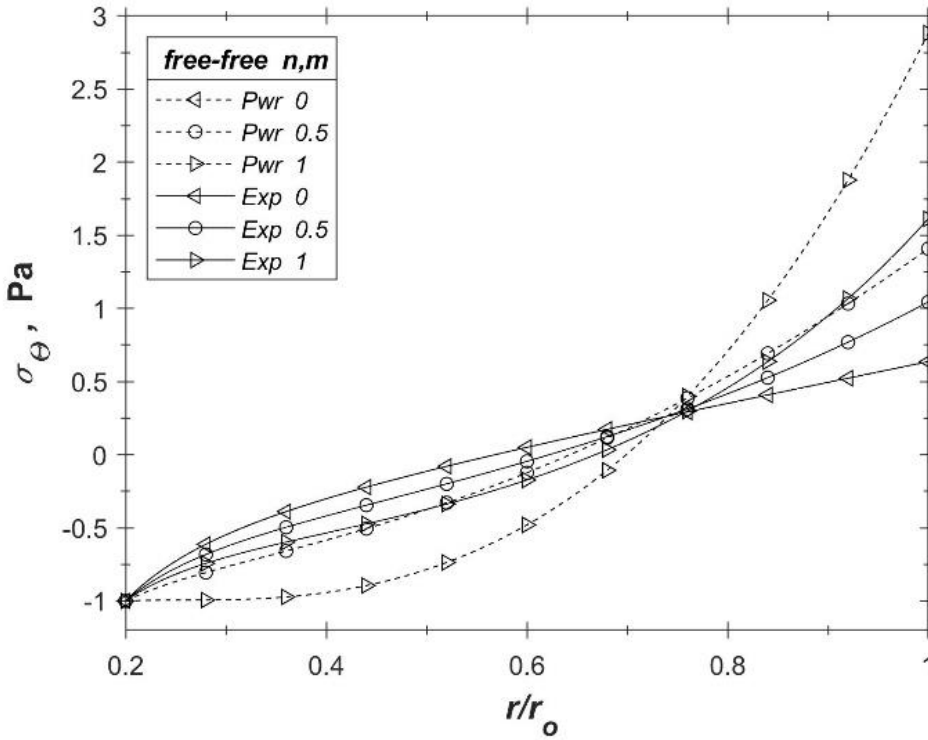
Şekil 4.5. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle radyal gerilme dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.5. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle radyal gerilme dağılımı

Şekil 4.5.'ten FDM içi boş diskin cidar kalınlığı boyunca gerilme dağılımı incelendiğinde, disk cidarının orta noktasına kadar gerilme miktarı hem Pwr hem de Exp form için azaldığı bu noktadan sonra cidarın dışına doğru tam tersi bir davranış sergileyerek arttığı gösterilmektedir. Cidar kalınlığının orta noktasında meydana gelen radyal gerilmelere bakıldığında Pwr formda oluşan gerilme miktarının Exp form ile kıyaslandığında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı koşullarda inhomojenlik parametrelerinin artırılmasıyla radyal gerilme miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

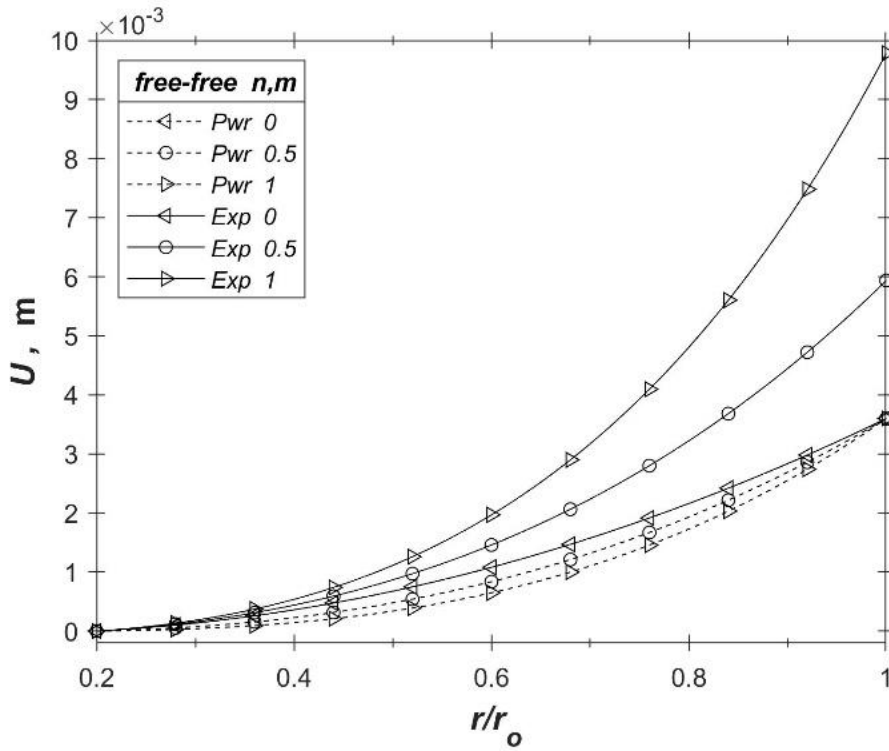
Şekil 4.6. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle teğetsel gerilme dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.6. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle teğetsel gerilme dağılımı

Şekil 4.6. incelendiğinde her iki form için FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca teğetsel gerilme miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca şekilde her iki form için $0,7 < r < 0,8$ arasında bir noktada bütün teğetsel gerilme değerinin sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak bahsi geçen bu noktaya kadar inhomojenlik parametresinin artırılmasıyla teğetsel gerilme miktarı azalırken, bu noktadan sonra tam tersi bir davranış sergileyerek diskin dış cidarında arttığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan Pwr ile Exp form kıyaslandığında $0,7 < r < 0,8$ arasındaki gerilmenin sabit kaldığı noktaya kadar Exp formda gerilme miktarının Pwr forma göre daha yüksek olduğu bu noktadan sonra ise Pwr form için teğetsel gerilme miktarının yükseldiği görülmektedir.

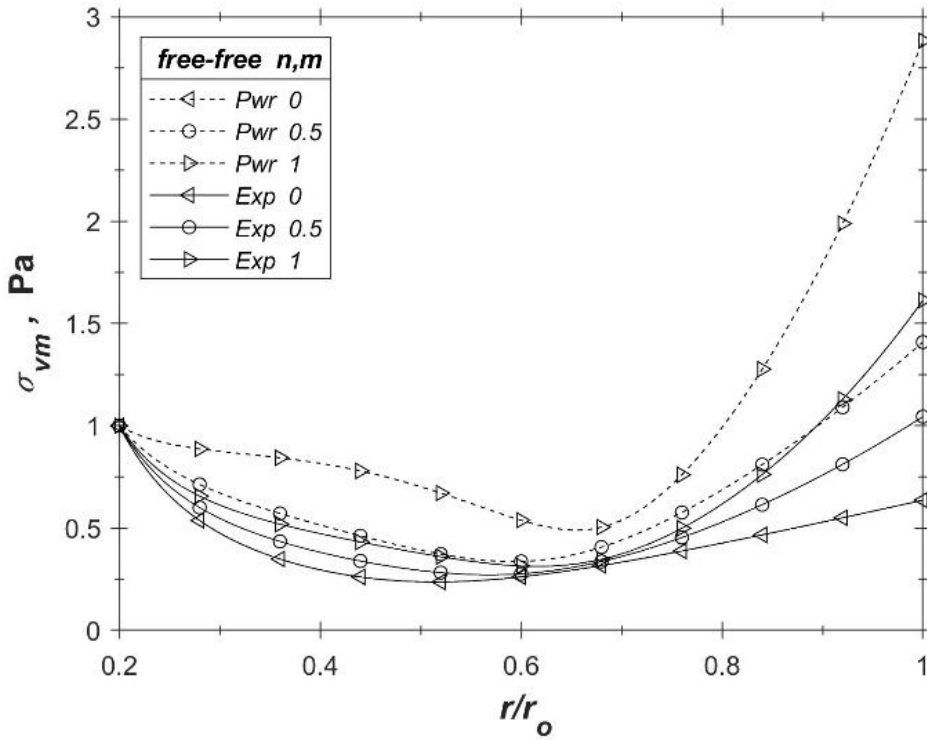
Şekil 4.7. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n,m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle deplasman dağılımını vermektedir.



Şekil 4.7. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle deplasman dağılımı

Şekil 4.7. incelendiğinde her iki form için FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca radyal deplasman miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca inhomojenlik parametresinin arttırılmasıyla boyutsuz yarıçapın orta noktasına bakıldığında Exp form için radyal deplasman miktarının arttığı buna karşın Pwr formda ise tam tersi bir davranış sergileyerek azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak Pwr form ile Exp form kıyaslandığında FDM diskin dış cidarında Pwr form için inhomojenlik parametresinin bütün değerleri için sabit kaldığı, Exp form için ise inhomojenlik parametresinin artmasıyla deplasman miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

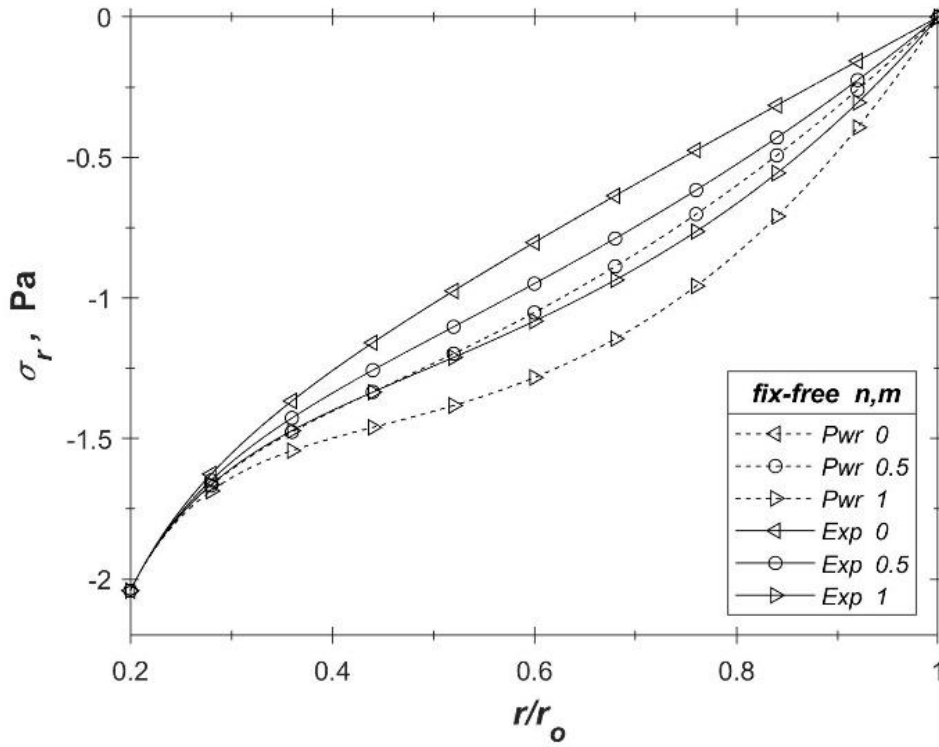
Şekil 4.8. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle eşdeğer gerilme (Von-Mises) dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.8. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle eşdeğer gerilme (Von-Misis) dağılımı

Şekil 4.8. incelendiğinde her iki form için FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap cidarının orta noktasına kadar eşdeğer gerilme miktarının azaldığı, bu noktadan sonra ise arttığı görülmektedir. Ayrıca inhomojenlik parametresinin artırılmasıyla boyutsuz yarıçap boyunca oluşan eşdeğer gerilme miktarının azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak Pwr form ile Exp form kıyaslandığında FDM diskin boyutsuz yarıçap boyunca Pwr form için daha yüksek gerilme değerlerine sahiptir. Diğer taraftan Exp form için boyutsuz yarıçap değerinin yaklaşık olarak 0,7’da sabit gerilme meydana getirdiği bu noktadan sonra cidar boyunca arttığı tespit edilmiştir.

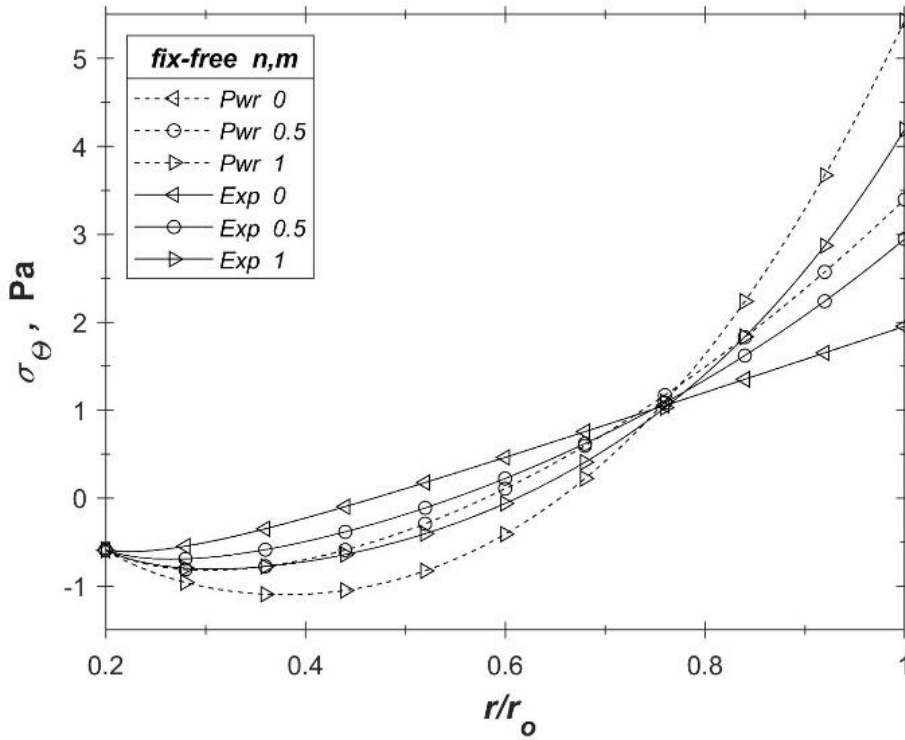
Şekil 4.9. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle radyal gerilme dağılımı gösterilmektedir.



Şekil 4.9. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle radyal gerilme dağılımı

Şekil 4.9.'dan FDM içi boş diskin cidar kalınlığı boyunca gerilme dağılımı incelendiğinde, disk iç cidarından dış cidarına doğru gidildikçe gerilme miktarı hem Pwr hem de Exp form için azaldığı anlaşılmaktadır. Cidar kalınlığının orta noktasında meydana gelen radyal gerilmelere bakıldığında her iki formda oluşan gerilme miktarında, inhomojenlik parametrelerinin değerlerinin artmasıyla mutlak değerce arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca aynı koşullarda Exp formda oluşan gerilme miktarlarının Pwr forma göre mutlak değer olarak düşük olduğu tespit edilmiştir.

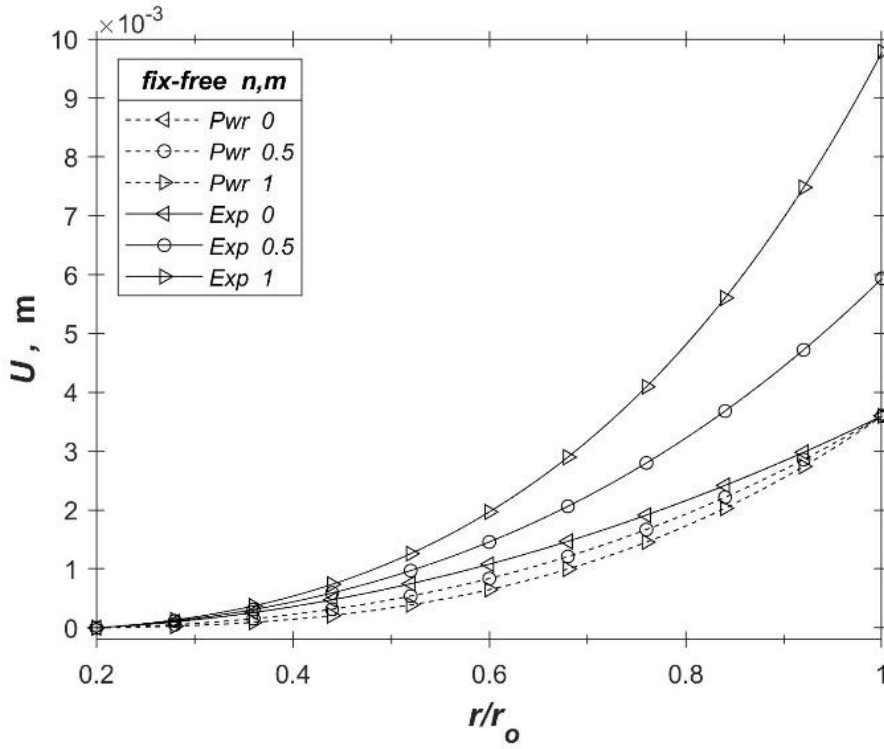
Şekil 4.10. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle teğetsel gerilme dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.10. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle teğetsel gerilme dağılımı

Şekil 4.10. incelendiğinde her iki form için FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca teğetsel gerilme miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca şekilde her iki form için $0,7 < r < 0,8$ arasında bir noktada bütün teğetsel gerilme değerinin sabit kaldığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak bahsi geçen bu noktaya kadar inhomojenlik parametresinin arttırılmasıyla teğetsel gerilme miktarı azalırken, bu noktadan sonra tam tersi bir davranış sergileyerek diskin dış cidarında arttığı tespit edilmiştir. Diğer taraftan Pwr ile Exp form kıyaslandığında $0,7 < r < 0,8$ arasındaki gerilmenin sabit kaldığı noktaya kadar Exp formda gerilme miktarının Pwr forma göre daha yüksek olduğu bu noktadan sonra ise Pwr form için teğetsel gerilme miktarının yükseldiği görülmektedir.

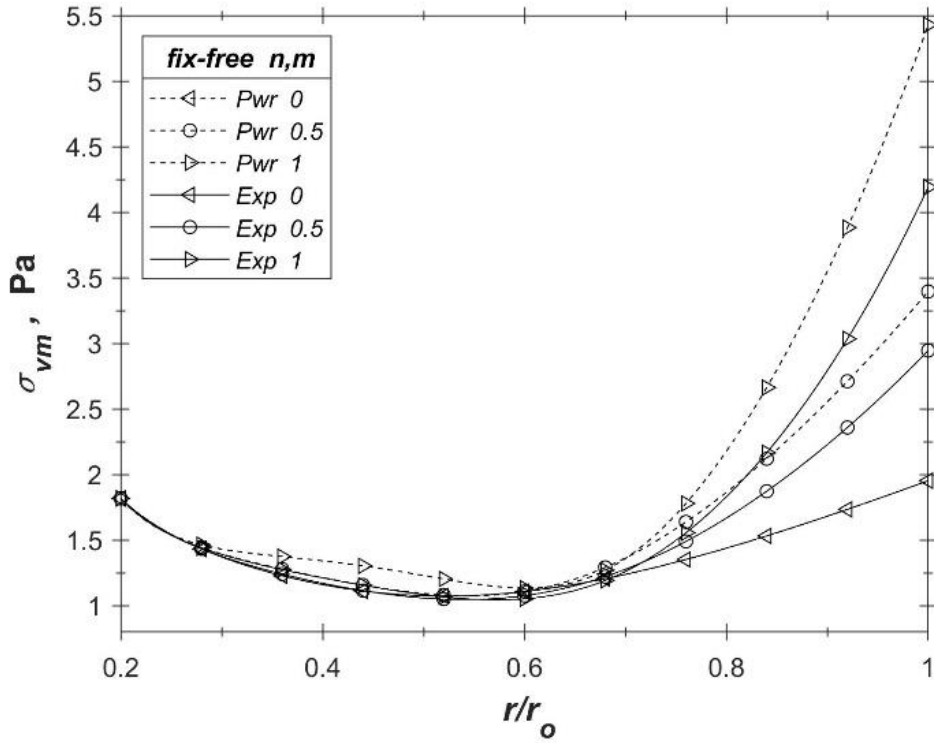
Şekil 4.11. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle deplasman dağılımını vermektedir.



Şekil 4.11. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle deplasman dağılımı

Şekil 4.11. incelendiğinde her iki form için FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca radyal deplasman miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca inhomojenlik parametresinin arttırılmasıyla boyutsuz yarıçapın orta noktasına bakıldığında Exp form için radyal deplasman miktarının arttığı buna karşın Pwr formda ise tam tersi bir davranış sergileyerek azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak Pwr form ile Exp form kıyaslandığında FDM diskin dış cidarında Pwr form için inhomojenlik parametresinin bütün değerleri için sabit kaldığı, Exp form için ise inhomojenlik parametresinin artmasıyla deplasman miktarının azaldığı tespit edilmiştir.

Şekil 4.12. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca fix-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle eşdeğer gerilme (Von-Mises) dağılımını göstermektedir.



Şekil 4.12. FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap boyunca free-free sınır koşulu ve malzeme derecelendirilmesinin her iki formu (Pwr, Exp), inhomojenlik parametrelerinin (n, m) farklı değerleri için sıcaklık etkisiyle eşdeğer gerilme (Von-Mises) dağılımı

Şekil 4.12. incelendiğinde her iki form için FDM içi boş diskteki boyutsuz yarıçap cidarının orta noktasına kadar eşdeğer gerilme miktarının azaldığı, bu noktadan sonra ise arttığı görülmektedir. Ayrıca inhomojenlik parametresinin artırılmasıyla boyutsuz yarıçap boyunca oluşan eşdeğer gerilme miktarının azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak Pwr form ile Exp form kıyaslandığında FDM diskin boyutsuz yarıçap boyunca Pwr form için daha yüksek gerilme değerlerine sahiptir. Diğer taraftan Exp form için boyutsuz yarıçap değerinin yaklaşık olarak 0,7’da sabit gerilme meydana getirdiği bu noktadan sonra cidar boyunca arttığı tespit edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, termo-mekanik yükleme nedeniyle FDM'lerden yapılmış içi boş diskin bir hem fr-f hem de fx-f sınır koşulları ile içi boş disk için termo-elastik gerilmeler sayısal çözümü ele alınmıştır. FDM diski için elastisite modülü ve termal büyüme katsayısının radyal yönde ve üstel olarak değişen olduğu varsayılmıştır. Bu durum sistemi idare eden diferansiyel denklemin değişken katsayılı olmasına sebep olmakla birlikte analitik olarak sınırlı durumlarda çözümler yapılabilmektedir. Sistemin sayısal, güvenilirliği ve hassasiyeti yüksek olan TFM ile çözüm yapılmıştır. Analitik çözümlerin mümkün olduğu ve daha önceden yapılmış olan homojen durum için incelendiğinde mevcut yöntemin doğruluğu gösterilmiştir. çözümü ve sayısal sonuçlar sunulmuştur. Bu çalışmadaki sayısal sonuçlar değerlendirildiğinde, sonuçlar kısaca aşağıda özetlenmiştir:

- n , m benzer değeri için, içi boş FDM diskin Pwr fonksiyon profili ve Exp fonksiyon profili diski fr-f ve fx-f sınır koşullarında en düşük olduğunda en yüksektir.
- Radyal gerilim dağılımı incelendiğinde, fr-f durum için gerilme merkezi kısımlarda yüksek olmasına rağmen, diskin iç ve dış yüzeylerinde sıfırdır.
- Teğetsel gerilme dağılımına bakıldığında FDM diskin ele alınan tüm profil ve gradyan parametreleri için iç cidarlarında çekme dış cidarlarda basma şeklinde olduğu gözlemlenmiştir.
- Yer değiştirme bileşenleri, FDM diskinin iç cidarlarında daha düşüktür ve dış cidarlarında daha yüksek değerlere sahiptir.
- Eşdeğer gerilme bileşeni, FDM diskinin iç cidarlarında çekme değerlerine sahiptir ve tüm profiller ve gradyan parametreleri için sabitken ortaya doğru azalırken dış cidarlarında artan bir gerilme değerine sahiptir.
- FDM diskinin fr-f ve fx-f sınır koşulları altında gerilme ve yer değiştirme davranışındaki farklılıklar gözlemlenebilir.
- Bazı uygulamalarda, termal yüklerin etkisi, atalet kuvvetleriyle ilgili olarak önemsizdir, ancak diğerleri için eşit veya daha büyük öneme sahip olabilir. Bu çalışmada önerilen çözüm yöntemi ile belirli ürünler için sağlam bir fikir edinilmesine yardımcı olabilir. Ayrıca FDM disk gradyan parametresi tasarım öncesi yardımcı olsa da gerilmelerin belirlenmesinde önemli bir parametre olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

- Agarwal, R. P. 1982. "On the Method of Complementary Functions for Nonlinear Boundary-Value Problems." *Journal of Optimization Theory and Applications* 36(1):139–44.
- Akgöz, Bekir, and Ömer Civalek. 2013. "Longitudinal Vibration Analysis of Strain Gradient Bars Made of Functionally Graded Materials (FGM)." *Composites Part B: Engineering* 55:263–68.
- Alagöz, H., M. Gülgeç, and A. Konez. 2004. "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler ve Kullanım Alanları." *Mühendis ve Makina* 532.
- Alshorbagy, Amal E., Mohamed A. Eltaher, and FF2677954 Mahmoud. 2011. "Free Vibration Characteristics of a Functionally Graded Beam by Finite Element Method." *Applied Mathematical Modelling* 35(1),412–25.
- Apatay, Tunç, and Ahmet N. Eraslan. 2003. "Parabolik Kalınlıklı Dönen Disklerin Elastik Deformasyonu: Analitik Çözümler." *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 18(2).
- Arnab, B., S. M. R. Islam, A. A. Khalak, and A. M. Afsar. 2014. "Finite Difference Solution to Thermoelastic Field in a Thin Circular FGM Disk with a Concentric Hole." *Procedia Engineering* 90,193–98.
- Aslan, Timuçin Alp, Ahmad Reshad Noori, and Beytullah Temel. 2018. "A Unified Approach for Out-of-Plane Forced Vibration of Axially Functionally Graded Circular Rods." *European Mechanical Science* 2(2):37–45.
- Bayat, M., B. B. Sahari, M. Saleem, E. Dezvareh, and A. H. Mohazzab. 2011. "Analysis of Functionally Graded Rotating Disks with Parabolic Concave Thickness Applying an Exponential Function and the Mori-Tanaka Scheme." P. 12005 in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 17, IOP Publishing.
- Bayat, Mehdi, M. Saleem, B. B. Sahari, A. M. S. Hamouda, and E. Mahdi. 2008. "Analysis of Functionally Graded Rotating Disks with Variable Thickness." *Mechanics Research Communications* 35(5):283–309.
- Çallioğlu, Hasan, Numan Behlül Bektaş, and Metin Sayer. 2011. "Stress Analysis of Functionally Graded Rotating Discs: Analytical and Numerical Solutions." *Acta Mechanica Sinica* 27(6),950–55.
- Çallioğlu, Hasan, Metin Sayer, and Ersin Demir. 2015. "Elastic–Plastic Stress Analysis of Rotating Functionally Graded Discs." *Thin-Walled Structures* 94,38–44.
- Çallioğlu, Hasan, Muzaffer Topcu, and Ali Rıza Tarakçılar. 2006. "Elastic–Plastic Stress Analysis of an Orthotropic Rotating Disc." *International Journal of Mechanical Sciences* 48(9),985–90.
- Çelebi, Kerimcan, Yarımpabuc Durmuş, and Tarık Baran. 2018. "Forced Vibration Analysis of Inhomogeneous Rods with Non-Uniform Cross-Section." *Journal of Engineering*

Research 6(3).

- Celebi, Kerimcan, Durmus Yarimpabuc, and Naki Tutuncu. 2018. "Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams Using Complementary Functions Method." *Archive of Applied Mechanics* 88(5),729–39.
- Chen, Jiangying, Haojiang Ding, and Weiqiu Chen. 2007. "Three-Dimensional Analytical Solution for a Rotating Disc of Functionally Graded Materials with Transverse Isotropy." *Archive of Applied Mechanics* 77(4):241–51.
- Delale, F., and F. Erdogan. 1988. "On the Mechanical Modeling of the Interfacial Region in Bonded Half-Planes."
- Durodola, J. F., and J. E. Adlington. 1997. "Functionally Graded Material Properties for Disks and Rotors." Pp. 1199–1206 in *Key Engineering Materials*. Vol. 127. Trans Tech Publ.
- Durodola, J. F., and O. Attia. 2000. "Deformation and Stresses in Functionally Graded Rotating Disks." *Composites Science and Technology* 60(7),987–95.
- Eraslan, A. N., and T. Akis. 2006. "On the Plane Strain and Plane Stress Solutions of Functionally Graded Rotating Solid Shaft and Solid Disk Problems." *Acta Mechanica* 181(1),43–63.
- Eraslan, Ahmet N., and Hakan Argeso. 2005. "On the Application of von Mises' Yield Criterion to a Class of Plane Strain Thermal Stress Problems." *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 29(2):113–28.
- Eraslan, Ahmet N., and Yusuf Orcan. 2004. "Thermoplastic Response of a Linearly Hardening Cylinder Subjected to Nonuniform Heat Source and Convective Boundary Condition." *Mechanics Based Design of Structures and Machines* 32(2),133–64.
- Ersan, Çiğdem. 2008. "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Disklerde Termal Gerilme Analizi."
- Fukui, Yasuyoshi, Noboru Yamanaka, and Kenji Wakashima. 1993. "The Stresses and Strains in a Thick-Walled Tube for Functionally Graded Material under Uniform Thermal Loading." *JSME International Journal. Ser. A, Mechanics and Material Engineering* 36(2),156–62.
- Go, J., A. M. Afsar, and J. I. Song. 2010. "Analysis of Thermoelastic Characteristics of a Rotating FGM Circular Disk by Finite Element Method." *Advanced Composite Materials* 19(2):197–213.
- Gruttmann, F., and W. Wagner. 2001. "Shear Correction Factors in Timoshenko's Beam Theory for Arbitrary Shaped Cross-Sections." *Computational Mechanics* 27(3),199–207.
- Güven, U. 1992. "Elastic-Plastic Stresses in a Rotating Annular Disk of Variable Thickness and Variable Density." *International Journal of Mechanical Sciences* 34(2),133–38.
- Güven, U. 1998. "Elastic-Plastic Stress Distribution in a Rotating Hyperbolic Disk with Rigid Inclusion." *International Journal of Mechanical Sciences* 40(1),97–109.

- Hassani, A., M. H. Hojjati, E. Mahdavi, R. A. Alashti, and G. Farrahi. 2012. "Thermo-Mechanical Analysis of Rotating Disks with Non-Uniform Thickness and Material Properties." *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 98,95–101.
- Hein, Helle, and Lidia Feklistova. 2011. "Free Vibrations of Non-Uniform and Axially Functionally Graded Beams Using Haar Wavelets." *Engineering Structures* 33(12),3696–3701.
- Horgan, C. O., and A. M. Chan. 1999a. "The Pressurized Hollow Cylinder or Disk Problem for Functionally Graded Isotropic Linearly Elastic Materials." *Journal of Elasticity* 55(1),43–59.
- Horgan, C. O., and A. M. Chan. 1999b. "The Stress Response of Functionally Graded Isotropic Linearly Elastic Rotating Disks." *Journal of Elasticity* 55(3),219–30.
- Huang, Yong, and Xian-Fang Li. 2010. "A New Approach for Free Vibration of Axially Functionally Graded Beams with Non-Uniform Cross-Section." *Journal of Sound and Vibration* 329(11),2291–2303.
- Jabbari, M., S. Sohrabpour, and M. R. Eslami. 2002. "Mechanical and Thermal Stresses in a Functionally Graded Hollow Cylinder Due to Radially Symmetric Loads." *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 79(7),493–97.
- Jahromi, B. Haghpanah, A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, and A. Vaziri. 2010. "Autofrettage of Layered and Functionally Graded Metal–Ceramic Composite Vessels." *Composite Structures* 92(8),1813–22.
- Jahromi, B. Haghpanah, G. H. Farrahi, M. Maleki, H. Nayeb-Hashemi, and A. Vaziri. 2009. "Residual Stresses in Autofrettaged Vessel Made of Functionally Graded Material." *Engineering Structures* 31(12),2930–35.
- Jing, Li-Long, Ping-Jian Ming, Wen-Ping Zhang, Li-Rong Fu, and Yi-Peng Cao. 2016. "Static and Free Vibration Analysis of Functionally Graded Beams by Combination Timoshenko Theory and Finite Volume Method." *Composite Structures* 138,192–213.
- Kadoli, Ravikiran, Kashif Akhtar, and N. Ganesan. 2008. "Static Analysis of Functionally Graded Beams Using Higher Order Shear Deformation Theory." *Applied Mathematical Modelling* 32(12),2509–25.
- Ke, Liao-Liang, Jie Yang, and Sritawat Kitipornchai. 2010. "An Analytical Study on the Nonlinear Vibration of Functionally Graded Beams." *Meccanica* 45(6),743–52.
- Khan, Ateeb Ahmad, M. Naushad Alam, and Mustafa Wajid. 2016. "Finite Element Modelling for Static and Free Vibration Response of Functionally Graded Beam." *Latin American Journal of Solids and Structures* 13(4),690–714.
- Khorsand, Mohammad, and Youhong Tang. 2018. "Design Functionally Graded Rotating Disks under Thermoelastic Loads: Weight Optimization." *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 161,33–40.
- Koizumi, M. 1993. "The Concept of FGM." *Ceramic Transactions* 34,3–10.

- Konez, A., H. Alagöz, S. Topal, and M. Gülgeç. 2005. "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretim Teknikleri ve Kullanım Alanları." *Mühendis ve Makine* 46(547),1–25.
- Kordkheili, S. A. Hosseini, and R. Naghdabadi. 2007. "Thermoelastic Analysis of a Functionally Graded Rotating Disk." *Composite Structures* 79(4),508–16.
- Kumar, Saurabh, Anirban Mitra, and Haraprasad Roy. 2015. "Geometrically Nonlinear Free Vibration Analysis of Axially Functionally Graded Taper Beams." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 18(4),579–93.
- Li, X. F., Y. A. Kang, and J. X. Wu. 2013. "Exact Frequency Equations of Free Vibration of Exponentially Functionally Graded Beams." *Applied Acoustics* 74(3),413–20.
- Liew, K. M., S. Kitipornchai, XZ1087 Zhang, and C. W. Lim. 2003. "Analysis of the Thermal Stress Behaviour of Functionally Graded Hollow Circular Cylinders." *International Journal of Solids and Structures* 40(10),2355–80.
- Lü, C. F., Chee Wah Lim, and W. Q. Chen. 2009. "Semi-analytical Analysis for Multi-directional Functionally Graded Plates: 3-D Elasticity Solutions." *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79(1):25–44.
- Lubarda, Vlado A. 2012. "On Pressurized Curvilinearly Orthotropic Circular Disk, Cylinder and Sphere Made of Radially Nonuniform Material." *Journal of Elasticity* 109(2),103–33.
- Mortensen, A., and S. Suresh. 1995. "Functionally Graded Metals and Metal-Ceramic Composites: Part 1 Processing." *International Materials Reviews* 40(6),239–65.
- Murthy, D. N. S., and A. N. Sherbourne. 1970. "Elastic Stresses in Anisotropic Disks of Variable Thickness." *International Journal of Mechanical Sciences* 12(7),627–40.
- Naghdbadi, R., and S. A. Hosseini Kordkheili. 2005. "A Finite Element Formulation for Analysis of Functionally Graded Plates and Shells." *Archive of Applied Mechanics* 74(5),375–86.
- Nejad, Mohammad Zamani, Majid Abedi, Mohammad Hassan Lotfian, and Mehdi Ghannad. 2013. "Elastic Analysis of Exponential FGM Disks Subjected to Internal and External Pressure." *Central European Journal of Engineering* 3(3):459–65.
- Noda, Naotake. 1999. "Thermal Stresses in Functionally Graded Materials." *Journal of Thermal Stresses* 22(4–5):477–512.
- Obata, Yoshihiro, and Naotake Noda. 1994. "Steady Thermal Stresses in a Hollow Circular Cylinder and a Hollow Sphere of a Functionally Gradient Material." *Journal of Thermal Stresses* 17(3),471–87.
- Orcan, Y., and Ahmet Nedim Eraslan. 2001. "Thermal Stresses in Elastic-Plastic Tubes with Temperature-Dependent Mechanical and Thermal Properties." *Journal of Thermal Stresses* 24(11),1097–1113.
- Orçan, Yusuf, and Müfit Gülgeç. 2001. "Elastic-Plastic Deformation of a Tube with Free

- Ends Subjected to Internal Energy Generation.” *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences* 25(6),601–10.
- Özarslan, Ozan. 2011. “Fonksiyonel Derecelendirilmiş Bir Plâgın Analizi.”
- Peng, X-L, and X. F. Li. 2012. “Elastic Analysis of Rotating Functionally Graded Polar Orthotropic Disks.” *International Journal of Mechanical Sciences* 60(1),84–91.
- Peng, Xu-long, and Xian-fang Li. 2009. “Thermoelastic Analysis of Functionally Graded Annulus with Arbitrary Gradient.” *Applied Mathematics and Mechanics* 30(10),1211–20.
- Peng, Xu-Long, and Xian-Fang Li. 2012. “Effects of Gradient on Stress Distribution in Rotating Functionally Graded Solid Disks.” *Journal of Mechanical Science and Technology* 26(5),1483–92.
- Piren, Caner. 2012. “Çift Yönlü Fonksiyonel Derecelendirilmiş Plakların Üç Boyutlu Serbest Titreşim Analizi.”
- Rajasekaran, S. 2013. “Buckling and Vibration of Axially Functionally Graded Nonuniform Beams Using Differential Transformation Based Dynamic Stiffness Approach.” *Meccanica* 48(5),1053–70.
- Reddy, T. Yella, and H. Srinath. 1974. “Elastic Stresses in a Rotating Anisotropic Annular Disk of Variable Thickness and Variable Density.” *International Journal of Mechanical Sciences* 16(2),85–89.
- Roberts, S. M., and J. S. Shipman. 1979. “Fundamental Matrix and Two-Point Boundary-Value Problems.” *Journal of Optimization Theory and Applications* 28(1),77–88.
- Sharma, J. N., Dinkar Sharma, and Sheo Kumar. 2013. “Vibration Analysis of a Rotating FGM Thermoelastic Axisymmetric Circular Disk Using FEM.” *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics* 14(3),262–70.
- Sharma, Sanjeev, and Yadav Sanehlata. 2013. “Finite Difference Solution of Elastic-Plastic Thin Rotating Annular Disk with Exponentially Variable Thickness and Exponentially Variable Density.” *Journal of Materials* 2013.
- Şimşek, M. 2009. “Static Analysis of a Functionally Graded Beam under a Uniformly Distributed Load by Ritz Method.” *International Journal of Engineering and Applied Sciences* 1(3):1–11.
- Şimşek, M., T. Kocatürk, and Ş. D. Akbaş. 2012. “Dynamic Behavior of an Axially Functionally Graded Beam under Action of a Moving Harmonic Load.” *Composite Structures* 94(8),2358–64.
- Şimşek, Mesut. 2010a. “Fundamental Frequency Analysis of Functionally Graded Beams by Using Different Higher-Order Beam Theories.” *Nuclear Engineering and Design* 240(4),697–705.
- Şimşek, Mesut. 2010b. “Non-Linear Vibration Analysis of a Functionally Graded Timoshenko Beam under Action of a Moving Harmonic Load.” *Composite Structures*

92(10),2532–46.

- Şimşek, Mesut, and T. Kocatürk. 2009. “Free and Forced Vibration of a Functionally Graded Beam Subjected to a Concentrated Moving Harmonic Load.” *Composite Structures* 90(4),465–73.
- Singh, Navneet, Hitesh Uppal, and Retaish Uppal. 2012. “FGM Rotating Disc Fabricate by Al/Al₂O₃.” *Marine Engineering* 51(2),145–54.
- Sugano, Yoshihiro, Ryoichi Chiba, Koichi Hirose, and Kazuhiro Takahashi. 2004. “Material Design for Reduction of Thermal Stress in a Functionally Graded Material Rotating Disk.” *JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering* 47(2),189–97.
- Tanigawa, Y., T. Akai, R. Kawamura, and N. Oka. 1996. “Transient Heat Conduction and Thermal Stress Problems of a Nonhomogeneous Plate with Temperature-Dependent Material Properties.” *Journal of Thermal Stresses* 19(1),77–102.
- Tanigawa, Yoshinobu. 1995a. “One-Dimensional Transient Heat Conduction and Associated Thermal Stress Problems of a Plate with Nonhomogeneous Material Properties.” *Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng.* 61(584),607.
- Tanigawa, Yoshinobu. 1995b. “Some Basic Thermoelastic Problems for Nonhomogeneous Structural Materials.”
- Tanigawa, Yoshinobu, Munehisa Matsumoto, and Tomikazu Akai. 1997. “Optimization of Material Composition to Minimize Thermal Stresses in Nonhomogeneous Plate Subjected to Unsteady Heat Supply.” *JSME International Journal. Ser. A, Mechanics and Material Engineering* 40(1):84–93.
- Tunca, Ömer Burak. 2009. “Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme Ve Sandviç Plakların Patlama Yüğü Altındaki Titreşim Analizi.”
- Tutuncu, Naki, and Beytullah Temel. 2009. “A Novel Approach to Stress Analysis of Pressurized FGM Cylinders, Disks and Spheres.” *Composite Structures* 91(3):385–90.
- Ugural, Ansel C., and Saul K. Fenster. 2003. *Advanced Strength and Applied Elasticity*. Pearson education.
- Vel, Senthil S., and R. C. Batra. 2003. “Three-Dimensional Analysis of Transient Thermal Stresses in Functionally Graded Plates.” *International Journal of Solids and Structures* 40(25),7181–96.
- Vullo, Vincenzo, and Francesco Vivio. 2008. “Elastic Stress Analysis of Non-Linear Variable Thickness Rotating Disks Subjected to Thermal Load and Having Variable Density along the Radius.” *International Journal of Solids and Structures* 45(20),5337–55.
- Xiang, Hongjun, Zhifei Shi, and Taotao Zhang. 2006. “Elastic Analyses of Heterogeneous Hollow Cylinders.” *Mechanics Research Communications* 33(5):681–91.
- Yildirim, Vebil. 1997. “Free Vibration Analysis of Non-cylindrical Coil Springs by

- Combined Use of the Transfer Matrix and the Complementary Functions Methods.” *Communications in Numerical Methods in Engineering* 13(6),487–94.
- Yilmaz, Yasin, Zekeriya Girgin, and Savas Evran. 2013. “Buckling Analyses of Axially Functionally Graded Nonuniform Columns with Elastic Restraint Using a Localized Differential Quadrature Method.” *Mathematical Problems in Engineering* 2013.
- You, L. H., Y. Y. Tang, J. J. Zhang, and C. Y. Zheng. 2000. “Numerical Analysis of Elastic–Plastic Rotating Disks with Arbitrary Variable Thickness and Density.” *International Journal of Solids and Structures* 37(52),7809–20.
- Zenkour, A. M. 2007. “Elastic Deformation of the Rotating Functionally Graded Annular Disk with Rigid Casing.” *Journal of Materials Science* 42(23),9717–24.
- Zenkour, A. M. 2009. “Stress Distribution in Rotating Composite Structures of Functionally Graded Solid Disks.” *Journal of Materials Processing Technology* 209(7),3511–17.
- Zenkour, Ashraf M. 2005. “Analytical Solutions for Rotating Exponentially-Graded Annular Disks with Various Boundary Conditions.” *International Journal of Structural Stability and Dynamics* 5(04),557–77.
- Zenkour, Ashraf M., and Daoud S. Mashat. 2010. “Analytical and Numerical Solutions for a Rotating Annular Disk of Variable Thickness.” *Applied Mathematics* 1(5):431.
- Zenkour, Ashraf M., and Daoud S. Mashat. 2011. “Stress Function of a Rotating Variable-Thickness Annular Disk Using Exact and Numerical Methods.” *Engineering* 3(4),422.
- Zhong, Zheng, and Tao Yu. 2007. “Analytical Solution of a Cantilever Functionally Graded Beam.” *Composites Science and Technology* 67(3–4),481–88.

ÖZGEÇMİŞ

ADI SOYADI : Ayşegül ÖZGÜR

BİLİMSEL FAALİYETLER

1. ÖZGÜR Ayşegül, AYDIN Kutay, KELEŞ İbrahim (2020). A Practical Jointed Approach to Thermal Stress Analysis of FGM Disc. International Journal of Engineering and Applied Sciences, 12(3), 111-124., Doi: 10.24107/ijeas.809300 (Uluslararası) (Hakemli)

