

**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ DİSKLERDE
TERMAL GERİLME ANALİZİ**

**Pamukkale Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Çiğdem ERSAN

Danışman: Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU

**Aralık, 2008
DENİZLİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

Çiğdem ERSAN tarafından Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU yönetiminde hazırlanan “**Fonksiyonel Derecelendirilmiş Disklerde Termal Gerilme Analizi**” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU
Jüri Başkanı (Danışman)



Doç. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ
Jüri Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Salih YILMAZ
Jüri Üyesi

Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun / /
tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mehmet Ali SARIGÖL
Müdür

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğini beyan ederim.

İmza

:



Öğrenci Adı Soyadı

:

ığdem ERSAN

TEŞEKKÜR

Bu çalıőmamda benden desteğini esirgemeyen, konunun tespitinden çalışmanın hazırlanmasına kadar olan surete yardım ve katkılarıyla beni yonlendiren sayın hocam Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU'ya, manevi destekleri için arkadaşlarıma, aileme ve çalışma arkadaşlarıma teşekkür ederim.

ÖZET

FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ DİSKLERDE TERMAL GERİLME ANALİZİ

Ersan, Çiğdem
Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği ABD
Tez Yöneticisi: Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU

Aralık 2008, 55 Sayfa

Modern teknoloji ile artan özel karakterlere sahip malzeme ihtiyacını, bilinen alaşımlar, kaplamalar ve kompozitler karşılayamaz hale gelmiştir. Özellikle uzay taşıtlarında ve yüksek ısıya maruz uygulamalarda gereksinim duyulan, yüksek mukavemet ve termal şoklara dayanıklı, yüksek ısıl dirence sahip olma özelliklerini sağlayan homojen bir malzeme olmaması, bu özellikleri bir arada bulunduran malzeme kombinasyonlarına yani Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme (FDM) teknolojisine yönelmeye sebep olmuştur.

Bu çalışmada fonksiyonel derecelendirilmiş disklerin termal yük altındaki davranışları analitik ve nümerik analiz yöntemiyle incelenmiştir. FDM disk her iki yöntem ile aynı termal yük ve sınır koşullarında incelenerek sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Fonksiyonel derecelendirilmiş diskler, Termal Analiz, Tabakalı Diskler

Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU
Doç. Dr. Numan Behlül BEKTAŞ
Yrd. Doç. Dr. Salih YILMAZ

ABSTRACT**THERMAL STRESS ANALYSIS OF FUNCTIONAL GRADED DISCS**

Ersan, Cigdem
M. Sc. Thesis in Mechanical Engineering
Supervisor: Prof. Dr. Muzaffer TOPCU

December 2008, 55 Pages

Known alloys, coatings and laminated composites cannot meet the demand of material exigency that has special character with modern technology. Especially, in spacecrafts and applications exposed to high heat, absence of a homogeneous material that supply properties of having high thermal resistance, high strength and durable to thermal shocks has caused going towards material combinations that have all these properties, that is Functional Graded Material (FGM) technology.

In this study, behaviors of graded laminated discs exposed to thermal load by the method of numeric and analytic analysis have been investigated. FGM structured disc has been investigated by these all methods in identical thermal load and boundary conditions and the results were compared.

Keywords: Functional Graded Discs, Thermal Analysis, Laminated Discs

Prof. Dr. Muzaffer TOPCU
Asso. Prof. Dr. Numan Behlül BEKTAS
Asst. Prof. Dr. Salih YILMAZ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU.....	i
BİLİMSEL ETİK SAYFASI.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Yapılan Çalışmalar.....	2
1.2. Çalışmanın Kapsamı ve Amacı.....	10
2. MALZEME SEÇİMİ.....	11
2.1. Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler.....	11
2.2. FDM’de Derecelendirme Tipleri.....	12
2.3. FDM’nin Avantajları.....	13
2.4. FDM’nin Kullanım Alanları.....	16
2.4.1. Uzay taşıtları teknolojisi.....	16
2.4.2. Endüstriyel malzemeler.....	16
2.4.3. Optoelektronik.....	17
2.4.4. Biyomalzemeler.....	18
2.4.5. Türbin ve dizel motorlarda termal bariyer kaplamalar.....	18
2.4.6. Güç iletim ve dağıtım sistemleri.....	19
2.5. Bakır ve Alaşımları.....	20
2.5.1. Bakır Alaşımlarının Özellikleri.....	21
2.5.2. Bakır-Nikel alaşımları.....	22
3. İZOTROPİK DİSK İÇİN ANALİTİK ÇÖZÜM.....	24
3.1. Diferansiyel Denklemlerin Oluşturulması.....	24
3.2. Radyal ve Teğetsel Gerilmeler.....	25
3.3. Radyal Yer Değiştirme.....	26
3.4. Malzeme Seçimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi.....	26
3.5. Modelin Uygulanması ve Analitik Sonuçlar.....	27
4. SONLU ELEMANLAR METODU VE DİSKİN SEM MODELİ.....	32
4.1. Modelin Oluşturulması.....	33
4.2. Nümerik Analiz İçin Diskin Sonlu Elemanlara Ayrılması.....	34
4.3. Termal Yüklerin ve Sınır Şartlarının Tanımlanması.....	35
4.4. Termal Gerilme Analizi.....	37
5. NÜMERİK ANALİZ.....	38
5.1. Gerilme Analizi Sonuçlarının Alınması.....	40
5.2. Radyal Yer Değiştirmeler.....	43
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	45
EKLER.....	49
Ek-1. Analitik Çözüm İçin Üretilmiş MATLAB Program Örneği.....	50
KAYNAKLAR.....	52
ÖZGEÇMİŞ.....	55

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1 SiC-A356 FDM kuvvetlendiricinin devamlı derecelendirilmesi	11
Şekil 2.2 Basit fonksiyonel derecelendirme tiplerinin grafik gösterimi.....	12
Şekil 2.3 Cu ve Ni bileşenleriyle üretilmiş tabakalı derecelendirilmiş FDM ve tabakaların bileşim yüzdeleri.....	13
Şekil 2.4 TBK’da ara yüz çatlaklarının oluşumu.....	14
Şekil 2.5 FDM’siz (a) ve FDM’li (b) TBK’ların termal yük altında gerilme dağılımları.....	14
Şekil 2.6 Klasik kompozit malzeme ile FDM tabakaların termo-mekanik özelliklerinin değişimi ve mikro yapıları.....	15
Şekil 2.7 Mitsubishi Materials Corp’un ürettiği FDM kesici kalemler.....	17
Şekil 2.8 Tavşanda FDM implant uygulaması.....	18
Şekil 2.9 Bakır ve alaşımların kullanım alanlarına örnekler.....	21
Şekil 3.1 Disk modelde tabakalarda Bakır oranlarının gösterimi.....	27
Şekil 3.2 Termal yüklerin değişimiyle oluşan radyal gerilmeler	28
Şekil 3.3 Termal yüklerin değişimiyle oluşan teğetsel gerilmeler	29
Şekil 3.4 Termal yüklerin değişimiyle oluşan radyal yer değiştirmeler	31
Şekil 4.1 Termal analiz için oluşturulan disk modeli.....	33
Şekil 4.2 Nümerik analiz için seçilen eleman tipi.....	34
Şekil 4.3 Fonksiyonel derecelendirilmiş disk’in kesit alan ve sonlu eleman görüntüsü.....	34
Şekil 4.4 Fonksiyonel derecelendirilmiş disk’in sonlu elemanlar modeli	35
Şekil 4.5 Diske termal yük girilmesi	36
Şekil 4.6 Termal yükleme için uygulanan sabit sıcaklık dağılımı.....	36
Şekil 5.1 Nümerik analiz programında malzeme özelliklerinin girilmesi.....	38
Şekil 5.2 Malzeme özellikleri atanmış tabaka görünümü.....	39
Şekil 5.3 Termal yüklerin modele uygulanması.....	39
Şekil 5.4 Gerilme değerlerinin alındığı düğüm noktaları.....	40
Şekil 5.5 Sonlu elemanlar çözümünden elde edilen gerilme dağılımı görseli.....	40
Şekil 5.6 Termal yükler altında nümerik analizden alınan radyal gerilmeler.....	42
Şekil 5.7 Termal yüklerin değişimiyle nümerik analizden alınan teğetsel gerilmeler.....	42
Şekil 5.8 Radyal yönde yer değiştirmelerin disk üzerindeki dağılımı.....	43
Şekil 5.9 Termal yükler altında nümerik analizden alınan radyal yer değiştirmeler.....	44
Şekil 6.1 T=100 için analitik ve nümerik analizden alınan radyal gerilmeler.....	45
Şekil 6.2 T=100 için analitik ve nümerik analizden alınan teğetsel gerilmeler...	46
Şekil 6.3 T=100 için analitik ve nümerik analizden alınan radyal yer değiştirmeler.....	47

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Bakırın alaşım oranlarına göre kullanım alanları.....	22
Tablo 3.1 FDM tabakaların mekanik özellikleri.....	26
Tablo 3.2 Diskin sabit sıcaklık altında teğetsel ve radyal gerilme değerleri.....	28
Tablo 3.3 Diskin sabit sıcaklık altında radyal yer değiştirme değerleri.....	30
Tablo 5.1 Diskin nümerik analizden alınan radyal ve teğetsel gerilme değerleri	41
Tablo 5.2 Diskin nümerik analizden alınan radyal yer değiştirme değerleri.....	44

SİMGE VE KISALTMALAR DİZİNİ

CAE	Computer Aided Engineering
EDAX	Enerji Dispersif X-ışınları Analizi
FDM	Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme
FGM	Functionally Graded Materials
GIS	Gas Insulated Switchgear
KTK	Klasik Tabakalı Kompozit
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
TBK	Termal Bariyer Kaplama
E	Elastisite Modülü, (MPa)
ν	Poisson Oranı
α	Isıl Genleşme Katsayısı, ($1/^\circ\text{C}$)
σ	Gerilme, (MPa)
σ_r	Radyal Gerilme, (MPa)
σ_θ	Teğetsel Gerilme, (MPa)
u_r	Radyal Yer Değiştirme, (mm)
r	Yarıçap, (mm)
T	Sıcaklık, ($^\circ\text{C}$)
T_0	Başlangıç Sıcaklığı
ε	Şekil Değiştirme Oranı
ε_r	Radyal Şekil Değiştirme Oranı
ε_θ	Teğetsel Şekil Değiştirme Oranı
σ	Gerilme Fonksiyonu
V_{Ni}	Nikelin Hacimsel Oranı
a	İç Çap, (mm)
b	Dış Çap, (mm)
C_1, C_2	İntegrasyon Sabitleri

1. GİRİŞ

Yakın geçmişte teknoloji ve bilimin hızlı gelişimiyle sanayinin temel girdisi olan malzemeler de hızlı bir gelişim sürecine girmiştir. En küçük el aletlerinden başlayarak uzay mekiği teknolojisine uzanan bu geniş ihtiyaç yelpazesinde artık malzemelerin, hem ekonomik hem mukavim, bununla birlikte daha hafif kimi zaman estetik özellikleri bünyesinde barındırması ihtiyacı doğmuştur. Bu noktada farklı malzemelerin bir arada kullanımı büyük bir önem kazanmıştır.

Malzemeler genellikle metaller, seramikler ve organik malzemeler olarak üç ana gruba ayrılırlar. Birbirlerine göre üstün ve zayıf özellikleri olan bu malzemeler, mevcut özellikleri iyileştirmek maksadıyla metal-metal, metal-seramik ve metal-organik olarak, makro ve mikro düzeyde birleştirilerek bir arada kullanılabilirler.

Metallerin birbirleriyle ya da başka elementlerle mikro düzeyde, homojen olarak muhtelif oranlarda birleştirilmesine *alaşım* adı verilir. Alaşım karışımdaki metallerin özelliklerinden farklı özellikler gösterirler. Alaşımın tarihi milattan önce 4000 yıllarına kadar uzanmaktadır. En bilinen alaşımlara, tunç (bakır-kalay), pirinç (bakır-çinko), lehim (kalay-kurşun) örnek verilebilir. Alaşım, uygulamaların gerektirdiği fiziksel özelliklere sahip malzemelerin üretilmesini sağlar. Yüksek sıcaklıklar, aşınma, kimyasal etkiler, metal yorgunluğu vb. gibi her türlü etkilere saf metallerin yetersiz kaldığı durumlarda, gerekli olan özellikleri sağlayan niteliklerde alaşım kullanılır.

Üretim teknolojisinde alaşım, havacılık sanayisi, otomotiv sanayisi, iş makineleri ve elektronik sanayisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Malzemelerin birleştirilmesiyle elde edilen ısı iletkenlik, aşınma ve korozyon dayanımı gibi avantajlar özellikle termal gerilmeye maruz uygulamalarda da alaşımın tercih edilmesine sebep olmuştur. Fakat gelişen teknoloji özel karakterlere sahip malzeme ihtiyacını büyük ölçüde artırmıştır. Bilinen alaşım, kaplamalar ve tabakalı kompozitler bu ihtiyacı karşılayamaz hale gelmiş, kullanım yerine göre yeni malzemelere ihtiyaç duyulmuştur. Özellikle uzay taşıtlarındaki gereksinim olan, yüksek mukavemet ve termal şoklara

dayanıklı, ısı direnç özelliği sağlayan homojen bir malzeme olmaması, bu özellikleri bir arada bulunduran malzeme kombinasyonlarına yani *Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme* (FDM) teknolojisine yönelmeye sebep olmuştur. FDM katmanlı malzemelerin sürekli değişen bir kompozisyonda ve derecelendirilmiş bir yapıda birbiriyle birleşmesi ile oluşur. Malzemeler arası ani olmayan geçişler katmanlar arasındaki gerilme dağılımının da sürekliliğini sağlar. Bu alanda hızlı gelişmeler mevcuttur ve FDM teknolojisinin uygulanabilirliği mümkündür.

1.1 Yapılan Çalışmalar

Nogata ve Takahashi (1995), doğadaki biyolojik örneklerin mikroyapıları, fonksiyonları ve modelleme şekilleri ile sürekli olarak bilimin ilgisini çekmesi neticesinde bambu kamışlarının mekanik özelliklerini incelemeye almışlar ve bu organik malzemenin tasarımını örnek alarak, FDM'leri çalışarak yeni bir üstün özellikli malzeme kavramı geliştirmeyi denemişlerdir. Çok fazlı ve fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit yapıdaki doğal malzemelerin temelde anlaşılması ve yeni malzemelerin tasarımı sürecine yardımcı olması için bambunun sahip olduğu özel yapıyı incelemiştirler. Bambu hücrelerinin gerilme altında elektrik sinyali üretebildiğinin tespiti ile gerilim altında bir kemikte de piezoelektrik etkinin benzer bir fonksiyonunu oluşturmuşlar ve elektriksel özelliklerin iskelet sisteminin sert dokularının modellenmesinde önemli rol oynadığı savunmuşlardır. Bambunun uygulanan kuvvetlere mukavemeti sebebiyle en iyi doğal optimizasyona sahip derecelendirilmiş yapıdaki malzeme olduğu ve biyomalzeme tasarımı için çok uygun bir örnek oluşturduğu sonucuna varmışlardır.

Banks vd (1997), tabakalı bir eğri kiriş için, genel tam kararlılık şartlarını sağlayan ve tahmini sonuçlara yakın bir matematiksel iskelet hazırlamışlardır. Söz konusu modelin viskoelastik tabakalarını elastik esaslı ve elastik bağımlı katmanların sandviç olarak birleştirilmesiyle elde etmişler ve analitik çözümü yapmışlardır.

Shenoi ve Wang (2001), yaptıkları çalışmada tabakalandırılmış eğri kompozit katmanlı ve sandviç kirişlerin, delaminasyonu ve elastik dayanımı için elastisite teorisi esaslı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Ana denklemleri bu sebeple elastik temelli olarak ele almış ve eğri ortotropik kirişin, değişken yük altındaki sonuçlarından türetmişlerdir.

Bu yaklaşımla, eğri tabakalı kirişlerin kalınlık boyunca ve iç gerilmelerinin tam doğru tanımlanmasını sağlamışlar ve çeşitli geometriler için de çözümler, hazırlamışlardır.

Pan (2003), üç boyutlu anizotropik lineer elastik ve fonksiyonel derecelendirilmiş dikdörtgen kompozit tabakaların basit mesnet sınır koşullarında kesin çözümünü elde etmiştir. Stroh formülasyonuna benzer şekilde terimler kullanmış ve kompozit tabakaların kalınlık doğrultusunda özelliklerinin sürekli değişen fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler olarak ele alınmıştır. Pagano'nun yaptığı mevcut fonksiyonel derecelendirilmiş malzeme çözümü genişletilerek, çeşitli nümerik metotlara dayalı fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit tabaka modellemesini karşılaştırmaya yardımcı olmuştur. Tek bir fonksiyonel derecelendirilmiş tabaka için mevcut çözümün sonuçları fonksiyonel derecelendirilmiş tabaka ile kaplanmış homojen bir çift tabakalı malzemeyle karşılaştırılmıştır. Her iki düzleme de aynı yük verilmiş ve sonuçta da uygun bir fonksiyonel derecelendirilmiş tabaka ile gerilme kuvvetinin azaltılabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca FDM tabakalı kompozitte, gerilme dağılımının daha düzgün olduğu tespit edilmiş ve FDM'nin tabakalar arası ayrılmaya karşı daha dayanıklı bir yapı olduğu tespit edilmiştir.

Matsunaga (2003), yaptığı çalışmasında, termal ve mekanik yüklere maruz, tabakaları birbirine çapraz yerleştirilmiş tabakalı kompozitlerde ve sandviç disk parçalarında, gerilmeler ve yerdeğıştirmeleri, hem çapraz kesme etkilerini hem de normal gerilmelerin etkilerini veren, global yüksek dereceden yay parçası teorisiyle analiz etmiştir. Tabaka yüzeyleri arasındaki sürekliliğin sağlanması ve yay şeklindeki disk parçasının alt ve üst yüzeylerindeki gerilme sınır koşullarının tespitiyle, derinlik yönündeki denge denklemlerinin üç boyutlu integrasyonunu yaparak, çapraz kesme gerilmeleri ve normal gerilmeleri hesaplamıştır.

Schulz vd (2003), Alman Ulusal Bilim Kuruluşu'nun bir projesi için yaptıkları araştırmada, metalik ve seramik malzemedan, termal uygulamalar için kaplama ve korozyon dayanımı özelliklerinden dolayı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeleri optimize etmişlerdir. Bakır altlık malzemesine termal bariyer kaplama yapmışlar ve çeşitli sayıda malzeme ile termal kaplamaların özelliklerini incelemişlerdir. Derecelendirilmiş malzemelerdeki gerilme dağılımlarını X-Ray ışınlarının kırılması yöntemini kullanarak ölçmüşlerdir. Titanyum ve alüminyum gibi parlak metallerin

korozyon dayanımı ve düşük yoğunluk özelliklerinden dolayı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerin giydirilmesinde ideal kaplama malzemeleri olduğunu ve Al-Cu-Ni alaşımlarının saf malzemelere göre daha iyi tutunma sağladığını bulmuşlardır.

Zhang vd (2003), dairesel delikli bir FDM'nin radyal yönde farklı termal yükler altında davranışlarını incelemişlerdir. Homojen malzemeler için olan mevcut çözümü, integrasyon sabitlerini değişken kabul edip malzeme sabitlerini genelleştirerek yarıçapın radyal koordinatta bilinmeyen bir fonksiyonuna dönüştürerek, FDM'ler için kullanmışlardır. Nümerik analizlerle fonksiyonel derecelendirilmiş malzemede dairesel delik etrafındaki termal gerilmeleri bulmuşlardır.

Sayer ve Sayman (2003), cam-elyaf takviyeli tabakalı bir disk üreterek mekanik özelliklerini deneysel olarak tespit etmiş ve sabit, lineer ve parabolik sıcaklık dağılımları için termal gerilme analizini analitik olarak yapmışlardır. Üretilen ortotropik diskin termoelastik gerilme analiziyle teğetsel ve radyal gerilmelerini, maruz kaldığı çeki ve bası gerilmelerini incelemişlerdir.

Alagöz vd (2004), fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeleri incelemiş, FDM'lere ihtiyaç duyulmasına sebep olan olumsuzlukları araştırmış ve FDM'nin bu olumsuzluklara nasıl çözüm ürettiğini tespit etmişlerdir. FDM uygulamalarında karşılaşılan sorunları, FDM'lerden yararlanılan alanları ele almış ve FDM ürünlerden örnekleri incelemişlerdir. Ayrıca günümüzdeki FDM çalışmalarının anlaşılabilmesi için FDM teknolojisinde lider olan Japonya'daki FDM çalışmalarına da değinmişlerdir.

Dimitoka ve Yıldırım (2004), fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış katmanlı termal bariyer kaplamalarındaki termal gerilmeleri sonlu elemanlar metodu (SEM) ile hesaplamışlardır. Çalışmalarında sonlu boyutlardaki homojen metal malzeme üzerindeki bir FDM ve çok tabakalı bir seramik kaplamanın uniform sıcaklık değişiminden etkilenen, termal gerilmelerin aksel simetrik problemini ele almışlardır. Öncelikle kaplamalardaki ara yüz çatlakları ve kenar çözümlerine neden olan gerilmeleri ele almışlardır. Kaplamanın ara katmanlarının sonlu boyutları nedeniyle analitik çözümün zorluğundan dolayı, bir sonlu elemanlar tekniği geliştirmiş ve kullanmışlardır. FDM kaplamaları ve FDM'lerdeki çatlak problemleri için kullandıkları

teknikinin etkinliğini kenar çatlaklı ve ara yüz çatlaklı FDM'ler üzerinde mevcut analitik çözümlerle karşılaştırarak ispatlamışlardır.

Sugano vd (2004), dönen bir diskte termal gerilmeleri ve merkezkaç kuvvetini azaltmak üzere yüksek termal ısıtım sağlamak ve hafifliği azaltmak için FDM ile oluşturulmuş bir metot kullanmışlardır. Disk dış kenarlardan radyal yönde süresiz olarak ısıtılmış ve ısı iletim katsayısı da radyal yönde değişmiştir. Kompozit bölgelerde tek boyutlu sınır değer problemleri için Vodicka metodu düzenlenerek termal analizler yapmışlar, Euler diferansiyel denklemindeki yer değiştirme terimleriyle denge denklemlerini yaklaşık olarak ifade etmişlerdir. Bu şekilde termal gerilmeleri ve merkezkaç kuvvetini elde etmişlerdir. Malzemeleri Ti+6Al+4V ve SUS410FGM'yi, Ti+6Al+4V, PSZ ve SUS410FGM'yi birleştirerek disk şeklinde tasarlamışlardır. Buldukları veriler ışığında diskler arasında karşılaştırma yapmışlardır.

Konez vd (2005), FDM'lerin üretim teknikleri ve kullanım alanlarını inceledikleri çalışmalarında, üretim tekniğinden doğabilecek farklılıklardan ortaya çıkabilecek içyapı değişikliklerinin ve bunların doğuracağı sonuçların önemine değinmişlerdir. Kullanım alanına göre, doğru üretim tekniğiyle imal edilmiş mükemmel kompozisyonda FDM oluşturma çabalarının sonucunda, malzeme bünyesinde makroskopik boyutta bir birleşme söz konusu olmadığından termal gerilmelerin kısmen kontrol edilebildiğini ve kaplamalardaki artık gerilmelerin tam anlamıyla azaltılamadığını savunmuşlardır.

Ecsedi ve Dluhi (2005), yaptıkları çalışmada, homojen olmayan eğri kirişlerin ve kapalı halkaların (disklerin) statik ve dinamik analizi için tek boyutlu, simetrik kesitli, mekanik bir model hazırlamışlardır. Simetri düzleminde yüklemeler vererek, yer değişimlerini klasik Bernoulli-Euler kiriş teorisine göre çözmüşlerdir.

Nirmala vd (2005), orta tabakası FDM tabakadan oluşturulmuş üç katmanlı bir tabakalı kompozit malzemenin termoelastik gerilmeleri için analitik ifadeler türetmişlerdir. Ni (metal) -FDM- Al_2O_3 (seramik) şeklinde düzenlenmiş bu kompozitte gerilme dağılımını ve artık gerilmeler gözlemlemişlerdir. Bu çalışmalarında FDM'nin orta noktasından her iki tabakaya doğru derecelendirme yapmışlar ve elde ettikleri termoelastik gerilme dağılım değerleri doğrultusunda bu şekilde düzenlenmiş kompozit kirişin tek tabakalı kompozitten daha kullanışlı olduğunu bulmuşlardır.

Wang vd (2005), sistem sıcaklığından farklı sıcaklıkta bir ortama aniden maruz kalan FDM bir düzlem malzemenin termal şok dayanımını analiz etmişlerdir. Bir sonlu elemanlar/mod süperpozisyon metoduyla, zamana bağlı alan sıcaklıkları hesaplamışlardır. Kabul edilebilir sıcaklık artışları olduğunu gerilme ve kırılma mekaniği kriterlerine göre kontrol edip doğrulamışlar, FDM'lerin termal gerilmeler altında dayanımlarını maksimum lokal çekme gerilmesi ve maksimum gerilme yoğunluk faktörlerinin kriterlerine göre incelemişlerdir. Malzemelerinde kenar çatlaklarının oluşmadığını fakat termal şok sınır koşulları değiştiği takdirde termal şok direncinin de değişebileceğini tespit etmişlerdir.

Çallıoğlu vd (2006), halka şeklinde dönen bir ortotropik diskin, analitik olarak elastik ve plastik gerilme analizlerini yapmışlardır. Açısal hız artırılarak alınan sonuçlar değerlendirilmiş, uygulanan tüm açısal hızlar için, elastik ve plastik çözümlerin her ikisinde de radyal yer değiştirmelerin iç yüzeyde en yüksek değere ulaştığı ve teğetsel gerilme büyüklüklerinin radyal gerilmelerden daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir.

Araki vd (2006), Cu/Ni ve PSZ/NiCrAlY malzemelerden oluşmuş termofiziksel özellikleri bilinen dört katmanlı bir FDM'den numunenin ısı iletiminde homojenitesi ve geçiş karakteristiklerini incelemişlerdir. Sıcaklık yayınımlarını lazer flaş yöntemiyle inceleyerek ve elde ettikleri eğrilerde FDM'ler ile homojen malzemelerin ısıl tepkilerinde çok büyük benzerlik görmüşlerdir.

Agarwal vd (2006), orta tabakası fonksiyonel olarak derecelendirilmiş çok sayıda paralel tabakalardan oluşan bir tabakalı kompozitte ısı iletim geçişlerini incelemişlerdir. Tabakalar boyunca her katmanın zamana bağlı ısı profilini oluşturan bir algoritma geliştirmişlerdir. Bu geliştirilen programın sürekli derecelendirilmiş FDM tabakaları ve istenen sayıda ara katman için de kullanılabilceğini ispatlamışlardır.

Sayman (2006), eğrisel çelik fiberle takviyelendirilmiş kompozit bir termoplastik diskte elasto-plastik gerilme analizi yapmıştır. Radyal ve teğetsel yönde farklı termal genişleme katsayıları ile eşit sıcaklık dağılımı altında radyal ve teğetsel gerilmeleri elde etmiştir. Diskin iç ve dış yüzeylerinde oluşan teğetsel gerilme bileşenlerinin sırasıyla bası ve çeki gerilmelerinden oluştuğunu, en yüksek gerilmenin diskin iç yüzeyinde meydana geldiğini analitik formülasyon ve nümerik çözüm yöntemleriyle çözerek

bulmuştur. Bu çözüm için ayrıca ANSYS sonlu elemanlar programını kullanmış ve her iki çözümdeki sonuçların birbiriyle örtüştüğünü ve analitik sonuçların ANSYS ile benzer sonuçlar verdiğini görmüştür.

Silva vd (2006), bambuların FDM yapısının kompozit malzemelerde takviye (fiber) doku olarak kullanılmasından dolayı, bu FDM yapının mekanik davranışlarını daha iyi araştırmak için derecelendirilmiş bir sonlu eleman modeli tasarlayarak çeşitli yükler altında malzemenin davranışlarını incelemişlerdir. Homojenizasyon ve Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) gibi nümerik metotlarla, boğumlu yapıya sahip bambunun bir hücresindeki malzeme dağılımını ve dereceli yapısını elde etmişler bunun için bir sonlu elemanlar formülasyonu kullanmışlardır. Bambunun FDM yapısının çeşitli yükler altında davranışlarını, homojenizasyon teorisinden evrensel değişkenlere göre Young modülleri, bir ortalama Young modülü ve ortotropik malzeme özellikleri elde edip üç boyutlu modellemesini yapmak suretiyle, eksenel simetrik olarak çekme burulma ve eğilme yükleri altında incelemişlerdir.

Pelletier ve Vel (2006), kalınlık boyunca fonksiyonel derecelendirilmiş silindirik kabuğun termal ve mekanik yükler altında kararlı halde tepkilerini analiz etmişlerdir. Fonksiyonel derecelendirilmiş kabuk uçlarından basit mesnetle tutturulmuş ve radyal yönde malzeme özelliklerinin değiştiğini kabul edilmiştir. Üç boyutlu kararlı ısı iletimi ve termoelastisite denklemleri eksenel yönde düzlem gerilme şekil değiştirme durumları için analitik olarak çözülmüştür. Analitik çözümler izotropik malzemeler için geçerli olmasına rağmen mevcut formülasyonda silindirik kabuğun ortotropik bir malzeme olduğu kabul edilmiştir. Fiber takviyeli fonksiyonel derecelendirilmiş kabukların hacminin fiber doğrultusu boyunca radyal yönde düzgün bir dağılım gösterdiği kabul edilmiştir. Silindirik kabuklar Flügge ve Donnell kabuk teorileri kullanılarak da analiz edilmiştir. Kabuk teorilerinden kalınlık boyunca ve açısız yönde elde edilen yer değiştirmeler ve gerilmeler, üç boyutlu kesin çözümlerle analitik olarak bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Gerilmelerin daha düzenli bir dağılım sağladığı görülmüştür. Pelletier ve Vel bu çalışmalarında fonksiyonel derecelendirilmiş kompozit kabuk kullanılmasının, gerilmelerin katmanlar arası geçişlerinin süreklilik sağlamasından dolayı geleneksel yöntemlerle üretilmiş tabakalı kompozit kabuklara göre daha avantajlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Sayman vd (2006), eğrisel çelik fiberle takviyelendirilmiş ortotropik bir diskte elasto-plastik gerilme analizi yapmışlardır. Lineer ısı dağılımı altında radyal ve teğetsel gerilmeleri elde etmişlerdir. Elastik ve Elasto-plastik durumlar için teğetsel gerilme bileşenlerinin, radyal gerilme bileşenlerinden daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca diskin iç ve dış yüzeylerindeki çeki ve bası gerilmelerini incelemişlerdir. Aynı problemi ANSYS sonlu elemanlar analiz programıyla yaparak sonuçları karşılaştırmışlar her iki yöntemin de birbirine yakın sonuçlar verdiğini görmüşlerdir.

Ohmichi ve Noda (2006), Fonksiyonel derecelendirme yönünde kısmi ısıya maruz eğri sınırlı fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeli, seramik yüzeyli kısmi ısıtılmış $ZrO_2/Ti-6Al-4V$ fonksiyonel derecelendirilmiş bir düzlemde termoelastik düzlem gerilmeleri analitik olarak bulmuşlardır. Malzeme özellikleri üstel fonksiyon terimleri ile ifade edilmiştir ve termoelastik düzlem denklemlerinin genel çözümü gerilme fonksiyon metodu kullanılarak türetilmiş ve bu FDM düzlem için nümerik sonuçlar elde edilmiştir.

Shodja vd (2006), homojen ve fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalardan oluşan iki boyutlu ince bir kompozit oluşumun tam termoelastik çözümünü yapmışlardır. Poisson oranı sabit alınırken fonksiyonel derecelendirilmiş tabakaların termomekanik özellikleri kalınlık boyunca üstel olarak değişmektedir ve ısı transfer problemini kararlı hal durumu için incelemişlerdir. Fourier serileri kullanılarak çözülen dördüncü dereceden kısmi diferansiyel denklemini küçültmek için gerilme fonksiyonunun temel denkleminde faydalanmışlardır. Homojen yapılı sandviç kompozitle fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalı sandviç malzemedan elde ettikleri sonuçları karşılaştırmışlar ve FDM yapıda gerilme yoğunluğunun azalmasıyla yüzeyler arası kayma gerilmesinin de azaldığını tespit etmişlerdir.

Hosseini Kordkheili ve Naghdabadi (2006), fonksiyonel derecelendirilmiş eksenel simetrik delikli dönen disklerin yarı analitik termoelastik analizini yapmışlardır. Diskin fonksiyonel derecelendirmesi iç yüzeydeki malzemedan dış yüzeydeki malzeme özelliklerine doğru radyal yönde sürekli olarak yapılmıştır. Sınır koşulları ve yükler oluşturulan diferansiyel denkleme uygulanmış, merkezkaç kuvveti ve termal yüklerin oluşturduğu şekil değiştirme ve gerilme bileşenleri alınıp literatürdeki sonlu elemanlar analizlerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Shao ve Ma (2007), mekanik yüklere ve lineer olarak artan sınır sıcaklığına maruz, fonksiyonel derecelendirilmiş içi boş dairesel silindirin termo-mekanik analizlerini yapmışlardır. Çalıştıkları örnekte molibden/mullit malzemeleri kullanmışlardır. Laplace dönüşüm ve serileri metodunu kullanarak basit diferansiyel denklemini oluşturarak zamana bağlı sıcaklık değerlerini ve kararsız halde termo-mekanik gerilmeleri bulmuşlardır.

Birman ve Byrd (2007), 2000–2007 yılları arasında FDM'ler ile ilgili yapılmış önemli çalışmalarını inceleyerek FDM teknolojisindeki önemli gelişmeleri ele almışlardır. FDM konusunda, ısı transferi konuları, gerilmeler, dinamik ve denge konuları için analizler, testler, üretim ve tasarım yöntemleri ve kırılma gibi farklı teori ve uygulamaları incelemişlerdir.

Çallıoğlu ve Karakaya (2008), sıcaklık etkisine maruz tabakalı bir diskte oluşan termal gerilmeleri analitik olarak ve sonlu elemanlar yöntemiyle bulmuşlar ve sonuçları karşılaştırarak değerlendirmişlerdir. Disk üst üste geçirilmiş izotropik malzemelerden oluşmuş ve sıcaklık dağılımı iç yüzeyden dış yüzeye doğru azalan parabolik bir fonksiyon olarak verilmiştir. Diskte oluşan radyal ve teğetsel gerilmelerin sıcaklık artışıyla değişimi ve radyal yer değiştirmesi izlenmiştir. Analitik yöntemle nümerik yöntemin sonuçlarının birebir örtüştüğünü tespit etmişlerdir.

Apetre vd (2008), fonksiyonel derecelendirilmiş çekirdekli (alt ve üst tabakalar arasında FDM tabaka ile oluşturulmuş) tek boyutlu sandviç plakalara uygulamak üzere, çok sayıda mevcut sandviç giriş teorisini incelemişlerdir. Varsayılan yer değiştirmelere dayanarak iki eşdeğer tekil tabaka teorisi, yüksek-tabaka teorisi ve Fourier-Galerkin metoduyla karşılaştırmışlardır. Sonuçlar sonlu elemanlar analizi ile de karşılaştırılmıştır. Sandviç düzlemin çekirdeği (orta tabakası) kalınlık boyunca rijitlik yoğunluk gibi çeşitli özellikler bakımından fonksiyonel olarak derecelendirilmiştir. Buna göre Young modülünü diferansiyel olarak hesaplamışlar, Poisson oranını ise sabit bir değer olarak almışlardır. Yaptıkları çalışmada Fourier-Galerkin metodu, Yüksek-tabaka teorisi ve sonlu elemanlar analizleri arasında birbiriyle örtüşen değerler elde etmişlerdir.

1.2 Çalışmanın Kapsamı ve Amacı

Çalışmada yer verilecek olan diskler günümüzde, özellikle uzay mekiği, uçak, gemi ve otomobil aksamları gibi pek çok alanda hayatımıza girmiştir. Yüksek hız dişlileri, motor volanları, türbin motorları ve sıkı geçme yataklar gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Yaygın bir kullanım alanı olan disklerin tabakalı malzeme ile termal özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik teorik çalışmalar var olmakla birlikte fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalı diskler, üzerinde çok fazla çalışılmamış, yeni ve güncel bir konudur.

Bu sebeple fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalı disklerin termal gerilme analizlerine bu çalışmada yer verilecektir. Çalışmanın amacı, fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalı disklerin, sabit sıcaklık dağılımıyla oluşan termal yükler altındaki davranışlarının analitik olarak ve ANSYS programı yardımıyla sonlu elemanlar metodu (SEM) ile nümerik olarak incelenmesi ve sonuçlarının karşılaştırılmasıdır. Tespit edilecek tabakalı disk modelin mekanik özellikleri ve uygulanacak termal yükler her iki yöntemle girilecek ve elde edilen gerilme ve yer değiştirme verileri değerlendirilecektir.

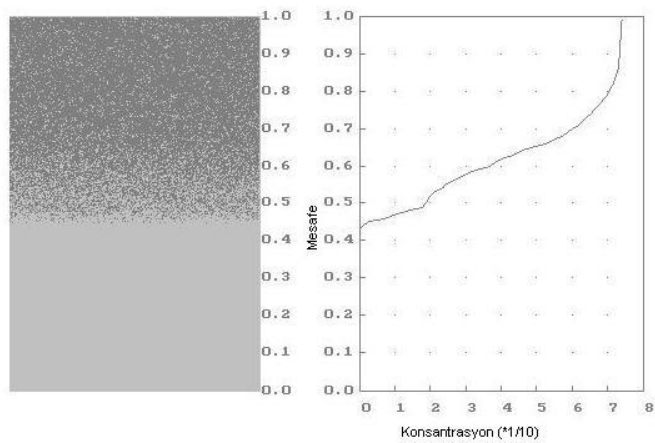
ANSYS programı ile sisteme ait özelliklerin ve termal koşulların simüle edilebilmesi ile ihtiyaç duyulan termal analiz için malzemeyi imal etmeden önce sistemin gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesini ve olası imalat hatalarının önüne geçilmesini sağlamaktadır. Bu çalışmada da söz konusu programla, modelin nümerik analizi yapıp analitik çözüm sonuçlarıyla da desteklenerek, üretim alanında reddedilemeyecek öneme sahip *Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme* teknolojisinin tabakalı disklere uygulanması örneği incelenerek literatüre kazandırılması düşünülmüştür.

2. MALZEME SEÇİMİ

Modern endüstrinin enerji, havacılık, uzay teknolojisi, elektronik, otomotiv ve kimyasal alanlar olmak üzere pek çok branşında, çeşitli kompleks düzenlerde ve birden fazla elementten oluşan malzemeler için, metal alaşımları ve seramiklerden oluşan, birleştirilmiş kombinasyonlar kullanma zorunluluğu doğmuştur. Bu birleşimlerde çok çeşitli ve birbirinden farklı malzeme özellikleri, malzemeler arası uyumsuzluklar, gerilme dağılımında düzensizlikler ve artık gerilmeler gibi olumsuzluklar oluşmaktadır. Bu tip olumsuzlukların önüne geçebilmek için malzeme geçişlerinde ara katmanların derecelendirilmesi fikri doğmuştur.

2.1 Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler

Derecelendirilmiş malzemelerin özelliklerinden en azından biri fonksiyonel olarak karakterize edilir. Derecelendirme kimyasal kompozisyonları, Şekil 2.1’de örneklendirildiği gibi karışım düzeni, tane boyutu, belli bir özelliğin seviyelendirilmesi ve yoğunluk için yapılabilir. Belli özellikleri derecelendirilmiş bu malzemeler Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (Functionally Graded Materials) olarak adlandırılır.

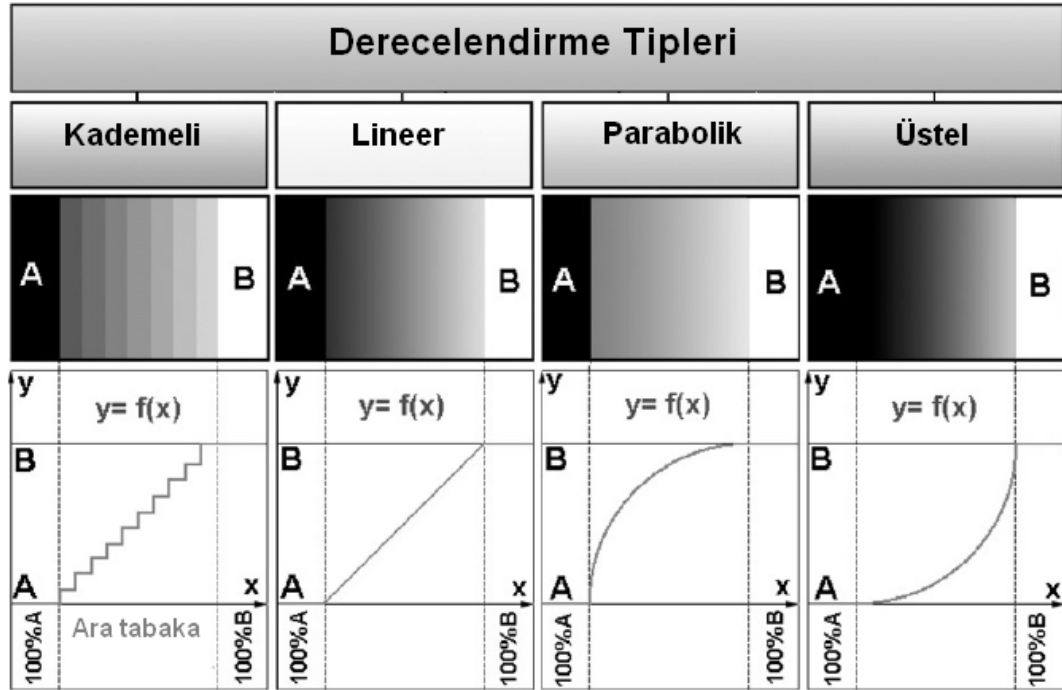


Şekil 2.1 SiC-A356 FDM kuvvetlendiricinin devamlı derecelendirilmesi (Luo ve Baosheng 1997)

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FDM), Şekil 2.1’de görüldüğü gibi fiziksel ve kimyasal olarak farklı özelliklerde olan iki maddenin birbiri içinde dereceli bir kompozisyonda birleştirilmesiyle oluşur. Kullanım amacına göre malzemenin yüzey özelliklerini ve tabakalar arası bağlarını iyileştirmek için uygulanmaktadır.

2.2 FDM’de Derecelendirme Tipleri

FDM’nin üretim teknolojileri derecelendirmenin farklı şekillerde yapılmasına izin vermektedir. Fonksiyonel derecelendirme tipleri, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi başlıca basamaklı, lineer, parabolik ve üstel olarak sıralanabilir.



Şekil 2.2 Basit fonksiyonel derecelendirme tiplerinin grafik gösterimi (Pietrzak 2006)

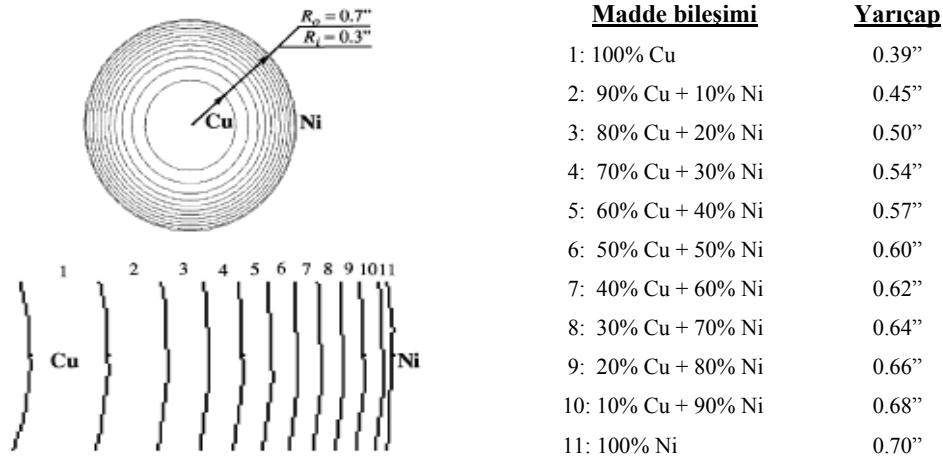
Şekil 2.2’den görülebildiği gibi, mikro yapılarının yanı sıra niteliklerine göre FDM özellikleri ve kalınlıkları da yapısal profilin bir fonksiyonudur.

$$f(x) = \left(\frac{y_i}{t} \right)^p \quad (2.1)$$

Buradaki f_x , x malzemesinin hacimsel fonksiyonu, y_i i'nci tabakanın derecelendirilmiş malzemenin yüzeyinden uzaklığı, t derecelendirilmiş malzemenin toplam yüksekliği, p üssü ise malzemenin yoğunluğudur (Pietrzak 2006).

FDM'nin çeşitli tabakaları, farklı kalınlıkları ve ara yüzey kalınlıklarının birbiriyle ilişkileri için 2.1 eşitliğine göre analiz edildiğinde, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemenin daha düzgün gerilme dağılımı ve azaltılmış artık gerilmeler için optimize edilmesine izin vermektedir. FDM'e uygun bir yapı elde etmek için, fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş bileşenlerin şekil, boyut ve takviyelendirici oranını gibi özelliklerinin de büyük ölçüde birbirine uygun olarak tespit edilmiş olması gerekmektedir.

Şekil 2.3'de tabakalı derecelendirilmiş bir FDM örneğinin SEM-EDAX analiziyle elde edilmiş tabakaları ve bileşim oranları görülmektedir.

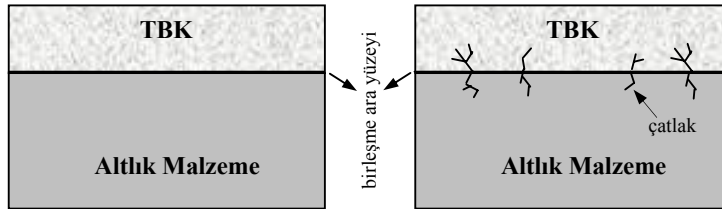


Şekil 2.3 Cu ve Ni bileşenleriyle üretilmiş tabakalı derecelendirilmiş FDM ve tabakaların bileşim yüzdeleri (Alagöz vd 2004)

2.3 FDM'nin Avantajları

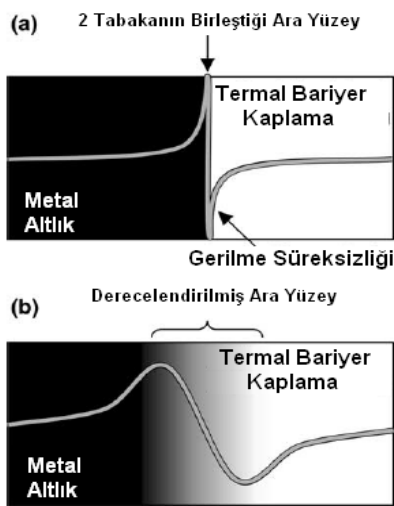
Termal uygulamalarda karşılaşılan en büyük sorunlardan biri, işlemin gerçekleştiği alanı çevreleyen yüzeyi oluşturan maddenin yüksek ısıdan olumsuz etkilenmesidir. Bu etkileri yok etmek üzere termal proseslerde kullanılan malzemelerin yüzeyi yüksek

sıcaklığa dayanıklı, özellikle de seramik malzemeler ile kaplanmaktadır. Termal bariyer kaplama (TBK) olarak adlandırılan bu sistemde bazı sorunlar yaşanmaktadır. Katmanlar arasında Şekil 2.4’de gösterildiği gibi termal genişleme katsayılarının farklılığından doğan ayrılmalar, ara yüz çatlakları, kırılmalar ve termal şoka maruz yüzeyde çatlaklar oluşmaktadır.




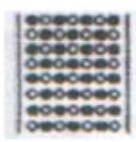
Şekil 2.4 TBK’da ara yüz çatlaklarının oluşumu

FDM kullanımı ile bu uyumsuzluğun giderilmesi ve termal gerilmelerin en aza indirilmesi amaçlanır. FDM’nin dereceli yapısı termal genişleme katsayıları arasındaki büyük farklardan doğan kırılmaları, ara yüz ve yüzey çatlaklarını minimum seviyeye indirmekte ayrıca altlık malzemeyi korozyon ve aşınmaya karşı korumaktadır. Termal bariyer kaplamalarında, keskin geçişli ara yüzeyler arası termal gerilme dağılımı ile FDM ara yüzey tabakasıyla elde edilen kesintisiz, sürekli düzgün gerilme dağılımı Şekil 2.5’te gösterilmiştir.

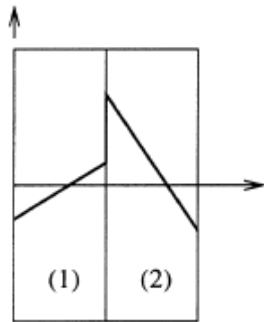


Şekil 2.5 FDM’siz (a) ve FDM’li (b) TBK’ların termal yük altında gerilme dağılımları (Tilbrook vd 2004)

Klasik tabakalı kompozitlerde (KTK) tabakalar homojen karışımlar şeklinde üretilir. Bu homojen yapıların çalışma sıcaklığını yükseltmek ve termal verimi artırmak için en uygun tasarımın yapılması gerekmektedir. Klasik tabakalı kompozitlerin kesit boyunca değişmeyen özellikleri FDM ile optimize edildiğinde malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri arasında ani geçişlerden doğan olumsuzluklar giderilir, Şekil 2.6'dan da görüldüğü gibi, derecelendirilmiş tabakalarla gerilme değerlerinde süreklilik elde edilmesi mümkün olur ve tabakalar arası uyumsuzluklar önlenmiş olur.

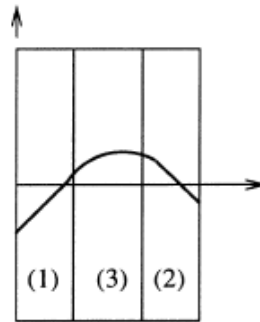
Malzemeler	Örnekler	FDM	FDM olmayan
Fonksiyonları/ Özellikleri	(1)Mekanik mukavemeti (2)Isıl Geçirgenliği	(1) (2)	(1) (2)
Yapısı	Seramik (○) Metal(●) Elyaf (◇+) Boşluk (○)		

Termal Gerilme



(KTK)

Termal Gerilme



(FDM)

(1) ; Metal Tabaka

(2) ; Keramik Tabaka

(3) ; FDM Tabaka

Şekil 2.6 Klasik kompozit malzeme ile FDM tabakaların termo-mekanik özelliklerinin değişimi ve mikro yapıları (Cho ve Oden 1998, Konez vd 2005)

Sıradan kompozitler ve FDM'nin mikro yapıları, mekanik mukavemet ve ısı geçirgenlik değerlerinin dağılımı Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Burada klasik tabakalı kompozitte tabakalar arası gerilme değerlerinin süreksizliği ve FDM'deki düzenli gerilme dağılımı da gözlenmektedir.

2.4 FDM'nin Kullanım Alanları

FDM teknolojisi yüksek ısı performans gerektiren uygulama alanlarında, biyomalzemelerde, elektronik alanında ve pek çok endüstriyel alanda kullanılmaktadır.

2.4.1 Uzay taşıtları teknolojisi

FDM konsepti, 1984'te Japonya'da bir uzay mekiği projesi sırasında, 10 mm'den ince bir kesit için, 2000 K seviyesinde bir yüzey sıcaklığına ve 1000 K'lık bir sıcaklık aralığına dayanabilecek bir ısı bariyer malzemesi önerisi ile ortaya çıkmıştır (Alagöz vd 2004).

Fonksiyonel dereceli malzemenin çıkışı uzay teknolojisi için olmuştur. Bir malzemede bulunabilirliği ters orantılı olarak değişen iyi ısı iletkenlik ve yüksek ısı direnç gibi iki özelliğin bir malzemede bulunabilmesi amacıyla geliştirilmiş olan FDM ile hafiflik ve sağlamlık gibi özellikler de bir araya getirilmiştir.

FDM yapısal malzeme ve enerji dönüştürücü malzeme olarak roket yapılarında ve motorun dış duvarında uygulanmaktadır. Uzay istasyonu Kibo'da test cihazı için FDM bir fişek olarak ve geri kullanılabilir bir roket motoru olarak kullanmıştır (Konez vd 2005).

2.4.2 Endüstriyel malzemeler

FDM'nin endüstriyel malzemelerdeki uygulamalarının geliştirilmesi, araştırmaların ana hedeflerinden biri olmuştur. Örnek olarak derecelendirilmiş kesici kalemlerin geliştirilmesinin nedeni mukavemet ve ısı direnç bakımından daha iyi malzemelere ihtiyaç duyulmasıdır. Bu alanda umulan aşınma direnci ve sertlik elde edilmiştir. Kendi kendini yağlama fonksiyonu ve yüksek ısı dirençlerin kesici kalemlerde elde edilmesinin yanında, bazı derecelendirilmiş kalemler sayesinde yağ kullanılmadan uygulanan kuru kesimler de gerçekleştirilmiştir. Bu şekilde geliştirilen bir kalem, iç kısmında çelik yoğunlukta, dış kısmına doğru elmas yoğunlukta. Yüksek hızlı kesici kalemlerde diğer FDM'lerde olduğu gibi- üretim tekniğinden kaynaklı şekil ve boyutta sınırlamalar bulunmaktadır. FDM kesici kalem örnekleri Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2.7 Mitsubishi Materials Corp'un ürettiği FDM kesici kalemler (Konez vd 2005)

Ayrıca yüksek sıcaklık uygulamalarının yanında FDM 'lerin triboloji alanında da kullanımları mevcuttur. Sürtünme veya normal gerilmelerden kaynaklanan yüzey çatlamasını geciktirmek için kullanılan FDM seramikler bu alandaki kullanıma örnek olarak verilebilir (Alagöz vd 2004).

Bunların yanı sıra günlük yaşamımıza da giren FDM ürünleri vardır. Titanyum hafif ve antialerjik özelliğinden dolayı saatlerde kullanılmaktadır fakat sertliği ve darbe direnci düşüktür. Citizen firması FDM teknolojisi ile titanyum saatlerin yüzey kalitesini yükseltmeyi amaçlamış ve dış tabakanın korunması amaçlanmıştır. Kil ve kumdan aşınıp parçalanmış beyzbol ayakkabılarında da FDM teknolojisi ile iyileştirme sağlanmıştır. Tıraş makinesi bıçaklarında da paslanmaz FDM kaplama ile malzeme korunarak işlevsel üstünlük mümkün kılınmıştır.

2.4.3 Optoelektronik

Görsel ve işitsel iletişimde kullanılan fiber optik kabloların üretiminde FDM teknolojisi kullanılmaktadır. Plastik optik fiberlerde FDM uygulaması ile iletişim hızı ayarlanabilmektedir.

Plastik optik fiberlerde esnekliği kaybetmeden telin boyutu büyüyebilecek şekilde FDM plastikten üretilir. Bu üretim maliyetlerini düşürmekte ve böylelikle yüksek hızda iletişim sağlanabilmektedir. Lucina TM adındaki optik teller ile 10 Gbps'i aşan yüksek hızda bilgi iletimi mümkündür, bu boyut 200000 telefon bağlantısına ve birkaç yüz metre iletim uzaklığına eşittir (Alagöz vd 2004).

2.4.4 Biyomalzemeler

Fonksiyonel derecelenme yaşamsal dokulardan ilham alınarak üretilmiş bir yapıdır. İnsan vücudunda da kemiklerdeki dereceli gözeneklilik yapısı ve kemikten kırıldak dokuya geçişler FDM için birer örnek teşkil etmektedir. Kaybedilen veya tamiri mümkün olmayan sert dokuların yerine insan vücuduyla uyum sağlayabilecek biyolojik doku malzemeleri konmaktadır ve bu malzemelerin ana malzemelerden oluşturulması mümkün olmamaktadır. Kaybedilen dokunun yerine konan malzeme benzer düzende ve hiyerarşiyle üretilmelidir.

Mevcut kemik dokusu dış bölgede sert kesit olarak bakıldığında ise iç bölgelere doğru daha gözenekli bir yapıdadır ki bu bir derecelendirme örneğidir. Uygulanan implant malzeme de benzer bir dokuda olmalı aynı zamanda yaşayan biyolojik dokuyla da uyum göstermelidir. Dış dokuyla uyumluluk içyapıda dayanıklılık gibi pek çok ihtiyaç bir araya geldiğinde bu ihtiyaç kesinlikle FDM malzemeler ile karşılanabilmektedir. Şekil 2.8’de bir deney tavşanına uygulanmış FDM implant örneği görülmektedir.



Şekil 2.8 Tavşanda FDM implant uygulaması (Konez vd 2005)

2.4.5 Türbin ve dizel motorlarda termal bariyer kaplamalar

Termal Bariyer Kaplamaları (TBK), yüksek ısı motorlarında metal bileşenlerin sıcaklığını azaltmak, çevre koşullarına direnci artırmak ve bazı durumlarda tehlikeli ayrılmaları önlemek için uygulanırlar. Yanma bölümleri ve ani ısı artışının olduğu yüzeylerde, motorun çalışma sıcaklığını yükseltip verim alma, metalik elemanların

soğutulması ve parçaların ömrünü uzatmak amacıyla termal bariyer kaplamaları (TBK) kullanılmaktadır.

Bu ince kaplamalar genellikle, bir magnezyum ya da itriyum dengeli zirkonyum tabakasının takip ettiği, metalik yapıştırılmış kaplamalardan oluşan metal bileşimlerdir. Nikel veya kobalt esaslı süper alaşım bileşimler olarak tasarlanan TBK'lar yüksek sıcaklık işlemleri içindir, bunlarda TBK'nın ısı davranışı kaplamada ve altlık malzemeyle kaplama arasında düzgün bir dağılım sağlamalıdır.

TBK sisteminin seçimi özellikle dış yüzeyin sınır koşullarının bilinmesi gibi pek çok şarta bağlıdır. Bu örtü tabakasının başarılı bir TBK olabilmesi için katılığını koruyabilmesi, kırılmadan ve aşınmadan çalışabilmesi gerekmektedir.

Gaz türbinlerinde ya da dizel motorlarda kullanılacak bir TBK sisteminin kırılmadan, termal şoklara, hızlı ısıtma ve soğutma çevrimlerine karşı dayanıklı olması beklenir. Bu kaplamalardaki kırılma, tekrarlı termal çevrimlerle yüksek gerilme değerlerine maruz termal kırılma numunesinden alınan sonuçlara göre zirkon tabakadaki çatlakların ilerlemesiyle oluşmaktadır. Bu sonuçlar, kaplama yüzeyinde, kritik bağlantı noktalarında önceden tespit edilen çatlakların zaman bağlı olarak ilerlemesi ile oluşan kırıklardır.

Yakın tarihte FDM kavramıyla tanışan TBK'lar ısıl genleşme katsayısı, elastisite modülü gibi özelliklerin kademelendirilmesiyle daha uzun ömürlü ve daha kullanışlı hale gelmişlerdir.

2.4.6 Güç iletim ve dağıtım sistemleri

Bu sistemlerde, FDM teknolojisi devir frenleyici, bağlantı kesici ve yıldırım durdurucu içeren kompleks bir anahtar olan Gaz Yalıtım Anahtarı (GIS) olarak kullanılmaktadır.

Güç ve Endüstriyel Sistem Araştırma ve Geliştirme Merkezi, Toshiba Carp, kristal yapıya sahip dereceli bir elementten yıldırım durdurucu üretmiştir. Bu elementte

dışarıdan içeriye termal gerilme kontrolü ve enerji emme kabiliyetinde önemli gelişmeler kaydedilmiştir (Alagöz vd 2004).

2.5 Bakır ve Alaşımları

Bakır ve bronz insanların ilk kullandıkları metal malzemelerdir. Bakırdan daha yüksek dayanımlı olan bronzun M.Ö. 2500 yıllarında üretilmesiyle, günlük kullanım araçlarında metal malzemelerin üstün tokluk özelliklerinden tam anlamıyla yararlanılmaya başlanmıştır. Dolayısıyla *Bronz Çağı* insanlar için önemli bir aşamayı temsil eder. Orta çağa kadar, insanlar tarafından en fazla kullanılan metal olan bakır, demirin silah yapımında kullanılması ile yerini ona bırakmıştır. 19. yüzyılın sonuna doğru elektroteknikğin gelişmesi, elektriği çok iyi ileten saf bakıra duyulan gereksinmeyi giderek arttırmıştır.

Öte yandan bu tür bakır daha çok elektrolitik arıtma, yani elektrik enerjisi yardımıyla elde edildiğinden, elektroteknik ve bakır üretimi birbirlerini karşılıklı destekleyerek gelişmişlerdir.

Dünya'nın hemen tüm bölgelerinde bulunması nedeniyle geniş ölçüde üretiminin yapılabilmesi, elektriği diğer bütün metaller içinde gümüşten sonra en iyi ileten metal olması ve endüstriyel önemi yüksek, pirinç, bronz gibi alaşımlar yapması nedeniyle önemini hiç kaybetmemiştir. Bakır, değerli madenlerle karışarak, onlara, renk ve parlaklıklarını bozmaksızın sertlik ve ince kısımlarını bile koruma özelliği verir. Belirgin özellikleri şöyle sıralanabilir;

- Elektrik ve ısı iletkenliği
- Korozyon direnci (nikelli alaşımlar)
- Görünüş, mimari
- Toksik olmaması (gıda, şeker sanayi)
- Yatak olmaya elverişlilik (kayma – sürtünme özelliği)

Kullanım yerine göre başka avantajlar sıralanabilir ama bakır metalürjisinin pahalı bir teknoloji olması ve dünyadaki zengin bakır yataklarının azalması, maliyet

faktörlerinin etkinliğini arttırmıştır. Fiyat – avantaj dengesi, bakır ve alaşımlarının kullanımını sınırlamaktadır.

2.5.1 Bakır Alaşımlarının Özellikleri

Bakır pek çok elementle alaşım yapabilmektedir, döküme elverişli olmadığından bakır kalayla birlikte eriterek tunç ve çinko ile eriterek pirinç alaşımları elde edilebilmektedir. Çinko ile yaptığı alaşımlara *Pirinç* adı verilir, kalay ve diğer elementlerle yaptığı alaşımların çoğu *Bronz* (tunç) olarak adlandırılır.

Saf bakır yumuşak, plastik olarak işlenebilme özelliği yüksek ve korozyona dayanıklıdır. Alaşımlandırma ile mukavemeti büyük oranda artırılabilir. Isıl iletkenliği yüksek olduğundan ısıtma ve soğutma sistemleri üretiminde, yüksek elektriksel iletkenliği nedeniyle de iletken tel üretiminde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Günümüzde üretilen bakırın %70'e yakını iletken tel olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.9 Bakır ve alaşımlarının kullanım alanlarına örnekler

Bakır birçok alaşımların yapısına girer, kıymetli madenlerden gümüş ve altına sertlik verir parlaklık ve renklerini bozmadan inceliklerini korur. Topların bronzu dayanıklılık bakımından önemlidir. Çanların bronzu, top bronzuna göre kalayın daha çok oranda bulunduğu bronzdur. Bu bronz kırılabilir, fakat çok tınlar. Bakır kalayla birleştiği zaman levha haline gelebilme özelliğini yitirir. Bakır alüminyum ile çok sert bir bronz meydana getirir. Silisli ve fosforlu bronzlar da vardır ayrıca bakır çinko ve nikel ile de mayekor (taklit gümüşü) yapar. Şekil 2.9'da bakırın imalat sektöründeki kullanım alanlarına örnekler görülmektedir.

Bir metalin miktarı çözünme sınırının üzerinde olduğu zaman alaşım homojen olmaz. Bunun yanında nikel ve alüminyum gibi sınırsız olarak bakırla karışabilen metaller de vardır. Tablo 2.1’de bakırın alaşım oranlarına göre kullanım alanları örnekleri verilmiştir.

Tablo 2.1 Bakırın alaşım oranlarına göre kullanım alanları

İsmi	Alaşım Oranları		Kullanım Alanı
	Bakır Oranı (%)	Alaşım El. Oranı (%)	
<i>Alüminyum bronzu</i>	Cu-90	Al-10	Fen aletlerinde
<i>Çan metalı</i>	Cu-75	Sn-25	Çan imalinde
<i>Pirinç</i>	Cu-65	Zn-35	Elektrik malzemesi imalinde
<i>Bronz</i>	Cu-82	Sn-16, Zn-2	Madalya ve heykelde
<i>Alman gümüşü</i>	Cu-50	Ni-25 Zn-25	Elektrik reostalarında
<i>Top metalı</i>	Cu-90	Sn-10	Top imalinde
<i>Nikel bronzu</i>	Cu-75	Ni-25	Para basma ve asit tankında

Bakır çinko ile her oranda alaşım yapabilme özelliğine sahiptir fakat sadece %45’in üzerinde çinko içeren alaşımlar pirinç olarak adlandırılır. Mesela berilyum % 2, silisyum % 5, kalay % 15 ve çinko % 38 nispetinde çözünebilir.

2.5.2 Bakır-Nikel alaşımları

Bakır ve nikel katı ve sıvı halde her oranda birbirleri içinde sürekli çözünerek sürekli katı eriyik oluştururlar. Yüksek sıcaklıklarda mukavemet özellikleri ve korozyon dirençleri çok iyidir. Bu sebeple buhar kazanları tesisatlarında, kimyasal tesislerde, kondenser boru malzemelerinde ve korozyon direncinin yüksek olması istenen yerlerde kullanılır.

Nikel miktarı % 30’a kadar çıkabilir. %10 – 30 arasında nikel içeren alaşımlar, orta dereceli dayanç sağladıkları gibi oksitlenme ve korozyon dirençleri yüksektir. Sıcak ve soğuk şekillendirilmeleri iyidir. Boru, çubuk ve yassı ürün olarak üretilirler. % 0,5 – 1 demir ilavesi korozyon direncini azaltır. % 25’ten fazla nikel içeren alaşımlar para yapımında kullanılır. Yüksek nikelli alaşımlara Mn ilavesiyle elektrik direnç malzemesi

teller üretilir. Çok az Si deoksidasyon amacıyla kullanılır. Bu alaşımlar özellikle 0°C'nin altında yüksek mukavemetlidir. Alaşımın çekme mukavemeti artan nikel yüzdesi ile yükselir ve % 60-65 Ni'de maksimuma erişir. En yüksek sertlikte % 50 Ni'de elde edilir. Artan nikel içeriği korozyon dayanıklılığını yükseltir ve ısı iletkenliğini düşürür ve % 45 nikelde en düşük değere iner.

3. İZOTROPİK DİSK İÇİN ANALİTİK ÇÖZÜM

Çalışmada, izotropik malzeme özellikleri taşıyan ve 7 tabakadan oluşan sabit sıcaklık yüküne maruz fonksiyonel derecelendirilmiş bir disk incelenmektedir.

3.1 Diferansiyel Denklemlerin Oluşturulması

Disk in kalınlığı bir birim kabul edilerek düzlem gerilme hali için, $\sigma_z = 0$ alınır ve genel denge denklemi (3.1) gibi yazılır,

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \quad (3.1)$$

ε_r radyal yönde şekil değiştirme, ε_θ teğetsel yönde şekil değiştirme ve u radyal yer değiştirme olmak üzere birim uzamalar (3.2) deki gibi ifade edilir:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{du}{dr} \\ \varepsilon_\theta &= \frac{u}{r} \end{aligned} \quad (3.2)$$

$$r \frac{d\varepsilon_\theta}{dr} + \varepsilon_\theta - \varepsilon_r = 0 \quad (3.3)$$

Uygunluk denklemi (3.3) eşitliğinde ifade edilen disk in gerilme-şekil değiştirme bağıntıları da (3.4) denklemlerinde verilmiştir.

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) + \alpha T \\ \varepsilon_\theta &= \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_r) + \alpha T \end{aligned} \quad (3.4)$$

ϕ gerilme fonksiyonu için (3.5)'te denge denklemi yazılmıştır.

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\phi}{r} \\ \sigma_\theta &= \frac{d\phi}{dr}\end{aligned}\quad (3.5)$$

(3.5) gerilme fonksiyonundan (3.6) denklemi elde edilir;

$$r^2 \frac{d^2\phi}{dr^2} + r \frac{d\phi}{dr} - \phi = \frac{2E\alpha r^3}{b^2 - a^2}\quad (3.6)$$

ve buradan gerilme fonksiyonu (3.7) eşitliğindeki halini alır:

$$\phi = C_1 r + \frac{C_2}{r} + Ar^3\quad (3.7)$$

3.2 Radyal ve Teğetsel Gerilmeler

Gerilme fonksiyonundan, radyal ve teğetsel gerilmeler (3.8) denklemlerinde yazılmıştır.

$$\begin{aligned}\sigma_r &= C_1 + \frac{C_2}{r^2} + Ar^2 \\ \sigma_\theta &= C_1 - \frac{C_2}{r^2} + 3Ar^2\end{aligned}\quad (3.8)$$

Halka şeklindeki disk için sınır şartları; $r=a \rightarrow \sigma_r=0$ ve $r=b \rightarrow \sigma_r=0$ olarak alınır. (3.9) denklemlerinde C_1 ve C_2 integrasyon sabitleri ve A son terim verilmiştir.

$$\begin{aligned}A &= \frac{E\alpha T}{4(b^2 - a^2)} \\ C_1 &= -A(a^2 + b^2) \\ C_2 &= Aa^2b^2\end{aligned}\quad (3.9)$$

Elde edilen bu terimler gerilme denklemlerinde yerine konur.

3.3 Radyal Yer Değiştirme

Radyal deplasman (3.4) denkleminde şu şekilde elde edilir:

$$u_r = \left[\frac{1}{E} \left(C_1 r (1 - \nu) - \frac{C_2}{r} (1 - \nu) + A r^3 (3 - \nu) \right) + \alpha r T \right] \quad (3.10)$$

3.4 Malzeme Seçimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi

Seçilen ana malzemeler Bakır ve Nikel olmakla birlikte tabakalar Bakır-Nikel alaşımı olarak seçilmiştir.

Bu malzemelerden %2Nikel alaşımlı bakır en içteki (1.) tabakayı oluşturmakta, içten dışa doğru tabakalarda nikel alaşım oranı (V_{Ni}) yükselttilerek bakırın oranı düşmektedir.

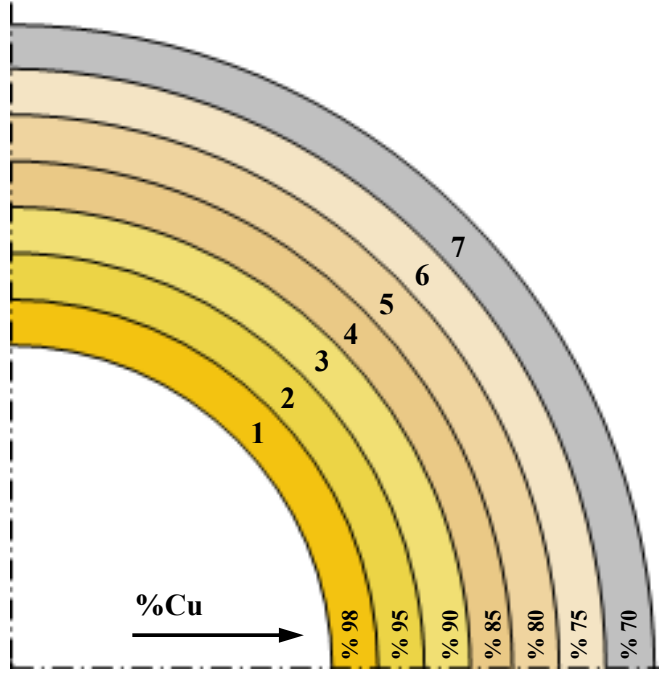
Tablo 3.1 FDM tabakaların mekanik özellikleri (WEB_1, 2008)

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
	%2 Ni	%5 Ni	%10 Ni	%15 Ni	%20 Ni	%25 Ni	%30 Ni
V_{Ni}	0.02	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
α (1/°C)	17,7.10 ⁻⁶	17,5.10 ⁻⁶	17,1.10 ⁻⁶	16,87.10 ⁻⁶	16,4.10 ⁻⁶	16,3.10 ⁻⁶	16,2.10 ⁻⁶
E (GPa)	118	120	126	141,47	144	150	154
ν	0,3395	0,3385	0,3355	0,3253	0,3198	0,3067	0,2979

Diskte derecelendirilmiş tabakalar en içte %98Bakır (Ni12) (1. tabaka) olmak üzere, dışarıya doğru sırasıyla; %95Cu-%5Ni (Ni15), %90Cu-%10Ni (Ni10), %85Cu-%15Ni, %80Cu-%20Ni (Ni20), %75Cu-%25Ni (Ni25), %70Cu-%30Ni (Ni30) olarak sıralanmıştır.

Tabakaların mekanik ve termal özellikleri literatürden alınmış yalnız 4. tabakanın özellikleri %80Bakır ve %87Bakır özelliklerinden interpolasyon yöntemiyle hesaplanarak girilmiştir.

Şekil 3.1’de disk modele ait $\frac{1}{4}$ kesit üzerinde, içten dışa doğru tabakalar numaralandırılmış (Tablo 3.1’de verildiği gibi) ve kullanılan malzemelerin bakır oranları şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Disk modelde tabakalarda Bakır oranlarının gösterimi

3.5 Modelin Uygulanması ve Analitik Sonuçlar

Diskte bulunan, mekanik özellikleri birbirinden farklı yedi tabaka için sabit sıcaklık altında radyal ve teğetsel gerilme değerleri elde edilmiştir ve Şekil 3.2 ile Şekil 3.3’te gösterilmiştir. Sıcaklık olarak, 100°C, 120°C, 140°C, 160°C, 180°C, 200°C olmak üzere altı farklı değer alınmıştır.

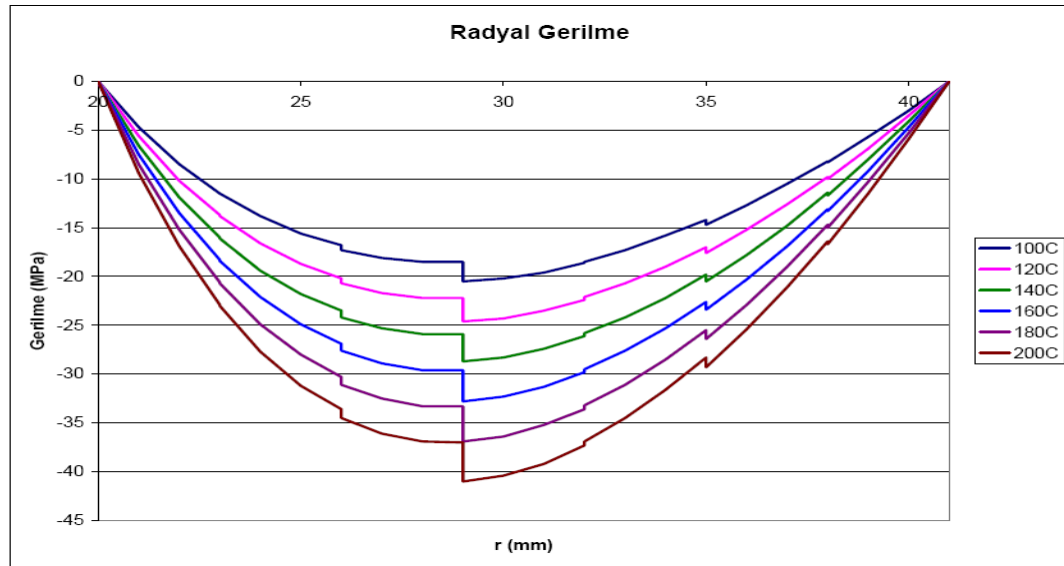
Burada elde edilen formülasyon MATLAB paket programına EK-1 de verildiği gibi girilerek, tüm değerler bu programdan elde edilmiştir. Ayrıca her bir sıcaklık değeri için radyal yönde yer değiştirmeler hesaplanarak altta grafiği verilmiştir.

Ayrıca, diskin iç ve dış yarıçaplarından elde edilen çeşitli sabit sıcaklıklar altındaki, radyal ve teğetsel gerilme değerleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

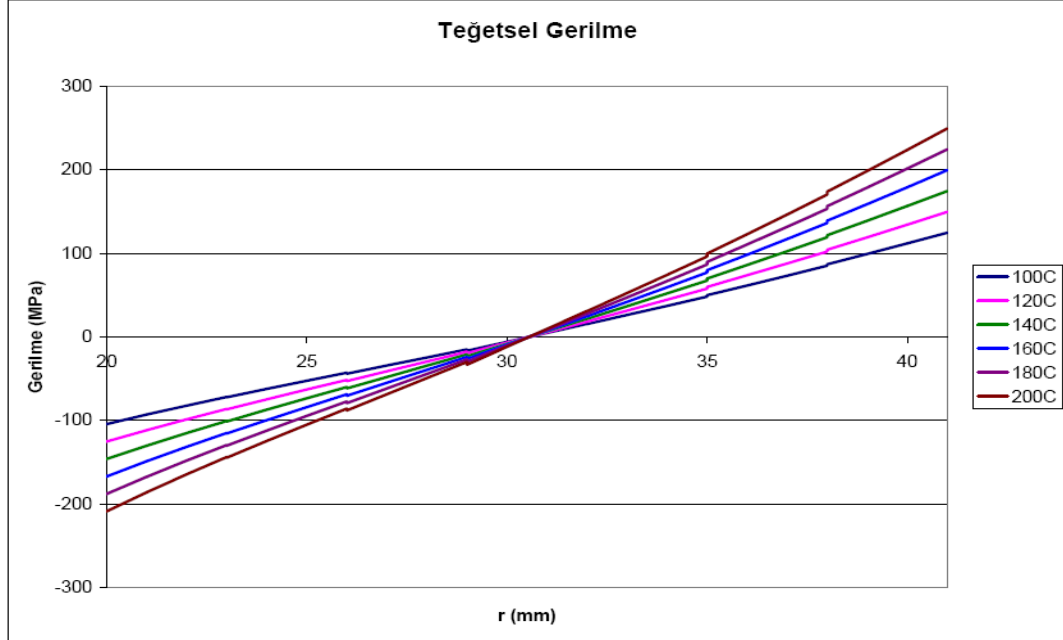
Tablo 3.2 Diskin sabit sıcaklık altında teğetsel ve radyal gerilme değerleri

Sıcaklık ΔT ($^{\circ}C$)	Yüzey	σ_t (MPa)	σ_r (MPa)
100	İç (r=20)	-104,4	0
	Dış (r=41)	124,7	0
120	İç (r=20)	-125,3	0
	Dış (r=41)	149,7	0
140	İç (r=20)	-146,2	0
	Dış (r=41)	174,6	0
160	İç (r=20)	-167,1	0
	Dış (r=41)	199,6	0
180	İç (r=20)	-188	0
	Dış (r=41)	224,5	0
200	İç (r=20)	-208,9	0
	Dış (r=41)	249,5	0

Tablo 3.2'de görüldüğü gibi iç ve dış yüzeylerde radyal gerilme değerleri daima sıfırdır. Diskte iç bölgelerde ise radyal gerilme bileşenleri bası gerilmesi durumundadır.

**Şekil 3.2** Termal yüklerin değişimiyle oluşan radyal gerilmeler

Elastik gerilme analizinden elde edilen teğetsel gerilme değerleri Tablo 3.2'den de görüldüğü gibi iç yüzeyde bası gerilmesi olarak, dış yüzeyde çeki gerilmesi olarak bulunmuştur.



Şekil 3.3 Termal yüklerin değişimiyle oluşan teğetsel gerilmeler

Analitik yöntemle yapılan bu çözümlerde, Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te gösterilen r radyal doğrultusu boyunca gerilme dağılımlarında, uygulanan en yüksek sıcaklık olan T=200 için alınan minimum radyal gerilme değeri $\sigma_{r(\min)} = -41\text{MPa}$ ve en düşük sıcaklık olan T=100 için ise bu değerler minimum $\sigma_{r(\min)} = -20,5\text{MPa}$ olarak bulunmuştur. Fonksiyonel derecelendirilmiş diskin iç ve dış yüzeylerinde radyal gerilmeler sıfırdır. Sıcaklığın artmasıyla gerilmeler artmakla birlikte tüm sıcaklıklar için iç ve dış yüzeylerdeki radyal gerilmeler sıfır olarak tespit edilmiştir. Yüzeyler arasındaki tüm bölgelerde ise radyal gerilme bileşenleri daima bası gerilmesi durumundadır. Artan sıcaklık bası gerilmesi hesaplanan bölgelerde radyal gerilme şiddetinin yükselmesine sebep olmuştur. Maksimum radyal gerilme bileşenleri r değerlerine göre diskin orta bölgesine yakın kısımlarında ve yüksek sıcaklıklarda hesaplanmıştır.

Bu çözümde teğetsel gerilmeler diskin iç yarıçapından negatifte $\sigma_t = -104,4\text{MPa}$ olarak başlamış (T=100 için), dışta pozitif $\sigma_t = 124,7\text{MPa}$ değerine kadar yükselmiştir.

Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, muhtelif sabit sıcaklıklar altında teğetsel gerilmeler fonksiyonel derecelendirilmiş diskin iç yüzeyinde bası gerilmesi dış yüzeyinde ise çeki gerilmesi şeklinde bulunmuştur. Sıcaklığın artmasıyla iç yüzeyde ve dış yüzeyde oluşan teğetsel gerilme bileşenlerinin şiddeti artmaktadır. Diskin dış yüzeyinde oluşan teğetsel gerilmenin şiddeti iç yüzeyde oluşan teğetsel gerilmeden daha yüksektir.

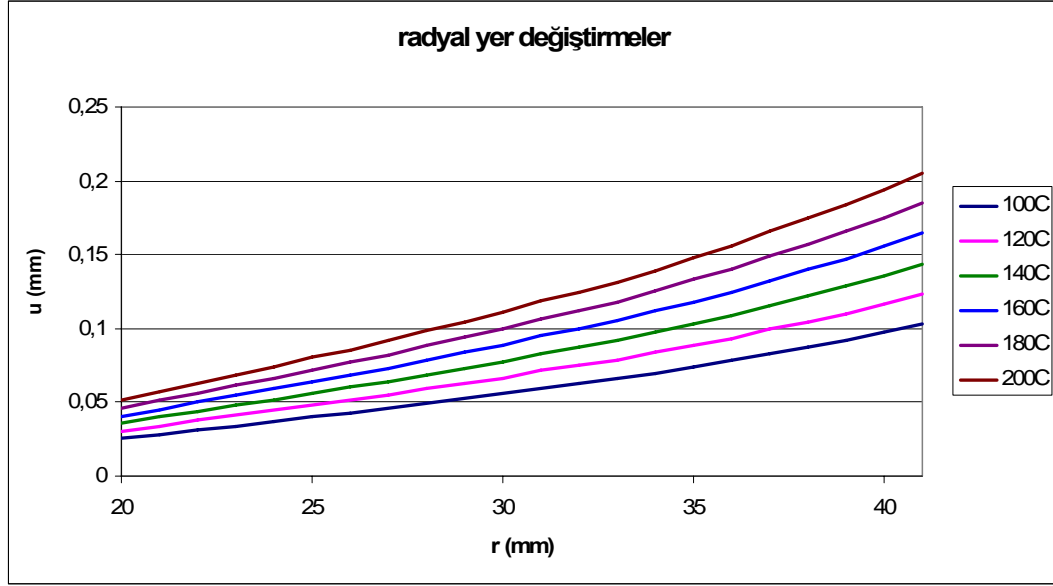
Radyal gerilme bileşenlerinin değeri, teğetsel gerilme değerlerinden daha küçük olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3.3'te sabit sıcaklık dağılımına maruz diskin, çeşitli termal yükler altındaki analitik çözümünden elde edilen radyal yöndeki yer değiştirmeler (u_r) verilmiştir.

Tablo 3.3 Diskin sabit sıcaklık altında radyal yer değiştirme değerleri

Sıcaklık ΔT (°C)	Yüzey	u_r (mm)
100	İç (r=20)	0,0256
	Dış (r=41)	0,1027
120	İç (r=20)	0,0307
	Dış (r=41)	0,1233
140	İç (r=20)	0,0358
	Dış (r=41)	0,1438
160	İç (r=20)	0,0409
	Dış (r=41)	0,1644
180	İç (r=20)	0,0461
	Dış (r=41)	0,1849
200	İç (r=20)	0,0512
	Dış (r=41)	0,2054

Şekil 3.4'te elastik çözümde hesaplanan radyal yer değiştirmeler görülmektedir. Burada iç yüzeyde minimum olan yer değiştirme değerleri diskin dış yüzeyinde maksimum büyüklüğüne ulaşmaktadır. Böylece diskin termal yük altında dışa doğru genişlediği söylenebilir.



şekil 3.4 Termal yüklerin değişimiyle oluşan radyal yer değiştirmeler

Bu çözümde hesaplanan radyal yer değiştirmeler 200°C için en fazla $u=0,2054\text{mm}$ 100°C için $u=0,1027\text{mm}$ olarak elde edilmiştir.

4. SONLU ELEMANLAR METODU VE DİSKİN SEM MODELİ

Mühendislik uygulamalarında problemlerin karmaşıklığı sebebiyle genellikle problemlerin tam çözümü yerine, kabul edilebilir seviyede bir yaklaşık çözüm tercih edilir. Bazı problemlerde tam çözüm imkânsız kabul edilerek yaklaşık çözüm tek yol olarak benimsenir. Sonlu elemanlar metodu, karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir.

Çözüm yöntemindeki adımlar şunlardır:

- a) Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
- b) İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi,
- c) Eleman direngenlik matrisinin teşkili,
- d) Sistem direngenlik matrisinin hesaplanması,
- e) Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
- f) Sınır şartlarının belirlenmesi,
- g) Sistem denklemlerinin çözümü. (Topcu ve Taşgetiren 1998).

Çalışmada, Sonlu Elemanlar Metodu (SEM) ile problem çözümünde kullanılan mevcut CAE (Computer Aided Engineering) programlarından ANSYS ile örnek modellerimizin, modellenmesi, yük tanımı, sınır şartları tanımlanması yapıldıktan sonra problemin çözümü gerçekleştirilecektir.

ANSYS yazılımı, mühendislerin mukavemet, mekanik, titreşim ve ısı transferi ile elektromanyetik alanlarında fiziğin tüm disiplinlerinin birbiri ile olan etkileşimini simule etmekte kullanılabilen genel amaçlı bir sonlu elemanlar yazılımıdır.

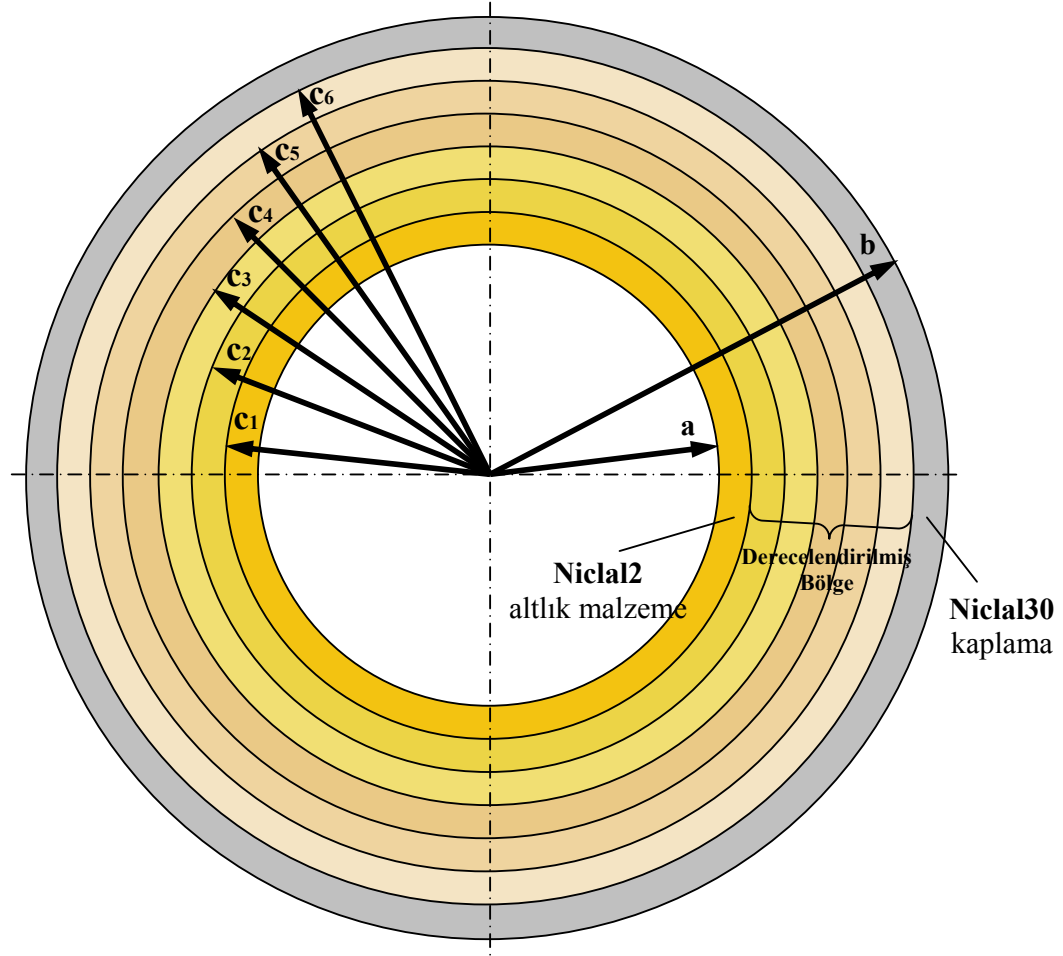
Bu sayede gerçekleştirilen testlerin ya da çalışma şartlarının simule edilmesine olanak sağlayan ANSYS, ürünlerin henüz prototipleri üretilmeden sanal ortamda test edilmelerine olanak sağlar. Ayrıca sanal ortamdaki 3 boyutlu simülasyonlar neticesinde

yapıların zayıf noktalarının tespiti ve iyileştirilmesi ile ömür hesaplarının gerçekleştirilmesi ve muhtemel problemlerin öngörülmesi mümkün olmaktadır.

4.1 Modelin Oluşturulması

Termal yükleme yapılacak disk malzeme tabakalı olarak dizayn edilecektir. Niclal2 (%98Cu) altlık malzeme ile üzerine kaplanacak olan Niclal30 olarak adlandırılan Bakır-Nikel (%70Cu - %30Ni) alaşım kaplama malzemesi arasındaki bölge alaşım oranlarına göre derecelendirilmiş eşit kalınlıkta 5 tabakaya bölünecektir.

Şekil 4.1'de gösterilen halka şeklindeki disk modelin iç çapı (a) 20mm, dış çapı (b) 41mm her bir tabakanın kalınlığı 3mm olarak alınmış, kalınlık 1 birim kabul edilmiştir.

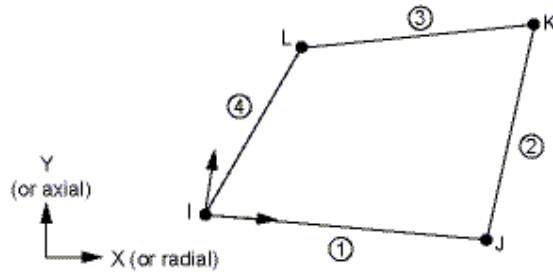


Şekil 4.1 Termal analiz için oluşturulan disk modeli

Disk modelinde farklı indislerle c_s ($s=1..6$) olarak verilen yarıçaplar derecelendirilmiş tabakaların yarıçapları olup sırasıyla 23, 26, 29, 32, 35 ve 38mm'dir.

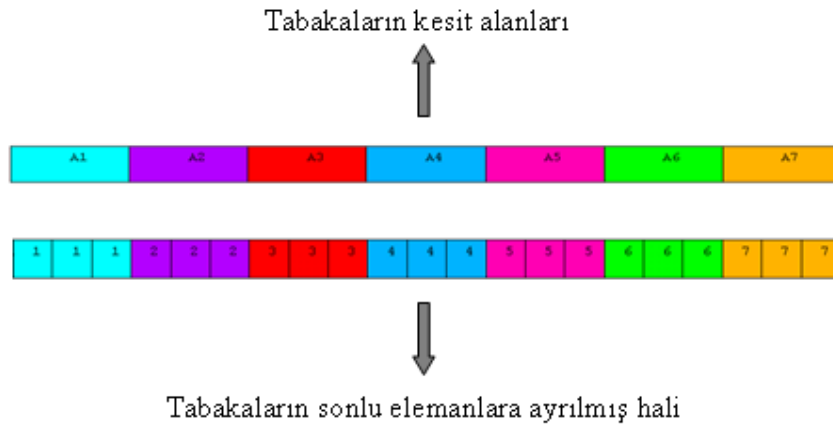
4.2 Nümerik Analiz İçin Diskin Sonlu Elemanlara Ayrılması

Sistemin sonlu elemanlara ayırma işlemi için Şekil4.2'deki 4 düğümlü dörtgen elemanlar seçilmiş ve düzgün bir mesh atılmıştır.



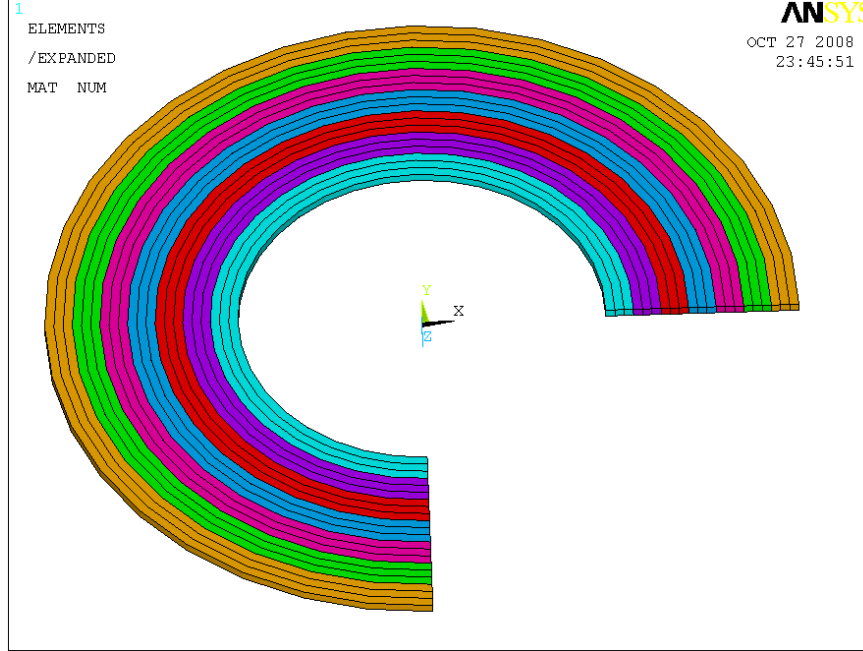
Şekil 4.2 Nümerik analiz için seçilen eleman tipi

Modelleme için kesit alanlar Şekil 4.3'te gösterildiği gibi tespit edildikten sonra malzeme aksenal simetrik (axisymmetric) tanımlanarak disk oluşturulmuştur.



Şekil 4.3 Fonksiyonel derecelendirilmiş disk'in kesit alan ve sonlu eleman görüntüsü

Malzeme özellikleri her bir tabakaya tanımlandıktan sonra sistem Şekil 4.4'te görüldüğü şekilde sonlu elemanlara ayrılmıştır. Ayrıca Şekil 4.4'te kesit alanı gösterebilmek için diskin $\frac{3}{4}$ 'lük bölümü alınmıştır.



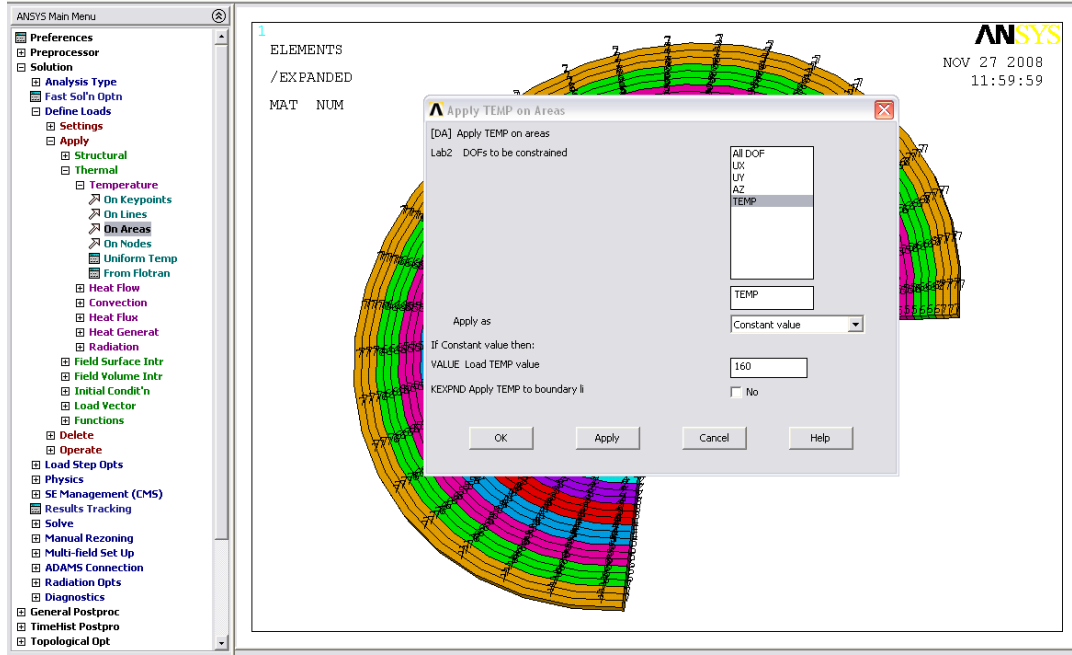
Şekil 4.4 Fonksiyonel derecelendirilmiş disk'in sonlu elemanlar modeli

4.3 Termal Yüklerin ve Sınır Şartlarının Tanımlanması

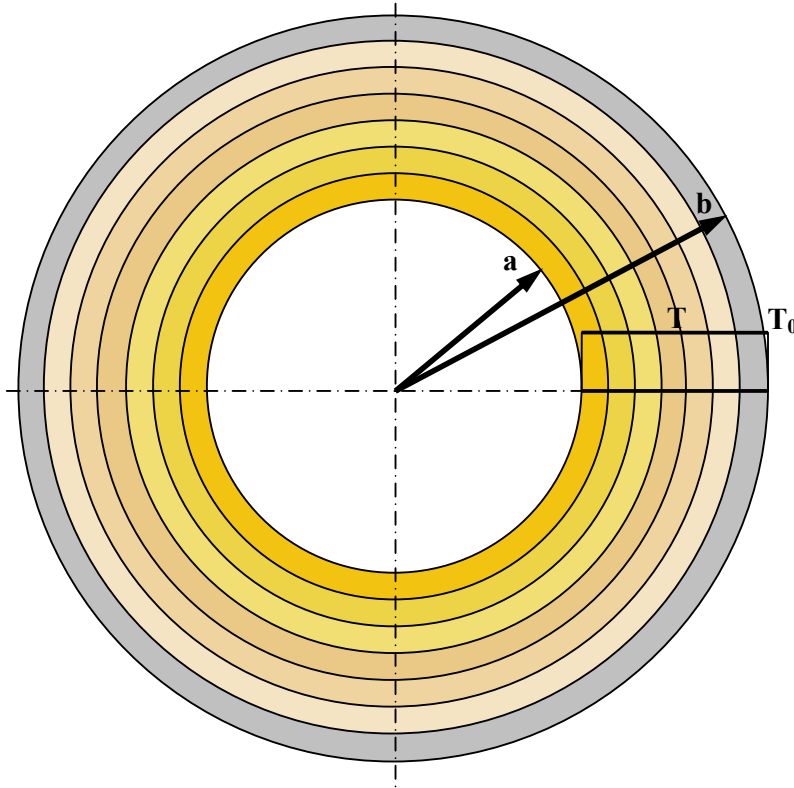
Analiz için oluşturulan disk modeline yarıçap boyunca sabit sıcaklıklar uygulanmış ve 6 farklı sıcaklık değeri için gerilme analizi yapılmıştır.

Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, Nümerik analiz için programın "Termal Yükler" (Define Loads>Apply>Temperature) bölümünden bu sıcaklık değerleri kesit boyunca sabit olacak şekilde girilmiştir.

Sırasıyla 100°C, 120°C, 140°C, 160°C, 180°C ve 200°C büyüklüğünde termal yük uygulanmış, diskin iç ve dış yüzeylerinde herhangi bir ısı yük verilmemiştir. Çevre sıcaklığı sıfır kabul edilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalı diske uygulanan sabit sıcaklık dağılımı Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.5 Diske termal yük girilmesi



Şekil 4.6 Termal yükleme için uygulanan sabit sıcaklık dağılımı

4.4 Termal Gerilme Analizi

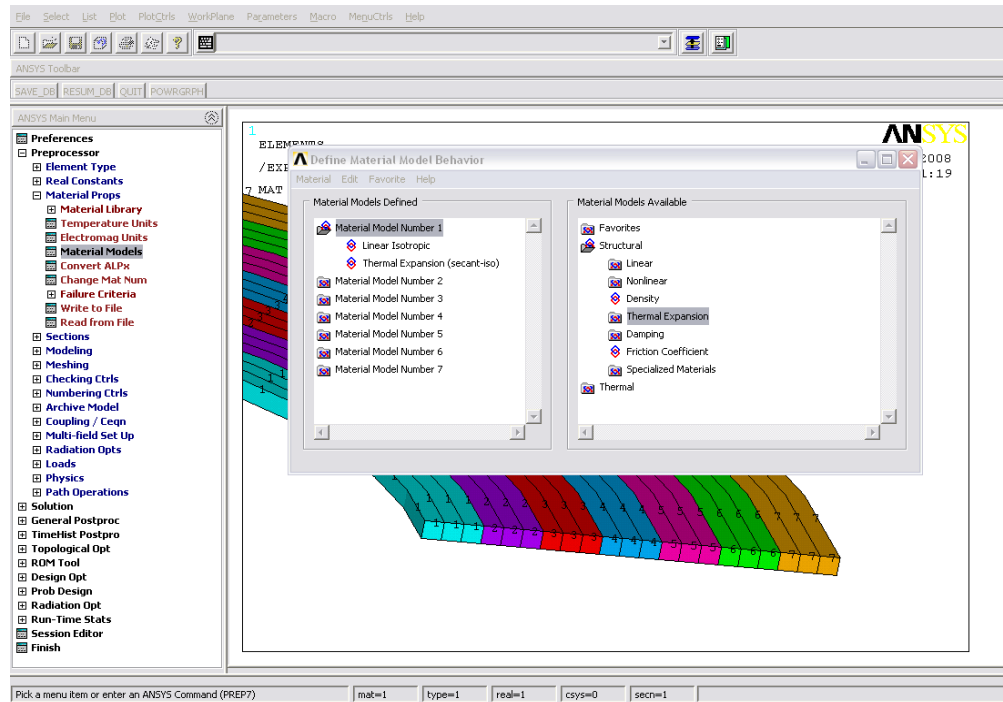
Oluşturulan model için ANSYS programında, verilen termal yükler ve sınır koşulları altında çözümlenip, sonuçlar fonksiyonel derecelendirilmiş disk için elde edilmiştir.

5. NÜMERİK ANALİZ

Çalışmanın bu aşamasında analitik çözümü yapılan disk modeli, uygulanan termal yükler ve sınır koşulları aynı şekilde nümerik analiz programına aktarılmıştır.

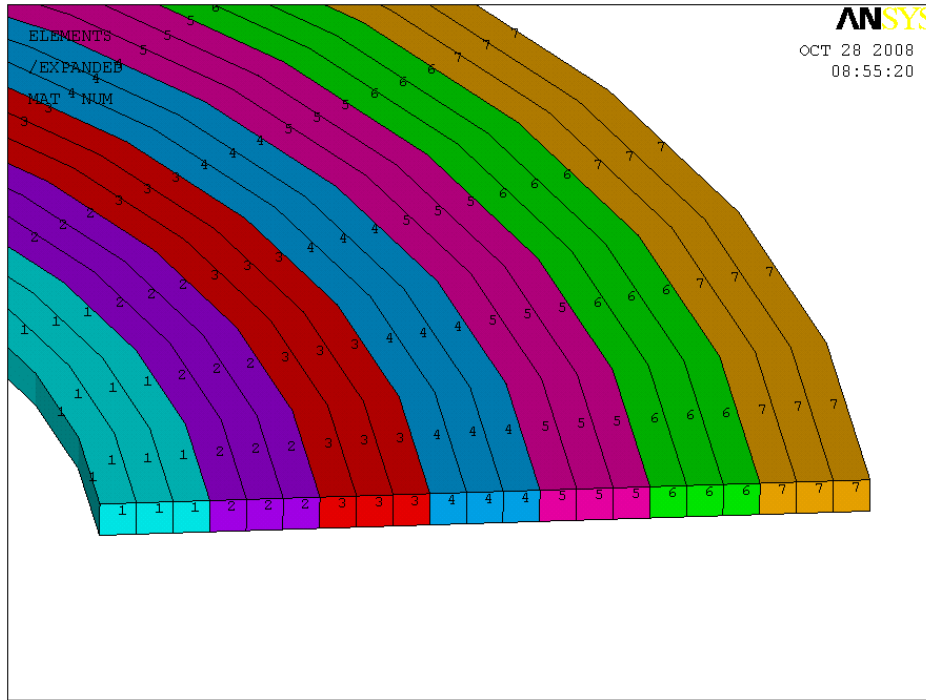
Programdaki Preprocessor>Material_Props>Material_Models menüsünden malzemenin Elastisite Modülü, Poisson Oranı ve Isıl Genleşme Katsayıları her tabaka için ayrı ayrı girilmiştir. Daha sonra bu girilen özellikler menüdeki Meshing>Mesh_Attributes kısmından her bir tabakaya atanır ve model dörtgen yapıda düzgün sonlu elemanlara ayrılır.

Şekil 5.1’de programda malzeme tanımlanan ekran görüntüsü verilmiştir. Burada tüm tabakalar için malzeme özellikleri Linear>Elastic>Isotropic olarak girilmiştir. Şekil 5.2’de malzemelere göre tabakalar görülmektedir.

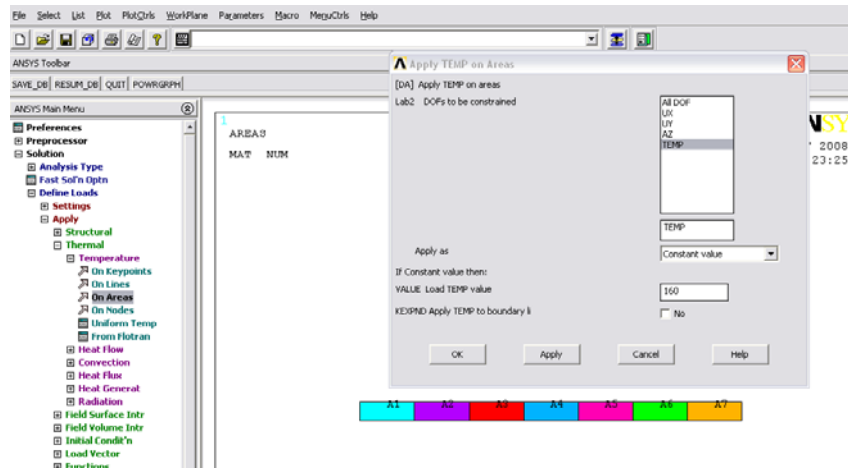


Şekil 5.1 Nümerik analiz programında malzeme özelliklerinin girilmesi

Modelleme, malzeme özellikleri girişi, malzemelerin tabakalara atanması, modelin sonlu elemanlara ayrılması aşamalarından sonra menülerden Solution>Define Load>Apply>Thermal yolu takip edilerek sabit sıcaklık değeri Şekil 5.3'teki gibi programa girilir ve son olarak Solution>Solve ile gerilme analizi tamamlanır.



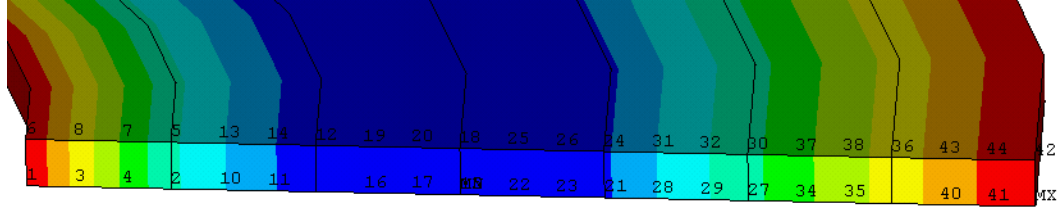
Şekil 5.2 Malzeme özellikleri atanmış tabaka görünümü



Şekil 5.3 Termal yüklerin modele uygulanması

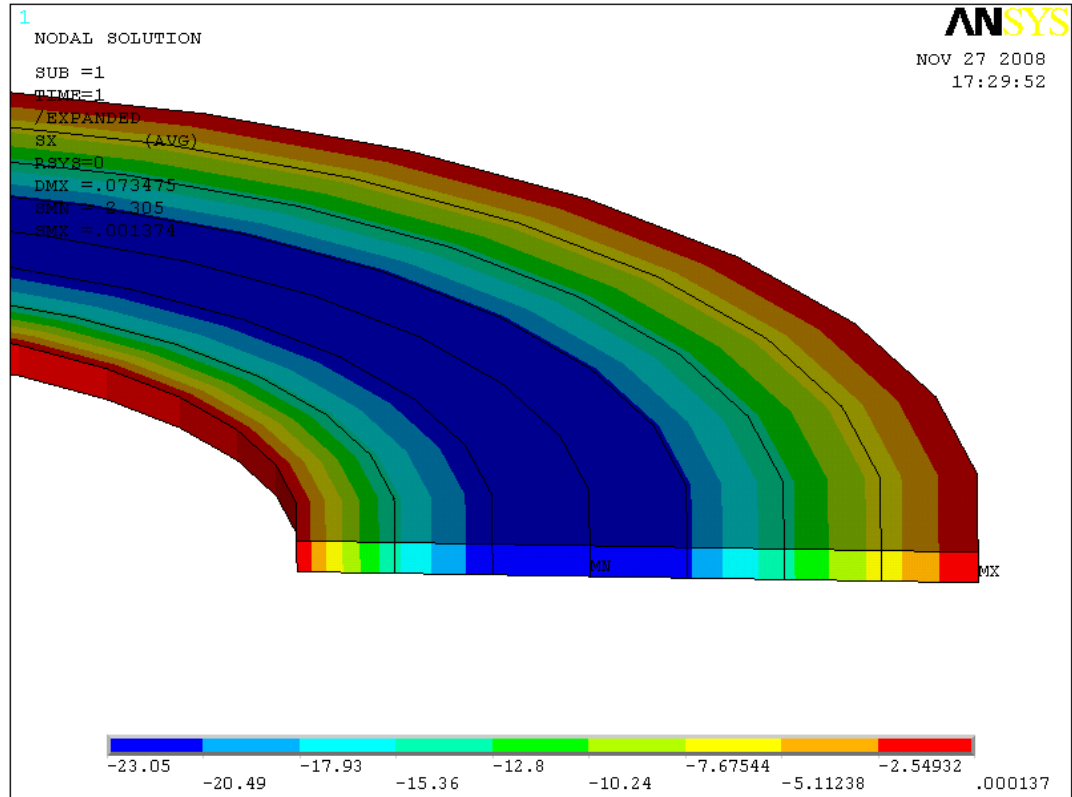
5.1 Gerilme Analizi Sonuçlarının Alınması

Çalışmada modellenen disk malzemenin kesit alanı boyunca Şekil 5.4'teki düğüm noktaları üzerinden değerler alınarak grafik üzerinden gerilme dağılımı gözlenmiştir.



Şekil 5.4 Gerilme değerlerinin alındığı düğüm noktaları

Malzemenin kalınlığı boyunca gerilme değerleri değişmemekle beraber, radyal yönde yarıçap boyunca gerilme dağılımı Şekil 5.5'te görülmektedir.



Şekil 5.5 Sonlu elemanlar çözümünden elde edilen gerilme dağılımı görseli

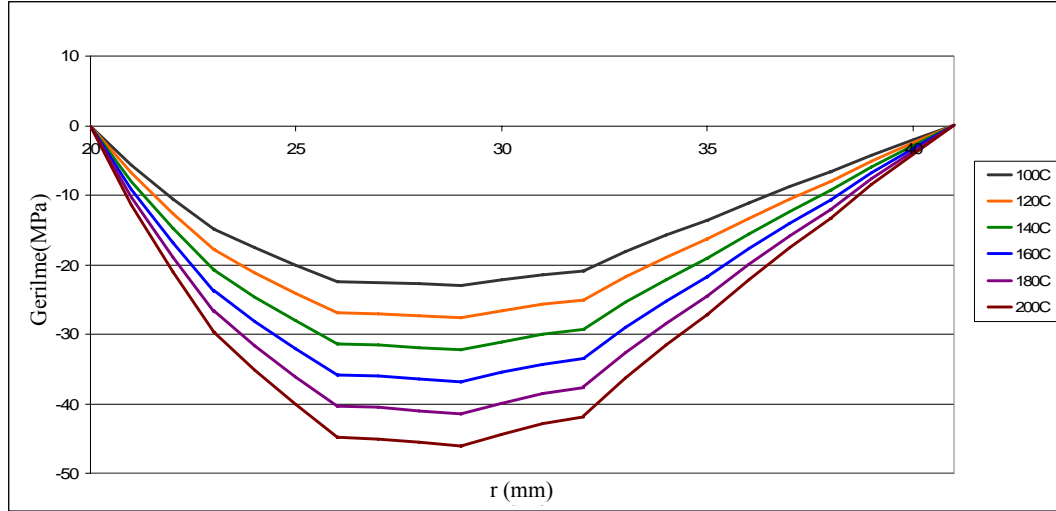
Nümerik analizden elde edilen farklı termal yükler altında oluşan radyal ve teğetsel gerilme değerleri Tablo 5.1’de verilmiştir. Radyal gerilmeleri gösteren gerilme dağılımı grafiği de Şekil 5.6’da görülmektedir.

Tablo 5.1 Diskin nümerik analizden alınan radyal ve teğetsel gerilme değerleri

Sıcaklık ΔT (°C)	Yüzey	σ_t (MPa)	σ_r (MPa)
100	İç (r=20)	-121,31	0
	Dış (r=41)	91,26	0
120	İç (r=20)	-145,57	0
	Dış (r=41)	107,51	0
140	İç (r=20)	-169,83	0
	Dış (r=41)	123,76	0
160	İç (r=20)	-194,10	0
	Dış (r=41)	140,01	0
180	İç (r=20)	-218,36	0
	Dış (r=41)	156,26	0
200	İç (r=20)	-242,62	0
	Dış (r=41)	172,51	0

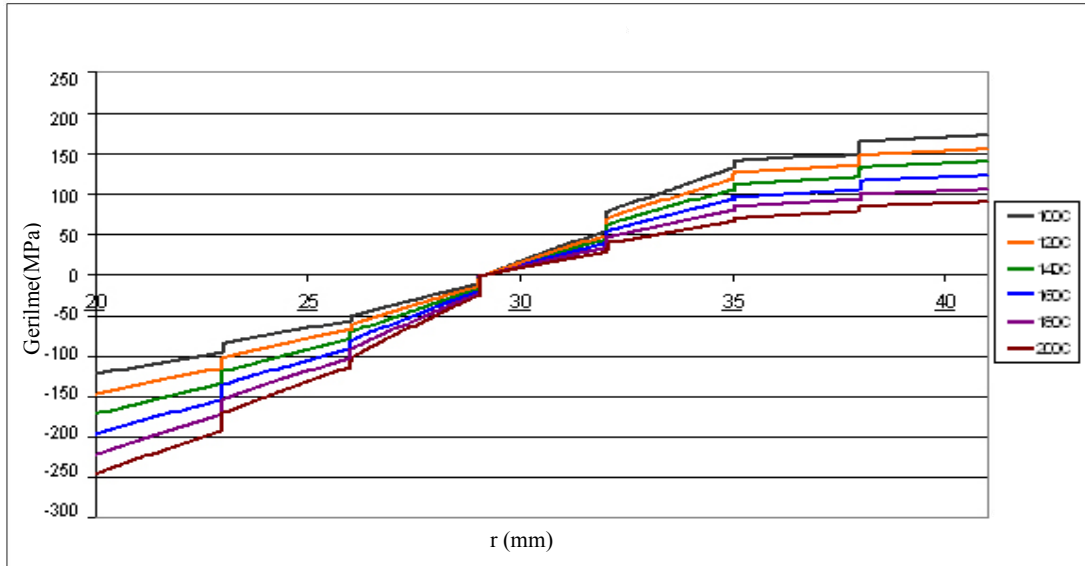
Disk modelin radyal gerilme dağılımı Şekil 5.6’da görüldüğü gibi negatif bölgede seyretmektedir. Tüm sıcaklıklar için maksimum radyal gerilme değeri sıfırdır ve minimum gerilme değerleri T=100 için $\sigma_{r(\min)} = -23,05\text{MPa}$, T=200 içinse $\sigma_{r(\min)} = -46,1\text{MPa}$ olarak tespit edilmiştir.

Fonksiyonel derecelendirilmiş disk için iç ve dış yüzeyler arasındaki bölgelerde radyal gerilme bileşenleri bası gerilmesi olarak görülmektedir. Diskin iç ve dış yüzeylerinde radyal gerilmeler sıfırdır. Sıcaklığın yükseltilmesiyle uygulanan termal yükün artırılması, bası gerilme değeri büyüklüklerinin artmasına sebep olmuştur. Şekil 5.6’da da görüldüğü gibi, maksimum radyal gerilme değerleri, radyal yönde disk orta bölgelerine yakın kısımlarda ölçülmüş ve yüksek termal yüklerle elde edilmiştir.



Şekil 5.6 Termal yükler altında nümerik analizden alınan radyal gerilmeler

Disk modeli için nümerik analizden elde edilen teğetsel gerilme dağılımı Şekil 5.7'de verilmiştir. Teğetsel gerilmeler iç yüzeyde bası gerilmesi olarak, dış yüzeyde çeki gerilmesi olarak tespit edilmiştir. Tablo 5.1'de verilen ve grafikte dağılımı görülen gerilme değerlerinden anlaşıldığı gibi bası gerilmeleri, çeki gerilmelerinden daha yüksektir.

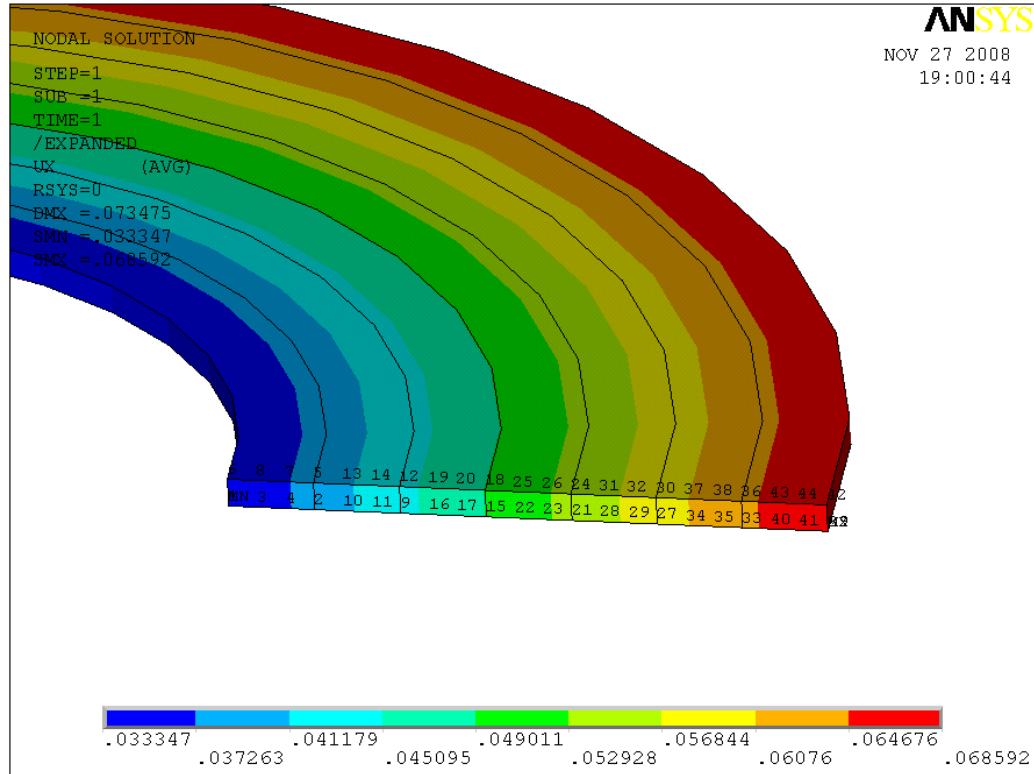


Şekil 5.7 Termal yüklerin değişimiyle nümerik analizden alınan teğetsel gerilmeler

Bu çözümde teğetsel gerilme bileşenlerinin, radyal gerilme bileşenlerinden çok daha büyük olduğu bulunmuştur.

5.2 Radyal Yer Değişirmeler

Analizi yapılan diskin üzerinden, yine yarıçap boyunca yer değiştirme değerleri alınarak değerlendirilmiştir. Şekil 5.8'de programdan alınan radyal yer değiştirme dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.8 Radyal yönde yer değiştirmelerin disk üzerindeki dağılımı

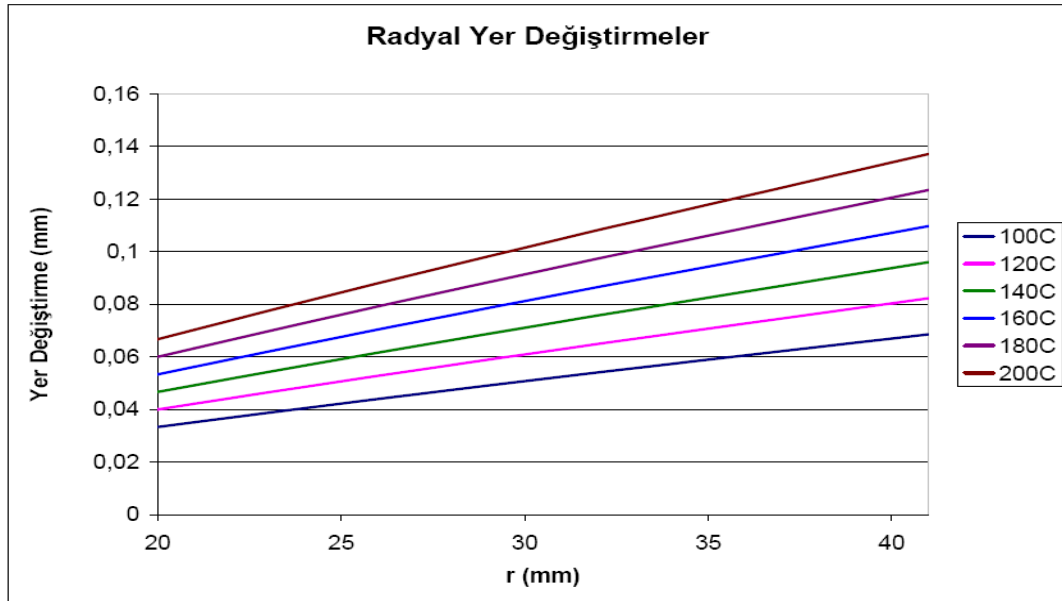
Sabit sıcaklık dağılımı uygulanmış FDM diskin nümerik analiz sonucu elde edilen radyal yer değiştirme değerleri Tablo 5.2'de verilmektedir.

Bu çözümde elde edilen radyal yer değiştirmeler diskin iç yüzeyinde minimum dış yüzeyinde ise maksimum değerlere ulaşmaktadır. Buradan fonksiyonel derecelendirilmiş diskin termal yükler altında genişlediği anlaşılmaktadır.

Tablo 5.2 Diskin nümerik analizden alınan radyal yer değıştirme değeri

Sıcaklık ΔT ($^{\circ}C$)	Yüzey	u_r (mm)
100	İç ($r=20$)	0,0334
	Dış ($r=41$)	0,0686
120	İç ($r=20$)	0,0400
	Dış ($r=41$)	0,0823
140	İç ($r=20$)	0,0467
	Dış ($r=41$)	0,0960
160	İç ($r=20$)	0,0534
	Dış ($r=41$)	0,1098
180	İç ($r=20$)	0,0600
	Dış ($r=41$)	0,1235
200	İç ($r=20$)	0,0667
	Dış ($r=41$)	0,1372

Şekil 5.9’da görülen yer değıştirmelerin grafik dağılımından, sıcaklık yükseltileerek artan termal yükün deplasman değeri artırdığı anlaşılmaktadır.

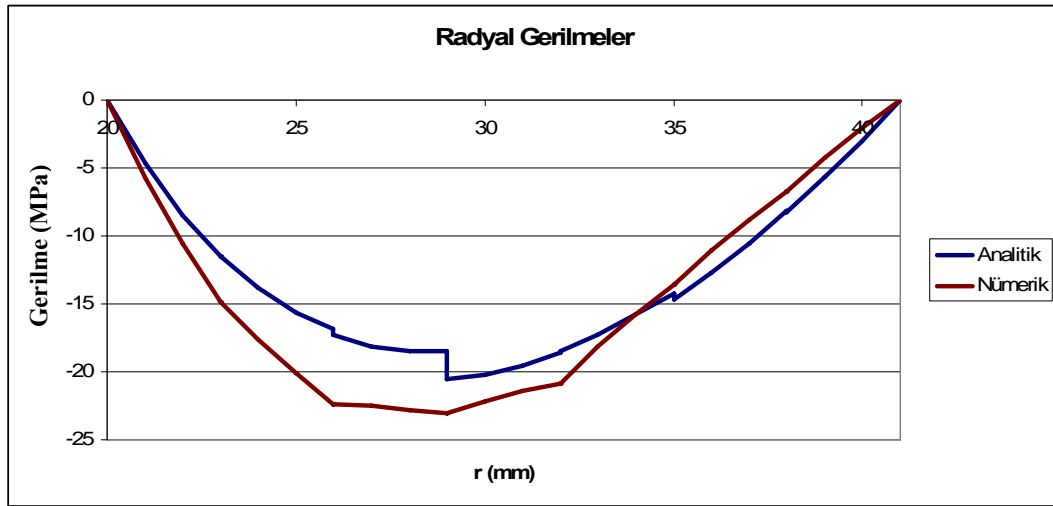
**Şekil 5.9** Termal yükler altında nümerik analizden alınan radyal yer değıştirmeler

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, fonksiyonel derecelendirilmiş tabakalı disklerin termal yük altındaki davranışları incelenmeye çalışılmıştır. Analizler analitik çözüm ve nümerik çözüm olmak üzere iki farklı yöntemle yapılarak elde edilen değerlerin tutarlılığı kontrol edilmiştir. Nümerik analiz için sonlu elemanlar analiz paket programı ANSYS kullanılmıştır. Her iki analiz yöntemi için de aynı model ve sınır koşulları ile çözüm yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir.

Disk in yarıçap boyunca radyal doğrultuda sabit sıcaklığa maruz olduğu düşünülerek, homojen yedi tabakadan oluştuğu ve %2 nikel alaşımlı altlık malzeme ile %30 nikel alaşımlı kaplama malzemesi arasındaki bölge beş eşit tabakaya bölünerek alaşım oranları fonksiyonel derecelendirilmiştir.

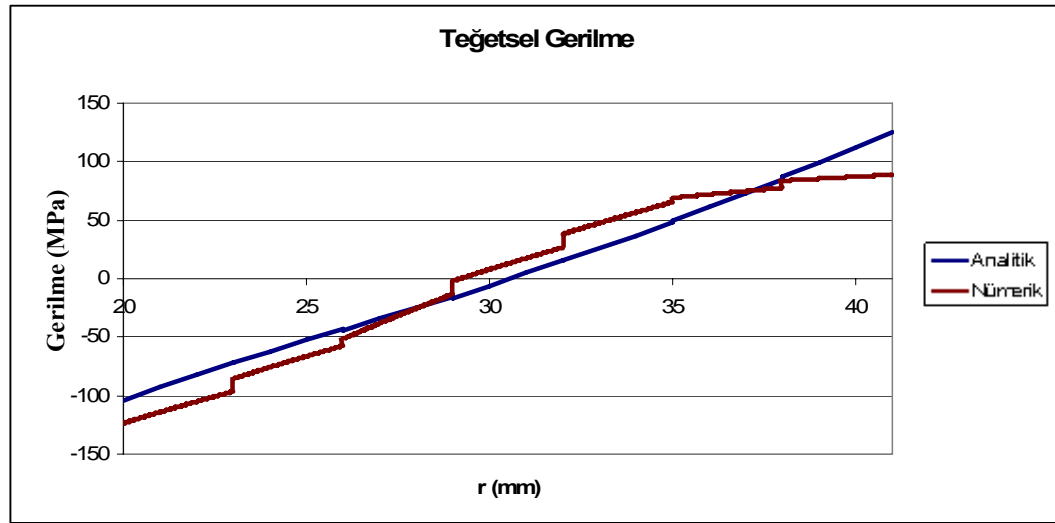
Her iki yöntemden alınan radyal ve teğetsel gerilme değerlerinin ve radyal yer değiştirmelerin (Şekil 6.1), yaklaşık büyüklükler arasında değiştiği ve benzer dağılımlar sergilediği görülmüştür.



Şekil 6.1 T=100 için analitik ve nümerik analizden alınan radyal gerilmeler

Şekil 6.1, Şekil 6.2 ve Şekil 6.3'te $T=100^{\circ}\text{C}$ için Analitik ve Nümerik çözümlerden elde edilen radyal gerilme, teğetsel gerilme ve radyal yönde yer değiştirme değerlerinin karşılaştırmalı grafiği verilmiştir.

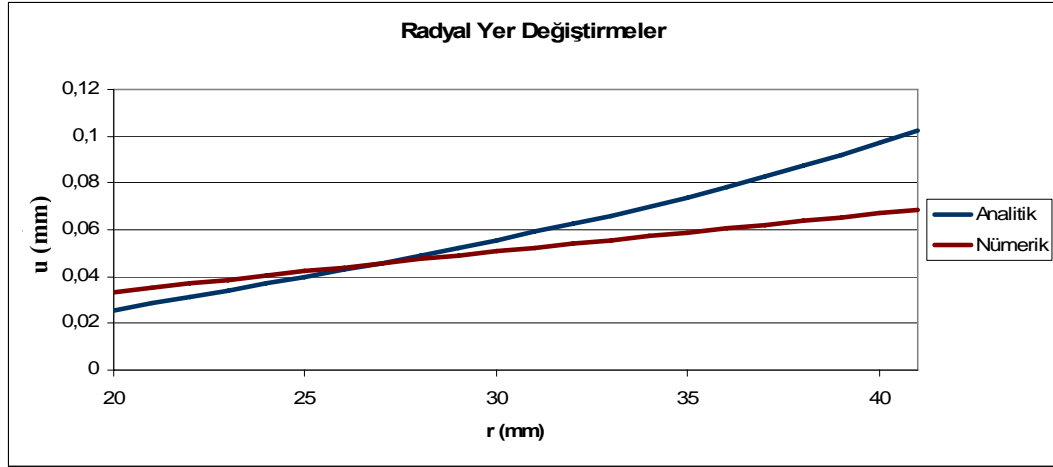
Bu sıcaklık için radyal gerilme büyüklükleri analitik çözümde 0 ile -20,5 MPa arasında, nümerik çözümde 0 ile -23,05 MPa aralığında değişmektedir. Bununla birlikte analitik çözümde, radyal gerilme değerlerinde tabaka geçişlerinde görülen atlamalar, nümerik çözümde çok daha küçüktür.



Şekil 6.2 $T=100$ için analitik ve nümerik analizden alınan teğetsel gerilmeler

Aynı sıcaklık için teğetsel gerilme değerleri, analitik çözümde -104,4 MPa ile 124,7MPa aralığında değişirken nümerik çözümde bu aralık -121,31 MPa ile 91,26 MPa arasındadır. Ayrıca teğetsel gerilmelerin tabakalar arası geçişlerinde, analitik çözümle hesaplanan sonuçlar nümerik çözümde elde edilen değerlere göre daha küçük sıçramalar yaptığı Şekil 6.2'den de görülmektedir.

Şekil 6.3'te verilen grafikte görülen radyal deplasmanlar nümerik çözümde, analitik çözüme göre daha küçük bir aralıkta değişmektedir. Her iki yöntemde elde edilen yer değiştirmeler diskin iç yarıçapında %0,128-%0,333 dış yarıçapta %0,167-%0,5 arasında bir genleşme yani ortalama olarak yarıçapta binde birlik bir değişim gözlenmektedir.



Şekil 6.3 T=100 için analitik ve nümerik analizden alınan radyal yer değışirmeler

İçteki tabakanın dış yüzeyiyle bir sonraki tabakanın iç yüzeyi farklı deplasman değeri göstermesi halinde tabakaların ayrıldığı ve birlikte hareket etmediği kabul edilmiş olacağından, radyal ve teğetsel gerilmelerde görülen tabaka geçişlerindeki sıçramalar deplasman analizlerinde görülmemiştir.

Çalışmada hem analitik hem de nümerik metotla, farklı sıcaklıklar için sabit sıcaklık dağılımıyla elastik termal gerilme analizi yapılmıştır. Model olarak Fonksiyonel Derecelendirilmiş Tabakalı Disk seçilmiş, ikinci bölümde FDM teknolojisinden bahsedilmiş, üçüncü bölümde modelin analitik çözümü yapılmış, daha sonraki bölümlerde nümerik yöntemden bahsedilmiş ve ANSYS programıyla bu çözüm gerçekleştirilmiştir.

Her iki yöntemde de sıcaklık arttıkça radyal gerilme değerin bası yönünde arttığı, teğetsel gerilme değerin ise hem bası hem çeki yönünde artış gösterdiği saptanmıştır. Deplasman değerlerinde ise lineer bir artış olduğu gözlenmiştir.

İncelenen çalışmalarda ara bölgesi fonksiyonel derecelendirilmemiş tabakalı diskler için yapılan termal gerilme analizlerinde, tabakalar arasında çok belirgin olarak görülen gerilme değeri sıçramalarının yürütülen çalışmadaki derecelendirilmiş geçiş bölgesi sayesinde minimize edilebildiği görülmüştür.

Fonksiyonel derecelendirilmiş diskte, elastisite, ısı iletim ve ısı genleşme fonksiyonlarının özellikleri, gerilme ve şekil değıştirmeler üzerinde beraber etki etmektedir. Diskteki FDM tabakasının gerilmelere olumlu etki ettiği, daha düzgün bir gerilme dağılımı sergilediği görölmüşür. Fonksiyonel derecelendirilmiş yapının termal gerilmeler üzerindeki olumlu etkilerinden dolayı tercih edilir bir yapı olduğu saptanmıştır.

Tipik bir tabakalı yapı, üretim aşamasında ve çalışma ömrü boyunca sıcaklıktan etkilenir. Bu sebeple tabakalı diski oluşturan malzemeler arasında termal uyumsuzluk nedeniyle oluşabilecek gerilmeleri önceden tahmin etmek gereklidir. Bazı mikromekanik gerilmeler iç hasarlara sebep olabilir, bu şekildeki gerilme dağılımı, hasar oluşumu ve yayılımı malzemenin çalışma ömrünü etkiler. Yüksek sıcaklık koşullarındaki tabakalı malzemenin çalışma ömrü için, hem makromekanik hem de mikromekanik düzeyde malzemenin sıcaklık dağılımı ve buna bağlı termal gerilmeler göz önünde bulundurulmalıdır. Tabakalı yapılarda termal gerilmelere bağlı uyumsuzlukları azaltmak, iç hasarları önlemek ve termal şoklara karşı dayanıklılığı artırmak için Fonksiyonel Derecelendirilmiş yapılar kullanılmaktadır.

Son yıllarda FDM teknolojisinin çok hızlı gelişme kaydettiği ve kullanım alanının genişlediği ve bununla birlikte FDM araştırmalarında memnuniyet verici bir artış görölmektedir. FDM özellikli homojenizasyon bölgesi, imalat yöntemleri açısından derecelendirilmemiş tabakalı kompozit malzemeye göre şimdilik daha kısıtlı imkânlarla sahip olmasına karşılık elde edilen mikromekanik özellikler ve analiz edilen gerilme değerleri bakımından daha avantajlıdır.

EKLER

Ek-1. Analitik Çözüm İçin Üretilmiş MATLAB Program Örneği

```

T=input(' (T=100,120000,140,160,180,200) Sıcaklık giriniz
=' );
c=20;
d=41;
%-----
R(1)=20;R(2)=21;R(3)=22;R(4)=23;R(5)=23;R(6)=24;R(7)=25;
R(8)=26;R(9)=26;R(10)=27;R(11)=28;R(12)=29;R(13)=29;
R(14)=30;R(15)=31;R(16)=32;R(17)=32;R(18)=33;R(19)=34;
R(20)=35;R(21)=35;R(22)=36;R(23)=37;R(24)=38;R(25)=38;
R(26)=39;R(27)=40;R(28)=41;
%-----
E(1)=118000;E(2)=118000;E(3)=118000;E(4)=118000;
E(5)=120000;E(6)=120000;E(7)=120000;E(8)=120000;
E(9)=126000;E(10)=126000;E(11)=126000;E(12)=126000;
E(13)=141470;E(14)=141470;E(15)=141470;E(16)=141470;
E(17)=144000;E(18)=144000;E(19)=144000;E(20)=144000;
E(21)=150000;E(22)=150000;E(23)=150000;E(24)=150000;
E(25)=154000;E(26)=154000;E(27)=154000;E(28)=154000;
%-----
n(1)=0.3395;n(2)=0.3395;n(3)=0.3395;n(4)=0.3395;
n(5)=0.3385;n(6)=0.3385;n(7)=0.3385;n(8)=0.3385;
n(9)=0.3355;n(10)=0.3355;n(11)=0.3355;n(12)=0.3355;
n(13)=0.3253;n(14)=0.3253;n(15)=0.3253;n(16)=0.3253;
n(17)=0.3198;n(18)=0.3198;n(19)=0.3198;n(20)=0.3198;
n(21)=0.3067;n(22)=0.3067;n(23)=0.3067;n(24)=0.3067;
n(25)=0.2979;n(26)=0.2979;n(27)=0.2979;n(28)=0.2979;
%-----
a(1)=17.7e-6;a(2)=17.7e-6;a(3)=17.7e-6;a(4)=17.7e-6;
a(5)=17.5e-6;a(6)=17.5e-6;a(7)=17.5e-6;a(8)=17.5e-6;
a(9)=17.1e-6;a(10)=17.1e-6;a(11)=17.1e-6;a(12)=17.1e-6;
a(13)=16.87e-6;a(14)=16.87e-6;a(15)=16.87e-6;

```

```

a(16)=16.87e-6;a(17)=16.4e-6;a(18)=16.4e-6;a(19)=16.4e-
6;a(20)=16.4e-6;a(21)=16.3e-6;a(22)=16.3e-6;a(23)=16.3e-
6;a(24)=16.3e-6;a(25)=16.2e-6;a(26)=16.2e-6;a(27)=16.2e-
6;a(28)=16.2e-6;

%-----
%T=100,120000,140,160,180,200
%-----

for i = 1:28
A=E(i)*a(i)*T/(4*((d)^2-(c)^2));
C1=-A*((c)^2+(d)^2);
C2=A*(c)^2*(d)^2;
Sr(i)=C1+(C2/(R(i)^2))+A*(R(i)^2)
St(i)=C1-(C2/(R(i)^2))+3*A*(R(i)^2)
ur(i)=1/E(i)*(C1*R(i)*(1-n(i))-C2/R(i)*(1-
n(i))+A*R(i)^3*(3-n(i)))+a(i)*R(i)*T
end

```

KAYNAKLAR

- Agarwal, B., Upadhyay, P. C., Banta, L. and Lyons, D. (2006) Transient Temperature Distribution In Composites With Layers Of Functionally Graded Materials (FGMs). *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 25: 513-542.
- Alagöz, H., Gülgeç, M. ve Konez, A. (2004) Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler ve Kullanım Alanları. *Mühendis ve Makine*, (532).
- Apetre, N. A., Sankar, B. V. and Ambur, D. R. (2008) Analytical Modeling Of Sandwich Beams With Functionally Graded Core. *Journal of Sandwich Structures and Materials*, 10: 53-74.
- Araki, N., Tang, D. W. and Ohtani, A. (2006) Evaluation Of Thermophysical Properties Of Functionally Graded Materials. *International Journal of Thermophysics*, 27 (1): 209-219.
- Banks, H. T., Mehdi, N. G. and Zhang, Y. (1997) Mathematical Model For A Laminated Curved Beam”, *Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control*, San Diego, California USA, s. 3739-3748.
- Birman, V. and Byrd, L. W. (2007) Modeling And Analysis Of Functionally Graded Materials And Structures. *Applied Mechanics Reviews*, 60: 195-215.
- Çallıoğlu, H., Topcu, M. and Tarakçılar, A.R. (2006) Elastic-Plastic Stress Analysis Of An Orthotropic Rotating Disc. *International Journal Of Mechanical Sciences*, 48: 985-990.
- Çallıoğlu, H. and Karakaya, Ş. (2008) Tabakalı Bir Diskin Termal Gerilme Analizi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1: 61-68.
- Cho, J. R. and Oden, J. T. (1998) Functionally Graded Material: A Parametric Study On Thermal-Stress Characteristics Using The Crank-Nicolson-Galerkin Scheme. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 188: 17-38.
- Dimitoka, K. and Yıldırım, B. (2003) Katmanlı Ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerden Yapılmış Termal Bariyer Kaplamalarındaki Termal Gerilimlerin Sonlu Elemanlar Metodu İle Hesaplanması. *Mühendis ve Makine*, (525): 34-42.
- Ecsedi, I. and Dluhi K. (2005) A Linear Model For The Static And Dynamic Analysis Of Non-Homogeneous Curved Beams. *Applied Mathematical Modelling*, 29: 1211-1231.
- Hosseini Kordkheili, S. A. and Naghdabadi, R. (2006) Thermoelastic Analysis Of A Functionally Graded Rotating Disk. *Composite Structures*, (79):508-516.
- Konez, A., Alagöz, H., Topal, S. and Gülgeç, M. (2005) Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretim Teknikleri Ve Kullanım Alanları. *Mühendis ve Makine*, 46(547): 39-52.

- Luo, H. and Baosheng, Z. (1997) Microstructure And Wear Resistance Of SiC/A356 Functionally Graded Materials, *Materials Science and Technology*, 5 (2): 76.
- Matsunaga, H. (2003), Interlaminar Stress Analysis Of Laminated Composite And Sandwich Circular Arches Subjected To Thermal/Mechanical Loading. *Composite Structures*, 60: 345-358.
- Nirmala, K., Upadhyay, P. C., Prucz, J. and Loynes, D. (2005) Thermoelastic Stresses In Composite Beams With Functionally Graded Layer. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 24: 1965-1977.
- Nogata, F. and Takahashi, H. (1995) Intelligent Functionally Graded Material: Bamboo. *Composites Engineering*, 5: 743-751.
- Ohmichi, M. and Noda, N. (2006) Plane Thermoelastic Problem In A Functionally Graded Plate With An Oblique Boundary To The Functional Graded Direction. *Journal of Thermal Stresses*, 30: 779-799.
- Pan, E. (2003) Exact Solution For Functionally graded Anisotropic Elastic Composite Laminates. *Journal of Composite Materials*, 37: 1903-1920.
- Pelletier, J. L. and Vel, S. S. (2006) An Exact Solution For The Steady-State Thermoelastic Response Of Functionally Graded Orthotropic Cylindrical Shells. *International Journal of Solids and Structures*, 43: 1131-1158.
- Pietrzak, K., Kalinski, D. and Chmielewski, M. (2006) Interlayer Of Al₂O₃-Cr Functionally Graded Material For Reduction Of Thermal Stresses In Alumina-Heat Resisting Steel Joints. *Journal of the European Ceramic Society*, 27: 1281-1286.
- Sayer, M. (2003) Thermal Stresses In Thin Thermoplastic Discs., Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 54s.
- Sayman, O. and Aksoy, S., (1980) Kompozit Malzemeler, *Ege Üniversitesi Matbaası*, İzmir, 108s.
- Sayman, O., Pekbey, Y., Sayman, S. (2006) Elastic-Plastic Stress Analysis Of A Thermoplastic Composite Disc Under Linear Temperature Distribution. *Journal of Reinforced Plastics And Composites*, 25: 379-391.
- Sayman, O. (2006) Stress Analysis Of A Thermoplastic Composite Disc Under Uniform Temperature Distribution. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 19: 61-77.
- Schulz, U., Peters, M., Bach, Fr. -W. and Tegeder, G. (2003) Graded Coatings For Thermal, Wear And Corrosion Barriers. *Materials Science and Engineering*, A362: 61-80.
- Shao, Z. S. and Ma, G. W. (2007) Thermo-Mechanical Stresses In Functionally Graded Circular Hollow Cylinder With Linearly Increasing Boundary Temperature. *Composite Structures*, 83: 259-265.

- Shenoi, R. A. and Wang, W. (2001) Through-Thickness Stresses In Curved Composite Laminates And Sandwich Beams. *Composites Science and Technology*, 61: 1501-1512.
- Shodja, H. M., Haftbaradaran, H. and Asghari, M. (2006) A Thermoelasticity Solution Of Sandwich Structures With Functionally Graded Coating. *Composites Science and Technology*, 67: 1073-1080.
- Silva E. C. N., Walters M. C. and Paulino G. H. (2006) Modeling Bamboo As A Functionally Graded Material: Lessons Fort He Analysis Of Affordable Materials. *Journal Material Science*, 41: 6991-7004.
- Sugano, Y., Chiba, R., Hirose, K. and Takahashi, K. (2004) Material Design For Reduction Of Thermal Stress In A Functionally Graded Material Rotating Disk. *JSME International Journal*, 47 (2): 189-197.
- Tilbrook, M. T., Moon, R. J. and Hoffman, M. (2004) Crack Propagation In Graded Composites. *Composites Science and Technology*, 65: 201-220.
- Topcu, M. ve Taşgetiren, S. (1998) Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu, 007, *PAÜ Mühendislik Fakültesi Matbaası*, Denizli, 302s.
- Wang, B. L., Mai, Y. W. and Zhang X. H. (2005) Functionally Graded Materials Under Severe Thermal Environments. *Journal of the American Ceramic Society*, 88 (3): 683-690.
- WEB_1 (2008). Clal msx, Manufacturer Of Copper And Nickel Based Alloys. <http://www.clal-msx.com/anglais/alliages> (03.11.2008)
- Zhang, X. Z., Kitipornchai, S., Liew, K.M., Lim, C. W. and Peng, L. X. (2003) Thermal Stresses Around A Circular Hole In A Functionally Graded Plate. *Journal of Thermal Stresses*, 26: 379-390.

ÖZGEÇMİŞ

Adı, Soyadı : Çiğdem ERSAN
Doğum Tarihi : 21. 02. 1977
Doğum Yeri : DENİZLİ
Bitirdiği Lise, Yılı : Denizli Lisesi, 1993
Bitirdiği Üniversite, Yılı : Pamukkale Üniversitesi Makine
Mühendisliği Bölümü, 1998