

**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMEDEN
YAPILMIŞ DÖNEN, İÇİ BOŞ BİR DİSKİN
GERİLME VE DEPLASMAN DAĞILIMININ
BELİRLENMESİ**

Alperen KÖSEDAĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2007
ANKARA**

Alperen KÖSEDAĞ tarafından hazırlanan FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMEDEN YAPILMIŞ DÖNEN, İÇİ BOŞ BİR DİSKİN GERİLME VE DEPLASMAN DAĞILIMININ BELİRLENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bedri TUÇ

Üye : Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

Üye : Prof. Dr. Yusuf ORÇAN

Üye : Doç. Dr. İbrahim USLAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Nihat GEMALMAYAN

Tarih : 30 / 04 / 2007

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Alperen KÖSEDAĞ

**FONKSİYONEL DERECELENDİRİLMİŞ MALZEMEDEN
YAPILMIŞ DÖNEN, İÇİ BOŞ BİR DİSKİN
GERİLME VE DEPLASMAN DAĞILIMININ
BELİRLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Alperen KÖSEDAĞ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Nisan 2007**

ÖZET

Bu çalışmada kalınlığı sabit ve malzeme özellikleri yarıçapın fonksiyonu olarak değişen, sabit bir sıcaklık değeri etkisinde, simetri eksenini etrafında ω açısal hızıyla dönen içi boş disk için elastik gerilme analizi yapılarak malzeme özelliklerinin gerilme, şekil değiştirme ve yer değiştirme dağılımına etkisi incelenmiştir. Çalışmada elastisite modülü $E = E_0(r/b)^{\beta_1}$, malzeme yoğunluğu $\rho = \rho_0(r/b)^{\beta_2}$, ısı genleşme katsayısı $\alpha = \alpha_0(r/b)^{\beta_3}$ şeklinde, yarıçapın fonksiyonu olarak alınmıştır. Uygunluk denklemi, denge denklemi, kinematik bağıntılar, Hooke kanunu kullanılarak elde edilen gerilme, şekil değiştirme ve radyal deplasmanlar boyutsuz hale getirildikten sonra, β değerlerinin akmanın başladığı kritik açısal hız üzerine etkisi elde edilmiştir. Ayrıca farklı β değerlerinin gerilme, gerinim ve radyal deplasman dağılımlarına olan etkisi de incelenmiştir.

Bilim Kodu : 914. 1.073
Anahtar Kelimeler : Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, dönen diskler
Sayfa Adeti : 65
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ

**STRESS AND DISPLACEMENT ANALYSIS
OF A ROTATING FGM ANNULAR DISK
(M.Sc. Thesis)**

Alperen KÖSEDAĞ

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCES AND TECHNOLOGY
April 2007**

ABSTRACT

In this study, a rotating annular disk with angular velocity ω under constant temperature, having a constant thickness and material properties which vary along the radial coordinate is considered. The effects of the material properties on the distribution of the stress, strain components and radial displacement are investigated. In this study, elasticity modulus, density and linear coefficient of thermal conductivity of the disk's material are assumed as functions of the radial coordinate $E = E_0 r^{\beta_1}$, $\rho = \rho_0 r^{\beta_2}$, $\alpha = \alpha_0 r^{\beta_3}$ respectively. After compatibility equation, equation of motion, deformation and radial displacement are stated in dimensionless form. Effect of β varies on stress, strain and radial displacement are also investigated.

Science Code : 914 .1.073
Key Words : Functionally Graded Materials , Rotating Disks
Page Number : 65
Adviser : Prof.Dr. Müfit GÜLGEÇ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın başından beri beni yönlendiren, yardımlarını ve değerli zamanlarını benden esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Müfit GÜLGEÇ'e ve Arş. Görevlisi Tunç APATAY'a, Makina Mühendisleri Çağdaş KAYA, Serhat ULUSAY, Alper D. KILIÇ, Şamil AKASLAN'a, yoğun iş programında tez çalışmalarım için gerekli toleransı gösteren müdürüm Raşit LATİF'e, fikir ve manevi desteğiyle Dr. Tuncay KARAÇAY'a, şimdiye kadar çalıştığım iş yerlerinde yüksek lisans çalışmalarım için destek veren, durumumu idare eden tüm iş arkadaşlarıma ve hoşlanmadıklarını belli etmelerine rağmen derslere gitmeme izin veren tüm patronlarıma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	iv
1. GİRİŞ	1
2. PROBLEMİN TANIMI.....	13
2.1. Malzeme Özellikleri	13
2.2. Disk Geometrisi	14
3. TEORİ	15
3.1. Temel Denklemler	15
3.1.1. Silindirik koordinatlarda denge denklemi	15
3.1.2. Denge denkleminin boyutsuz forma getirilmesi	17
3.1.3. Polar koordinatlarda şekil değiştirme-yer değiştirme bağıntıları	18
3.1.4. Disk için şekil değiştirme bağıntıları ve uygunlukdenklemi	19
3.1.5. Hooke kanunu	20
3.1.6. Dönen disk için Hooke kanunu	20
3.1.7. Dönen disk için gerilme - yer değiştirme bağıntıları	21
3.1.8. FDM disk için gerilme - yer değiştirme bağıntıları	21
3.2. Plastisite Teorisi	22
3.2.1. Akma kriteri ve akma yüzeyi	22

Sayfa

3.2.2. Deformasyon enerji teorisi veya von mises akma kriteri.....	23
4. ELASTİK ÇÖZÜM VE SONUÇLAR	25
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR	63
ÖZGEÇMİŞ.....	65

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Takım malzemelerinin mekanik özellikleri	44

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. a) Homojen seramik kaplamanın şematik gösterimi b) kırılmaların kaplamada oluşumu	2
Şekil 1.2. a) Kaplamanın üst yüzeyindeki yatay gerinimler b) yatay gerinimlerden kaynaklanan ve kaplamanın üst yüzeyine dik kenar olarak oluşan çatlakları	3
Şekil 1.3. SiC/A356 FDM'inde kuvvetlendirici parçacıkların devamlı derecelendirmesi	4
Şekil 1.4. Michigan Üniversitesinde Cu ve Ni bileşenleriyle üretilen tabakalı derecelendirilmiş FDM'de SEM-EDAX analizi ile elde edilmiş tabakalar ve bileşim yüzdeleri.....	4
Şekil 1.5. Metal tozlarının mekanik presle sıkıştırılması.....	5
Şekil 1.6. FDM disklerinin katmanlarının sıkıştırılarak elde edilmesi.....	6
Şekil 1.7. Toz metalürjisi ile katmaları oluşturulmuş FDM disk	7
Şekil 1.8. İçi boş FDM diskin mekanik presle sıkıştırılması	8
Şekil 1.9. İkinci katmanın presle sıkıştırılması	9
Şekil 1.10. İçi boş FDM disk.....	9
Şekil 1.11. Lazer veya plazma ile toz kaplama	10
Şekil 1.12. Püskürtme şekillendirme yöntemi.....	11
Şekil 2.1. Sabit kalınlıklı, iç yarıçapı $r = a$, dış yarıçapı $r = b$ olan disk.....	14
Şekil 3.1. Polar koordinatlarda bir elemana gelen gerilmeler	15
Şekil 3.2. Polar koordinatlarda bir elemanın deformasyonu ve yer değiştirmesi.....	18
Şekil 3.3. Von mises elipsi	24
Şekil 4.1. Boyutsuz malzeme özelliklerinin boyutsuz yarıçapa göre değişimi.....	29
Şekil 4.2. Farklı malzemeye sahip disklerde kritik hızlarda gerilme ve yer değiştirmeler.....	30

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. β_1 parametresinin boyutsuz kritik hız üzerine etkisi	33
Şekil 4.4. β_2 parametresinin boyutsuz kritik hız üzerine etkisi (boyutsuz yarıçap $\bar{a} = 0,1$ ve $\bar{a} = 0,3$ için)	34
Şekil 4.5. β_2 parametresinin boyutsuz kritik hıza etkisinin sıcaklıkla değişimi.....	35
Şekil 4.6. β_3 parametresinin boyutsuz kritik hız üzerine etkisi	36
Şekil 4.7. β_1 parametresinin boyutsuz gerilme bileşenleri üzerine etkisi $\Omega = 1,0857$ $\Delta T = 50^\circ C$ a) radyal, b) teğetsel	38
Şekil 4.8. β_2 parametresinin boyutsuz gerilme bileşenleri üzerine etkisi $\Omega = 1,0857$, $\Delta T = 50^\circ C$ a) radyal, b) teğetsel	41
Şekil 4.9. β_3 parametresinin boyutsuz gerilme bileşenleri üzerine etkisi $\Omega = 1,0857$, $\Delta T = 50^\circ C$ a) radyal, b) teğetsel	43
Şekil 4.10. Çelik ile TiC esaslı seramikten oluşan FDM diskte gerilme ve yer değiştirme dağılımı.	45
Şekil 4.11. Çelik ile Al – Si esaslı seramikten oluşan FDM diskte gerilme ve yer değiştirme dağılımı	46
Şekil 4.12. Çelik ile WC esaslı seramikten oluşan FDM diskte gerilme ve yer değiştirme dağılımı	47
Şekil 4.13. Çelik ile TiC esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\bar{a} = 0,3$	48
Şekil 4.14. Çelik ile Al-Si esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\bar{a} = 0,3$	49
Şekil 4.15. Çelik ile WC esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\bar{a} = 0,3$	50
Şekil 4.16. Çelik - TiC FDM diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz radyal koordinat ile değişimi,	51

Şekil	Sayfa
Şekil 4.17. Çelik ile Al – Si alaşımlı malzemeden yapılmış diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz radyal koordinatla değişimi.....	52
Şekil 4.18. Çelik ile WC alaşımlı malzemeden yapılmış diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz radyal koordinat ile değişimi	53
Şekil 4.19. Çelik ile TiC esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\bar{a} = 0,4$	54
Şekil 4.20. Çelik ile AlSi esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\bar{a} = 0,4$	55
Şekil 4.21. Çelik ile WC esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\bar{a} = 0,4$	56
Şekil 4.22. Çelik ile TiC alaşımlı malzemeden yapılmış diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz iç yarıçapla değişimi, $\bar{a} = 0,7$	57
Şekil 4.23. Çelik ile Al – Si alaşımlı malzemeden yapılmış diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz iç yarıçapla değişimi, $\bar{a} = 0,7$	58
Şekil 4.24. Çelik ile WC alaşımlı malzemeden yapılmış diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz iç yarıçapla değişimi, $\bar{a} = 0,7$	59

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Disk iç yarıçapı
$\bar{a} = r / b$	Boyutsuz iç yarıçap
b	Disk dış yarıçapı
E	Elastisite modülü
$P(r), Q(r)$	Dif.denklemin homojen çözümleri
$R(r)$	Dif.denklemin özel çözümü
C_i	İntegral sabitleri
r, θ	Silindirik koordinatlar
$\bar{r} = r / b$	Boyutsuz silindirik koordinat
$\bar{E} = E / E_0$	Boyutsuz elastisite modülü
J_2	İkinci deviatorik gerilme değişmezi
ΔT	Sıcaklık farkı
ν	Poisson oranı
ρ	Kütle yoğunluğu
α	Isıl genleşme katsayısı
ω	Açısal hız
Ω	Boyutsuz açısal hız
β_i	Boyutsuz malzeme parametreleri
σ_{ij}	Gerilme bileşenleri
ε_{ij}	Gerinme bileşenleri
σ_0, σ_y	İlk akma gerilmesi, akma gerilmesi
$\bar{\alpha} = \alpha / \alpha_0$	Boyutsuz ısı genleşme katsayısı

Simgeler

$$\bar{\rho} = \rho / \rho_0$$

$$\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij} / \sigma_0$$

f

Açıklama

Boyutsuz kütle yoğunluğu

Boyutsuz gerilme bileşenleri

Von Mises kriterine göre akma gerilmesi

Kısaltmalar**Açıklama**

EŞ.

Eşitlik

FDM

Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzeme

TiC

Titanyum Karbür Alaşımı

AlSi

Alüminyum Silisyum Alaşımı

WC

Volfram Karbür Alaşımı

1. GİRİŞ

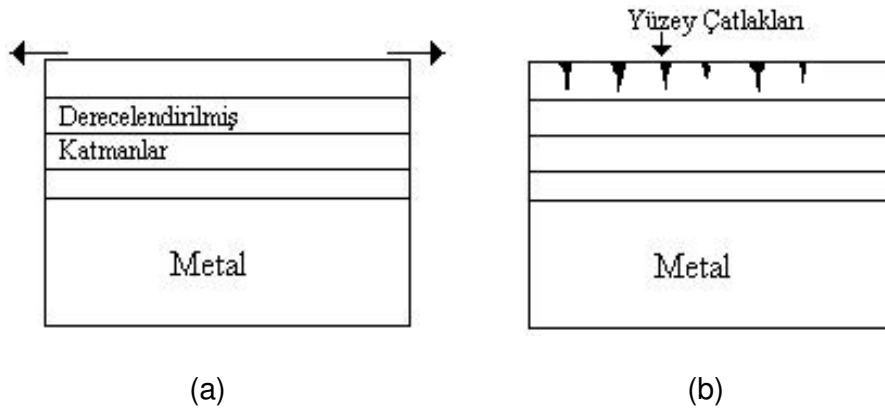
Dönen elemanlar içeren makinalar mühendislik dünyasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu alanlardan örnek olarak turbo makinalar, gaz türbinleri, volanlar, kesici takımlar, güç istasyonları, otomobiller, elektrikli ev aletleri, uzay uygulamaları, medikal aletler sıralanabilir [1,2]. Özellikle uzay araçları, turbo makinalarda dönen elemanların kapasitelerinin üstünde bir hızda çalıştırıldıklarında ortaya çıkan yüksek ısı ve gerilmeler sonucu oluşan deformasyonlar, sistemde onarımı yüksek maliyetlerin yanında insan hayatı için tehlikeli bir tehdit oluştururlar. Bu geniş uygulama alanı ve önemi nedeniyle dönen diskler üzerine gerilme ve yer değiştirmelerin teorik ve deneysel analizi uzun zamandır ilgi çeken bir konu olmuştur.

Gamer [3-5], sabit kalınlıklı içi dolu dönen bir disk için gerilme analizini incelemiştir. Güven [6,7], Gamer 'in çalışmalarını içi boş, değişken kalınlıklı ve değişken yoğunluklu diskler için geliştirmiştir. Dönen disklerle ilgili olarak değişik sınır şartlarında ve geometrilere sahip diskler için pekçok çalışma mevcuttur. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte yeni malzeme kompozisyonları geliştirilmiştir. Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler bunlardan biridir ve bu malzeme yapısıyla beraber diskler üzerine yapılan çalışmalar farklı bir boyut ve önem kazanmıştır [8-11].

Doğada çoğu zaman bir halden diğer bir hale doğrudan geçişler sorun çıkarmaktadır. Bunun yerine, durumlar arası geçişler kademeli yapılarak olumsuzluklar azaltılmaya çalışılır. Teknolojinin gelişimiyle birlikte yeni tür bazı ihtiyaçların karşılanabilmesi için malzemelerde de homojen olmayan kademeli veya devamlı değişen bir yapıya ihtiyaç duyulmuştur.

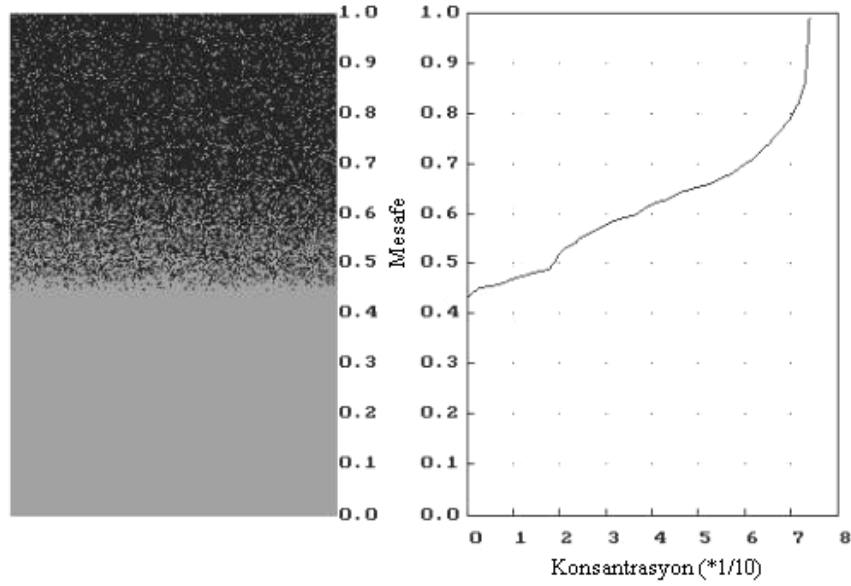
FDM'ler de (Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler) buna benzer olarak birbirleri ile birleştirilmiş, fiziksel ve kimyasal olarak birbirlerinden farklı özellikler taşıyan iki madde arasında farklı ısı genleşme katsayılarından dolayı oluşan ısı gerilmeleri derecelendirilmiş yapılarıyla azaltır, iki madde arasındaki fiziksel ve kimyasal özelliklerdeki ani değişimlerden dolayı

Termal bariyer uygulamalarında yüksek sıcaklığa maruz kalan homojen seramik ve metalin termal genleşme katsayılarındaki yüksek uyumsuzluk nedeniyle bağlanma bölgesinde termal gerilmeler ortaya çıkar, sonuçta ara yüz çatlakları ve kırılmalar meydana gelir (Şekil 1.1). Ayrıca yüksek sıcaklığa ilk maruz kalan kaplamanın en üst yüzeyinde de yüzeye dik kenar çatlakları görülmektedir (Şekil 1.2). Bu çatlakların oluşmasında rol oynayan gerinim kaplamanın en üst yüzeyindeki yarıçap yönündeki yatay gerinimdir [12].

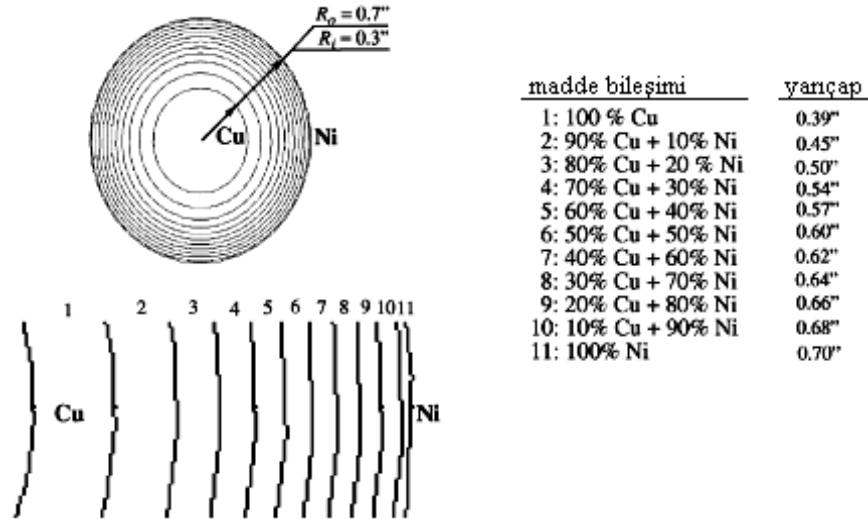


Şekil 1.2. a) Kaplamanın üst yüzeyindeki yatay gerinimler, b) Yatay gerinimlerden kaynaklanan ve kaplamanın üst yüzeyine dik olarak oluşan kenar çatlakları [12]

Bu uyumsuzlukları minimuma indirmek, dolayısıyla ısı gerilmeleri azaltmak amacıyla fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemelerdeki dereceli yapı metali korozyon, oksidasyon veya aşınmaya karşı korumanın yanında, homojen seramik kaplamada oluşan kırılmaları, arayüz ve yüzey çatlaklarını da minimuma indirmektedir. İhtiyaca ve seçilen üretim tekniğine bağlı olarak FDM'lerde dereceli yapı devamlı (Şekil 1.3) veya tabakalı (Şekil 1.4) derecelendirilmiş olabilmektedir. Tabakalı derecelendirilmiş kaplamalar teknik olarak yarı kompozit, sürekli olmayan termomekanik özelliklere sahip birbirinden farklı homojen malzemeler içerir.



Şekil1.3. SiC/A356 FDM'inde kuvvetlendirici parçacıkların devamlı derecelendirmesi [12]

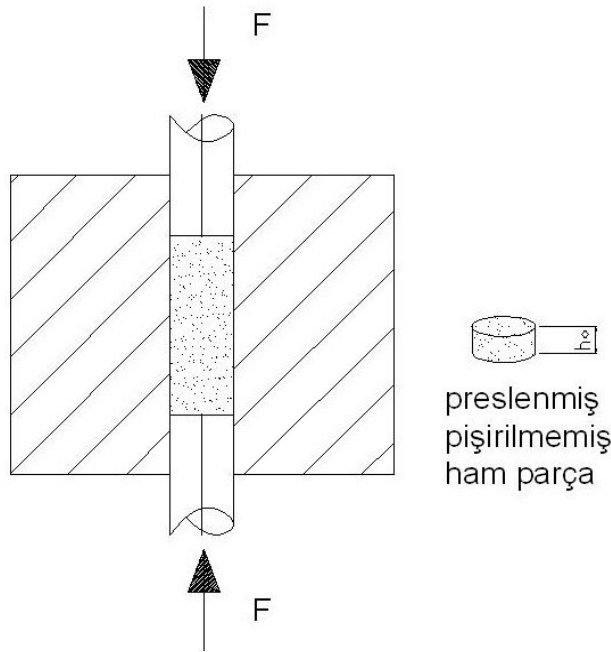


Şekil 1.4. Michigan Üniversitesi'nde Cu ve Ni bileşenleriyle üretilen tabakalı derecelendirilmiş FDM'de SEM-EDAX analizi ile elde edilmiş tabakalar ve bileşim yüzdeleri [12]

Devamlı derecelendirilmiş kaplamalarda ise iki önemli özellik vardır. Birincisi; seramiğin kısmi hacmi; ara yüzde %0'dan yüzeyde %100'e kadar değiştiğinden, kaplamayla kaplanan arasındaki bağlanma, malzeme uyumluluğu sebebiyle daha iyi olacaktır. İkinci olarak; malzeme özellikleri dağılımlarının düzgün olması sebebiyle FDM kaplı ara katmanda gerilme konsantrasyonları tabakalı homojen kaplamalara göre daha düşük olacaktır.

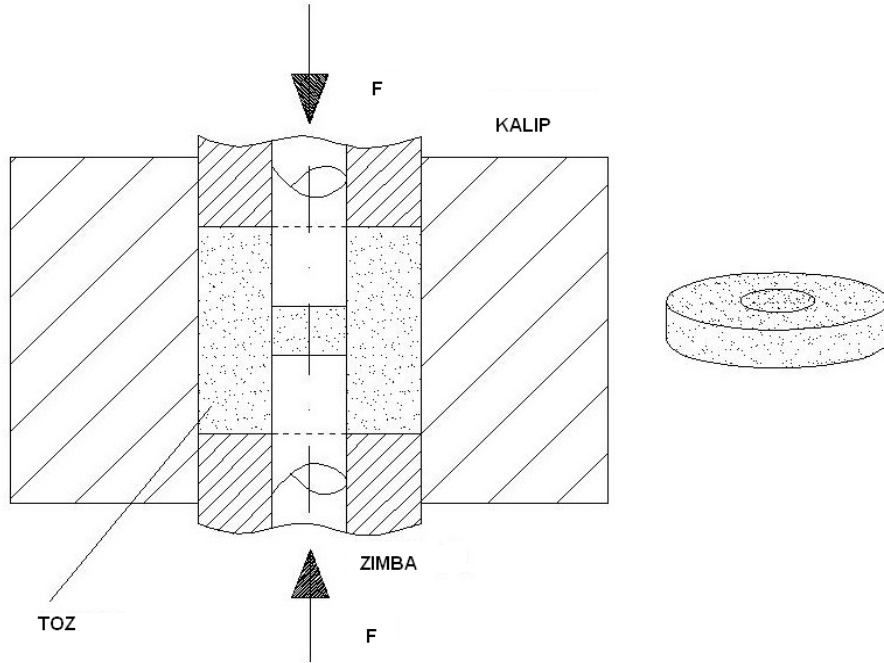
FDM üretim metodlarını kuru ve yaş metot olmak üzere iki ana grupta toplamak mümkündür. Kuru metot yöntemleri; toz metalurjisi, plazma spreyiyle kaplama, SHS (Self-Propagating High-Temperature Synthesis), CVD Fırını ile kaplama ve pervane ile kuru karıştırma, Yaş metotlar ise endüksiyonla yığma, slip döküm ve santrifüj döküm şeklinde sıralanabilir [13].

Dönen FDM bir disk toz metalürjisi ile çeşitli yöntemlerde üretilebilir. Birinci yöntemde, diskin iç kısmına %100 metal tozları koyarak mekanik bir presleme ile tozları istenilen disk kalınlığına getirilerek sıkıştırılmaktadır (Şekil 1.5).



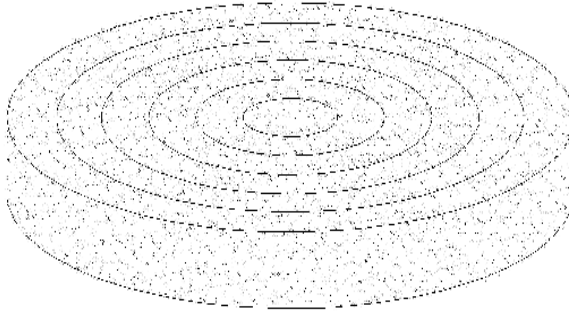
Şekil 1.5. Metal tozlarının mekanik presle sıkıştırılması

sıkıştırılan fakat pişirilmemiş bu disk başka bir kalıba konulup sabitlendikten sonra etrafına %90 metal + %10 seramik tozu karıştırılarak ikinci katmanı oluşturulur. Bu disk geometrisi için tasarlanmış silindirik bir pres kalıbında sıkıştırılır (Şekil 1.6).



Şekil 1.6. FDM disklerinin katmanlarının sıkıştırılarak elde edilmesi

Bu işlem katman sayısı kadar devam eder. En dış katman %100 seramik olduğunda sıkıştırılmış disk presten çıkartılır ve pişirilir. Bu pişirme esnasında difüzyon oluşmasıyla katmanlar birbirlerine kaynayıp tek bir disk meydana gelir (Şekil 1.7). Daha sonra istenilirse infiltrasyon (boşluk doldurma) işlemi ile diskte kalan boşlukların doldurulması yapılır.

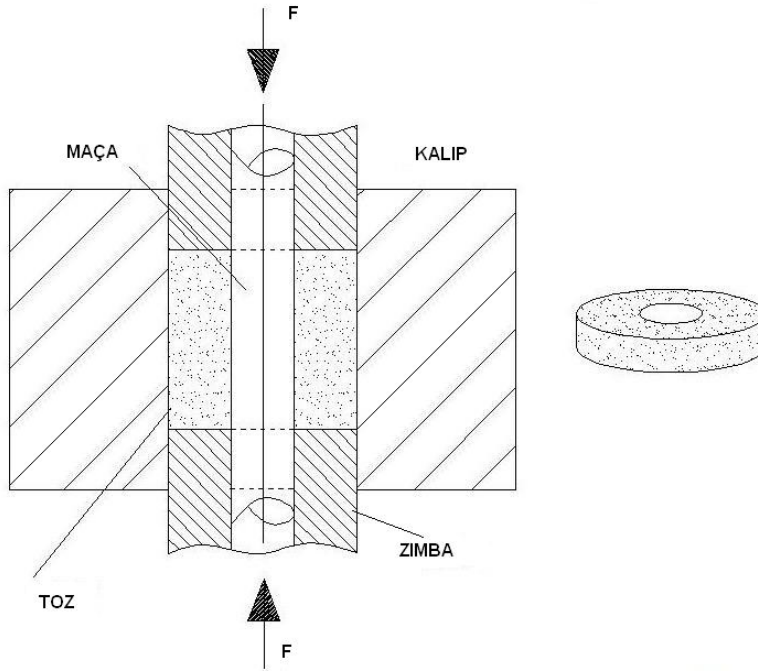


Şekil 1.7. Toz metalürjisi ile katmaları oluşturulmuş FDM disk

İç boş FDM disk imal edilmesinde ise öncelikle istenilen iç yarıçap kadar bir maça imal edilir. Sonra maça, bu geometri için tasarlanan halka şeklindeki mekanik presin ortasına yerleştirilir Kalıp ile maça etrafına %100 metal tozları yerleştiriliyor ve sıkıştırılır (Şekil 1.8). Sıkıştırılan bu iç boş disk pişirilmediğinden dolayı mukavemeti zayıftır ve elle temasta dağılabilir.

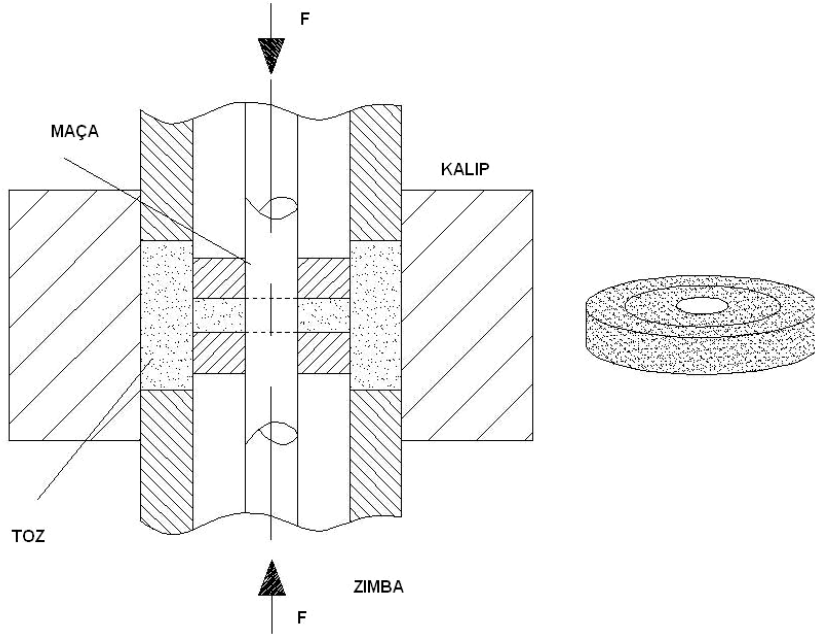
İkinci katmanda sıkıştırılan iç boş diskin etrafına başka bir kalıp konularak %90 metal tozu + %10 seramik tozu karışımı bu maçanın etrafına konulur. Tekrar bu geometri için hazırlanmış silindirik kalıpta sıkıştırılır (Şekil 1.9).

İstenilen katman kadar bu işlem tekrar edildikten sonra, en dış katman %100 seramik olacak şekilde sıkıştırılıp sonra disk pişirme işlemine tabi tutulur. Pişirilirken difüzyon kaynağı meydana gelir ve disk katmanları birleşir. Böylece FDM disk elde edilmiş olur (Şekil 1.10). İstenildiği takdirde infiltrasyon ile diskte kalan boşlukların doldurulması yapılır.

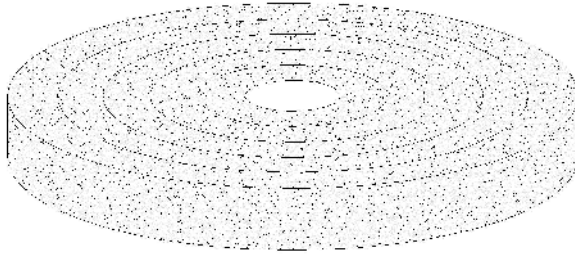


Şekil 1.8. İçi boş FDM diskin mekanik presle sıkıştırılması

Mekanik presleme ile talaşlı imalata gerek kalmadan içi boş diskin üretimi mümkündür. Fakat içi dolu yapıp daha sonrada talaşlı imalat ile içi boşaltılabilir. Bu yöntemde her katman için ayrı bir kalıp hazırlanması ve bu kalıplara göre halka şeklinde baskı zımbaları yapılması gerekir. Bu da bu yöntemin zorlaştırmakta ve maliyetini arttırmaktadır.



Şekil 1.9. İkinci katmanın presle sıkıştırılması

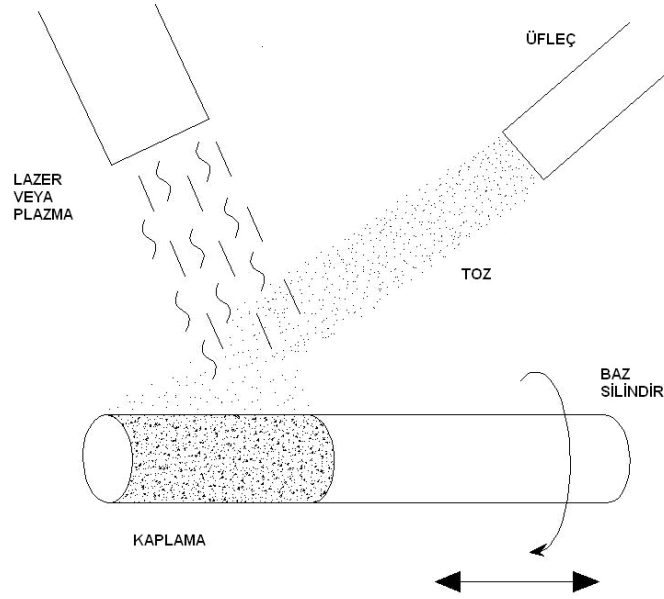


Şekil 1.10. İçi boş FDM disk

Toz metalürjisinde mekanik presleme yaparak ince katmanlar oluşturmak çok kolay değildir. Bu durumlar için lazerle veya plazma ile toz kaplama gibi daha etkili yöntemlerden yararlanılabilir.

Bu yöntemde silindir şeklinde belirli bir hızda dönen çubuk üzerine katman oluşturacak tozlar püskürtülür. Aynı zamanda plazma veya lazer yardımıyla bu tozlar eritilerek yüzeye yapışması sağlanır. Yüzeyde bir sıvı havuzu oluşturulur (tamamen erimeyen tozlar bu havuza batır). Katılaşmadan sonra

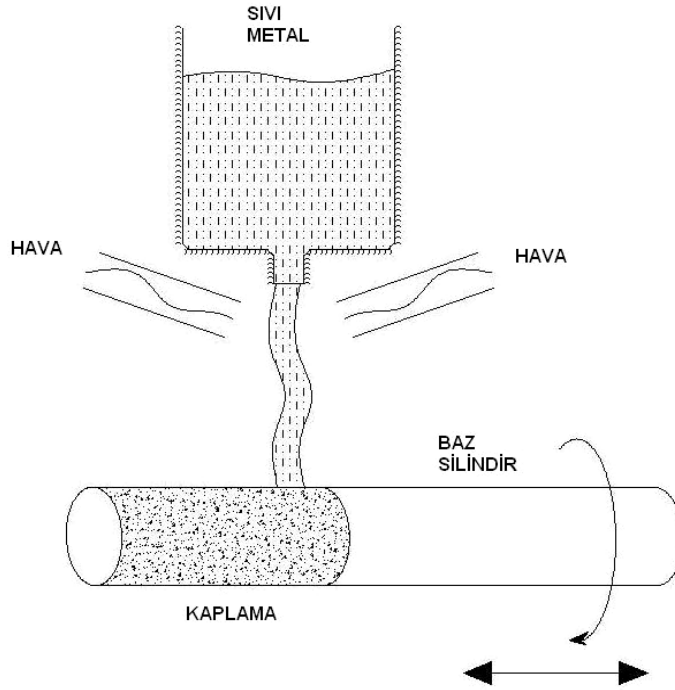
katman kalınlığı istenilen değere ulaşıncaya kadar bu işlem tekrarlanır (Şekil 1.11).



Şekil 1.11. Lazer veya plazma ile toz kaplama

Tozun karışımı değiştirilerek katman malzemesi istenilen şekilde ayarlanır. Bütün katmanlar ayarlandıktan sonra silindir kesilerek istenilen kalınlıktaki disk elde edilir.

Bir başka yöntem de püskürtme şekillendirme yöntemidir. Bu yöntem, lazer veya plazma toz kaplama yöntemine benzer. Sıvı metal (veya alaşım), gaz ile atomize edilerek belirli bir hızda dönen silindirin üzerine püskürtülür. Metal veya alaşım silindir üzerine yapışıp katılaşarak bir katman oluşturur. İstenilen oranlardaki karışımlarla tüm katmanları elde ettikten sonra silindir kesilerek disk üretilmiş olur (Şekil 1.12).



Şekil 1.12. Püskürtme şekillendirme yöntemi

You, L.H., Tang, Y.Y., Zhang, J.J. ve Zheng, C., rastgele seçilmiş değişken kalınlık ve yoğunluklu dönen disklerin elastik – plastik sayısal analizlerini yapmışlardır. Analizler lineer olmayan sertleştirilmiş sürekli değişken ve rastgele seçilmiş değişken yoğunluklu malzeme için gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada nonlineer sertleştirilmiş malzemeden yapılmış sürekli değişken kalınlık ve rastgele değişken yoğunluklu dönen diskte kullanılabileceğinin araştırması yapılmıştır [14].

Sugano, Y., Chiba, R., Hirose, K. ve Takahashi, K. ise, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeden yapılmamış dönen diskin radyal yöndeki rastgele ısı ve mekanik homojen olmayan özellikleriyle birlikte ağırlığının azaltılması, yüksek ısı radyasyon altındaki ısıl gerilmelerinin azaltılması ve merkezkaç gerilmelerinin azaltılması çalışmasını yapmışlardır. İç çapta görünen maksimum çekme ısıl gerilmesi ile dış yarıçaptaki çok yönlü ısıl gerilmenin yol açtığı merkezkaç kuvvetin maksimum çekme gerilmesi değerinde ve ağırlığında azalmalar gözlemlenmiştir [10].

Bu çalışmanın amacı sabit kalınlıklı, yarıçap fonksiyonuna bağlı değişken elastisite modüllü, değişken yoğunluklu ve değişken ısı genleşme katsayılı sabit sıcaklık altında dönen içi boş diskin gerilme ve yer değiştirme bağıntılarının elastik çözümlerini yapmaktır. Bununla birlikte, malzeme özelliklerinin, diskte meydana gelecek akmaya olan etkileri de incelenmiştir.

2. PROBLEMİN TANIMI

Bu çalışmada kalınlığı sabit ve malzeme özellikleri yarıçapın fonksiyonu olarak değişen sabit bir sıcaklık değeri etkisindeki simetri eksenini etrafında ω açısal hızıyla dönen içi boş disk için elastik gerilme analizi yapılarak malzeme özelliklerinin gerilme, gerinim ve yer değiştirme dağılımına etkisi elde edilmiştir.

2.1. Malzeme Özellikleri

İncelenecek olan disk malzemesi FDM malzeme olarak değişik malzeme parametreleriyle aşağıdaki şekilde modellenmiştir. Malzemenin;
Elastisite modülü

$$E(r) = E_0 \left(\frac{r}{b} \right)^{\beta_1},$$

Isıl genleşme katsayısı

$$\alpha(r) = \alpha_0 \left(\frac{r}{b} \right)^{\beta_2},$$

Yoğunluğu

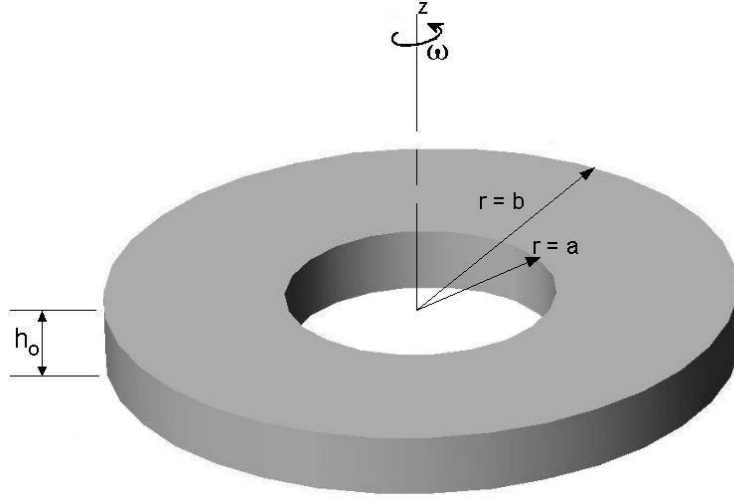
$$\rho(r) = \rho_0 \left(\frac{r}{b} \right)^{\beta_3},$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Burada r yarıçap, b dış yarıçap, $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ malzeme parametreleri, E_0, α_0 ve ρ_0 diskin dış yarıçapındaki malzeme özelliklerini ifade etmektedir.

2.2. Disk Geometrisi

Ele alınan disk sabit kalınlıklıdır. Diskin iç yarıçapı $r = a$, dış yarıçapı $r = b$ 'dir.



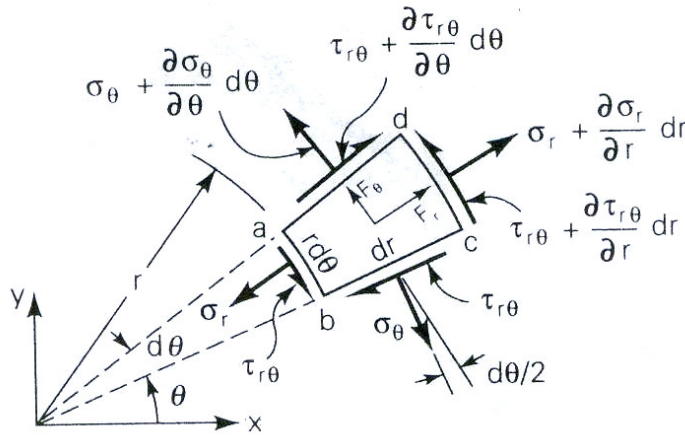
Şekil 2.1. Sabit kalınlıklı, iç yarıçapı $r = a$, dış yarıçapı $r = b$ olan disk

3 . TEORİ

3.1. Temel Denklemler

3.1.1. Silindirik koordinatlarda denge denklemi

Disk kalınlığının yarıçapa oranla küçük olduğu kabulüyle, simetri eksenine doğrultusundaki gerilme bileşeni σ_z ihmal edilerek, problem düzlem gerilme hali ele alınarak incelenebilir.



Şekil 3.1. Polar koordinatlarda bir elemana gelen gerilmeler [2]

$\sum F_r = 0$ ve $\sum F_\theta = 0$ denge şartlarından;

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + X_r = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + 2 \frac{\tau_{r\theta}}{r} + X_\theta = 0 \quad (3.2)$$

Burada $X_r = 0$ ve $X_\theta = 0$, kütle kuvvetinin radyal teğetsel bileşenleridir. Ele alınan problemde $X_\theta = 0$ sıfırdır.

Disk in dönme eksenine göre simetrik olmasından dolayı yer değıştirmeler θ 'dan bağımsızdır ve $\tau_{r\theta} = 0$ 'dır. Ayrıca disk in ağırlığından kaynaklanan gerilmeler diğerlerine oranla küçük olduğundan disk ağırlığı ihmal edilebilir. Kütle kuvveti olarak da sadece atalet kuvvetinin dikkate alınmasıyla denge denkle mi ;

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta + \rho \omega^2 r^2 = 0 \quad (3.3)$$

haline gelir [1,2].

Burada ;

ρ : Disk malzemesinin yoğunluğu, $[kg / m^3]$

ω : Disk in açısal hızı, $[rad / s]$

σ_r : Radyal doğrultudaki normal gerilme, $[N / m^2]$

σ_θ : Çevresel doğrultudaki normal gerilme. $[N / m^2]$

olarak ifade edilir. Sabit yoğunluklu malzeme için elde edilen bu denge denkle mi yoğunluğu

$$\rho(r) = \rho_0 r^{\beta_2}$$

şeklinde değışen disk için,

$$r \frac{d\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_\theta + \rho(r) \omega^2 r^2 = 0$$

halini alır.

3.1.2. Denge denkleminin boyutsuz hale getirilmesi

Farklı malzemelerde ve farklı geometrik özelliklerdeki diskler için daha genel bir çözüm elde etmek ve çözümlerin karşılaştırılmasında kolaylık sağlamak için denklemleri boyutsuz olarak yazmak uygun olur.

Malzeme özellikleri aşağıdaki gibi boyutsuzlandırılabilir:

$$\bar{E}(r) = \frac{E(\bar{r})}{E_0}, \quad \bar{\rho}(r) = \frac{\rho(\bar{r})}{\rho_0}, \quad \bar{\alpha}(r) = \frac{\alpha(\bar{r})}{\alpha_0}$$

Yarıçap r , açısal hız ω , gerilme bileşenleri σ_r ve σ_θ aşağıdaki gibi boyutsuzlandırılırsa ;

$$\bar{r} = \frac{r}{b}, \quad \bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{\sigma_0}, \quad \bar{\sigma}_\theta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_0}, \quad \Omega = b\omega \sqrt{\frac{\rho_0}{\sigma_0}} \quad (3.4)$$

İfadeleri elde edilir.

$\frac{d}{dr} = \frac{d}{d\bar{r}} \frac{d\bar{r}}{dr} = \frac{1}{b} \frac{d}{d\bar{r}}$ ifadesi Eş. 3.4'teki ifadelerle birlikte Eş.3.3'te yerine yazılırsa;

$$\frac{1}{b} \frac{d}{d\bar{r}} (b\bar{r}\sigma_0\bar{\sigma}_r) - \sigma_0\bar{\sigma}_\theta + \rho_0 \frac{\Omega^2}{b^2} \frac{\sigma_0}{\rho_0} \bar{r}^2 b^2 = 0 \quad (3.5)$$

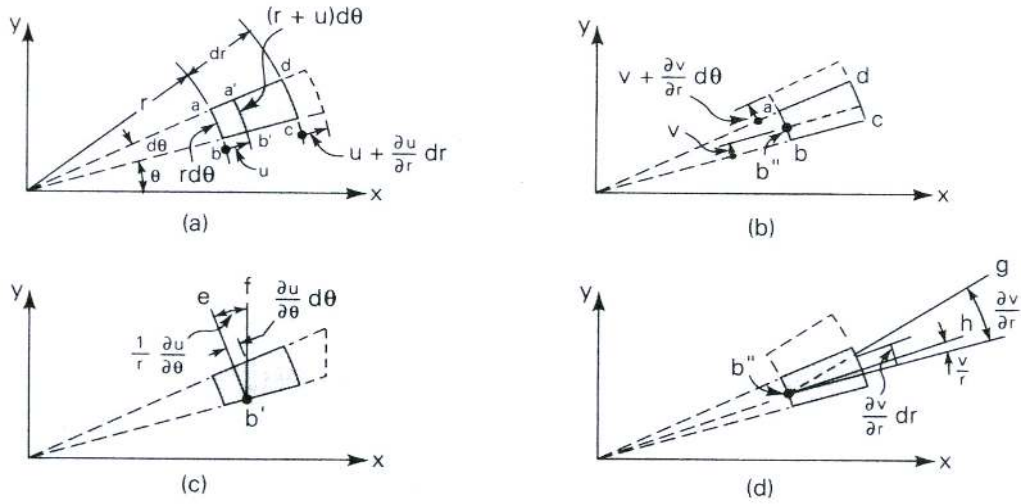
denklemini bulunur.

Bu eşitlik üzerinde gerekli sadeleştirmelerden sonra boyutsuz haldeki hareket denklemini;

$$\frac{d}{dr}(\bar{r}\bar{\sigma}_r) - \bar{\sigma}_\theta + \Omega^2 \bar{r}^{(2+\beta_3)} = 0 \quad (3.6)$$

şeklinde elde edilir.

3.1.3. Polar koordinatlarda şekil değiştirme - yer değiştirme bağıntıları



Şekil 3.2. Polar koordinatlarda bir elemanın deformasyonu ve yer değiştirmesi a) radyal doğrultudaki kenar uzunluğundaki değişim b) teğetsel doğrultudaki kenar uzunluğundaki değişim c) radyal doğrultudaki kenarın açısal değişimi d) teğetsel doğrultudaki kenarın açısal değişimi [2]

Şekil 3.2'den radyal şekil değiştirme bileşeninin

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (3.7a)$$

olduğu görülmektedir. u yer değiştirmesine bağlı olan çevresel şekil değiştirme bileşeni;

$$(\varepsilon_{\theta})_u = \frac{(r+u)d\theta - rd\theta}{rd\theta} = \frac{u}{r} \quad (3.7b)$$

v yer değiştirmesine bağlı olan çevresel şekil değiştirme bileşeni;

$$(\varepsilon_{\theta})_v = \frac{(\partial v / \partial \theta) d\theta}{rd\theta} = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \quad (3.7c)$$

Böylece toplam çevresel şekil değiştirme;

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} \quad (3.7d)$$

olur.

Şekilden anlaşılacağı üzere u ve v yer değiştirmelerinden dolayı oluşan toplam kayma şekil değiştirmesi de,

$$\gamma_{r\theta} = \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} - \frac{v}{r} \quad (3.7e)$$

şeklinde elde edilir [2].

3.1.4. Disk için şekil değiştirme - yer değiştirme bağıntıları ve uygunluk denklemi

Disk simetrisinden dolayı çevresel yönde yer değiştirme olmayacağından $v = 0$ ve u 'nun θ 'a göre kısmi türevleri de sıfırdır. Böylece Eş. 2.7'de verilen ifadeler disk için aşağıdaki ifadelere indirgenir.

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad \varepsilon_{\theta} = \frac{u}{r} \quad \gamma_{r\theta} = 0 \quad (3.8)$$

Eş. 3.7'deki ε_θ ifadesinden $u = r\varepsilon_\theta$ 'nin r 'ye göre türevi alınıp ε_r ifadesinde yerine yazıldığında ε_θ ve ε_r arasındaki bağıntı;

$$\frac{d}{dr}(r\varepsilon_\theta) - \varepsilon_r = 0 \quad (3.9)$$

olarak bulunur. Bu ifade uygunluk denklemdir [2].

3.1.5. Hooke kanunu

Elastik bölgede geçerli olan gerilme ve şekil değiştirme arasındaki lineer ilişki Hooke kanunu olarak bilinir. Genel Hooke Kanunu şu şekildedir:

$$\begin{aligned} \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] + \alpha T \\ \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha T \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] + \alpha T \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy}, \quad \gamma_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz}, \quad \gamma_{xz} = \frac{1}{G} \tau_{xz} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Yukarıda geçen G , kayma elastisite modülü veya rijitlik modülü olup, aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

3.1.6. Dönen disk için Hooke kanunu

Düzlem gerilme durumu, simetri ve polar koordinatlar için Eş. 3.9'da ile verilen elastik şekil değiştirmeler

$$\begin{aligned}
\varepsilon_r &= \frac{1}{E}(\sigma_r - \nu\sigma_\theta) + \alpha T \\
\varepsilon_\theta &= \frac{1}{E}(\sigma_\theta - \nu\sigma_r) + \alpha T \\
\gamma_{r\theta} &= 0
\end{aligned} \tag{3.11}$$

şeklini alır.

3.1.7. Dönen disk için gerilme - yer değiştirme bağıntıları

Dönen disk için elde edilen Eş. 3.8 ve Eş. 3.11'den σ_r ve σ_θ , yer değiştirme cinsinden şu şekilde elde edilir:

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

Bu denklemlerin simültane çözülmesiyle gerilme – yer değiştirme bağıntıları;

$$\sigma_r(r) = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[\frac{\nu u(r)}{r} + u'(r) - (1+\nu)\alpha T \right] \tag{3.12a}$$

$$\sigma_\theta(r) = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left[\frac{u(r)}{r} + \nu u'(r) - (1+\nu)\alpha T \right] \tag{3.12b}$$

şeklinde olur. Burada (') radyal koordinata göre türevi göstermektedir.

3.1.8. FDM disk için gerilme - yer değiştirme bağıntıları

Radyal koordinata bağlı olarak değişen malzeme özellikleri Eş. 3.12a ve Eş.3.12b'de yerine yazıldığında gerilme – yer değiştirme bağıntıları;

$$\sigma_r(r) = \frac{E(r)}{(1-\nu^2)} \left[\frac{\nu u(r)}{r} + u'(r) - (1+\nu)\alpha(r)T \right] \quad (3.13a)$$

$$\sigma_r(r) = \frac{E(r)}{(1-\nu^2)} \left[\frac{\nu u(r)}{r} + u'(r) - (1+\nu)\alpha(r)T \right] \quad (3.13b)$$

şeklinde yazılır.

3.2. Plastisite Teorisi

Akma sınırının üstünde uygulanan yükler için malzemedeki gerilme ve şekil değiştirmelerinin hesaplanmasında elastisite denklemleri artık geçerli değildir. Malzemenin gerilme - şekil değiştirme eğrisinde kalıcı deformasyonların meydana geldiği bölgeye plastik bölge denir.

3.2.1. Akma kriteri ve akma yüzeyi

Malzemede akmanın başlangıç durumunun matematiksel olarak belirlenmesi için çeşitli akma kriterleri kullanılmaktadır. Eğer bir noktadaki gerilme durumu akma kriterini sağlıyorsa bu nokta plastik olarak deforme olur, diğer durumda ise elastik deformasyonlar geçerlidir.

Isıl gerilmelerin olmadığı ve malzemenin homojen olduğu kabulüyle kapalı bir yüzey belirten akma fonksiyonu matematiksel olarak;

$$F(\sigma_{ij}) = 0 \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir [16]. Buna göre;

$F(\sigma_{ij}) < 0$ ise elastik deformasyonlar,

$F(\sigma_{ij}) > 0$ ise plastik deformasyonlar geçerlidir.

$F(\sigma_{ij}) = 0$ ise akma başlangıç durumunu belirler.

3.2.2. Deformasyon enerji teorisi veya von Mises akma kriteri

Bu teoriye göre malzemedeki deformasyon enerjisi çekme deneyindeki deformasyon enerjisine eşit olduğunda akma başlar.

$$U_d = \frac{1}{2G} J_2 = \frac{3}{4G} \tau_{oct}^2 \quad (3.15)$$

Burada J_2 ikinci deviatorik gerilme değişmezi (second invariant of stress deviator tensor) dir ve asal gerilmeler cinsinden

$$J_2 = \frac{1}{6} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] \quad (3.16)$$

şeklindedir. Basit çekme deneyinde akma noktasında

$$J_2 = \frac{1}{3} \sigma_0^2 \quad (3.17)$$

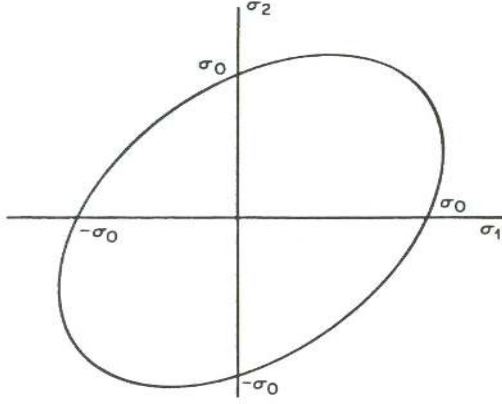
şeklinde yazılırsa akma kriteri;

$$\frac{1}{2} \left[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right] = \sigma_0^2 \quad (3.18)$$

şeklinde yazılır. Düzlemsel gerilme durumu için akma kriteri;

$$\sigma_1^2 - \sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_0^2 \quad (3.19)$$

şeklinde yazılır. Bu denklem bir elips denklemdir ve bu elips von Mises elipsi diye isimlendirilir (Şekil 3.4) [16].



Şekil 3.3. Von Mises Elipsi [15]

Polar koordinatlarda bu denklem;

$$\sigma_y = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_\theta + \sigma_\theta^2} \quad (3.20)$$

şeklinde yazılabilir.

4. ELASTİK ÇÖZÜM VE SONUÇLAR

Bu bölümde, içi boş disk için açısal hızın ve farklı β_1 , β_2 ve β_3 parametrelerinin diskteki gerilme dağılımına ve plastik deformasyonun başlama durumuna etkileri incelenecektir.

Eş.3.13 denklemleriyle elde edilen gerilme – yer değiştirme bağıntıları Eş.3.3 ile verilen denge denkleminde yerlerine yazılıp gerekli sadeleştirmeler yapıldığında

$$u''(r) + \frac{(1+\beta_1)}{r}u'(r) - \frac{(1-\nu\beta_1)}{r^2}u(r) = \frac{(1+\nu)}{r} \left[r^{\beta_2} T_0 \alpha_0 (\beta_1 + \beta_2) - \frac{r^{2-\beta_1+\beta_3} (1-\nu) \omega^2 \rho_0}{E_0} \right] \quad (4.1)$$

diferansiyel denklemi elde edilir. Denklemin homojen çözümü için

$$u''(r) + \frac{(1+\beta_1)}{r}u'(r) - \frac{(1-\nu\beta_1)}{r^2}u(r) = 0 \quad (4.2)$$

yazıldığında homojen çözüm

$$u_h(r) = r^{-(\beta_1+A)/2} [C_1 + C_2 r^A] \quad (4.3)$$

şeklinde elde edilir. Burada

$$A = \sqrt{4 - 4\nu\beta_1 + \beta_1^2} \text{ şeklinde tanımlanmıştır.}$$

Denklemin genel çözümü;

$$u(r) = C_1 P(r) + C_2 Q(r) + R(r) \quad (4.4)$$

şeklinde yazılır. $R(r)$ diferansiyel denklemin özel çözümü, geri kalan ifade ise homojen çözümdür. Homojen çözümü oluşturan $P(r)$ ve $Q(r)$, Eş. 4.3'den aşağıdaki gibi ifade edilirler;

$$P(r) = r^{\frac{-\beta_1}{2} - \frac{A}{2}} \quad (4.5)$$

$$Q(r) = r^{\frac{-\beta_1}{2} + \frac{A}{2}}$$

Eş. 4.4'deki özel çözüm $R(r)$ ifadesi ise parametrelerin değişimi metoduyla aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$R(r) = P(r)U_1(r) + Q(r)U_2(r) \quad (4.6)$$

Bu ifadede;

$$U_1(r) = -\int_a^r \frac{Q(\xi)f(\xi)}{W(\xi)} d\xi \quad \text{ve} \quad U_2(r) = \int_a^r \frac{P(\xi)f(\xi)}{W(\xi)} d\xi, \quad (4.7)$$

$$f(r) = \frac{(1+\nu)}{r} \left[r^{\beta_2} T_0 \alpha_0 (\beta_1 + \beta_2) - \frac{r^{2-\beta_1+\beta_3} (1-\nu) \omega^2 \rho_0}{E_0} \right] \quad (4.8)$$

Eş.4.7 denklemlerinde geçen a elastik bölgenin başlangıç koordinatı, $W(r)$

Wronskian'dır ve

$$W(r) = P \frac{dQ}{dr} - Q \frac{dP}{dr} \quad (4.9)$$

şeklindedir.

Eş.4.4 ile verilen $u(r) = C_1P(r) + C_2Q(r) + R(r)$ denklemi Eş.3.13 ile verilen gerilme denklemlerinde yerine yazıldığında radyal ve teğetsel gerilme bileşenleri;

$$\sigma_r = \frac{r^{\beta_1} E_0}{1-\nu^2} \left[-r^{\beta_2} T \alpha_0 + C_1 \left(\nu \frac{P(r)}{r} + P'(r) \right) + C_2 \left(\nu \frac{Q(r)}{r} + Q'(r) \right) + \left(\nu \frac{R(r)}{r} + R'(r) \right) \right] \quad (4.10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{r^{\beta_1} E_0}{1-\nu^2} \left[-r^{\beta_2} T \alpha_0 + C_1 \left(\frac{P(r)}{r} + \nu P'(r) \right) + C_2 \left(\frac{Q(r)}{r} + \nu Q'(r) \right) + \left(\frac{R(r)}{r} + \nu R'(r) \right) \right] \quad (4.11)$$

şeklinde elde edilir. Yukarıdaki denklemlerde geçen $dR(r)/dr$ ise şu şekilde ifade edilebilir:

$$\frac{dR}{dr} = \frac{dU_1}{dr} P + \frac{dP}{dr} U_1 + \frac{dU_2}{dr} Q + \frac{dQ}{dr} U_2$$

Daha sonra $U_1(r)$ ve $U_2(r)$ 'nin Eş.4.7'deki ifadeleri yerine yazılırsa;

$$\frac{dR}{dr} = \frac{dP}{dr} U_1 + \frac{dQ}{dr} U_2 \quad (4.12)$$

elde edilir.

Sınır şartları yardımıyla integral sabitleri C_1 ve C_2 şu şekilde bulunur:

Uçları serbest disk için sınır şartları;

Disk in iç çapında ($r = a$) ve ucunda ($r = b$) radyal gerilme bileşeni sıfırdır.

Yani $\sigma_r(a) = 0, \sigma_r(b) = 0$

şeklindedir.

Bu sınır şartlarının Eş.4.10 ile verilen radyal gerilme bileşeni ifadesinde yerine yazılmasıyla integrasyon sabitleri;

$$C_1 = \frac{T}{L}, \quad C_2 = \frac{M}{L} \quad (4.13)$$

şeklinde elde edilir, burada;

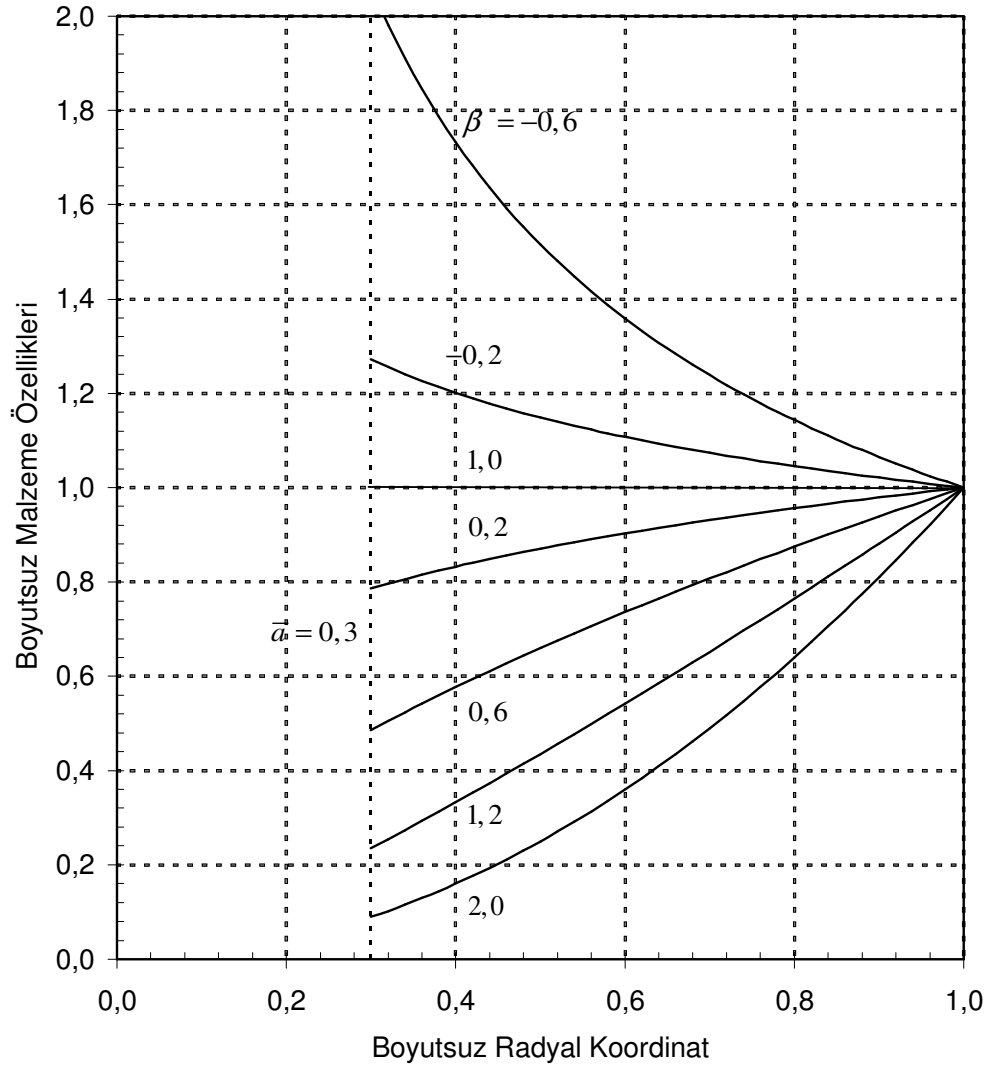
$$L = -[vQ(a) + aQ'(a)][vP(b) + bP'(b)] + [vQ(b) + bQ'(b)][vP(a) + aP'(a)]$$

$$T = [vQ(a) + aQ'(a)][vR(b) + bR'(b)] - [vR(a) + aR'(a)][vQ(b) + bQ'(b)] + T_0\alpha_0(1+\nu)\left(-b^{1+\beta_2}[vQ(a) + aQ'(a)] + a^{1+\beta_2}[vQ(b) + bQ'(b)]\right)$$

$$M = -[vP(a) + aP'(a)][vR(b) + bR'(b)] + [vR(a) + aR'(a)][vP(b) + bP'(b)] + T_0\alpha_0(1+\nu)\left(b^{1+\beta_2}[vP(a) + aP'(a)] - a^{1+\beta_2}[vP(b) + bP'(b)]\right)$$

olarak tanımlanmıştır. İntegral sabitlerinin elde edilmesiyle elastik çözüm elde edilmiştir. Aşağıda malzeme özelliklerini belirleyen değişik β değerlerinin diskte plastik deformasyona ve gerilme-yer değiştirme dağılımına etkisi grafiklerle gösterilmiştir. Bu grafiklerdeki sonuçlar boyutsuz büyüklükler cinsinden sunulmuştur.

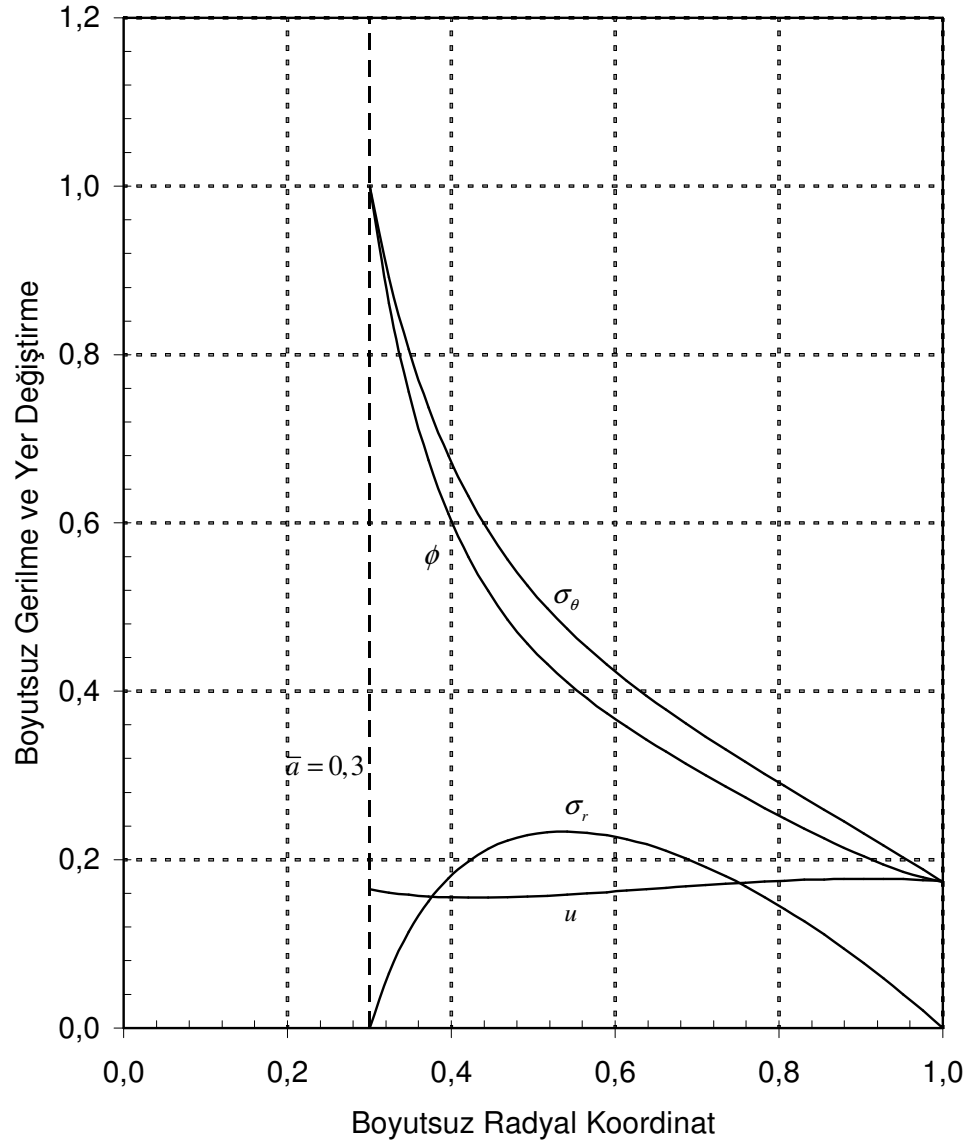
İlk olarak Şekil 4.1'de β değerleri ile malzeme özelliklerini disk içinde değişimi gösterilmiştir. Bu grafikte diskin boyutsuz iç yarıçapı $\bar{a} = 0,3$ alınmıştır.



Şekil 4.1. Boyutsuz malzeme özelliklerinin boyutsuz yarıçapa göre değişimi

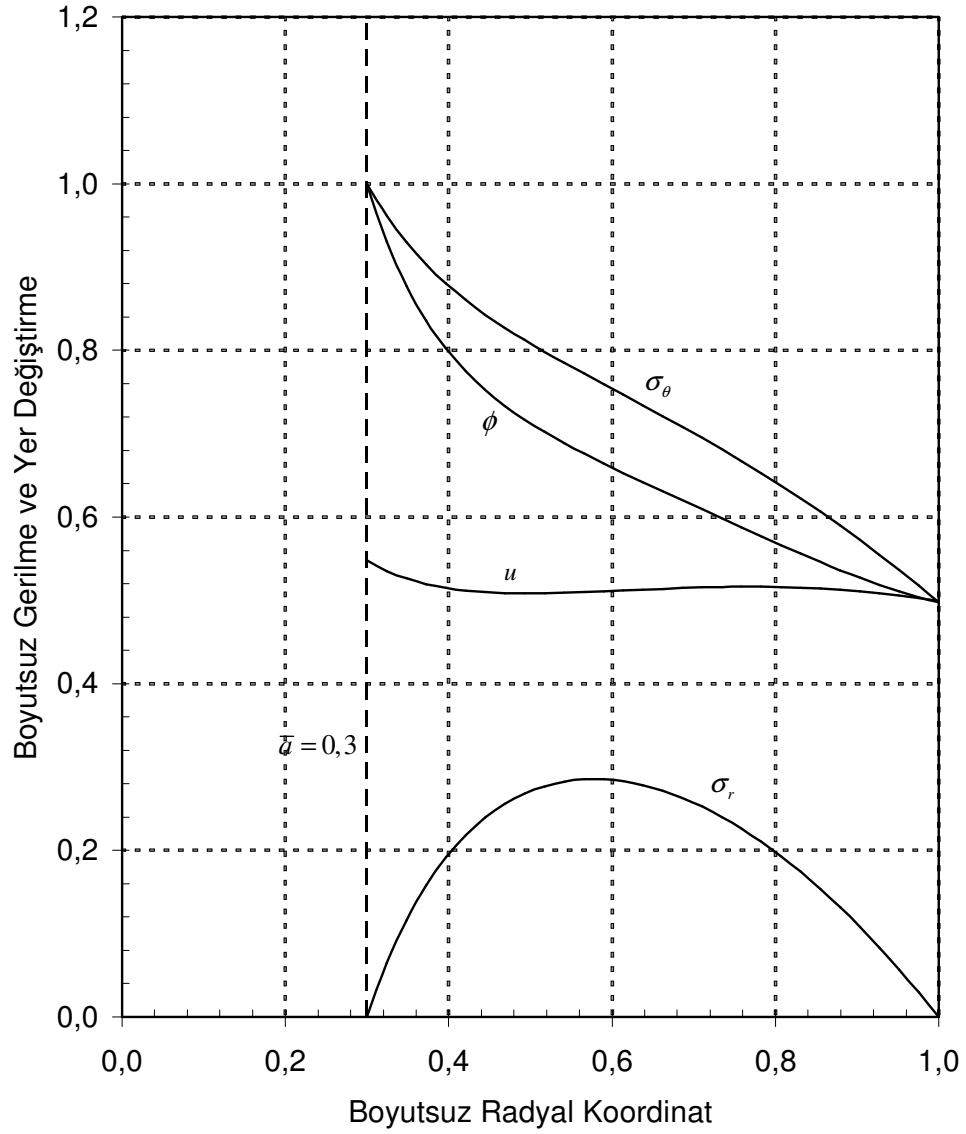
Şekilden görüldüğü gibi $\beta=0$ değerleri homojen malzemeden yapılmış disk özelliğini verir. $\beta<0$ değerleri ile malzeme özellikleri iç yarıçaptan dış yarıçapa doğru azalan, $\beta>0$ değerleri ile ise malzeme özellikleri iç yarıçaptan dış yarıçapa doğru artan diskler modellenebilir.

Şekil 4.2a'da $\beta_1 < 0$ ve Şekil 4.2b'de $\beta_1 > 0$ olan iki farklı disk için kritik açısal hızlardaki gerilme ve yer değiştirme dağılımları gösterilmiştir.



(a)

Şekil 4.2. Farklı malzemeye sahip disklerde kritik hızlarda gerilme ve yerdeğiştirmeler $\Delta T = 80^\circ C$ a) $\beta_1 = -0,5, \beta_2 = 0,3, \beta_3 = 0,35$
 $\Omega = 1,018565$, b) $\beta_1 = 0,5, \beta_2 = -0,3, \beta_3 = 0,35$ $\Omega = 1,318659$



(b)

Şekil 4.2. (Devam) Farklı malzemeye sahip disklerde kritik hızlarda gerilme ve yerdeğiştirmeler $\Delta T = 80^\circ C$ a) $\beta_1 = -0,5$, $\beta_2 = 0,3$, $\beta_3 = 0,35$ $\Omega = 1,018565$, b) $\beta_1 = 0,5$, $\beta_2 = -0,3$, $\beta_3 = 0,35$ $\Omega = 1,318659$

Şekil 4.2a'daki disk malzeme parametreleri $\beta_1 = -0,5$, $\beta_2 = 0,3$ ve $\beta_3 = 0,35$ olarak rastgele seçilmiştir. Bu disk için hesaplanan boyutsuz kritik açısal hız ise $\Omega = 1,018565$ 'dir. Şekil 4.2b'deki disk malzeme parametreleri ise

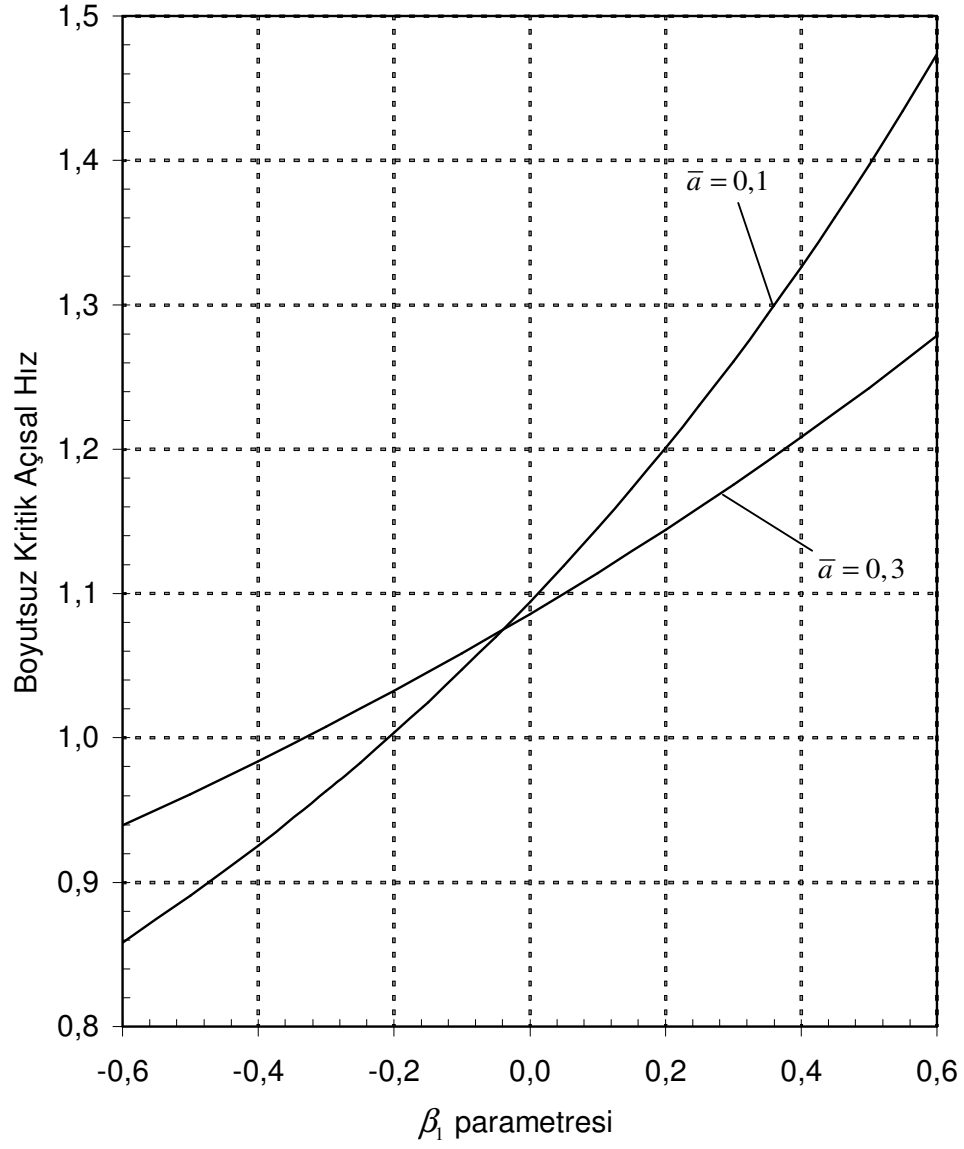
$\beta_1 = 0,5$, $\beta_2 = -0,3$ ve $\beta_3 = 0,35$ olarak seçilmiş ve kritik hız $\Omega = 1,318659$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerler hesaplanırken $\Delta T = 80^\circ C$ alınmıştır.

Şekillerdeki ϕ değeri ise von Mises akma kriterine bağlı olarak $\phi = \sqrt{\sigma_r^2 - \sigma_r \sigma_\theta + \sigma_\theta^2}$ şeklinde tanımlanmıştır. $\phi = 1,0$ olduğu anda ve radyal konumda diskte akma başlamaktadır.

Şekilden görüldüğü gibi her iki durumda da disk içinde $\phi = 1,0$ değeri $\bar{r} = \bar{a}$ 'da görülmektedir. Yani her iki diskte de akma $\bar{r} = \bar{a}$ 'da başlamaktadır.

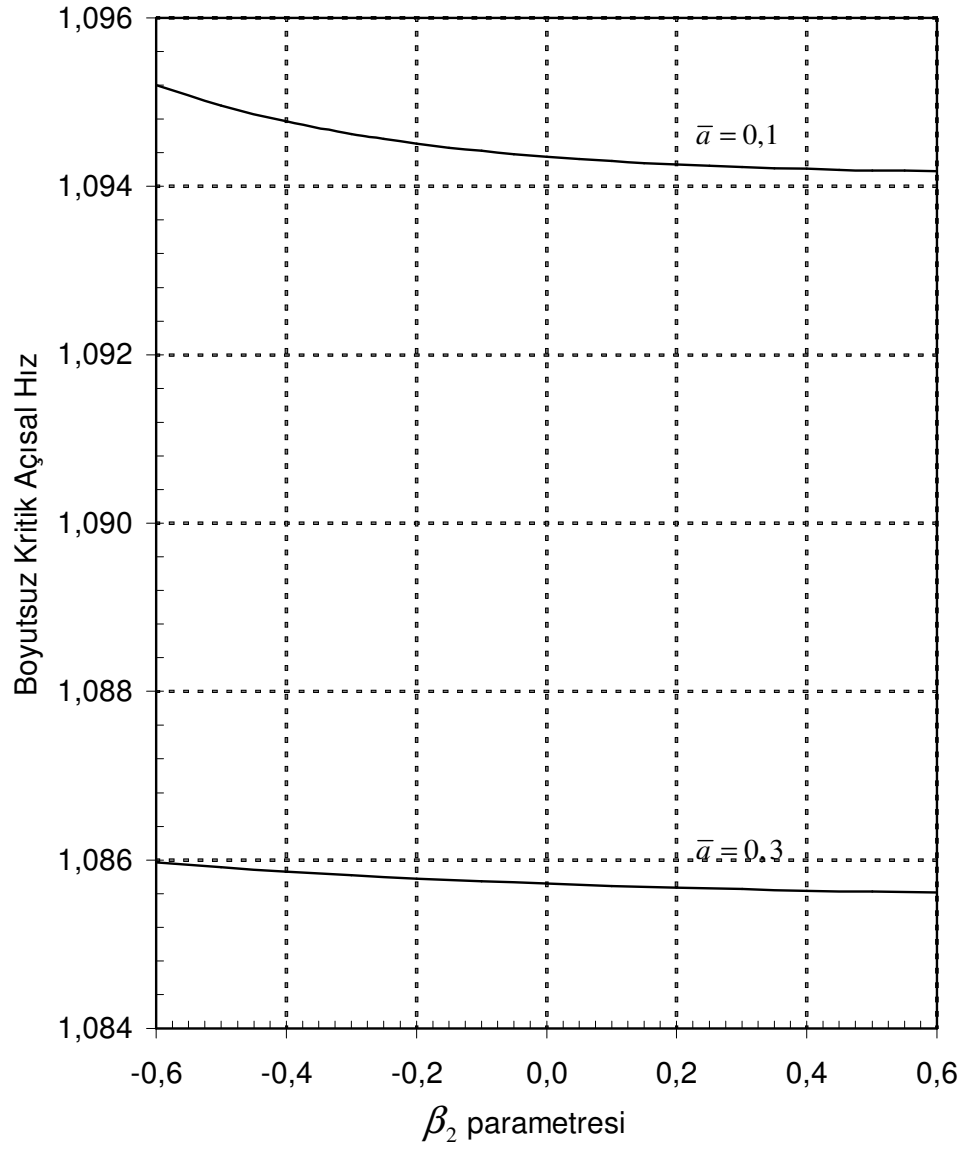
Aşağıdaki grafiklerde β parametrelerinin diskte akmanın başladığı kritik açısal hız değerleri üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Şekil 4.2'de β_1 parametresinin kritik hız üzerine etkisi iç yarıçapı $\bar{a} = 0,1$ ve $\bar{a} = 0,3$ olan diskler için incelenmiştir. Bu grafik elde edilirken $\beta_2 = \beta_3 = 0$ alınmıştır.

Şekil 4.3'ten görüldüğü gibi β_1 değerleri arttıkça kritik açısal hız değerleri artmaktadır yani disk daha yüksek açısal hızlara dayanabilmektedir. $\beta < 0$ değerleri ile iç tarafta daha yüksek elastisite modülüne sahip malzeme olmasına karşılık diskin daha düşük hızlarda akmaya başladığı görülmüştür. Bu nedenle $\beta < 0$ değerlerini kullanmak bu diskler için avantajlı değildir. Ayrıca β_1 değerlerinin iç yarıçap değeri küçük disklerde kritik açısal hızı daha fazla etkilediği görülmüştür.



Şekil 4.3. β_1 parametresinin boyutsuz kritik hız üzerine etkisi ($\beta_2 = \beta_3 = 0$
 $\Delta T = 50^\circ C$)

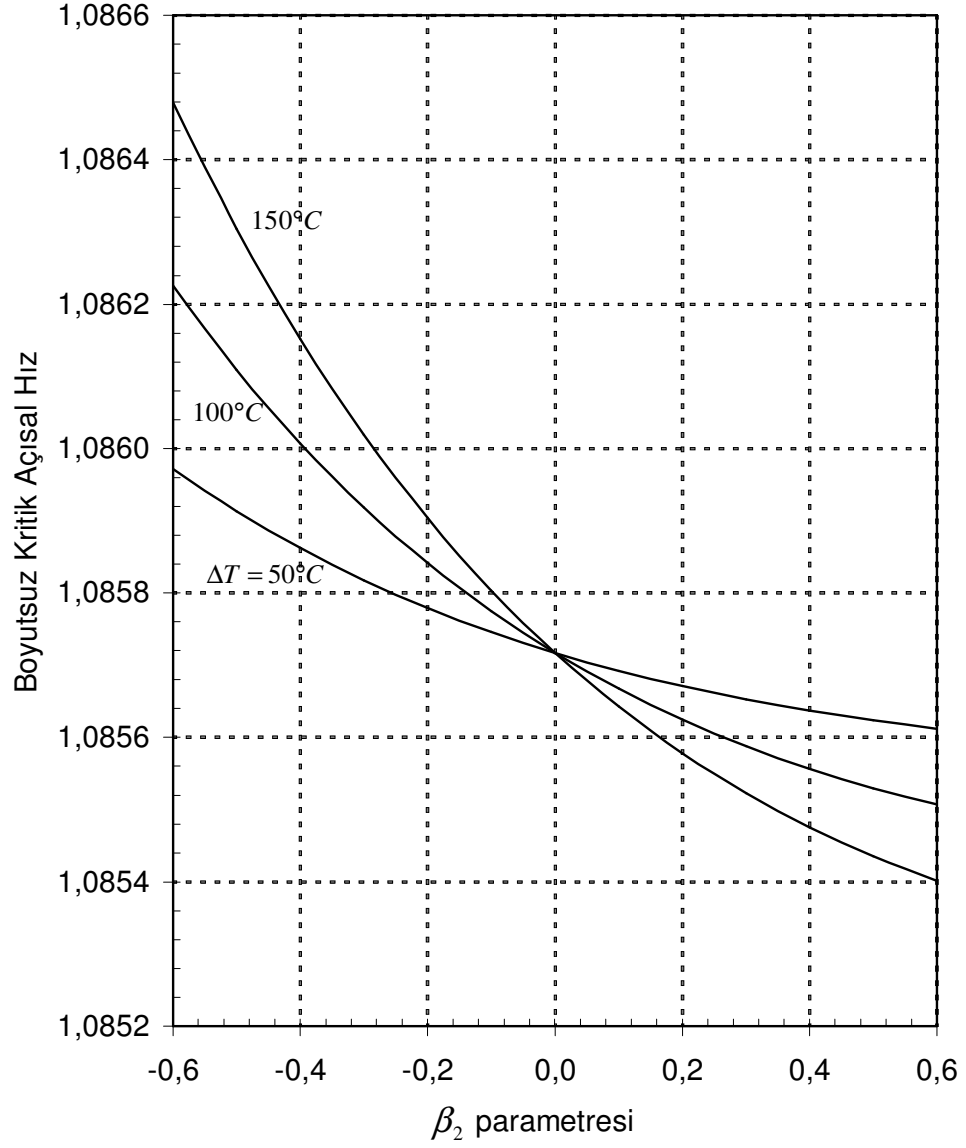
Şekil 4.4'teki grafikte ise disk iç yarıçapı $\bar{a}=0,1$ ve $\bar{a}=0,3$ alınarak β_2 parametresinin kritik hıza etkisi gösterilmiştir. Bu grafikte $\Delta T = 50^\circ C$ alınmıştır.



Şekil 4.4. β_2 parametresinin boyutsuz kritik hız üzerine etkisi ($\beta_1 = \beta_3 = 0$, $\Delta T = 50^\circ C$)

Grafikten görüldüğü gibi β_2 değeri kritik hızı çok fazla etkilememektedir. İç yarıçap değiştikçe β_2 değerinin kritik hız üzerindeki etkisi artmaktadır, iç yarıçapı küçük olan disklerde β_2 değeri kritik hızı arttırmaktadır. Bu grafik $\beta_1 = \beta_3 = 0$ alınarak elde edilmiştir.

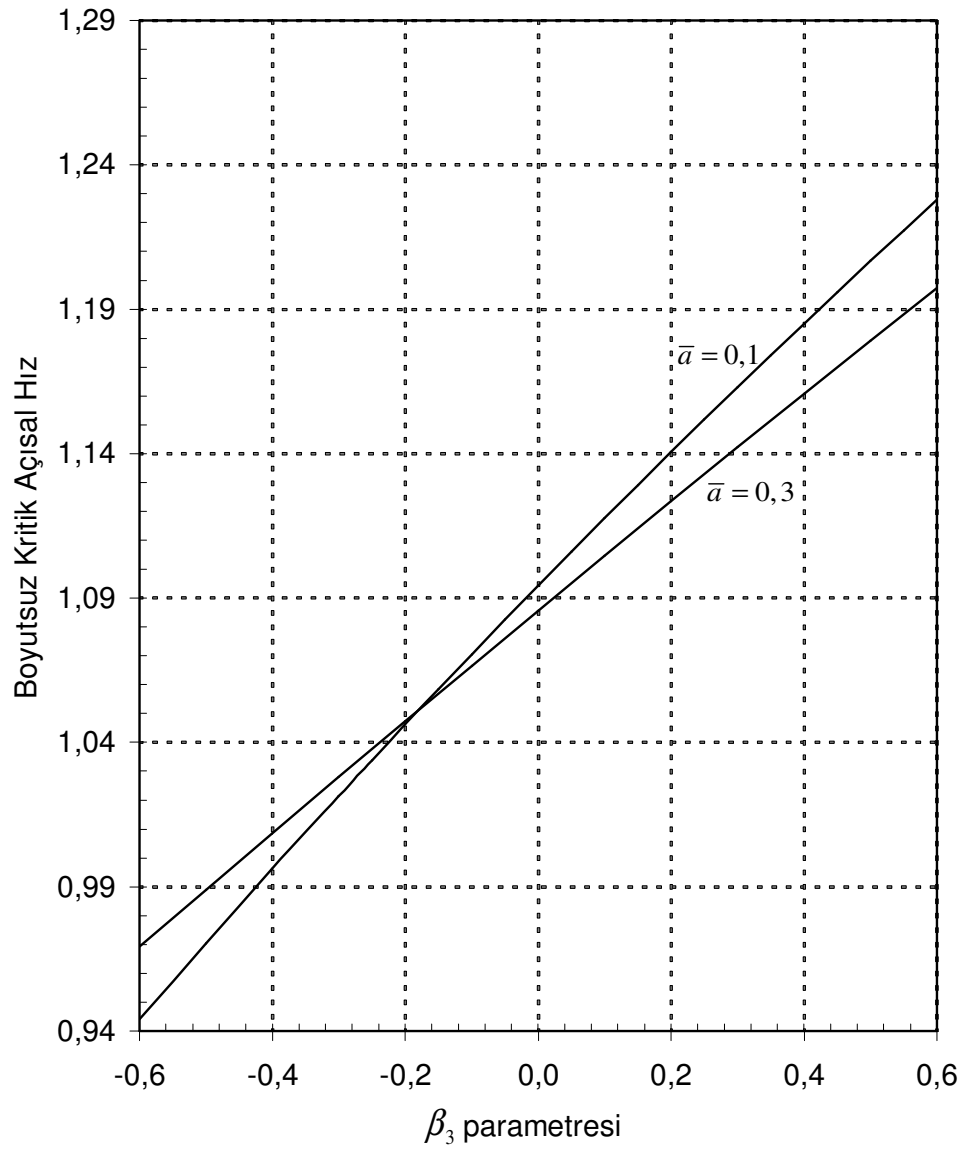
Şekil 4.5'te ise farklı sıcaklık değerleri için β_2 değerlerinin etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.5. β_2 parametresinin boyutsuz kritik hıza etkisinin sıcaklıkla değişimi
($\beta_1 = \beta_3 = 0$)

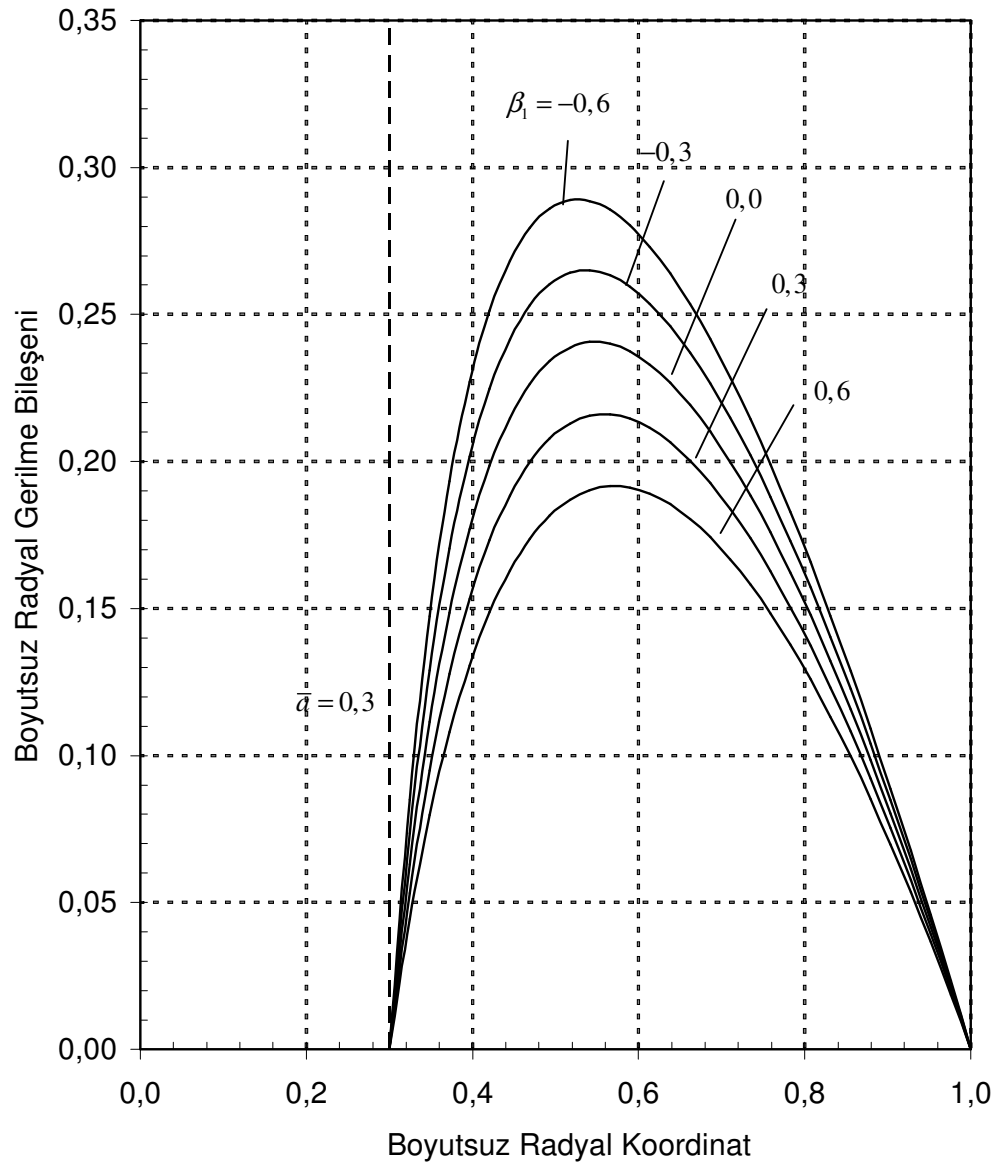
Grafikten de görüldüğü gibi β_2 değerlerinin etkisi sıcaklıkla artmaktadır, ancak bu etki oldukça hız değeri aralıklarındadır. Bu grafik $\bar{a}=0,3$ ve $\beta_1 = \beta_3 = 0$ alınarak elde edilmiştir.

Şekil 4.6'da ise β_3 değerlerinin kritik hız üzerindeki etkisi gösterilmiştir.



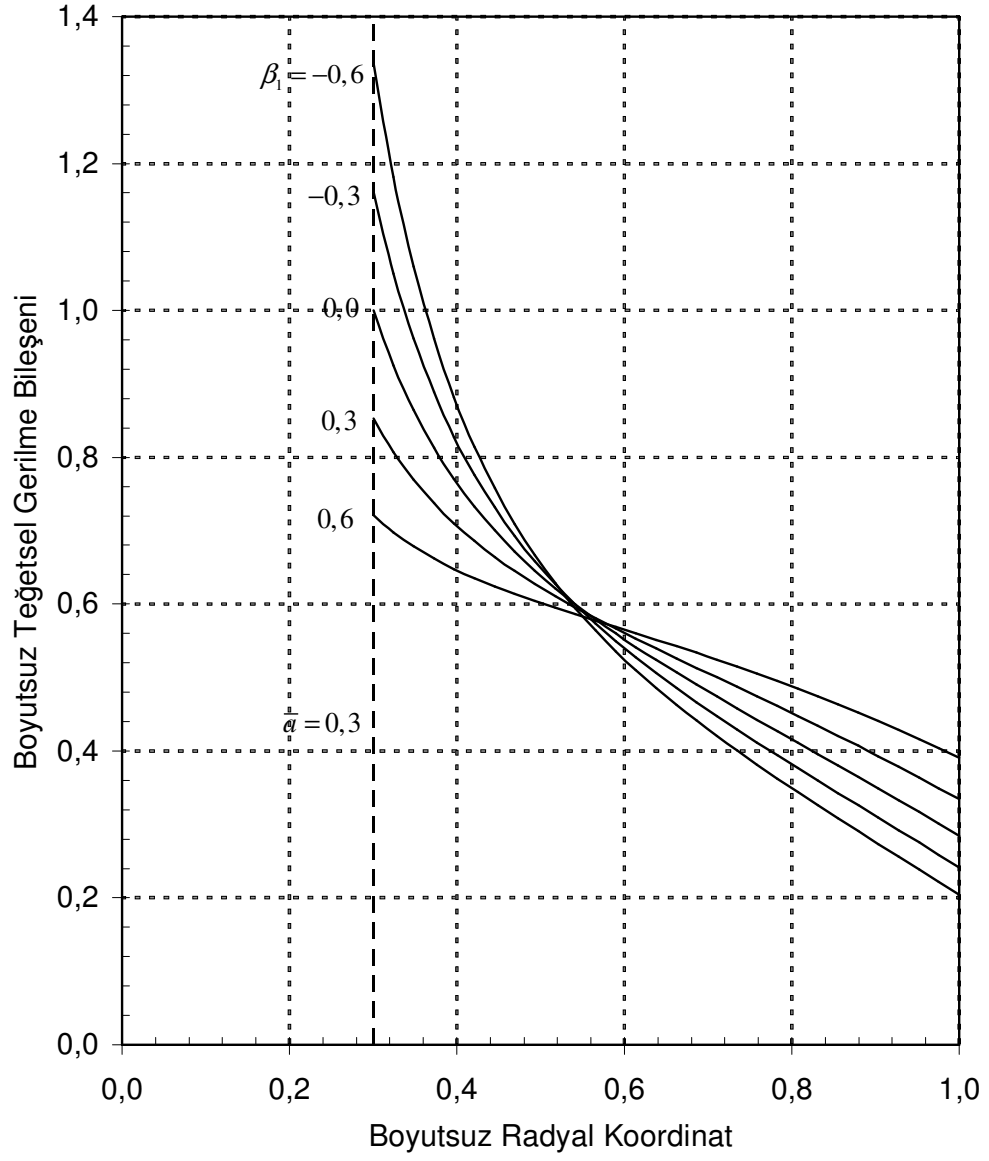
Şekil 4.6. β_3 parametresinin boyutsuz kritik hız üzerine etkisi $\Delta T = 50^\circ C$

Şekilden görüldüğü gibi β_3 değerleri arttıkça kritik açısal hız değerlerinin arttığı görülmektedir. Diğer parametrelerde olduğu gibi β_3 de iç yarıçapı küçük olan disklerde kritik hızı daha fazla etkilemektedir. Bu grafik elde edilirken $\beta_1 = \beta_2 = 0$ alınmıştır.



(a)

Şekil 4.7. β_1 parametresinin boyutsuz gerilme bileşenleri üzerine etkisi $\Omega = 1,0857$ $\Delta T = 50^\circ C$ a) radyal, b) teğetsel



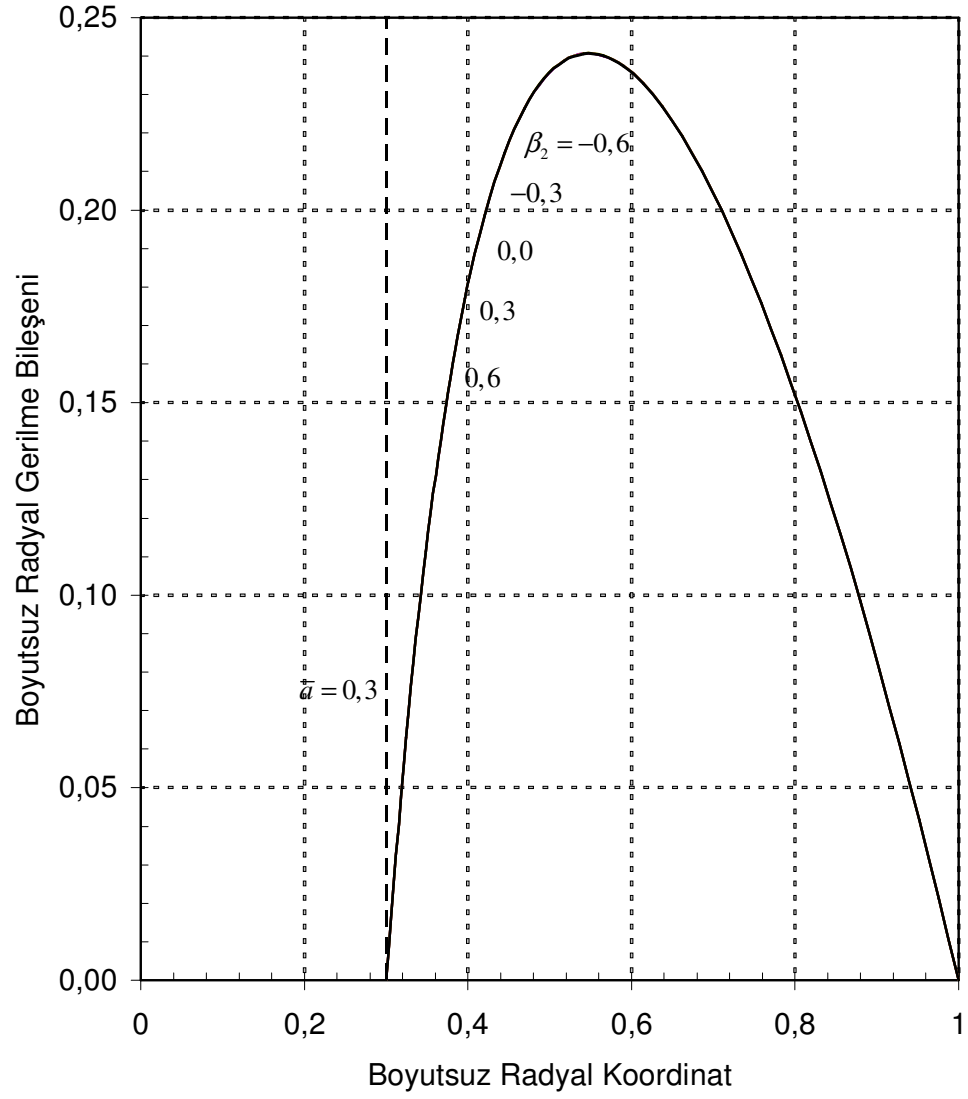
(b)

Şekil 4.7. (Devam) β_1 parametresinin boyutsuz gerilme bileşenleri üzerine etkisi $\Omega = 1,0857$ $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ a) radyal, b) teğetsel

β değerlerinin disk içerisindeki gerilme bileşenleri üzerindeki etkileri Şekil 4.7 - 4.9'da verilmiştir.

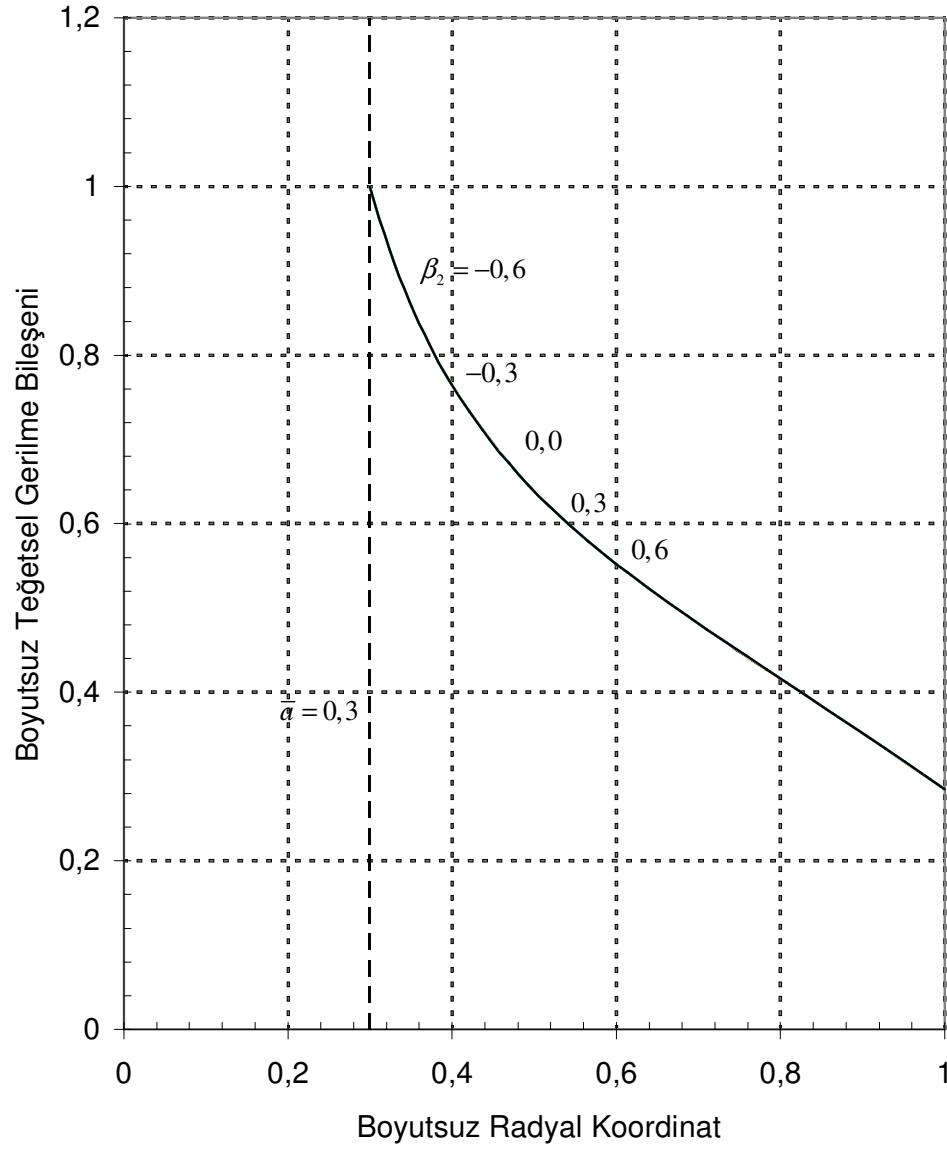
$\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 0$ alınarak homojen disk için elde edilen kritik açısal hız değeri kullanılarak boyutsuz kritik açısal hız değeri $\bar{\omega} = 0,3$ için $\Omega = 1,0857$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.7'de bu hız değeri kullanılarak değişik β_1 değerleri için radyal gerilme bileşenleri ve teğetsel gerilme bileşenleri gösterilmiştir. Görüldüğü gibi $\beta_1 < 0$ değerlerinde radyal gerilme bileşenleri homojen diskten daha büyük değerlerdedir. β_1 arttıkça radyal gerilme bileşeninin azaldığı görülmektedir. Teğetsel gerilme bileşenlerine bakıldığında gerilme bileşeninin değeri düşmekte, belli bir konumdan sonra ise β_1 değerleri arttıkça gerilme bileşenleri artmaktadır. Bu grafik elde edilirken $\beta_2 = \beta_3 = 0$ alınmıştır.

Şekil 4.8'de grafikler homojen disk için hesaplanan kritik hız değeri ve $\beta_1 = \beta_3 = 0$ değerleri ile birlikte değişik β_2 değerleri kullanılarak $\Delta T = 50^\circ C$ için elde edilmiştir. Grafiğe bakıldığında herhangi bir β_2 değerleri için radyal ve teğetsel gerilme bileşenlerinin üzerinde bir etkisi olmadığı ve grafiklerinin aynı olduğu görülmektedir.



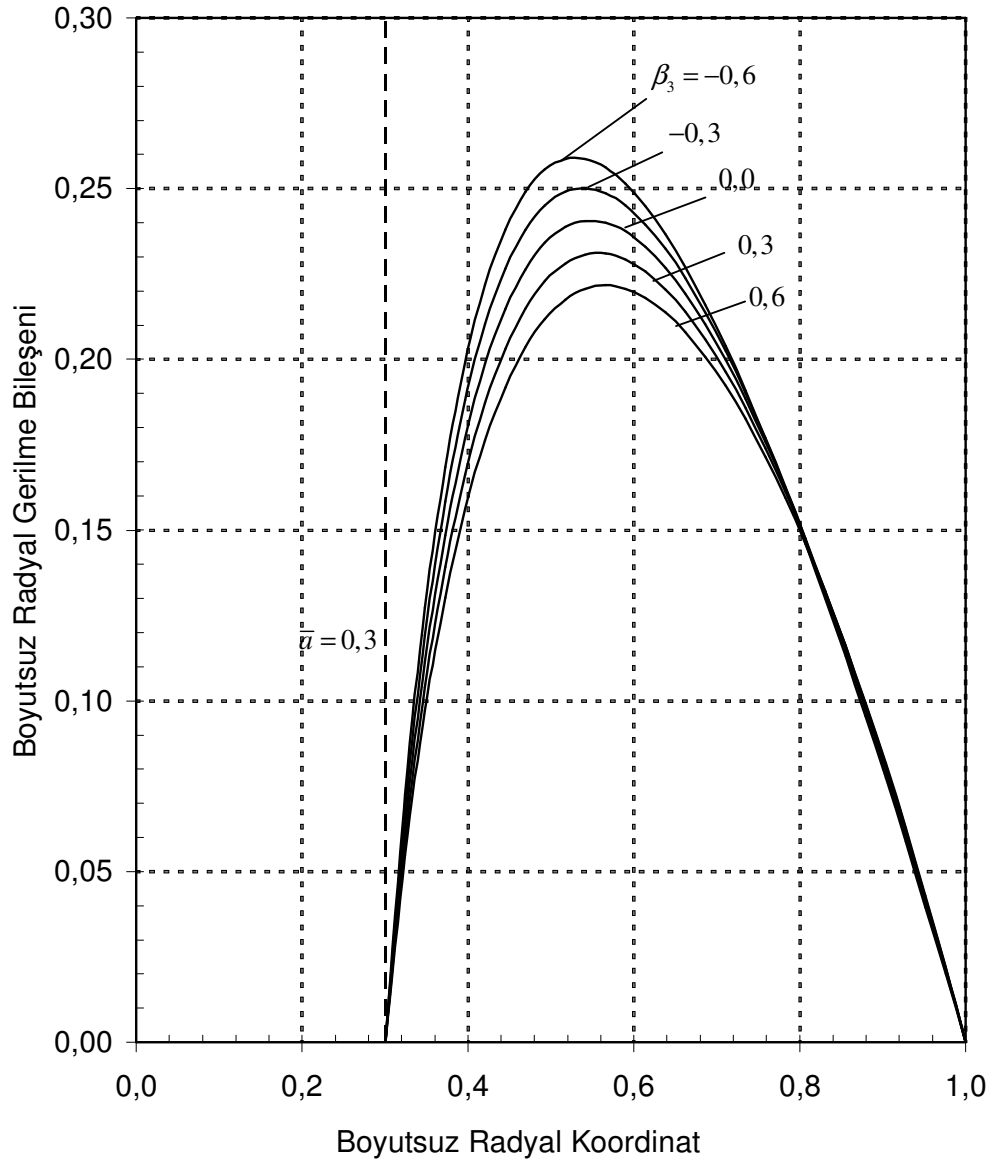
(a)

Şekil 4.8. β_2 parametresinin boyutsuz gerilme bileşenleri üzerine etkisi
 $\Omega = 1,0857$, $\Delta T = 50^\circ C$ a) radyal, b) teğetsel



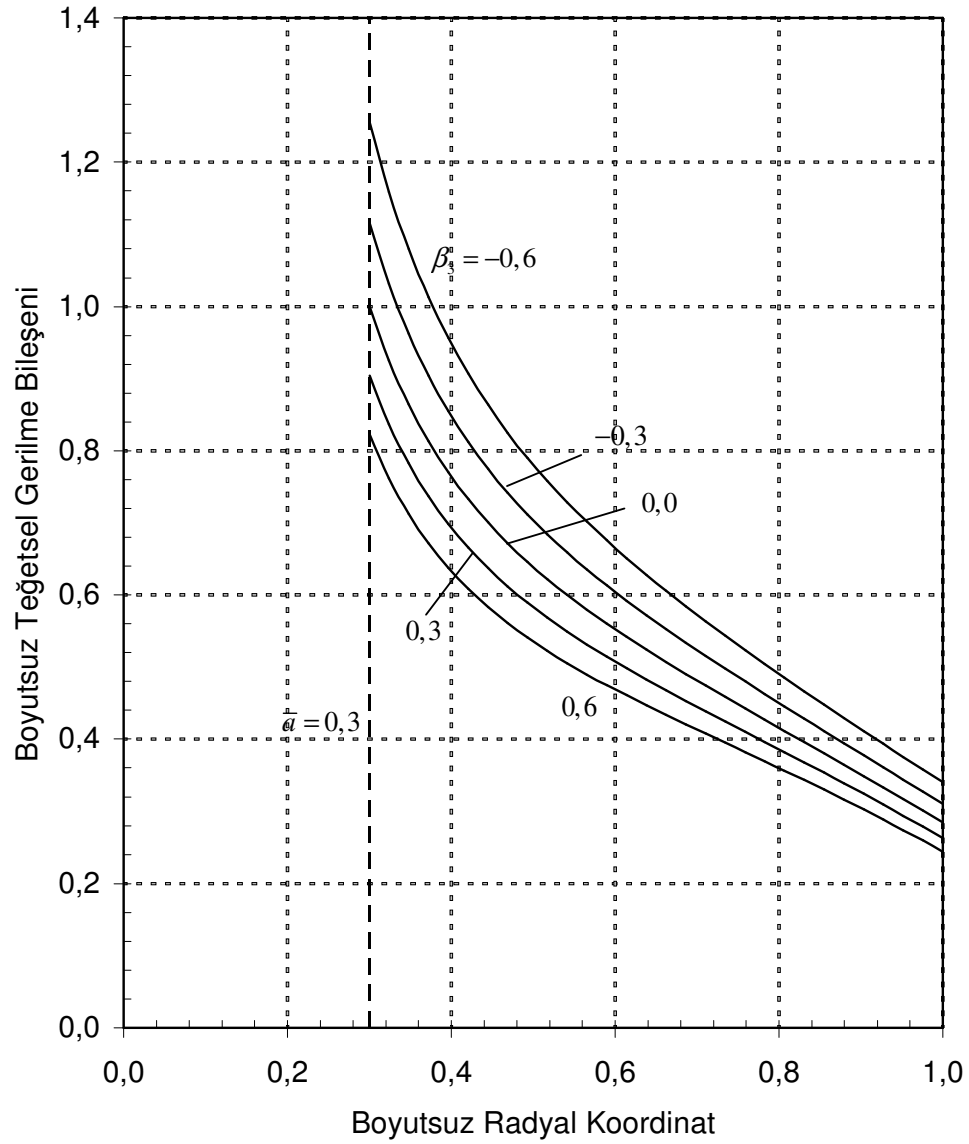
(b)

Şekil 4.8. (Devam) β_2 parametresinin boyutsuz gerilme bileşenleri üzerine etkisi $\Omega = 1,0857$, $\Delta T = 50^\circ C$ a) radyal, b) teğetsel



(a)

Şekil 4.9. β_3 parametresinin boyutsuz gerilme bileşenleri üzerine etkisi
 $\Omega = 1,0857$, $\Delta T = 50^\circ C$ a) radyal, b) teğetsel



(b)

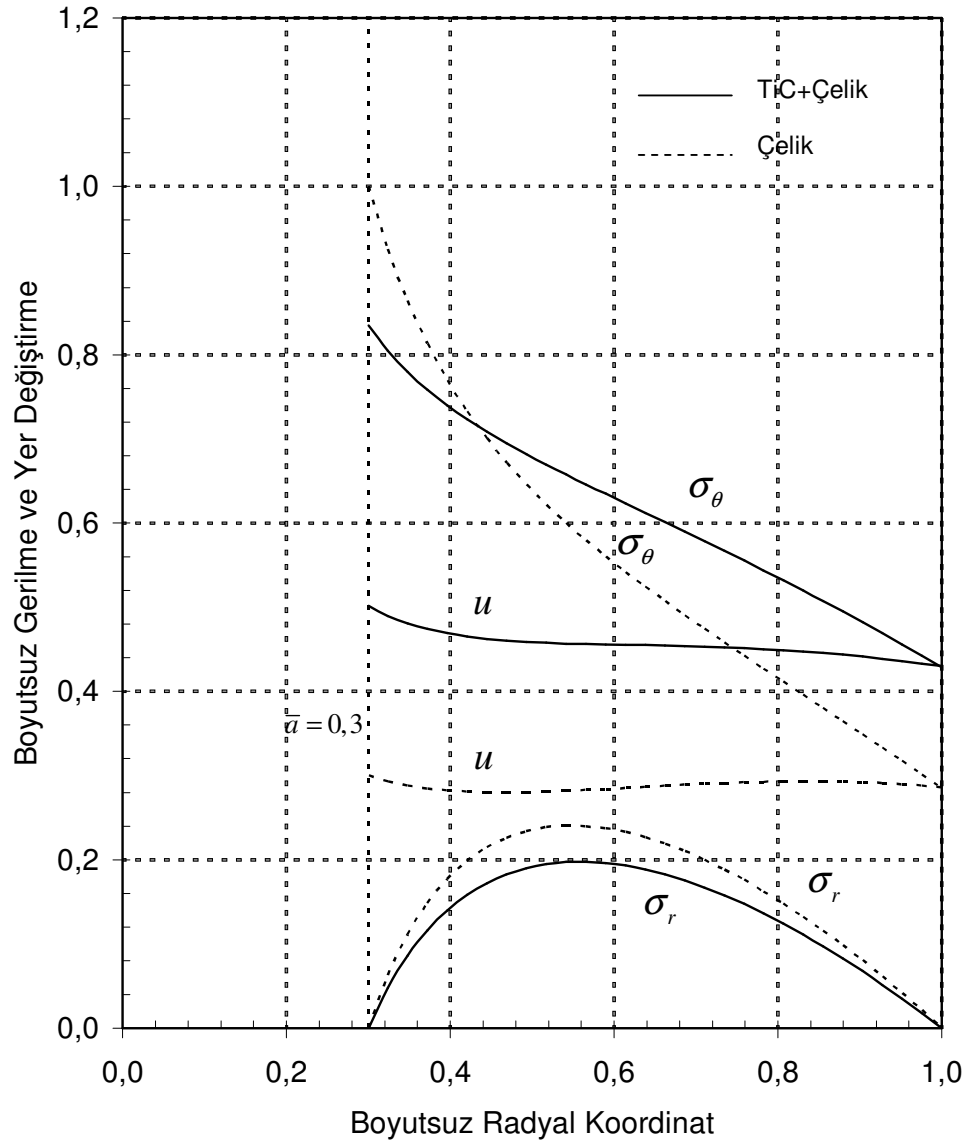
Şekil 4.9. (Devam) β_3 parametresinin boyutsuz gerilme bileşenleri üzerine etkisi $\Omega = 1,0857$, $\Delta T = 50^\circ C$ a) radyal, b) teğetsel

Şekil 4.9'deki grafikler homojen disk için hesaplanan kritik hız değeri ve $\beta_1 = \beta_2 = 0$ değerleri ile birlikte değişik β_3 değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Grafiğe bakıldığında β_3 değerleri arttıkça gerilme bileşenlerinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.1. Takım malzemelerinin mekanik özellikleri [18]

Özellik	Yüksek Hız Çeliği	Döküm Alaşımı	WC	TiC	Al ve Si Esaslı Seramik	CBN	Elmas
Sertlik (GPa)	8,5	8,0	14–24	18–32	20–30	40–50	70–80
Basma mukavemeti (MPa)	4100–4500	1500–2300	4100–5850	3100–3850	2750–4500	6900	6900
Darbe mukavemeti (J)	1,35–8	0,34–1,25	0,34–1,35	0,79–1,24	<0,1	-	-
Elastisite Modülü (GPa)	200	200	520–600	310–450	310–410	850	820–1050
Yoğunluk (g/cm ³)	8,6	8–8,7	10–15	5,5–5,8	4–4,5	3,48	3,5
Ergime/Bozunma Sıc. (°C)	1300	-	1400	1400	2000	1300	700
Isıl iletkenlik (W/m°C)	-	-	42–125	17	17–29	13	70
Isıl Genleşme Katsayısı (x10 ⁻⁶ /°C)	12	-	4–6,5	7,5–9	3,2–8,5	4,8	1,2

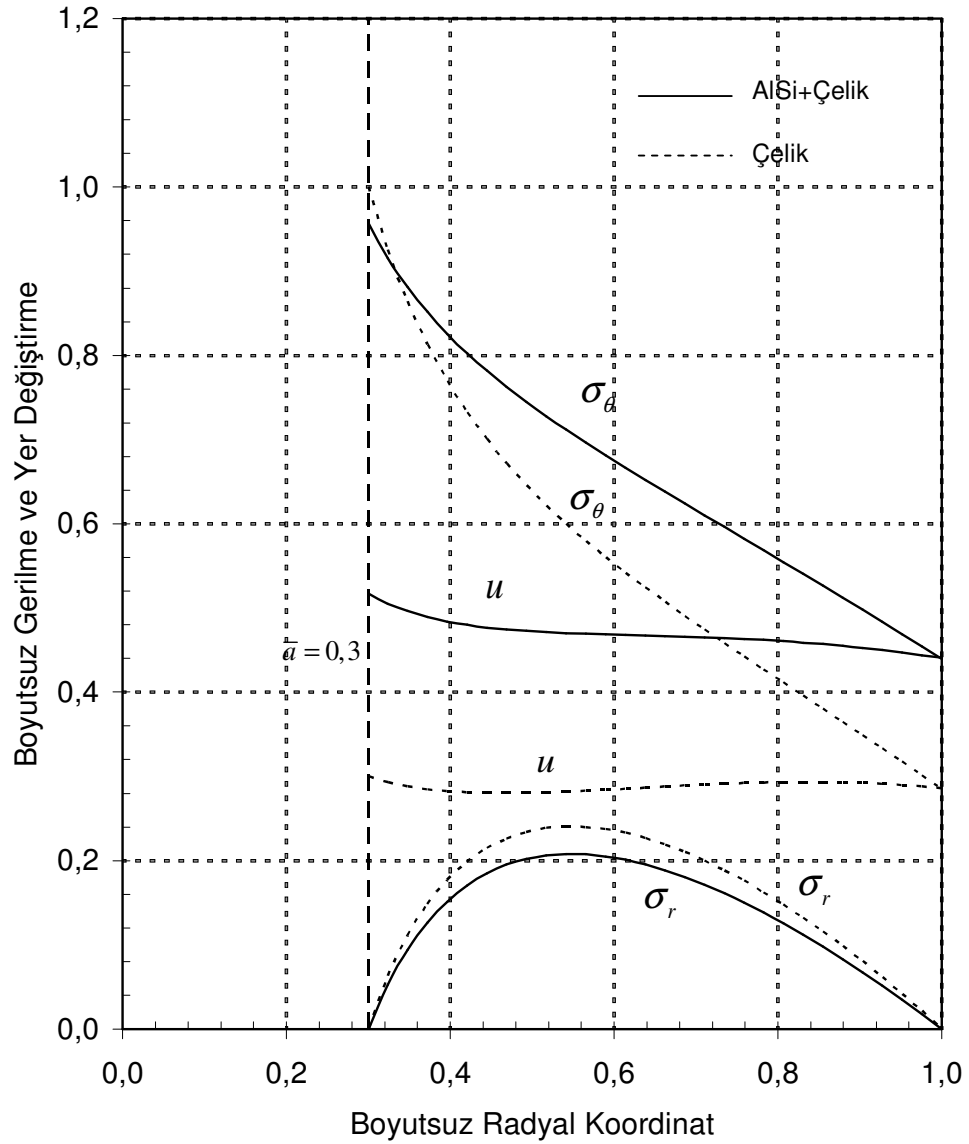
β değerlerinin değişik sayısal değerlerle gerilme ve yer değiştirme dağılımına etkilerinin incelenmesinden sonra mekanik özellikleri bilinen bazı malzemeler kullanılarak modellenen FDM disklerin gerilme ve yer değiştirme dağılımları gösterilmiştir. Bunun için Tablo 4.1'den örnek olarak TiC, WC ve Al - Si esaslı seramik seçilmiştir. Şekil 4.10'da malzeme özelliklerinin iç yarıçapta ($\bar{r} = \bar{a}$) yüksek hız çeliği, dış yarıçapta ($\bar{r} = 1$) TiC olacak şekilde değiştiği durum için β değerleri, $\beta_1 = 0,5757$, $\beta_2 = -0,3367$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = -0,3563$ seçilmiştir. Grafik, homojen diskin akmaya başladığı $\Omega = 1,0857$ kritik açısal hız değeri için çizilmiştir ve kesikli çizgi ile çizilen eğriler homojen malzemedan yapılan diske aittir. Şekilden de görüldüğü gibi bu hızda homojen diskte akma başlarken, FDM disk henüz elastik sınırlar içerisinde.



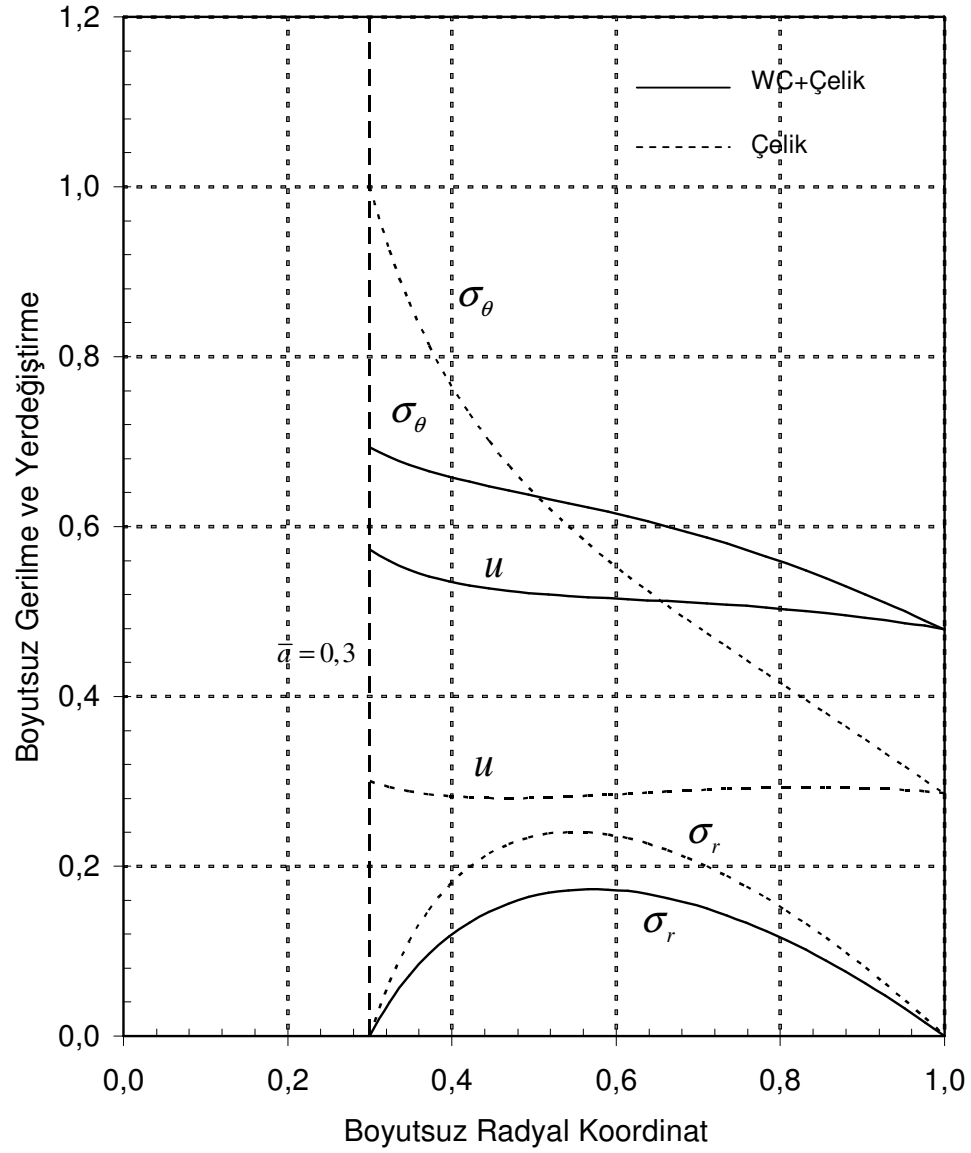
Şekil 4.10. Çelik ile TiC esaslı seramikten oluşan FDM diskte gerilme ve yerdeğiştirme dağılımı. $\beta_1 = 0,5757$, $\beta_2 = -0,3367$ ($\Delta T = 100^\circ C$)
 $\beta_3 = -0,3563$ $\Omega = 1,0857$

Şekil 4.11'da malzeme özelliklerinin iç yarıçapta ($\bar{r} = \bar{a}$) yüksek hız çeliği, dış yarıçapta ($\bar{r} = 1$) Al-Si esaslı seramik olacak şekilde değiştiği durum için β değerleri, $\beta_1 = 0,4882$, $\beta_2 = -0,7271$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = -0,5757$ seçilmiştir. Şekil 4.12'de ise iç yarıçapta yüksek hız çeliği dış yarıçapta WC olacak şekilde β değerleri, $\beta_1 = 0,8402$, $\beta_2 = -0,7272$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = 0,2767$ seçilmiştir. Bu

grafikler de homojen disk için hesaplanan kritik açısal hız değerinde çizilmiştir. Şekillerden anlaşıldığı gibi bu hızda homojen disklerde akma meydana gelirken FDM diskler henüz elastik sınırlar içerisindedir.

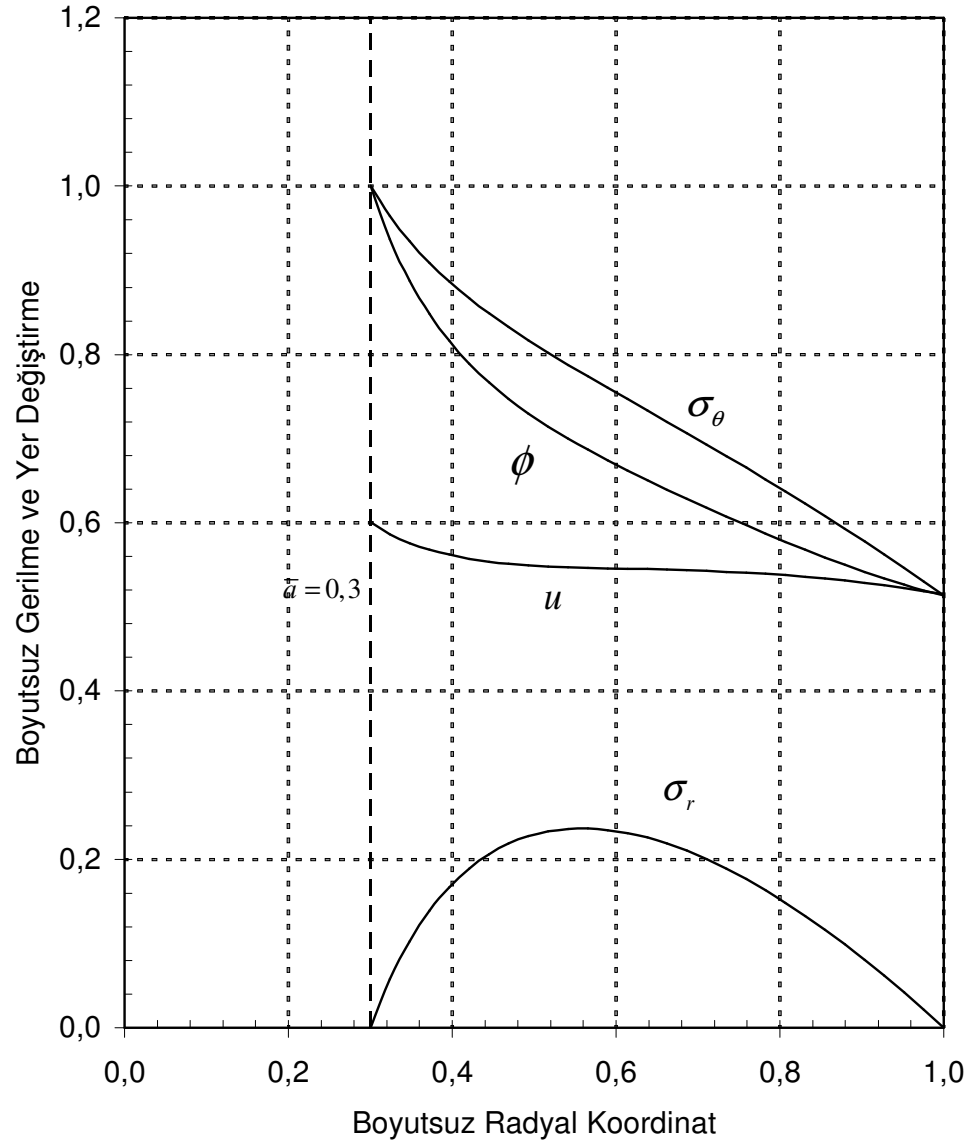


Şekil 4.11. Çelik ile Al – Si esaslı seramikten oluşan FDM diskte gerilme ve yer değiştirme dağılımı $\beta_1 = 0,4882$, $\beta_2 = -0,7271$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = -0,5757$ $\Omega = 1,0857$



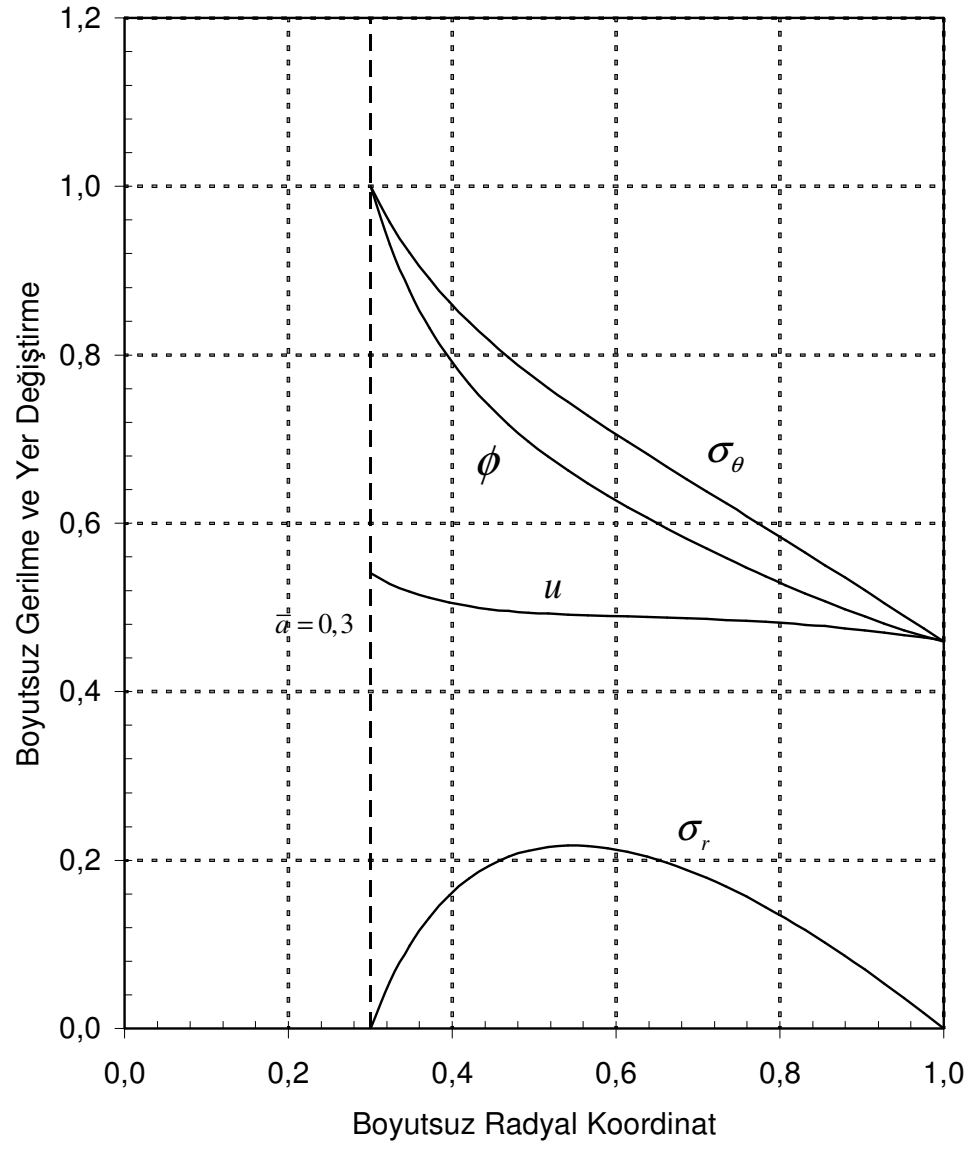
Şekil 4.12. Çelik ile WC esaslı seramikten oluşan FDM diskte gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\beta_1 = 0,8402$, $\beta_2 = -0,7272$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = 0,2767$ $\Omega = 1,0857$

Şekil 4.13 - 4.15'te ise seçilen bu üç FDM diskler için hesaplanan kritik açısal hız değerlerinde gerilme ve yer değiştirme dağılımları gösterilmiştir. Şekil 4.13'te Çelik ve TiC'den oluşan disk için kritik açısal hız değeri $\Omega = 1,1883$ olarak hesaplanmış ve gerilme, yer değiştirme dağılımı verilmiştir. Görüldüğü gibi bu hız homojen disk için hesaplanan açısal hız değerinden büyüktür.

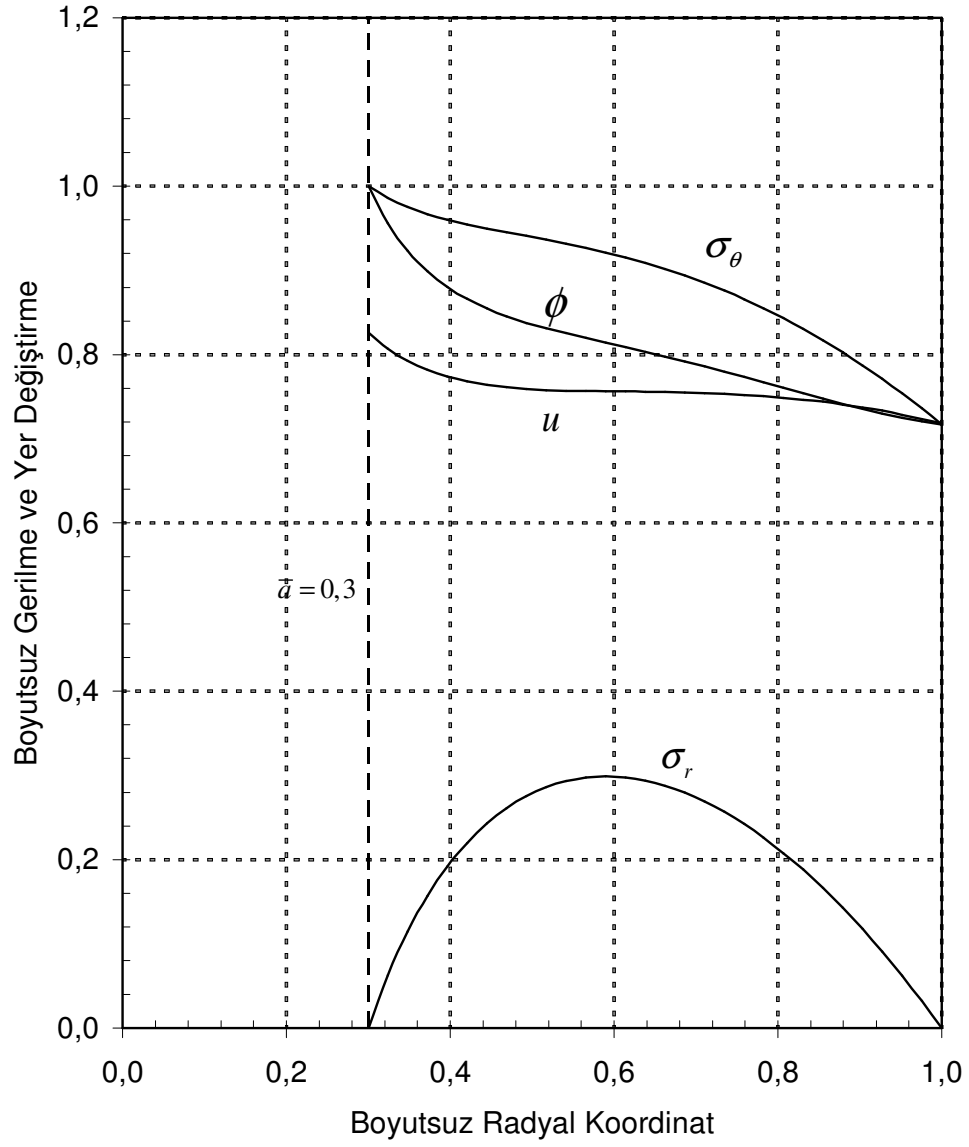


Şekil 4.13. Çelik ile TiC esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yerdeğiştirme dağılımı, $\beta_1 = 0,5757$, $\beta_2 = -0,3367$, $\beta_3 = -0,3563$, $\Omega = 1,1883$

Şekil 4.14'te ise çelik ve Al-Si'dan oluşan disk için kritik açısal hız değeri $\Omega = 1,1100$, Şekil 4.15'de ise çelik ve WC'den oluşan disk için kritik açısal hız $\Omega = 1,4396$ olarak hesaplanmıştır.



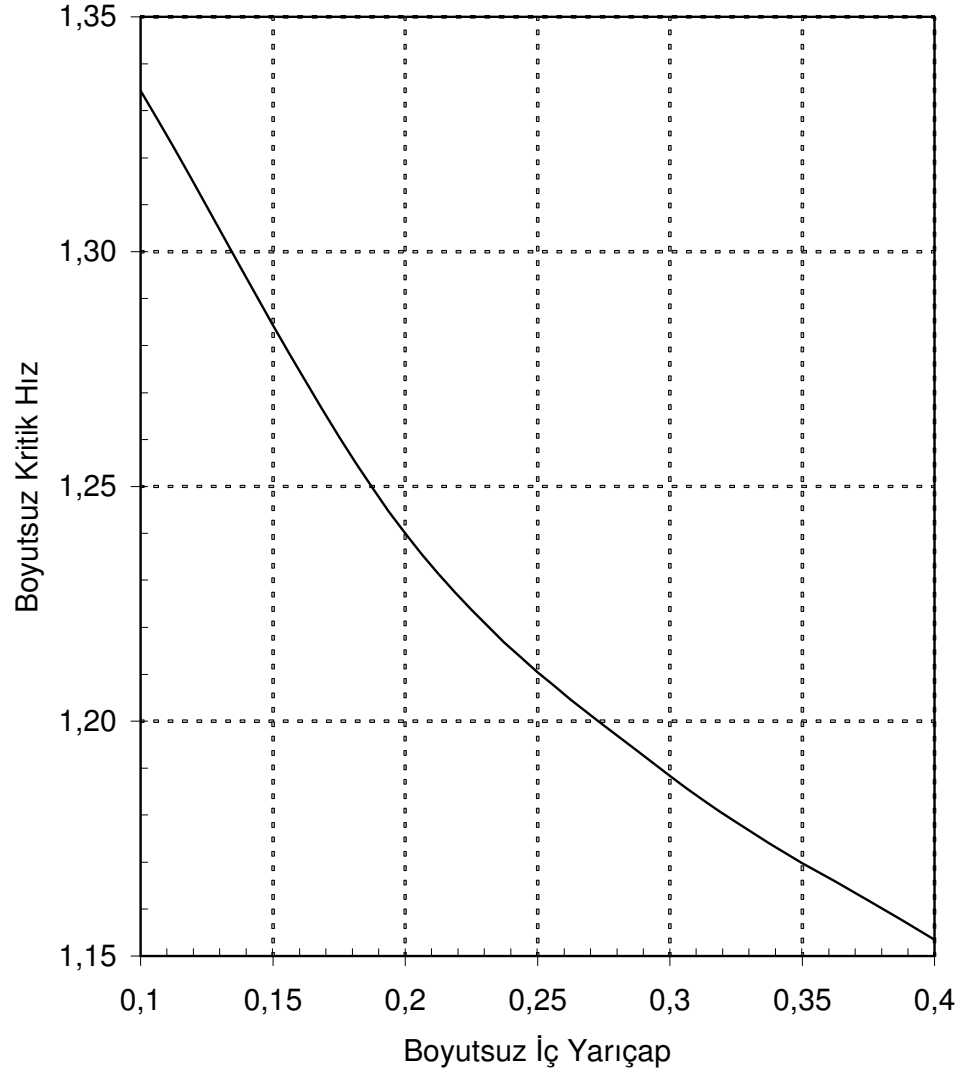
Şekil 4.14. Çelik ile Al-Si esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açılal hızda gerilme ve yer değıştirme dağılımı, $\beta_1 = 0,4882$, $\beta_2 = -0,7271$, $\beta_3 = -0,5757$ $\Omega = 1,4396$



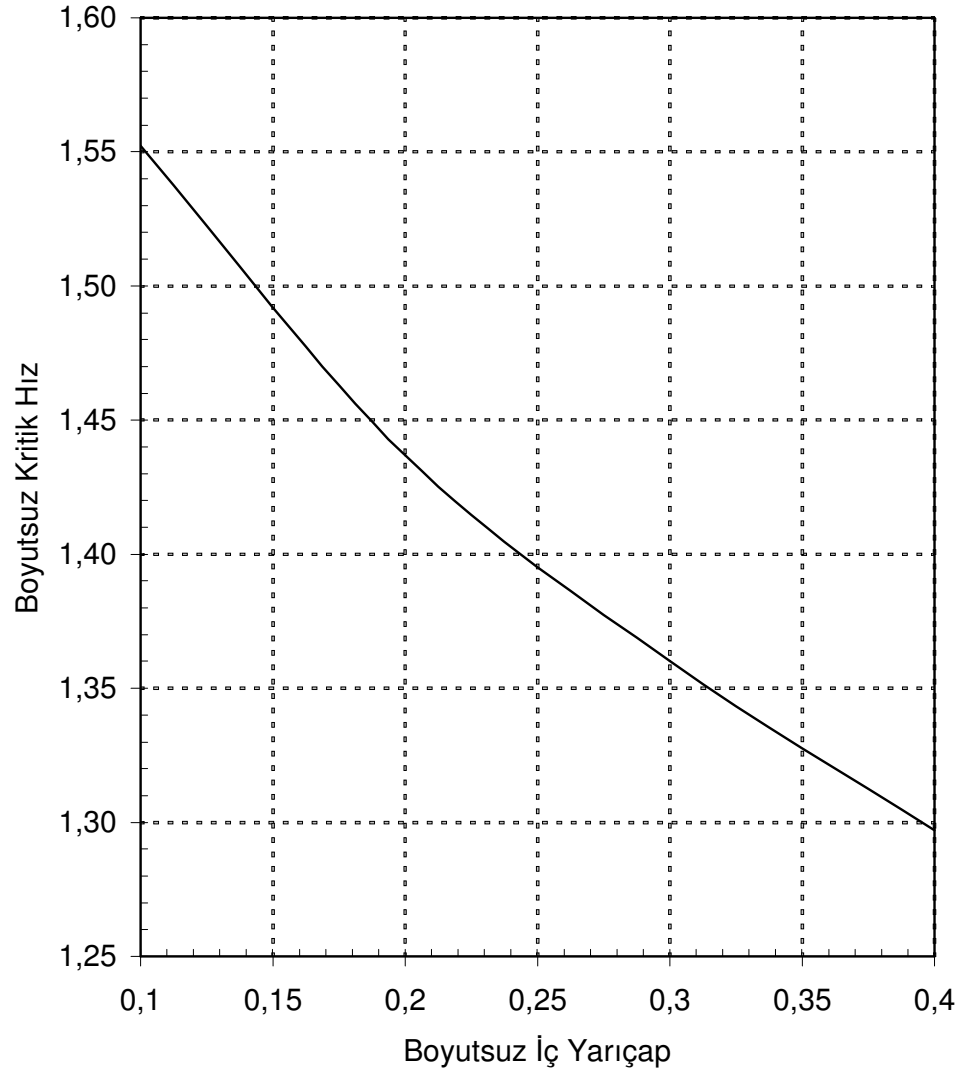
Şekil 4.15. Çelik ile WC esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısıl hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\beta_1 = 0,8402$, $\beta_2 = -0,7272$, $\beta_3 = 0,2767$, $\Omega = 1,4396$

Şekil 4.16'da boyutsuz yarıçapın kritik hıza etkisi gösterilmiştir. malzeme özelliklerinin iç yarıçapta ($\bar{r} = \bar{a}$) yüksek hız çeliği, dış yarıçapta ($\bar{r} = 1$) TiC olacak şekilde değiştiği durum için β değerleri, $\beta_1 = 0,5757$, $\beta_2 = -0,3367$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = -0,3563$ seçilmiştir. $\bar{a} = 0,1$ için $\Omega = 1,3343312$, $\bar{a} = 0,2$

için $\Omega = 1,2399878$, $\bar{a} = 0,3$ için $\Omega = 1,18832$ ve $\bar{a} = 0,4$ için $\Omega = 1,1534$ bulunmuştur. Boyutsuz yarıçap attıkça kritik hız azalmaktadır.

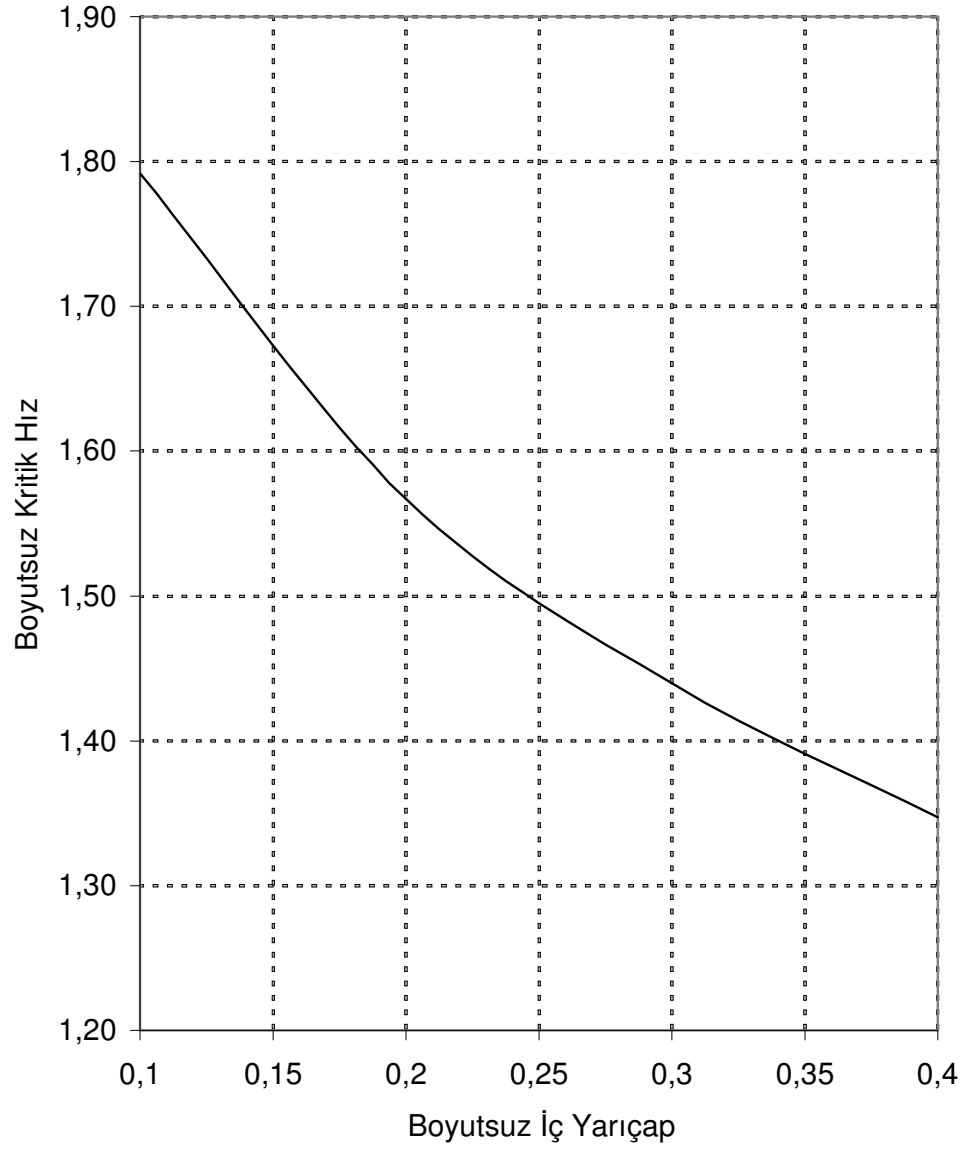


Şekil 4.16. Çelik - TiC FDM diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz iç yarıçap ile değişimi, $\beta_1 = 0,5757$, $\beta_2 = -0,3367$ ($\Delta T = 100^\circ C$) $\beta_3 = -0,3563$



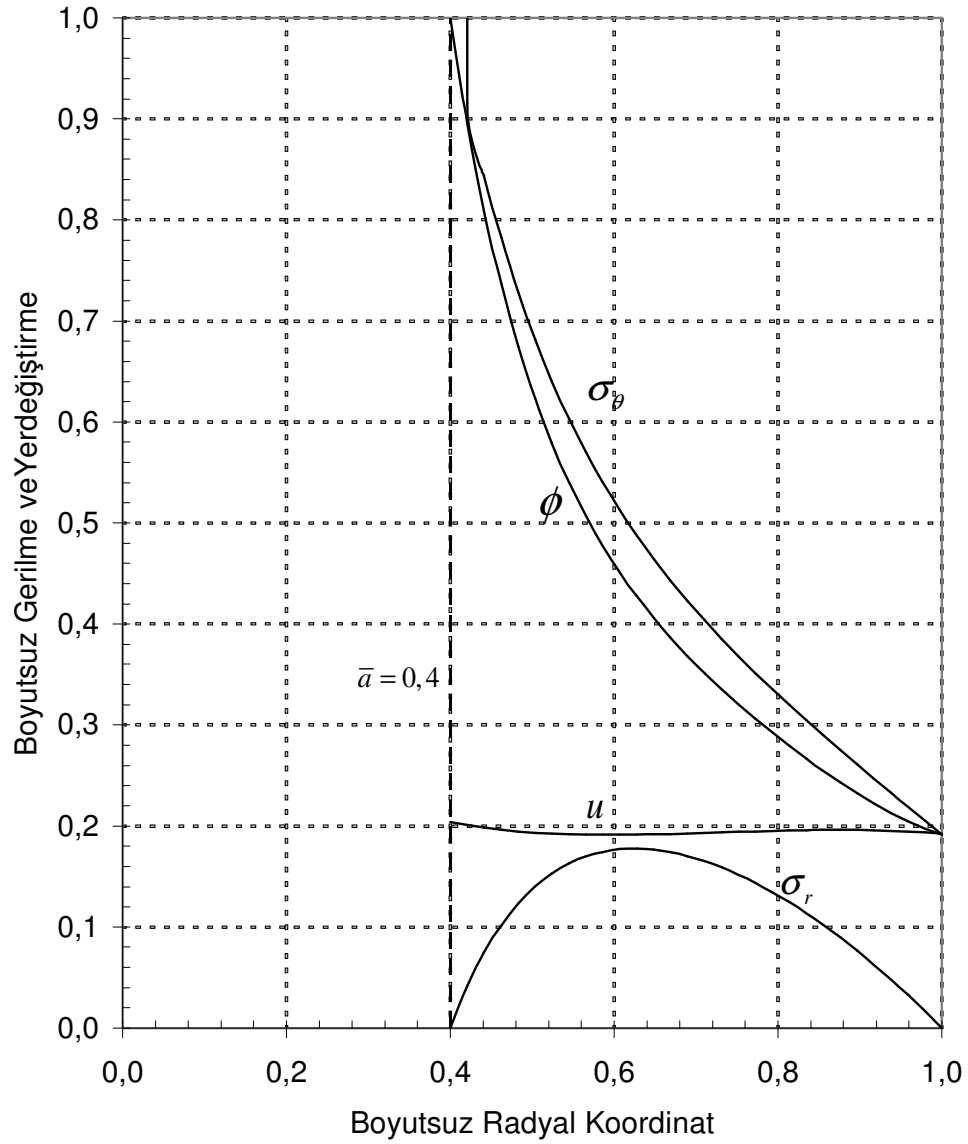
Şekil 4.17. Çelik ile Al – Si alaşımlı malzemeden yapılmış diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz iç yarıçapla değişimi, $\beta_1 = 0,4822$, $\beta_2 = -0,7271 (\Delta T = 100^\circ C)$ $\beta_3 = -0,5757$

Çelik ile Al–Si alaşımlı malzemeden yapılmış disk için $\beta_1 = 0,4822$, $\beta_2 = -0,7271 (\Delta T = 100^\circ C)$, $\beta_3 = -0,5757$ değerlerinde elde edilen sonuçlar Şekil 4.17’de benzerdir. $\bar{a} = 0,1$ için $\Omega = 1,5524$, $\bar{a} = 0,2$ için $\Omega = 1,436825$, $\bar{a} = 0,3$ için $\Omega = 1,360093$ ve $\bar{a} = 0,4$ için $\Omega = 1,296958$ bulunmuştur. Yine boyutsuz radyal koordinat attıkça kritik hız azalmaktadır.



Şekil 4.18. Çelik ile WC alaşımlı malzemeden yapılmış diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz iç yarıçap ile değişimi, $\beta_1 = 0,8402$, $\beta_2 = -0,7272 (\Delta T = 100^\circ C)$ $\beta_3 = -0,2767$

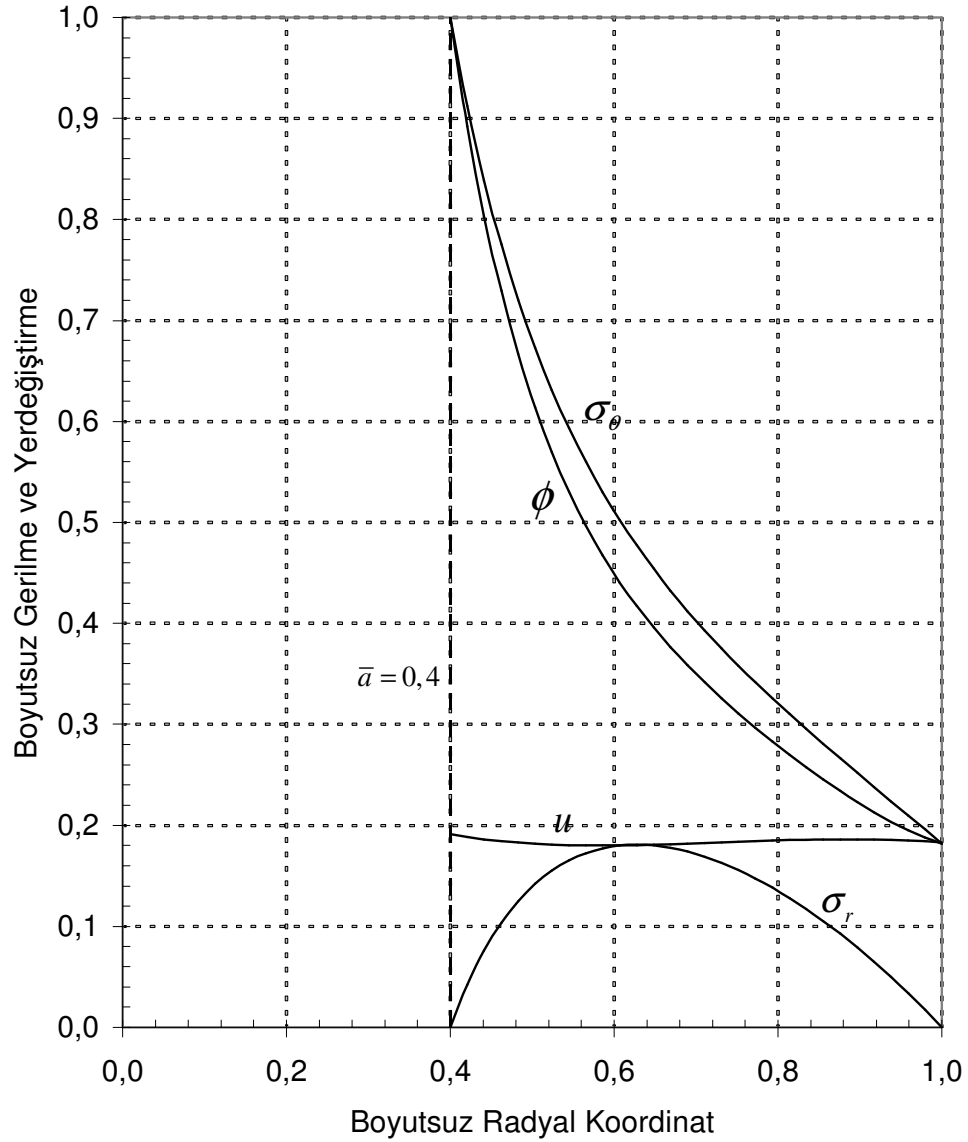
Şekil 4.18’de iç $r = \bar{a}$ da Çelik $r=1$ de WC olan FDM diskin $\beta_1 = 0,8402$, $\beta_2 = -0,7272 (\Delta T = 100^\circ C)$ $\beta_3 = -0,2767$ parametreleri için grafiği çizilmiştir. $\bar{a} = 0,1$ için $\Omega = 1,7917$, $\bar{a} = 0,2$ için $\Omega = 1,5671$, $\bar{a} = 0,3$ için $\Omega = 1,4396$ ve $\bar{a} = 0,4$ için $\Omega = 1,3471$ bulunmuştur. Çelik – WC alaşımlı FDM diskte de görülen aynı olup boyutsuz radyal koordinat attıkça kritik hız azalmaktadır.



Şekil 4.19. Çelik ile TiC esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\beta_1 = -0,7361$, $\beta_2 = 0,5395$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = 0,5015$, $\Omega = 1,00676$

Şekil 4.19 - 4.21’de ise yukarıda verilen malzemelerden yapılan disklerin iç yarıçapı $\bar{a} = 0,4$ alınarak, kritik açısal hızları hesaplanmış ve bu hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımları verilmiştir. Şekil 4.19’da çelik ve TiC alaşımlı disk için boyutsuz kritik açısal hız $\Omega = 1,00676$ olarak hesaplanmıştır.

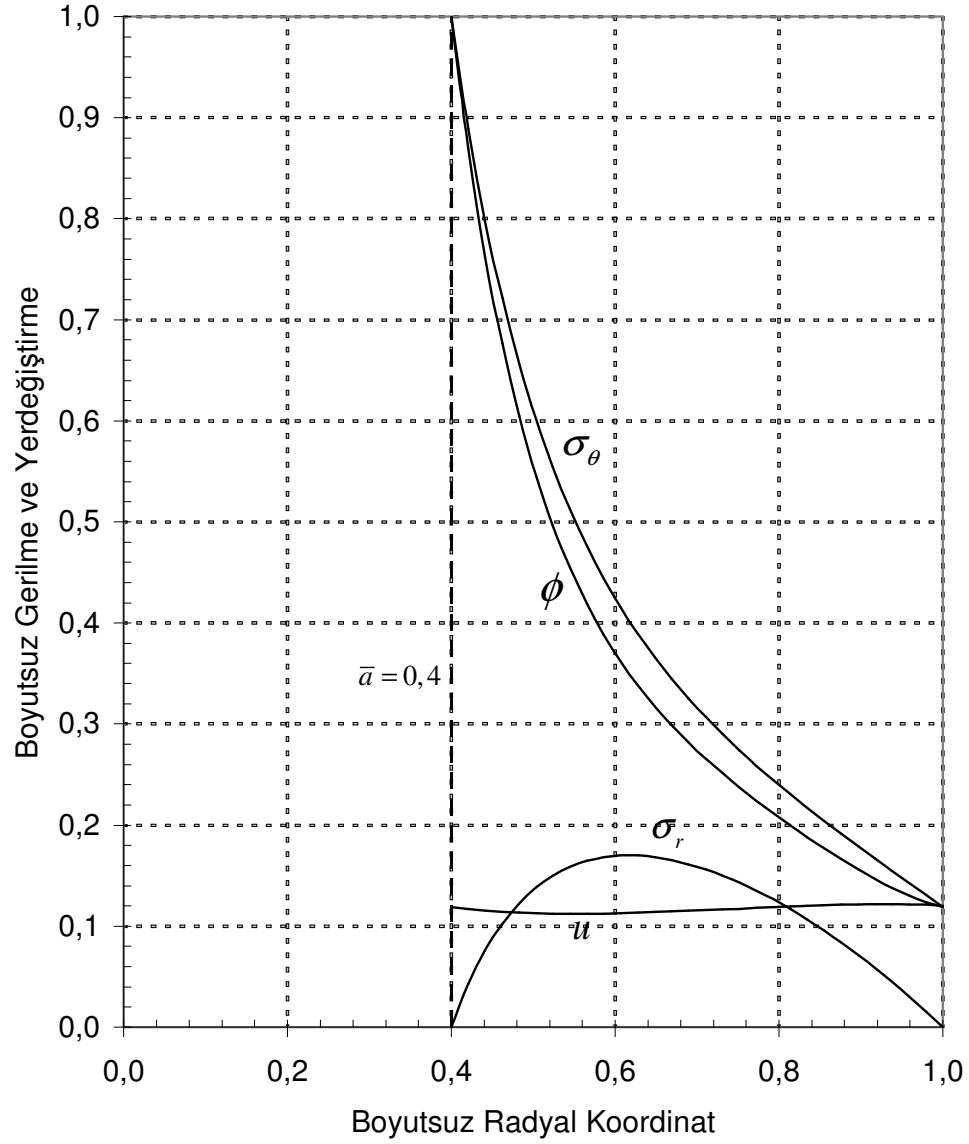
$\bar{a}=0,4$ alındığında bu malzeme özelliklerini verecek parametreler ise $\beta_1 = -0,7361$, $\beta_2 = 0,5395$ ($\Delta T = 100^\circ C$) $\beta_3 = -0,5015$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.20. Çelik ile AISi esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yer değiştirme dağılımı, $\beta_1 = -0,803817$, $\beta_2 = 0,868053$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = 0,68182$, $\Omega = 1,018946$

Şekil 4.20'de çelik ve AISi alaşımlı disk için boyutsuz kritik açısal hız $\Omega = 1,018946$ olarak hesaplanmıştır. $\bar{a} = 0,4$ alındığında bu malzeme özel-

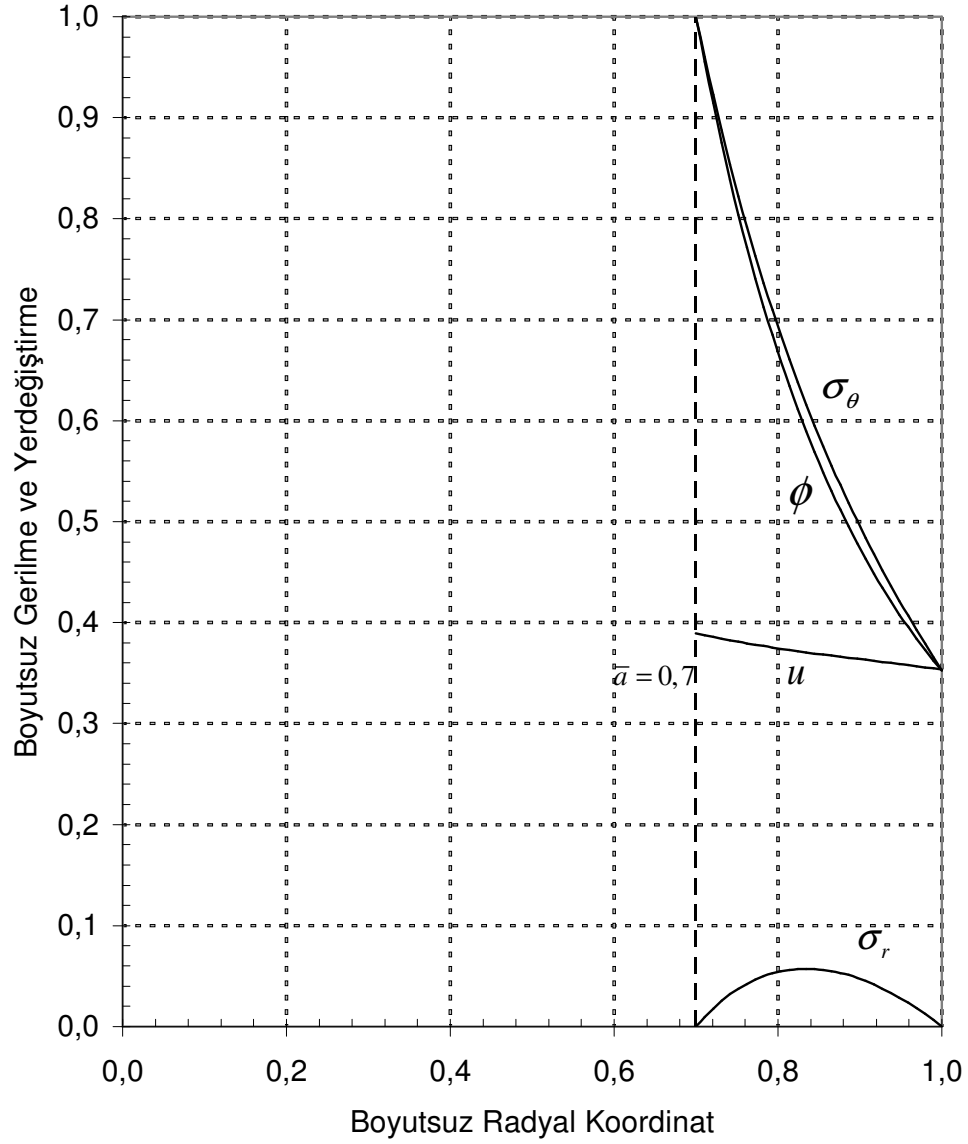
liklerini verecek parametreler ise $\beta_1 = -0,803817$, $\beta_2 = 0,868053$ ($\Delta T = 100^\circ\text{C}$), $\beta_3 = 0,68182$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.21. Çelik ile WC esaslı seramikten oluşan FDM diskte kritik açısal hızda gerilme ve yer değişirme dağılımı, $\beta_1 = -1,33338$, $\beta_2 = -0,69365$ ($\Delta T = 100^\circ\text{C}$), $\beta_3 = 0,771672$, $\Omega = 0,94317$

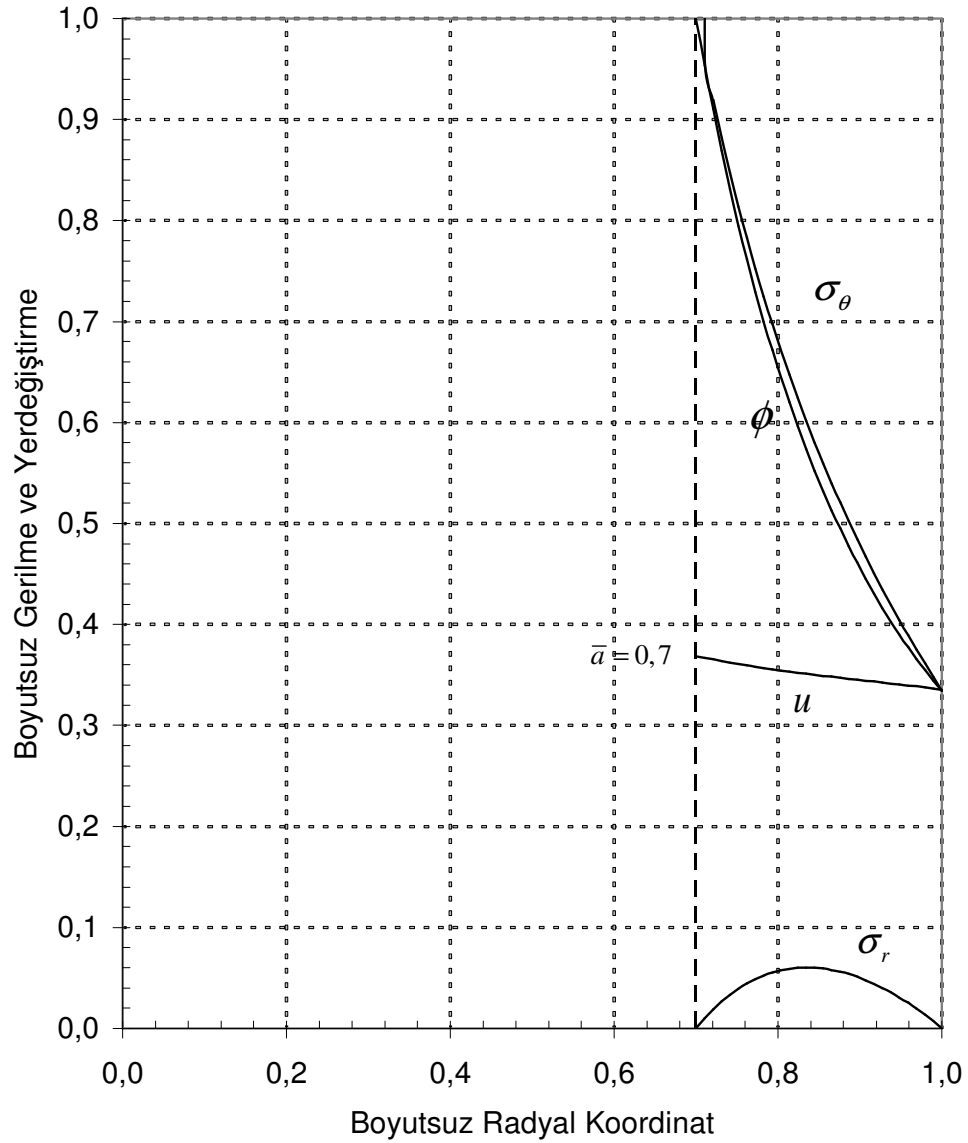
Şekil 4.21’de çelik ve WC alaşımlı disk için boyutsuz kritik açısal hız $\Omega = 0,94317$ olarak hesaplanmıştır. $\bar{a} = 0,4$ alındığında bu malzeme

özelliklerini verecek parametreler ise $\beta_1 = -1,33338, \beta_2 = -0,69365$
 $(\Delta T = 100^\circ C), \beta_3 = 0,771672$ olarak belirlenmiştir.



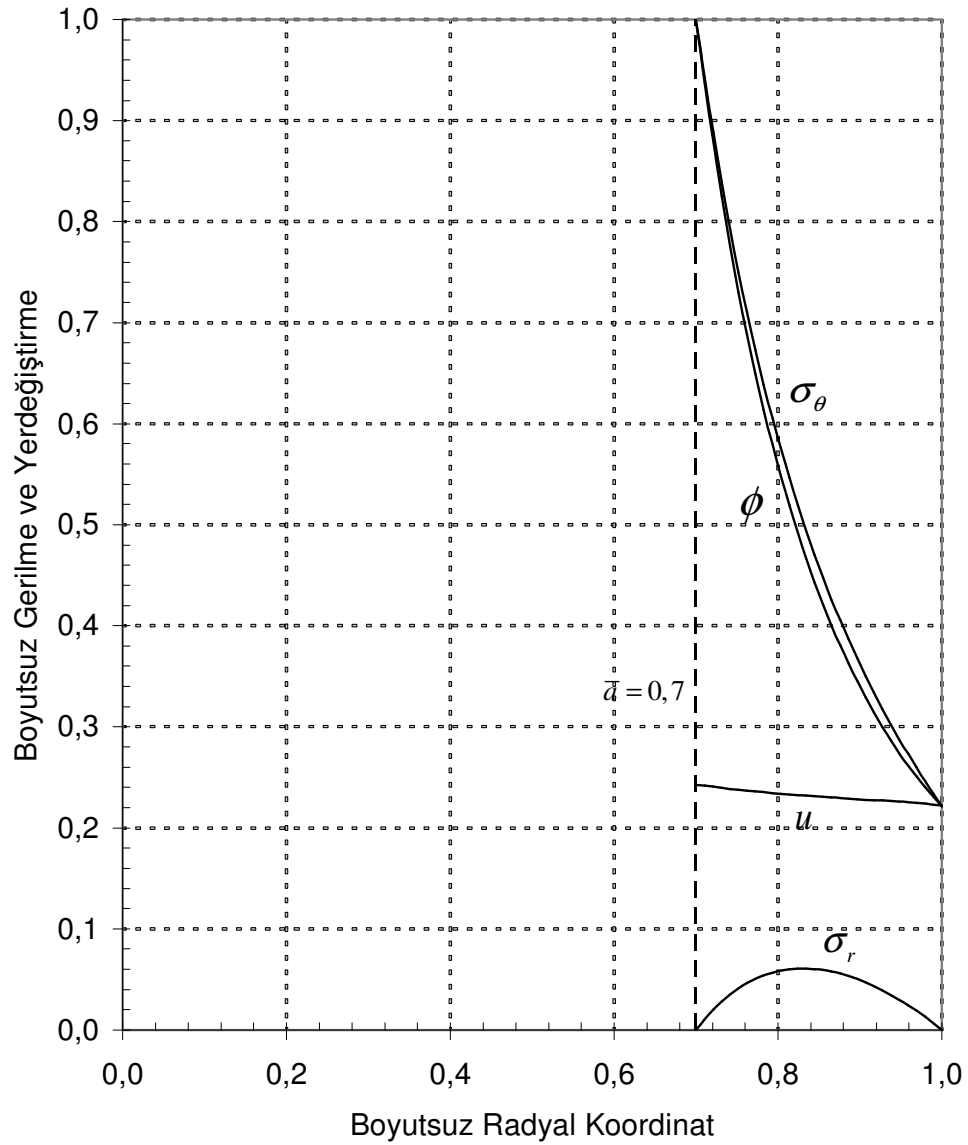
Şekil 4.22. Çelik ile TiC alaşımlı malzemeden yapılmış diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz iç yarıçapla değişimi, $\beta_1 = -2,9851$,
 $\beta_2 = -1,35291 (\Delta T = 100^\circ C)$ $\beta_3 = 1,72758$, $\Omega = 0,9959145$

Şekil 4.22’de çelik ve TiC alaşımlı disk için boyutsuz kritik açısal hız $\Omega = 1,00676$ olarak hesaplanmıştır. $\bar{a} = 0,7$ alındığında bu malzeme özelliklerini verecek parametreler ise $\beta_1 = -2,9851, \beta_2 = -1,35291$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = -0,5015$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.23. Çelik ile Al – Si alaşımlı malzemeden yapılmış diskin boyutsuz kritik hızının boyutsuz iç yarıçapla değişimi, $\beta_1 = -1,79955$, $\beta_2 = 1,94336$ ($\Delta T = 100^\circ C$) $\beta_3 = 1,52724$, $\Omega = 1,00934743$

Şekil 4.23'te çelik ve AISi alaşımlı disk için boyutsuz kritik açısal hız $\Omega = 1,018946$ olarak hesaplanmıştır. $\bar{a} = 0,7$ alındığında bu malzeme özelliklerini verecek parametreler ise $\beta_1 = -1,79955$, $\beta_2 = 1,94336$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = 1,52724$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.24. Çelik ile WC alaşımlı malzemeden yapılmış disk için boyutsuz kritik hızının boyutsuz iç yarıçapla değişimi, $\beta_1 = -1,64796$, $\beta_2 = -1,20777$ ($\Delta T = 100^\circ C$) $\beta_3 = 1,16497$, $\Omega = 0,9390923$

Şekil 4.24'de çelik ve WC alaşımlı disk için boyutsuz kritik açısal hız $\Omega = 0,94317$ olarak hesaplanmıştır. $\bar{a} = 0,7$ alındığında bu malzeme özelliklerini verecek parametreler ise $\beta_1 = -1,64796$, $\beta_2 = 1,20777$ ($\Delta T = 100^\circ C$), $\beta_3 = 1,16497$ olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Diskin içerisinde malzeme parametrelerinin radyal koordinata göre değişimini belirleyen β_1, β_2 ve β_3 değerlerinin disk içerisinde gerilme ve yer değiştirme dağılımına etkileri incelenmiştir.

Elde edilen grafiklerde diskte her durumda akmanın iç yarıçapta başladığı dikkate alındığında, FDM diskin iç tarafındaki malzemenin elastisite modülünün dış tarafındaki malzemenin elastisite modülünden yüksek seçilmesinin uygun olmadığı görülmüştür. Buna göre bu şekilde malzeme modeli veren $\beta_1 < 0$ değerlerinin seçilmesi uygun olmamaktadır.

Isıl genleşme katsayısının değişimini belirleyen β_2 parametresinin disk içindeki gerilme ve yer değiştirme dağılımına etkisinin çok küçük olduğu ve bu etkinin iç yarıçap değeri küçüldükçe ve sıcaklık büyüdükçe arttığı görülmüştür.

FDM disk içerisinde yoğunluk dağılımını belirleyen β_3 değerinin ise artırılmasıyla diskte plastik deformasyonun başladığı kritik açısal hız değerinin arttığı görülmüştür.

Boyutsuz kritik hızın boyutsuz iç yarıçap ile değişimi incelenmiş, elde edilen grafiklerde boyutsuz iç yarıçapın artması durumunda boyutsuz kritik hızın azaldığı görülmüştür.

Bu etkilerle beraber bazı örnek malzemeler ele alınarak belirlenen β değerleri kullanılarak modellenen FDM disklerle homojen malzeme özelliğindeki diskler karşılaştırıldığında belli bir açısal hızda homojen diskte akma başlarken FDM diskin halen elastik sınırlar içerisinde kaldığı ve akma için daha yüksek bir hıza çıkabileceği görülmüştür.

Bu yapılan çalışmada, diskin kalınlığı ve sıcaklık farkı sabit olarak alınmıştır. Bundan sonraki yapılacak çalışmada diskin kalınlığı ve sıcaklık farkı yarıçapın fonksiyonu olarak tanımlanarak çalışmayı genel hale getirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Timoshenko, S.P. and Gooider, J.N., "Theory of Elasticity", 3rd Edition, **McGraw Hill**, New York, 30 -110 (1970).
2. Uğural, A.C. and Fenster S. K., "Advanced Strength and Applied Elasticity", 3rd Edition, **Prentice Hall International** , London, 114-118, 339-352, (1995).
3. Gamer, U., "Tresca's Yield Condition and Rotating Solid Disk", **Journal of Applied Mathematics** , 50: 676-678 (1983).
4. Gamer, U., "Elastic – Plastic Deformation of the Rotating Solid Disk", **Ingenieur-Archiv**, 54: 345-354 (1984).
5. Gamer, U., "Stress Distribution in the Rotating Elastic-Plastic Disk", **ZAMM**, 65 (4): 136-137 (1985).
6. Güven, U., "Elastic-Plastic Stresses in a Rotating Annular Disk of Variable Thickness and Variable Density", **International Journal of Mechanical Sciences**, 34 (2): 133-138 (1992).
7. Güven, U., "Elastic-Plastic Stresses Distribution in a Rotating Hyperbolic Disk With Rijid Inclusion", **International Journal of Mechanical Sciences**, 40: 97-109 (1998).
8. You, L.H., Tang, Y.Y. and Zheng, C.Y., "Numerical Analysis of Elastic-Plastic Rotating Disks With Arbitrary Variable Thickness and Density", **International Journal of Solids and Structures**, 37: 7809-7820 (2000).
9. Eraslan, A.N. and Akis, T., "On the Plane Strain and Plane Stress Solutions of Functionally Graded Rotating Solid Shaft and Solid Disk Problems", **Acta Mechanica**, 181: 43-63 (2006).
10. Sugano, Y., Chiba, R., Hirose, K. and Takahashi, K., "Material Desing for Reduction of Thermal Stress in a Functionally Graded Material Rotating Disk", **International Journal of Mechanical Sciences**, 47 (2): 189-197 (2004).
11. Eraslan, A.N. and Akis, T., "On the Plane Strain and Plane Stress Solutions of Functionally Graded Rotating Solid Shaft and Solid Disk Problems", **Acta Mechanica**, 181: 43-63 (2006).
12. Gülgeç, M., Alagöz, H., Kolonez, A., "Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler Ve Kullanım Alanları", **Mühendis ve Makina**, 45 (532): 39-45 (2004)

13. Kolonez, A., Alagöz, H., Topal, S., Gülgeç, M., “Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemelerin Üretim Teknikleri Ve Kullanım Alanları”, **Mühendis ve Makina**, 46 (547): 32-45 (2004)
14. You, L.H., Tang, Y.Y., Zhang, J.J. and Zheng, C.Y., “Numerical Analysis of Elastic-Plastic Rotating Disks With Arbitrary Variable Thickness and Density”, **International Journal of Solids and Structures**, 37: 7809-7820 (2000).
15. Alexander Mendelson, “Plasticity: Theory and Application” **The Macmillan Company**, New York, Collier-Macmillan Limited, London:70-77, 100-108 (1968)
16. Abramowitz, M. and Stegun A.I. (Eds.), “Handbook of Mathematical Functions.”, 5th ed, **US Government Printing Office**, Washington D.C, 42- 118 (1996).
17. Özdemir, Ö., İpek, M. ve Zeytin, S., “Kesici Takım Malzemeleri”, **Mühendis ve Makina**, 41(487): 22-31 (2000).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KÖSEDAĞ, Alperen
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 17.08.1976 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (532) 620 36 40
 e-mail : alperenk@hotmail.com

Eğitim Derece

Eğitim Birimi

Mezuniyet tarihi

Lisans	Gazi Üniversitesi/ Makina Müh. Bölümü	2000
Lise	Ordu Anadolu Lisesi	1994

İş Deneyimi Yıl

Yer

Görev

2005	Erkunt Tarım Mak.San.A.Ş.	Metot Mühendisi
2005	Skoda And Otomotiv	Servis Müdürü
2004	Intercity Rent a Car	Servis Müdürü
2003	Nissan An Otomotiv	Servis Müdürü
2002	Grup Volvo	Servis Danışmanı

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

İnternet , Basketbol , Sinema