

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

**TERMAL BARIYER KAPLI GAZ TÜRBİN  
KANATLARINDA ÇALIŞMA ESNASINDA OLUŞAN  
GERİLMELERİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mak. Yük. Müh. Yaşar KAHRAMAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : MAKİNA TASARIM VE İMALAT**

**Tez Danışmanı : Doç. Dr. İmdat TAYMAZ**

**Ağustos 2011**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


TERMAL BARIYER KAPLI GAZ TÜRBİNİ  
KANATLARINDA ÇALIŞMA ESNASINDA OLUŞAN  
GERİLMELERİN MODELLENMESİ VE ANALİZİ


DOKTORA TEZİ


Makine. Y. Müh. Yaşar KAHRAMAN


Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

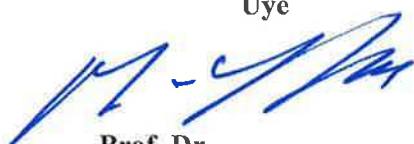
Bu tez 19 / 08 /2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Doç. Dr.  
İmdat TAYMAZ  
Jüri Başkanı

  
Prof. Dr.  
H. Rıza GÜVEN  
Üye

  
Prof. Dr.  
Fethi HALICI  
Üye

  
Prof. Dr.  
Fatih ÜSTEL  
Üye

  
Prof. Dr.  
Muharrem YILMAZ  
Üye

## TEŞEKKÜR

Doktora süreci boyunca başta danışman hocam, Sayın Doç. Dr. İmdat TAYMAZ ve ortak danışman gibi çalışmalarını beraber yürüttüğüm sayın Prof. Dr. Fatih ÜSTEL' e akademik çalışmalarında ve doktora tez sürecinde bana desteklerini esirgemediği için minnettarlığımı sunarım. Doktora tez izleme komitesinde bulunan hocam, Sayın Prof. Dr. Fethi HALICI' ya, tez çalışmamdaki eksik noktaların belirlenmesi ve düzeltilmesi sürecinde göstermiş oldukları destek ve ilgiden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Geliştirmiş olduğu çatlak ilerleme programı FCPAS' ı kullanma izni verdiği için sayın Doç. Dr. Ali Osman AYHAN' a ve program ile ilgili destek aldığım sevgili Mahmut USLU ve Cihan KURTİŞ' e teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarında bana yardımcı olan Garip ERDOĞAN, Savaş ÖZTÜRK ve Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama merkezi çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Mesai arkadaşlarım –Sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim Kutay YILAZÇOBAN Sayın Yrd. Doç. Dr Cemil YİĞİT'e, Sayın Erman ASLAN' a Sayın Sedat İRİÇ ve Sayın Ufuk DURMAZ'a tez çalışması süreci boyunca yapmış oldukları katkılardan dolayı teşekkürü bir borç bilirim.

Her koşul altında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen ve her zaman yanımda olan aileme ve tez dönemi boyunca gösterdikleri sabırdan dolayı eşim ve çocuklarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xiv
ÖZET .....	xv
SUMMARY .....	xvi

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ .....	2
1.1. Giriş .....	2
1.2. Termal Bariyer Kaplama Sistemi .....	5
1.3. Termal Bariyer Kaplamaların Gelişimi Süreci .....	7
1.4. Termal Bariyer Kaplama Malzemeleri .....	8
1.5. Termal Bariyer Kaplamaların İşlevi .....	11
1.6. Gaz Türbinlerinde Kullanılan Termal Bariyer Kaplamalar.....	13
1.7. Termal Bariyer Kaplamaların Üretim Yöntemleri .....	15
1.8. Termal Bariyer Kaplamalarda Termal Şok .....	15
1.9. Termal Bariyer Kaplamalarda Termal Şok Testleri .....	17
1.9.1. Su verme termal şok testi.....	19
1.9.2. Brülör ısıtma termal şok testi.....	20
1.9.3. Lazer ışını ile termal şok testi .....	22
1.10. Termal Bariyer Kaplamalarda Hasar Mekanizması .....	22
1.11. Termal Bariyer Kaplamalarda Hasar Tipleri .....	24
1.12. Kırılma Mekanizması .....	27
1.13. Kırılma Modelleri .....	29
1.13.1. Çatlak Açılma Deformasyon Tipi (Mode I) .....	29
1.13.2. Çatlak Kayma Deformasyon Tipi (Mode II) .....	29
1.13.3. Çatlak Yırtılma Deformasyon Tipi (Mode III) .....	30

1.14. Gerilme Şiddet Faktörü (K) ve Elde Etme Metotları .....	30
1.14.1. Teorik Metotlar .....	33
1.14.2. Nümerik Metodlar.....	33

## BÖLÜM 2.

MODELLEME VE ANALİZLER.....	38
2.1. Giriş .....	38
2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	38
2.3. Isı Transferi .....	42
2.4. Fourier Kanunu.....	42
2.5. Sonlu Eleman Analizleri.....	53
2.5.1. Eleman tipi .....	60
2.5.2. Malzeme modelleri .....	61
2.6. FCPAS Programı .....	64
2.7. FCPAS Programında Çatlak İlerleme Analizi.....	65
2.8. Çatlak İlerleme Modeli.....	66
2.9. Deney Numunesi ve Türbin Kanadının CAD Modellerinin Oluşturulması...	67
2.10. Türbin Kanatçığı Sonlu Eleman Analiz Modellerinin Oluşturulması.....	68

## BÖLÜM 3.

DENEYSEL ÇALIŞMA .....	72
3.1. Giriş .....	72
3.2. Kullanılan Malzeme ve Numune Hazırlama .....	72
3.3. Termal Şok Testi .....	73
3.4. Termal Şok Test Düzenegi .....	74
3.5. 1 Numaralı numuneye ait sonuçlar.....	77
3.6. 2 Numaralı numuneye ait sonuçlar.....	80
3.7. 3 Numaralı numuneye ait sonuçlar.....	82
3.8. 4 Numaralı numuneye ait sonuçlar.....	84
3.9. Beş (5) Numaralı Numuneye Ait Sonuçlar .....	86
3.10. Çatlak Profili Oluşturma.....	87

## BÖLÜM 4.

ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA .....	91
4.1. Giriş .....	91
4.2. Analizler .....	91
4.2.1. Deneysel ve analitik analiz sonuçlarının karşılaştırılması.....	91
4.3. Deney Numunesine Ait Analiz Sonuçları .....	94
4.4. Üç Farklı TBK' ya Ait Analiz Sonuçlarının Kıyaslanması.....	96
4.5. Türbin Kanatçığına Ait Analiz Sonuçları.....	97
4.6. Çatlak İlerleme Analizi.....	111
4.7. Çatlak Profili Oluşturma.....	112
4.8. Gerilme Şiddet Faktörü ve Ömür Tahmini.....	116

## BÖLÜM 5.

SONUÇ VE ÖNERİLER .....	120
5.1. Sonuçlar .....	120
5.2. Öneriler .....	122
KAYNAKLAR .....	125
ÖZGEÇMİŞ .....	132

## SİMGELER VE KISALTMALAR

A	:	Alan
E	:	Young (Elastisite) modülü
$E_{abs}$	:	Yapının plastik deformasyonu ile absorbe edilen enerji
$E_p$	:	Plastik pekleşme modülü
$E_t$	:	Tanjant modülü
$f_i, f_j$	:	Düğümlerdeki kuvvetler
F	:	Kuvvet
G	:	Kayma modülü
i, j	:	İki düğüm noktası
n	:	Pekleşme üsteli
SEM	:	Scanning Electron Microscope – Taramalı Elektron
Mikroskobu		
TBK	:	Termal Bariyer Kaplama
YSZ Oksit	:	İtriyum Oksit ile Kısmen Kararlı Hale Getirilmiş Zirkonyum
t	:	Zaman
$u_i, u_j$	:	Düğümelerin yer değiştirmeleri
x	:	Yer değiştirme miktarı
$\alpha$	:	Isıl genleşme katsayısı
$\beta$	:	Pekleşme parametresi
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	:	Kayma deformasyonları (zorlanmaları)
$\Delta$	:	Yer değişimi
$\Delta l$	:	Boydaki değişim
$\varepsilon$	:	Zorlanma
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	:	Normal deformasyonlar(zorlanmalar)
$\varepsilon_{eff}^p$	:	Efektif plastik zorlanma (plastik şekil değişim hızı)
$\theta$	:	Salınım açısı (derece)
$\nu$	:	Poisson oranı

$\rho$	:	Yoğunluk
$\sigma$	:	Gerilme
$\sigma_a$	:	Akma gerilme değeri
$\sigma_0$	:	Başlangıçtaki akma gerilmesi
$\sigma_{maks}$	:	Maksimum çekme gerilmesi
$M_x, M_y, M_{xy}$	:	Momentler
$p(x, y)$	:	Dış kuvvetler
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	:	Normal gerilmeler
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	:	Kayma gerilmeleri
$u, v, w$	:	x, y, z koordinat bileşenleri
$I$	:	Atalet momenti
$K_t$	:	Gerilme yığılma katsayısı
$\sigma_{max}$	:	Parçada oluşan maksimum gerilme
$\sigma_{ort}$	:	Parçada oluşan ortalama gerilme
$K$	:	Gerilme şiddet faktörü
$\beta$	:	Parça geometrisine bağlı sabit bir katsayı
$\sigma$	:	Parçaya uygulanan gerilme
$a$	:	Çatlak yarı uzunluğu
$C$	:	Çatlağı saran herhangi bir yön
$W$	:	Genleme enerjisi yoğunluğu
$T$	:	C boyunca n normali doğrultusunda oluşan çekme vektörü
$U$	:	Şekil değişimi vektörü



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Malzemelerin sıcaklık performansındaki gelişim [4,31] .....	3
Şekil 1.2. Gaz türbinli bit uçak motoru [13] .....	4
Şekil 1.3. Örnek bir TBK mikro yapısı [90] .....	6
Şekil 1.4. Soğutma kanallı bir türbin kanatçığı [35] .....	13
Şekil 1.5. Bir gaz türbin kanatçığı ve üzerine uygulanmış termal bariyer kaplama kesiti [32] .....	14
Şekil 1.6. Farklı termal sok koşulları altında gerilmelerin gelişimi [21] .....	16
Şekil 1.7 Bir gaz türbininin şematik gösterimi ve bölgelere göre basınç ve sıcaklık değişimi [33] .....	17
Şekil 1.8. Gaz türbin motorlarının çalışma şartları .....	18
Şekil 1.9. Brülör ısıtma termal sok deneyi düzeneği şematik gösterimi .....	21
Şekil 1.10 .Termal bariyer kaplamalarda rastlanan tipik bir servis hasarı [27] .....	23
Şekil 1.11. Kullanım öncesi ve kullanım sonrası kanatçıktaki TBK görüntüsü .....	24
Şekil 1.12.TBK’da rastlanan hasar tipi .....	24
Şekil 1.13. Termal sok testleri sonucu tespit edilen hasar tipleri [20] .....	25
Şekil 1.14 . Fırın testi (a) 90 çevrim sonundaki kaplama delaminasyonu (b) 300 çevrim sonunda tamamen delaminasyon [55].....	26
Şekil 1.15. Brülör testi sonrası üst tabaka /alt tabaka arasında oluşmuş ara yüzey çatlakları [55] .....	26
Şekil 1.16. Brülör testi sonunda alev alanı dışında oluşmuş dikey çatlaklar .....	27
Şekil 1.17. Kırılma Modelleri a) Mod I tipi b) Mod II tipi c) Mod III tipi .....	30
Şekil 1.18. Üniform Gerilme Yüğü Altındaki Eliptik Delik İçeren Bir Plaka[95] ....	31
Şekil 1.19. İntegral Konturu .....	35
Şekil 1.20. Çatlak Ucu $C$ ve $C'$ Konturları .....	35
Şekil 2.1. Otomobil arka dingilinin sonlu eleman modeli .....	40
Şekil 2.2. Doğrusal sonlu elemanlara ayrılmış 1 boyutlu cisim.....	41
Şekil 2.3. Dörtgen sonlu elemanlara ayrılmış 2 boyutlu cisim .....	41

Şekil 2.4. Dikdörtgen prizma elemanlara ayrılmış 3 boyutlu cisim.....	41
Şekil 2.5. Kütle kuvvetleri, yüzey kuvvetleri ve tekil kuvvetler altındaki çubuğun sonlu elemanlar modeli. ....	48
Şekil 2.6. Yay elemanı[80].....	49
Şekil 2.7. Lineer ve lineer olmayan durumlar için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi.....	50
Şekil 2.8 Yüzeylerdeki gerilme durumu .....	51
Şekil 2.9. Solid-90 ve Solid 186 eleman tipi [88] .....	61
Şekil 2.10. Çatlak ilerleme genel işlem şeması.....	66
Şekil 2.11. Türbin kanatçığı CAD modeli .....	67
Şekil 2.12. Türbin kanatçığının hazırlanmış sonlu elmanlar modeli .....	69
Şekil 2.13. Soğutma kanalları açılmış türbin kanatçığının sonlu elemanlar modeli..	69
Şekil 2.14. Deney numunesinin sonlu elemanlar modeli.....	70
Şekil 3.1. Numunenin teknik resmi ve kaplama öncesi görüntüsü .....	72
Şekil 3.2. Kaplanmış bir numune .....	72
Şekil 3.3. Termal şok testi şematik gösterimi .....	73
Şekil 3.4. Termal şok test düzeneği .....	74
Şekil 3.5. Deney çalışma sırasında numune görüntüsü.....	75
Şekil 3.6. Deney numunesinin A Termal şok öncesi, B 50 çevrim, C 100 çevrim, D 150 çevrim, E 200 çevrim sonrası görüntüsü.....	77
Şekil 3.7. 1 Nolu deney numunesinin 50 çevrim 100 çevrim, 150 çevrim 200 çevrim sonundaki optik mikroskop yüzey görüntüleri.....	78
Şekil 3.8. Deney numunesinin 0 çevrim 100 çevrim ve 200 çevrim sonundaki elektron mikroskobundaki yüzey görüntüleri .....	79
Şekil 3.9. 1 numaralı deney numunesinin 200 çevrim sonundaki elektron mikroskobundaki kesit görüntüsü .....	80
Şekil 3.10. 2 Numaralı deney numunesinin A 300Çevrim, B 400 çevrim, C 500 çevrim, sonrası görüntüsü .....	80
Şekil 3.11 Deney numunesinin 300 çevrim 400 çevrim, 500 çevrim sonundaki optik mikroskop yüzey görüntüleri .....	81
Şekil 3.12. 2. Numaralı deney numunesinin 500 çevrim sonundaki elektron mikroskobundaki (SEM) kesit görüntüsü .....	81
Şekil 3.13. Deney numunesinin 540 çevrim sonundaki görüntüsü.....	82
Şekil 3.14. Numunenin 600 (A), 100 (B), 1200 (C) ve 1500 (D) çevrim sonundaki görüntüleri.....	83

Şekil 3.15. 1500 çevrim sonundaki çatlak uzunluğunun SEM görüntüsü .....	84
Şekil 3.16. Deney numunesinin 1750 çevrim sonundaki üst yüzey görüntüsü (A) , optik mikroskopta 50 x te çekilmiş (B) ve SEM de 500x te çekilmiş (C) görüntüsü	84
Şekil 3.17. kesiti alınmış numunenin SEM görüntüsü .....	85
Şekil 3.18. Numunedeki 1750 çevrim sonunda üst kaplamada oluşan dikey çatlak..	85
Şekil 3.19. Deney numunesinin 2000 çevrim sonundaki optik mikroskopta çekilmiş merkez ve kenar görüntüsü .....	86
Şekil 3.20. Numunenin 2000 çevrim sonunda oluşan çatlak görüntüsü .....	86
Şekil 3.21. Numunelerin dilimlenmiş görüntüsü .....	87
Şekil 3.22. Dört numaralı numunenin orta eksendeki çatlak uzunluğu. ....	88
Şekil 3.23. Dört numaralı numunenin orta eksen den 1 mm kesildikten sonraki çatlak uzunluğu .....	88
Şekil 3.24. Dört numaralı numunenin orta eksen den 2 mm kesildikten sonraki çatlak uzunluğu .....	89
Şekil 3.25. deneyler sonunda elde edilen çatlak profili .....	89
Şekil 4.1. Deneysel ve Analiz sonuçlarından elde edilen ön ve arka yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi .....	91
Şekil 4.2. YSZ Kaplama, bağ tabaka ve altlığın sonlu elemanlar modelindeki ölçüleri.....	91
Şekil 4.3. YSZ kaplamaya ait 300 saniye sonundaki sıcaklık dağılımları .....	91
Şekil 4.4. YSZ TBK' daki mesafeye bağlı sıcaklık değişim grafiği .....	92
Şekil 4.5. Kaplamadaki mesafeye bağlı sıcaklık değişim grafiği .....	92
Şekil 4.6. 300 saniye sonundaki Von- Mises eşdeğer gerilme durumu .....	93
Şekil 4.7. YSZ Kaplamadaki mesafeye göre Von- Mises eşdeğer gerilme grafiği....	93
Şekil 4.8. Süper alaşım altlı üzerine YSZ TBK' daki zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği .....	94
Şekil 4.9. Süper alaşım altlı üzerine Mullit TBK' daki zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği .....	95
Şekil 4.10. Süper alaşım altlı üzerine Mullit+ YSZ TBK' daki zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği .....	95
Şekil 4.11. YSZ, Mullit ve YSZ+Mullit TBK' larda ulaşılan en yüksek sıcaklıklar..	96
Şekil 4.12. YSZ TBK' daki kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık değişim grafiği.....	96
Şekil 4.13. YSZ, Mullit ve %40YSZ-%60 Mullit için kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık değişim grafiği .....	97

Şekil 4.14. Soğutma kanalları açılmış kanatçığın mesh görüntüsü.....	97
Şekil 4.15. YSZ TBK' lı kanatçığın 300. Saniyedeki sıcaklık dağılımı .....	98
Şekil 4.16. YSZ TBK'lı kanatçıktaki zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği.....	98
Şekil 4.17. YSZ TBK lı kanatçığın 300. Saniyedeki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı .....	99
Şekil 4.18. YSZ TBK lı kanatçığın Von Misses eşdeğer gerilme dağılım grafiği.....	99
Şekil 4.19. YSZ TBK'lı kanatçığın 300. Saniye sonundaki XY kayma gerilme dağılımı .....	100
Şekil 4.20. YSZ TBK'lı kanatçığın mesafeye bağlı XYkayma gerilme grafiği .....	100
Şekil 4.21. YSZ TBK lı kanatçığın 300. Saniyedeki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı .....	101
Şekil 4.22. YSZ TBK lı kanatçığın Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı dağılım grafiği .....	101
Şekil 4.23. Mullit TBK'lı Türbin kanatçığının 300. Saniye sonundaki sıcaklık dağılımı .....	102
Şekil 4.24. Mullit TBK lı Türbin kanatçığın sıcaklık dağılımı grafiği .....	102
Şekil 4.25. Mullit TBK lı kanatçığın Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı.....	103
Şekil 4.26. Mullit TBK lı kanatçığın Von Misses eşdeğer gerilme grafiği.....	103
Şekil 4.27. %60Mullit-%40YSZ TBK'lı Türbin kanatçığının 300. Saniye sonundaki sıcaklık dağılımı .....	104
Şekil 4.28. %60 Mullite-%40 YSZ TBK lı kanatçığın 300. Saniyedeki sıcaklık dağılımı grafiği.....	104
Şekil 4.29. %60Mullit-%40YSZ TBK'lı Türbin kanatçığının 300. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı .....	105
Şekil 4.30. %60Mullit-%40YSZ TBK'lı Türbin kanatçığının Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı grafiği.....	105
Şekil 4.31. YSZ ve Mullit kaplamalardaki 10. Saniye sonundaki Sıcaklık Dağılımı .....	106
Şekil 4.32. YSZ ve Mullit kaplamalardaki 10. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı .....	106
Şekil 4.33. YSZve Mullit kaplamalardaki 10. Saniye sonundaki xy kayma gerilme dağılımı .....	106
Şekil 4.34. YSZ ve Mullit kaplamalardaki 10. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı.....	107

Şekil 4.35. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 20. saniye sonundaki sıcaklık dağılımı .....	107
Şekil 4.36. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 20. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılım .....	107
Şekil 4.37. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 20. saniye sonundaki xy kayma gerilme dağılımı .....	108
Şekil 4.38. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 20. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı .....	108
Şekil 4.39. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 40. saniye sonundaki sıcaklık dağılımı .....	108
Şekil 4.40. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 40. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı .....	109
Şekil 4.41. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 40. saniye sonundaki xy kayma gerilme dağılımı .....	109
Şekil 4.42. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 40. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı .....	109
Şekil 4.43. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 340. Sıcaklık dağılımı .....	110
Şekil 4.44. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 340. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı .....	110
Şekil 4.45. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 340. saniye sonundaki xy kayma gerilme dağılımı .....	110
Şekil 4.46. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 340. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı .....	111
Şekil 4.47. Çatlak ilerleme profili .....	112
Şekil 4.48. Nümerik olarak hesaplanan çatlak profili .....	115
Şekil 4.49. Deneysel olarak elde edilen ile nümerik olarak hesaplanan çatlak profilleri.....	115
Şekil 4.50. YSZ Kaplama için Gerilme şiddet Faktörü .....	116
Şekil 4.51. YSZ Kaplama için ömür tahmini .....	117
Şekil 4.52. Deneysel ve nümerik olarak elde edilen çevrim sayısına bağlı- çatlak uzunluğu grafiği .....	117
Şekil 4.53. Mullite Kaplama için hesaplanan ömür tahmin grafiği .....	118
Şekil 4.54. %60Mullit-%40YSZ Kaplama için ömür tahmini .....	119

Şekil 4.55. Üç kaplama malzemesinin ömür tahmin hesaplamalarının kıyas grafiği  
..... 119

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1. Türbin kanatçığının sonlu eleman modellerindeki eleman ve düğüm sayıları .....	69
Tablo 3.1. Kaplama parametreleri.....	72
Tablo 3.2. AISI 316 paslanmaz çelik özellikleri[76] .....	76
Tablo 3.3. Nikel bazlı süper alaşım altlık fiziksel özellikleri .....	76
Tablo 3.4. NiCrAlY özellikleri[76,77].....	76
Tablo 3.5 YSZ özellikleri[76,77] .....	77

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Termal Bariyer Kaplama(TBK), Türbin Kanatçığı, Termal Gerilme, Sonlu Elemanlar Metodu

Bu çalışmada, uçaklarda kullanılan gaz türbinli motorların türbin kanatçıklarına uygulanan bir termal bariyer kaplama sisteminin termal şok davranışı incelenmiştir. Bir termal bariyer kaplama sisteminin termal şok davranışı deneysel olarak incelenmiş ve bulgular ışığında bilgisayar destekli analizi gerçekleştirilmiştir. Termal bariyer kaplama sistemi, paslanmaz çelik altlıktan, itriyum oksit ile kısmen kararlı hale getirilmiş zirkonyum oksitten (YSZ) oluşan bir seramik üst tabakadan ve NiCrAlY metalik bağ tabakadan meydana gelmektedir. Her iki tabakada plazma sprey yöntemiyle uygulanmıştır. Numunelerde oluşan hasarlar, çevrim sayısı, termal gerilmeler ve ısıtma sürecinde geçen zaman açısından incelenmiştir. Deneysel bulgular ışığında modellenen TBK' nın gerilme analizleri gerçekleştirilmiş ve oluşan çatlakların profilleri ve çatlak ilerleme oranı hesaplanarak kaplama için ömür tayini yapılmıştır.



# **DURING THE STUDY OF THERMAL BARRIER COATED WINGS STRESSES MODELING AND ANALYSIS OF GAS TURBINE**

## **SUMMARY**

Keywords: Thermal Barrier Coating (TBC), Turbine Blade, Thermal Stress, Finite Element Method.

In this study, thermal shock behavior of the thermal barrier coating system of gas turbine engine's turbine blade of the planes is evaluated. Thermal shock behavior of the thermal barrier coating system was investigated and computer aided analysis was carried out with the help of the taken information. Thermal barrier coating system consists of stainless steel substrate, yttria stabilized zirconia ceramic top coat and NiCrAlY bond coat. Plasma spray method was used for the coatings. Damages occurred in specimens were figured out by the cycle numbers, thermal stresses and heating time. With the help of experiments, modeled TBC's stress analyzes were performed and crack profiles and crack growth rates determined. Finally the coating life was appointed.

# **BÖLÜM 1. GİRİŞ**

## **1.1. Giriş**

Teknolojinin mühendislik alanlarında hızla ilerlemesi sonucu, makine yapı elemanları ve malzemeleri devamlı artan talepleri karşılamak durumunda kalmaktadır. Malzemelerin üretiminde kullanılan hammadde rezervlerin azalması ve malzemelerin fiyatlarındaki artış, kullanımı önemli ölçüde sınırlamaktadır. [1]

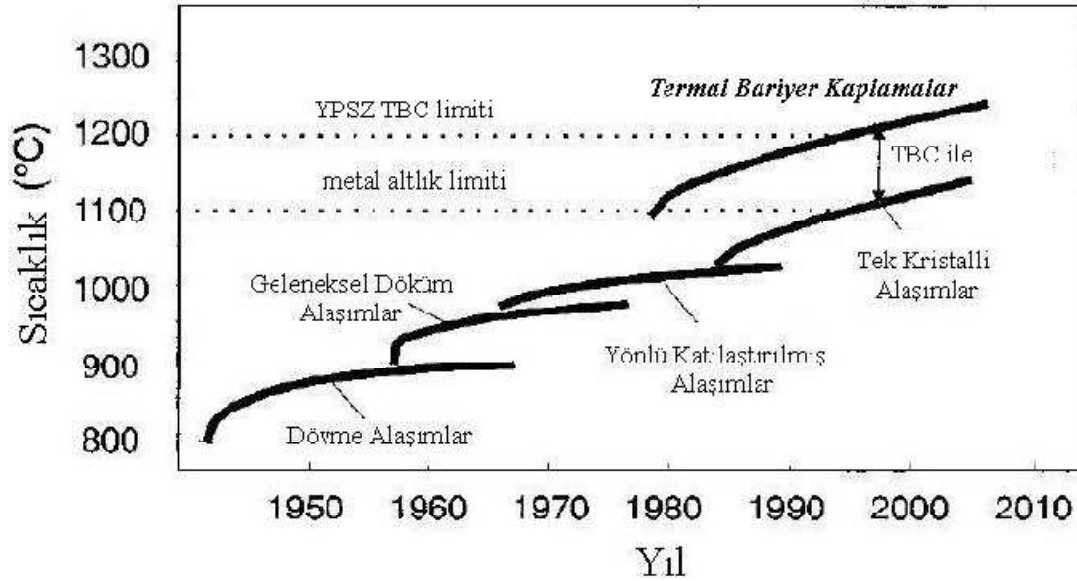
Günümüzde metal ve alaşımlarının, yüksek sıcaklık, korozyon, aşınma gibi çalışma şartlarında arzu edilen özelliklerin sağlanamadığı durumlarda, metallerin korozyona, yüksek sıcaklık oksidasyonuna ve aşınmaya karşı dirençlerinin artırılması seramik kaplamalarla gerçekleştirilmektedir. Kullanım amacına göre bir ya da birden çok katmandan oluşan bu kaplamalar Termal Bariyer Kaplama (TBK) olarak adlandırılırlar.

Bir uçağın rekabet edebilirliğini doğrulamak tek bir parametreyle mümkün değildir. Bununla birlikte direkt İşletme gideri'nin, belirli bir uçak tipinin potansiyelini göstermede kullanışlı bir araç olduğu yaygın bir şekilde kabul görmektedir. Bir uçak motoru üreticisi için direkt işletme giderlerini düşürmenin temel yolu ağırlık, sürüklenme ve özgül yakıt tüketimini düşürerek yakıt sarfiyatını kontrol etmektir. Yeni bir motor için özgül yakıt tüketiminde %2-3'lük bir iyileştirme ve %5'lik bir ağırlık azalımı gerçekçi bir tablodur [2].

Özellikle ticari motorlarda güvenilirlik ve sağlamlık kilit üretim karakteristikleri haline gelmiştir. Geniş gövdeli ticari uçaklarda eğilim; Boeing 767, Airbus 310, Airbus 320, Boeing 777'de olduğu gibi çift motorlu tasarımlardır. Bu uçaklar deniz üzerinde uzun mesafeli rotalarda uçtuklarından yüksek bir motor güvenilirliğine ihtiyaç vardır. Amerikan Federal Havacılık Ajansı (FAA) ve Avrupa Havacılık

Otoriteleri Birliği (JAA) bu tür motorlarda, uçak/motor kombinasyonu sertifikasyonu için katı ölçütlere sahiptir. Bu sınıflama Genişletilmiş Çift Motorlu Operasyonlar (ETOPS: Extended Twin-Engine Operations) olarak adlandırılmaktadır. ETOPS sınıflaması dakika cinsinden yapılır ve daha yüksek ETOPS sınıfları, toplam uçuşun deniz üzerinde yapılan kısmının daha uzun olmasını sağlar. Bu, ticari bir havayolu için çok önemli olan toplam yakıt giderlerini ve uçuş süresini etkiler [3]. Sağlamlık, özellikle türbin kısmında, bir motorun bakım için sökülmeden önce hizmette kaldığı süreyi belirtir. Son 30 yılda uçak motorlarının sağlamlığı önemli bir şekilde gelişmiştir. Geliştirilmiş sağlamlık; işletme açısından önemli olan, uçaktan daha iyi faydalanma ve daha düşük işletme giderleri anlamına gelmektedir. Boeing 707 1950'de ilk hizmete girdiğinde motorlar, 500 saatlik bir çalışmadan sonra bakım için sökülüyordu. Sökümü gerektiren en büyük etken yüksek basınç türbini (HPT)'nin performansındaki bozulmaydı. Günümüzde Boeing 747 sınıfı bir motor 20000 saatten fazla uçakta kalmaktadır. Bu çarpıcı gelişme kısmen daha sağlam tasarımlara ve kısmen de daha iyi malzemelere bağlıdır. Yakıt ekonomisini iyileştirmek için motor çalışma sıcaklıklarının son derece yükseldiği göz önünde bulundurulduğunda, daha iyi malzemelerin etkisi daha açık bir hal almaktadır [3]. Uçak motorlarının yüksek basınç türbin paleleri (blade) ve kanatçıkları (vane) en yüksek gerilmelere maruz kalan parçalardır. Nikel bazlı süper alaşımlardan yapılan dâhili olarak soğutulan profiller yaklaşık 1000°C'de çalışmakta ve kısa sürelerde alaşımın ergime noktasının %90'ı olan 1100°C'ye maruz kalmaktadır [2,4-6]. Bu sıcaklıklara ancak çok karmaşık soğutma sistemleri sayesinde ulaşılmaktadır. Fakat bu soğutma sistemi tarafından ısı enerjisi 1MW/m<sup>2</sup> oranında profillerden çekilmekte, bu da motorun toplam yakıt verimini azaltmaktadır [2]. Malzeme sıcaklığının hassas bir şekilde kontrol edilmesinin gereksinimi basit bir kuralla açıklanabilir. Sıcaklıktaki her 10-15°C'lik bir artış kanatçığın sürünme ömrünü yarıya indirmektedir [2,4]. Günümüzde türbin giriş sıcaklıkları (TIT) 1400°C'yi geçmektedir [2,7]. Fakat hedeflenen gelişmeler daha yüksek türbin giriş sıcaklıkları gerektirir. Gelecekte türbin giriş sıcaklıklarının 1600°C'yi aşması beklenmektedir [7-11]. Bu yüksek sıcaklıklara ancak ekonomik olmayan gelişmiş soğutma sistemleri veya geliştirilmiş yüksek sıcaklık malzemeleri kullanılarak ulaşılabileceği açıktır. Geleneksel döküm alaşımlardan yönlü olarak katılaşımış. (DS) ve tek kristalli (SX) alaşımlara geçiş malzeme performansıda gerçekten çarpıcı iyileşmeler sağlamıştır [4]. Fakat bu

malzemeler şu an ergime noktalarının yaklaşık %90'ına yaklaşan sıcaklıklarda çalıştıklarından performanslarında olası gelişmeler pek mümkün gözükmemektedir. Ayrıca günümüzde kullanılan daha verimli soğutma geometrilerine sahip kanatçık tasarımları ve parça yüzeyinin soğutma delikleri tarafından soğutulmasını öngören “film soğutma” yaklaşımları da artık en olgun hallerine ulaşmıştır [12].

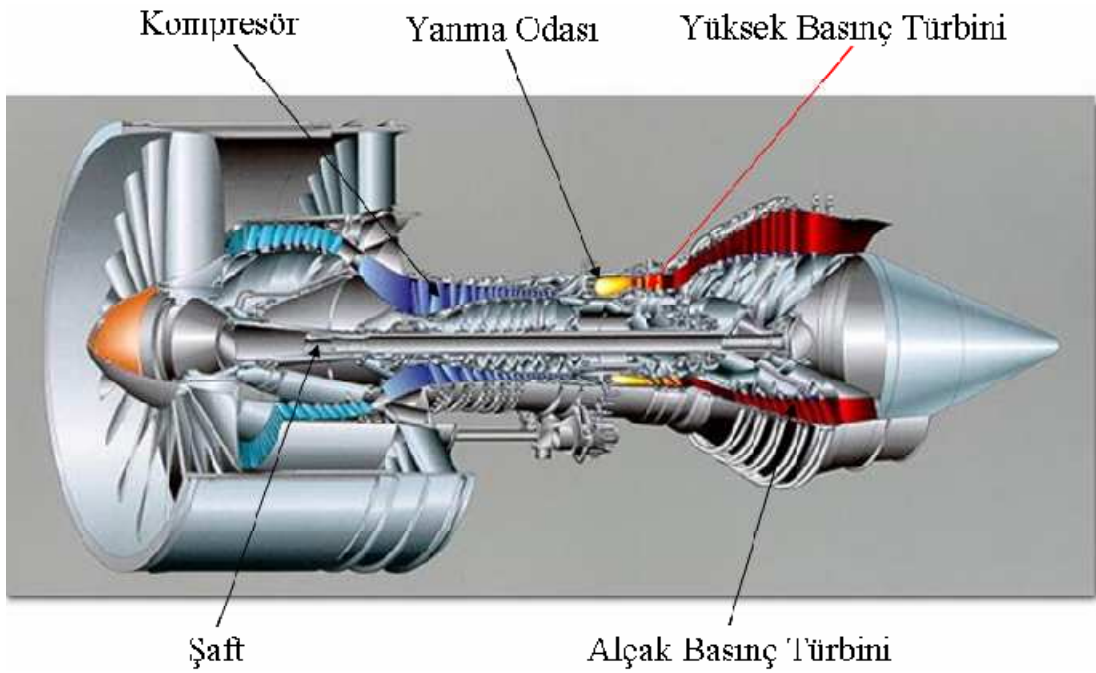


Şekil 1.1. Malzemelerin sıcaklık performansındaki gelişim [4,31]

En makul yaklaşım termal bariyer kaplamaların (TBC-Thermal Barrier Coatings) kullanılmasıdır. Termal bariyer kaplamalar; gelişmiş türbinli motorların yanma odası ve türbin gibi sıcak bölümlerinde (Şekil 1.2), parçaları sıcak gazların olumsuz etkilerinden korumak amacıyla kullanılan ve iki ya da daha fazla katmandan oluşan koruyucu kaplamalardır. Bu kaplamaların sıcaklığı izole etme özelliği; belirli bir metal sıcaklığı için daha az soğutma havasının kullanılmasına izin vererek performansın iyileştirilmesini sağlar veya belirli bir soğutma havası akışı için metal sıcaklığını düşürerek parça ömrünün arttırılmasını sağlar [4,12,14]. Yanma sıcaklığının arttırılması ve soğutma havası miktarının azaltılması sonucu yakıt tüketimi azalır [7,14-16]. Bu tür kaplamaların yanma odası ve türbin kanatçıklarına uygulanmasıyla, bir işletme yakıt giderlerinde %1-2'lik bir tasarruf elde edebilir. Bu oran küçük gözükmesine rağmen bazı işletmeler için yılda 10 milyon ABD dolarından fazla tasarruf anlamına gelmektedir [15]. Gaz türbinli motorda termal

bariyer kaplama sayesinde çalışma sıcaklığının artması yakıt verimini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda emisyon miktarını da azaltır [17,18,19].

Termal bariyer kaplamalar altlık malzemesinin sıcaklığını düşürür; malzemeyi yanmış gazların olumsuz etkilerinden (sıcak korozyon, oksitlenme) ve aşınmadan korur [19]



Şekil 1.2. Gaz türbinli bit uçak motoru [13]

TBK'ların ısı direnci seramik üst tabaka ve metalik bağ tabakaya bağlıdır. Bağ tabakanın ana amacı, üst tabakayı altlığa yapıştırmaktır. Fakat aynı zamanda oksidasyonun altlığa ulaşmasını önler veya geciktirir. Fakat TBK'ın ömrü sadece oksidasyona bağlı değildir. Diğer ana problem seramik esaslı olan bu kaplamaların sıcaklık değişimi karşısında hassas olmalarıdır. [20]

Seramikler, kırılğan ve düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip malzemelerdir. Bu özellikler seramikleri, geçici ya da sürekli ısı transferinin sebep olduğu termal gerilmelere karşı hassas kılar. Seramik malzemeler, hızlı sıcaklık değişimlerine maruz bırakıldıklarında (termal şok), malzeme önemli gerilmeler meydana gelir.[21]

Dolayısıyla Termal bariyer kaplamalarda kullanım ömrünü belirleyen en önemli unsurlardan biri termal şok dayanımıdır.

Bu çalışmanın amacı yüksek sıcaklık uygulamalarında sıkça kullanılan termal bariyer kaplamaların kullanım ömrünü direkt olarak belirleyen termal şok etkisinin incelenmesi ve bu etki sonucunda oluşan hasar mekanizmasına bir tanımlama yapmaktır.

Bu amaç doğrultusunda  $ZrO_2$ -ağ.% 8  $Y_2O_3$  tozu plazma sprey yöntemi ile kaplanmış ve özel olarak tasarlanan termal şok test düzeneğinde termal şok deneyi yapılmıştır.

## 1.2. Termal Bariyer Kaplama Sistemi

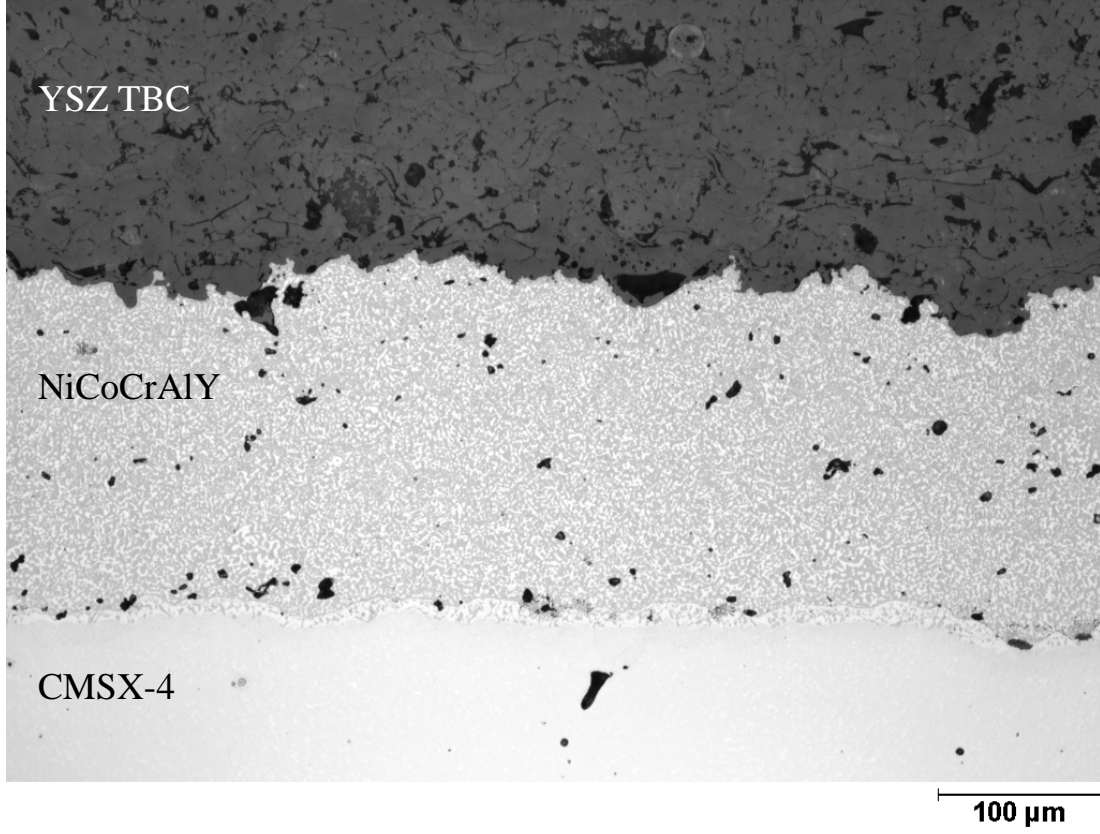
TBK, yüksek sıcaklık uygulamalarında altlık metali yüksek sıcaklık korozyonundan oksidasyon korumaya yönelik yapılan bir kaplama uygulamasıdır. TBK sistemi, biri metalik diğeri seramik esaslı olmak üzere iki farklı tabakadan meydana gelir.

Metalik tabaka, bağ tabakası olarak adlandırılır ve  $MCrAlY$  (M: Co, Fe, Ni) olarak bilinen süper alaşım esaslı bir kaplamadır. Bağ tabakasının TBK'daki fonksiyonu, altlığı anti-oksidan olarak korumak ve üst seramik tabakanın altlık yüzeyine yapışmasını sağlamaktır.

Seramik üst tabaka ise; genellikle ısıl iletkenliği düşük, termal genleşme katsayısı nispeten yüksek, muhtelif ajanlarla (Örn.  $Y_2O_3$ , CaO, MgO) kimyasal kararlılığı sağlanmış  $ZrO_2$  (zirkonyum oksit)'tir [22].

Seramik üst tabaka olarak müllit, alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ), seryum oksit ( $CeO_2$ ), özellikle son zamanlarda kullanılmaya başlanan lantanyum zirkonat ( $La_2ZrO_7$ ) gibi seramikler de tercih edilebilir. Ancak genel olarak TBK'larda yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya ağ.%8  $Y_2O_3$ - $ZrO_2$  (YSZ) kullanılır. Bunun nedeni yüksek termal kararlılık, düşük termal geçirgenlik, iyi kırılma tokluğu ve göreceli olarak yüksek

termal genleşme katsayısına sahip olmasıdır [23]. Şekil 1,3'de örnek bir TBK mikro yapısı ve tabakaları görülmektedir.



Şekil 1.3. Örnek bir TBK mikro yapısı [90]

Termal bariyer amaçlı seramik kaplamalar, genellikle uzay roket nüzulleri, uçak endüstrisinde (türbin paleleri, yanma odaları vb.), enerji santrallerinde ve otomotiv endüstrisinde (piston başları, supaplar vb.) malzeme yüzeylerinin sıcaklığa karşı korunması durumunda kullanılmaktadır.

Havacılıkta kullanılan gaz türbin motorlarındaki tipik TBK uygulamaları yanma odaları, yanma boruları, yakıt buharlaştırıcıları, nozül kılavuz kanatçık platformları gibi statik parçalar ve hava profilleridir. Bunlara bir örnek olarak Prait & Whitney aircraft 265 kaplama sistemi verilebilir. Bu sistem pale ve kanatçıklardan daha çok yanma odası ve diğer türbin parçalarında kullanılmaktadır. [25]

### 1.3. Termal Bariyer Kaplamaların Gelişimi Süreci

TBK'lar ilkin 1970'li yılların ortasında gaz türbin motorlarının yanma odasında başarıyla kullanılmıştır. 1980'li yılların başında uçakların türbin motorlarının kanatlarına kaplama yapılmaya başlanılmıştır. [26]

Günümüzde bu kaplamalarının önemi daha çok belirginleşmektedir, çünkü bu kaplamalar olmasaydı gaz türbin kanatları daha ağır malzemelerden oluşacaktı.

Uçakların ve gaz türbin kanatlarının kaplanması ilk olarak frit emaye kaplamalar kullanılmıştır. Frit kaplama tekniği ilk defa NASA tarafından geliştirilmiştir. Daha sonra alev sprej tekniği geliştirilmiştir, bu yöntemle birlikte çeşitli metal ve seramik kompozisyonlarının karışımı kaplama olarak denenmiştir. TBK'lar için CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> denenmiştir. Altlık/tabak malzemesi olarak da Ni ve Mo denenmiştir. Bunların çıkışıyla daha yüksek sıcaklıklara dayanıklı kaplamalar geliştirilmeye başlanılmıştır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'ün termal iletkenliğinin diğer bileşenlerle olan uyumsuzluğu bu alanda gelişimini önlemiştir. Bu uyumsuzluk, kaplama içinde basma ve çekme gerilmeleri oluşturması sonucu kaplama ömrünü kısaltmaktadır.

1970'lerin başında plazma sprej tekniği sayesinde TBK'ın gelişimi ile NASA tarafından iki katmanlı kaplama yapılarak önemli bir adım atılmıştır.

Bu alanda düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip yitrium oksit stabilize zirkonyum oksit (YSZ) üzerine kurulu termal bariyer kaplamalar önemli bir gelişim göstermiştir. Bu seramik kaplamanın altlık malzemeye doğrudan uygulanmasının termal genişleme uyumsuzluğu doğurmasından dolayı, termal iletkenlik katsayısı kaplama malzemesiyle uyumlu olan bir bağ kaplama uygulaması geliştirilmiştir. Bu katman ise kısaca MCrAlY (M: Co, Fe, Ni) diye genelleştirilmiştir.

Termal bariyer kaplama uygulaması kısaca şöyle özetlenebilir; önce Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilize ZrO<sub>2</sub> kullanılmasından sonraki ikinci adım oksidasyon direnci yüksek, termal genişleme katsayısı uyumlu ve seramik kaplama ile altlık malzeme arasında



koordinasyonu kuran bir kaplama (MCrAlY) olmasıdır. Finalde ise bu kaplamalar üzerinde çalışmak ve termal gerilme uyumsuzluklarını minimuma indirecek alaşım geliştirmektir. Bunun sonucunda  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  / MCrAlY meydana gelen TBK sistemi geliştirilmiştir. [26]

Bununla birlikte çeşitli kompozisyon varyantları denendi. Bu amaç çerçevesinde %12–20 arasında farklı yüzdelerde  $Y_2O_3$  tamamen stabilize kübik yapıya ilave edilmiş, Sonuç olarak  $Y_2O_3$  miktarının 8%'e indirmenin en iyi sonucu verildiği gözlemlenmiştir.

EB-PVD tekniği ise ilk defa Pratt ve Whitney tarafında 1970'li yıllarda  $ZrO$ - $Y_2O_3$  kaplanmasıyla başlanmış olup bu alanda yenileştirmeler hala devam etmektedir. [26]

Günümüzde ise TBK'ların kullanılmasında genellikle iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar plazma sprej yöntemi ve elektron ışını ile fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) teknikleridir. Atmosferik plazma sprej TBK üretiminde EB-PVD 'ye göre daha düşük termal çevrim dayanımı sağlar. Fakat uygun maliyetli birikim miktarı, yüksek birikim oranı ve verimi APS tekniğinin oturmuş yaygın bir teknik haline gelmesini sağlamıştır. [23]

#### **1.4. Termal Bariyer Kaplama Malzemeleri**

Düşük bir ısı iletkenliğe sahip kaplamalardan elde edilecek faydalar açıktır. Belirli bir kaplama kalınlığı için daha geniş bir sıcaklık farkı sağlar ya da belirli bir sıcaklık farkı için daha ince kaplamaların kullanımına izin verirler. Bağ kaplama ve üst kaplamanın, dönen bir kanatçığa iletilen merkezkaç yükleri arttırdığı göz önünde bulundurulduğunda ikinci özelliğin önemi daha çarpıcı hale gelmektedir. Şöyle ki; 125  $\mu$ m kalınlığındaki bir kaplama dönen bir kanatçığa yaklaşık %10'luk bir gerilme eklemektedir. [27]

Bu tür uygulamalarda termal bariyer kaplamalar kendi yüklerini mekanik olarak taşıyacak yeterli kapasiteye sahip olmadıklarından, kaplamanın ilave yükü süper alaşım altlık tarafından taşınır ve bu da makul gerilme seviyelerinin sağlanabilmesi

için daha yüksek yapısal ağırlık anlamına gelmektedir. Dahası, belirli şartlar altında daha düşük ısı iletkenlik daha düşük metal yüzeyi sıcaklığı sağlar. Hücum kenarı sıcaklık profili hesaplamaları, termal bariyer kaplamanın ısı iletkenliği azaldığında ilave bir sıcaklık düşüşü olduğunu göstermektedir. Dikkate değer bir şekilde seramiğin dış yüzey sıcaklığı, azalan ısı iletkenliğe bağlı olarak artmaktadır. Çünkü ısı akışı sabit kalmaktadır. Artan yüzey sıcaklığı seramiğin yüksek sıcaklık kararlılığını olumsuz yönde etkiler veya sinterlenmeyi arttırarak kaplamanın ısı iletkenliğini arttırır.

Sonuç olarak bir termal bariyer kaplama sisteminde üst kaplama ve bağ kaplama olarak kullanılacak malzeme seçimi oldukça önem kazanmaktadır [27].

TBK'larda kullanılan kaplama malzemeleri genelde seramik esastır ve toz formdadır. Biriktirmek istediğimiz seramik tozlar, TBK'larda istenilen özellikleri sağlamak zorundadır. Bu gereksinimler;

- Yüksek ergime sıcaklığı,
- Oda sıcaklığı ve işlem sıcaklığı arasında faz dönüşümlerinin olmaması,
- Düşük termal iletkenlik,
- Kimyasal inertlik,
- Altlık malzemesi ile termal genleşme uyumu,
- Altlığa iyi yapışma özelliği,
- Gözenekli mikro yapının düşük sinterleşme hızı.

Yukarıda sayılan bu gereksinimler TBK malzemelerini sınırlandırmaktadır. Bu gereksinimleri sağlayan birkaç tane TBK malzemesi mevcuttur. Bu malzemeler ile yapılan kaplamalar, kaplama parametrelerinin de uygun seçilmesi ile optimum seviyede gerçekleşmektedir. [28]

TBK malzemeleri ile ilgili İPEK, M [29], MISTA ile arkadaşları [30] ve CAO, X.Q. ile arkadaşları [31] detaylı bir şekilde çalışmıştır.

Zirkonyanın yüksek iyonik iletkenliğinden dolayı oksijen seramik tabakadan metalik yüzeye doğru kolayca difüze olabilir ve bir oksit tabakası oluşturur [24]. Bu oluşum termal büyüyen oksit (TGO: thermally grown oxide) olarak adlandırılır ve kaplama ömründe birinci dereceden etkin bir rol oynar. [32]

Yeterli yüksek sıcaklık ve sıcak gaz korozyonu direncini garanti etmek için metaller, uzun süre boyunca TGO oluşumunu sağlayacak ve altlık alaşımında tükenmeye (depletion) neden olmayacak kadar yüksek Al içeren bir tabakayla kaplanır. Bağ kaplama olarak adlandırılan bu tabaka ayrıca metal ve seramiğin farklı genleşme katsayılarının ayarlanmasına da yardımcı olur. Bağ kaplama alaşımı, diğer oksitlere nazaran tercihen  $\alpha$ -alümina oluşumunu sağlamak için yerel bir Al deposu olarak tasarlanmıştır. Düşük oksijen difüzyon hızı ve üstün yapışma özellikleri nedeniyle alümina ( $Al_2O_3$ ) tercih edilen oksittir. Gaz türbinli motorlarda kullanılan bağ kaplamalar genelde MCrAlY kaplamalar ve basit ya da Pt ile modifiye edilmiş alüminid kaplamalardır. [27]

Tipik MCrAlY bağ tabakaları ( $M=Fe,Co$  or  $Ni$ ) en az 4 element içerir. MCrAlY 'un M'i, süper alaşımın türüne bağlı olarak, Ni veya Co, ya da ikisinin bir kombinasyonu olabilir (çeliğe uygulandığında, Fe de olabilir). Birleşim ve eklentilerin rolü incelendiğinde;

— Cr 'un varlığı, bu kaplamalara mükemmel bir korozyon direnciyle birlikte iyi oksidasyon direnci vermektedir.

— Al içeriği tipik olarak ağırlık %10-12 civarındadır. Oksidasyon ömrü, gerçekte Al'un kullanılabilirliği ile kontrol edildiğinden alüminyum içeriğinin artışı istenen bir özellik olacaktır. Buna rağmen, bu artış sünekliğin önemli miktarda azalmasına sebep olmaktadır.

— MCrAlY ayrıca tipik olarak, oksit katmanının yapışkanlığını arttıran ağırlık %1 yitrium (Y) içerir. Başlangıçta, yitrium'un oksit tabakasının kaplamaya

tutunmasını sağlayan oksitlerin oluşumuna yardım ettiği düşünülmekteydi. Fakat böyle bir etki mevcut olsa da bunun çok az olduğu görüldü. [33]

Günümüzde yitrium'un ana rolünün, sülfürle bir araya gelerek, onun oksit katmanına segregasyonunu önlemek (aksi halde yapışmasına zararlı olacaktır) olduğuna inanılmaktadır.

— Hafniyum (Hf)'un eklenmesi de yitrium eklenmesine benzer bir rol oynar.

— Diğer eklentilerin de etkileri ayrıca araştırılmıştır. Silisyum'un (Si) çevrimsel oksidasyon direncini önemli derecede arttırdığı buna karşın kaplamanın erime noktasını düşürdüğü görüldü. Ağırlıkça %5 ekleme erime sıcaklığını yaklaşık 1140 °C yapmak için yeterliydi. Ayrıca faz stabilliğini etkilediğinin kanıtları vardır. 1000 °C'de çevrimsel oksidasyon için, ağ.%2,5 optimum değer olarak bulundu. Daha fazla ekleme zararlıydı. Renyum (Re) katkısının izotermal veya çevrimsel oksidasyon direncini ve termal çevrim yorulmasını arttırdığı görülmektedir.

— Tantalyum (Ta)'un eklentisi de oksidasyon direncini arttırabilir. [33]

### **1.5. Termal Bariyer Kaplamaların İşlevi**

Günümüzde özellikle modern hava motorlarında çalışma verimini artırmak için işlem sıcaklığını artıracak uygulamaların araştırılması devam edilmektedir. Düşük emisyon ve yüksek verimlilik için yanma odasının yüksek sıcaklıklarda olması beklenmektedir. Ayrıca türbin giriş sıcaklığının artışı yakıt ekonomisine de katkı sağlamaktadır.

Gaz türbinlerinde verim maksimum sıcaklığa bağlı olarak türbin rotorlarının sürekli çalışması ile sağlanır. Türbinlerde sınırlamalar türbin bileşenin büyük oranda mekanik özellikleri ve kısımlarda sürünme direncine bağlı olmaktadır. Süper

alaşımalarının kompozisyonların gelişmesi, yönlü katılaştırılmış türbin kanatları ve tek kristal türbin bileşenlerinin sınırlarını genişletmişlerdir. [24]

Tümüyle seramik esaslı türbin bileşenleri geliştirilmiş olmasına rağmen termal sok, gevreklik ve kırılganlıkları nedeni ile zor kullanım şartlarında avantaj sağlamamışlardır. Yine de türbin kanadı üzerine ince bir seramik tabakası uygulamasıyla motor gazlarının yanma sıcaklığı, türbin metalinin sıcaklığı artmadan, 50–200°C arasında artırılabilir. Bu durumda motorun verimliliği % 6–12 arası artırılabilir. Bu durumda bir motordan yılda 250.000\$ gibi tasarruf yapılabilir [24].

Ayrıca gelişen teknoloji ile birlikte artan çalışma sıcaklıkları altlık malzemelerinin erime sıcaklıklarına yaklaşmaktadır. Termal bariyer kaplamaların gelişimi ile bu sorun önlenmeye çalışılmaktadır. Bu sayede çalışma sıcaklığı ile parça sıcaklığı arasındaki fark artmakta, bu durum gerek maliyet açısından gerekse oksidasyon, sürünme, korozyon gibi özelliklerin iyileştirilmesi bakımından avantaj sağlamaktadır. [24]

Termal bariyer kaplamalar:

— 0.25 mm kalınlığında bağlayıcı kaplama (genellikle MCrAlY veya Pt- Aluminid), ara kaplama ( $Al_2O_3$ -alümina),

— 7–8  $Y_2O_3$  ile stabilize edilmiş 0.13 mm kalınlığında seramik tabaka'dan oluşurlar.

Bu kaplamalar motordaki sıcak gazlarla metal parçalar arasında bir bariyer oluştururlar. Seramik tabaka ise yalıtım sağlar ve aşağıdaki faydaları sağlar:

— Motor performansını artırır (motorlarda sıkıştırma oranının artırılmasına imkân sağlarlar)

— Düşük parça sıcaklıkları (böylece yüksek sıcaklık uygulamalarında yetersiz kalmazlar),

— Daha az soğutma hava ihtiyacı,

— Termal süreksizliklerin modernizasyonu

Bu öğeler performans, dayanıklılık ve parça ömrünü arttıırırlar. Mevcut termal bariyer kaplamalar normal şartlar altında metal sıcaklıklarını 50 ile 80 °C arasında düşürürken sıcak noktalarda bu düşüş 140 °C 'ye çıkar. [34]

Sonuç olarak gelişen kaplama teknolojisine ek olarak soğutma kanallı türbin kanatlarının üretilmesi ve kanatlar üzerinde yapılan aerodinamik çalışmalar neticesinde altlık ile sıcak gaz yüzeyi arasında 100–300 °C bir azalma sağlanmıştır.



Şekil 1.4. Soğutma kanallı bir türbin kanatçığı [35]

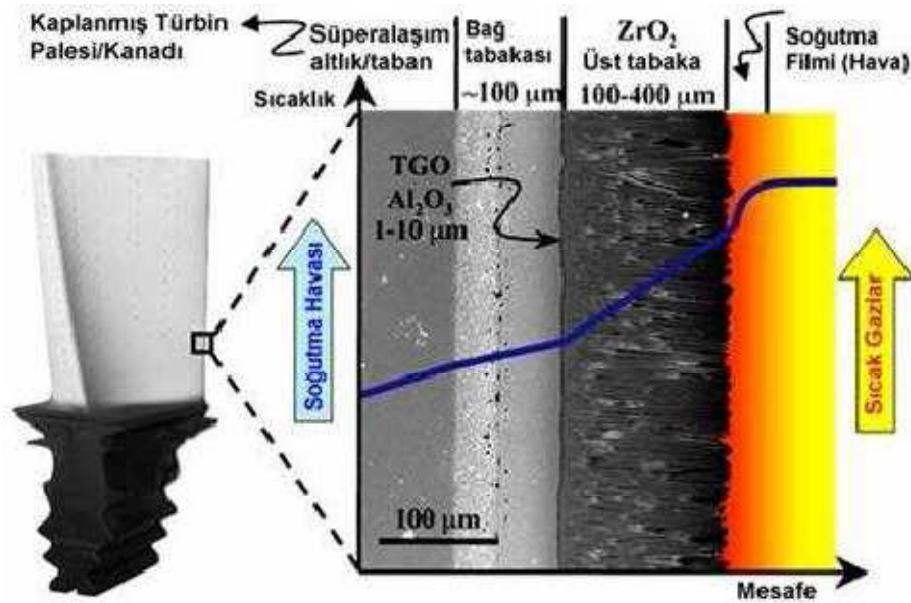
## 1.6. Gaz Türbinlerinde Kullanılan Termal Bariyer Kaplamalar

Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilize ZrO<sub>2</sub>'ten ( YSZ'den ) yapılan termal bariyer kaplama ( TBC ) seramik üst kaplamalar 30 yıldan fazladır gaz türbini motor uygulamalarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. YSZ istenilen performansını özelliklerinin

kombinasyonundan alır ki bunlar düşük termal iletkenlik, yüksek termal genişleme katsayısı ve göreceli yüksek sıcaklıklarda faz kararlılığıdır. Geliştirilmiş performansın ve artırılmış dayanıklılığın ileri motor gereksinimleriyle, daha yüksek işletme sıcaklıklarına izin veren yeni nesil termal bariyer kaplamalara gereksinim duyulmuştur.

Bu maksatla yapılan çalışmalarda ana amaçlar şunlar olmuştur:

- Potansiyel düşük iletkenlik seramik TBK adaylarını tespit etmek,
- Termal iletkenliklerini analiz etmek ve ölçmek,
- Sıcak korozyon davranışlarını belirlemek,
- Termal bariyer kaplamaların termomekanik performanslarını değerlendirmek,
- Hata mekanizmalarını belirlemek. [36]



Şekil 1.5. Bir gaz türbin kanatçığı ve üzerine uygulanmış termal bariyer kaplama kesiti [32]

Gaz türbin motorlarının gelişiminde çeşitli soğutma sisteminden yararlanılmıştır. İlk olarak hava akışının türbin kanadı içindeki kanallardan geçerek soğutulması ile daha sonrasında çok sayıda kanal içinde hava geçişi ile birlikte dıştan film soğutması ile bunu takiben ise çok kanallı geçiş sistemleri ve son olarak da termal bariyer kaplama sistemleri ile türbin kanadı soğutulmaya çalışılmıştır. [29,37]

Bu tür film soğutma sistemlerin çalışma prensibi kanat yüzeyi ile sıcak gazlar arasında tampon görevi yaparak hava akışı vasıtasıyla soğutucu etkiyi oluşturmaktadır. Bu sayede ısı yükü ve metal sıcaklığında düşme sağlanmaktadır.

Film soğutma sisteminin katkısını artırmak için çok küçük boyutlu (çap: 0,2–0,5 mm) boşluk kanalları oluşturulmuştur. Bu sayede konveksiyon (iletim) yoluyla ve film soğutma tekniği ile ısının dağılması sağlanmıştır. Bu kanalcıkların bir kaçının dahi kapanması durumunda hava akışı düşmekte ve sisteme zarar verici etki meydana gelmektedir. Bu nedenle türbin kanadının üzerine kaplama yapılması durumunda havalandırma boşluk kanalı boyut dağılımı önemli bir faktör oluşturmakta ve üzerinde hassasiyetle durulması gereken bir konudur. Kaplama yöntemine bağlı olarak boşluk boyut ve sayısı azalmakta ve dolayısıyla da hava soğutma sistem verimliliğinde de aksamalar meydana gelebilmektedir. [37]

### **1.7. Termal Bariyer Kaplamaların Üretim Yöntemleri**

Termal bariyer kaplamaların üretiminde çeşitli teknikler uygulanmaktadır. Bunlar Plazma sprey (PS=Plasma Spraying), Elektron ışın Fiziksel buhar biriktirme (EBPVD=Electron Beam Physical Vapour Deposition), Yüksek hızlı oksijen yakıt (HVOF=High Velocity Oxygen Fuel) ve yüksek sıklıkta detonasyon (HFPD=High Frequency Pulse Detonation ) yöntemleridir. Fakat günümüzde ilk iki teknik en yaygın oranda kullanılmaktadır.[23]

Plazma sprey yöntemi ve EB-PVD yöntemi. Bu yöntemlerle ilgili olarak, literatürde detaylı çalışmalar mevcuttur [38, 39, 40,42, 43]

### **1.8. Termal Bariyer Kaplamalarda Termal Şok**

Seramikler, kırılğan malzemelerdir ve genellikle düşük ısıl iletkenlik gösterirler. Bu özellikler seramikleri, geçici ya da sürekli ısı transferinin sebep olduğu termal gerilmelere karşı hassas kılar. Seramik malzemeler, hızlı sıcaklık değişimlerine maruz bırakıldıklarında (termal şok), malzeme önemli gerilmeler meydana gelir.

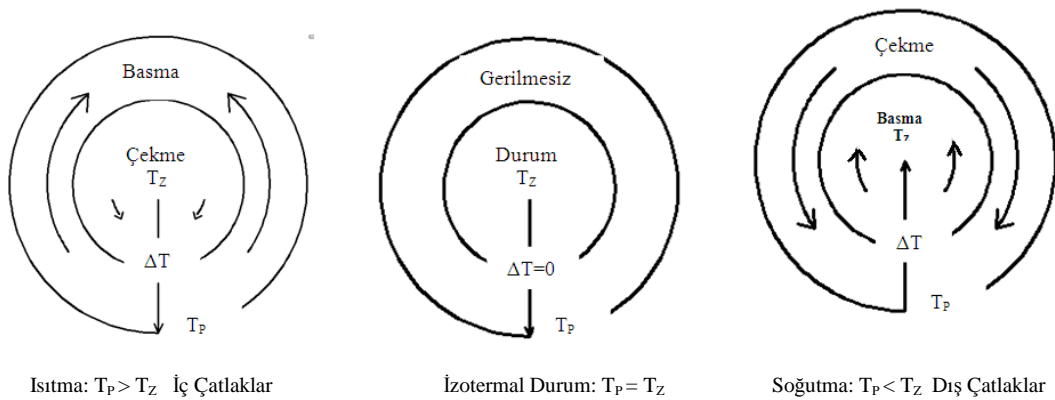


Bu şartlar altında kırılmaya karşı direnç "termal dayanım, termal gerilme direnci veya termal şok direnci" olarak isimlendirilir. Farklı malzemelerde termal gerilmelerin etkisi sadece gerilme seviyesine bağlı değil, cisimdeki gerilme dağılımına ve gerilme sürekliliğine, süneklik, homojenizasyon, porozite gibi malzeme özelliklerine ve daha önceki çatlaklara bağlıdır. [21]

Cam ve seramikler gibi kırılğan malzemelerin termal şok davranışı ( $R_{TS}$ ), bu malzemelerin en zayıf noktalarından birisidir. Termal şok; kırılma mukavemetine ( $R_m$ ), elastisite modülüne ( $E$ ), Poisson oranına ( $\nu$ ), termal genişleme katsayısına ( $\alpha$ ) ve ısı iletkenliğe ( $K$ ) bağlı olarak aşağıda verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$R_{TS} = \frac{K.R_m.(1-\nu)}{E.\alpha} \quad (1.1)$$

Bu denklemin temeli, su verilmiş ya da hızlıca ısıtılmış bir numunenin merkezi ve yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ( $T$ ) ile oluşan gerilmelerin hesaplanmasıdır (şekil 1.6). Eğer belirli bir sıcaklık farkı mevcut olursa ( $T_{krit.} = R_{TS}$ ), bu gerilme bahsedilen özelliklere bağlıdır ve kırılma mukavemetine eşit olur ( $\sigma = R_m$ ). Termal şok koşulları altında gerilmelerin gelişiminin verildiği Şekil 1.6' da  $T_p$ , numune yüzeyindeki sıcaklığı ve  $T_z$  de numune merkezindeki sıcaklığı ifade etmektedir.[21]

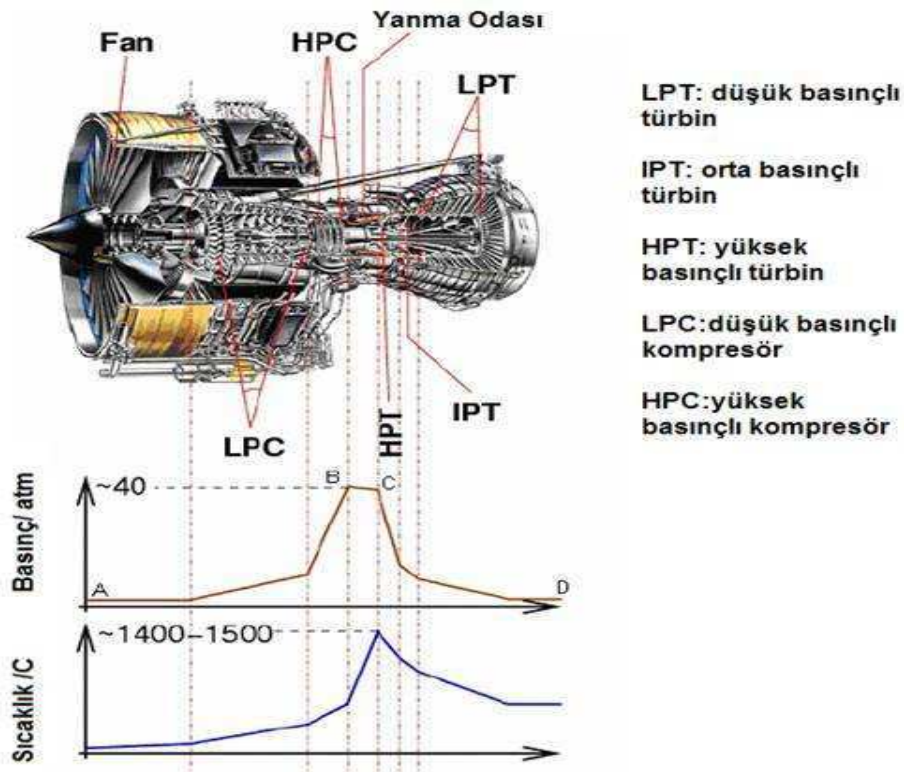


Şekil 1.6. Farklı termal şok koşulları altında gerilmelerin gelişimi [21]

### 1.9. Termal Bariyer Kaplamalarda Termal Şok Testleri



Termal şok; Süper iletkenler, yanma odaları, filtre aygıtları, termal yapı elemanları gibi ani sıcaklık değişimlerine maruz kalan ortamlarda seramik kullanıcıları için yaygın olan problemlerden biridir. Termal şok esnasında termal gerilimler, mikro ve makro çatlaklar şeklinde malzeme içinde birikirler ve yeterli büyüklüğe ulaştıklarında hasara yol açarlar.

Termal şok hasarının doğası ve kapsamı bir yandan seramiğin kırılmaya karşı direncine yani kalınlığına ve gücüne, diğer yandan ise su verme (quenching) 'nin şiddetine yani işlem boyunca geçici termal stres tarafından ulaşılan maksimum değere dayanır. Bunlardan ilki, klasik mekanik testle kolayca ölçülebilirken; ikincisi, sıvıda, katıda ve onların ara yüzlerinde ısı transferi ve iletimi gibi karmaşık geçici mekanizmaların sonucu olduğu için ölçümü daha zordur. Bu sebepten dolayı, birçok araştırma, içerdiği fizikten ziyade, seramik materyallerdeki termal şok'un sonuçlarının karakterizasyonunu (nitelendirilmesini) amaçlar. [45]



Şekil 1.7 Bir gaz türbininin şematik gösterimi ve bölgelere göre basınç ve sıcaklık değişimi [33]

Şekil 1.7’de verilen gaz türbin şemasında, özellikle yanma odasında oluşan basınç ve sıcaklık değişimi görülmektedir. Bu durum zamanla termal yorulmanın da etkisi ile hasara neden olmaktadır. Gaz türbin motorlarının çalışma koşulları ve TBK’lardan beklenen beklentiler şekil 1.8 de verilmiştir. Termal şok testlerinin amacı ve faydası bu noktada önem kazanmaktadır. Bu testler sonucunda elde edilen bulgular hasar mekanizmasını ve servis ömrünü belirlemeye yönelik bilgiler taşımaktadır.

Hedef		Havacılık GT.	Enerji Santralleri GT.
Düşük	Yüksek	Rolls Royce Trent 900	GE 9H
Yakıt tüketimi Emisyon Bakım giderleri	Termal verim $T_{gpr}$ Dayanım Performans. Ömrü		
<b>Gaz Türbin Motorlarının Çalışma Şartları</b>			
Yakıt türü		Kerosen	Doğal gaz
Basınç oranı		16:1- 40:1	12:1 ile 17:1 arası
Türbin giriş sıcaklığı (°C)		>1200	<1200
Türbin hızı (dev/dak.)		3000-3600	3000-15000
Egzos sıcaklığı (°C)		400-550	530-600
Göreceli Boyut		1x	5x
<b>Termal Bariyer Kaplamaların Çalışma Koşulları ve Beklentiler</b>			
Termal çevrim sayısı		8000	2400
Çevrim periyodu (saat)		1-15	100-500
Toplam çalışma süresi (saat)		<10 000	>24 000
Pik sıcaklıklarda çalışma süresi (saat)		300	>24 000
Seramik tabaka yüzey pik sıcaklığı (°C)		>1200	<1200
Bağ tabaka yüzey pik sıcaklığı (°C)		1093	954

Şekil 1.8. Gaz türbin motorlarının çalışma şartları

Termal bariyer kaplamalarda termal şok dayanımını belirlemeye yönelik birçok test yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemler genel olarak şöyle sınıflandırılabilir:

- Su verme (fırında ısıtma/soğutma) termal şok testi,
- Brülör ısıtma (alevle ısıtma/soğutma) termal şok testi,

— Lazer ısıyla termal şok testi,

Bu yöntemlerde ısıtma ve soğutma yöntemleri farklı olmakla beraber ana prensip numunenin belli bir sıcaklığa çıkarıldıktan sonra ani soğutulmasıdır. Bu ısıtma soğutma işlemi 1 çevrim olarak adlandırılır. Numune sürekli gözlemlenerek termal şok'a bağlı olan hasarların (çatlama, dökülme, kabarma) hangi çevrim sayısında olduğu belirlenir. Elde edilen çevrim sayısı malzemenin termal şok ömrünün bir göstergesidir.

Termal şok testinin çeşitli metotları, hava aracı ve endüstriyel gaz türbin motoru imalatçıları tarafından kalite kontrolünde olduğu kadar, gelişme aşamasında da yeni termal bariyer kaplama sistemlerinin ömrünün belirlenmesi için kullanılır. [46]

Yaygın olarak uçak uygulamalarında kullanılan, periyodik fırın oksidasyon testi (FCT) seramik tabaka-bağ tabaka ara yüzeyindeki gerilimlerin ve termal büyüyen oksit (TGO) oluşumu sonrasındaki gerilimlerin kaplama ömrüne etkisinin incelenmesinde yaygın olarak kullanılır. [46]

### 1.9.1. Su verme termal şok testi

Seramiklerin termal şok davranışının karakterize edilmesinde kullanılan en önemli ve en basit deney su verme testidir. Genellikle su verme deneylerinde, seramik numune  $T_1$  sıcaklığına kadar fırında yavaşça ısıtılır ve daha sonra  $T_0$  sıcaklığındaki su verme ortamına atılır. Numunelerin kalıntı gerilmeleri  $\sigma_r$  ölçülür ve  $T_c = T_1 - T_0$  olan sıcaklık farkıyla ilişkisi kurulur. Yüksek çevrim sayılarıyla çok güçlü termal şoklar elde edilir ve su ortamında termal şok direnç  $R$  parametresi ile orantılıdır.

Su verme ortamı olarak yağ veya sıkıştırılmış hava kullanılırsa, numunelerin ısı transferi, su ortamına göre daha da düşürülmüş olacağından daha düşük  $T_c$  değeri elde edilecektir. [47]

Su verme yönteminin avantajı  $T_1$  ve  $T_0$ 'ın ayarlanabilmesidir. Bu yöntemle termal şok uygulanmak istenirse;

- Sıcaklık ve termal gerilme alanının kantitatif değerlendirilmesi,
- 1000 °C'nin üstündeki sıcaklıklarda termal şok uygulanması,
- 1000°C'den daha fazla döngü kullanılmak isteniyorsa kısa periyotlar kullanılmasına izin vermesi sayılabilir. [47]

Basitliğinden dolayı su verme ile termal şok testi en popüler yöntemlerden biri haline gelmiştir. Su verme işlemi manuel olarak yapılabileceği gibi şekilde görüldüğü gibi bir test düzeneği yardımıyla da yapılabilir. Düzenekte aşağı yukarı hareket eden pistonlu bir sistemin ucuna yerleştirilen numune önce iki ucu açık bir tüp fırın içinde ısıtılıp daha sonra aşağı doğru indirilerek su verme banyosunun içine girer. [48]

Yöntemin avantajlarına örnek olarak; basit ve ucuz bir proses olması, dizayn edilebilirliğinin kolay olması, fırın test ortamı ve su verme ortamının hassas sıcaklık kontrolüne imkân sağlaması verilebilir.

Yöntemin dezavantajı ise altlığın da kaplama ile birlikte ısınması, buna bağlı olarak termal gerilmelerin oluşturulamamasıdır. Altlık üst tabaka birlikte uzayıp kısılır ve bu yüzden kaplama-altlık ara yüzeyinde gradyant oluşmaz.

### **1.9.2. Brülör ısıtma termal şok testi**

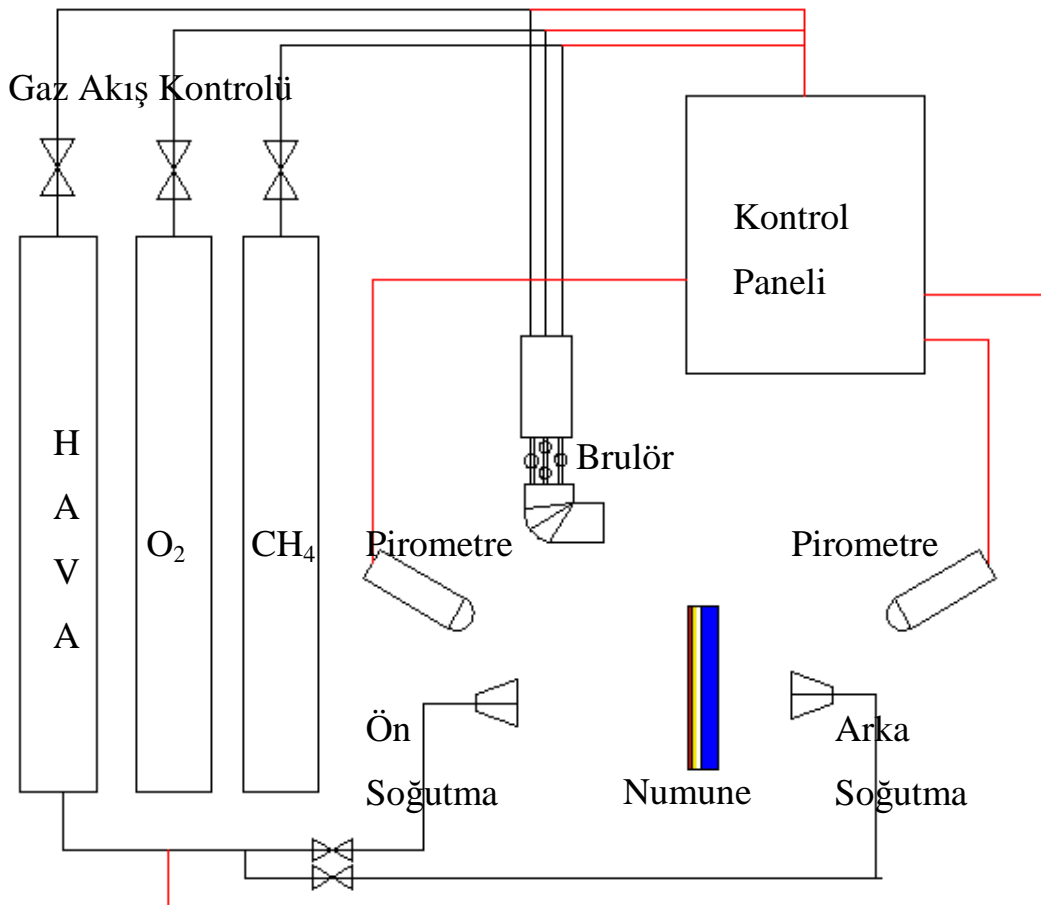
Tipik olarak dairesel, dikdörtgen ve çubuk şeklindeki numuneler doğalgaz/propan ve oksijenin beraber kullanıldığı bir brülör vasıtasıyla periyodik olarak ısıtılıp sonrasında basınçlı hava ile soğutulmasıdır.

Brülör ile ısıtma termal şok testi şu şekilde yapılır: Numune yüzeyi brülör alevi tam numunenin ortasına gelecek şekilde merkezlenir. Numune çok hızlı bir şekilde ısıtılır. Alev propan-oksijen gaz karışımının yakılmasıyla elde edilir. TBK kaplanmış yüzey sıcaklığı ve altlık malzemesinin sıcaklığı, önden bir pirometre ve altlık

malzemesinin sıcaklığı merkezine doğru açılmış deliğe yerleştirilen bir termokupl ile ölçülür.

Deney numunesi  $1250^{\circ}\text{C}$ 'deki yüzey sıcaklığında 20 saniye ısıtılır ve bu sıcaklıkta 5 dakika tutulur. Isıtma sırasında, test numunesinin arka tarafı, numunenin üzerinde kontrollü bir sıcaklık gradyanı elde etmek için yüksek debide hava ile soğutulur. Böylece, altlığın sıcaklığı yaklaşık  $800^{\circ}\text{C}$ ' de tutulmuş olur. Isıtma işlemi bittikten sonra yakıcı gaz otomatik olarak kaplama yüzeyinden uzaklaştırılır ve numune  $100\text{ K/s}$  hızda sıkıştırılmış havayla birlikte 2 dakika boyunca her iki yönden soğutulur. [23]

Şekil 1.9'da bu şekilde çalışan örnek bir termal şok deney düzeneği şematik olarak görülmektedir.



Şekil 1.9. Brülör ısıtma termal şok deneyi düzeneği şematik gösterimi

Yöntemin avantajlarına örnek olarak; sağlıklı bir sıcaklık gradyanı elde etme imkânı vermesi ve bu sayede daha reel bir çalışma ortamı simüle edilebilmesi verilebilir. Ayrıca sistem tam otomatik olduğundan, ısıtma ve soğutma rejimleri ayarlanabilmektedir.

Dezavantajı ise su verme testine göre daha fazla maliyet gerektirmesidir. Ayrıca otomasyon düzeneğinin uzman kişilerce planlanması gereklidir.

### **1.9.3. Lazer ışını ile termal şok testi**

Lazer ışını ile termal şok testi uygulama prensibi olarak diğer yöntemler ile benzerlik göstermekle beraber ısıtma bir lazer kaynağı ile gerçekleştirilmektedir. Bir lazer kaynağı ile yüksek sıcaklığa çıkartılan numune daha sonra oda sıcaklığına soğutulur. 1.5 kW CO2 lazer ünitesi Termal bariyer kaplama yüzeyine yüksek bir sıcaklık akımı uygulamada kullanılır. [49]

Yöntemin avantajlarına örnek olarak; yüksek sıcaklıklara çıkabilme, ani ısıtma ve soğutma imkânı ile daha hızlı termal şok oluşturulabilmesi verilebilir.

Dezavantajı ise kompleks bir proses olması ayrıca lazer ekipmanı ve diğer donanımın yüksek maliyetli olmasıdır.

### **1.10. Termal Bariyer Kaplamalarda Hasar Mekanizması**

Termal bariyer kaplamaların mevcut uygulamalarda ve tasarlanan yeni nesil motorlarda önemli bir role sahip olduğu açıktır. Bununla birlikte sağlamlık ve güvenilirlik konuları termal bariyer kaplamalardan elde edilecek kazanımları sınırlamaktadır. Çünkü günümüzde güvenilir bir ömür tahmini olmadığından bu kaplamaların potansiyeli tam olarak kullanılamamaktadır. Termal bariyer kaplamalardaki hasar mekanizmalarının iyi bir şekilde anlaşılması, kaplamanın sağlamlığının ve güvenilirliğinin artırılması için kilit faktördür. [27]

Ancak TBK' da hasar mekanizması hala tam olarak anlaşılabilmiş değildir. Çünkü birçok efekt bunda etken olabilir. Bunlardan başlıcalar:

— Kaplama karakteristiği, üst tabaka kalınlık ve yoğunluğu, bağ tabaka-üst tabaka ara yüzey pürüzsüzlüğü, birikim esnasında oluşan gerilimler.

— Termal yük etkisi, bağ tabaka oksidasyonu sonucu termal büyüyen oksit (TGO: thermally grown oxide) oluşumu, termal genleşme uyumsuzluğuna bağlı termal gerilim, dik sıcaklık gradyanı ve ani sıcaklık değişimlerine bağlı termal gerilim, üst tabaka faz dönüşümleri, sürünme, sinterlenme ve bağ tabaka sürünmesidir. [20]

Termal bariyer kaplama sistemlerinde servis hasarı tipik olarak seramik tabakanın pullanarak kalkması (spallation) şeklindedir. [50, 51, 52] Şekil 1,9'da bir türbin kanatçığına uygulanmış ve servis esnasında pullanarak kalkmış bir TBC görülmektedir.

Hasar çoğunlukla bağ kaplama/seramik üst kaplama ara yüzeyinde başlar. Plazma sprej yöntemiyle üretilmiş kaplamalar için araştırmacılar hasarın ya TGO içinde ya da seramik kaplama içinde, fakat TGO ara yüzeyine çok yakın bölgelerde başladığını göstermişlerdir.



Şekil 1.10 .Termal bariyer kaplamalarda rastlanan tipik bir servis hasarı [27]



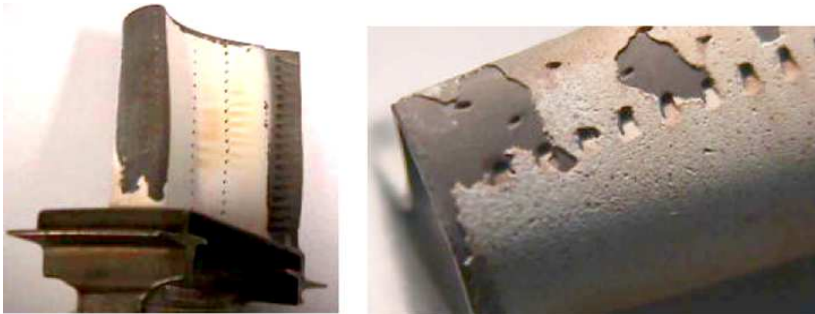


Şekil 1.11. Kullanım öncesi ve kullanım sonrası kanatçıktaki TBK görüntüsü










Bu başlangıç çatlakları birbirleriyle birleşip seramik tabaka içinde ara yüzeye paralel bir şekilde ilerler ve seramik tabaka üzerindeki basma yüklerinden dolayı kaplamamanın kalkmasına neden olurlar.[53, 50, 54] Diğer yandan EB-PVD kaplamalar TGO/bağ kaplama ara yüzeyi boyunca çatlayarak hasara uğrarlar [52, 54,56, 57, 58, 59-64]. Hasar yerlerindeki bu fark temelde kaplamaların mikro yapılarındaki farktan kaynaklanmaktadır. PS kaplamalar, oldukça düzgün bir dağılıma sahip mikro çatlaklar nedeniyle gözenekli (porlu) bir yapıya sahipken, EB-PVD kaplamalar genelde altlık yüzeyine dik bir şekilde büyüyen ve birbirleriyle zayıf bir bağla bağlanan kolonsal tanelerden oluşur.[27]

### 1.11. Termal Bariyer Kaplamalarda Hasar Tipleri

Literatürde termal bariyer kaplamalara yapılan testler sonucunda, daha önce bahsedilen hasar mekanizmaları çerçevesinde birçok hasar tipi tespit edilmiştir.



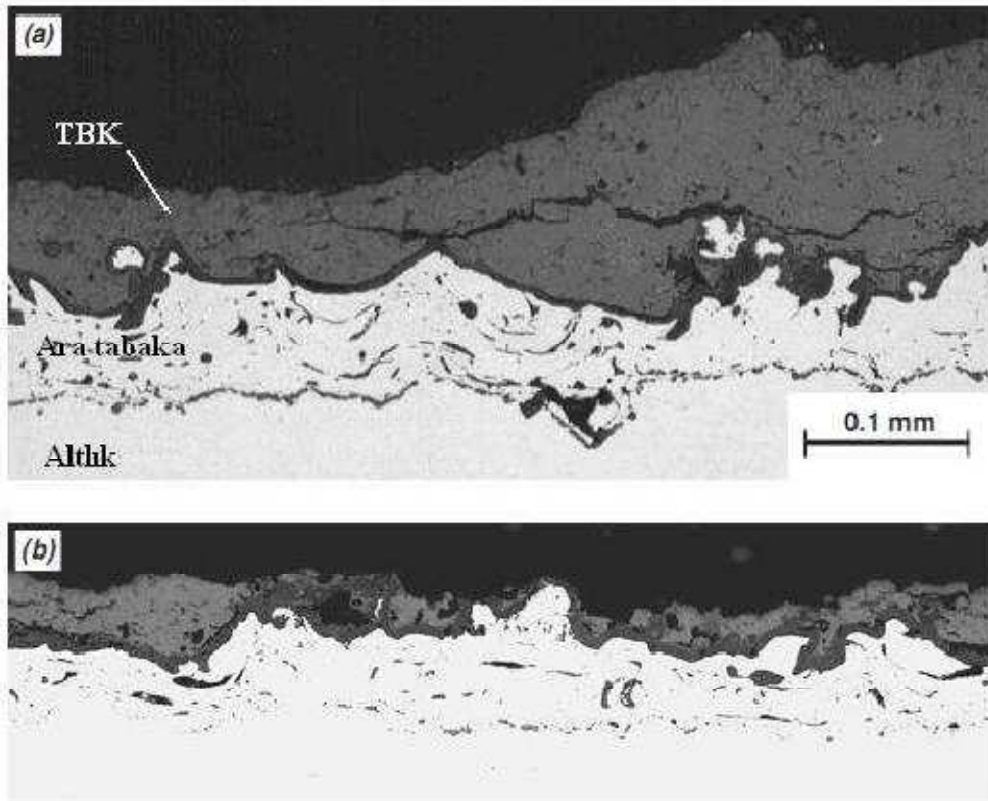
Şekil 1.12.TBK'da rastlanan hasar tipi

Üst tabaka komple delaminasyonu	CD	
Üst tabaka arayüzey çatlak	IC	
Üst tabaka dikey çatlak	VC	
Üst tabaka kalınlığı boyunca segmentasyon çatlak	SC	
Üst tabaka alev alanı delaminasyonu	FD	
Üst tabaka kenar alev alanı delaminasyonu	ED	
Üst tabakanın numune kenarından dökülmesi	NO	
Şiddetli ara tabaka bozunması	BD	
Numune eğilmesi sonucu ayrılma	SB	

Şekil 1.13. Termal sok testleri sonucu tespit edilen hasar tipleri [20]

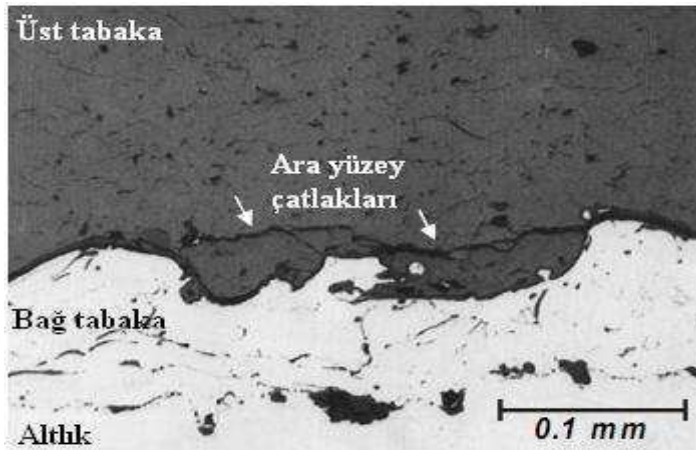
Elde edilen sonuçlar hasar mekanizmalarını anlamaya yönelik bulgular taşımaktadır. Koolos ve Schouten [20,55] muhtelif kalınlıklarda, bağ tabakalı ya da bağ tabakası olmayan TBK'ların ömrünü hesaplamak ve hasar modeline bir tanım getirmek üzere 3 farklı test yöntemi kullanarak (fırın ısıtma termal şok, brülör ısıtma termal şok ve brülör ısıtma termal çevrim) kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Çalışmada dikdörtgen şekilli, nikel esaslı Hastelloy X alaşımı üzerine NiCrAlY bağ kaplama ve  $ZrO_2$ -ağ.% 8  $Y_2O_3$  üst kaplama farklı kaplama kalınlıklarında atılmış, test yöntemi ve kaplama kalınlığının hasar mekanizmasına etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak birden fazla hasar tipi tespit edilmiş ve tanımlanmıştır. Bu hasar tipleri Şekil 1.13'de verilmektedir.



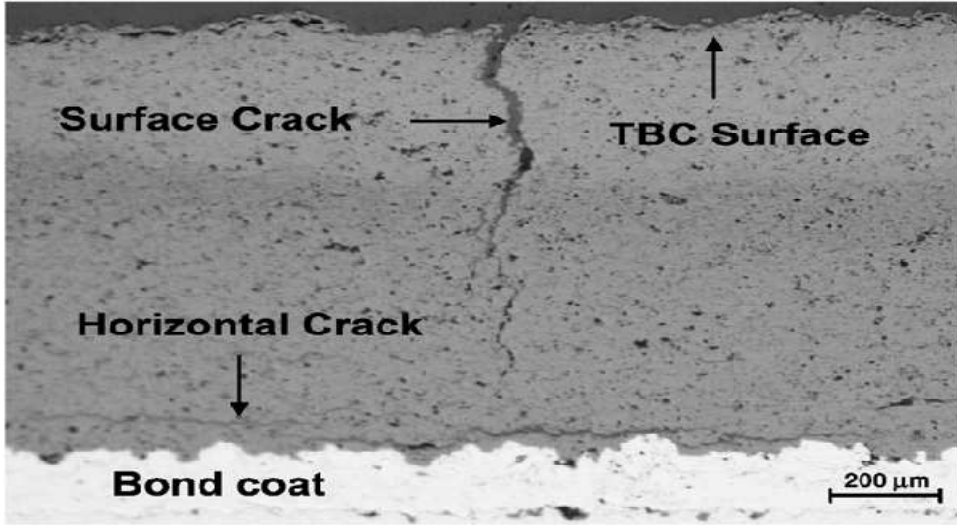
Şekil 1.14 . Fırın testi (a) 90 çevrim sonundaki kaplama delaminasyonu (b) 300 çevrim sonunda tamamen delaminasyon [55]

Şekil 1.14’de komple delaminasyon hasar tipine örnek bir mikro yapı görülmektedir. 90 çevrimde önce kenarından delaminasyon görülen numune 300 çevrim sonunda tamamen hasara uğramıştır.



Şekil 1.15. Brülör testi sonrası üst tabaka /alt tabaka arasında oluşmuş ara yüzey çatlakları [55]

Şekil 1.15’de ara yüzey çatlak oluşumuna bir örnek verilmektedir. Bu çatlaklar genellikle termal genişleme katsayısı uyumsuzluğundan dolayı meydana gelmektedir.



Şekil 1.16. Brülör testi sonunda alev alanı dışında oluşmuş dikey çatlaklar

Bir termal bariyer kaplama kesitinde üst kaplama kalınlığının yarısına kadar olan çatlaklar segmentasyon çatlağı yarısından fazla olanlar ise dikey çatlak olarak adlandırılmaktadır.

Termal çevrim esnasında sürekli bir termal yorulma etkisinde kalan altlık malzemesi genişip büzölmelerin etkisi ile zamanla eğilir. Bu eğilmenin getirdiği gerilimi kaldıramayan üst tabaka kaplamada çatlamlar oluşur.

Görüldüğü gibi kaplamalardaki çatlak oluşumu ve çeşitli yükler altında çatlak davranışı önem arz etmektedir. Çatlak davranışı kırılma mekaniği ile anlaşılabilir.

### 1.12. Kırılma Mekaniği

Kırılma mekaniği, çatlak veya boşluk içeren mühendislik yapılarının emniyetli bir şekilde çalışmalarını sağlayan bir bilim dalıdır ve malzemenin deformasyonunu ve kırılmasını incelemektedir. Kırılma olayı atomik düzeyde, parçaya gelen gerilmenin atomlar arasındaki bağların oluşturduğu mukavemeti aşması sonucunda gerçekleşmektedir.

Mühendislik malzemeleri ne kadar hassas üretilirse üretilsinler içlerinde veya yüzeylerinde boşluk, hata, çatlak, çentik, gibi kusurlar içermektedirler. Ayrıca çalışma koşullarından dolayı da çatlaklar oluşabilmektedir. Mühendislik malzemelerinin neden kırıldığıнын araştırılarak, kırılma sebeplerinin anlaşılması benzer hasarların ve kazaların tekrarlanmaması için gerekmektedir. Malzemelerin hasara uğrama sebepleri ise; yanlış tasarımlar, malzeme hataları, beklenmeyen yükler, üretim hataları, çalışma koşulları ve diğer karmaşık nedenler olabilmektedir [65].

Mühendislik malzemelerinin kırılma davranışı geçmişten günümüze gelen ciddi bir sorun olmuştur. Kırılmanın iki temel sonucu emniyet ve ekonomiktir.

Bir parçanın teorik olarak hesaplanan kopma mukavemeti ile deneyler sonucunda elde edilen kopma mukavemeti arasındaki büyük fark, parçanın içerisinde veya yüzeyinde bulunan mikro çatlakların parça yük altında iken birleşmesi ile parçanın kopma mukavemetinin düşmesi olarak tanımlanır. Bir parçanın teorik kopma mukavemeti gözlemlenen deneysel kopma mukavemetinden yaklaşık 100 kat daha küçüktür. Malzemelerde bulunan mikro çatlaklar malzemede gerilme yığılmalarına sebep olmakta ve buna bağlı olarak malzemede önemli oranda mukavemet kayıpları oluşmaktadır[66].

Griffith 1920'lerin başlarında kırılma olayını, çatlak ilerlemesi için gerekli enerji olarak tespit etmiştir. Griffith, sistemin toplam enerjisindeki azalmayla önceden var olan bir çatlakın ilerlemeye başlayacağını formüle etmiştir [67].

Kırılma Mekaniği, önemli ölçüde Griffith'in 1922'de yayınlamış olduğu çalışma ile başlamış ve George Irwin'in 1958'deki çalışması ile hız kazanmıştır. Irwin lineer elastik kırılma mekaniği ile ilgilenmiştir. J.R. Rice lineer olmayan kırılma problemleri çalışmış ve 1968 yılında bugün J-İntegrali olarak bilinen çözümü geliştirerek kırılma mekaniği çalışma alanını ileri seviyeye taşımıştır.

Bu aşamadan sonra son otuz yıl içerisinde kırılma mekaniğinde kullanılan nümerik metotlar sürekli olarak gelişmeye devam etmiş, üç boyutlu ve daha karmaşık yapılara uygulanmıştır. Üç boyutlu kırılma problemlerinin nümerik olarak çözümünde

kullanılan metotlara alternatif metotlar, sınır integral metodu, virtuel işler metodu, çizgi-yay metodu ve tekil çeyrek nokta üç boyutlu elemanlara uygun olarak modifiye edilmiş sonlu elemanlar metodudur. Bu metotlara ilave olarak ise domain integral ve sonlu elemanlar metodu yaygın bir biçimde kullanılmaya başlanmıştır. Bahsedilen bu yöntemlerin bazılarında çatlak ucu etrafında sonlu eleman bölüntüsüne ve gerilme şiddet faktörünün hesaplanması için son işleme ihtiyaç duyulmaktadır [68].

Malzemelerin mekanik özellikleri, belli boyutlardaki numunelere belirli koşullar altında gerçekleştirilen laboratuvar testleri ile belirlenir. Malzemenin gerilme altındaki davranışını etkileyen özellik yükleme türüdür. Bu nedenle mühendislik malzemelerinin mekanik özelliklerini incelerken uygulanacak olan yükleme türünün ortaya konması gerekir. Malzemelerde yükleme durumuna bağlı olarak kırılma üç şekilde meydana gelir.

### **1.13. Kırılma Modelleri**

Kırılma model çeşitleri;

Çatlak açılma deformasyon tipi (Mode I)

Çatlak kayma deformasyon tipi (Mode II)

Çatlak yırtılma deformasyon tipi (Mode III) olarak tanımlanır.

#### **1.13.1. Çatlak Açılma Deformasyon Tipi (Mode I)**

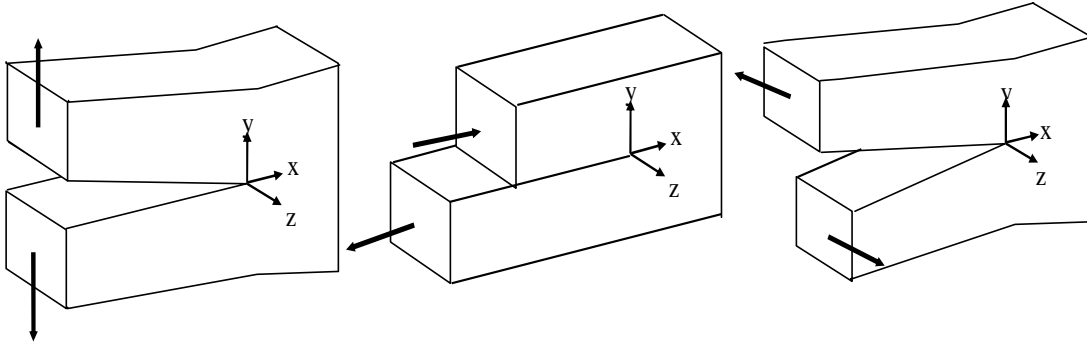
Şekil 1.17.a da görüldüğü gibi Mode I deformasyon tipinde, gerilmenin normal bileşeni, çatlak yüzeyine dik olarak y eksenini doğrultusunda etki etmektedir

#### **1.13.2. Çatlak Kayma Deformasyon Tipi (Mode II)**

Şekil 1.17.b de görüldüğü gibi Mode II deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla x eksenini doğrultusunda etki etmektedir.

### 1.13.3. Çatlak Yırtılma Deformasyon Tipi (Mode III)

Şekil 1.17.c de görüldüğü gibi Mode III deformasyon tipinde, gerilmenin kayma bileşeni, çatlakla z eksenine doğrultusunda, çatlakın dip kenarına paralel olarak etki etmektedir.



Şekil 1.17. Kırılma Modelleri a) Mod I tipi b) Mod II tipi c) Mod III tipi

Yüklemeye türüne bağlı olarak gerilme şiddet faktörü doğru hesaplanması içerisinde çatlak bulunduran yapılar için önemlidir. Bu üç kuvvet uygulama yöntemleri arasında açılma deformasyon türü en sık karşılaşılan kırılma modudur. [65]

Gerilme şiddet faktörünün doğru hesaplanması çatlak içeren yapılar için büyük önem arz etmektedir. Bunun için geliştirilmiş olan değişik metotlar vardır.

### 1.14. Gerilme Şiddet Faktörü (K) ve Elde Etme Metotları

Dış kuvvet ya da iç kuvvet etkisi altındaki bir parçada gerek eleman iç kısımlarında gerekse eleman kenarlarında süreksizlik ya da çentik bulunabilmektedir. Ayrıca yine kuvvet etkisi altındaki bir elemanın kesitinde yavaş veya ani bir kesit değişimi olabilmektedir. Aynı zamanda parçanın imalatı sırasında çatlak, boşluk, süreksizlik gibi küçük boşluklar oluşabilmektedir. Parçada bulunan çatlak, boşluk benzeri küçük boşluklar çentik etkisi oluşturmaktadır. Böyle bir durumda eleman üzerindeki kuvvetten dolayı oluşan gerilmeler parçanın her yerinde üniform olarak değişmemektedir. Parçada süreksizliklerin bulunduğu yerlerde meydana gelen gerilme ortalama gerilmenin üzerinde olmaktadır. Bazı bölgelerde gerilme maksimum değere ulaşmaktadır. Gerilme değerlerinin ortalama gerilmenin üzerine

çıkarak maksimum değere ulaşmasına gerilme yığılması denilmektedir. Gerilmenin maksimum noktaya ulaşmasına çentik etkisi de denilebilmektedir.

Mühendislik parçalarının mukavemet hesaplamaları esasen elastisite teorisini temel almaktadır. Eğer akma sınırı aşılsa plastik deformasyon oluşmaktadır ve çok daha karmaşık olan plastisite teorisi kullanılmaktadır. Gerilme yığılmasının maksimum olduğu durumlar için şöyle bir formül kullanılmaktadır [65, 69, 96].

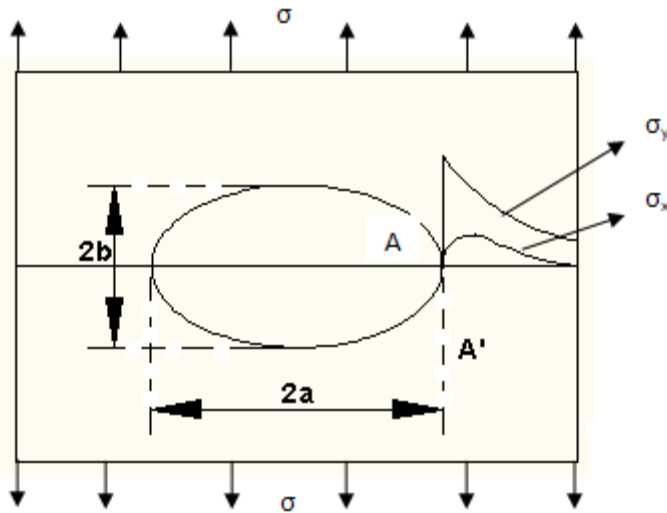
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{ort}} \quad (1.1)$$

$K_t$  : Gerilme yığılma katsayısı

$\sigma_{max}$  : Parçada oluşan maksimum gerilme

$\sigma_{ort}$  : Parçada oluşan ortalama gerilme

İçerisinde elips biçiminde bir delik bulunan sonsuz büyüklükteki bir levhanın gerilme dağılımı Inglis tarafından incelenmiştir (Şekil 1.18). Gerilme analizi gerçekleştirilirken kullanılan elastisite teorisini temel alan analitik çözümler burada detaylı bir biçimde gösterilmemiştir. Analiz çeşitli kitaplarda bulunmaktadır [91-92]. Sonuç olarak A noktasında oluşan maksimum gerilme şu şekilde ifade edilmiştir.



Şekil 1.18. Üniform Gerilme Yüğü Altındaki Eliptik Delik İçeren Bir Plaka[95]



$$\sigma_{max} = \sigma \left[ 1 + \frac{2a}{b} \right] = \sigma \left[ 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right] \quad (1.2)$$

$$K_t = \left[ 1 + \frac{2a}{b} \right] = \left[ 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \right] \quad (1.3)$$

Çatlak başlangıç ömrü çok büyük ölçüde Denklem1.3'te elde edilmiş olan gerilme yığılma katsayısı ( $K_t$ ) değerine bağlıdır.

Çatlak başlangıç periyodunu çatlak ilerlemesi takip etmektedir. Çatlak başlangıcı gerçekleştikten sonra gerilme yığılma katsayısı ( $K_t$ ) çatlak ucundaki gerilme dağılımı büyüklüğü için faydalı bir durum olmayacaktır. Çünkü çatlak da uç yarıçapı sıfıra eşit olan bir çentiktir yani Denklem1.3'te  $b = 0$  durumu söz konusudur ve böyle bir durumda gerilme yığılma katsayısı olan  $K_t$  sonsuza gitmektedir. Bu durum da herhangi bir çatlak uzunluğu için doğru olmayacaktır.  $b = 0$  Olmasının sebebi; elipsin yarıçapı değişken  $\rho$ , çatlağın uzunluğu  $a$  ve çatlağın derinliği  $b$  olduğunda geometrik bağıntıdan  $b = 0$  olmakta ve böylece  $K_t$  'nin sonsuza gitmesidir.

Çatlak ucunda gerilme dağılımı büyüklüğünü gösteren yeni durum gerilme şiddet faktörüdür( $K$ ). Bu durum Irwin modelinden geliştirilmiştir [69]. Geliştirilmiş olan gerilme şiddet faktörünün ( $K$ ) formülü Denklem1.4'te verilmiştir.

$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1.4)$$

$K$ : Gerilme şiddet faktörü

$\beta$ : Parça geometrisine bağlı sabit bir katsayı

$\sigma$ : Parçaya uygulanan gerilme

$a$ : çatlak yarı uzunluğu

Gerilme şiddet faktörü ( $K$ ) değeri temel olarak elastik durum için geçerlidir.

Kırılma analizinde çatlak ucu boyunca (K) gerilme şiddet faktörünü elde etme yöntemleri teorik, nümerik, deneysel olmak üzere üç ana başlık altında toplamak mümkündür.

#### **1.14.1. Teorik Metotlar**

Teorik metotlar basit çatlak geometrileri ve sınır şartları ile kısıtlanmaktadır [70]. Teorik metotlar Airy gerilme fonksiyonlarının farklı formatta yazılmış durumlarıdır [71].

İki farklı teorik gerilme şiddet faktörü elde etme metodu vardır. Bunlar;

Komplex Potansiyeller Metodu

Westergard Metodu

Mod-I çatlakları için Westergard Metodunun kullanılması uygundur. Westergard metodunun tam olarak doğru olmadığı Sih [72] ve Eftis ve Liebowitz [73] tarafından gerçekleştirilen çalışmalar ile gösterilmektedir ancak bu durum tekil gerilme durumlarını etkilememektedir [74].

#### **1.14.2. Nümerik Metodlar**

İki farklı nümerik gerilme şiddet faktörü elde etme metodu vardır. Bunlar

##### **1.14.2.1. Green fonksiyonu metodu**

Green fonksiyonu metodu Çatlaksız yapıdan elde edilecek olan çatlak bölgesindeki gerilmeler kullanılarak gerilme şiddet faktörleri değerleri hesaplanabilmektedir. Çatlak yüzeyindeki tekil bir kuvvet yüklemesinden elde edilmiş olan gerilme şiddet faktörü formülasyonunu çatlak yüzeyindeki herhangi bir yükleme veya gerilme profiline uygulayabilmek için kullanılan bir metottur.

### 1.14.2.2. Sonlu elemanlar metodu

Sonlu elemanlar metodunda yapı, sürekli ortam veya problemin bölgesinin sonlu boyutta çok sayıda elemana ayrıldığı tasavvur edilmektedir. Metodun ismi de bu sebeple sonlu elemanlar metodu olarak adlandırılmaktadır. Sonlu elemanların kırılma mekaniğine uygulamasında çeşitli metotlar vardır. Bu metotlar

Domain integral metodu

J integrali metodu

Zenginleştirilmiş sonlu eleman metodudur.

#### Domain integral metodu

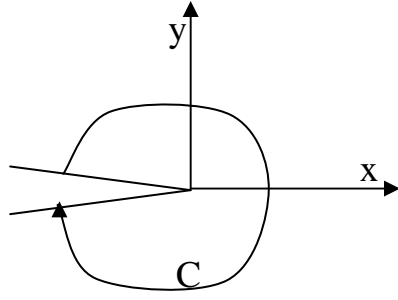
Domain integral metodu, bilinen şekil fonksiyonlarını kullanarak kolayca hesaplanabilen çizgi integralin, bir domain integrale dönüştürülmesi ile hesaplanmış olan J integrali enerji salıverme oranı hesaplanması için kullanılan metottur.

#### J integrali metodu

J integrali çatlak ilerlemesinin başlamasını tanımlamaktadır. Elasto-plastik kırılma mekaniğinde kırılma tokluğunu tespit etmede kullanılan en önemli metodlardan birisidir. Plastik şekil değiştirme lineer-elastik kırılma mekaniğinin (LEFM) kullanılmayacağı kadar büyüdüğünde J integrali kullanılmaktadır.

Plastik şekil değiştirme sırasında gerilme-gerinim ilişkileri lineer değildir. Kırılma öncesi yüksek plastik şekil değiştirmesi ile birlikte geometri değişiklikleri oluşmaktadır. Çözüm olarak, çatlak ilerlemesinin başlaması ile çatlak ilerlemesinin ayrı ayrı incelenmesi çözümü bulunmuştur.

Bu metodun esası, iki boyutlu çatlak problemlerinde çatlak ucunu çeviren bölgede genleme enerji yoğunluğu ve iş terimleri seçilecek çatlak uzunluklarına sahip numunelere ait yük-uzama diyagramlarının karşılaştırılmasıdır. Başka bir deyişle, bu yöntem çatlak boyu ve gerilmeyi depolanan plastik enerjiye bağlamaktadır.



Şekil 1.19. İntegral Konturu

J integral metodunun temel formülasyonu

$$J = \int_C \left( W dy - \vec{T} \cdot \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} ds \right) \quad (1.6)$$

C: Çatlağı saran herhangi bir yön

W: Genleme enerjisi yoğunluğu

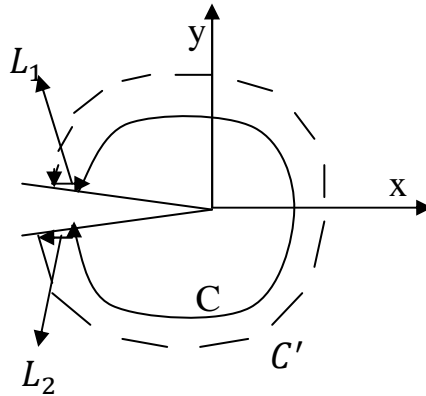
T: C boyunca n normali doğrultusunda oluşan çekme vektörü

u: Şekil değişimi vektörü

ds: Ark boyu

Burada  $W$  birim hacmin yaptığı iş olup elastik alandaki gerilme yoğunluğu olarak da tarif edilebilir ve şu bağıntı ile verilir.

$$W = \int_C \sigma d\varepsilon \quad (1.7)$$



Şekil 1.20. Çatlak Ucu C ve C' Konturları

Kontur kapalı olduğundan konturun  $L_1$  ve  $L_2$  kısımlarında  $dy = 0$  ve  $\vec{T} = 0$  olacağından integral sifıra eşit olacaktır. Bu da C konturunun nereden çizilirse çizilsin yüke ve çatlak uzunluğuna bağlı bir fonksiyon bulunduğunu göstermektedir.

Ayrıca, J integrali çatlak ilerlemesi için kullanılabilen enerji ile de bağlantılıdır. J integrali aynı yük altında iki parça arasındaki potansiyel enerji farkıdır [66].

### Zenginleştirilmiş sonlu elemanlar metodu

Zenginleştirilmiş sonlu elemanlar metodu çatlak ucu yakınında özel bölüntüye ve sonlu eleman çözümünün sonrasında işleme ihtiyaç duymadığından üç boyutta etkili ve hassas kırılma analizleri için cazip bir metottur. Zenginleştirilmiş elemanlar için yer değiştirmeler aşağıdaki gibidir.[95]

$$\begin{aligned}
 u(\xi, \eta, \rho) = & \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) u_j + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( f_u(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) f_{uj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_I^i \right) \\
 & + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( g_u(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) g_{uj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{II}^i \right) \\
 & + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( h_u(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) h_{uj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{III}^i \right)
 \end{aligned}
 \tag{1.8}$$

$$\begin{aligned}
 v(\xi, \eta, \rho) = & \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) v_j + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( f_v(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) f_{vj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_I^i \right) \\
 & + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( g_v(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) g_{vj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{II}^i \right) \\
 & + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( h_v(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) h_{vj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{III}^i \right)
 \end{aligned}
 \tag{1.9}$$

$$\begin{aligned}
 w(\xi, \eta, \rho) = & \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) w_j + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( f_w(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) f_{wj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_I^i \right) \\
 & + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( g_w(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) g_{wj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{II}^i \right) \\
 & + Z_0(\xi, \eta, \rho) \left( h_w(\xi, \eta, \rho) - \sum_{j=1}^m N_j(\xi, \eta, \rho) h_{wj} \right) \left( \sum_{i=1}^{ntip} N_i(\Gamma) K_{III}^i \right)
 \end{aligned}
 \tag{1.10}$$

Sonlu eleman denklemlerinden zenginleştirilmiş çatlak elemanları fonksiyonunda polinomik olmayan yer değiştirmeleri ve tekil gerilme kavramlarını içerdiği elde edilebilmektedir.[75].

## **BÖLÜM 2. MODELLEME VE ANALİZLER**

### **2.1. Giriş**

Bu bölümde, termal şok deneyine tabi tutulan deney numunesi ile türbin palesinin, bilgisayar ortamında modeli hazırlanmıştır. Bilgisayar destekli (CAD) modelleri yardımıyla sonlu eleman modelleri (FEM) oluşturulmuştur. Modeller termal analizlere tabi tutulmuştur. Daha sonra termal analizlerden elde edilen sıcaklıklar altında yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Pale modeline farklı malzemeler uygulanarak yapılan analizler sonucunda hangi kaplama malzemesi uygulandığında ana malzemenin daha az hasar gördüğü tespit edilmiştir.

### **2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi**

Mühendislik problemlerinin çözümünde, çoğunlukla analitik yöntemler ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaktadır. Herhangi bir problem analitik olarak çözülebiliyorsa, o problem için analitik yöntem en iyi yoldur. Ancak mühendislik problemlerinin birçoğunun analitik yöntemlerle çözülmesi mümkün olmamaktadır. Böyle durumlarda sonlu elemanlar metodu alternatif çözüm olarak kullanılmaktadır.

Ancak sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yaklaşık sonuçlar elde edilebilir. Bu sonuçların doğruluk oranı ise kullanılan eleman tipi ve mesh yapısı ile doğrudan alakalıdır. Doğru eleman tipi kullanarak ve uygun bir mesh yapısı ile gerçek sonuca çok yakın sonuçlar elde edilebilir. Bu da modelin kurulması esnasında kullanılan verilerin doğruluğu ile sağlanabilir[78].

CAD/CAM/CAE(bilgisayar destekli tasarım, imalat ve mühendislik uygulamaları) programlarıyla özellikleri bilinen tüm malzemelerin tel kafes, katı ve yüzey modeli oluşturulabilir ya da endüstriyel tasarım uygulamaları yapılabilmektedir.

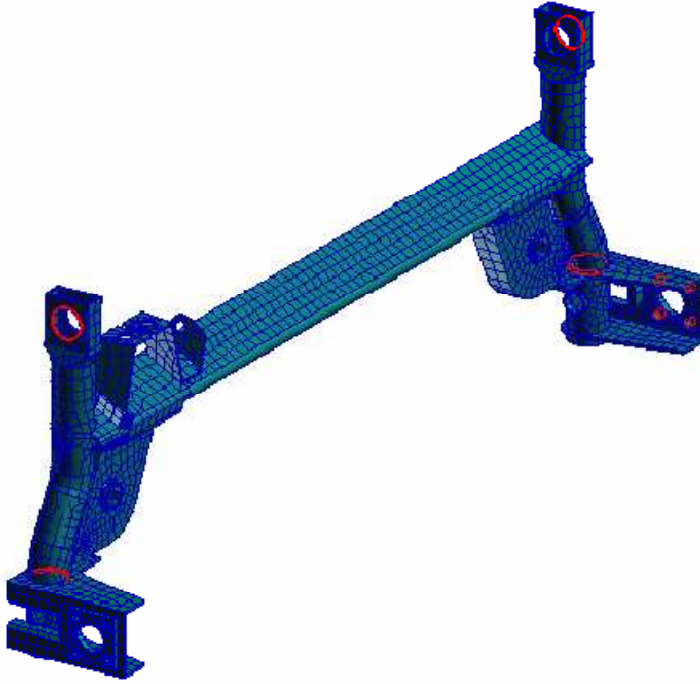
Yapılan katı modele bağımlı imalat resimleri, üretim sürecindeki değişiklikleri kolaylaştırması açısından çok önemlidir. Katı modelleme programlarından direk olarak alınabilen modeller ise sonlu elemanlar metodunda zamandan tasarruf ve daha detaylı modelleme imkânları sunmaktadır. Böylece sonlu eleman modelinin uygun bir şekilde elde edilme süreci kolaylaşmaktadır.

Sonlu elemanlar metodu; karmaşık olan problemlerin daha basit alt problemlere ayrılarak her birinin kendi içinde çözülmesiyle tam çözümün bulunduğu bir çözüm şeklidir. Metodun üç temel niteliği vardır: *İlk* olarak, geometrik olarak karmaşık olan çözüm bölgesi sonlu elemanlar olarak adlandırılan geometrik olarak basit alt bölgelere ayırır. *İkincisi*, her elemandaki sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. *Üçüncü* kabul ise, aranan değerlerin her eleman içinde sürekli olan tanım denklemlerinin belirli noktadaki (düğüm noktaları) değerleri elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır.

Kullanılan yaklaşım fonksiyonları interpolasyon teorisinin genel kavramları kullanılarak polinomlardan seçilir. Seçilen polinomların derecesi ise çözülecek problemin tanım denkleminin derecesine ve çözüm yapılacak elemandaki düğüm sayısına bağlıdır[79].

Sürekli bir ortamda alan değişkenleri (gerilme, yer değiştirme, basınç, sıcaklık vs.) sonsuz sayıda farklı değere sahiptir. Eğer sürekli bir ortamın belirli bir bölgesinin de aynı şekilde sürekli ortam özelliği gösterdiği biliniyorsa, bu alt bölgede alan değişkenlerinin değişimi sonlu sayıda bilinmeyen olan bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Bilinmeyen sayısının az ya da çok olmasına göre seçilen fonksiyon lineer ya da yüksek mertebeden olabilir. Sürekli ortamın alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösteren bölgeler olduğundan, bu bölgelere ait alan denklem takımları birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden denklem takımı elde edilir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortamdaki alan değişkenleri sayısal olarak elde edilir[79]. Şekil 2.1'de bir otomobil arka dingilinin tipik düğüm ve elemanlardan oluşmuş sonlu eleman modeli görülmektedir.





Şekil 2.1. Otomobil arka dingilinin sonlu eleman modeli

Sonlu elemanlar metodu ile problem çözümünde kullanılacak olan yaklaşım çözüm metodu, izlenecek yolu değiştirmez. Çözüm yöntemindeki adımlar şunlardır[79]:

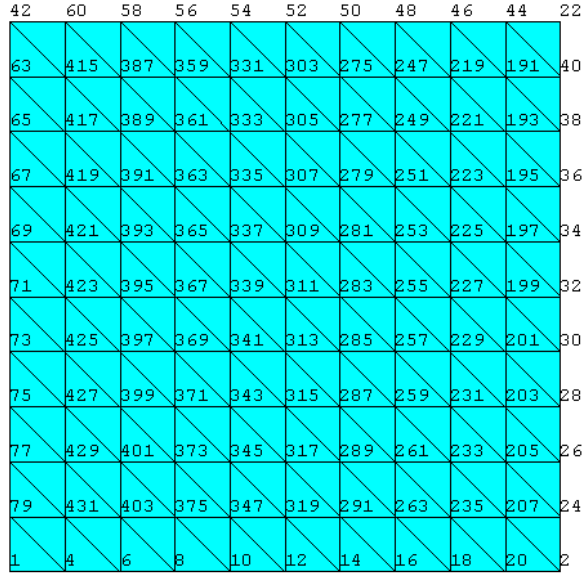
- Cismin sonlu elemanlara bölünmesi,
- İnterpolasyon fonksiyonlarının seçimi,
- Eleman rijitlik matrisinin teşkili,
- Sistem rijitlik matrisinin hesaplanması,
- Sisteme etki eden kuvvetlerin bulunması,
- Sınır şartlarının belirlenmesi,
- Sistem denklemlerinin çözümü.

Sonlu elemanlar metodunda analizi yapılacak olan cismin sonlu boyutta çok küçük elemanlara bölüdüğü varsayılır. Bir boyutlu cisimler düğüm noktalarıyla, iki boyutlu cisimler sınır çizgileriyle, üç boyutlu cisimler ise alanlarla bir birinden ayrılırlar. Bu ayırım biçimleri Şekil 2.2, 2.3 ve 2.4'de gösterilmiştir. Şekillerde düğüm noktaları numaralarla temsil edilmektedir. İki ve üç boyutlu cisimlerde eleman boyutları ya da eleman şekilleri bir birinden farklı olabilir. Düğüm noktaları ise sınır çizgilerinin kesişim noktalarında alınmaktadır. Bu ayırma işlemi sonucunda

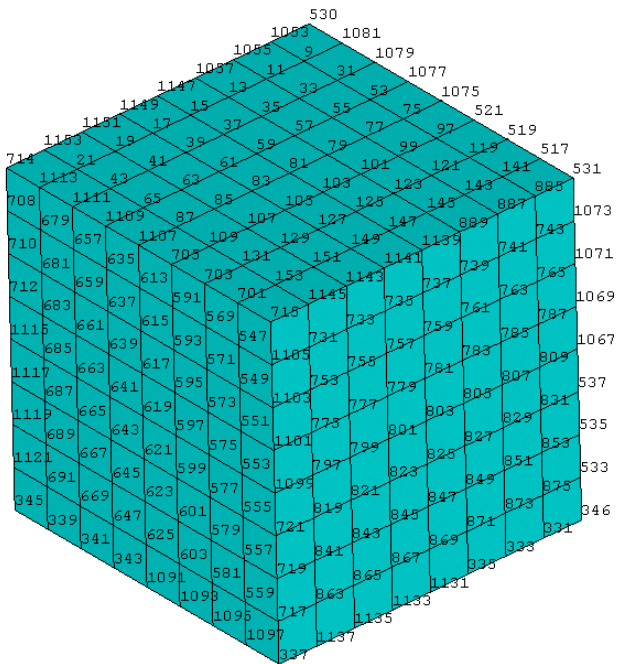
cisim, sonlu sayıda elemandan ve bunları bir birine bağlayan düğümlerden oluşan bir yapıya dönüşecektir[78, 80, 81, 94].

5 4 3 1 2

Şekil 2.2. Doğrusal sonlu elemanlara ayrılmış 1 boyutlu cisim



Şekil 2.3. Dörtgen sonlu elemanlara ayrılmış 2 boyutlu cisim



Şekil 2.4. Dikdörtgen prizma elemanlara ayrılmış 3 boyutlu cisim

Yukarıda belirtilen elamanlara bölünme durumu sonlu elemanların temelini teşkil etmektedir.

### 2.3. Isı Transferi

Sonlu eleman yöntemi, gerilme analizi, akışkanlar mekaniği, elektrik ve magnetik alanlarında kullanıldığı gibi ısı transferi problemlerinde de yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ele alınan bu problemler genellikle skaler ve vektörel alan problemleri olarak iki şekilde sınıflandırılır.[82] , [83].

Isı iletimi (kondüksiyon), bir maddenin parçacıklarının komşu parçacıklarla enerji alışverişidir. Bu alışveriş gazlarda molekül hareketleri, sıvılarda ve iletken olmayan katılarda molekül titreşimleri, iletken katılarda ise elektron hareketleri ile olur. Bundan dolayı elektriksel ve ısıl iletkenlikler arasında belirgin bir bağıntı vardır. Elektrigi en iyi ileten maddeler genellikle ısıyı da iyi iletirler. Taşınım ile ısı transferi, hareket halindeki bir ortam ile bir duvar arasındaki ısı alışverişidir. Konveksiyon akımı ya da bir makine aracılığı ile (vanitlatör, kompresör, pompa,vb.) meydana gelir. Kendiliğinden olana serbest, tabii veya doğal konveksiyon da denir. Makine aracılığı ile oluşan harekete de zorlanmış konveksiyon denmektedir. Cisimler birbirine dokunmadan ısı ışınımı (radyasyon) ile ısı transfer edebilirler. Bu durumda cisim ısı dalgası enerjisine çevrilerek diğer bir cisme nakledilir. Diğer cisimlerde dalga enerjisinin tekrar ısı enerjisine dönüşmesiyle ısı transferi tamamlanmış olur.

### 2.4. Fourier Kanunu

Bir cisimde sıcaklıkları aynı olan noktalar birleştirildiğinde, belirli bir sıcaklıkta bulunan bir düzlem elde edilir. Bu düzleme izoterm düzlem (eşsıcaklık düzlemi) denir. Cisim iki boyutlu olarak düşünüldüğünde bu düzlem bir çizgi halini alır ki, bu çizgi de izoterm eğrisi (eşsıcaklık eğrisi) olarak adlandırılır. [93]

Isı akımı yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru olduğundan, ısı akım şiddeti vektörü ile sıcaklık gradyanı vektörü ters işaretlendirilir. Bu durumda,

$$q = k(-gradT) = -kgradT \quad (2.1)$$

Eşitliği yazılabilir ve bu Fourier kanunu olarak adlandırılır.

x, y, z koordinatlarına göre fourier kuralı;

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad , \quad q = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad , \quad q = -k \frac{\partial T}{\partial z} \quad (2.2) \text{ şeklini alır.}$$

Bir Sonlu Eleman modelinin her birinde z adet düğüm bulunan M elemana bölünürse, bir eleman içindeki sıcaklık ve sıcaklık gradyanı aşağıdaki gibi gösterilebilir. [82,83]

$$T^e(x, y, t) = \sum_{i=1}^z N_i(x, y) T_i(t) \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial T^e}{\partial x}(x, y, t) = \sum_{i=1}^z \frac{\partial N_i}{\partial x}(x, y) T_i(t)$$

$$\frac{\partial T^e}{\partial y}(x, y, t) = \sum_{i=1}^z \frac{\partial N_i}{\partial y}(x, y) T_i(t) \quad (2.4)$$

Matris nütasyonunda ifade edilirse;

$$T^e(x, y, t) = [N(x, y)] \{T(t)\} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial T^e}{\partial x}(x, y, t) \\ \frac{\partial T^e}{\partial y}(x, y, t) \end{bmatrix} = [B(x, y)] \{T(t)\} \quad (2.6)$$

olur. Burada [N] sıcaklık interpolasyon matrisini, [B] ise sıcaklık gradyanı, sıcaklık dönüşüm matrisi olarak adlandırılır.  $T_i$  her düğümün sıcaklığı  $\{T_i(t)\}$ 'de eleman düğüm sıcaklıkları vektörüdür.

Sonuçta genel denklem ve eleman denklemleri aşağıdaki gibi olur.

$$[C] = \left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \right\} + [[K_c] + [K_h] + [K_r]] \cdot \{T\} = \{R_T\} + \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_h\} + \{R_r\} \quad (2.7)$$

Verilen her bir ifade sırası ile şu şekilde tanımlanır. [C] eleman kapasitans matrisi, [Kc], [Kh], [Kr] eleman ısı iletim matrisleri olup sırası ile iletim, taşınım, radyasyon şartlarını ifade etmektedir. Taşınım ve ışıyım matrisleri yalnızca yüzeyle ilgili sınır şartlarına maruz elemanlar için hesaplanır. {RT}, {RQ}, {Rq}, {Rh} ve {Rr} sırasıyla tanımlı düğüm sıcaklığı, iç ısı kaynağı, tanımlı yüzey ısı akışı, yüzey taşınımı, ve ışıyımdan kaynaklanan ısı yük vektörleridir.

Elde edilen bu genel ifade (2.7) ele alınan problemin durumuna göre çeşitli şeklerde düzenlenebilir. Bunlardan en çok karşılaşılan dört örnek aşağıda verilmiştir.

**a- Lineer kararlı hal ısı iletimi**

$$[[K_c] + [K_h]] \cdot \{T\} = \{R_Q\} + \{R_q\} + \{R_h\} \quad (2.8)$$

**b- Lineer geçişli hal ısı iletimi**

$$[C] \{T(t)\} + [[K_c] + [K_h(t)]] \cdot \{T(t)\} = \{R_Q(t)\} + \{R_q(t)\} + \{R_h(t)\} \quad (2.9)$$

**c- Nonlinear kararlı hal ısı iletimi**

$$[[K_c(T)] + [K_h(T)] + [K_r(T)]] \cdot \{T\} = \{R_Q(T)\} + \{R_q(T)\} + \{R_h(T)\} + \{R_r(T)\} \quad (2.10)$$

**d- Nonlinear geçişli hal ısı iletimi**

$$[C(T)] \{T\} + [[K_c(T)] + [K_h(T,t)] + [K_r(T)]] \cdot \{T\} = \{R_Q(T,t)\} + \{R_q(T,t)\} + \{R_h(T,t)\} + \{R_r(T,t)\} \quad (2.11)$$

Elde edilen bu genel denklemler çözülecek probleme göre yeniden düzenlenerek çözüm yapılır.

## İki Boyutlu Geçişli Isı İletimi İçin Sıcaklık Dağılımı

Lineer ısı transfer problemleri kararlı durum sıcaklıkları için;

$$[[K_c]+[K_h]].\{T\}=\{R_Q\}+\{R_q\}+\{R_h\} \quad (2.12)$$

Denkleminin çözümünü, geçişli sıcaklıklar için;

$$[C]\{T(t)\}+[[K_c]+[K_h(t)]].\{T(t)\}=\{R_Q(t)\}+\{R_q(t)\}+\{R_h(t)\} \quad (2.13)$$

Denkleminin çözümünü içerir ve her denklemin kullanıldığı yerde uygun başlangıç ve sınır şartları kullanılır.

Lineer kararlı şartlarda yapılan iletim problemlerinin nümerik çözümü özel zorluklar içermez. Bu tip problemler cebirsel diferansiyel denklemlerinin simetrik sistemi, Gaus Eliminasyon gibi standart yöntemler kullanılarak kolayca çözümlenebilir.

Lineer geçişli ısı iletim problemlerinin nümerik çözümleri için düzenli diferansiyel denklemlerin birinci dereceden düzenlenmiş halleri gereklidir. (2.13) eşitliği ele aldığımız sınır şartlarına göre yeniden düzenlenirse,

$$[C]\{T(t)\}+[[K_c]+[K_h(t)]].\{T(t)\}=\{R_h(t)\} \quad (2.14)$$

Şeklinde elde edilir. Yüzey film katsayısı yüzey sıcaklığına büyük bir bağlılık gösterdiğinden ilgili matris ve vektörün yüzey sıcaklığına bağlı olarak hesaplanması gerekmektedir. Bu arada sıcaklığa bağlı olarak değişen yoğunluk, özgül ısı ve iletim katsayısı gibi malzeme özelliklerinin de dikkate alınması gerekir. Türev sonlu farklar yaklaşımı ile (3.32) ifadesi,

$$[C]\left\{\frac{T_{n+1}-T_n}{\Delta t}\right\}+[[K_c]+[K_h(t)]].\{T_n\}=\{R_h(t)\} \quad (2.15)$$

Olur. Gerekli düzenlemeler yapılarak,

$$[C]\{T_{n+1}\} = \left[ [C] - \Delta t \cdot \left[ [K_c] + [K_h(t)] \right] \right] \{T_n\} + \Delta t \cdot \{R_h(t)\} \quad (2.16)$$

Eşitliği elde edilir. (3.18) denklemi farklı algoritmalar kullanılarak çözümü yapılabilir. (Crank-Nicolson Metodu, Galerkin Metodu, Geri Farklar Metodu). Biz bu denklemi Crank-Nicolson Algoritmasını kullanarak yeniden düzenlersek,

$$[K] = \left[ [K_c] + [K_h(t)] \right]$$

Olmak üzere,

$$\left[ [C] + [K] \frac{\Delta t}{2} \right] \{T_{n+1}\} = \left[ [C] - \frac{\Delta t}{2} \cdot [K] \right] \{T_n\} + \Delta t \cdot \{R_h(t)\} \quad (2.17)$$

Böylece yukarıdaki denklemden düğüm sıcaklıkları kolayca hesaplanabilir. Fakat Bu denklemin çözümünde dikkat edilmesi gereken en önemli husus zaman aralığı  $\Delta t$  belirlenmesidir. Bu zaman aralığı kritik zaman aralığından küçük olmalıdır [84].

Isı iletim problemlerinin çözümünde sonlu eleman yönteminin kullanılması düzensiz geometriler için kolaylık sağladığından yaygın olarak kullanılır. Fakat geçişli çözümlerde (zamana bağlı çözümlerde) zaman aralığının seçimi oldukça önemlidir. Çok büyük zaman aralığı anlamsız ve salınımlı bir çözüme götürdüğü gibi çok küçük zaman aralığı ise çözüm zamanı uzatmaktadır. Bu tanımlamaya göre alınabilecek en büyük zaman aralığı kritik zaman aralığıdır. ( $\Delta t$ ) ve uygun bir çözümde  $\Delta t \geq \Delta t_c$  olarak seçilmelidir. Yapılan çalışmalarda  $\lambda_n$  sisteminin en büyük değeri olmak üzere,

$$\Delta t_c = \frac{2}{\lambda_n}$$

Alınabilecek en büyük değer olduğu saptanmıştır [82]. Maksimum eşdeğerin ( $\lambda_n$ ), dolayısıyla kritik zaman aralığının belirlenmesinde, [C] ve [K] matrislerinin ve düğüm noktalarının termal özellikleri (k,c,h,p) ile ilk durum ve sınır şartlarının önemi büyüktür. Tüm bu koşullar göz önünde bulundurularak sistemin kritik zaman aralığı izoparametrik eleman için,

$$\Delta t_c = \frac{1}{2} M_{i=1}^z \ln \left[ \frac{C_i}{S_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^z |S_{ij}|} \right] \quad (2.18)$$

İfadesi ile hesaplanabilir.[2] Sonuç olarak (3.18) eşitliği yeniden düzenlenirse,

$$\{T_{n+1}\} = \left[ [C] + [K] \frac{\Delta t}{2} \right]^{-1} \left[ \left[ [C] - \frac{\Delta t}{2} \cdot [K] \right] \cdot \{T_n\} + \Delta t \cdot \{R_h(t)\} \right] \quad (2.20)$$

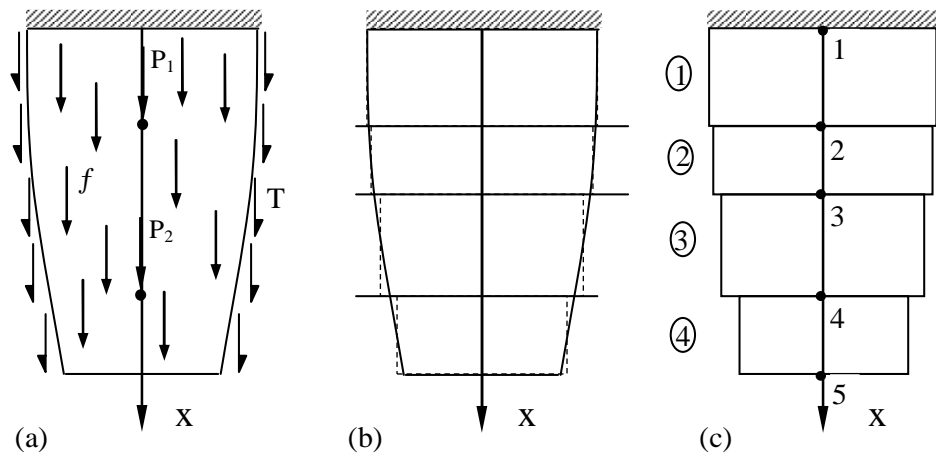
Elde edilir. Böylece  $\Delta t > \Delta t$  olduğu düşünülerek ve (3.20) eşitliği de kullanılırsa (3.21) denkleminin çözümünden elemanın düğüm noktalarının sıcaklıkları elde edilmiş olur.

Şekil 3.5'deki kademeli elemanın sonlu eleman modellemesinde, çubuk belirli sayıda sabit kesitli elemanlardan meydana gelmiş kademeli çubuk olarak ele alınmaktadır. Burada çubuğu dört eleman kullanarak modellenmektedir. Çubuk, Şekil 3.5-b'deki gibi dört bölgeye ayrılmaktadır. Bundan sonra her bir bölgenin ortalama kesit alanı bulunarak eleman tanımlamalarında bu değer kullanılmaktadır.

Çubuğun dört eleman ve beş düğümünden oluşan sonlu eleman modeli, Şekil 3.5-c'de gösterilmektedir. Şekil 3.5-c'de eleman numaraları, düğüm numaralarından ayırt edilmesi için yuvarlak içine alınmıştır. Şekilde görüldüğü gibi, kesit alanı, yüzey kuvveti ve kütle kuvvetleri her eleman için sabit olmaktadır. Doğal olarak kesit alanları ve kuvvetler şiddetleri bakımından elemandan elemana değişebilmektedir.



Yapılan analizin durumuna göre, eleman sayıları artırılarak daha iyi sonuçlar elde edilebilmektedir. Tekil yüklerin uygulanmış olduğu noktaların, düğüm noktası olarak seçilmesi gerekmektedir. Cisme etkiyen diğer kuvvetler de yalnızca düğüm noktalarından etki ediyormuş gibi ele alınmaktadır[79]. Düğümleri, elemanları bir birine bağlayan ve onları bir arada tutan, somun – cıvata bağlantısı gibi düşünmek mümkündür. Düğümlerin kaldırılması durumunda bütün elemanlar bir birlerinden ayrılırlar. Bu durumda komşu elemanlar arasında fiziksel bir süreksizlik meydana gelmektedir[78, 94].



Şekil 2.5. Kütleye kuvvetleri, yüzey kuvvetleri ve tekil kuvvetler altındaki çubuğun sonlu elemanlar modeli.

Tipik bir elemanın davranışını incelerken üniform bir kesite sahip katı modelin deformasyonunu incelemek gerekmektedir. Bu elemanın kesiti  $A$ , uzunluğu  $l$  ve maruz kaldığı kuvvet  $F$  olmaktadır. Bu durumda parçadaki ortalama gerilme  $\sigma$  aşağıdaki gibidir[85, 94]:

$$\sigma = F/A \quad (2.21)$$

Parçanın ortalama normal zorlanması  $\varepsilon$ , boydaki değişimin  $\Delta l$  orijinal boya  $l$  oranı olarak tanımlanmaktadır[85, 94].

$$\varepsilon = \Delta l/l \quad (2.22)$$

Elastik bölgede gerilme-zorlanma durumu ise Hooke kanunu ile belirlenmektedir [85, 94].

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.23)$$

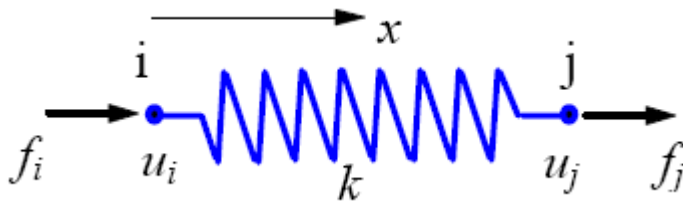
Bu denklemde belirtilen E malzemenin elastisite modülü olmaktadır.

$$F = \left(\frac{A \cdot E}{l}\right) \Delta l \quad (2.25)$$

Denklem (2.4), lineer yay denkleminde benzerdir ( $F = k \cdot x$ ). Üniform bir kesite sahip katı model, (**k**) sabiti olan yay şeklinde modellenmektedir[85, 86].

$$k = \frac{A \cdot E}{l} \quad (2.26)$$

Yay haline dönüştürülen elemanlar sonlu elemanlar metodu yardımı ile denklem sistemlerine dönüştürülürler. Aşağıdaki şekilde yay haline dönüştürülmüş bir eleman görülmektedir[80, 94].



Şekil 2.6. Yay elemanı[80]

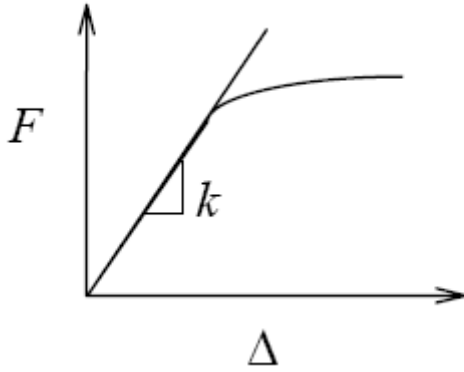
İki düğüm noktası	: i, j
Düğümelerin yer değiştirmeleri	: $u_i, u_j$
Düğümelerdeki kuvvetler	: $f_i, f_j$
Yay sabiti (rijitliği)	: k

Yayın kuvvet-yer değiştirme ilişkisi aşağıda verilmektedir.

$$F = k \cdot \Delta \quad (2.27)$$

$$\Delta = u_j - u_i \quad (2.28)$$

Aşağıdaki şekilde, lineer ve lineer olmayan durumlar için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi gösterilmektedir[80, 94].



Şekil 2.7. Lineer ve lineer olmayan durumlar için kuvvet-yer değiştirme ilişkisi

Aşağıda birim uzama oluşturması gereken kuvvet durumu verilmektedir[80].

$$k = \frac{F}{\Delta} > 0 \quad (2.29)$$

Yay için kuvvetlerin dengesi değerlendirildiğinde (i) düğümünde[80],

$$f_i = -F = -k(u_j - u_i) = ku_i - ku_j \quad (2.30)$$

(j) düğümünde,

$$f_j = F = k(u_j - u_i) = -ku_i + ku_j \quad (2.31)$$

Olmaktadır. Bu denklemler matris formunda yazıldığında ise[80],

$$\begin{bmatrix} k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ u_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ f_j \end{Bmatrix} \quad (2.32)$$

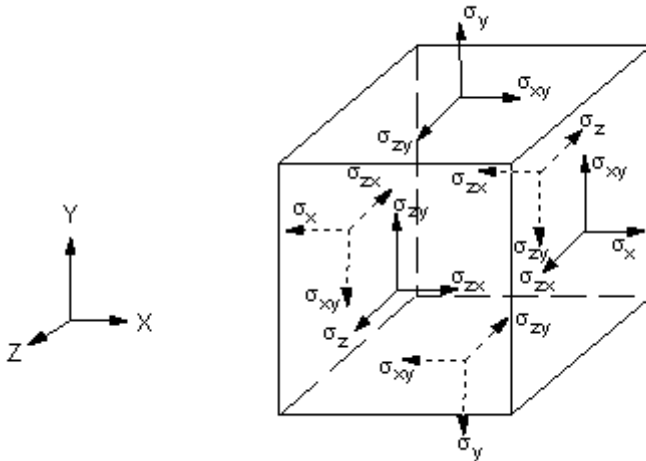
Elde edilmektedir.

Metodun çözümlenmesinde yukarıda belirtildiği gibi, cisimi oluşturan elemanların her birinin eleman rijitlik matrisini ifade etmektir. Daha sonra bu matrisler toplanarak cisme ait tümel rijitlik matrisini meydana getirirler. Bu toplama işleminde cismin sonlu eleman modelindeki bütün düğümlerde kuvvetlerin dengesi ve deformasyonların sürekliliği sağlanmalıdır[78]. Denklem sisteminin genel tanımlaması ise, aşağıdaki matris denklemi şeklinde olmaktadır:

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (2.33)$$

Belirtilen denklem yardımıyla, yer değiştirmeler hesaplanmaktadır. Yer değiştirmelerden ise, zorlanmalar ve gerilmeler hesaplanabilmektedir [78, 79, 80, 81]

Cisimlerin birim alanlarına etkiyen yüzey kuvvetleri, koordinat eksenlerine paralel olarak üç bileşene (X, Y, Z) ayrılmaktadır. Bu kuvvetler neticesinde ise normal ve kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Aşağıda eleman yüzeylerindeki gerilme durumunu veren şekil gösterilmektedir[87].



Şekil 2.8 Yüzeylerdeki gerilme durumu

Şekil 3.10'da belirtildiği gibi sürekli bir ortamda, bir noktadaki gerilme hali, dokuz bileşenli bir tansörle ifade edilmektedir. Bu tansör simetrik olup gerçekte altı bileşeni mevcuttur[81, 87, 88, 94]. Aşağıda bu tansör verilmektedir.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ : Normal gerilmeler

$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ : Kayma gerilmeleri

Bu tansörler matris hesabında aşağıdaki gerilme vektörü ile ifade edilmektedirler[72, 75].

$$\{\sigma^T\} = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}] \quad (2.35)$$

Sürekli bir ortamda, bir noktanın deformasyon hali, dokuz bileşenli bir tansörle ifade edilmektedir[81].

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & 1/2\gamma_{xy} & 1/2\gamma_{xz} \\ 1/2\gamma_{yx} & \varepsilon_y & 1/2\gamma_{yz} \\ 1/2\gamma_{zx} & 1/2\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ : Normal deformasyonlar(zorlanmalar)

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ : Kayma deformasyonları (zorlanmaları)

Normal zorlanma bileşenleri, sonsuz küçük mertebede çizgisel bir elemanın birim boyu başına düşen uzunluk değişimi olarak; kayma zorlanma bileşenleri ise, başlangıçta birbirine dik olan iki çizgisel elemanın arasındaki açı değişimi olarak tanımlanmaktadır. Zorlanma tansörü de gerilme tansörü gibi simetriktir ve altı bağımsız bileşeni aşağıdaki zorlanma vektörü ile gösterilmektedir[81].

$$\{\varepsilon^T\} = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, 1/2\gamma_{xy}, 1/2\gamma_{yz}, 1/2\gamma_{zx}] \quad (2.37)$$

En basit gerilme-zorlanma bağıntısı ‘‘Hooke Kanunu’’ dur ve gerilme bileşenlerinin zorlanma bileşenleri ile orantılı olduğunu ifade eder. Bu kanun bir boyutlu çubuklar için[87, 88];

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.38)$$

Eşitliği ifade edilmektedir. Burada E “elastisite modülüdür”. “Hooke Kanunu” üç boyutlu ortam için aşağıdaki gibi genelleştirilmiştir[81, 86].

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} \quad (2.39)$$

Burada [D] “malzeme matrisi” dir. “Hooke Kanunu” matris biçiminde ifade edilirse aşağıdaki durum ortaya çıkmaktadır.

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & \cdots & D_{16} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D_{61} & \cdots & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.40)$$

Verilen denklem sistemlerinin geliştirilmesi ile sonlu elemanlar metodunun temeli oluşturulmaktadır.

## 2.5. Sonlu Eleman Analizleri

Temel sonlu elemanlar teorisi farklı durumlar için uyarlanarak birçok konuda analiz yapılabilmektedir. Bazı ana başlıkları belirtmek gerekirse;

Yapısal analiz

Termal analiz

Akış analizi

Manyetik analiz

Elektrik analizi

Bu ana başlıklar kendi aralarında daha detaylı alt gruplara ayrılmaktadır. Bu çalışmada türbin kanadının termal ve yapısal analizi gerçekleştirilmiştir. Yapısal analizde türbin kanadının gerilme yığılması oluşan bölgeleri tespit edilerek.

Gerilmenin yığıldığı bölgelerde çatlak oluşacağı ön görülerek çatlak başlangıcı ve çatlak geometrisi oluşturulmuş ve çatlağın ilerlemesi saptanmıştır.

Sonlu elemanlar metodunda analiz edilen yapı belirli sayıda elemanlara bölünerek ağ oluşturulur. Her bir eleman birbirine düğüm noktaları ile bağlanır. Analiz şekline ve incelenen yapının geometrisine göre farklı eleman tipleri seçilebilir. Analiz sonucunda elde edilen gerilme, deplasman, sıcaklık, vb. bilgiler düğüm noktalarına aittir. Düğüm noktalarındaki bu bilgilerin ortalamaları alınarak elemana ait bilgiler elde edilir.

Elastisite teorisine göre bir cisimdeki gerilme durumu aşağıda belirtilen denge denklemlerini sağlamak zorundadır:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + b_x = 0 \quad (2.41)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + b_y = 0 \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + b_z = 0 \quad (2.43)$$

Burada  $b_x$ ,  $b_y$  ve  $b_z$  birim hacimdeki cisim kuvvetlerini (yerçekimi kuvveti gibi) ifade etmektedir. Doğrusal (lineer) elastik ve izotropik malzemeler için üç boyutlu gerilme-şekil değiştirme bağıntısı şu şekilde belirtilmektedir:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(1-2\nu) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} \quad (2.44)$$

Yukarıdaki ifade kısaca şu şekilde gösterilebilir:

$$\{\sigma\} = [E] \{\varepsilon\} \quad (2.45)$$

Şekil değiştirme-deplasman bağıntısı aşağıdaki gibi belirtilmektedir:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial yz} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} \quad (2.46)$$

Yukarıdaki ifade kısaca şu şekilde gösterilebilir:

$$\{\varepsilon\} = [D] \{\delta\} \quad (2.47)$$

İki boyutlu, düzlemsel gerilme durumunda;  $\partial z = \partial z x = \partial y z = 0$ . Bu durumda, gerilme-şekil değiştirme bağıntısı:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2.48)$$

şekil değiştirme-deplasman bağıntısı ise:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (2.49)$$

şeklinde ifade edilir.



Minimum potansiyel enerji teorisine göre, elastik bir cismin potansiyel enerjisi şu şekilde belirtilmektedir:

$$\Pi = U - W \quad (2.50)$$

U; şekil değiştirme enerjisini, W ise dış kuvvetlerin cisim üzerinde yapmış olduğu işi tanımlamaktadır.

Minimum potansiyel enerji teorisine göre bir cismin dengede olabilmesi için potansiyel enerjisinin minimum olması gerekir. O halde,

$$\delta\Pi = \delta U - \delta W = 0 \quad (2.51)$$

olmalıdır.

Doğrusal ve elastik bir cisim için şekil değiştirme enerjisi şu şekilde ifade edilir:

$$U = \frac{1}{2} \int_v \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dv = \frac{1}{2} \int_v \{\varepsilon\}^T [E] \{\varepsilon\} dv \quad (2.52)$$

Bir cisme dışarıdan etkiyen yükler üç ana grupta toplanabilir. Bunlar; yayılı yükler (basınç vb.), cisim kuvvetleri ve noktasal yüklerdir. Dış yüklemelerin cisim üzerinde yapmış oldukları iş şu şekilde ifade edilebilir:

$$W = \int_v \{\delta\}^T \{b\} dv - \int_{S_1} \{\delta\}^T \{T\} dS_1 + \sum_{i=1}^l \{\delta_i\}^T \{P_i\} \quad (2.53)$$

Deplasman vektörü, şekil fonksiyonu cinsinden şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\{\delta\} = \begin{pmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{pmatrix} = [N]\{q\} \quad (2.54)$$

şekil değiştirme vektörü, düğüm noktalarının yer değiştirmesine  $\{q\}$  bağlı olarak şu şekilde gösterilebilir:

$$\{\varepsilon\} = [d][N]\{q\} = [B]\{q\} \quad (2.55)$$

Gerilme vektörünün düğüm noktalarının fonksiyonu olarak gösterimi ise;

$$\{\sigma\} = [D]\{\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}\} = [D][B]\{q\} - [D]\{\varepsilon_0\} \quad (2.56)$$

Burada,  $\varepsilon_0 = \{\alpha\Delta T, \alpha\Delta T, 0\}^T$ ,  $\alpha$ ; ısı genleşme katsayısı,  $\Delta T$ ; sıcaklık farkıdır.

Bu durumda bir elemana ait şekil değiştirme enerjisi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D] [B] \{q\} dv - \int_{V^e} \{q\}^T [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dv \\ & - \int_{V^e} \{q\}^T [N]^T \{b\} dv - \int_{S_1^e} \{q\}^T [N]^T \{T\} dS_1 \end{aligned} \quad (2.57)$$

Yapıya ait toplam potansiyel enerji, her bir elemanın enerjisinin toplamıdır.

$$\Pi = \sum_{e=1}^E \Pi^e - \{Q\}^T \{F_C\} \quad (2.58)$$

Burada,  $\{Q\}$ , yapının yer değiştirme vektörü tanımlamaktadır.

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left[ \int_{V^e} [B]^T [D] [B] dv \right] \{Q\} \\ & - \{Q\}^T \sum_{e=1}^E \left\{ \int_{V^e} [B]^T [D] \{\varepsilon_0\} dv + \int_{V^e} [N]^T \{b\} dv \right. \\ & \left. + \int_S [N]^T \{T\} dS \right\} - \{Q\}^T \{F_C\} \end{aligned} \quad (2.59)$$

Yukarıdaki ifadede;

$$[k] = \int_V [B]^T [D][B]dv \quad : \text{elemanın katılık matrisi}$$

$$\{f_i\} = \int_V [B]^T [D][\varepsilon_0]dv \quad : \text{elemanın sıcaklık kuvvet vektörü}$$

$$\{f_b\} = \int_V [N]^T \{b\}dv \quad : \text{eleman cisim kuvvet vektörü}$$

$$\{f_s\} = \int_S [N]^T \{T\}dS \quad : \text{eleman yüzey kuvvet vektörü}$$

Minimum potansiyel enerji teorisi yukarıda ifade edilen eşitliklerden sonra kısaca şu şekilde de ifade edilebilir:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{Q\}} = \{0\} \quad (2.60)$$

Yukarıdaki eşitlik kullanılarak,

$$[K]\{Q\} = \{F\} \quad (2.61)$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlik kullanılarak elemanların düğüm noktalarındaki deplasman değerleri ve reaksiyon kuvvetler elde edilir. İki boyutlu, üç düğüm noktasına sahip üçgen eleman için şekil fonksiyonu aşağıda belirtildiği gibidir. u, v deplasmanlarının eleman içerisinde lineer fonksiyon oldukları varsayımı ile şöyle ifade edilebilir:

$$u = b_1 + b_2x + b_3y, v = b_4 + b_5x + b_6y \quad (2.62)$$

$b_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 6$ ) sabittir.

Her bir düğüm noktasına ait deplasman şu şekilde gösterilir:

$$\begin{aligned}
u_1 &= b_1 + b_2x_1 + b_3y_1 \\
u_2 &= b_1 + b_2x_2 + b_3y_2 \\
u_3 &= b_1 + b_2x_3 + b_3y_3 \\
v_1 &= b_4 + b_5x_1 + b_6y_1 \\
v_2 &= b_4 + b_5x_2 + b_6y_2 \\
v_3 &= b_4 + b_5x_3 + b_6y_3
\end{aligned} \tag{2.63}$$

Yukarıda tanımlanan eşitlikler yeniden düzenlenerek aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \tag{2.64}$$

şekil fonksiyonları,  $N_i$ ,  $x$  ve  $y$ 'nin fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned}
N_1 &= \left(\frac{1}{2A}\right) \{(x_2y_3 - x_3y_2) + (y_2 - y_3)x + (x_3 - x_2)y\} \\
N_2 &= \left(\frac{1}{2A}\right) \{(x_3y_1 - x_1y_3) + (y_3 - y_1)x + (x_1 - x_3)y\} \\
N_3 &= \left(\frac{1}{2A}\right) \{(x_1y_2 - x_2y_1) + (y_1 - y_2)x + (x_2 - x_1)y\}
\end{aligned} \tag{2.65}$$

$A$ ; üçgenin alanını ifade etmektedir.

şekil değiştirme-deplasman bağıntısı;

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [B]\{q\} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} y_{23} & 0 & y_{31} & 0 & y_{12} & 0 \\ 0 & x_{32} & 0 & x_{13} & 0 & x_{21} \\ x_{32} & y_{23} & x_{13} & y_{31} & x_{21} & y_{12} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} \tag{2.66}$$

Yukarıda belirtilen şekil fonksiyonları başka bir biçimde de tanımlanabilir. Üçgen eleman üzerinde doğal koordinatlar tanımlanabilir ve şekil fonksiyonları bu koordinat sistemine göre yeniden ifade edilebilir.

$$N_1 = \xi, N_2 = \eta, N_3 = 1 - \xi - \eta \quad (2.67)$$

Yukarıdaki ifadenin tanımlanmasında  $N_1 + N_2 + N_3 = 1$  özelliğinden faydalanılmıştır.

$$\begin{aligned} x &= x_{13}\xi + x_{23}\eta + x_3 \\ y &= y_{13}\xi + y_{23}\eta + y_3 \end{aligned} \quad (2.68)$$

Burada  $x_{ij} = x_i - x_j$  ve  $y_{ij} = y_i - y_j$  ( $i, j = 1, 2, 3$ )

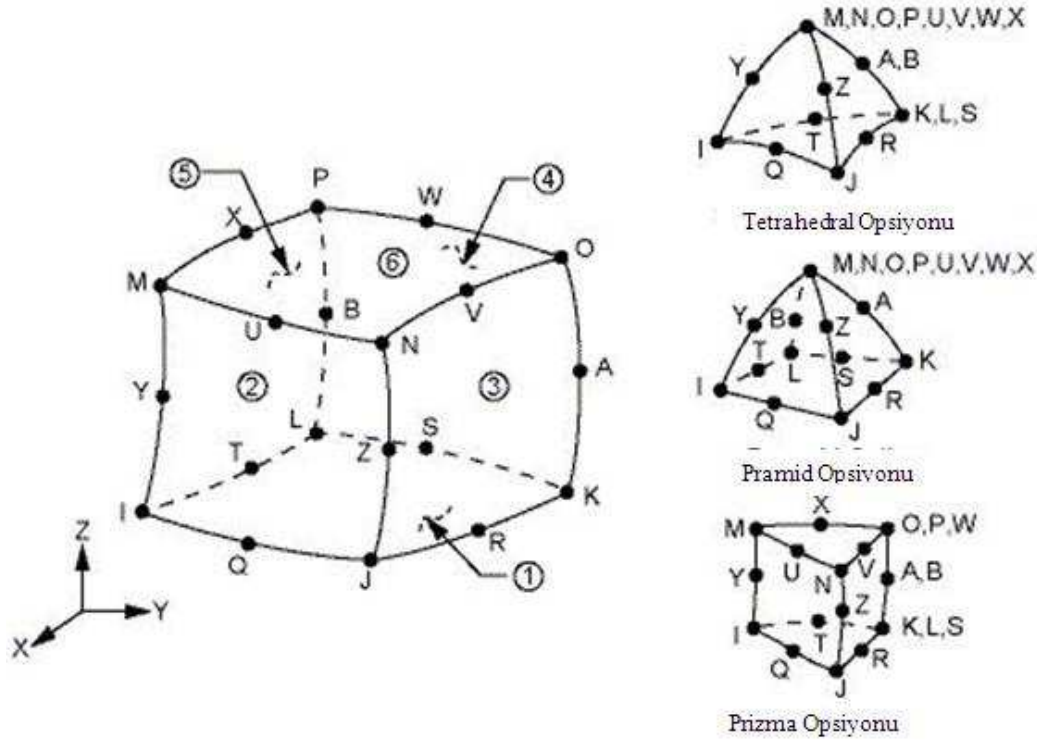
$$\begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial \xi} \\ \frac{\partial u}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix} = J \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (2.69)$$

Yukarıdaki ifadede J, Jacobian matrisidir [94].

### 2.5.1. Eleman tipi

Ansys programında, kabul edilebilir hata sınırları içerisinde bir çözüm yapabilmek için eleman tipinin doğru seçilmesi gerekmektedir. ANSYS' de farklı problemler için kullanılan, birçok eleman mevcut olup, her eleman ve her problem için uygun değildir.

Bu çalışmada, üç boyutlu bir modelleme yapıldığı için ve Pro\_ENGINEER tasarım programından, Ansys analiz programına direk katı aktarımı çok kolay olduğundan, solid eleman kullanılmıştır. Kullanılan bu eleman tipi termal analiz için solid-90 yapısal analiz için solid 186 olarak isimlendirilmektedir. Solid-90 ve solid-186 eleman tipi Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Solid-90 ve Solid 186 eleman tipi [88]

### 2.5.2. Malzeme modelleri

Sonlu elemanlar analizinde elde edilecek sonuçlar, seçilen malzeme modeline bağlı olarak büyük farklılıklar gösterebilmektedir. Kullanılan malzeme modeline bağlı olarak, kullanılan formülasyon ve sonuçta elde edilen deformasyon değerleri değişmektedir. Bunun nedeni ise değişik malzeme modellerinin farklı parametreleri dikkate alınması ve bazı faktörleri ise ihmal etmesidir. Bu nedenle ihmal edilecek faktörlerin ve ağırlık derecelerinin kullanıcı tarafından doğru olarak belirlenmesi ve buna bağlı olarak uygun malzeme modelinin kullanılması gerekmektedir[78, 88].

Analizlerde her malzeme kendi özellik ve davranışına göre farklı malzeme modelini kullanmaktadır. Çelik, lastik, köpük, beton, polimer, kompozit vb. malzemeler farklı yapıda oldukları için verecekleri tepkilerde değişik olmaktadır. Her malzemenin deformasyon şekli, hem yapısına hem de analiz tipine (statik, dinamik, çarpma, termal, manyetik vb.) göre değişiklikler göstermektedir. Bu sebeplerden dolayı malzeme modeli en önemli kısımlardan birini oluşturmaktadır. Analiz için öncelikle çalışmanın hangi aralıkta olacağı tespit edilmelidir (elastik, plastik deformasyon bölgesi). Bu aşamadan sonra malzemeyi en iyi tanımlayan malzeme modeli

seçilmelidir. Bu çalışmadaki türbin kanatçığının ısıtılıp soğutulması sürecinde, kanatçığın kaplama bölümünde, kalıcı deformasyonlar oluşacağı bilindiğine göre lineer ve elastik olmayan malzeme modellerinden uygun olanının kullanılması gerekmektedir. Aşağıda bu malzeme modellerinin bazıları belirtilmiştir.

### 2.5.2.1. İzotropik pekleşme modeli

İzotropik malzeme, bir malzemenin tüm yönlerde tüm özelliklerinin aynı olduğu durumu ifade etmektedir. İzotropik pekleşmede akma yüzeyinin boyutu büyümekte ve genişlemektedir; ama düzlemdeki merkezi aynı kalmaktadır[80]. Bu malzeme modelinde malzemenin gerilme-zorlanma davranışını tanımlamak için elastik ve plastik olmak üzere iki eğri mevcuttur. Bu malzeme modeli zorlanma parametrelerinden bağımsız olmaktadır[76, 78, 79].

Genelde sac metal şekillendirmesinde tüm form verme zamanının uzun olduğu koşullarda kullanılmaktadır[79]. Aşağıdaki Bilineer İzotropik (BISO) malzeme modellerinde sıcaklığa bağımlılık durumuna göre sınıflandırma yapılmıştır.

**Bilineer İzotropik(BISO) Model:** Gerilme-zorlanma davranışı, bir tek sıcaklığa göre belirlenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı ( $\nu$ ) ve Yoğunluk ( $\rho$ ) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak Akma Gerilme Değeri ( $\sigma_a$ ) ve Tanjant Modülü ( $E_t$ ) değerleri de girilebilmektedir[76, 78, 79].

**Sıcaklığa Bağlı Bilineer İzotropik Model:** Gerilme-zorlanma davranışı, altı farklı sıcaklığa kadar belirlenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı ( $\nu$ ), Yoğunluk ( $\rho$ ) ve Isıl Genleşme Katsayısı ( $\alpha$ ) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak Akma Gerilme Değeri ( $\sigma_a$ ) ve Tanjant Modülü ( $E_t$ ) değerleri de girilebilmektedir. Eğer bir sıcaklığa bağlı davranış belirlenirse Bilineer İzotropik model kabul edilmektedir[76].

### 2.5.2.2. Anizotropik pekleşme modeli

Anizotropik malzeme, bir malzemenin değişik yönlerde değişik özelliklerinin olduğu durumu ifade etmektedir. İki boyutlu elemanlar için uygun olmaktadır[76].

Anizotropik Pekleşme Modeli: Bu model, kabuk ve iki boyutlu elemanlar için kullanılmaktadır. Gerilme-zorlanma davranışı, bir tek sıcaklığa göre belirlenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı ( $\nu$ ), Yoğunluk ( $\rho$ ), Akma Gerilme Değeri ( $\sigma_a$ ), Tanjant Modülü ( $E_t$ ) ve Anizotropik Pekleşme Parametresi (R) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak efektif akma gerilmesi ile efektif plastik zorlanmae bağlı Yükleme Eğri Numarası (ID) girilmektedir[76].

Anizotropik -Şekillendirme Sınır Diyagramı(FLD)- Pekleşme Modeli: Bu model, anizotropik malzemelerin sac-metal simülasyonları için kullanılmaktadır. Bu modelde gerilme akışının bağımlılığı ile efektif plastik zorlanma, tanımlanmış yük eğrisi ile modellenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı ( $\nu$ ), Yoğunluk ( $\rho$ ), Akma Gerilme Değeri ( $\sigma_a$ ), Tanjant Modülü ( $E_t$ ) ve Anizotropik Pekleşme Parametresi (R) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak efektif gerilmeye bağlı Yükleme Eğrisi ve Şekillendirme Sınır Diyagramı -(FLD) girilmektedir[76].

### 2.5.2.3. Kinematik pekleşme modeli

Bu malzeme modelinde malzemenin gerilme-zorlanma davranışını tanımlamak için elastik ve plastik olmak üzere iki eğri mevcuttur[76].

Bilineer Kinematik(BKIN) Model: Gerilme-zorlanma davranışı, bir tek sıcaklığa göre belirlenmektedir. Bu malzeme modeli zorlanma parametrelerinden bağımsız olmaktadır. Bu model de akma yüzeyinin ebadı sabit kalmakta, fakat merkezi, düzlem üzerinde yer değiştirmektedir[80]. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü (E), Poisson Oranı ( $\nu$ ) ve Yoğunluk ( $\rho$ ) değerleri belirtilmektedir. İlave



olarak Akma Gerilme Değeri ( $\sigma_a$ ) ve Tanjant Modülü ( $E_t$ ) değerleri de girilebilmektedir[76].

Plastik Kinematik Model: Bu malzeme modeli, izotropik ve kinematik pekleşme modellerinin karışımıdır. Yani hem akma yüzeyinin ebadı, değişmekte; hem de merkezi, düzlemde yer değiştirmektedir[79]. İzotropik ve kinematik dağılımlar Pekleşme Parametresinin ( $\beta$ ), 0 (kinematik pekleşme) ile 1 (izotropik pekleşme) arasında ayarlanmasıyla değiştirilebilmektedir. Zorlanma oranı, gerilmeyi zorlanma oranına bağımlı faktör ( $\sigma_a$ ) ile ölçeklendiren Cowper—Symonds Modeliyle belirlenmektedir. Malzeme modeli tanımlanırken; Elastisite Modülü ( $E$ ), Poisson Oranı ( $\nu$ ), Yoğunluk ( $\rho$ ), Akma Gerilme Değeri ( $\sigma_a$ ) ve Tanjant Modülü ( $E_t$ ) değerleri belirtilmektedir. İlave olarak Pekleşme Parametresi ( $\beta$ ), Cowper-Symonds Zorlanma Oranı Parametreleri ( $C$ ,  $P$ ) ve Zorlanma Hasarı değerleri de girilmektedir. Bu modelde de gerilme-zorlanma davranışı, bir tek sıcaklığa göre belirlenmektedir[76].

İfade edilen modellerin haricinde daha pek çok malzeme modeli mevcuttur. Çalışmanın kapsamına göre bu modeller yeterli olmaktadır. Bu çalışma, kolaylık ve uygunluk bakımından katı model olarak meydana getirilmiştir.

Modeller değerlendirildiğinde; Anizotropik Pekleşme Modelleri kabuk ve iki boyutlu elemanlarda uygun olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı analiz modeli için uygun malzeme modeli değildirler. Termal gerilmeler lineer bir sıcaklık farkıyla oluşmaktadır. Bu değerlendirmeler sonucunda lineer İzotropik modelin çalışmaya daha uygun olduğu anlaşılmaktadır.

## 2.6. FCPAS Programı

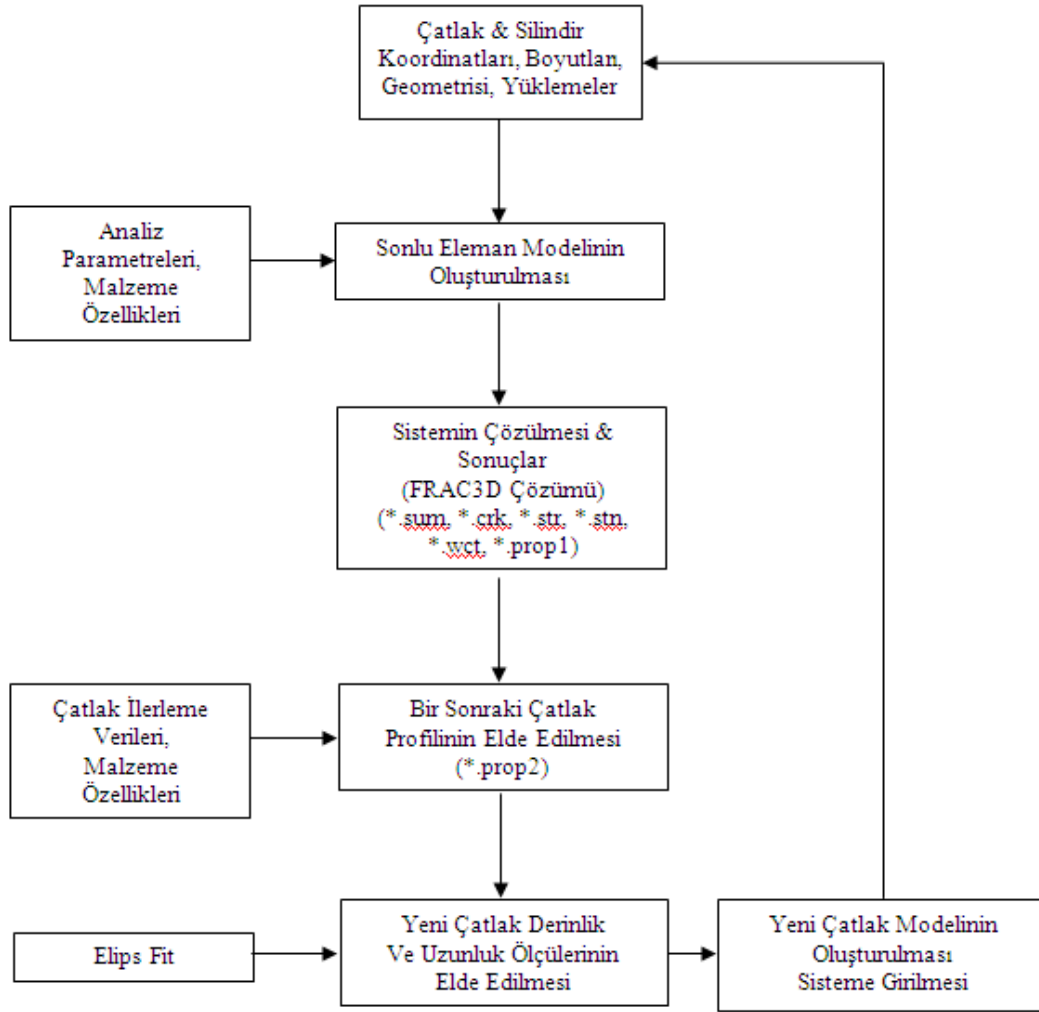
FCPAS, mühendislik malzemelerinin üç boyutlu biçimde kırılma analizleri ve plaka ile silindirik modeller için çatlak ilerleme analizi yapabilen, temelinde sonlu elemanlar yöntemine dayanan bir ara yüzdür. Ayrıca çatlak içermeyen modellere, istenilen konum ve boyutlarda çatlak yerleştirme işlemini gerçekleştirerek kırılma analizleri yapabilir. Üç boyutlu zenginleştirilmiş elemanların kullanılmasına ve gerilme şiddeti faktörü gibi önemli kırılma parametrelerinin çok etkili bir biçimde

hiçbir özel bölüntü ihtiyacı ve post-process çabası gerekmeden hesaplanmasına fırsat vermektedir.

## 2.7. FCPAS Programında Çatlak İlerleme Analizi

Çatlak ilerleme analizlerinde tekrarlı işlemlerin yapılması oldukça uzun zaman alan ve tekrar işlemleri esnasında hata yapılma ihtimali yüksek olan bir işlemdir. Ancak FCPAS programı içerisinde bulunan otomatikleştirilmiş çatlak ilerleme ara yüzü ile, kullanıcı istediği silindir çapı (D), silindir yüksekliği (H), başlangıç çatlağı uzunluğu (c), başlangıç çatlağı derinliği (a) bilgileri ile, istediği çatlak ucu boyunca bir adımdaki maksimum ilerleme miktarı ( $\Delta_{max}$ ), her bir maksimum ilerleme miktarı için çatlak ucu boyunca istenilen eleman sayısı ve yapılacak tekrar sayısı değerlerini girerek, termal yükü kontrollü, eliptik yüzey çatlağı içeren üç boyutlu silindirik bir çubukta çatlak ilerleme analizini rahatlıkla gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca, malzeme özellikleri olan elastisite modülü (E) ile poisson oranı ( $\nu$ ) değerleri ile malzeme sabitleri olan C ve n değerlerini, uygulanmasını istediği gerilme değerini ve de her maksimum ilerleme miktarı  $\Delta_{max}$  için çatlak ucu boyunca istenilen eleman sayısını kullanıcı kendisi belirlemektedir. [95]

FCPAS programının bu analizi kullanıcıya kolayca sağlama nedeni ise parametrik olarak yazılmış olan ANSYS makrosunun ve ayrıca ANSYS makrosunu her defasında elde edilen yeni çatlak boyutları ve kullanıcı istekleri ile çalıştıran büyük bir kod döngüsünün arka planda bulunmasıdır. Otomatikleştirilmiş makronun oluşturulması aşamasında ilk olarak belirli ölçülerde, değişken olmayan eliptik bir yüzey çatlağı içeren silindirik bir çubuk modeli için gerekli sınır şartları, yükler ve bölüntü oluşturulmuştur. Tüm bu işlemler sırasında her yapılan işlem komut olarak ANSYS programının List→Log File kısmından açılan metin dosyasındaki son yapılan işleme karşılık gelen komut alınarak sabit ölçülere ait bir makro oluşturulmuştur. Bir sonraki adımda ise sabit ölçülere sahip bu makro parametrik olarak, yani kullanıcının istediği herhangi bir çatlak-silindir boyutlarında ve malzeme özelliklerinde çalışabilir hale getirilmiştir. [95]. Çatlak ilerleme analizi genel işlem şeması Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Çatlak ilerleme genel işlem şeması

Bu çalışmada her çatlak ilerleme adımındaki gerilme şiddet faktörü değerlerinin bulunmasında zenginleştirilmiş sonlu elemanlar metodu ve bir sonraki çatlak ölçüleri bulunurken de Paris-Erdoğan denklemi esas alınmaktadır.

## 2.8. Çatlak İlerleme Modeli

Yorulma çatlak ilerlemesi birçok malzeme ve mühendislik yapısının yorulma ömrünün büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Yorulma ömrünün belirlenmesi için yorulma çatlak ilerlemesinin hassas bir şekilde tahmini önemlidir. Yorulma çatlak ilerlemesinin ana sorusu; bir çatlağın başlangıç çatlak derinliğinden maksimum izin verilebilen çatlak derinliğine ulaşması için gerekli olan  $N_{kr}$  kritik çevrim sayısının belirlenmesi ve  $N$  yükleme çevrimi ile çatlak uzunluğunun ilgili olduğu bu artış

formudur. Yorulma çatlak ilerlemesi analizinin en yaygın gerçekleştirildiği kural Paris Erdoğan kanunudur [89].

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (2.70)$$

$da$ : Belli bir çevrim sayısındaki çatlak ilerlemesi

$dN$ : Çevrim sayısı

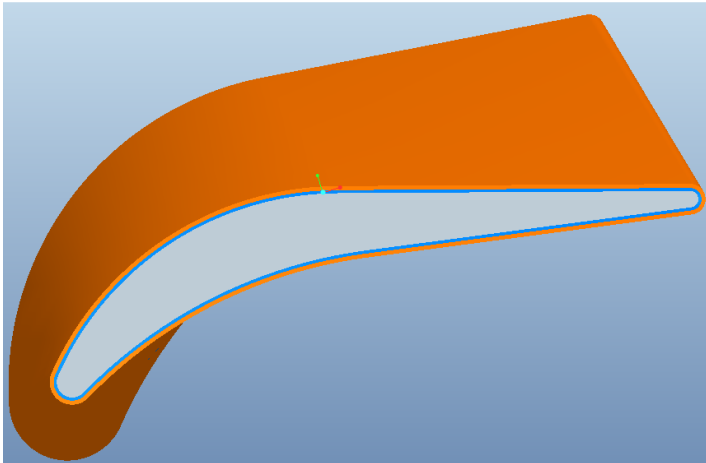
$C$ : Malzeme sabiti

$\Delta K$ : Gerilme şiddet faktörü genliği

$n$ : Malzeme sabiti

## 2.9. Deneysel Numunesi ve Türbin Kanadının CAD Modellerinin Oluşturulması

Deneysel numunesini basit bir geometriye sahip olması nedeniyle model ansys programında oluşturulmuştur. Ancak türbin kanatçığının karmaşık bir geometriye sahip olması nedeniyle kanatçıklar bir katı modelleme programında oluşturulmuştur. Tasarım programı olarak ProENGINEER Wildfire' dan faydalanılmıştır. Şekil 2.11' de oluşturulan türbin kanatçığının üzerine bağ tabakası ve kaplama tabakası uygulanmış halinin katı modeli görülmektedir.



Şekil 2.11. Türbin kanatçığı CAD modeli

Detaylı model, kanatçığın hangi bölgesinde nasıl bir durum olduğunu tam olarak anlayabilmek amacıyla yapılmıştır. Detaylı model sadece imalat için kullanılması uygundur. Modelin ağırlaşması, uygun ağ yapısını oluşturulamaması ve uygun çözüm yapılamaması nedeniyle sonlu eleman analizlerinde, detaylı model

kullanılmaması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı türbin kanatçığı, sonlu eleman analizlerine uygun olacak şekilde sadeleştirilerek modellenmiştir.

CAD modellerinde yapılan bu değişiklikler ile analizlerde kullanılacak olan türbin kanatçığı mesh yapısı için uygun şekilde hazırlanmış olmaktadır.

## **2.10. Türbin Kanatçığı Sonlu Eleman Analiz Modellerinin Oluşturulması**

Sonlu elemanlar analizinde mümkün olduğu kadar düzgün bir mesh yapısı olmalıdır. Bazı durumlarda serbest mesh yapısı ile de uygun sonuçlar elde edilebilmektedir. Yalnız serbest mesh yapısı basit analizler haricinde fazla tercih edilmemektedir. Bununla birlikte mesh yapısının eleman tipiyle yakın bir ilişkisi mevcuttur. Mesh yapılacak modelin geometrik yapısının, eleman tipinin mesh ile alabileceği geometrik opsiyonları ile uyumlu olması gerekmektedir. Örneğin katı modelin köşeleri, kenarları ve bağlantı noktaları geometrik elemanlara fazla şekil değişimi olmadan bölünebilmelidirler.

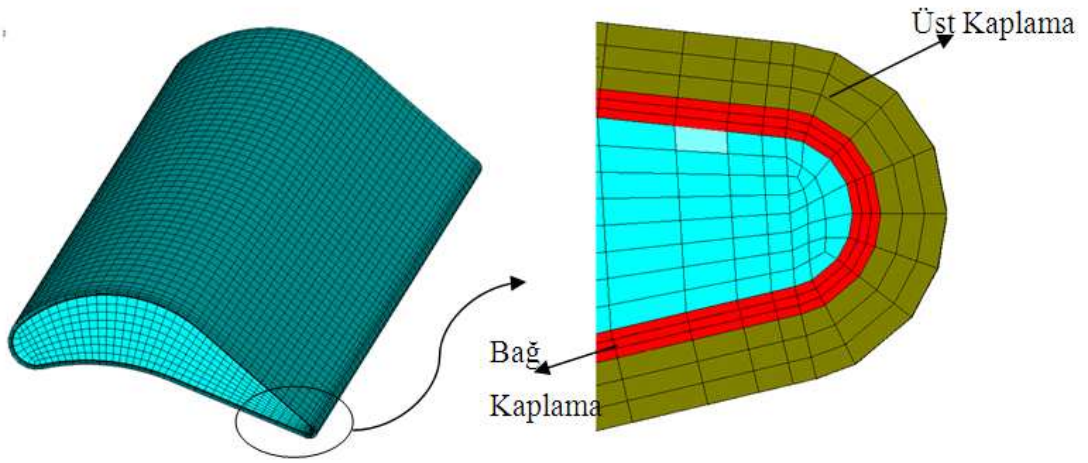
Bu çalışmada termal analiz için kullanılmış olan “solid-90” ve yapısal analiz için kullanılmış olan “solid-186” eleman tipi, en uygun sonucu, hegzagonal (altı yüzlü) şekilde (süpürme) sweep mesh yapılarak verebilmektedir. Bundan dolayı da, deney numunesi ve türbin kanatçığının katı modeli, bir montaj halinde altlık malzemesi bağ tabakası ve kaplama tabakasının birleştirilmesiyle ve eleman tipilerine uygun olarak (genelde hegzagonal elemanlara bölünebilecek şekilde) meydana getirilmişlerdir. ANSYS de ise bu ayrı parçalar birbirlerine yapııştırılmıştır. Birleştirilmiş sonlu eleman modelindeki tüm katı parçalar, girilen malzeme özellikleri ve eleman tipine göre sırayla ve düzgün bir şekilde mesh yapılır. Mesh’den sonra meydana gelen tüm düğüm noktalarına, termal ve yapısal analiz için gerekli tüm parametreleri girilir.

Sonlu eleman modelleri hazırlanan deney numunesi ve türbin kanatçığının eleman ve düğüm sayıları aşağıdaki tabloda verilmektedir.

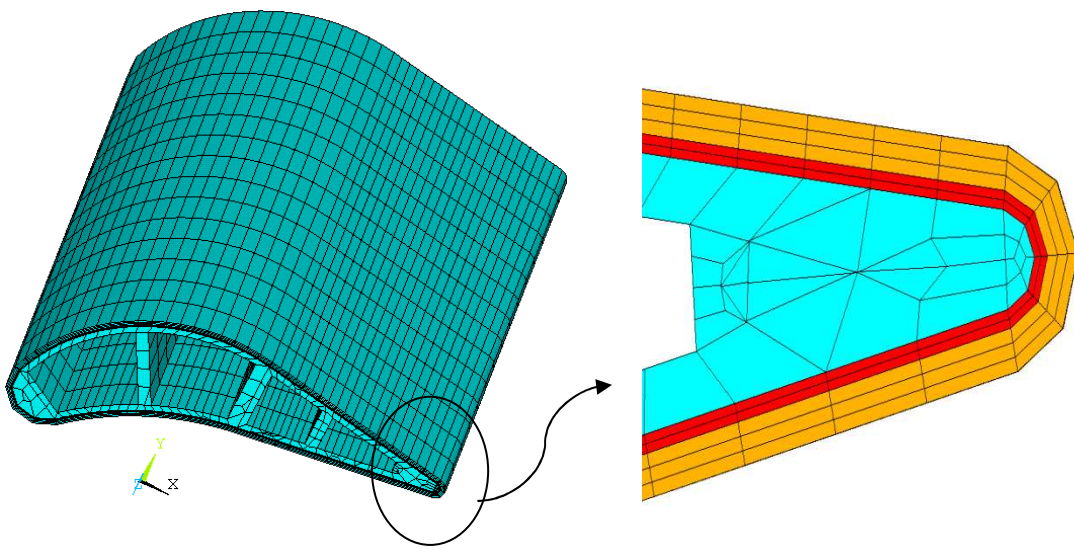
Tablo 2.1. Türbin kanatçığının sonlu eleman modellerindeki eleman ve düğüm sayıları

	Eleman Sayısı	Düğüm Sayısı
Deney Numunesi	5500	24223
Türbin Kanatçığı	60850	269522
Soğutma Kanallı Kanatçık	8490	40022

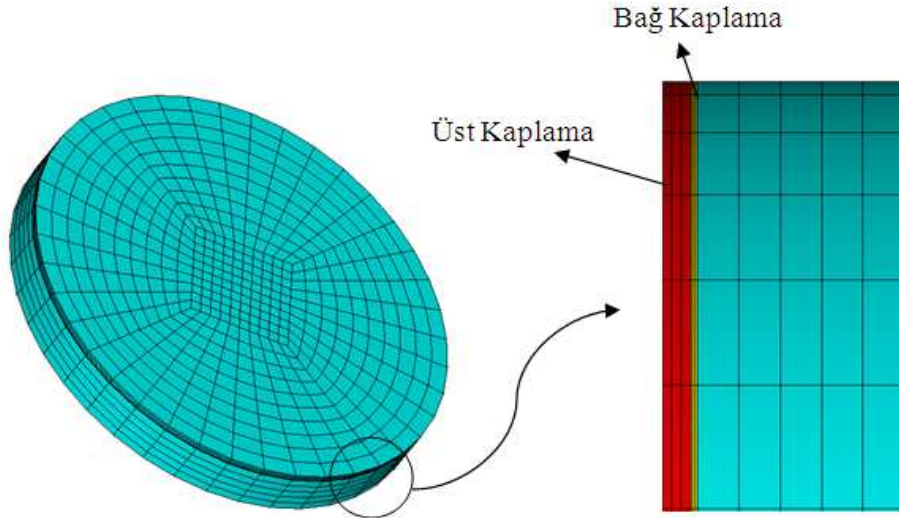
Aşağıdaki şekillerde deney numunesi ve türbin kanatçığının hazırlanmış sonlu elmanlar modeli görülmektedir.



Şekil 2.12. Türbin kanatçığının hazırlanmış sonlu elmanlar modeli



Şekil 2.13. Soğutma kanalları açılmış türbin kanatçığının sonlu elemanlar modeli



Şekil 2.14. Deney numunesinin sonlu elemanlar modeli

Model doğrulama çalışmaları deney numunesinde tamamlandıktan sonra, analizler için türbin kanatçığı modeline geçilmiştir. Türbin kanatçığı deney numunesinden alınan sıcaklık değerleri ile termal analize tabi tutulmuştur. Bu çalışma farklı kaplama malzemeleri için tekrarlanmıştır. Kaplama olarak YSZ, Mullit ve %40 YSZ %60 Mullit olmak üzere üç farklı malzeme kullanılmıştır. Bu malzemelerin özellikleri tablo 2.4 ve 2.5 te verilmiştir.

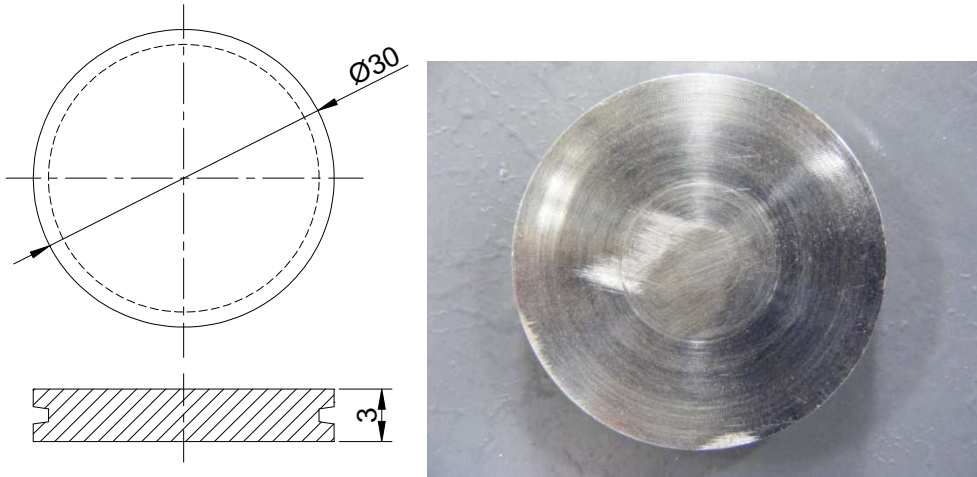
## BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 3.1. Giriş

Bu çalışmada yüksek sıcaklık uygulamalarında sıkça kullanılan termal bariyer kaplamalardaki yatay ve dikey çatlakların oluşumunu, ilerlemesini ve ömrünü belirleyen termal şok etkisinin incelenmesi ve bu etki sonucunda oluşan hasar mekanizmasını tanımlamaktır. Bunun için, AISI 316 paslanmaz çelik üzerine uygulanmış seramik termal bariyer kaplama ve metalik bağ tabakaya sahip bir TBK sisteminin termal şok testleri yapılarak, kaplamada oluşan çatlaklar incelenmiştir. Araştırmanın ilgi alanı altlıktan ziyade TBK sistemindeki hasardır. Çünkü servis esnasında TBK sistemi, üzerine uygulandığı kanatçıktan daha önce hasara uğramaktadır.

### 3.2. Kullanılan Malzeme ve Numune Hazırlama

AISI 316 paslanmaz çelik'ten imal edilmiş malzeme bilgisayar kontrollü bir torna tezgahında işlenerek 30 mm çap ve 3 mm kalınlığa sahip deney numuneleri hazırlanmıştır. Şekil2.1 de numunenin ölçülerini gösteren teknik resim ve kaplama öncesi numuneye ait bir fotoğraf bulunmaktadır.



Şekil 3.1. Numunenin teknik resmi ve kaplama öncesi görüntüsü



Daha sonra numune yüzeyleri kumlanmış ve yaklaşık 100 µm kalınlığında bir NiCrAlY bağ kaplama ile kaplanmıştır. Bu işlemten sonra yaklaşık 400 µm kalınlığında YSZ ( $ZrO_2$ - ağı %8 $Y_2O_3$ ) seramik üst kaplama (termal bariyer kaplama) ile kaplanmıştır. Hem metalik bağ tabaka hem de seramik üst tabaka plazma sprej yöntemi kullanılarak oluşturulmuştur. Kaplamalar Sakarya Üniversitesi termal sprej uygulama laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kaplama parametreleri tablo 3.1’ de verilmiştir.

Tablo 3.1. Kaplama parametreleri

Parametre	Voltaj (V)	Akım (A)	Argon (NLPM)	Hidrojen (NLPM)	Taşıyıcı gaz (NLPM)	Disk hızı (%)	Karıştırıcı (%)
Bağ Tabakası	80	500	50	15	2.1	10	30
YSZ	80	500	50	15	2.5	10	30

Şekil 3.2’ de bağ kaplama seramik üst tabaka kaplanmış bir numune görülmektedir.



Şekil 3.2. Kaplanmış bir numune

Test edilen numunelerin mikro yapısal incelemelerini yapmak üzere, ilk önce 30 mm çapında bir numune 0,5 mm kalınlığında elmas bir disk ile hassas bir şekilde ikiye bölünmüştür. Kesiti elde edilmiş olan numune daha sonra soğuk olarak kaplanmıştır.

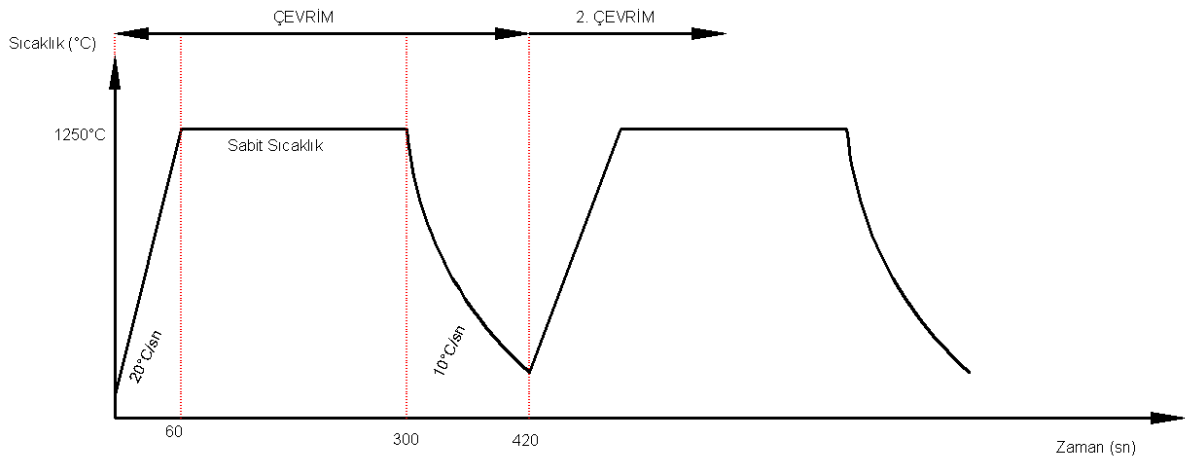
Optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılacak incelemeler için numune kesiti metalografik işlemlerden geçirilerek parlatılmıştır. Numuneler optik mikroskopta incelendikten sonra elektriksel iletkenlik sağlamak amacıyla bir altın- paladyum alaşımı ile kaplanarak SEM incelemeleri için hazırlanmıştır.

### 3.3. Termal Şok Testi

Literatürde, türbin kanadının termal ve yapısal analizleri ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda türbin kanadının küçük bir kesiti alınarak termel şok deneylerine tabi tutulmaktadır. Genelde 1 inç veya 30mm çapındaki deney numuneleri propan ve oksijenin beraber kullanıldığı bir brülör vasıtasıyla periyodik olarak ısıtılıp sonrasında basınçlı hava ile soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Üzerine kaplama uygulanmış malzemelerden oluşmaktadır. Numunenin TBK kaplanmış yani ön yüzeyi belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, o sıcaklıkta belirli bir süre tutulup yine belirli bir süre soğutulmaktadır. Ön yüzeyin ısıtılıp soğutulması esnasında arka yüzeyde kararlı bir sıcaklık gradyanı oluşturmak adına sürekli soğutulmaktadır.

Termal şok testi şu şekilde yapılır: Brülör alevi tam numunenin ortasına gelecek şekilde merkezlenir. Numune çok hızlı bir şekilde ısıtılır. Alev propan-oksijen gaz karışımının yakılmasıyla elde edilir. TBK kaplanmış yüzey sıcaklığı ve altlık malzemesinin sıcaklığı, önden ve arkadan birer pirometre ile ölçülür.

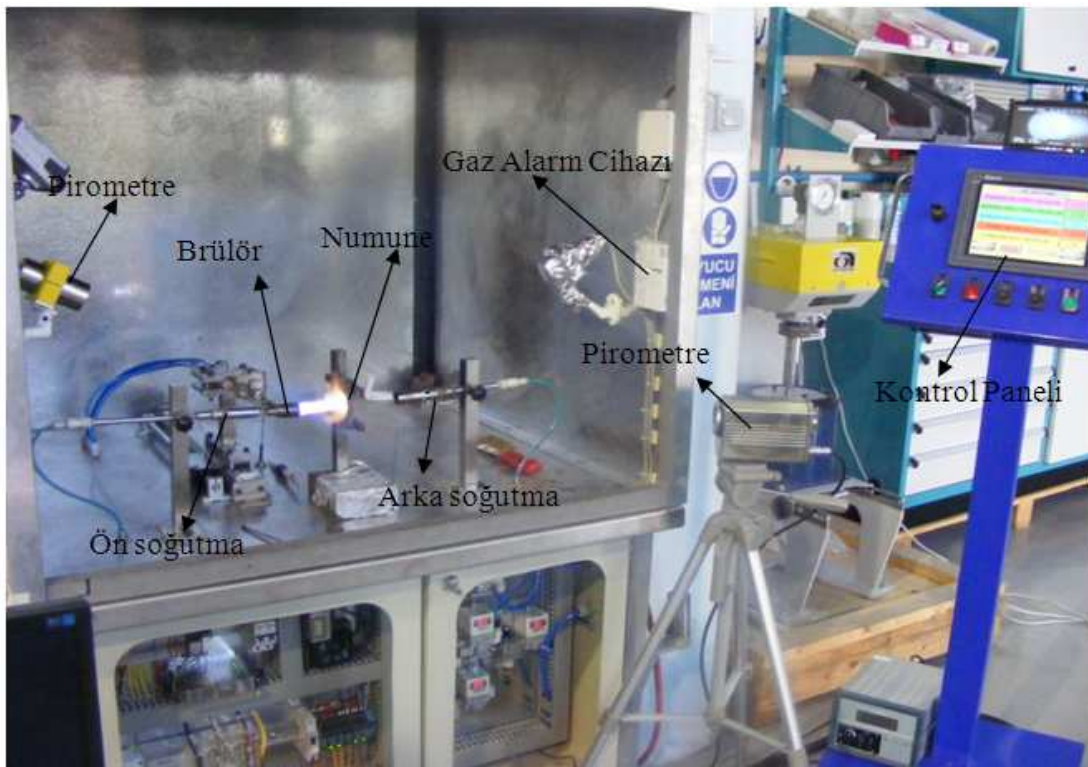
Deney numunesi 1250°C'deki yüzey sıcaklığında 5 dakika tutulur. Isıtma sırasında, test numunesinin arka tarafı, numunenin üzerinde kontrollü bir sıcaklık gradyanı elde etmek için yüksek debide hava ile soğutulur. Böylece, altlığın sıcaklığı yaklaşık 800°C' de tutulmuş olur. Isıtma işlemi bittikten sonra yakıcı gaz otomatik olarak kaplama yüzeyinden uzaklaştırılır ve havayla birlikte 2 dakika boyunca her iki yönden soğutulur.



Şekil 3.3. Termal şok testi şematik gösterimi

Şekil 3.3 ten de anlaşılacağı gibi her bir çevrim 420 saniyeden yani 7 dakikadan oluşmaktadır. İlk 300 saniye ısıtma işleme son 120 saniye soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem numune hasar görünceye kadar tekrarlanmıştır. Her 50 çevrimin sonunda numunenin üst yüzeyi kontrol edilerek hasar olup olmadığına bakılmıştır. Aynı parametrelerle kaplanmış test numunelerinden her biri belirlenen çevrim sayılarına ulaşıncaya kadar kesilip içyapılarına bakılmıştır.

### 3.4. Termal Şok Test Düzenegi



Şekil 3.4. Termal şok test düzenegi

Test düzenegi Sakarya Üniversitesi termal spreyci uygulama laboratuvarı için özel olarak tasarlanan bir düzenektir.

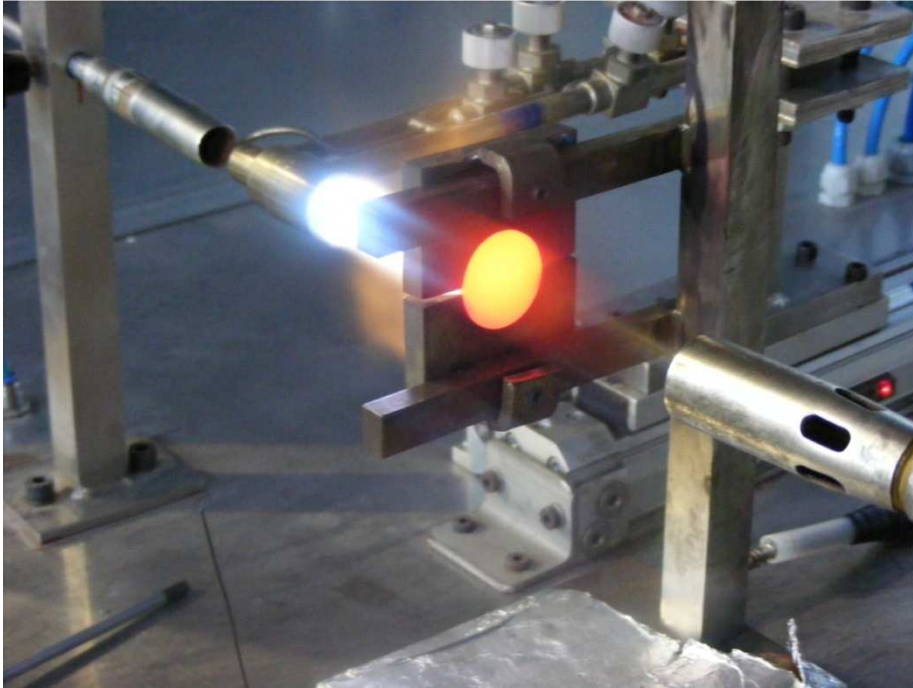
Şekil 3.4 dede görüldüğü gibi deney düzeneginde numunenin ön ve arka yüzey sıcaklıklarını aynı anda ölçebilmek için iki adet pirometre mevcuttur. Alev özel bir brülör yardımıyla propan-oksijen gaz karışımının yakılmasıyla elde edilir. Brülörün üzerinde propan, oksijen ve havanın manüel olarak ayarlanabilmesine olanak sağlayan ayar vanaları mevcuttur. Kabin içini görüntülemek amacıyla kabine bir adet video kamera yerleştirilmiştir.

Yine kabin içinde her hangi bir gaz kaçağının uyararak amacıyla gaz alarm cihazı yerleştirilmiştir.

Kontrol panelinde zaman ve basınç ayar sekmelerinden, ateşleme süresi, ısıtma süresi, soğutma süresi gibi zaman ile ilgili ayarlar ile oksijen, propan ve hava basıncı gibi basın ayarları yapılabilmektedir.

Soğutma havalarının kontrolüne imkân tanıyan soğutma havası basınç ayarları mevcuttur.

Pirometrelerin ölçtüğü ön ve arka yüzey sıcaklıkları iki saniyede bir elektronik ortamda kaydedile bilmektedir. Kaydedilen veriler bir taşınabilir bellek yardımıyla alınabilmektedir.



Şekil 3.5. Deney çalışma sırasında numune görüntüsü

Termal şok deney numunesinde altlık malzemesi olarak paslanmaz çelik bağ tabakada NiCrAlY kaplama malzemesi olarak da YSZ kullanılmıştır. Bu malzemelerin özellikleri ise Tablo 3.2, 3.4 ve 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.2. AISI 316 paslanmaz çelik özellikleri[76]

Isıl İletkenlik katsayısı (k) [W/m°C]		Isıl Genleşme katsayısı ( $\alpha$ ) $10^{-6}$ [1/°K]		Yoğunluk ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	Özgül Isı (c) [J/kg°K]	Poisson oranı ( $\nu$ )	Elastisite Modülü (E) [GPa]
100°C'	15.5	100°C	15	7900	500	0.3	200
		300°C	16.6				
		550°C	17.2				
500°C'	17.8	600°C	17.8				
		700°C	18.3				
		1000°C	19.5				

Tablo 3.3. Nikel bazlı süper alaşım altlık fiziksel özellikleri

Isıl İletkenlik [W/m°C]		Isıl Genleşme $10^{-6}$ [1/°K]		Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]	Özgül Isı [J/kg°K]		Poisson oranı	Elastisite Modülü [GPa]	
22	10.5	22	15	7.71x10 <sup>3</sup>	22	455	0.25	22	20.4
600°C	20.7	600°C	15.4		600°C	567		600°C	16.8
900°C	29	900°C	17.5		900°C	750		900°C	13.5

Tablo 3.4. NiCrAlY özellikleri[76,77]

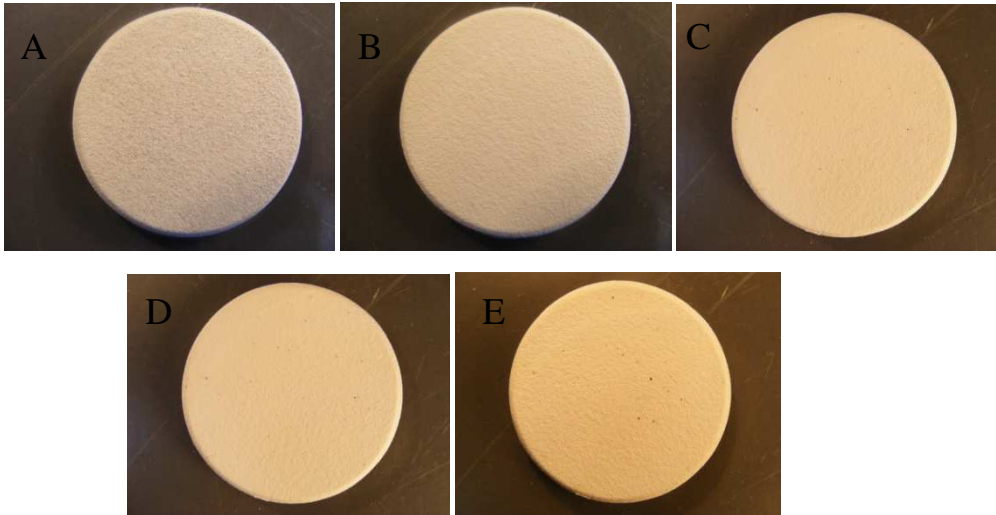
Isıl İletkenlik [W/m°C]		Isıl Genleşme $10^{-6}$ [1/°K]		Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]	Özgül Isı [J/kg°K]		Poisson oranı	Elastisite Modülü [GPa]	
22	10.5	22	15	7.71x10 <sup>3</sup>	22	455	0.25	22	20.4
600°C	20.7	600°C	15.4		600°C	567		600°C	16.8
900°C	29	900°C	17.5		900°C	750		900°C	13.5

Tablo 3.5 YSZ özellikleri[76,77]

Isıl İletkenlik [W/m°C]		Isıl Genleşme 10 <sup>-6</sup> [1/°K]	Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]	Özgül Isı [J/kg°K]	Poisson oranı	Elastisite Modülü [GPa]
22	1.4	10.8	5.24x10 <sup>3</sup>	582	0.2	50
600°C	1.6					
900°C	1.6					

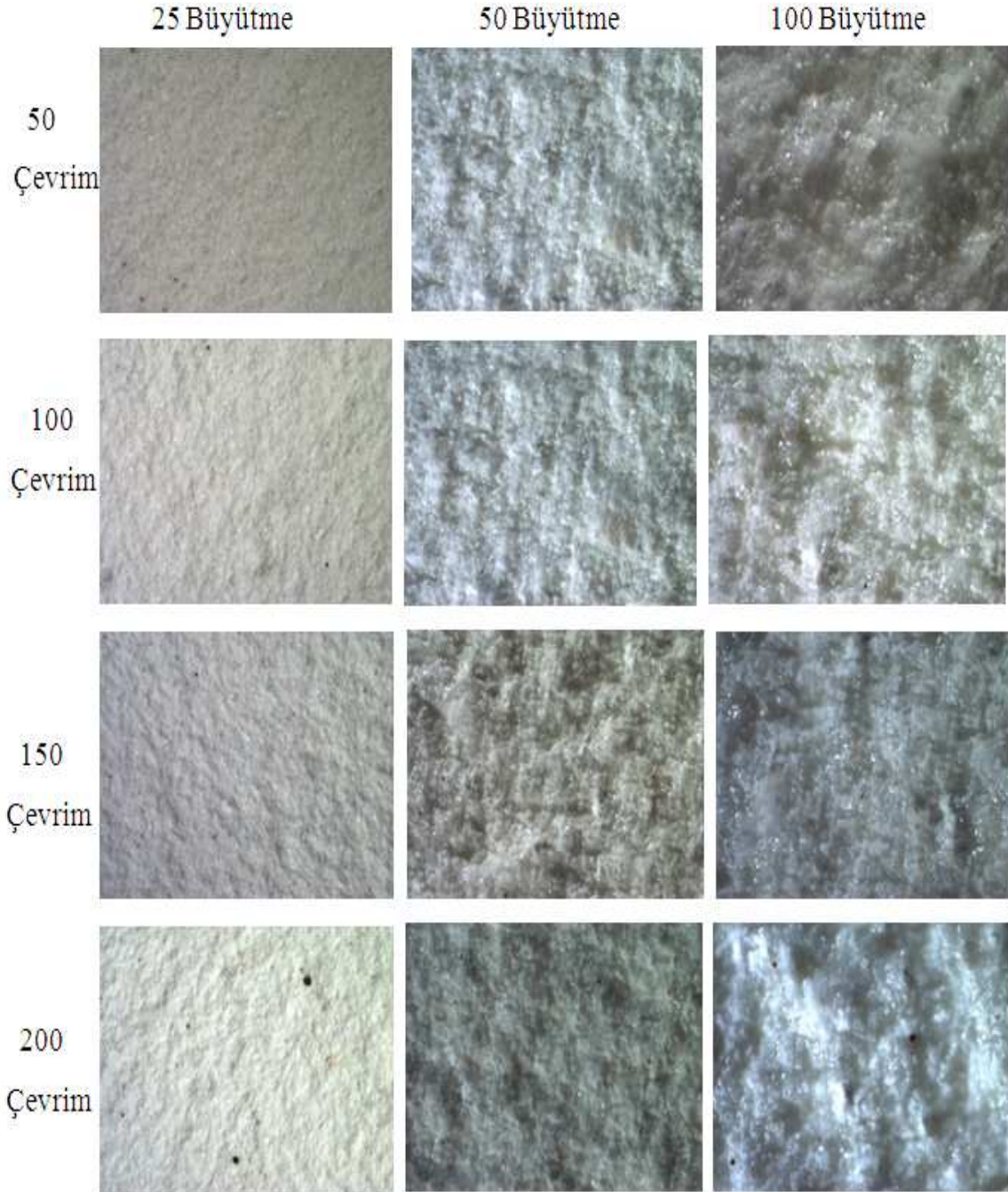
### 3.5. 1 Numaralı numuneye ait sonuçlar

Tablo 3.1 de belirtilen parametrelerle kaplanmış deney numunelerinden ilki (1 nolu numune) termal şok testine tabii tutulmuş 200 tekrar yapılmıştır. 1. Numuneye ait sonuçlar aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Numune 50 çevrimli periyotlarda incelenerek hasar kontrolü yapılmıştır.



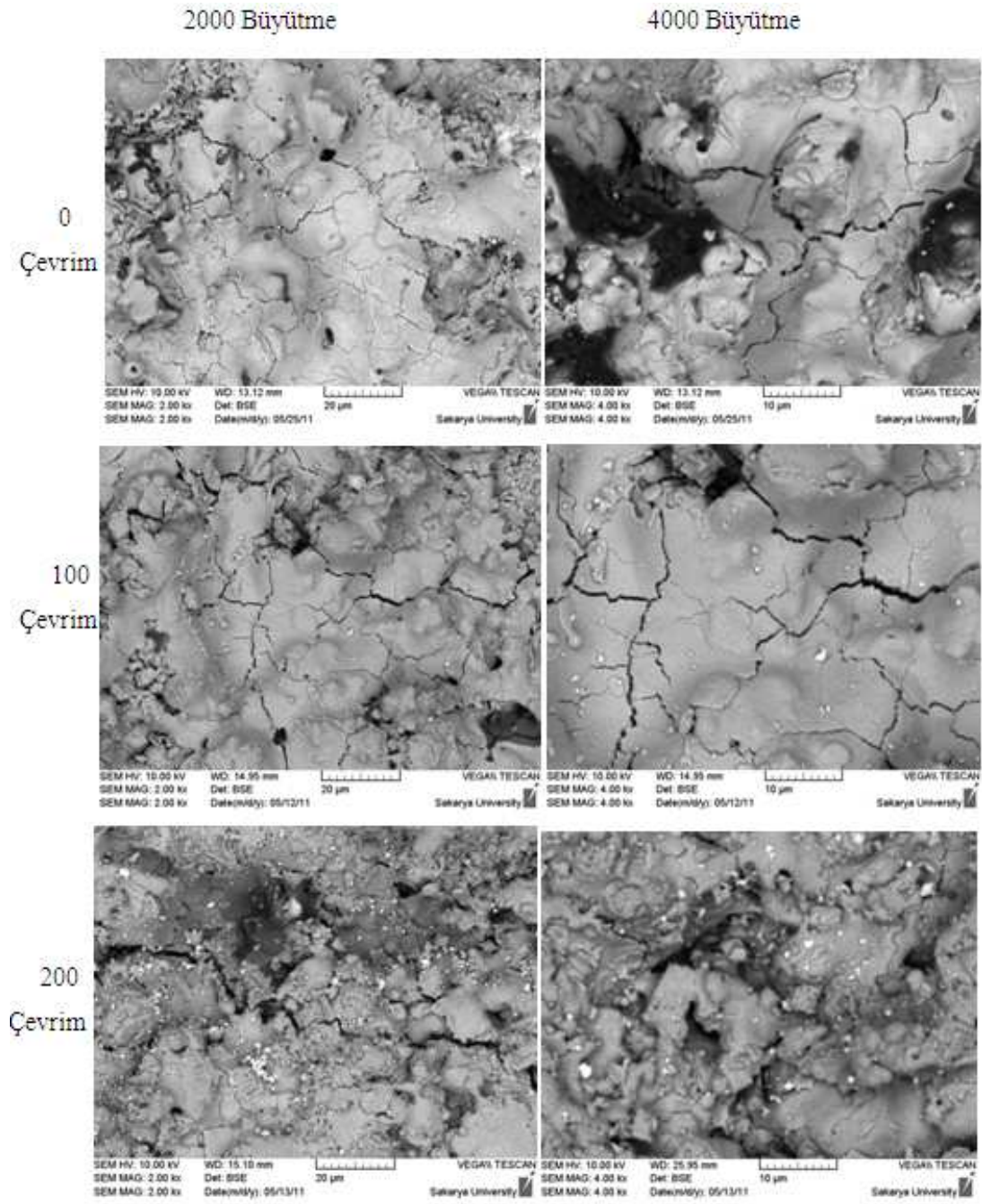
Şekil 3.6. Deney numunesinin A Termal şok öncesi, B 50 çevrim, C 100 çevrim, D 150 çevrim, E 200 çevrim sonrası görüntüsü

Şekil 3.6 dada görüldüğü gibi numunede gözle görülür bir hasara rastlanmamıştır.



Şekil 3.7. 1 Nolu deney numunesinin 50 çevrim 100 çevrim, 150 çevrim 200 çevrim sonundaki optik mikroskop yüzey görüntüleri

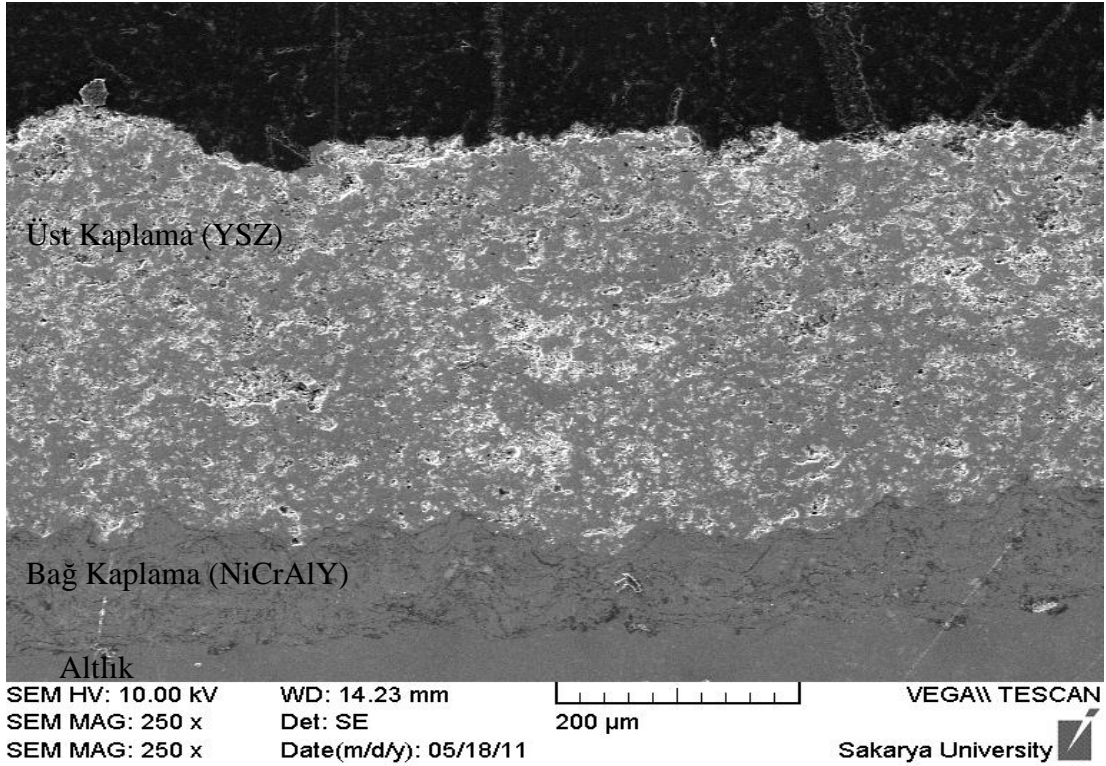
Optik mikroskopta incelenen numune yüzeylerinde herhangi bir hasar tespit edilmemiştir (Şekil 3.7)



Şekil 3.8. Deney numunesinin 0 çevrim 100 çevrim ve 200 çevrim sonundaki elektron mikroskopundaki yüzey görüntüleri

SEM görüntüleri de incelendiğinde (şekil 3.8) 200 çevrim sonunda üst yüzeyde bir hasara olmadığı, splat çatlakları haricinde bir olguya rastlanmamıştır. 200 çevrim sonundaki iç yapısının incelenmesi için numune kesilerek kaplama kontrol edilmiştir.



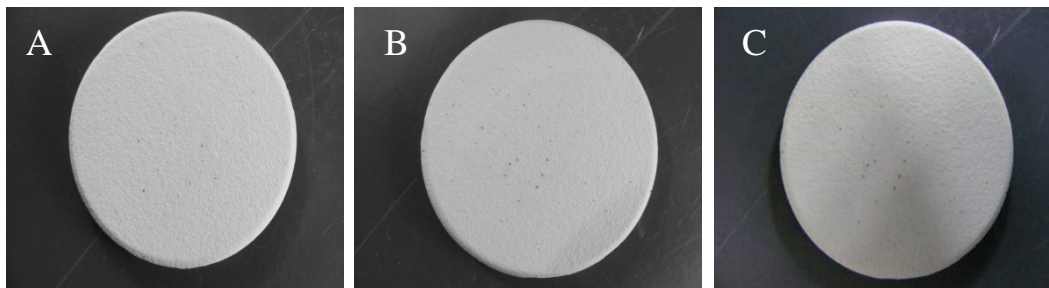


Şekil 3.9. 1 numaralı deney numunesinin 200 çevrim sonundaki elektron mikroskobundaki kesit görüntüsü

Kesiti alınmış TBK Şekil 3.9 da görüldüğü gibi yaklaşık 100 µm metalik bağ tabaka ve yaklaşık 400 µm seramik üst tabaka homojen bir şekilde kaplanmıştır. Yapılan inceleme sonunda 200 çevrim sonunda kaplamada hasar olmadığı gözlenmiştir.

### 3.6. 2 Numaralı numuneye ait sonuçlar

2 numaralı deney numunesi için deney 500 çevrim tekrarlanmış ve incelemeler gerçekleştirilmiştir.

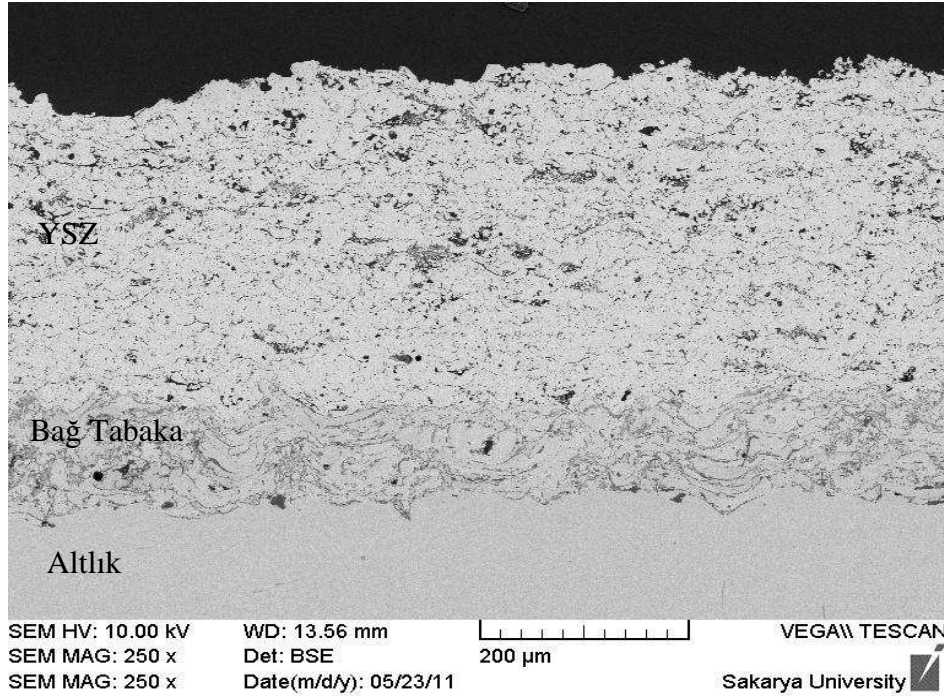


Şekil 3.10. 2 Numaralı deney numunesinin A 300Çevrim, B 400 çevrim, C 500 çevrim, sonrası görüntüsü

Numunede 500 çevrim sonunda makro ve mikro incelemelerde bulunulmuş, kaplama içindeki çatlak oluşumuna etki edecek herhangi bir oluşum tespit edilmemiştir.



Şekil 3.11 Deney numunesinin 300 çevrim 400 çevrim, 500 çevrim sonundaki optik mikroskop yüzey görüntüleri



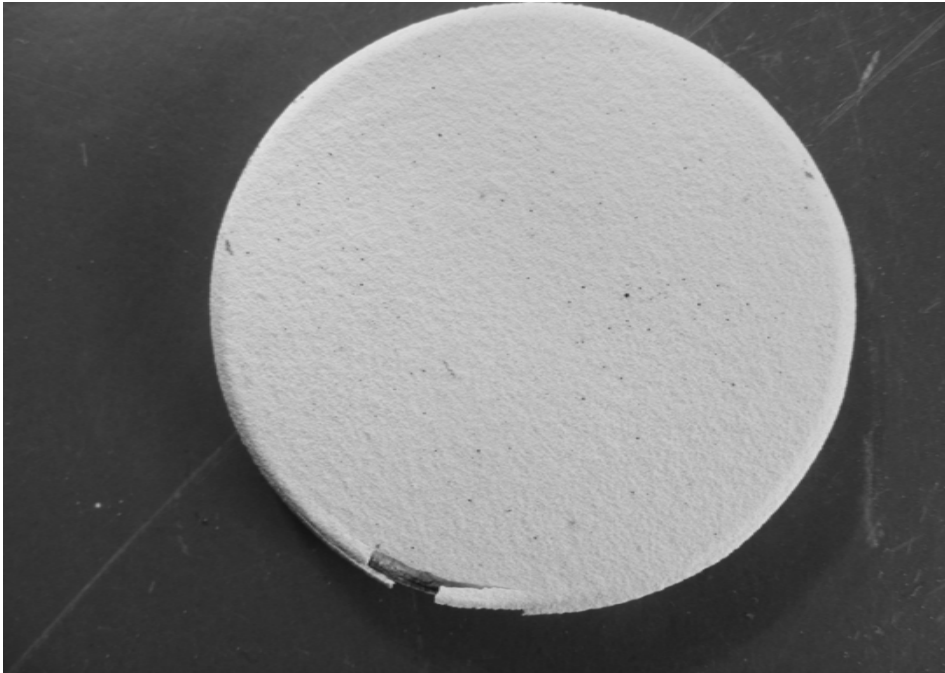
Şekil 3.12. 2. Numaralı deney numunesinin 500 çevrim sonundaki elektron mikroskopundaki (SEM) kesit görüntüsü

500 çevrim sonundaki numunenin kesit görüntüsünde herhangi bir hasara rastlanmamıştır.

### 3.7. 3 Numaralı numuneye ait sonuçlar

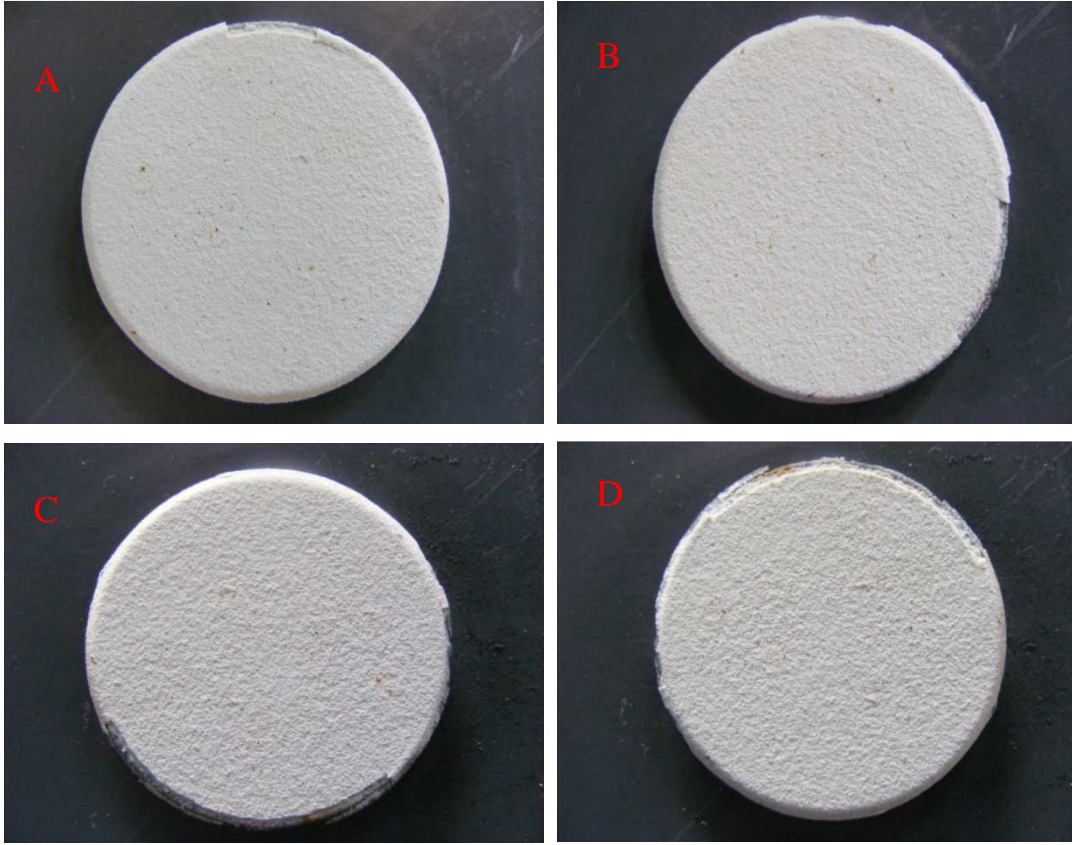
3. numaralı numune 1500 çevrime tabi tutulmuş ve her 100 çevrimde bir üst yüzeyi kontrol edilerek hasar olup olmadığı kontrol edilmiştir.

540. çevrimde numunenin kenarında ilk dökülmelerin başladığı görülmüştür.



Şekil 3.13. Deney numunesinin 540 çevrim sonundaki görüntüsü

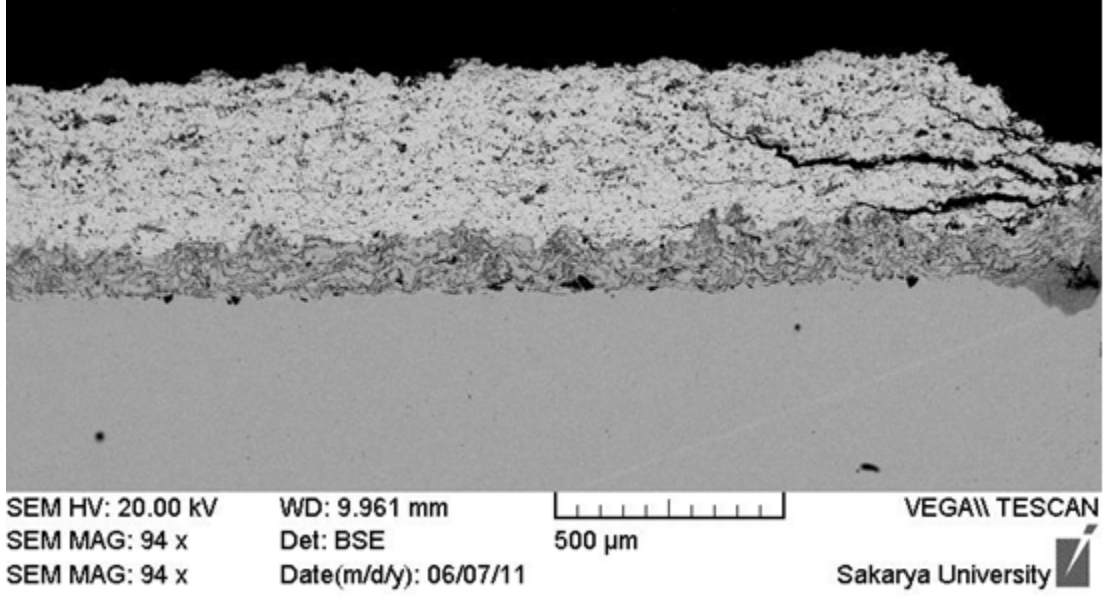
Şekil 2.13 de görüldüğü gibi numunenin kenarlarında fazlalık kaplamalar dökülmeye başlamıştır. Bunun yanında numunenin merkezinde herhangi bir hasar söz konusu değildir. Bunun sebebinin kenarlarda yapışmanın tam olarak gerçekleşmemesi ve geometriden kaynaklanın fazla kaplama tozu birikmesidir. Bunun yanında gerilme yığılmasının olduğu yerler numunenin kenarlarıdır. Bu da kaplama ilk olarak kenarlardan dökülmeye başlamasına sebebiyet vermektedir.



Şekil 3.14. Numunenin 600 (A), 100 (B), 1200 (C) ve 1500 (D) çevrim sonundaki görüntüleri

600 çevrim sonunda numunenin kenarlarındaki fazlalık kaplamalar dökülmeye başladığı görülmüş ve çevrim sayısı arttıkça numunenin kenarındaki fazlalıkların tamamı dökülmüştür ancak kaplama yüzeyinde hasar tespit edilmemiştir. Şekil 3.14 de 600, 1000, 1200, 1500 çevrim sonundaki numune görüntüleri verilmiştir.

Numunenin 1500 çevrim sonunda kenarlardan hasara uğramaya başladığı tespit edilmiştir. Kesit görüntüleri incelendiğinde çatlakların gerilme yığılmasının olduğu kenar bölgelerde başladığı ve merkeze doğru yaklaşık 1 mm ilerlediği gözlenmiştir(Şekil 3.15)

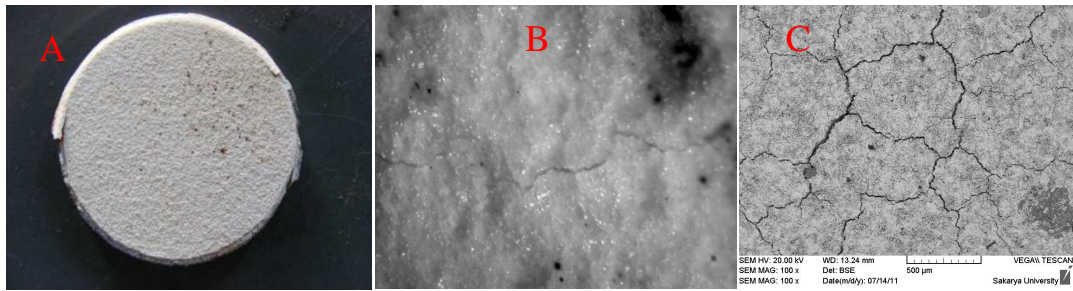


Şekil 3.15. 1500 çevrim sonundaki çatlak uzunluğunun SEM görüntüsü

Kaplamanın merkezinde hasar tespit edilmemiştir.

### 3.8. 4 Numaralı numuneye ait sonuçlar

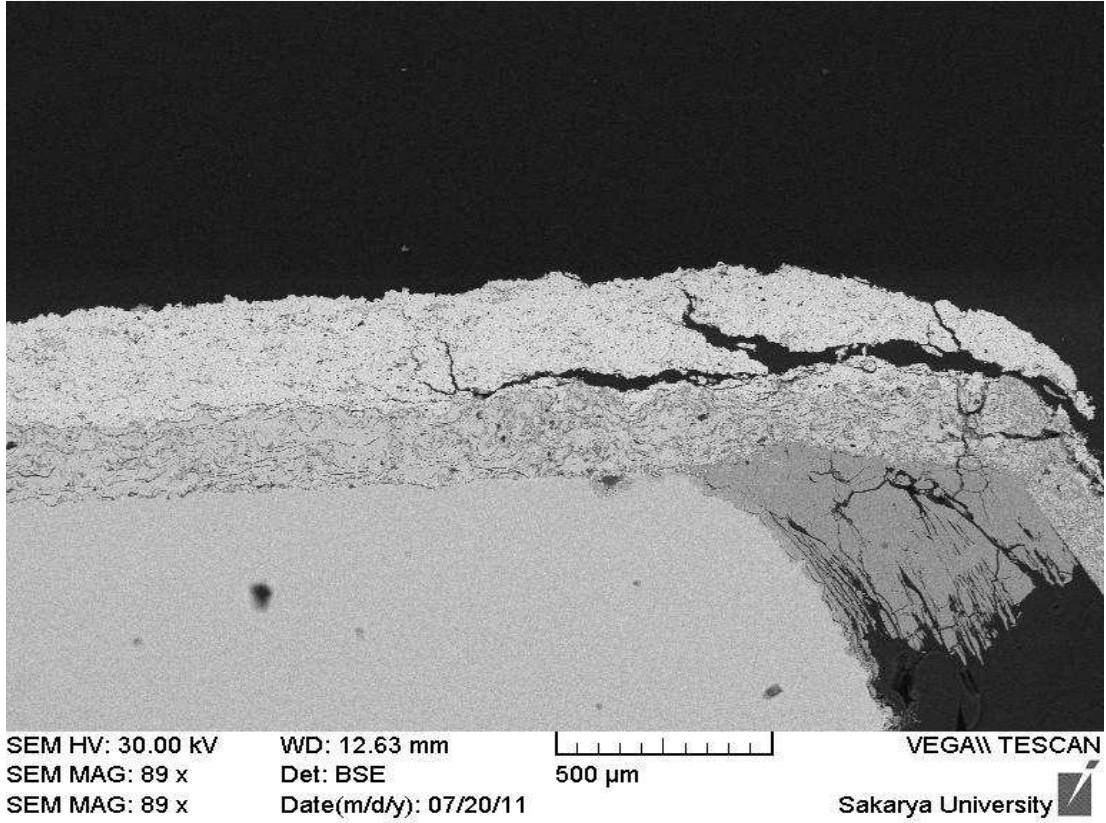
4 numaralı numune için deney 1750 kez tekrarlanmıştır. Yüzey görüntüleri incelendiğinde kenar dökülmeleri yanında üst yüzeyde çalıkların oluştuğu gözlenmiştir. Bu da hem yatay çatlakların ilerlediği hemde dikey çalkakların başladığı anlamına gelmektedir.



Şekil 3.16. Deney numunesinin 1750 çevrim sonundaki üst yüzey görüntüsü (A) , optik mikroskopta 50 x te çekilmiş (B) ve SEM de 500x te çekilmiş (C) görüntüsü

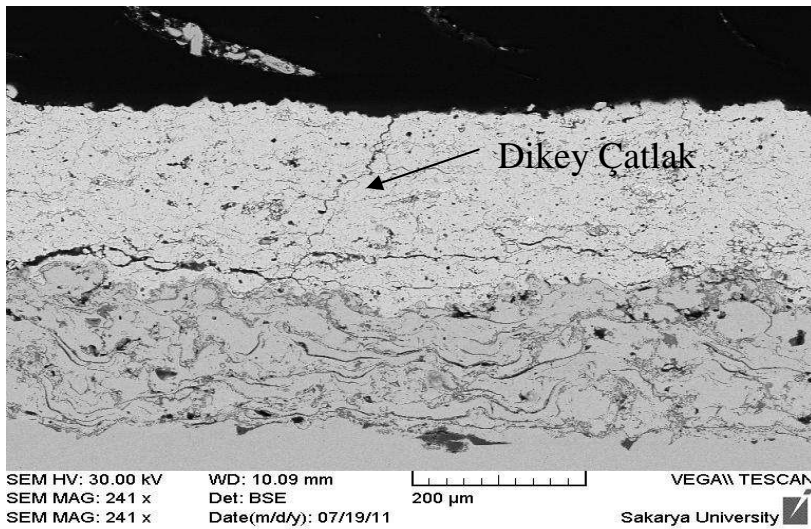
Şekil 3.16 da kaplama yüzeyinde başlayan çatlaklar belirgin bir şekilde görülmektedir.

Deney numunesine ait kesit görüntüleri şekil 3.17 de verilmiştir.



Şekil 3.17. kesiti alınmış numunenin SEM görüntüsü

Kaplamadaki çatlağın 1500 çevrime nazaran ilerlediği ve yaklaşık 1.5 mm ye ulaştığı görülmüştür.

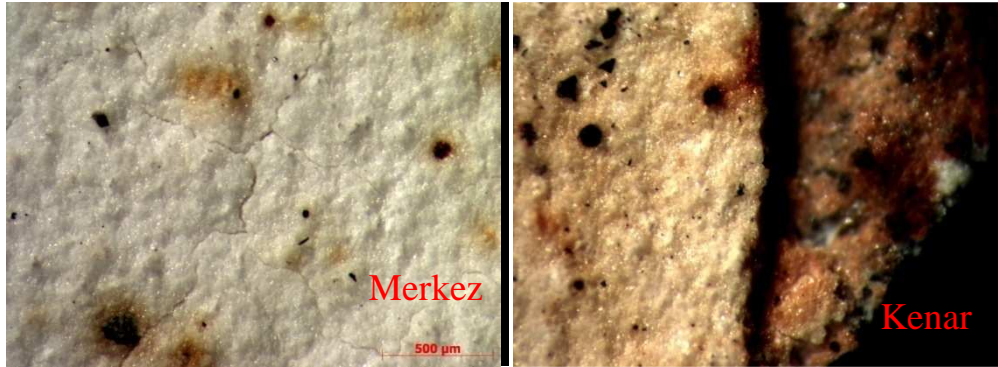


Şekil 3.18. Numunedeki 1750 çevrim sonunda üst kaplamada oluşan dikey çatlak

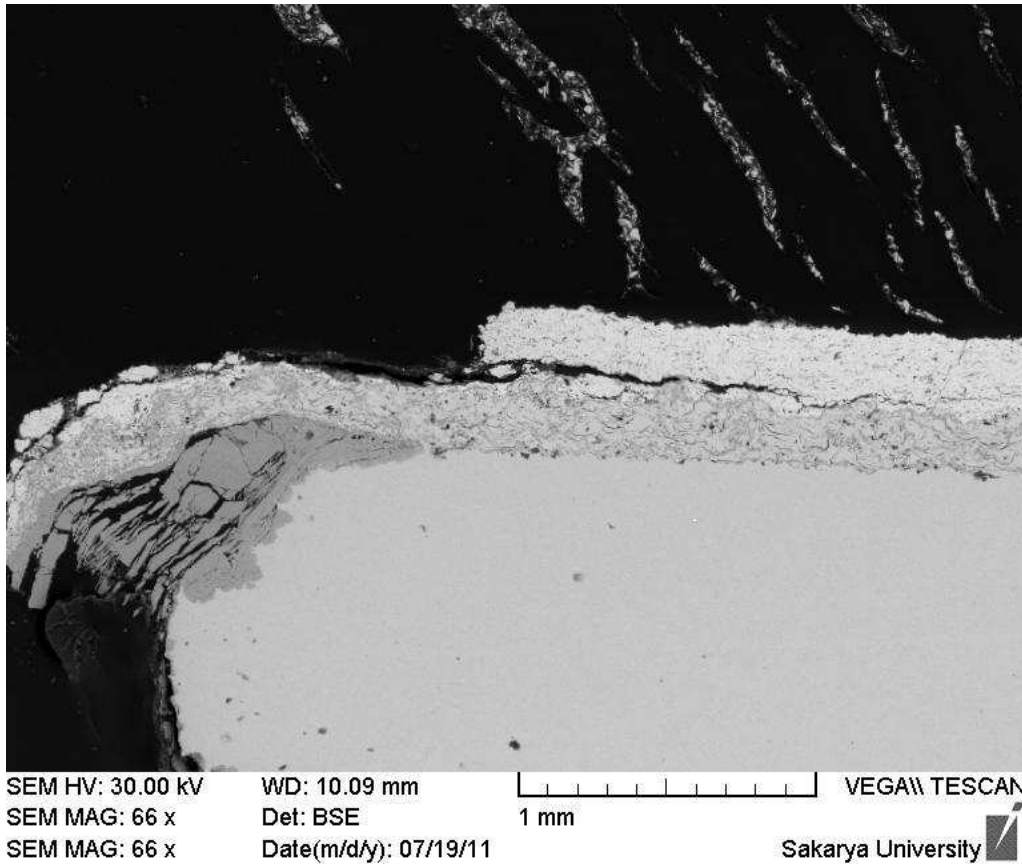
Görüldüğü gibi kaplamada dikey çatlak oluşmuş ve kenardan başlayan yatay çatlağın ilerlediği tespit edilmiştir.

### 3.9. Beş (5) Numaralı Numuneye Ait Sonuçlar

Deney numunesi (5 numaralı numune) için deney 2000 tekrar yapılmıştır. 2000 çevrim sonunda çatlak ilerleme miktarı incelenmiş ve çatlağın 2.5 mm ye ulaştığı görülmüştür. Numunenin üst yüzeyinde çatlaklar oluştuğu ve kenarlardan dökülmeler olduğu tespit edilmiştir.



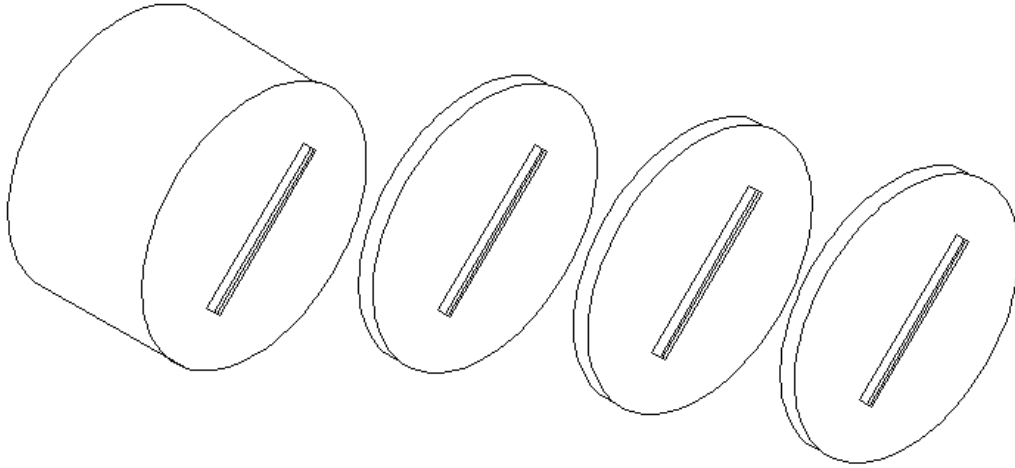
Şekil 3.19. Deney numunesinin 2000 çevrim sonundaki optik mikroskopta çekilmiş merkez ve kenar görüntüsü



Şekil 3.20. Numunenin 2000 çevrim sonunda oluşan çatlak görüntüsü

### 3.10. Çatlak Profili Oluşturma

Deney numunelerinin kesitleri incelendikten sonra, çatlak profillerini belirlemek için, 1 mm arayla dilimler elde edecek şekilde kesilerek (şekil 3.21) meteolografik işlemlerden geçirilerek optik mikroskobunda incelenmiştir.

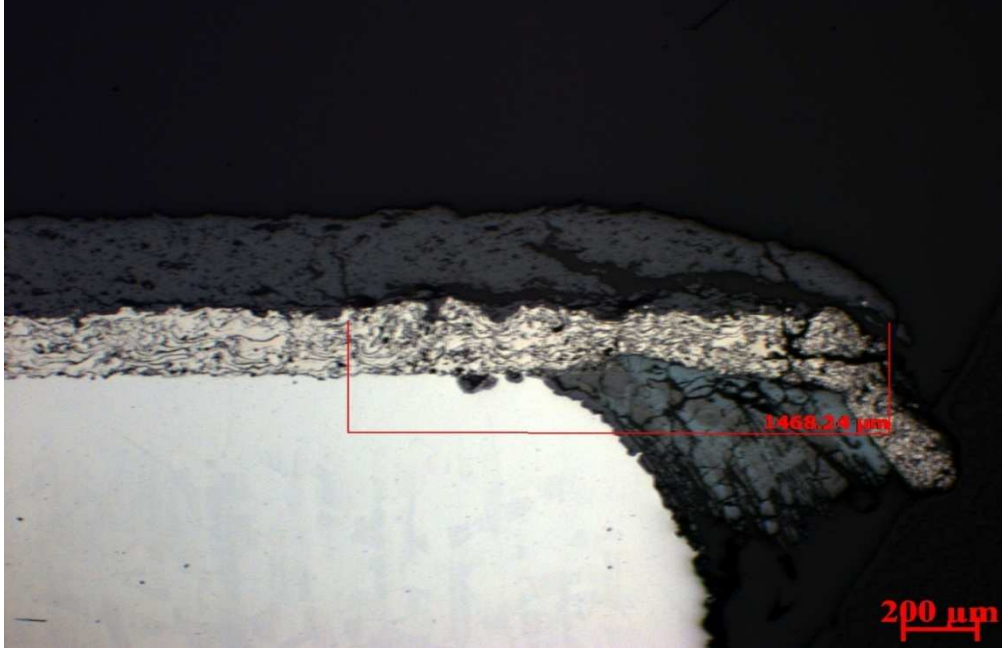


Şekil 3.21. Numunelerin dilimlenmiş görüntüsü

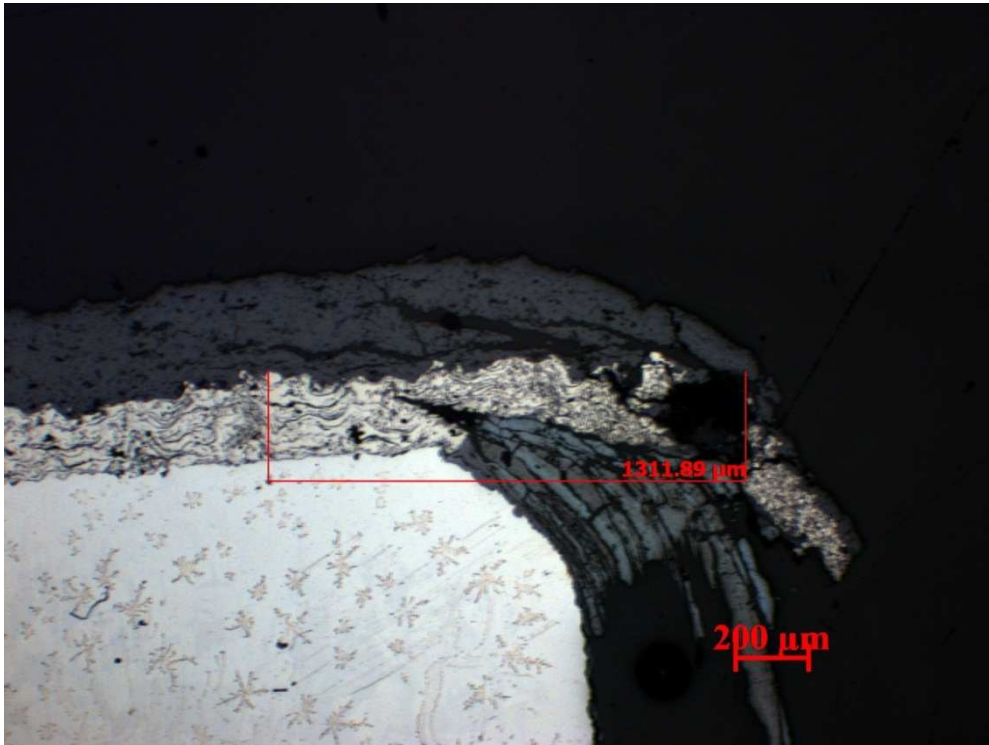
Yapılan incelemelerde çatlak boyunun merkezden uzaklaştıkça kısaldığı görülmüştür. Merkezden uzaklık ve çatlak uzunluklarından faydalanarak çatlak



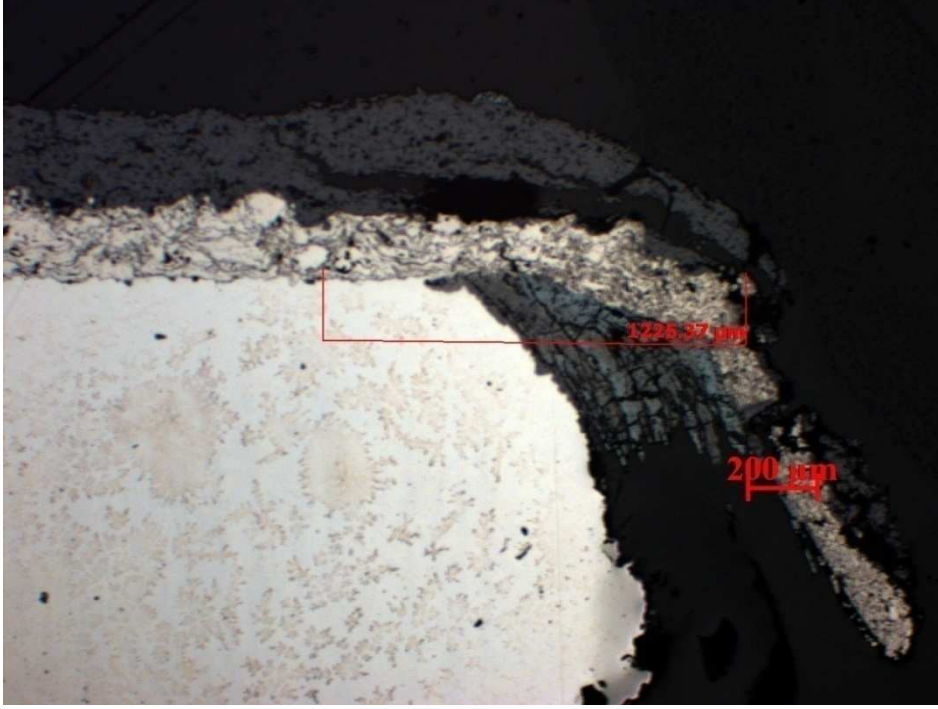
profilinin elips formuna yakın olduğu görülmüştür. 4 numaralı numune için yapılan incelemeler aşağıdaki resimlerde verilmiştir.



Şekil 3.22. Dört numaralı numunenin orta eksenindeki çatlak uzunluğu.

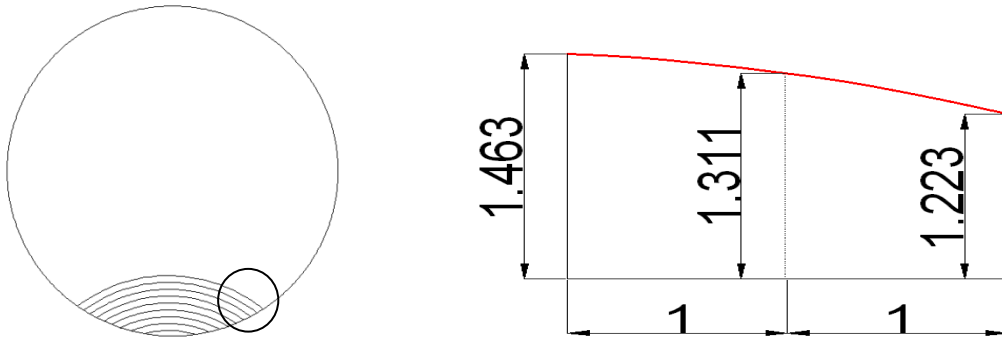


Şekil 3.23. Dört numaralı numunenin orta ekseninden 1 mm kesildikten sonraki çatlak uzunluğu



Şekil 3.24. Dört numaralı numunenin orta ekseninden 2 mm kesildikten sonraki çatlak uzunluğu

Bu ölçüler dikkate alındığında çatlak profili şekil 3.25 deki gibi eliptik olmaktadır.



Şekil 3.25. deneyler sonunda elde edilen çatlak profili

## BÖLÜM 4. ANALİZ SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1. Giriş

Bu bölümde deney numunesi ve türbin kanatçığının termal ve yapısal analiz sonuçları verilmiştir. Termal analizler, deneysel sonuçlarla kıyaslanmıştır. Analizlerden elde edilen TBK da çatlak analizi gerçekleştirilmiş ve deneysel sonuçlarla kıyaslanarak, çatlak profili, çatlak için gerilme şiddet faktörü ve malzeme için ömür tahmini yapılmıştır.

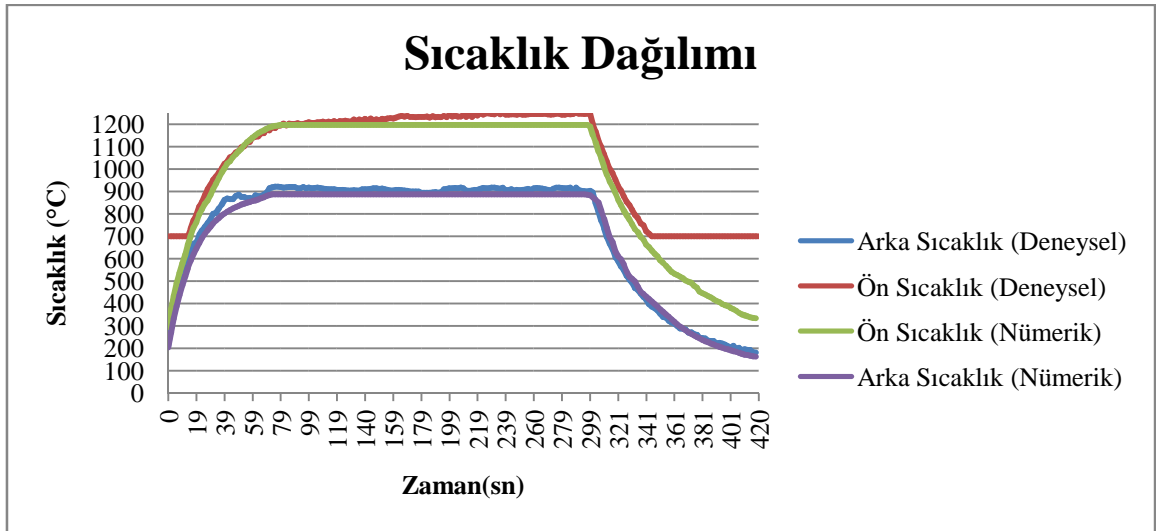
### 4.2. Analizler

#### 4.2.1. Deneysel ve analitik analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Yapılan deneylerde deney numunesinin ön ve arka sıcaklıkları birer pirometre ile ölçülerek kaydedilmiştir. Deney düzeneği modeli sonlu elemanlar yöntemiyle oluşturulmuş ve aynı sınır şartları altında analiz edilmiştir.

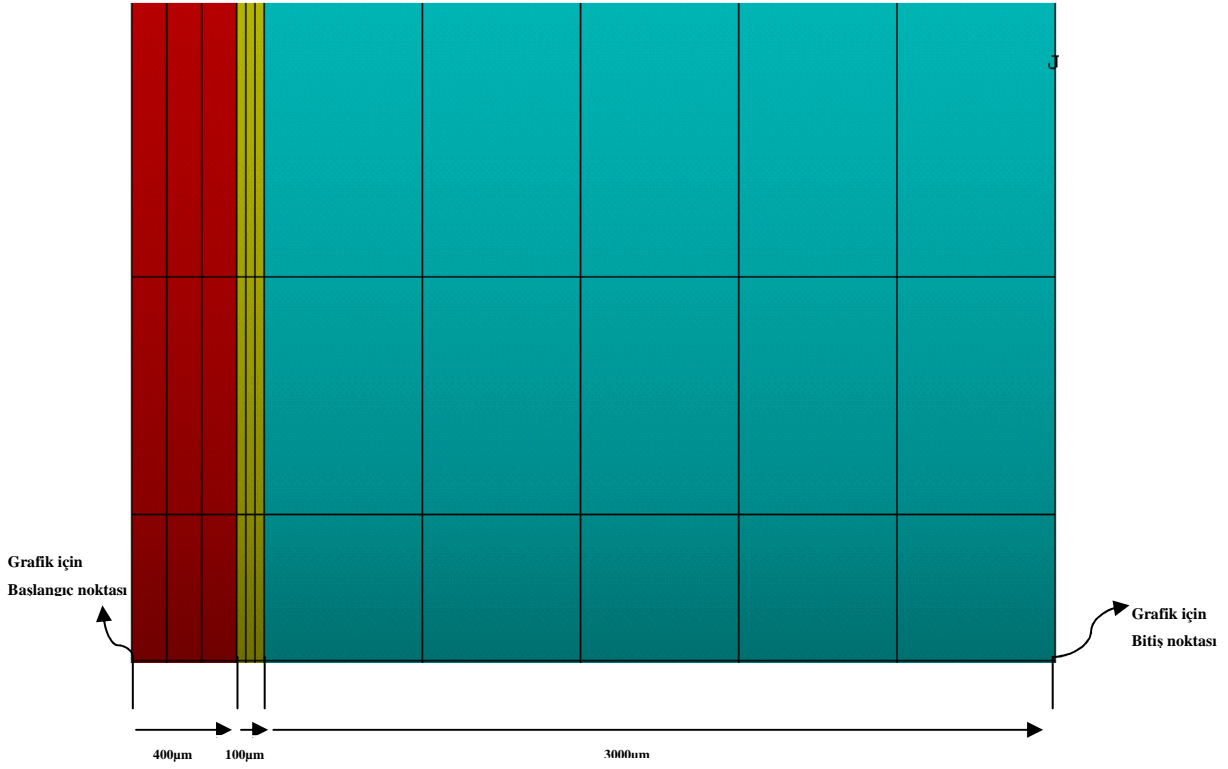
Analiz sonuçlarından elde edilen ön ve arka yüzey sıcaklıkları ile deneysel olarak elde edilen sıcaklıklar kıyaslanarak, kurulan modelin doğruluğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.1 dede görüldüğü gibi deneysel ve nümerik sonuçlar birbirine çok yakın değerlerde çıkmıştır. Bu durum kurulan modelin doğruluğu ile açıklanabilir.

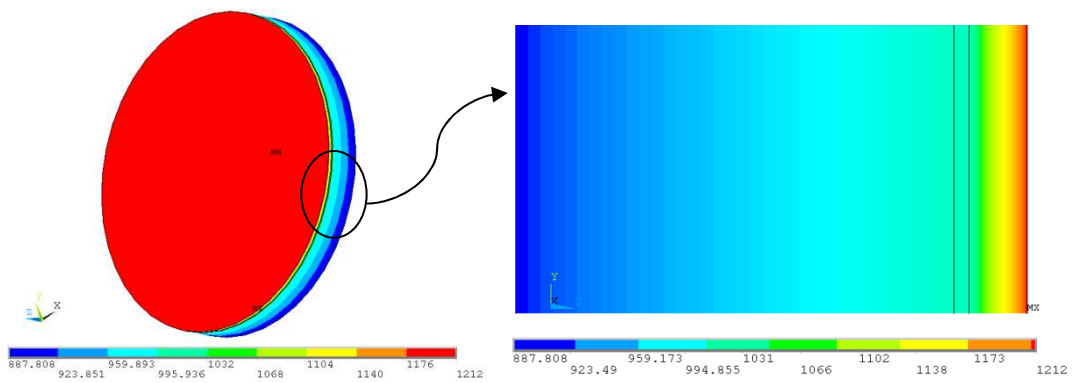


Şekil 4.1. Deneysel ve Analiz sonuçlarından elde edilen ön ve arka yüzey sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi

Grafikler Şekil 4.2 de gösterildiği gibi kaplamanın üst yüzeyi baŐlangiŐ noktası ve altlığın bitiŐ noktası grafiğin sonu olacak Şekilde kalınlık boyunca sıcaklık değerleri gösterilmiştir.



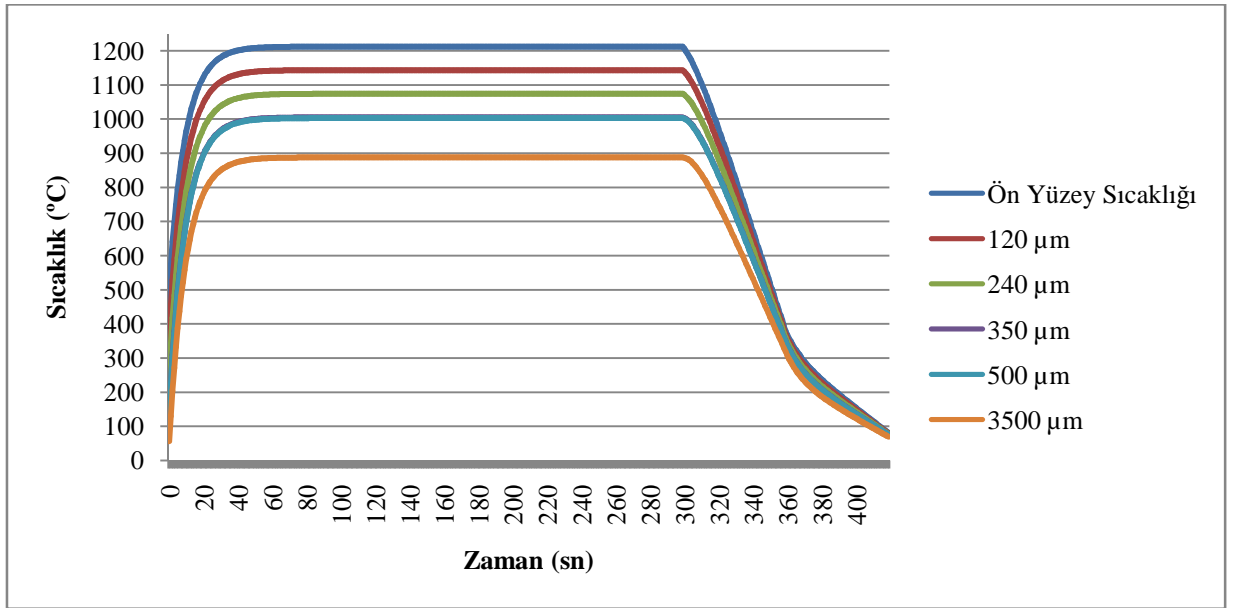
Şekil 4.2. YSZ Kaplama, bağ tabaka ve altlığın sonlu elemanlar modelindeki lŐleri.



Şekil 4.3. YSZ kaplamaya ait 300 saniye sonundaki sıcaklık dağılımları

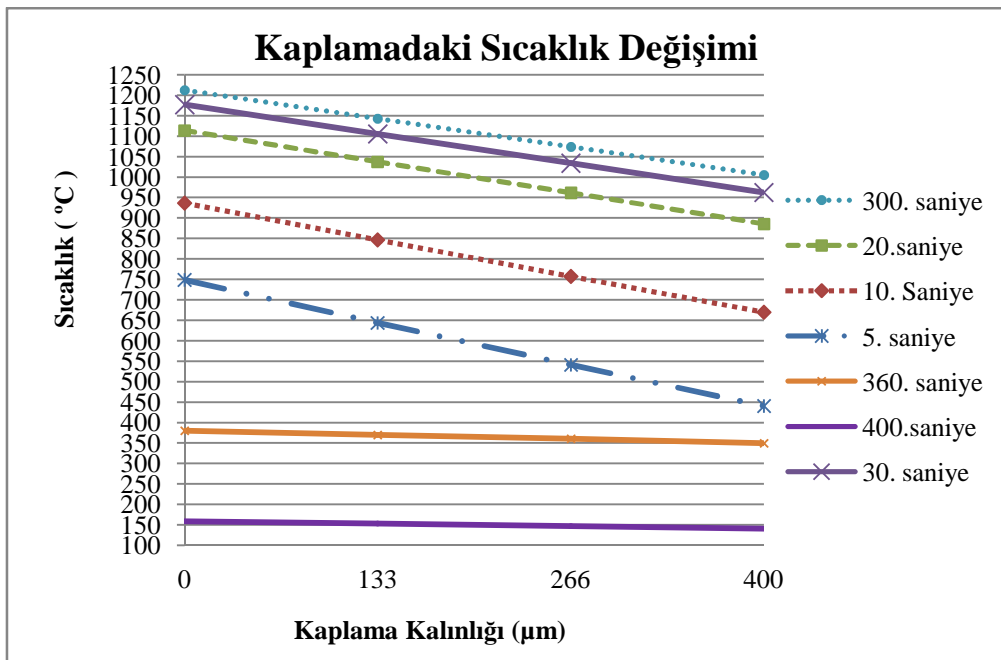
Şekil 4.4 de de grldĞi gibi sıcaklığlar 0 ile 60. Saniye arasında artmaktadır. 60 ile 300. Saniyeler arasında sabit kalmaktadır. 300 ile 420 arasında da düşmektedir. Bu

nedence kritik zamanlar belirlenerek bu zamanlardaki sıcaklığın kaplama kalınlığına göre değişimi incelenmişti (şekil 4.5).



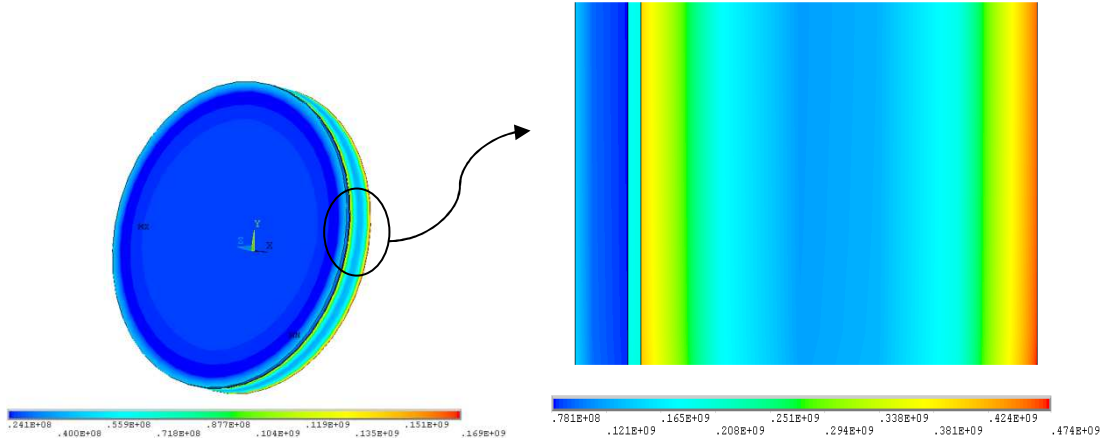
şekil 4.4. YSZ TBK' daki mesafeye bağlı sıcaklık değişim grafiği

Zamana bağlı sıcaklık değişimi incelendiğinde maksimum sıcaklığa 40. Saniyede ulaşıldığı ve bu sıcaklığın 300. Saniyenin sonuna kadar korunduğu görölmektedir. Ön yüzey sıcaklığı 1212 °C ye ulaşırken altlığın bağ tabakaya temas eden yüzeyinin sıcaklığı 980 °C de kalmaktadır. Bu da TBK nın 232 °C lik bir ısı koruma sağladığı anlamına gelir.



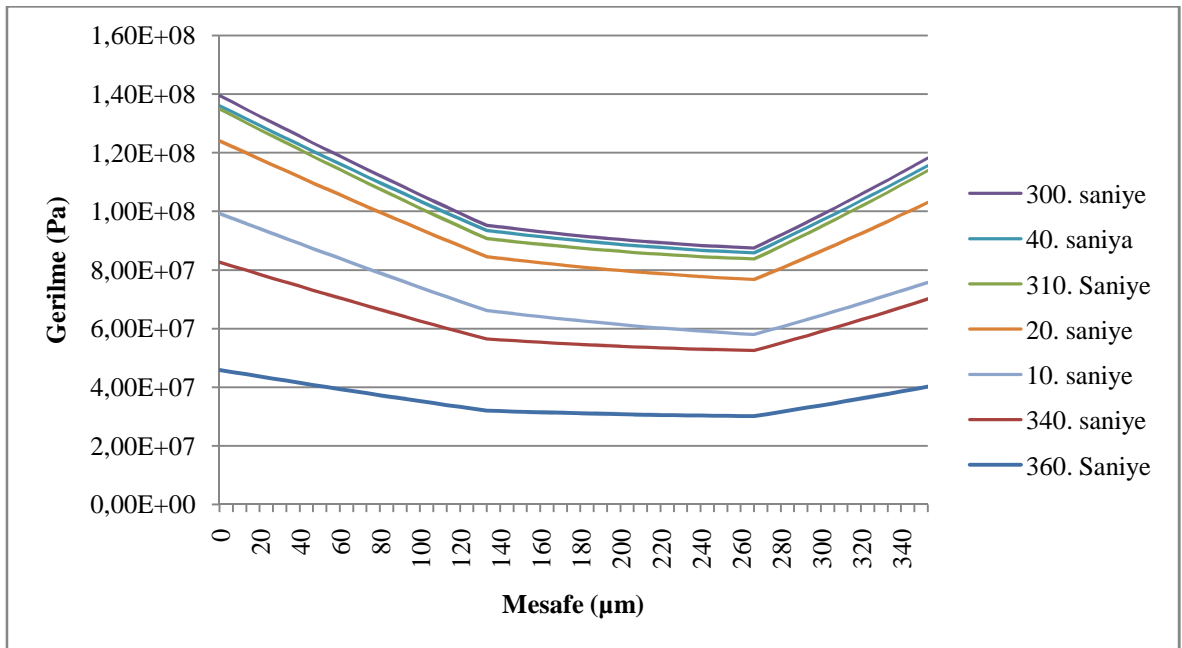
şekil 4.5. Kaplamadaki mesafeye bağlı sıcaklık değişim grafiği

Kaplamanın kalınlığına bağlı sıcaklık değişimini daha iyi anlayabilmek için 8 zaman dilimi belirlenmiştir. 10, 20, 30, 300, 340, 360, 400. Saniyelerdeki sıcaklık değerlerine bakılmış ve çatlak ilerleme analizi için maksimum sıcaklık farkı tespit edilmiştir.



Şekil 4.6. 300 saniye sonundaki Von- Mises eşdeğer gerilme durumu

Şekilden de anlaşıldığı gibi maksimum gerilmenin altlıkta olduğu görülmektedir. Çalışmada kaplama incelendiğinden kaplamadaki gerilmelerin durumu incelenmiştir.

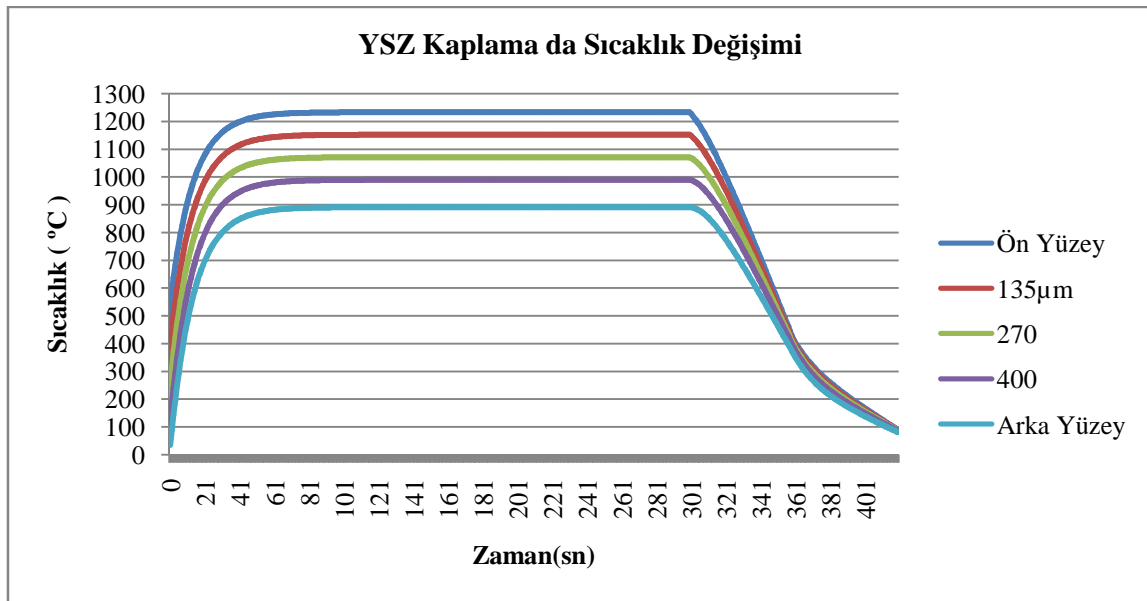


Şekil 4.7. YSZ Kaplamadaki mesafeye göre Von- Mises eşdeğer gerilme grafiği

YSZ kaplamada maksimum eşdeğer gerilmenin kaplamanın üst yüzeyinde kenarlarda oluştuğu ve değerini 140 MPa tespit edilmiştir.

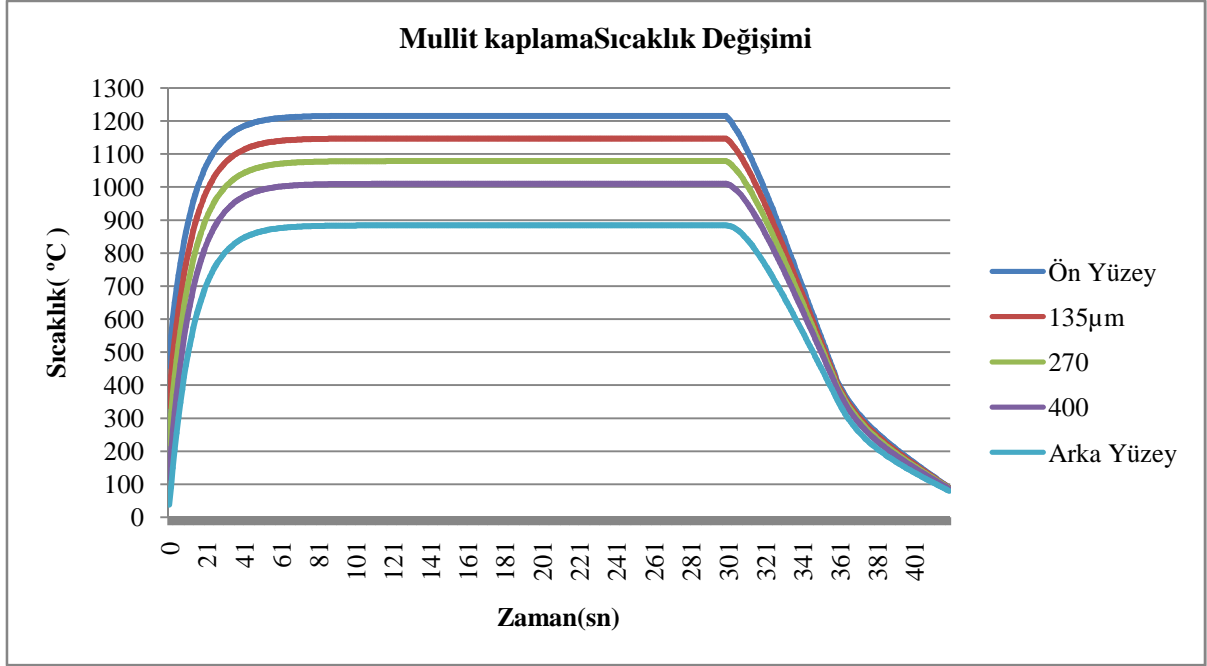
### 4.3. Deney Numunesine Ait Analiz Sonuçları

Model doğrulandıktan sonra kullanılan malzemeler değiştirilerek analizler tekrarlanmış ve sonuçlar kıyaslanarak termal şok dayanımı ölçülmüştür. Türbin kanatçıklarında altlık malzemesi olarak nikel bazlı süper alaşım kullanılmaktadır, analizlerde de nikel bazlı süper alaşım kullanılmıştır. Süper alaşım altlık kullanılarak bağ tabakası olarak NiCrAlY üst kaplama olarak YSZ, Mullit Ve %40YSZ-%60 Mullit olmak üzere üç tane TBK için analizler gerçekleştirilmiştir. Termal ve yapısal analizlerin sonuçları grafiklerle verilmiştir.



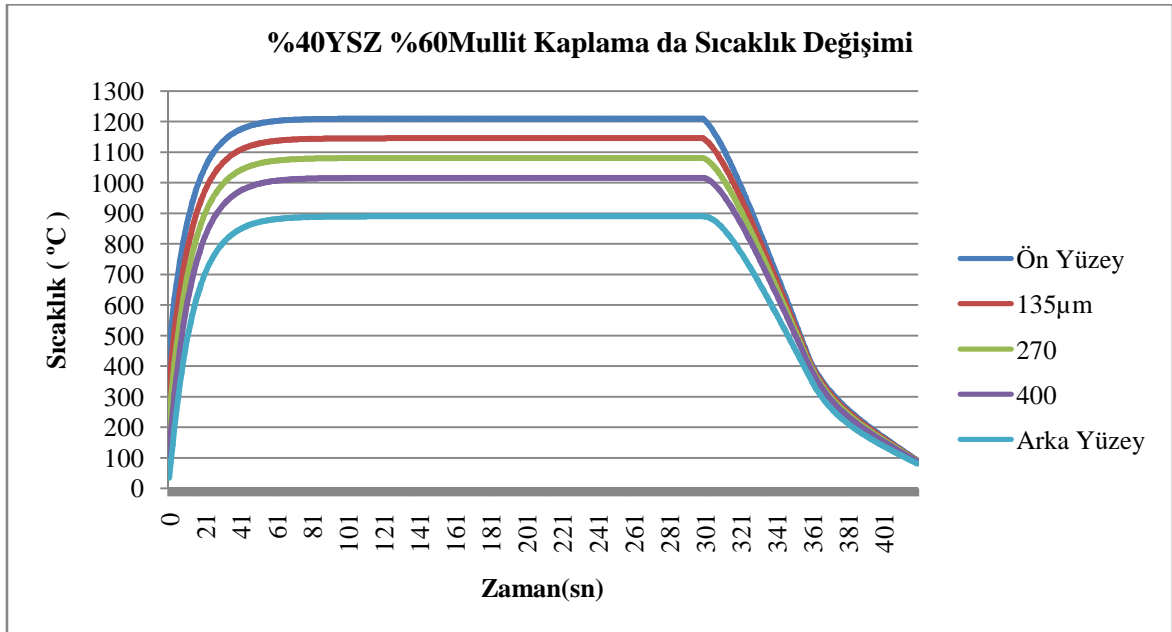
Şekil 4.8. Süper alaşım altı üzerine YSZ TBK' daki zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği

YSZ TBK maksimum sıcaklık 1232 °C olmaktadır. Aynı sınır şartlarında Mullite 1218 °C ve mullit+ YSZ 1200 °C olmaktadır. Altlığın arka yüzeyindeki sıcaklıklar en yüksek 900 °C civarındadır.



Şekil 4.9. Süper alaşım altlı üzerine Mullit TBK' daki zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği

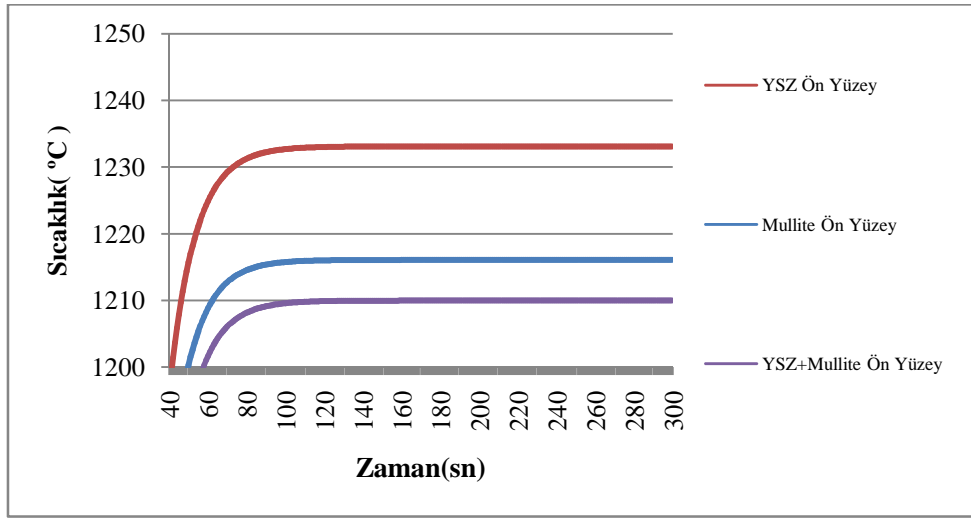
Grafiklerde ayrıca kaplama kalınlıkları boyunca sıcaklık değişimleri de görülmektedir. Şekil 4.11 de bu üç kaplamanın üst yüzeylerini ulaştığı en yüksek sıcaklıklar kıyaslanmıştır.



Şekil 4.10. Süper alaşım altlı üzerine Mullit+ YSZ TBK' daki zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği

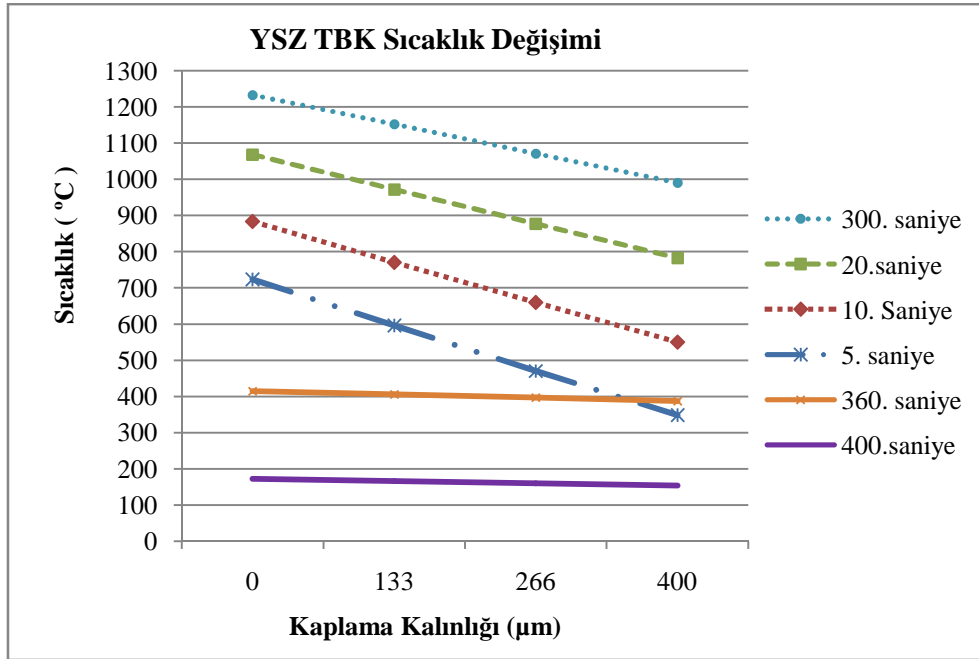


#### 4.4. Üç Farklı TBK' ya Ait Analiz Sonuçlarının Kıyaslanması



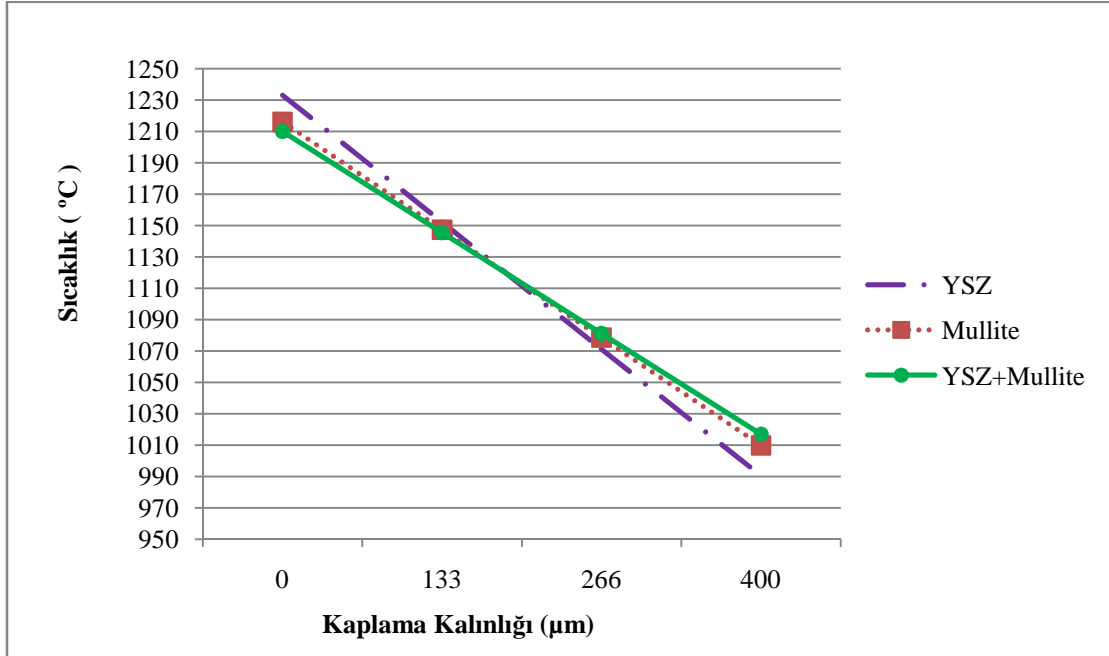
Şekil 4.11. YSZ, Mullit ve YSZ+Mullit TBK'larda ulaşılan en yüksek sıcaklıklar

Şekil 4.12 dede görüldüğü YSZ kaplamadaki kalınlık boyunca sıcaklık değişim grafiği verilmiştir. Maksimum sıcaklığın 1232 °C olduğu durumda kaplamanın bağ tabaka ile birleştiği yüzeyde sıcaklık 990 °C ye kadar düşmektedir. Bu sırada altlığın üst yüzeyindeki sıcaklık 985 °C olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.12. YSZ TBK' daki kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık değişim grafiği

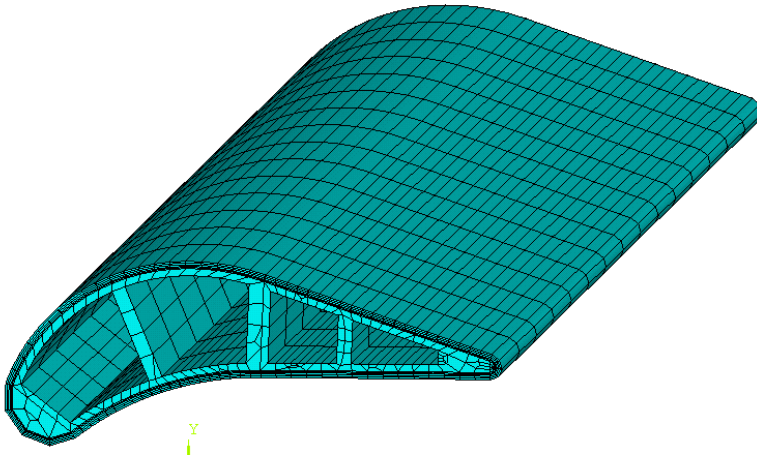
Böylece YSZ nin altlığı 247 °C lik sıcaklıktan koruduğu anlaşılmaktadır. Şekil 4.13 te YSZ, Mullit ve %40YSZ-%60 Mullit için kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 4.13. YSZ, Mullit ve %40YSZ-%60 Mullit için kaplama kalınlığı boyunca sıcaklık değişim grafiği

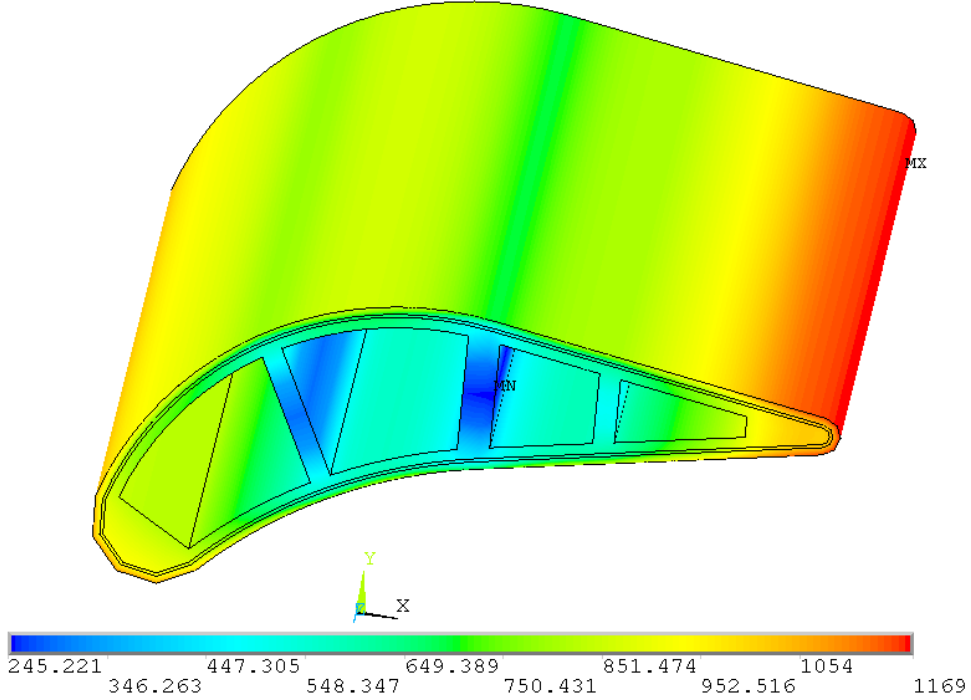
#### 4.5. Türbin Kanatçığına Ait Analiz Sonuçları

Şekil 4.14 te soğutma kanalları açılmış türbin kanatçığına ait sonlu elemanlar modelinin ağ yapısı verilmiştir

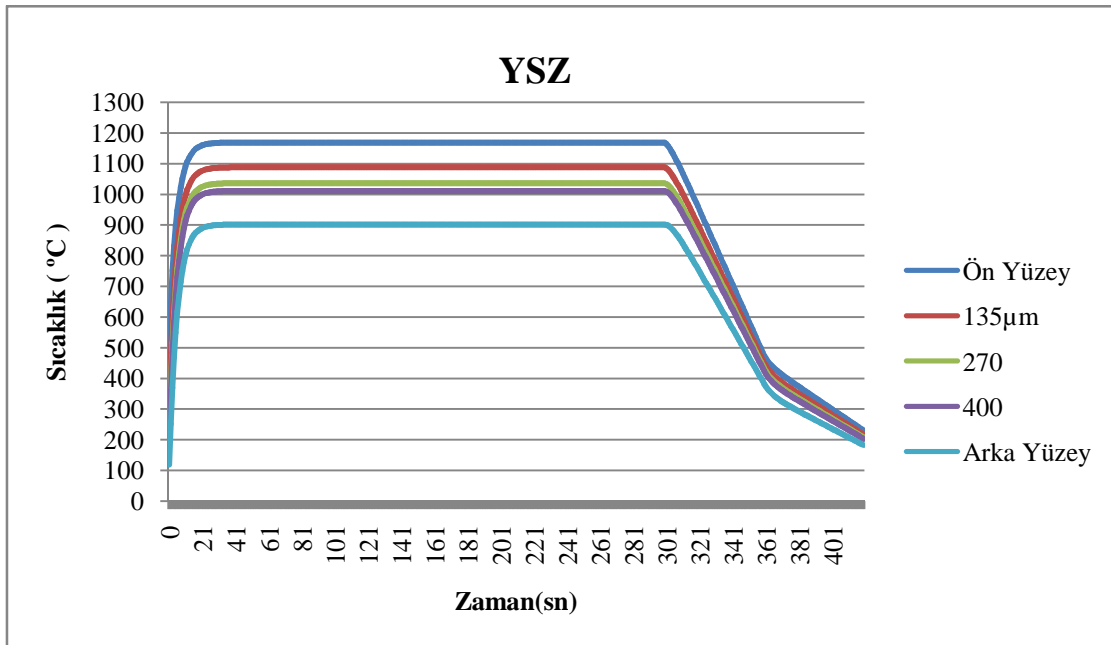


Şekil 4.14. Soğutma kanalları açılmış kanatçığın mesh görüntüsü

Şekil 4.15'te 300. Saniye sonundaki sıcaklık dağılımı verilmiştir. Maksimum sıcaklığın kanatçığın uç kısmında meydana geldiği görülmektedir, bu da en yüksek gerilmenin aynı yerde meydana geleceği anlamına gelmektedir.



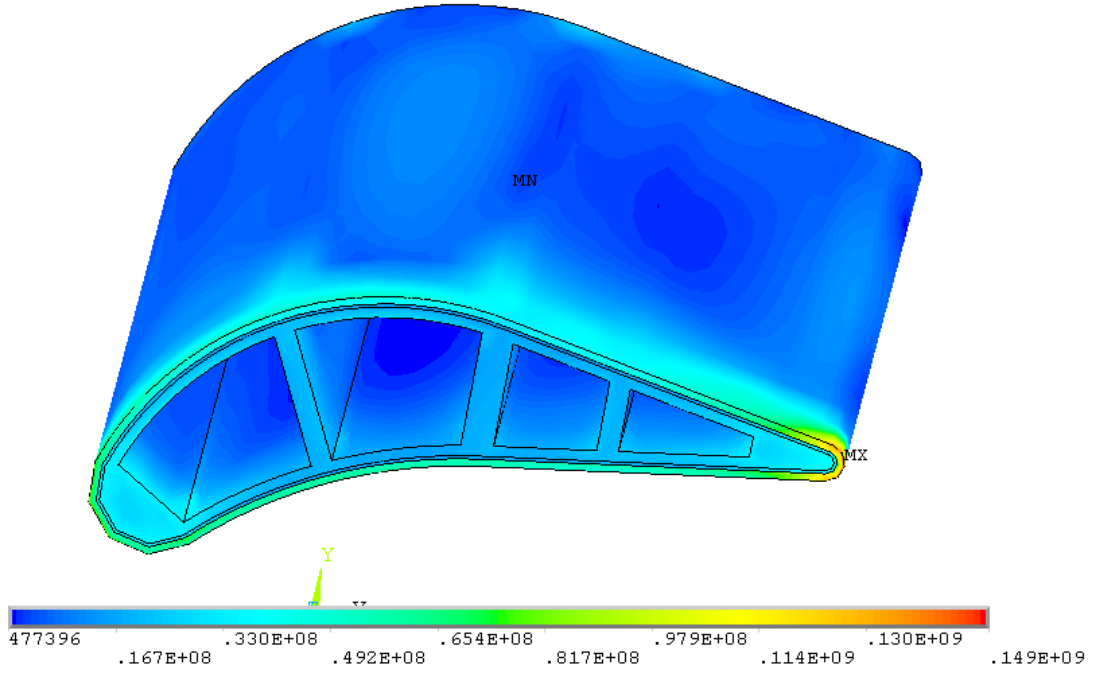
Şekil 4.15. YSZ TBK'lı kanatçığın 300. Saniyedeki sıcaklık dağılımı



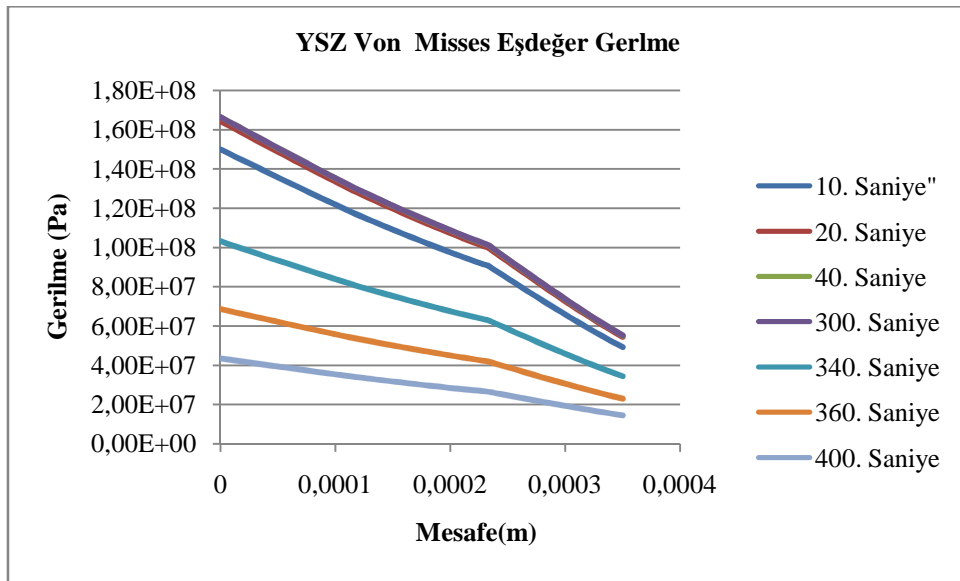
Şekil 4.16. YSZ TBK'lı kanatçıktaki zamana bağlı sıcaklık değişim grafiği

Şekil 14.16'da kaplama yüzeyinde sıcaklık 1169 °C olduğunda kaplamamın sonunda yaklaşık 1000°C sıcaklığa ulaşmaktadır. TBK'nın 169 °C'lik bir ısı koruma ısı koruma sağladığı görülmektedir.

Şekil 4.17'de kanatçığa ait von-Misses eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir.



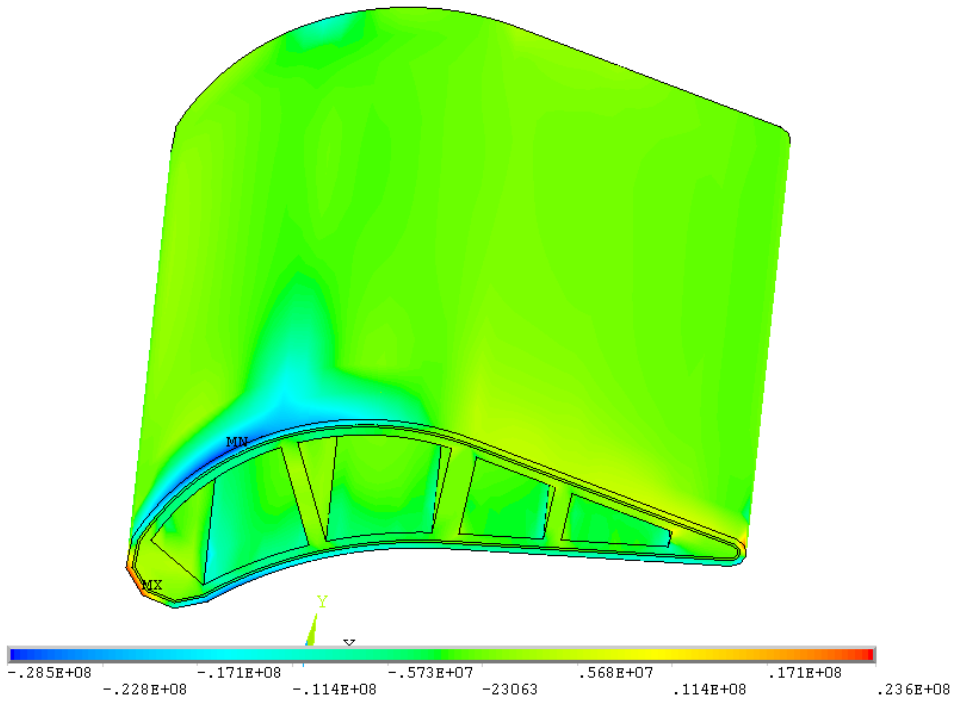
Şekil 4.17. YSZ TBK lı kanatçığın 300. Saniyedeki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı



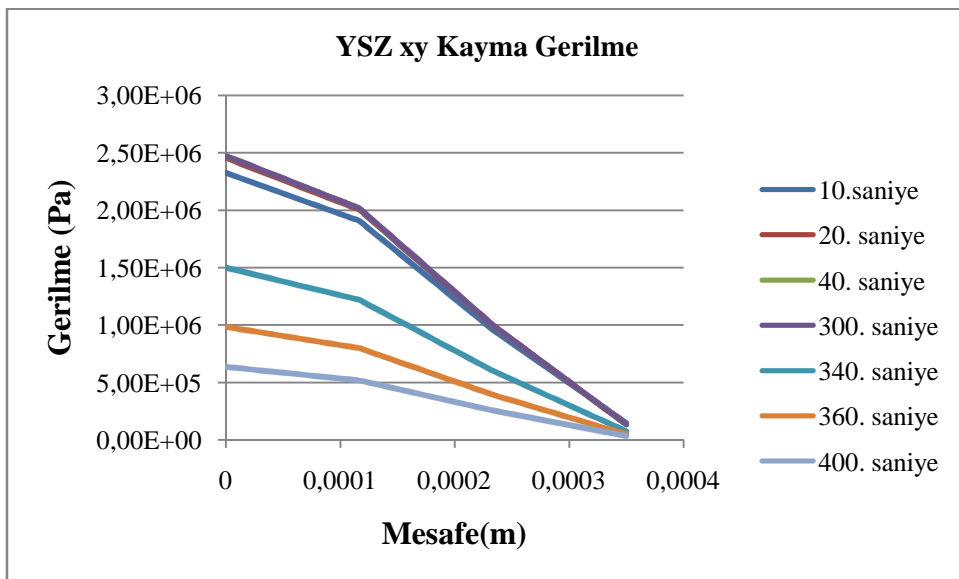
Şekil 4.18. YSZ TBK lı kanatçığın Von Misses eşdeğer gerilme dağılım grafiği

Şekil 4.18' deki grafikten de anlaşıldığı gibi sıcaklık düştükçe gerilmelerde düşmektedir. Maksimum gerilme kaplamanın üst yüzeyinde kanatçığin ince ucunda meydana gelmektedir. Altlıktaki gerilmenin 60MPa olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.19 da XY eksenindeki kayma gerilme dağılımı verilmiştir. Kanatçığin ince uç kısmında 2.2 MPa'lık bir gerilme söz konusudur.

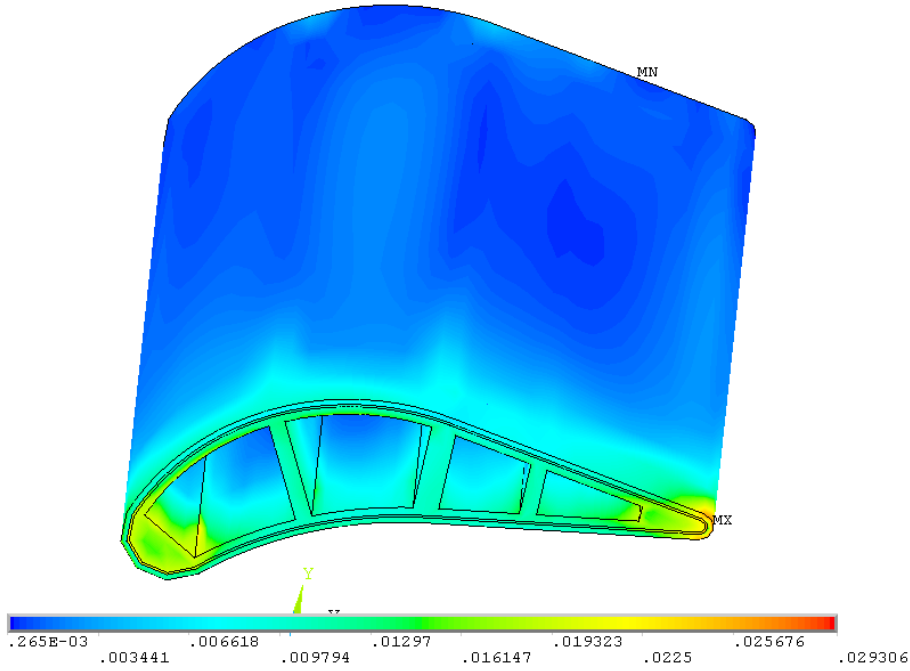


Şekil 4.19. YSZ TBK'lı kanatçığin 300. Saniye sonundaki XY kayma gerilme dağılımı

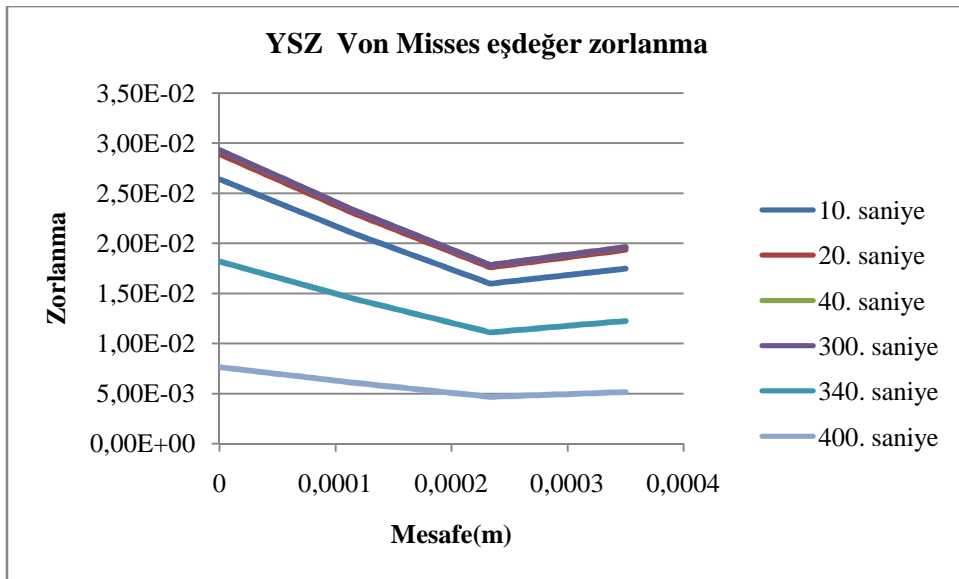


Şekil 4.20. YSZ TBK'lı kanatçığin mesafeye bağlı XY kayma gerilme grafiği

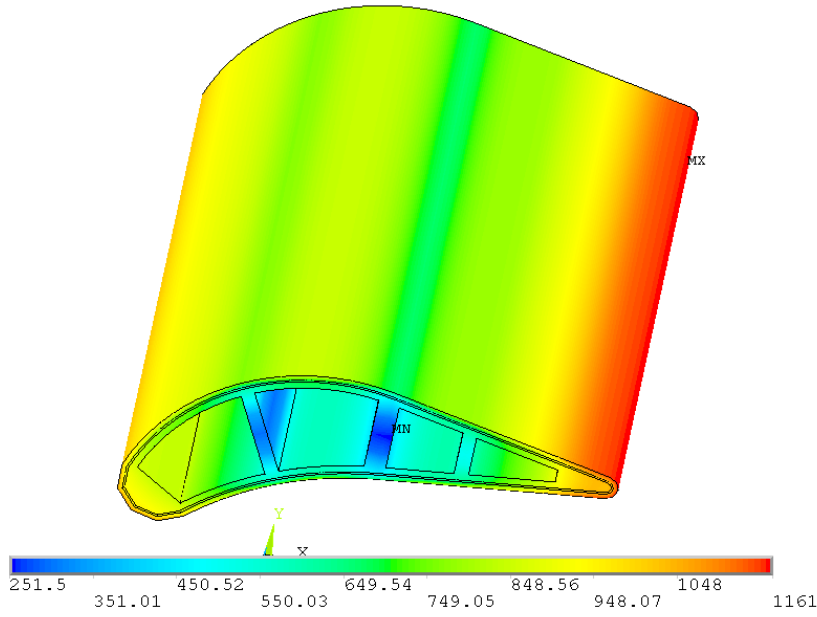
Şekil 4.21 de ye ait Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı verilmiştir. Maksimum zorlanmanın kaplamada olduğu görülmektedir. Kaplamanın yüzeyinden uzaklaştıkça zorlanmanın azaldığı fakat bağ tabakasına yaklaştıkça tekrar yükselmeye başladığı görülmektedir.



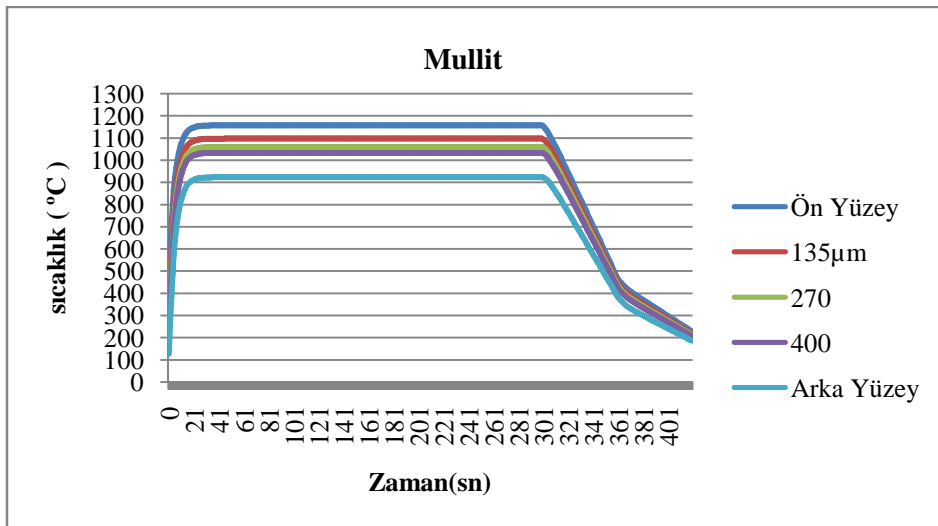
Şekil 4.21. YSZ TBK lı kanatçığın 300. Saniyedeki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı



Şekil 4.22. YSZ TBK lı kanatçığın Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı dağılım grafiği

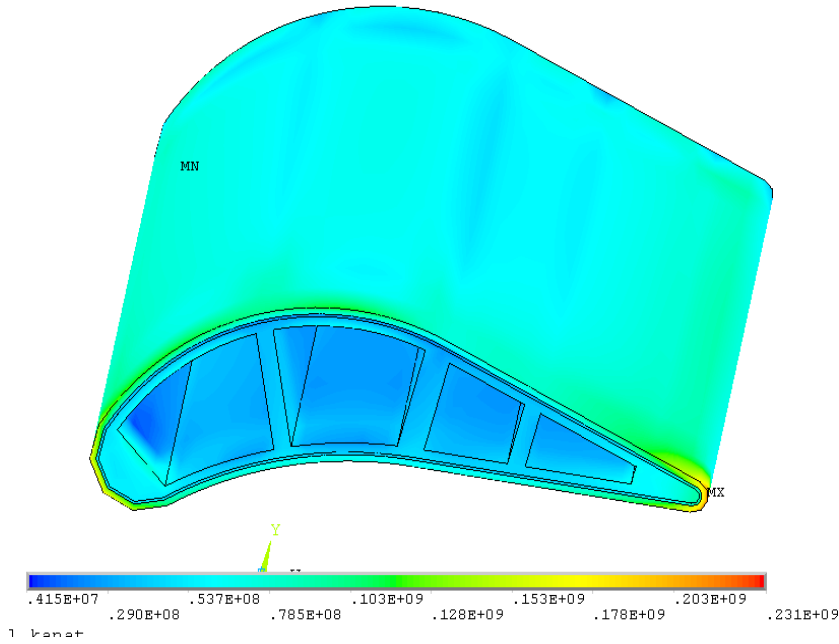


Şekil 4.23. Mullit TBK'lı Türbin kanatçığının 300. Saniye sonundaki sıcaklık dağılımı

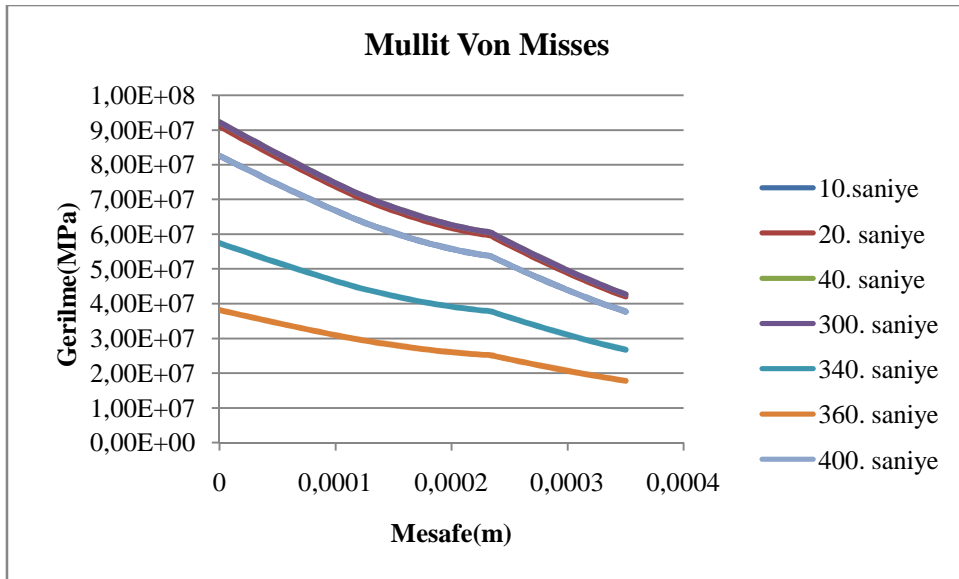


Şekil 4.24. Mullit TBK lı Türbin kanatçığın sıcaklık dağılımı grafiği

Şekil 4.23 ve şekil 4.24 Mullit kullanılarak yapılan TBK nın sıcaklık bilgilerinin bulunduğu resim ve grafikten oluşmaktadır. Maksimum sıcaklığın 1161 °C olduğu ve bu sıcaklığın kanatçığın uç kısımlarında olduğu, kaplamanın bittiği yerde yani kaplamanın bağ tabaka ile birleştiği yerde sıcaklığın 1020 °C görülmektedir. Mullitin yaklaşık 140 °C'lık bir ısı koruma sağladığı anlaşılmıştır.



Şekil 4.25. Mullit TBK lı kanatçıĝın Von Misses eşdeĝer gerilme daĝılımı



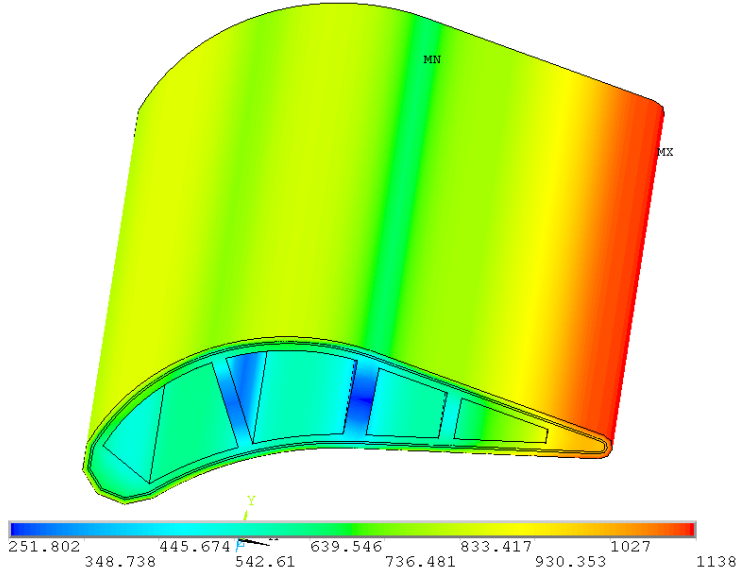
Şekil 4.26. Mullit TBK lı kanatçıĝın Von Misses eşdeĝer gerilme grafiĝi

Şekil 4.25'te Mullit TBK'lı Türbin kanatçıĝının 300. Saniye sonundaki von Misses eşdeĝer gerilme daĝılımı görölmektedir.

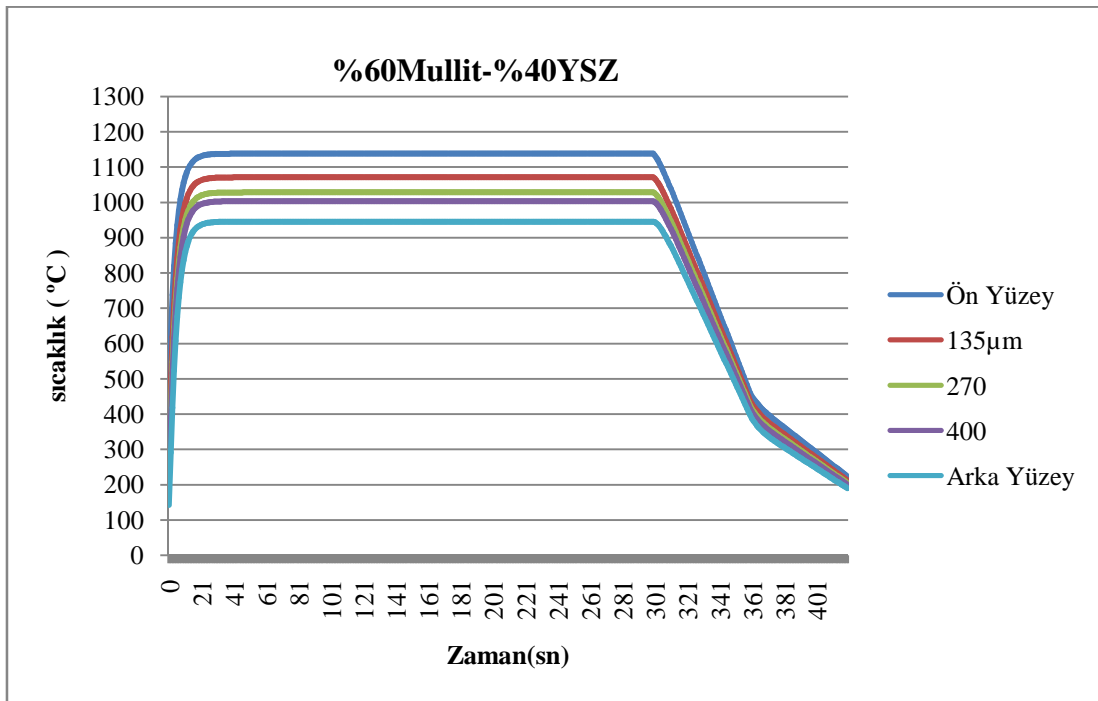
Şekil 4.26'deki grafikte anlaşılabacağı gibi maksimum gerilmenin 300. Saniyede yani sıcaklığın en yüksek dereceye ulaştığı anda oluşmakta ve 95 MPa civarındadır.



Şekil 4.27 de %60Mullit-%40YSZ nin kaplama malzemesi olarak kullanıldığı TBK'nı sıcaklık dağılımı verilmiştir. Sıcaklığın ulaştığı en yüksek nokta 1138 °Cdir buna karşın altlıktaki sıcaklık 1040 derecede kalmaktadır. Buda 98 °C lik bir ısı koruma anlamına gelmektedir.

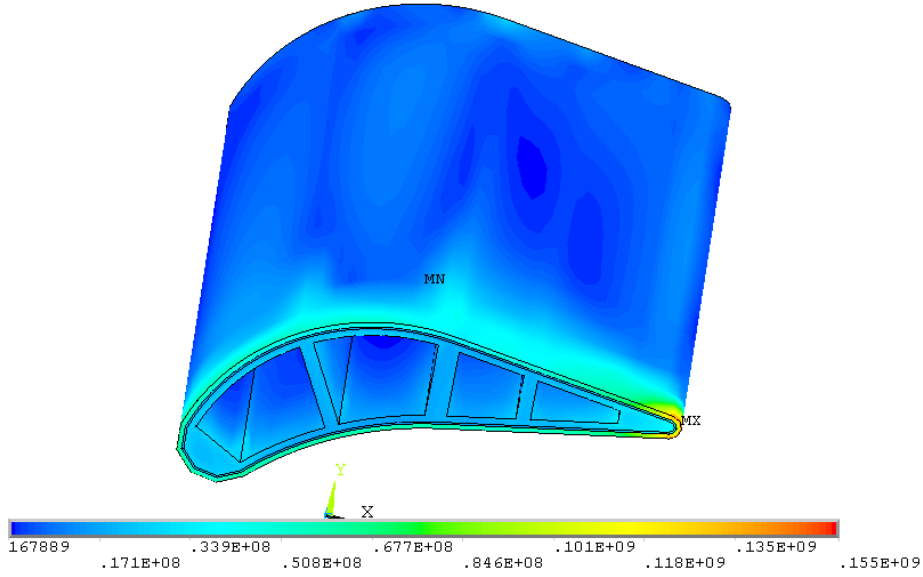


Şekil 4.27. %60Mullit-%40YSZ TBK'lı Türbin kanatçığının 300. Saniye sonundaki sıcaklık dağılımı

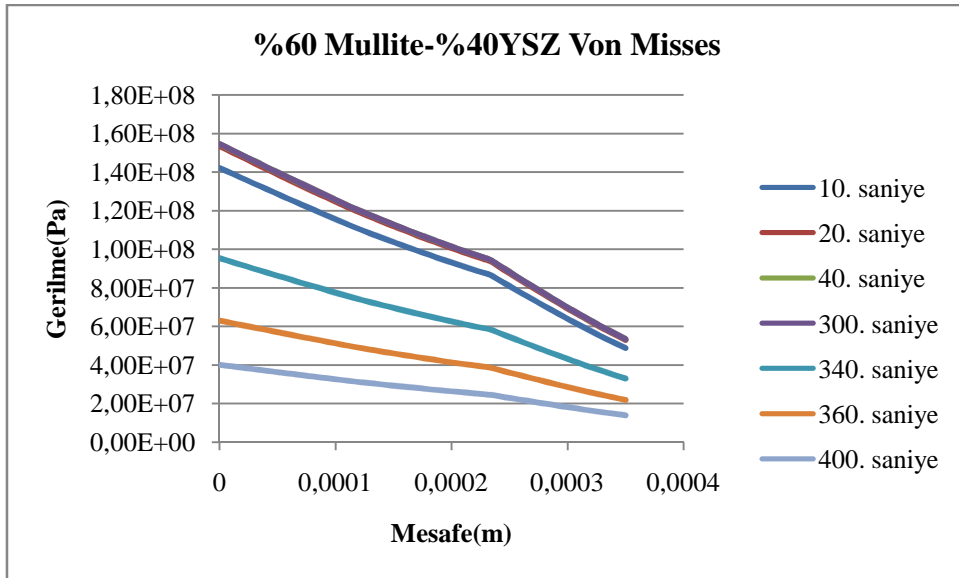


Şekil 4.28. %60 Mullite-%40 YSZ TBK'lı kanatçığın 300. Saniyedeki sıcaklık dağılımı grafiği

Şekil 4.29 da %60Mullit-%40YSZ TBK'lı Türbin kanatçığının Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı verilmiştir. Gerilmenin maksimum noktada 155MPa olduğu görülmektedir



Şekil 4.29. %60Mullit-%40YSZ TBK'lı Türbin kanatçığının 300. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı

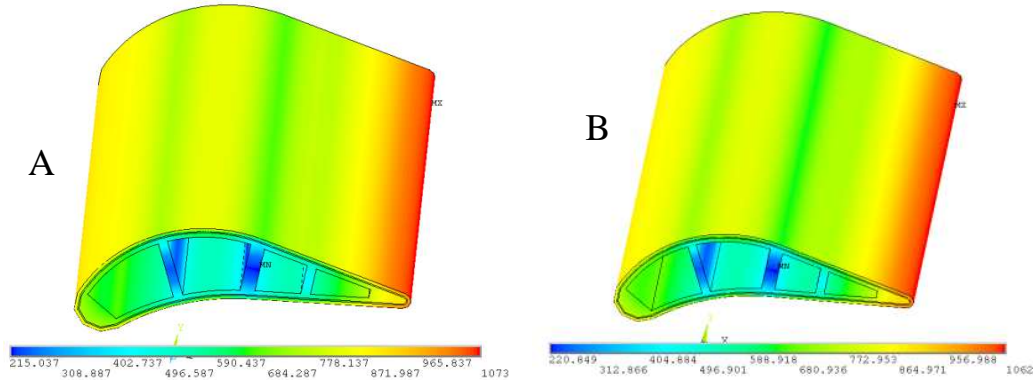


Şekil 4.30. %60Mullit-%40YSZ TBK'lı Türbin kanatçığının Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı grafiği

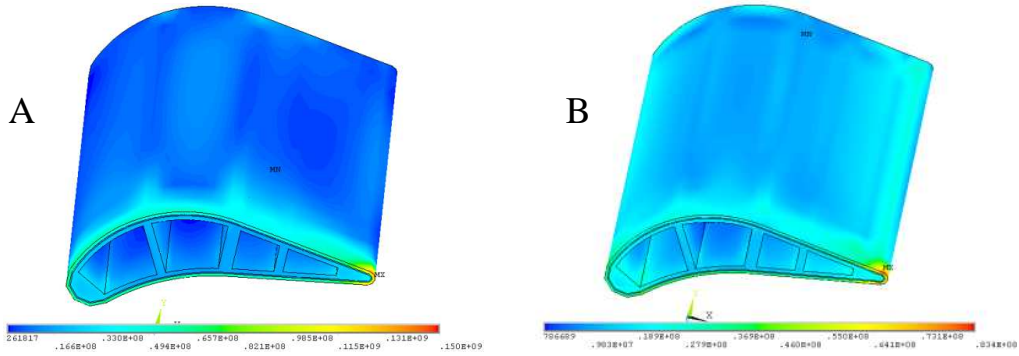
Von Misses eşdeğer gerilmenin minimum değeri 400. Saniyede kaplamanın bağ tabaka ile birleştiği yerde meydana gelmektedir. Minimum değeri 15MPa dır.

Şekil 4.31A'da YSZ, 4.31B'de Mullit TBK'lı türbin kanatçığına ait 10. Saniyedeki sıcaklık dağılımı verilmiştir. 10. Saniye sonunda en yüksek sıcaklığın YSZ için 1073°C, mullit için 1062 °C ye ulaştığı görülmüştür.

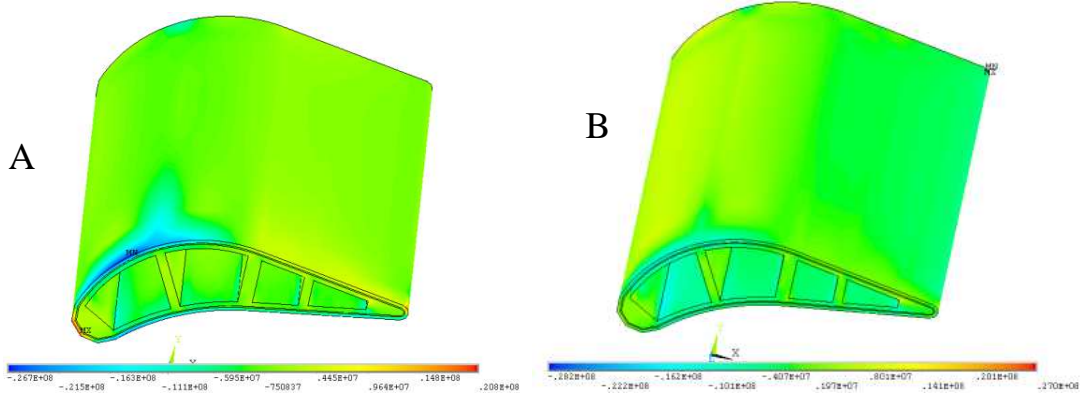
Aşağıdaki şekillerde (A) YSZ, (B) mullit için sonuçları göstermektedir.



Şekil 4.31. YSZ ve Mullit kaplamalardaki 10. Saniye sonundaki Sıcaklık Dağılımı

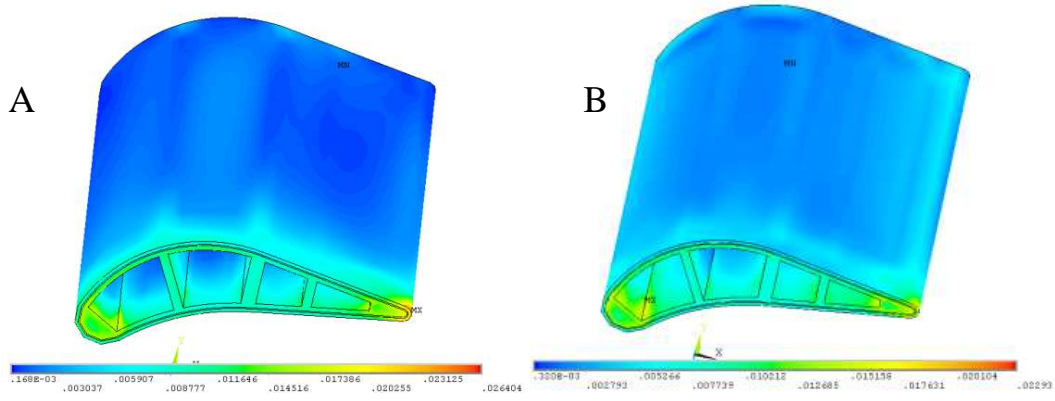


Şekil 4.32. YSZ ve Mullit kaplamalardaki 10. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı



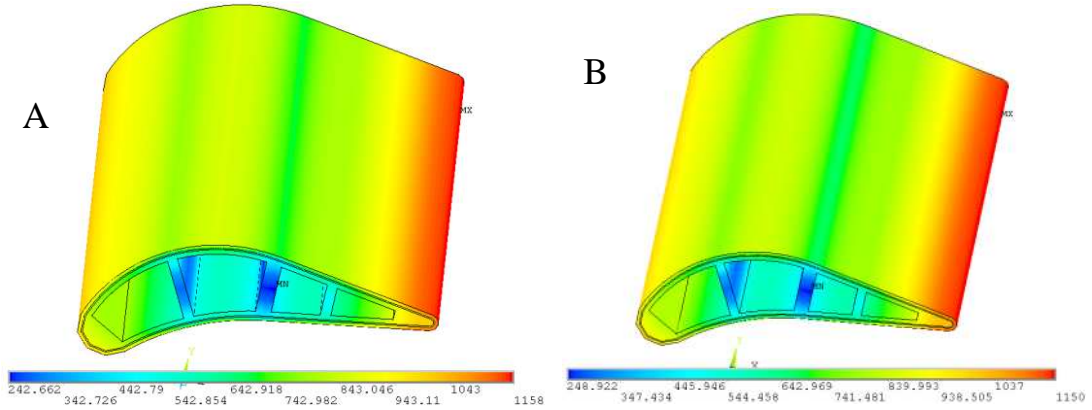
Şekil 4.33. YSZ ve Mullit kaplamalardaki 10. Saniye sonundaki xy kayma gerilme dağılımı

Şekil 4.32 de 10. Saniyedeki Von Misses eşdeğer gerilme 4.33 te xy kayma gerilme dağılımı, 4.34 te de Von Misses eşdeğer zorlanma değerleri verilmiştir.

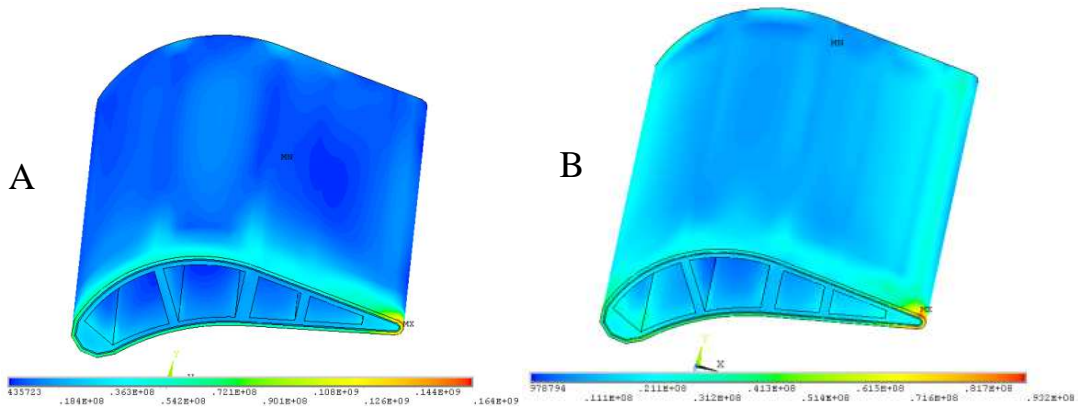


Şekil 4.34. YSZ ve Mullit kaplamalardaki 10. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı

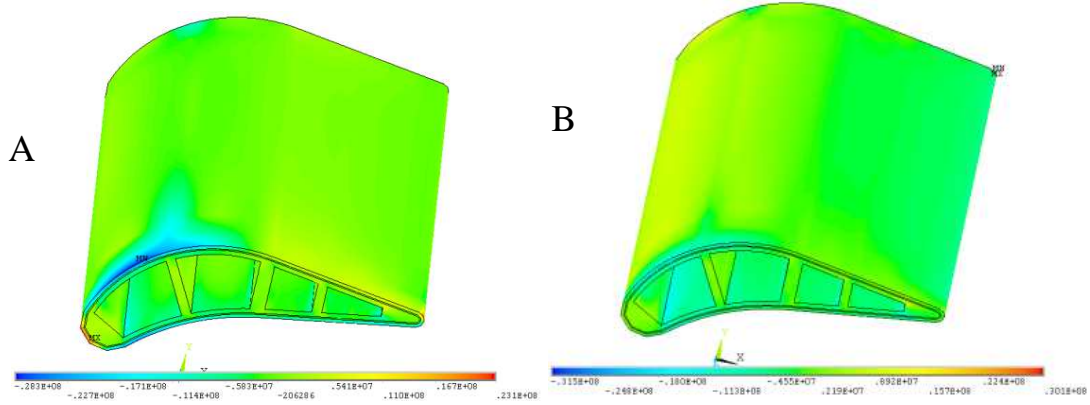
Sonuçlar incelendiğinde 10. Saniye deki gerilme ve zorlanmaların çok küçük değerlerde olduğu görülmüştür.



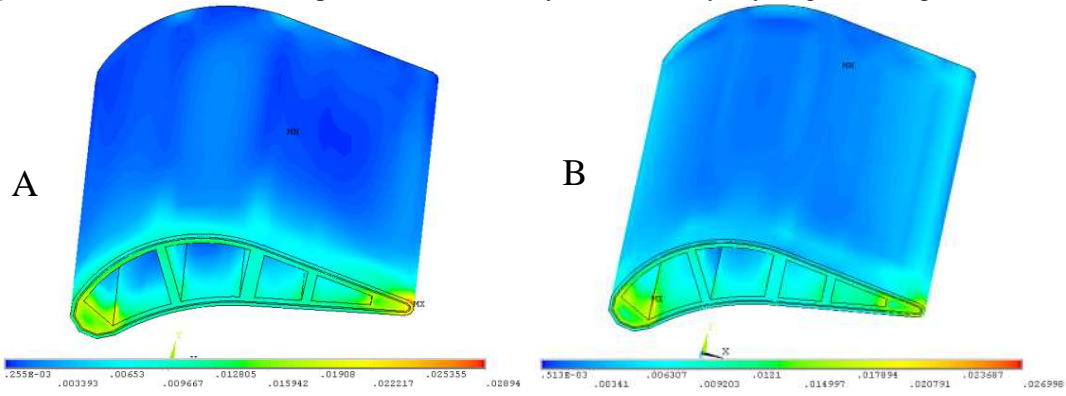
Şekil 4.35. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 20. saniye sonundaki sıcaklık dağılımı



Şekil 4.36. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 20. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı

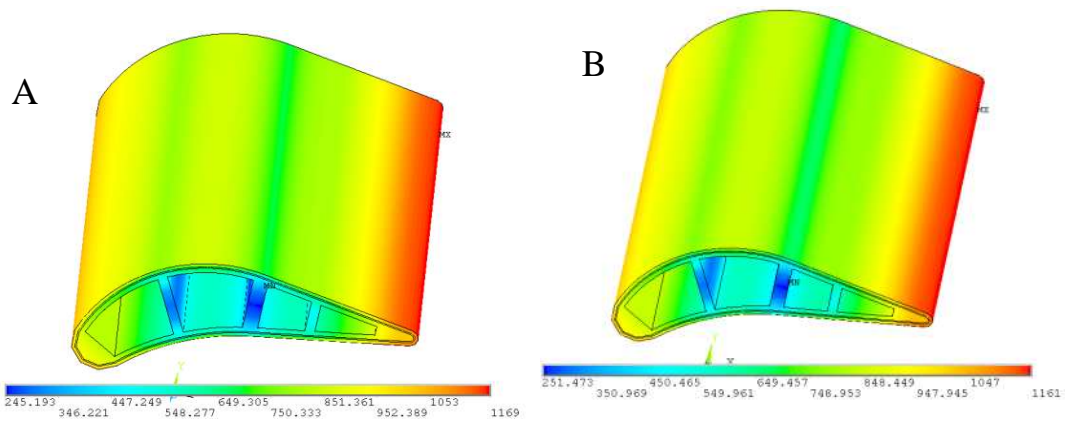


Şekil 4.37. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 20. saniye sonundaki xy kayma gerilme dağılımı

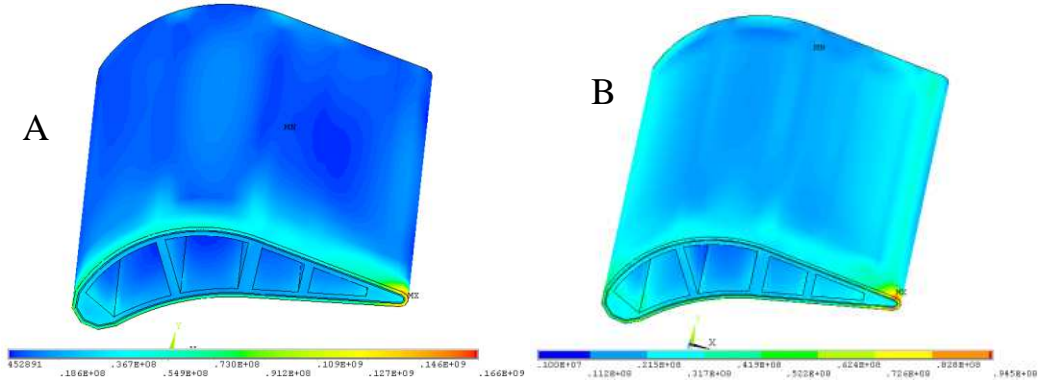


Şekil 4.38. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 20. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı

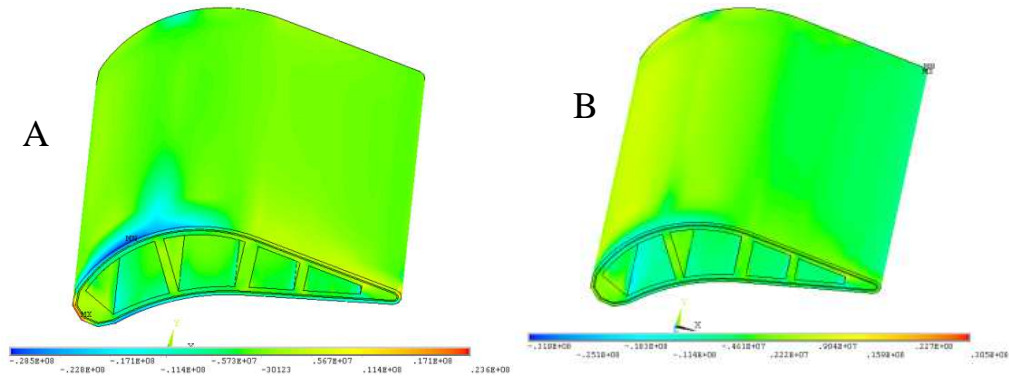
Şekil 4.35 de 20. Saniyedeki sıcaklık dağılımı 3.36 da Von Misses eşdeğer gerilme 4.37 de xy kayma gerilme dağılımı, 4.38 de de Von Misses eşdeğer zorlanma değerleri verilmiştir. 20. Saniye sonunda yüzey sıcaklıklarının YSZ için 1158 °C mullit için 1150 °C olduğu Von Misses eşdeğer gerilmelerin 144MPa ve 93MPa olduğu, en yüksek XY kayma gerilme değerlerinin 23 MPa ve 30MPa olduğu görülmüştür.



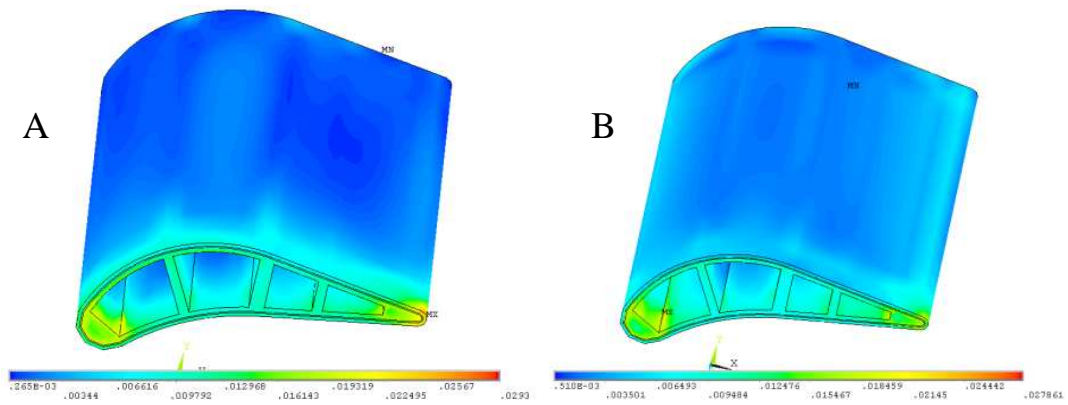
Şekil 4.39. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 40. saniye sonundaki sıcaklık dağılımı



Şekil 4.40. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 40. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı



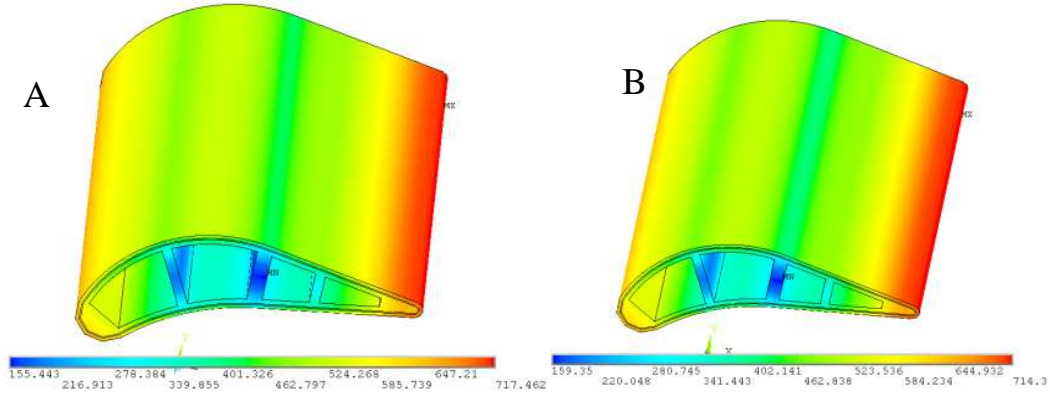
Şekil 4.41. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 40. saniye sonundaki xy kayma gerilme dağılımı



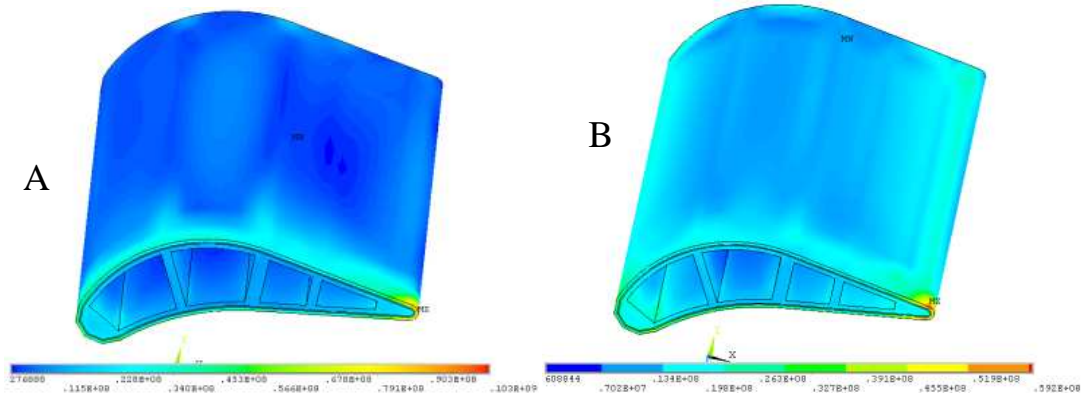
Şekil 4.42. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 40. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı

Şekil 4.39 da 40. Saniyedeki sıcaklık dağılımı 3.40 da Von Misses eşdeğer gerilme 4.41 de xy kayma gerilme dağılımı, 4.42 de de Von Misses eşdeğer zorlanma

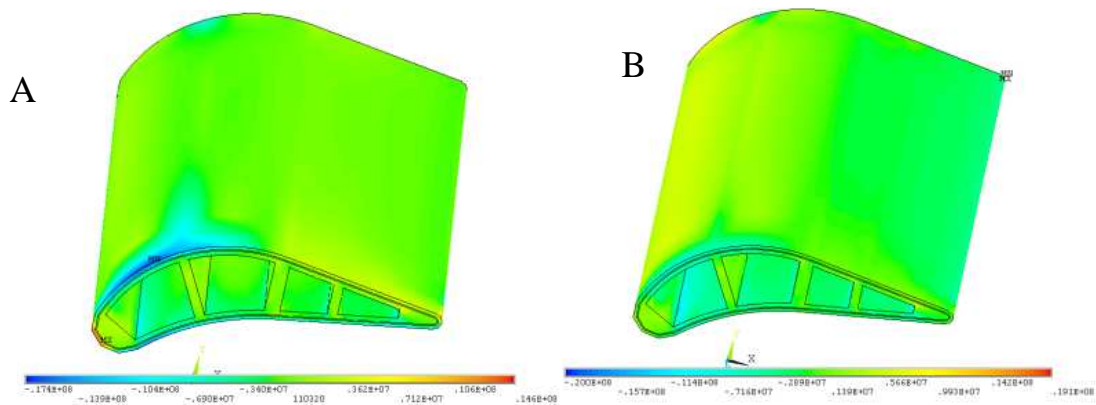
değerleri verilmiştir. 40. Saniye sonunda yüzey sıcaklıklarının YSZ için 1169 °C mullit için 1161 °C olduğu Von Misses eşdeğer gerilmelerin 166MPa ve 98MPa olduğu, en yüksek. XY kayma gerilme değerlerinin 24MPa ve 31MPa olduğu, eşdeğer zorlanmaların 0.029 ve 0.027 olduğu görülmektedir.



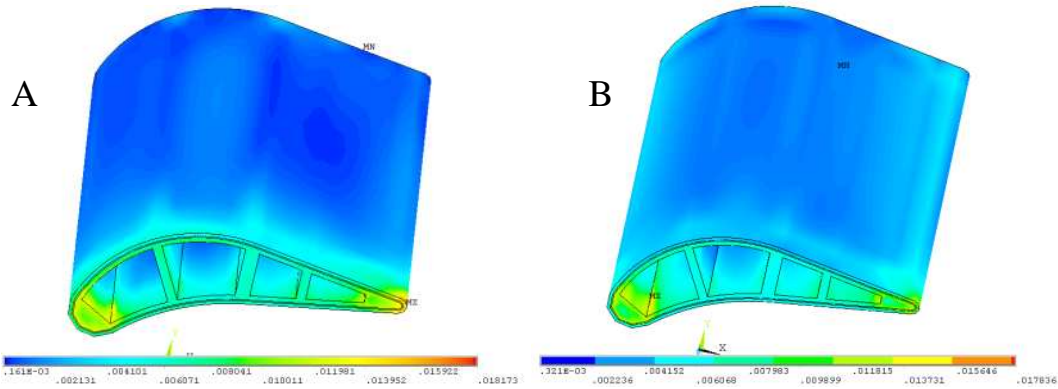
Şekil 4.43. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 340. Sıcaklık dağılımı



Şekil 4.44. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 340. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer gerilme dağılımı



Şekil 4.45. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 340. saniye sonundaki xy kayma gerilme dağılımı



Şekil 4.46. YSZ ve Mullit, kaplamalardaki 340. Saniye sonundaki Von Misses eşdeğer zorlanma dağılımı

Şekil 4.43 da 340. Saniyedeki sıcaklık dağılımı 3.44 de Von Misses eşdeğer gerilme 4.45 de xy kayma gerilme dağılımı, 4.46 da da Von Misses eşdeğer zorlanma değerleri verilmiştir. 340. Saniye sonunda yüzey sıcaklıklarının YSZ için 717 °C mullit için 714 °C olduğu Von Misses eşdeğer gerilmelerin 103MPa ve 59MPa olduğu, en yüksek. XY kayma gerilme değerlerinin 14MPa ve 19MPa olduğu, eşdeğer zorlanmaların 0.018 ve 0.017 olduğu görülmektedir.

#### 4.6. Çatlak İlerleme Analizi

Yapılan deneyler ve yapılan analizlerden elde edilen verilerden yararlanılarak TBK' daki üst kaplamada çatlak oluşumu ve ilerlemesi incelenmiştir. Yapılan deneylerde deney tekrar sayısına bağlı olarak çatlak ilerleme miktarı ölçülmüştür. elde edilen sonuçlar ile nümerik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

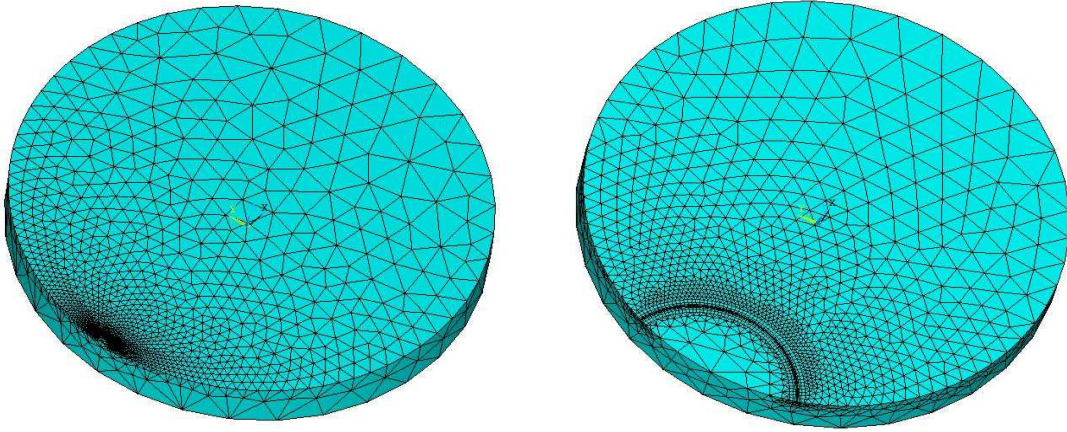
Bu bölümde yapılan çalışmada ilk olarak Bölüm 3'te yapılan deneylerin sonuçları kullanılarak termal yük altında eliptik çatlak içeren kaplama modeli ANSYS programında manuel olarak oluşturularak FCPAS kırılma analizi için gerekli dosyalar elde edilmiştir.

Otomatikleştirilmiş makroya geçiş yapılırken geometrinin oluşturulması, sistemin bölüntülenmesi, sıcaklık yüklerinin uygulanması kaplama malzeme sabitleri, sınır şartları, çatlak ucu boyunca istenilen eleman sayısı manuel olarak tek seferliğine ANSYS programından oluşturmuş ve daha sonra sabit ölçüler için elde edilmiş olan



makro parametrik hale getirilmiştir. Oluşturulan modellerde çatlak ucu bölgesine Şekil 4.47 de gösterildiği gibi zenginleştirilmiş eleman kullanılarak daha hassas bölüntülenmiş, kaplamanın geriye kalan kısmı ise serbest bölüntülenmiştir.

Şekil 4.47 de çatlak yerleştirilmiş üst kaplamanın sonlu elemanlar modelinin ağ yapısında çatlak ilerleme profili verilmiştir.



Şekil 4.47. Çatlak ilerleme profili

Çatlak profili ve ilerleme miktarının belirlenebilmesi için FCPAS ara yüzü kullanılarak kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir.

#### 4.7. Çatlak Profili Oluşturma

Nümerik olarak çatlak profili elips uydurma yöntemi ile elde edilir

En genel elips formülü

$$a \cdot x^2 + 2 \cdot b \cdot x \cdot y + c \cdot y^2 + 2 \cdot d \cdot x + 2 \cdot f \cdot y + g = 0 \quad (4.1)$$

şeklinde tanımlanır. Bu sisteme en küçük kareler metodu uygulayabilmek için (a,b,c,d,f,g) denklem katsayılarını bulmamız gerekmektedir. İlk olarak Denklem 4.1'i a katsayısına bölünür ve  $x^2$  ifadesini denklemin sağ tarafına taşınarak Denklem 4.2'yi elde etmiş oluruz.

$$2*b'*x*y + c'*y^2 + 2*d'*x + 2*f'*y + g' = -x^2 \quad (4.2)$$

Bu ifadeyi matris formunda yazarsak;

$$[2*x.*y \quad y.^2 \quad 2*x \quad 2*y \quad 1] * \begin{bmatrix} b' \\ c' \\ d' \\ f' \\ g' \end{bmatrix} = -x.^2 \quad (4.3)$$

$$(M*E=B) \quad (4.4)$$

$$E = (B) / M \quad E = \begin{bmatrix} e(1) \\ e(2) \\ e(3) \\ e(4) \\ e(5) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\begin{aligned} [M]_{i,1} &= (2*x)*(y) \\ [M]_{i,2} &= (y_i)^2 \\ [M]_{i,3} &= (2*x) \\ [M]_{i,4} &= (2*y) \\ [M]_{i,5} &= 1 \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$[B]_{i,1} = (-x_i)^2 \quad (4.7)$$

$$E = B / M$$

$$E = \text{pseudoinverse}(M) * B \quad (4.7)$$

Pseudoinverse (M) matrisinin elde edilişi ;

$$\begin{aligned}
[N] &= [M]^T \\
[A] &= [N] \times [M] \\
[K] &= [A]^{-1} \\
[Z] &= [K] \times [N] \\
[Z] &= Pseudoinverse(M)
\end{aligned} \tag{4.7}$$

$$\begin{aligned}
a &= 1 \\
[E]_{1,1} &= b \\
[E]_{1,2} &= c \\
[E]_{1,3} &= d \\
[E]_{1,4} &= f \\
[E]_{1,5} &= g
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Elipse uydurma formülasyonu sonucu elde edilen parametrik elips değerleri:

$$\Delta = b^2 - ac \tag{4.9}$$

Çatlak ucu koordinatlarına uydurulmuş elipsin merkez koordinat değerleri; Denklem 4.9 yardımı ile hesaplanır.

$$\begin{aligned}
X_0 &= (cd - bf) / \Delta \\
Y_0 &= (af - bd) / \Delta
\end{aligned} \tag{4.10}$$

Elipsin yatay eksenle yapmış olduğu dönme açısı;

$$\beta = 0.5 * \text{acot} \left( (c - a) / (2 * b) \right) \tag{4.11}$$

Elipsin kısa ve uzun kenar ölçüleri;

$$s = \sqrt{1 + \frac{4 * b^2}{(a - c)^2}} \tag{4.12}$$

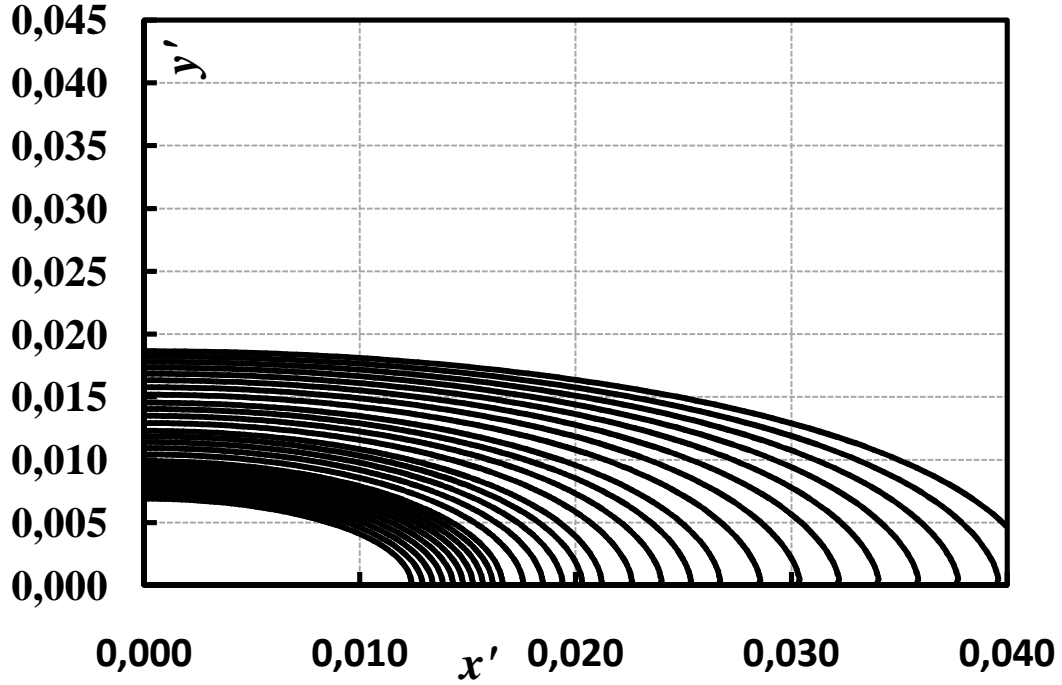
Denklem 4.2 yardımı ile elips kısa kenar ve uzunlukları

$$\begin{aligned}
a\_prime &= \sqrt{\frac{w}{\Delta * ((c - a) * s - (c + a))}} \\
b\_prime &= \sqrt{\frac{w}{\Delta * ((a - c) * s - (c + a))}}
\end{aligned} \tag{4.13}$$

Semimajor\_axis: Max (a\_prime, b\_prime): Elips uzun eksen (a) uzunluğu

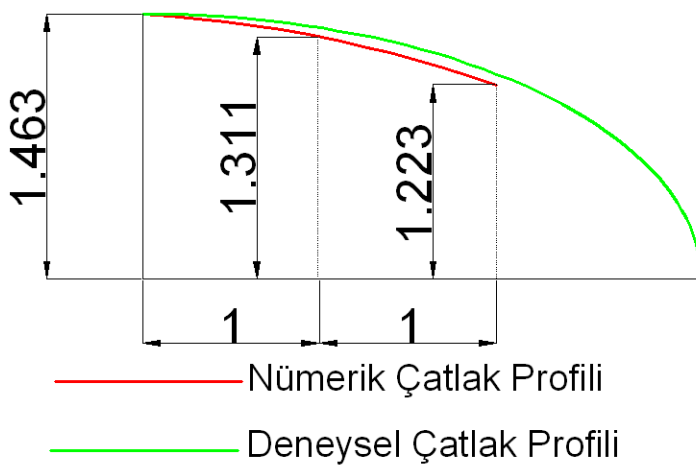
Semiminor\_axis: Min (a\_prime, b\_prime): Elips kısa eksen (b) uzunluğu

Açıklanan elips matematiksel formülasyonu kullanılarak Fortan dilinde çatlak koordinatlarına en uygun elipse uydurma işlemini gerçekleştiren Ellipsefit\_5.exe oluşturulmuştur.[96]



Şekil 4.48. Nümerik olarak hesaplanan çatlak profili

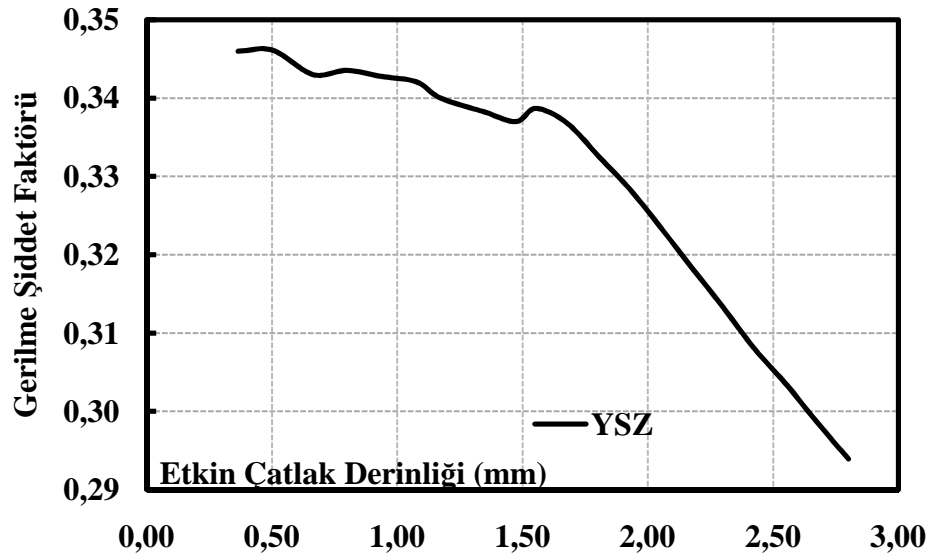
Deneysel çalışmalardan çatlakın eliptik yapıda olduğu tespit edilmiştir. Nümerik olarak hesaplanan çatlak profili ölçüler deneysel verilerle kıyaslanmış ve uyumlu oldukları tespit edilmiştir. (Şekil 4.49)



Şekil 4.49. Deneysel olarak elde edilen ile nümerik olarak hesaplanan çatlak profilleri

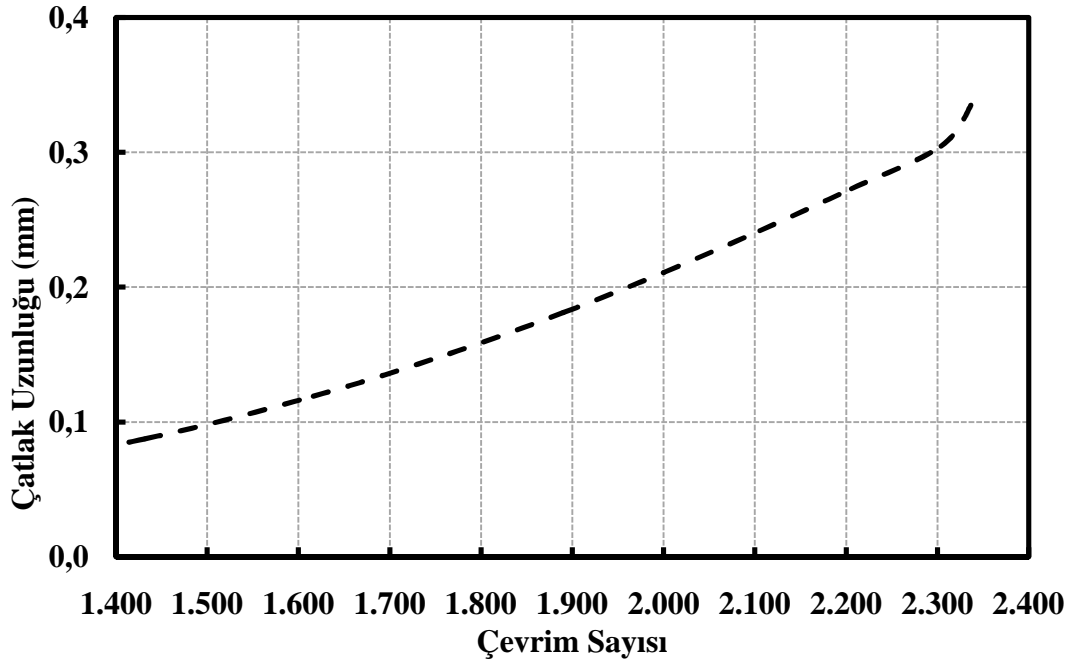
#### 4.8. Gerilme Şiddet Faktörü ve Ömür Tahmini

Çatlak ilerleme miktarının belirlenebilmesi için FCPAS ara yüzü kullanılarak kırılma analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerilme şiddet faktörleri zenginleştirilmiş sonlu elemanlar yardımı ile hesaplanmıştır. Şekil 4.50 te YSZ ye ait gerilme şiddet faktör grafiği çatlak derinliğine bağlı olarak verilmektedir. Gerilme şiddet faktörü çatlak ilerledikçe düşmektedir. Buda çatlak büyüdükçe çatlak ilerletmek için gerekli enerjini azaldığı anlamına gelmektedir.

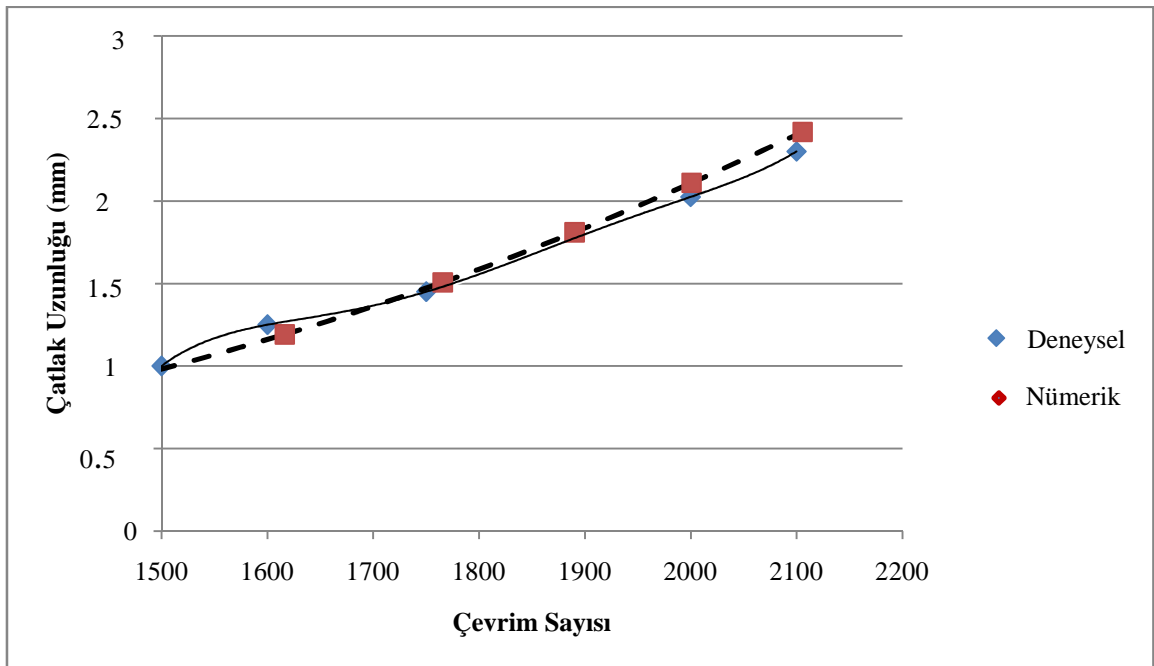


Şekil 4.50. YSZ Kaplama için Gerilme şiddet Faktörü

Çatlak profili ve gerilme şiddet faktörleri yardımıyla kaplama için ömür tahmini nümerik olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.51de YSZ kaplama için ömür tahmin grafiği verilmiştir.



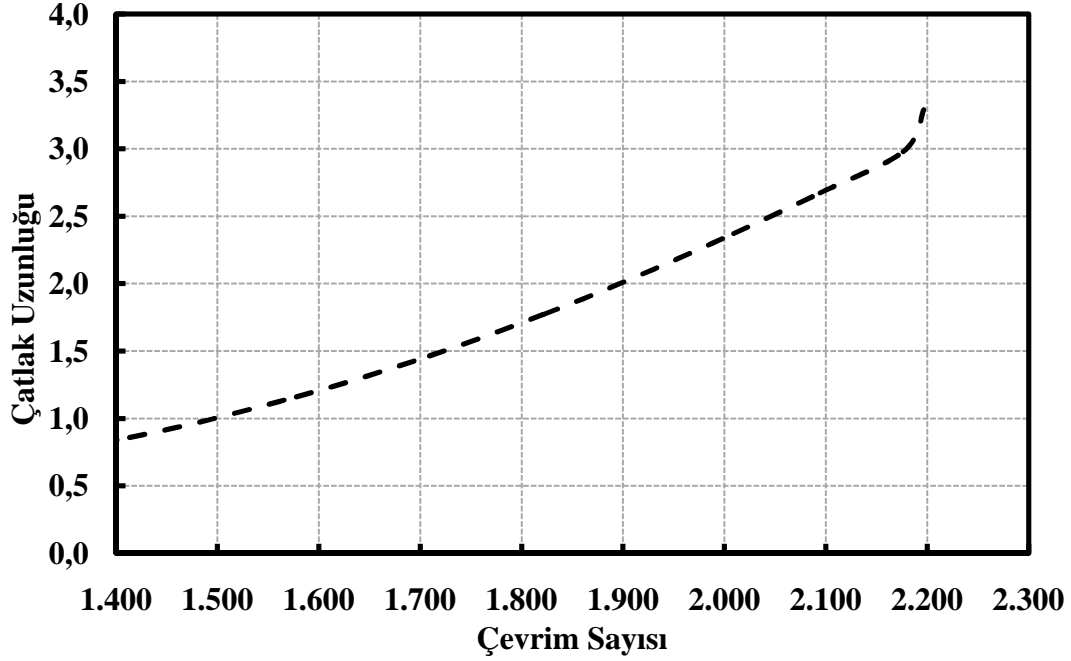
Şekil 4.51. YSZ Kaplama için ömür tahmini



Şekil 4.52. Deneysel ve nümerik olarak elde edilen çevrim sayısına bağlı- çatlak uzunluğu grafiği

Deneysel olarak elde edilen çatlak uzunluğu ile nümerik olarak elde edilen çatlak uzunluklarının uyumlu olduğu, var olan sapmaların en fazla %2.3 olduğu bununda kabul edilebilir sınırlar içinde olduğu belirlenmiştir. Yapılan analizlerde YSZ' nin 2300 çevrimde 3 mm ulaştığı ve kullanılamaz hale geldiği sonucuna varılmıştır.

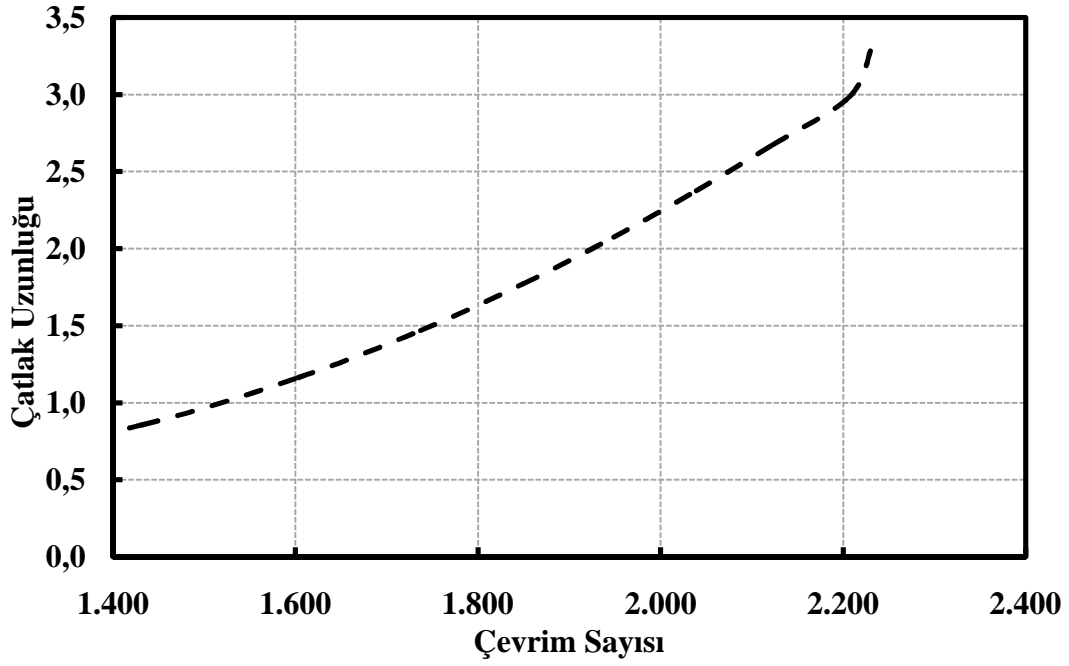
Mullit ve %60Mullit-%40YSZ için gerilme şiddet faktörleri ve ömür tahini hesaplamaları yapılmıştır.



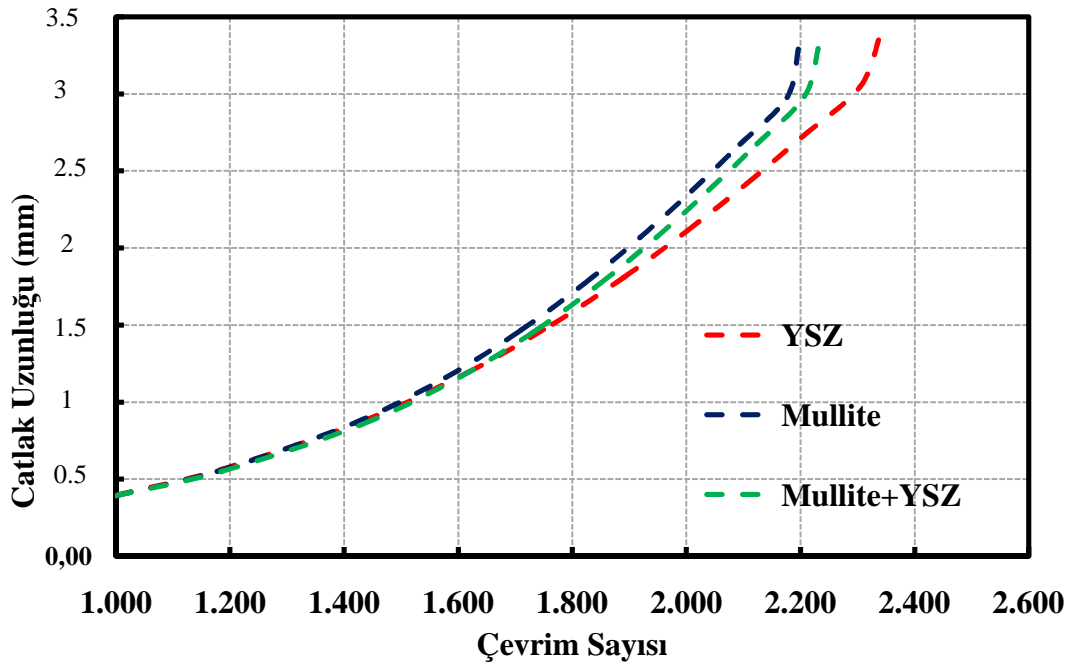
Şekil 4.53. Mullite Kaplama için hesaplanan ömür tahmin grafiği

Şekil 4.53 de Mullit için hesaplanan ömür tahmini grafiği verilmiştir. Yapılan analizde çatlağın 1400 çevrimden sonra başlayacağı ve 2180 çevrim sonra çatlağın 3 mm ye ulaşarak kaplamanın kullanılmaz hale geleceği belirlenmiştir.

Şekil 4.54 de %60Mullit-%40YSZ kaplama için yapılan ömür tahmin grafiği verilmiştir. Bu kaplamada çatlağın 1400 çevrim sonunda başlayacağı ve 2200 çevrim sonra çatlağın 3 mm ye ulaşacağı görülmektedir.



Şekil 4.54. %60Mullit-%40YSZ Kaplama için ömür tahmini



Şekil 4.55. Üç kaplama malzemesinin ömür tahmin hesaplamalarının kıyas grafiği

YSZ, Mullit ve %60Mullit-%40YSZ den oluşan üç farklı TBK'nın ömür tahmin hesaplamaları incelendiğinde YSZ'nin diğer iki kaplamaya göre daha uzun ömürlü olduğu tespit edilmiştir.



## **BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER**

### **5.1. Sonuçlar**

Bu çalışmada uçaklarda kullanılan gaz türbinli motorların türbin kanatçıklarına uygulanan bir termal bariyer kaplama sisteminin termal şok davranışı incelenmiştir. Bir termal bariyer kaplama sisteminin termal şok davranışı deneysel olarak incelenmiş ve bulgular ışığında bilgisayar destekli analizi gerçekleştirilmiştir. Termal bariyer kaplama sistemi paslanmaz çelik altlığa itriyum oksit ile kısmen kararlı hale getirilmiş zirkonyum oksit (YSZ) oluşan bir seramik üst kaplamaya ve NiCrAlY metalik bağ kaplamaya sahiptir. Her iki tabakada plazma sprej yöntemiyle uygulanmıştır. Numunelerde oluşan hasarlar, çevrim sayısı, termal gerilme, sıcaklıkta geçen zaman açısından incelenmiştir. Deneysel bulgular ışığında modellenen TBK' nın gerilme analizleri gerçekleştirilmiş ve oluşan çatlakların profilleri ve çatlak ilerleme oranı hesaplanarak kaplama için ömür tayini yapılmıştır.

Çatlak ilerleme analizlerinde ANSYS programı kullanılarak üç boyutlu kaplama içindeki yatay çatlaklar modellenmiş ve termal yükler altında parametrik makrolar oluşturulmuş ve tekil analizler gerçekleştirilmiştir. Tekil kırılma analizleri sonucunda elde edilen değerlerin literatür ile uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Deneysel verilerle de uyumlu olduğu görülen FCPAS çözümlerinin ve parametrik makro ile oluşturulan modellerin geçerliliği ispatlanmıştır.

Deneyler termel şok cihazında 300 saniye ısıtılıp 120 saniye soğutularak gerçekleştirilmiştir. Numuneyi ısıtma hızı 20 °C/sn, soğutma hızı 10 °C/sn dir. Isıtma ve soğutma zamanlarında deneysel verilerle nümerik sonuçların %2.8 lik sabit rejimde de %1.2 lik sapmalarla örtüştüğü tespit edilmiştir.

Modellenen deney numunesi ve türbin kanatçığı üzerine farklı malzemelerden oluşan TBK uygulanmıştır. Uygulanan kaplama malzemeleri YSZ, mullit ve %40 mullit %60 YSZ olarak denenmiş ve analizler gerçekleştirilmiştir.

Yapılan analizler neticesinde deney numunesinde YSZ üst katmanlı TBK' nın üst yüzey sıcaklığı 1232 °C ye ulaştığında altlık sıcaklığı 990 °C olarak hesaplanmıştır. Buda YSZ kullanılan TBK'nın altlık sıcaklığını 242 °C düşürerek %19.6 oranında ısı koruma sağladığı tespit edilmiştir. Mullit üst katmanlı TBK' nın altlık sıcaklığını 211 °C düşürerek %17.1, Mullit+YSZ üst katmanlı TBK'nın altlık sıcaklığını 194 °C düşürerek %15.7 oranında ısı koruma sağladığı tespit edilmiştir.

Türbin kanatçığında ise YSZ nin 169 °C ile %14, mullit'in 140 °C ile %12 ve mullit+YSZ'nin 98 °C ile %9 oranında ısı koruma sağladığı görülmüştür.

Türbin kanatçığındaki Von Misses eşdeğer gerilmeler kanatçık profilinin en ince yeri olan uç kısmında en yüksek değerine ulaştığı görülmüş ve YSZ kaplama için 149MPa, Mullit için 231MPa, YSZ+Mullit için 155MPa olduğu görülmüştür.

Yapılan deneylerde çevrim sayısına bağlı olarak çatlak ilerleme miktarı ve çatlak profili belirlenmiş ve YSZ üst katmanlı TBK uygulanmış numunenin 1500 çevrim sonunda çatlağın kenardan başlayıp merkeze doğru 1mm ilerlediği, 1750 çevrim sonunda çatlak boyunun 1.5 mm, 2000 çevrim de 2.5 mm'ye ulaştığı tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen ömür tahmini analizlerinde YSZ üst katmanlı TBK uygulanmış numunede 1500 çevrim sonunda çatlak boyunun kenardan merkeze doğru 1 mm, 1750 çevrim sonunda 1.45mm ve 2000 çevrim sonunda 2.6mm olarak hesaplanmıştır. 2300 çevrim sonunda çatlak boyu yarıçap ölçüsünün %20 si olan 3 mm' ye ulaşmıştır. Deneysel verilerin nümerik sonuçlarla en fazla %3.6 lık sapma ile örtüştüğü görülmüştür. Çatlak profilinin eliptik olduğu ve nümerik sonuçlarla %1 lik bir sapma ile örtüştüğü tespit edilmiştir.

Mullit üst katmanlı TBK için yapılan analizlerde çatlak boyunun 3 mm'ye 2100 çevrimde, mullit+YSZ üst katmanlı TBK için ise 2200 çevrim sonunda ulaştığı görülmüştür.

Sonuç olarak, bu çalışmada kullanılan deneylerden elde edilen sonuçlar ve nümerik sonuçların, literatürde bulunan çatlak ilerleme analizi, çatlak profili oluşturma ve sonlu elemanlar yöntemiyle gerilmelerin hesaplanması ile birlikte türbin kanatçığı tasarımcıları için ömür belirlemede kullanılacak faydalı bir veri kaynağı oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar ışığında, bilgisayar destekli modellemenin ve analizin deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Böylece, bilgisayar destekli modelleme yardımıyla termal bariyer kaplama sistemleri ve daha birçok çok katmanlı malzeme sistemleri için bir hasar mekanizması modellenilebilecektir.

## 5.2. Öneriler

Laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerle bir ömür belirlenirken farklı mekanizmaların birbiriyle etkileşimi, uygulanan mekanik ve termal yüklerin servis esnasında oluşan gerçek yüklerle benzerliği, gerçek türbin kanatçıklarının maruz kaldığı çevresel şartlar gibi birçok etken göz önünde bulundurulmalıdır.

Türbin kanatçığı üzerine gerçek şartlardaki mekanik yükler göz önünde bulundurulurken deney düzeneği yeniden düzenlenebilir. Bunun için mevcut düzeneğe yük hücresi ve hidrolik aktuator eklenerek termal ve mekanik yüklerin TBK üzerindeki etkileri incelenebilir.

Deneysel çalışma sırasında kaplamada meydana gelen termal gerilmeleri ölçmek için gerinim ölçer (strain gage) kullanılarak, sayısal model iyileştirilebilir, deneysel çalışmayla sayısal model arasındaki hata azaltılabilir.

Birden fazla numunenin aynı anda teste tabii tutulacağı bir deney düzeneği tasarlanarak, toplam deney süresi kısaltılıp, tüm testlerde aynı ortam şartları sağlanabilir.

Çatlak ilerleme analizlerine veri elde etmek için numuneler, çeşitli geometrilerinde çatlak içerecek şekilde hazırlanabilir. Böylece farklı geometrilere sahip çatlakların TBK üzerindeki etkileri incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] ÜSTEL, F. ,Plazma Sprey Kaplama Teknolojisi, Yük. Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 1995.
- [2] KAYSSER, W.A., PETERS, M., FRITSCHER, K. ve SCHULZ, U., Processing, characterisation and testing of EB-PVD Thermal Barrier Coatings, AGARD SMP Meeting on Thermal Barrier Coatings, Denmark., 1997.
- [3] WILLIAMS, J.C. ve EDGAR, E.A., Progress in structural materials for aerospace systems, Acta Materialia 51, 5775-5799, 2003.
- [4] PETERS, M., LEYENS, C., SCHULZ, U ve KAYSSER, W.A., EB-PVD thermal barrier coatings for aeroengines and gas turbines, Advanced Engineering Materials, 3 (4), 193-204, 2003.
- [5] SCHMITT, G. ve HERTTER, M., Improved oxidation resistance of thermal barrier coatings, Surface and Coatings Technology, 120-121, 84-88, 1999.
- [6] HORNE, D.F., Aircraft production technology, Cambridge University Press, UK, 1985.
- [7] LEYENS, C., FRITSCHER, K., GEHLING, R., PETERS, M. ve KAYSSER, W.A., Oxide scale formation on an MCrAlY coating in various H<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O atmospheres, Surface and Coatings Technology, 82, 133-144, 1996.
- [8] BEELE, W., MARIJNISSEN, G. ve LIESHOT, A., The evolution of thermal barrier coatings-status and upcoming solutions for today's key issues, Surface and Coatings Technology, 120-121, 61-67, 1999.
- [9] SCHULZ, U., Phase transformation in EB-PVD yttria partially stabilized zirconia thermal barrier coatings during annealing, Journal of American Ceramic Society, 83, 904-910, 2000.
- [10] KAYSSER, W.A., BARTSCH, M., KRELL, T., FRITSCHER, K., LEYENS, C., Schulz, U. ve PETERS, M., Ceramic thermal barriers for demanding turbine applications, Ceramic Forum International, 6, 32-36, 2000.
- [11] SCHULZ, U., KRELL, T., LEUSHAKE, U. ve PETERS, M., Graded design of EB-PVD Thermal barrier coating, AGARD SMP Meeting on Thermal Barrier Coatings,Denmark,1997.

- [12] HASS, D.D., Thermal barrier coatings via directed vapour deposition, A Dissertation the Faculty of the School of Engineering and Applied Science, University of Virginia, USA., 2001. 133
- [13] BARTSCH, M., SCHULZ, U. ve SARUHAN, B., EB-PVD Thermal Barrier Coatings for Gas Turbines- Processing and Lifetime Assessment, Proceeding of the Summer School of the EU Project "SICMAC" (HPRN-CT-2082- 20203),191-214, Mao Minorca Island, Spain, 2006.
- [14] MORRELL, P. ve RICKERBY, D.S., Advantages / disadvantages of various TBC systems as perceived by the engine manufacturer, AGARD SMP Meeting on Thermal Barrier Coatings, Denmark, 1997.
- [15] ALPERINÉ, S., DERRIEN, M., JASLIER, Y. ve MÉVREL, R., Thermal barrier coatings: the thermal conductivity challenge, AGARD SMP Meeting on Thermal Barrier Coatings, Denmark, 1997.
- [16] XU, H., GONG, S. ve DENG, L., Preparation of thermal barrier coatings for gas turbine blades by EB-PVD, Thin Solid Films, Vol 334, 98-102, 1998.
- [17] HARRIS, K.D., VICK, D., GONZALES, E.J., SMY, T., ROBBIE, K. ve BRETT M.J., Porous thin films for thermal barrier coatings, Surface and Coatings Technology, 138, 185-191, 2001.
- [18] ZOU, Y.C., HASHIDA, T., Coupled effects of temperature gradient and oxidation on thermal stress in thermal barrier coating system, International Journal of Solids and Structures, 38, 4235-4264, 2001.
- [19] SHARAFAT, S., KOBAYASHI, A., CHAN, Y. ve GHONIEM, N.M., Plasma spraying of micro-composite thermal barrier coatings, Vacuum, 65 (3-4), 415-425, 2001.
- [20] KOOLLOOS, M.F.J., SCHOUTEN, M.J.W. Thermal testing of low porosity microcracked thermal barrier coatings, National Aerospace Laboratory NLR, 2002
- [21] YILMAZ, M., Seramik kaplamalarda ara malzeme ve porozitenin Termal sok üzerine etkisi, Yük. Lisans Tezi, SAÜ. Müh. Fak. Metalürji ve Malzeme Müh. Böl. Ocak 1997
- [22] ÜSTEL, F. YILMAZ, M B.,Termal ve çevresel bariyer kaplamalar ve uygulamaları, IV. Uluslar arası Seramik Kongresi, 30 Ekim-1 Kasım 2006, Sakarya Üniversitesi; 413, Adapazarı
- [23] SZULC, M., Manufacture and characterization of plasma-sprayed, segmented La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> – based thermal barrier coatings, Master Thesis, Silesian University of Technology Dept. Material Engineering and Metalurgy Katowice University of Applied Sciences Steinfurt, 2004

- [24] KARA, İ., TBK Kaplamaların Termal Şok Özelliklerinin İncelenmesi, Yük. Lisans Tezi, SAÜ. Müh. Fak. Metalürji ve Malzeme Müh. Böl., Eylül 2008
- [25] SARAL, U., Alümina ilavesinin YSZ Termal Bariyer Kaplamaların mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisi, Yük. Lisans Tezi, SAÜ. Müh. Fak. Metalürji ve Malzeme Müh. Böl., Haziran 2007
- [26] MILLER, R.A., Thermal Barrier Coatings for Aircraft Engines: History and Directions, Journal of Thermal Spray Technology, Volume 6(1) March 1997 35–42
- [27] DALKILIÇ, S., Bir Termal Bariyer Kaplama Sisteminin Yorulma Davranışının İncelenmesi, Doktora tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mart 2007
- [28] CAO, X.Q., Development of New Thermal Barrier Coating Materials for Gas Turbines, Forschungszentrum Jülich, April 2004
- [29] İPEK, M., İki Farklı Yolla Üretilmiş Alumina-Zirkonya Nanokompozitlerin Sinterlenme ve Kırılma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora tezi, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mayıs 2005
- [30] MISTA, V. RAYMENT, T.HANUZA, J. MACALIK L., Synthesis and characterization of metastable CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> solid solution obtained by polymerized complex method, Materials Science-Poland, Vol. 22, No. 2, 2004
- [31] CAO, X.Q. VASSEN, R. STOEVEER, D., Ceramic materials for thermal barrier coatings, Journal of the European Ceramic Society 24 (2004) 1–10
- [32] PADTURE, N.P. GELL, M. JORDAN, E.H., Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications, Science's compass, Volume 296, April 2002, 280–284
- [33] SOURMAIL, T., Coatings for Turbine Blades, University of Cambridge, <http://www.msm.cam.ac.uk/phasetrans/2003/Superalloys/coatings/index.html> (07.03.2011)
- [34] YÖRÜK, B., Uçak malzemelerinin yapı ve özellikleri, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivil Havacılık Anabilim Dalı, Tezli Yüksek Lisans Programı, Ocak 2004; 14–25
- [35] HASS, D.D., Directed Vapor Deposition of Thermal Barrier Coatings, Ph.D. Dissertation,,University,of, Virginia,2000  
<http://www.ipm.virginia.edu/research/PVD/Pubs/thesis6/chapter2.PDF> (07.03.2011)
- [36] GGRISAFFE, S.G., Simplified Guided to Thermal Spray Coatings, Mach. des. vol 39, 174 -181
- [37] CERVENKA, M., The Rolls-Royce Trent Engine, (Rolls-Royce), (2000),<http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/mphil/Trent1/sld001.htm> (07.03.2011)

- [38] HERMAN, H. SHANKAR, N.R., Survivability of thermal barrier coatings, *Materials Science & Engineering*, Vol 88, pp 69–74, 1987
- [39] JOSHI, S.V., SRIVASTA, M.P., On the cycling life of plasma-sprayed Yttria-Stabilized Zirconia Coatings, *Surface and Coating Technology*, Vol.56 pp 215–224, 1993
- [40] UNDER, R. H., Comparison of Thermal Spray Bond Coats, *Thermal Spray Advances in Coating Technology Conference proceeding*, pp. 365- 370, 14–17 September 1978, USA
- [41] <http://www.ptihome.com/machine.php?id=49> (07.03.2011)
- [42] BERNIER, J., Evolution and characterization of partially stabilized zirconia (7wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) thermal barrier coatings deposited by electron beam physical vapor deposition, A master's Thesis Submitted to the faculty of the Worcester Polytechnic Institute, May 18, 2001.
- [43] ÜSTEL, F. YILMAZ M.B. “ Termal Sprey teknolojisi: Termal ve Çevresel Bariyer Kaplamalar ve Uygulamaları”, *Uluslar arası katılımlı Seramik Kongresi, Sakarya 2006*
- [44] ÇELEBİ, A., Seramik kaplamalarda sonlu elemanlar yöntemi ile Termal Şok Analizi, *Yük. Lisans Tezi, SAÜ. Müh. Fak. Metalürji ve Malzeme Müh. Böl., Haziran 1996*
- [45] TANCRET, F., Comments on Thermal shock resistance of yttria-stabilized zirconia with Palmqvist indentation cracks, by G. Fargas, D. Casellas, L. Llanes, M. Anglada [*J. Eur. Ceram. Soc.* 23 (2003) 107–114], *Journal of the European Ceramic Society* 26 (2006) 1517–1522
- [46] BOLCAVAGE, A. FEUERSTEIN, A. FOSTER, J. MOORE, P., Thermal Shock Testing of Thermal Barrier Coating/Bondcoat Systems, *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol 13(4) , August 2004
- [47] DEMİRKIRAN, S., MgZrO<sub>3</sub> esaslı fonksiyonel değişken kaplamaların incelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi, SAÜ. Müh. Fak. Metalürji ve Malzeme Müh. Böl., Sakarya, Haziran 1997; 1–2, 42*
- [48] ABSI, J. GLANDUS, J.C., Improved method for severe thermal shocks testing of ceramics by water quenching, *Journal of the European Ceramic Society*, 24 (2004) 2835–2838
- [49] ZHOU, B. KOKINI, K., Effect of preexisting surface cracks on the interfacial thermal fracture of thermal barrier coatings: an experimental study, *Surface and Coatings Technology* 187 (2004) 17– 25



- [50] TZÍMAS, E., MÜLLEJANS, H., PETEVES, S.D., BRESSERS, J. ve STAMM, W., Failure of thermal barrier coating systems under cyclic thermomechanical loading, *Acta Materialia*, 48, 4699-4707, 2000.
- [51] Balke, H., Hofinger, I., Häusler, C., Bahr, H.-A., Weiß, H.-J. ve Kirchhoff, G., Fracture mechanical damage modeling of thermal barrier coatings, *Archive of Applied Mechanics*, 70, 193-200, 2000.
- [52] TOLPYGO, V.K., CLARKE, D.R. ve MURPHY, K.S., Oxidation-induced failure of EB-PVD thermal barrier coatings, *Surface and Coatings Technology*, 146-147, 124-131, 2001.
- [53] SCHLICHTING, K.W., VAIDYANADHAN, K., SOHN, Y.A., JORDAN, E.H., GELL, M. ve PADTURE, N.P., Application of Cr<sup>3+</sup> photoluminescence piezo-spectroscopy to plasma sprayed thermal barrier coatings for residual stress measurement, *Materials Science and Engineering A*, 291, 68-77, 2000.
- [54] GELL, M., FORDAN, E., VAIDYANADHAN, K., MCCARRON, K., BARBER, B., SOHN, Y.H. ve TOLPYGO, V.K., Bond strength, bond stress and spallation mechanisms of thermal barrier coatings, *Surface and Coatings Technology*, 120-121, 53-60, 1999.
- [55] KOOLLOOS, M.F. J., Behaviour of Low Porosity Microcracked Thermal Barrier Coatings under Thermal Loading, *Doktora Tezi, Technische Universiteit Eindhoven*, Mart 2001 <http://alexandria.tue.nl/extra2/200110384.pdf> (12.03.2011)
- [56] LAU, H., LEYENS, C., KADEN, U., SCHULZ, U., MÜNZER, J., FRIEDRICH, C. ve COSACK, T., Influence of bondcoat pre-treatment on the cyclic lifetime of EB-PVD TBCs, *Materials Week 2001-Proceedings*, Werkstoff-Informationsgesellschaft mbH, Frankfurt, Germany, 1-8, 2002.
- [57] GUERRE, C., MOLINS, R. ve REMY, L., Study of the coating stability of a TBC system, *Materials at High Temperatures*, 17(2), 197-204, 2000.
- [58] HUTCHINSON, J.W. ve EVANS, A.G., On the delamination of thermal barrier coatings in a thermal gradient, *Surface and Coatings Technology*, 149, 179-184, 2002.
- [59] LEYENS, C., SCHULZ, U., PINT, B.A. ve WRIGHT, I.G., Influence of electron beam physical vapour deposited thermal barrier coating microstructure on 136 the thermal barrier coating system performance under cyclic oxidation conditions, *Surface and Coatings Technology*, 120-121, 68-76, 1999.
- [60] IBEGAZENE-QUALÍ, F., MEVREL, R., RÍO, C. ve RENOLLET, Y., Microstructural evolution and degradation modes in cyclic and isothermal oxidation of an EB-PVD thermal barrier coating, *Materials at High Temperatures*, 17(2), 205-218, 2000

- [61] JORDAN, E., GELL, M. ve CLARKE, D., University contributions to the effective use of thermal barrier coatings in ATS engines, AGTSR Contract 95-01-SR030, 2000
- [62] BANKS, J.P., SAUNDERS, S.R.J. ve CHUNNILALL, C.J., Adhesion of thermal barrier coatings – the development of metastable alumina, *Materials at High Temperatures*, 17(2), 225-230, 2000
- [63] VASINONTA, A. ve BEUTH, J.L., Measurement of interfacial toughness in thermal barrier coating systems by indentation, *Engineering Fracture Mechanics*, 68, 843-860, 2001
- [64] RÖSLER, J., BÄKER, M. ve VOLGMANN, M., Stress state and failure mechanisms of thermal barrier coatings: Role of creep in thermally grown oxide, *Acta Materialia*, 49, 3659-3670, 2001.
- [65] YAYLA, P., *Kırılma Mekaniği, Çağlayan Kitabevi*, 2007
- [66] GDOUTOS, E.E., *Fracture Mechanics*, Springer, 2005
- [67] GRIFFITH, A.A., The phenomena of rupture and flow in solids, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A* 221, pp.163-198, 1921
- [68] AYHAN, A. O., Three-dimensional fracture analysis using tetrahedral enriched elements and fully unstructured mesh, *International Journal of Solids and Structures* 48 , pp. 492–505 ,2011.
- [69] SCHIJVE, J., *Fatigue of Structures and Materials*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [70] COURONEAU, N., ROYER, J., Simplified Model For The Growth Analysis of Surface Cracks in Round Bar, *International Journal Of Fatigue*, pp. 711-718, 1998.
- [71] LIN, X. B., SMITH, R. A., Shape Evolution Of Surface Cracks in Fatigued Round Bars With a Semicircular Circumferential Notch, *International Journal Of Fatigue*, pp. 965-973, 1999.
- [72] SİH, G. C., On the Westergaard Method of Crack Analysis, *Int. J. Fracture Mech.*, 2 pp. 628-631, 1966
- [73] EFTIS, J., LIEBOWITZ, H., On the Modified Westergaard Equations for Certain Plane Crack Problems, *Int. J. Fracture Mech.*, 8 , pp. 383-392, 1972
- [74] BROEK, D., *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Galena OH, USA , 1986.
- [75] NART, E., AYHAN., A. O., Crack Insertion, Meshing And Fracture Analysis Of Structures Using Tetrahedral Elements, pp.293-306, 2011.

- [76] ALTUN, O., ERHAN BOKE Y., KALEMTAŞ A., Problems For Determining The Thermal Conductivity Of TBCs By Laser-Flash Method, Jurnal of Achievements in materials and Manufacturing Engineering 30-2, 2008
- [77] LOÏS J. G, DONGMİNG Z., Thermal Barrier and Protective Coatings to Improve The Durability Of A Combustor Under A Pulse Detonation Engine Environment, NASA/TM ,214915, 2008
- [78] İYİBİLGİN, O., Bilgisayar Destekli Yüksek Hızlarda Çarpma Analizi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tez Çalışması, Ekim 2004.
- [79] TOPÇU, M., TAŞGETİREN, S., Sonlu Elemanlar Ders Notları, Pamukkale Üniversitesi Makine Müh. Böl. , 2008.
- [80] [LIU](#), Y., Introduction to Finite Element Method - I & II Lecture Notes Winter & Spring Quarters, University of Cincinnati, 1998.
- [81] KURTAY, T., Sonlu Elemanlar Yöntemine Giriş Ders Notu, İ.T.Ü. Makine Fakültesi, 1980.
- [82] HUEBNER K.H., THORNTON E.A., finite element Method For Engineers, A Wiley-Intercience Publication., Newyork, 1982
- [83] CHANDRUPATLA T.R., BELEGUNDU A.D., İntroduction To Finite Element In Eng., Prentice- Hall Inc., U.S.A., 1991
- [84] MYERS G.E., The Critical Time Step For Finite Element olutions To Two Dimensional Heat conduction Transient., J. Heat Transfer, 100,120-128, 1978
- [85] MOAVENI, S., Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS, Minnesota State University, Mankato, Prentice Hall, 1999.
- [86] NELSON, J.K., Matrix and Finite Analysis of Structures Lecture Notes Clemson University Graduate Engineering.
- [87] TIMOSHENKO, S., GOODIER, J.N., Theory of Elasticity McGrawHill Book Company, Inc, 1951.
- [88] Release 11.0 Documentation for ANSYS.
- [89] SIH, G. C., CHOW, C. L., Fracture Mechanics and Technology, Sijthoff and Noordhoff International Publishers.
- [90] VİTALİİ P, Failure Mechanisms of Thermal Barrier Coatings for High Temperature Gas Turbine Components under Cyclic Thermal Loading, aus Kiew, Ukraine, 2008
- [91] TIMOSHENKO, S. And GOODIER, J.N., Theory of Elasticity (3rd rd.). Mc Graw Hill, 1987.

- [92] MUSKHELISVILI, N.I., Some Basic Problems of The Mathematical Theory of Elasticity, Noordhoff, 1936
- [93] LIENHARD, J.H. , A Heat Transfer Text Book, Phlogiston Press, Cambridge, M.A., 738 p. 2004
- [94] YILMAZÇOBAN İ.K., Engelli Araçlarının Sonlu Elemanlar Metodu Yardımı ile Çevresel Şartlara Uygunluğunun İncelenmesi.,Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 2009.
- [95] KURTŞ C, Kırılma ve Çatlak İlerleme Problemlerinin Üç Boyutta Düzensiz Bölüntülü Modellerle Uygulamalı Olarak Çözümü, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2011
- [96] USLU M, Ansys Ve Fcpas Kullanarak Plakalardaki Kırılma Ve Çatlak İlerleme Problemlerinin Modellenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 2011

## ÖZGEÇMİŞ

Yaşar KAHRAMAN 1974 yılında Mardin’de doğdu. 1993 yılında Kabataş Erkek Lisesi’nden mezun oldu. 1996 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne girdi. 2000 yılında bölüm birincisi olarak, onur derecesiyle mezun olduktan sonra aynı yıl Sakarya Üniversitesinde Makine Tasarım İmalat bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2003 yılında yüksek lisans programından mezun olduktan sonra aynı yıl, Makine Tasarım İmalat bilim dalında Doktora eğitimine başladı. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. Halen bu bölümde görevine devam etmektedir. Evli ve üç çocuk babasıdır.