

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

**SERAMİK KAPLI DİZEL PİSTONLARDA TERMAL  
GERİLMELERİN SONLU ELEMANLAR  
METODUYLA BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mak.Müh. Suat CEYLAN**

**Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**Enstitü Bilim Dalı : MAK. TAS. VE İMALAT**

**Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. MUHAMMET CERİT**

**Temmuz 2009**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SERAMİK KAPLI DİZEL PİSTONLARDA TERMAL  
GERİLMELERİN SONLU ELEMANLAR  
METODUYLA BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mak.Müh. Suat CEYLAN

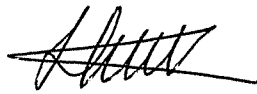
Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : MAK. TAS. VE İMALAT

Bu tez 22 / 07 /2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Yrd. Doç. Dr.  
Muhammet CERİT  
Jüri Başkanı



Yrd. Doç. Dr.  
Halit YAŞAR  
Üye



Doç. Dr.  
Adnan PARLAK  
Üye

## ÖNSÖZ

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte, sonlu elemanlar metodu; karmaşık geometriye sahip parçaların tasarımlarında ve uzun süren hesaplanmalarında, mühendislik çalışması gerektiren yerlerde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu metodun doğru kullanılması ile zaman ve maliyet kazancı sağlanmaktadır. Ancak, bu metod ile seramik kaplı pistonların üç boyutlu modellenmesi ve termal gerilme analizlerinin uygulanması konusunda literatürde bir boşluk yer almaktadır. Bu çalışma, literatürdeki eksiğin giderilmesine katkıda bulunma amacı ile gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışma, bir dizel ve benzinli motor pistonunun bilgisayar ortamında modellenmesini, çeşitli kademelerde seramik kaplanmasını ve üzerinde sonlu elemanlar yöntemi ile analizler gerçekleştirilmesini ve seramik kaplı pistonlarda elde edilecek avantaj ve dezavantajları ortaya koymuştur.

Bu çalışma boyunca desteğini esirgemeyen Y.Müh.Kd.Bnb. Nurdan ARSLAN, hocam Yrd.Doç.Dr. Muhammet CERİT'e teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimine başvurmadamda beni teşvik eden, eğitim süresince ve tez çalışmalarında desteğini esirgemeyen ve mühendislik alanındaki mesleki gelişimimi destekleyen eşim Çocuk Cerrahi Asistanı Feray Özdemir Ceylan'a teşekkür ederim.

Suat CEYLAN

# İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xv
BÖLÜM 1.	
Giriş.....	1
Tezin Kapsamı ve Amacı.....	1
Literatür Taraması.....	2
BÖLÜM 2.	
DİZEL VE BENZİNLİ MOTOR PİSTONLARI.....	6
2.1. Giriş.....	6
2.2. Piston ve Havuz Geometrisi.....	7
2.2.1. Piston boyu.....	8
2.2.2. Piston yüzeyinin şekli ve et kalınlığı.....	8
2.3. Segman Kanalları.....	9
2.4. Piston Eteği .....	11
2.5. Sıcaklık Dağılımları.....	11
BÖLÜM 3.	
KAPLAMA MALZEMELERİ.....	18
3.1. Giriş.....	18

3.2. Yanma Odalarının Yalıtımında Kullanılan Bazı Seramik Malzemeler ve Özellikleri.....	23
BÖLÜM 4.	
SONLU ELEMANLAR METODU.....	27
4.1. Giriş.....	27
4.2. Katı Modelleme.....	27
4.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları ve Sınırları.....	28
4.4. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanması.....	29
4.4.1. Yapının parçalara ayrılması.....	29
4.4.2. Uygun bir interpoasyon veya er değişimi modelinin seçimi.....	30
4.4.3. Element katılık matrislerinin ve yük vektörlerinin elde edilmesi.....	30
4.4.4. Element denklemlerinin birleştirilmesiyle toplam denge denklemlerinin elde edilmesi.....	30
4.4.5. Bilinmeyen nodal yer değişimler için çözüm.....	30
4.4.6. Elementlerin belirlenmesi.....	31
4.5. Dizel ve Benzinli Motor Pistonunun 3 Boyutlu Modellenmesi.....	35
4.6. Kullanılan Analiz Program.....	39
4.7. Pistonu ve Termal Bariyeri Oluşturan Elemanların Malzeme Özellikleri.....	39
4.8. Piston ve Termal Bariyeri Oluşturan Tabaka Modeli.....	44
4.9. Dizel Motor Pistonu İçin Sınır Şartların Belirlenmesi.....	46
4.10. Benzinli Motor Pistonu İçin Sınır Şartların Belirlenmesi.....	47
BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	48
5.1. Sıcaklık Dağılımları.....	50
5.1.1. Demir (Fe) esaslı dizel motor pistonu için yüzey sıcaklık değişimi .....	50

5.1.2. Alüminyum (Al) esaslı dizel motor pistonu için yüzey sıcaklık değişimi .....	50
5.1.3. Tek katmanlı termal bariyer kaplı Fe esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık değişimi.....	51
5.1.4. Tek katmanlı termal bariyer kaplı Al esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık değişimi.....	51
5.1.5. Dört katmanlı termal bariyer kaplı Al esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık değişimi.....	52
5.1.6. Dört katmanlı termal bariyer kaplı Al esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık değişimi.....	52
5.1.7. Dizel motor pistonlarının termal bariyerli ve bariyersiz yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	53
5.1.8. Dizel motor pistonu ile termal bariyer arası gerilmeler.....	54
5.1.9. Termal bariyer kaplı dizel motor piston kenarı üzerindeki gerilmeler.....	59
5.1.10. Alüminyum esaslı benzinli motor pistonu için yüzey sıcaklık dağılımı.....	62
5.1.11. Çeşitli termal bariyer kaplı benzinli motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı.....	63
5.2. Termal Gerilmeler.....	69
5.2.1. Termal bariyerli ve bariyersiz benzinli motor pistonu üst yüzeyinde oluşan yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması.....	69
5.2.2. Benzinli motor pistonu üst yüzeyinde meydana gelen gerilmeler.....	72
5.2.3. Benzinli motor pistonu ile termal bariyer ara yüzey gerilmeleri.....	74
5.2.4. Benzinli motor pistonundaki tek tabaka termal bariyer kaplamalar arasındaki ara yüzeylerde oluşan gerilmeler.....	75
5.2.5. Termal bariyer kaplı benzinli motor piston kenarı üzerindeki gerilmeler.....	76
5.2.6. Teğetsel gerilmelerin dağılımı ( $\sigma_{\theta}$ ).....	77
5.2.7. Eksenel (Düşey) gerilmelerin dağılımı ( $\sigma_z$ ).....	78
5.2.8. Kayma gerilmelerinin dağılımı ( $\sigma_{rz}$ ).....	79

5.2.9. Radyal (Yatay) gerilim dağılımları ( $\sigma_r$ ).....	80
5.2.10. Sıcaklık.....	80
5.2.11. Dizel motor pistonu.....	81
5.2.11.1. Teğetsel gerilim dağılımları ( $\sigma_\theta$ ).....	83
5.2.11.2. Radyal (Yatay) gerilimlerin dağılımı ( $\sigma_r$ ).....	83
5.2.11.3. Eksenel (Düşey) gerilimlerin dağılımı ( $\sigma_z$ ).....	84
5.2.11.4. Kayma gerilimlerinin dağılımı ( $\sigma_{rz}$ ).....	84
5.2.11.5. Eşdeğer (Von Mises ) gerilme dağılımı.....	84
5.2.12. Benzinli motor pistonu.....	84
5.2.12.1. Radyal (Yatay) gerilimlerin dağılımı ( $\sigma_r$ ).....	84
5.2.12.2. Eksenel (Düşey) gerilimlerin dağılımı ( $\sigma_z$ ).....	85
5.2.12.3. Kayma gerilimlerinin dağılımı ( $\sigma_{rz}$ ).....	85
5.2.12.4. Eşdeğer (Von Mises ) gerilme dağılımları.....	86
KAYNAKLAR.....	87
ÖZGEÇMİŞ.....	89

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

PSZ	: Kısmen Stabilize edilmiş zirkonya
PVD	: Fiziksel Buhar Çöktürme
CVD	: Kimyasal Buhar çöktürme
[K]	: Cismin Temel Direngelik matrisi
$\vec{a}$	: Deplasman
$\vec{p}$	: Düğümlere Gelen Kuvvet



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Standart ve Termal Bariyer Kaplamalı Bir Motorda Enerji Dengelerinin Karşılaştırılması.....	3
Şekil 2.1.	İçten Yanmalı Motorda Piston, Segman ve Layner Üzerinden Soğutma Suyuna Geçen Isı Transferi.....	11
Şekil 2.2.	Dört Zamanlı Motorlarda Hafif Metal Alaşımli Pistonun Sıcaklık Dağılımı.....	12
Şekil 3.1.	Bazı Seramik ve Dökme Demir Genleşme Katsayıları.....	19
Şekil 3.2.	Bazı Seramiklerin Isı İletim Katsayısı.....	20
Şekil 3.3.	Seramik Kaplamanın Yayım (ışınım) Kabiliyeti.....	24
Şekil 4.1.	Düzlem Elementi Plane 223.....	31
Şekil 4.2.	Hacim Elementi, Brick 20 Node 226.....	32
Şekil 4.3.	Tek Katmanlı Dizel Motor Pistonu Mesh Yapısı.....	33
Şekil 4.4.	Beş Katmanlı Dizel Motor Pistonu Mesh Yapısı.....	34
Şekil 4.5.	MVM 518 TBRHS V 16 Dizel motor pistonu.....	36
Şekil 4.6.	Benzinli Motor Pistonu.....	36
Şekil 4.7.	MVM 518 TBRHS V16 dizel makine piston ölçüleri.....	37
Şekil 4.8.	Benzinli Motor Piston ölçüleri.....	38
Şekil 4.9.	Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplı Dizel Piston.....	44
Şekil 4.10.	Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplı Benzinli Piston.....	45
Şekil 4.11.	Beş Katmanlı Termal Bariyer Kaplı Piston.....	45
Şekil 5.1.	Demir esaslı dizel motor pistonu için yüzey sıcaklık dağılımı.....	50
Şekil 5.2.	Alüminyum esaslı dizel motor pistonu için yüzey sıcaklık dağılımı.....	50
Şekil 5.3.	Tek katmanlı demir esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı.....	51

Şekil 5.4.	Tek katmanlı Alüminyum esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı.....	51
Şekil 5.5.	Dört katmanlı demir esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı.....	52
Şekil 5.6.	Dört katmanlı Alüminyum esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı.....	52
Şekil 5.7.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyinde ve kaplama alt yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılım grafiği.....	53
Şekil 5.8.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyinde ve kaplama alt yüzeyinde meydana gelen Teğetsel gerilme dağılım grafiği.....	54
Şekil 5.9.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyinde ve kaplama alt yüzeyinde meydana gelen Teğetsel gerilme dağılım grafiği.....	54
Şekil 5.10.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Radyal gerilme dağılım grafiği.....	55
Şekil 5.11.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Radyal gerilme dağılım grafiği.....	55
Şekil 5.12.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Eksenel gerilme dağılım grafiği.....	56
Şekil 5.13.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Eksenel gerilme dağılım grafiği.....	56
Şekil 5.14.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Kayma gerilme dağılım grafiği.....	57
Şekil 5.15.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Kayma gerilme dağılım grafiği.....	57

Şekil 5.16.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Von Mises gerilme dağılım grafiği.....	58
Şekil 5.17.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Von Mises gerilme dağılım grafiği.....	58
Şekil 5.18.	Termal bariyer kaplı dizel motor pistonu.....	59
Şekil 5.19.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki radyal gerilme dağılım grafiği.....	59
Şekil 5.20.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki eksenel gerilme dağılım grafiği.....	60
Şekil 5.21.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki teğetsel gerilme dağılım grafiği.....	60
Şekil 5.22.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki kayma gerilme dağılım grafiği.....	61
Şekil 5.23.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki von mises gerilme dağılım grafiği.....	61
Şekil 5.24.	Alüminyum esaslı benzinli motor pistonu için yüzey sıcaklık dağılımı.....	62
Şekil 5.25.	Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.55 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kaplama.....	63
Şekil 5.26.	Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.45 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kaplama.....	63
Şekil 5.27.	Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kaplama.....	64
Şekil 5.28.	Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.25 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kaplama.....	64
Şekil 5.29.	Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.15 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kaplama.....	65
Şekil 5.30.	13,2 mm genişlik ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kap.....	65
Şekil 5.31.	11,2 mm genişlik ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kaplama.....	66

Şekil 5.32.	9,2 mm genişlikli ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kaplama.....	66
Şekil 5.33.	7,2 mm genişlikli ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kaplama.....	67
Şekil 5.34.	5,2 mm genişlikli ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO <sub>3</sub> ) mm termal bariyer kaplama.....	67
Şekil 5.35.	9,2 mm genişlik ve beş katmanlı 0.1 (NiCrAl) mm+0.1 (%75NiCrAl+%25 MgZrO <sub>3</sub> ) mm + 0.1mm (%50NiCrAl+%50 MgZrO <sub>3</sub> ) + 0.1mm(%25NiCrAl+%75 MgZrO <sub>3</sub> ) + 0.1 mm (MgZrO <sub>3</sub> )termal bariyer kaplama.....	68
Şekil 5.36.	Kaplamasız, tek ve dört termal bariyer kaplamalı benzinli motor pistonu üst yüzeyinde oluşan yüzey sıcaklık dağılım grafiği.....	69
Şekil 5.37.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı piston üst yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılım grafiği.....	70
Şekil 5.38.	Değişken genişlikteki termal bariyer kaplı piston üst yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılım grafiği.....	71
Şekil 5.39.	Benzinli motor pistonu üzerinde meydana gelen gerilme dağılım grafiği.....	72
Şekil 5.40.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplama ve piston ara yüzeyinde meydana gelen gerilme dağılım grafiği.....	72
Şekil 5.41.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplama ve piston ara yüzeyinde meydana gelen Von Mises gerilme dağılım grafiği.....	73
Şekil 5.42.	Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplama ve piston ara yüzeyinde meydana gelen gerilme dağılım grafiği.....	74
Şekil 5.43.	Kaplamasız, tek ve dört termal bariyer kaplamalı benzinli motor pistonu üst yüzeyinde oluşan yüzey sıcaklık dağılım grafiği.....	75
Şekil 5.44.	Farklı kalınlıklardaki tek termal bariyer kaplamalı benzinli motor pistonu.....	76
Şekil 5.45.	Tek termal bariyer kaplamalı benzinli motor pistonu dış kenarında oluşan Von Mises gerilme dağılımı.....	76
Şekil 5.46.	Termal Bariyer Katmanlar ve piston yüzeyi arasında oluşan teğetsel gerilmeler.....	77

Şekil 5.47. Termal Bariyer Katmanlarının Kesiştiği Köşe Noktalarındaki Oluşan Ara Yüz Kenar Çatlakları	78
Şekil 5.48. Katmanların Kesiştiği Köşe Noktalarındaki Yüksek Tekil Kayma Gerilmeleri ve Ara Yüz Çatlakları.....	79
Şekil 5.49. Kaplamanın Üst Yüzeyindeki Yatay Gerilmeler ve Üst Yüze Dik Olarak Oluşan Çatlakları.....	80

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1	Pistonlardaki Genel sıcaklık Dağılımı (°C).....	13
Tablo 3.1.	Bazı Yüksek Teknoloji Seramiklerinin Özellikleri.....	22
Tablo 4.1.	Hesaplama da Kullanılan Bilgisayarın Teknik Özellikleri.....	32
Tablo 4.2.	Tek Katmanlı Dizel Motor Pistonu Element Bilgileri.....	33
Tablo 4.3.	Beş Katmanlı Dizel Motor Pistonu Element Bilgileri.....	34
Tablo 4.4.	Tek Katmanlı Benzinli Motor Pistonu Element Bilgileri.....	34
Tablo 4.5.	Beş Katmanlı Benzinli Motor Pistonu Element Bilgileri.....	35
Tablo 4.6.	Dizel Motor Pistonda Termal Bariyer Kaplama Kalınlığı.....	40
Tablo 4.7.	Benzinli Pistonda Termal Bariyer Kaplama Kalınlığı.....	40
Tablo 4.8.	Benzinli Pistonda Termal Bariyer Kaplama Genişliği.....	40
Tablo 4.9.	Benzinli Piston ve Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri.....	41
Tablo 4.10.	Benzinli Piston ve Beş Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri.....	41
Tablo 4.11.	Demir Esaslı Dizel Piston ve Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri.....	42
Tablo 4.12.	Alüminyum Esaslı Dizel Piston ve Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri.....	42
Tablo 4.13.	Demir esaslı Dizel Piston ve Beş Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri.....	43
Tablo 4.14.	Alüminyum esaslı Dizel Piston ve Beş Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri.....	43
Tablo 4.15.	Dizel motor pistonu için sınır şartları.....	46
Tablo 4.16.	Benzinli motor pistonu için sınır şartların belirlenmesi.....	47

## ÖZET

Anahtar kelimeler: Dizel ve Benzinli Motor Pistonu, Seramik kaplama, Termal bariyer kaplama, Sonlu elemanlar.

Mühendislik problemlerinin çözülmesinde sayısal metotlar son yıllarda sıklıkla uygulanmaktadır. En çok bilinen ve kullanılan sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar metodu, son yirmi yılda bilgisayar destekli tasarımın vazgeçilmez bir parçası olmuştur. Özellikle hızlı ve güvenilir biçimde gerçekleştirilmesi gereken mukavemet analizlerinde, malzemenin tahribatını gerektirecek deneyimlerin bilgisayarlı tahribatsız olarak gerçekleştirilmesinde, çok sayıda tekrar gerektiren hesaplamalarda bu metodun sağladığı faydalar tartışılmazdır. Bu çalışmada, bu metodun seramik kaplı dizel ve benzinli pistonu uygulanması ele alınmıştır.

Bu çalışma ile dizel ve benzinli motor pistonunun ANSYS programında modellenmesi, kalınlığı ve genişliği değişen çeşitli kademelerde “Termal Bariyer”  $MgZrO_3$ ,  $NiCrAl$  malzeme kaplamalarının oluşturulması, sınır şartlarının tanımlanması ve ANSYS programı içerisinde termal gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir. Piston üzerine homojen kaplanabilen ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilen “Termal bariyer” kaplamalar; yanma odası sıcaklığını artırarak sistemin verimini de artırmaktadır. Bu kaplamaların sahip olduğu en büyük dezavantaj, kaplamanın yapıldığı ana metal ile arasındaki termal genleşme katsayılarının farkından dolayı oluşan gerilmelerdir. Bu gerilmeler piston ve termal bariyer arasında çatlakların, ayrılmaların oluşmasına neden olmaktadır. Söz konusu çatlakları ve ayrılmaları önlemek için fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalar uygulanmaktadır. Çalışmalar sonunda elde edilen değerler ile piston yüzey sıcaklığının düştüğü, seramik kaplanmış pistonun son derece avantajlı olduğu ve tabakalı kaplamanın oluşan termal gerilmeler yönünden avantajlı olduğunu yapılan çalışma sonunda görülmüştür.

# **DETERMINATION OF THERMAL STRESSES IN CERAMIC COATED DIESEL ENGINE PISTONS USING FINITE ELEMENTS METHOD**

## **SUMMARY**

Key Words: Diesel and gasoline engine pistons, ceramic coating, thermal barrier coating, finite elements method

Recently, numerical methods are commonly employed in solution of engineering problems. Finite elements method (FEM) is the most widely used one among the other methods. In the last twenty years, FEM has become an unargued part of computer aided design process. Making use of FEM provides fast and reliable solutions for structural design problems and less number of destructive tests are required. In this study, FEM is used in order to analyses ceramic coated diesel and gasoline engine pistons.

In the study, diesel and gasoline engine pistons are modeled in ANSYS software. Thermal barrier coatings of  $MgZrO_3$  and  $NiCrAl$  with different thickness and width values are created on the pistons. Furthermore, the boundary conditions are defined. Consecutively, thermal stress analyses are performed with ANSYS. Homogenously coated thermal barriers on the pistons can work at high temperatures and increase the efficiency of the system by resisting high temperatures in combustion chambers. However, the most significant drawback of thermal barrier coating is the thermal stresses introduced due to the difference between expansion coefficients of base and coating materials. The thermal stress brings about cracks and separation between the piston and the coating. Thus, in order to figure out this problem functionally graded coating are applied. The results of this study reveals that, the surface temperature of pistons are degraded by using thermal barrier coatings. Besides, the coated pistons are advantageous in application. In addition, layered coating is a functional method for thermal stress.



## **BÖLÜM 1.GİRİŞ**

### **1.1. Giriş**

Petrol ürünlerinin kullanılması ile içten yanmalı motorlarda elde edilen enerjinin %30-40 kadarı faydalı işe dönüşmekte ve enerjinin %60-70 kadarı da motor parçalarını yüksek sıcaklıktan korumak amaçlı yapılmış olan soğutma sistemine, egzoz gazlarına ve diğer kayıplara harcanmaktadır. Meydana gelen ısı kayıplarını azaltmak ve verimliliği artırmak amaçlı teknolojik araştırmalar yapılmaktadır. Motor dizaynında yapılacak tasarım değişiklikleri veya ileri teknolojik uygulamalar ile kayıp enerjiden geri kazanım sağlanacaktır. Böylelikle modern çağımızın problemlerinden olan enerji ihtiyacı ve sera gazı etkisi yapan zararlı gaz üretimi de azaltılmış olacaktır.

### **1.2. Tezin Kapsamı ve Amacı**

Bu çalışma ile dizel ve benzinli motor pistonunun ANSYS programında modellenmesi, kaplama kalınlığı ve genişliği değişen çeşitli kademelerde “Termal Bariyer” MgZrO<sub>3</sub>, NiCrAl malzeme kaplanmalarının oluşturulması, sınır şartlarının tanımlanması ve ANSYS programı içerisinde termal gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir.

Piston üzerine homojen kaplanabilen ve yüksek sıcaklıklarda çalışabilen “Termal bariyer” kaplamalar; yanma odası sıcaklığını artırarak sistemin verimini de artırmaktadır. Bu kaplamaların sahip olduğu en büyük dezavantaj, kaplamanın yapıldığı ana metal ile arasındaki termal genleşme katsayıların farkından dolayı oluşan gerilmelerdir. Bu gerilmeler piston ve termal bariyer arasında çatlakların, ayrılmaların oluşmasına neden olmaktadır. Söz konusu çatlakları ve ayrılmaları önlemek için fonksiyonel derecelendirilmiş kaplamalar uygulanmaktadır.

Bu çalışma sonunda piston yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi, seramik kaplama ve çok katmanlı kaplama ile piston yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimi elde edilmiştir. Termal bariyer kaplı pistonda oluşan gerilmeler, termal etkiler ve avantaj/dezavantaj değerlendirmesi yapılmıştır.

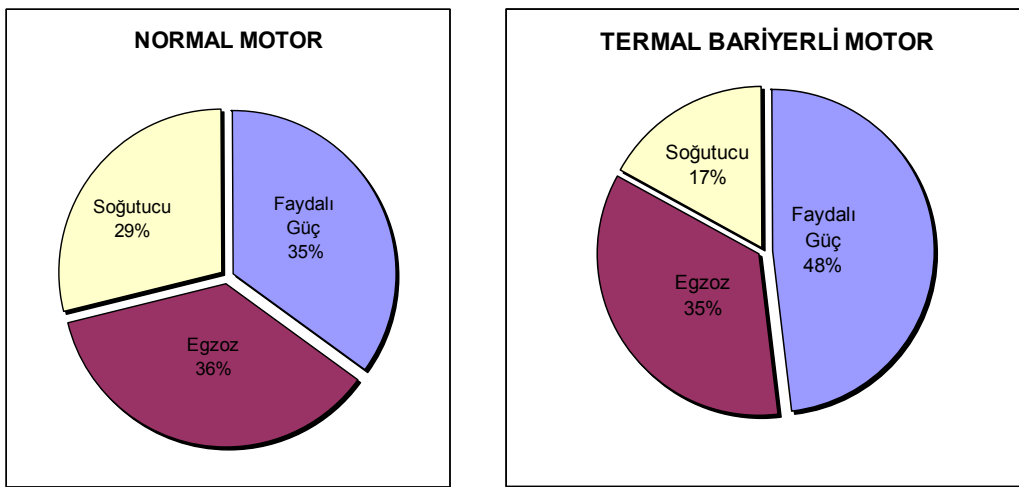
### 1.3. Literatür Taraması

İçten yanmalı motorda meydana gelen kayıp enerjiyi faydalı hale getirmek, genişleme zamanındaki işi artırmak, egzoz ve soğutma sistemine giden ısıları azaltmakla sağlanabilir. Bunun içinde yanma odasını oluşturan parçaların ısı iletkenliği düşük, yüksek çalışma sıcaklığına dayanabilen malzemedan imal edilmesi veya kaplanması gerekmektedir [1].

Dizel ve benzinli motorun soğutma sisteminin ortadan kaldırılması için, soğutma sistemine verilen ısının önlenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda termal bariyer kaplama ile sağlanan izolasyon sonucu soğutma sistemine gitmesi önlenen enerjinin büyük bir kısmı egzoz gazlarının sıcaklığının artmasına neden olmaktadır. Bir dizel motorun soğutma sisteminin ortadan kaldırılması ile soğutucu akışkana gitmesi engellenen enerji yalnızca faydalı işe değil aynı zamanda yağlamaya, radyasyon ve konveksiyonla kayba ve egzoz gazlarına gidecektir. Soğutma ile transfer edilen ısının azaltılması sonucunda termodinamiğin birinci kanunu göre daha fazla iş elde edilebilecektir. Buna ilave olarak harici ve dahili kayıplarının ortadan kaldırılmasıyla motorun efektif gücünde artma meydana gelecektir. Soğutma ünitesini oluşturan ekipmanlardan radyatörün, hortumların, soğutucu fanların ortadan kaldırılması ile motor dizaynı kolaylaşmaktadır. Motor dizaynının optimuma götürülmesi ile hiçbir zaman %100 verim elde etmek mümkün değildir. Kısacası üretilen ısının bir kısmı atık gaz olarak kayba uğrayacaktır [2].

Termal bariyerli motorlarda egzoz gazlarının sıcaklığının artırmakla oluşan egzoz enerjisindeki artış, tabii ki emmeli bir dizel motoruna turbo şarj veya turbo kombine düzeneğinin eklenmesiyle dışarı atılan ısı enerjisinin mekanik enerjiye dönüştürülmesini sağlar ki bu da motorun performansını iyileştirir. Yanma odasındaki sıcaklık artışı ile yanmadan atılan hidro karbonlar tamamıyla yanmakta,

karbon monoksit çıkışı ise azaltılmaktadır. Tabii emmeli bir dizel motorunda egzoz enerjisi toplam %30-40 iken, Termal bariyer kaplamalı dizel motorun da %60-65 değerindedir. Ayrıca egzoz sıcaklıkları da standart bir dizel motorunda 400-600 °C olmasına karşılık Termal bariyer kaplamalı dizel motorun 700-900 °C'dir [3]. Turbo kombine bir motora ise bu değer 1100 °C'ye kadar ulaşabilmektedir. Dizel motorlarda cidar sıcaklıklarının artması sonucu tutuşma gecikmesini de engelleyerek motorun daha sessiz çalışmasını sağlar. Şekil 1.1 'de standart ve termal bariyer kaplamalı bir motor için enerji dengelerinin karşılaştırılması verilmiştir [4].



Şekil 1.1. 'de Standart ve Termal Bariyer Kaplamalı Bir Motorda Enerji Dengelerinin Karşılaştırılması.

Metalürjik alandaki teknolojik gelişmelerle birlikte, seramik kaplama uygulanan ana malzeme fiziksel, termal ve kimyasal özelliklerini istenen şartlara yaklaştırarak, içten yanmalı motorlarda kullanımına imkan kılmaktadır. Günümüzdeki seramik ve kompozit olarak ifade edilen bu malzemelerin denenmeye başlanması aşağı yukarı 40-50 yıl öncesine dayanmaktadır. Ancak tam anlamı ile uygulamaya geçilmesi ve özellikle roket nozulleri, gaz türbini kanatçıkları, gemi dizel motor blokları layner üst/alt yaslanma yüzeyleri ve motor yanma odası elemanlarının kaplanması 1965'lerde yapılmaya başlanmıştır. Günümüze kadar olan tüm termal bariyer kaplama çalışmalarda kullanılacak seramik malzemelerin kullanım yerine göre uygunluğu araştırılmış ve bir takım sonuçlar elde edilmeye çalışılmıştır. Örneğin yanma odası elemanlarının yapısal amaçlı ileri teknoloji seramikleri olan oksit seramikler grubundan alüminyum oksit ve zirkonyum oksit dikkat çekmektedir [6].

Isı kayıplarını azaltarak motorda verimi artırmak amacıyla; yanma odasının, pistonların, kaverlerin ve supapların termal bariyer kaplanmasına ihtiyaç duyulur. Yanma odasından %80'e yakın bir ısı kaybı azalması için en az 3.5 mm'lik bir kaplama kalınlığına ihtiyaç vardır. Tabii ki daha iyi kaplam yöntemlerinin gelişmesi ile bu kalınlık 5 mm civarında gerçekleştirilmektedir. Şayet layner de seramikten yapılırsa segmanlara uygun termal genleşmeli ve aşınmaya dayanıklı kaplama gereklidir. Bazı seramik malzemeler 870 °C 'ye kadar kendi kendine yağlayıcıdırlar [6]. Motor yanma odalarında çok iyi bir izolasyon için 5 mm'lik bir kaplama tekniğine ihtiyaç duyulur. Ancak bu plazma püskürtmeli kaplama tekniği için mümkün değildir [6].

Garbincius ve diğ. Tarafından yapılan: soğutma sıvılarının neden olduğu tortu tabakasının, piston ve silindir deformasyonlarına etkilerini incelediği çalışmada, araştırmacılar, Toyota 18 R-G tipi motorun piston ve silindirini bilgisayar ortamında üç boyutlu olarak modelleyip, Cosmos Design Start yazılımı ile sonlu elemanlar modelini oluşturarak, çalışma sıcaklıklarında piston ve silindirde meydana gelen termal genleşme ve termo mekanik deformasyonları incelemişlerdir. Araştırmacılar, bu çalışmalarda; yanma gazlarından yanma odası duvarlarına, yanma odası duvarlarından pistonu, soğutucu akışına ve yağa olan ısı geçişini, Bendersky Termokupulları kullanılarak yapılan deneysel ölçümlerden ve ampirik bağlantılar kullanarak yapılan hesaplamalardan elde edilmiştir. Sonlu elemanlar sonucunda; pistondaki en yüksek sıcaklık piston üst yüzeyinde 250 °C, en düşük sıcaklık piston eteğinde 106 °C olarak, silindirdeki en yüksek sıcaklık silindir üst yüzeyinde 165 °C, en düşük sıcaklık silindir alt yüzeyindeki 101 °C olarak bulunmuştur [7].

M.N.ERŞAN tarafından yapılan çalışmada, traktör motorlarında kullanılan dizel motora ait piston bilgisayar ortamında modellenmiş, sonlu elemanlar modeli oluşturup sınır şartları tanımlanarak pistonun yapısal ve termal analizleri yapılmıştır. Bu çalışmada önce kaplamasız pistonunun, daha sonra piston üst yüzeyinin 150 µm kalınlığında NiCrAl ve 350 µm kalınlığında MgZrO<sub>3</sub> ile kaplandığı pistonun analizleri yapılmıştır. Son olarak ta piston yüzeyi farklı kalınlarda çok tabakalı seramik malzeme ile kaplanarak analizleri tekrarlanmıştır. Bu çalışma sonucunda kaplamasız pistonun yüzeyindeki en yüksek sıcaklık değerinin 309 °C olduğu

görölmüş, tek tabak seramik kaplama uygulanan pistonun kaplama yüzeyindeki sıcaklık değeri nin %9,8 arttığı ve 339 °C olduğu bulmuştur [8].

## **BÖLÜM 2. DİZEL VE BENZİNLİ MOTOR PİSTONLARI**

### **2.1. Giriş**

Günümüzde kullanılan motorların metal parçaların da yüksek sıcaklıklardan dolayı piston üzerinde ergimelerin olduğu bilinmektedir. Düşük ısı kaybı sağlamak maksadı ile dizel motorlarda yapılan kaplamalar, parçanın yüksek sıcaklıklarda fiziksel, termal ve kimyasal özelliklerini korumayı amaçlamaktadır. Fakat ana malzeme ile termal bariyer kaplama arasındaki genleşme katsayıları birbirinden farklıdır. Bu sebepten iki malzeme arasında istenmeyen gerilmeler oluşacak ve bağ kuvvetinin üzerinde bir gerilme kaplamanın çatlamasına veya dökülmesine neden olacaktır. Bu gerilmelerin giderilmesi veya kabul edilebilir değerlere indirgenmesi için termal bariyer kaplamada ara bağlayıcı bir termal bariyer kaplama uygulanmaktadır.

Ara bağlayıcı; termal üst bariyer tabaka ile ana malzemenin oransal karışımından oluşmaktadır. Bu çalışma için ara bağ malzemesi olarak NiCrAl kullanılmıştır. Termal bariyer kaplama ile ana malzeme arasında oluşturulan bu tabaka; bir geçiş tabakası olup, çalışma ortamında meydana gelecek olan termal etki ve gerilmelerin oluşturacağı yüzey gerilmeleri değerlerini absorbe etmesi beklenmektedir. Tabakaların temas yüzeyleri arasında oluşacak gerilmelerin azaltılması ve emniyetli kabul edilen gerilme değerlerinin altına indirgenmesi amaçlanmaktadır. Ara bağlayıcı kaplama ile ana malzemenin arasında yapışma mukavemetini artırıcı yüzey pürüzlülük katsayısı ara yüzey bağ kuvvetini doğrudan etkileyen ve dikkat edilmesi gereken bir husustur. Plazma sprej yöntemi ile yapılan bu tür kaplamalarda ana malzemeye yapılacak kaplamanın özelliğine göre belirli bir sıcaklığa kadar ana malzeme ısıtılır ve ara tabakanın yapışması sonrasında iki malzeme birlikte soğumaya bırakılır. Buradaki amaç ön ısıtma yapılan ana malzeme üzerine kaplama yapılan ara bağ tabakası ile arasında oluşacak yüzey gerilmesini azaltmaktır.

Kaplama-kaplama, kaplama-ana malzeme arasındaki bağ kuvvetlerin tespit edilmeleri deneysel olarak birkaç metod ile yapılmaktadır. Kaplama malzemesi üzerine yapıştırılan ara bağlayıcı çekmeye tabi tutulmaktadır. Bu bağlayıcı malzemeler kaplama bağ kuvvetlerinin altında kalmakta ve deneysel sonuçların çıkarılmasında sorun oluşturmaktadır. Ara tabakaların sayısının artırılması sonucunda deneysel bağ kuvvetlerinin elde edilmesi de imkansızlaşmaktadır. Bu bağlamda yapılan bu çalışmada sonlu elemanlar yöntemi ile termal bariyersiz piston, termal bariyer kaplanmış piston ve 5 kademeli olarak yapılan termal bariyerli kaplanmış pistonların modellenmesi, üzerindeki termal değişimler ve termal değişimlerin oluşturduğu gerilmelerin hesaplaması yapılmıştır.

Bu çalışmada sonlu elemanlar ve bu metodla yapılan analiz tipleri incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan analiz basamakları ve hazır paket programları araştırılmıştır. Bu çalışma doğrultusunda termal gerilmeler hakkında bilgi verilip, sonlu elemanlar ve kullanıldığı alanlar hakkında bilgi verilmiştir. Son yıllarda yapısal analiz için geliştirilen bilgisayar programlarında oldukça büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Özellikle hızlı ve güvenilir biçimde gerçekleştirilmesi gereken mukavemet analizlerinde, malzemenin tahribatını gerektirecek deneyimlerin bilgisayarlı tahribatsız olarak gerçekleştirilmesinde, çok sayıda tekrar gerektiren hesaplamalarda bu metodun sağladığı faydalar tartışılmazdır.

Farklı yapısal modellerde yapılan statik ve termal analizlerde, sonlu elemanlar metodu doğruluğunu kanıtladığına inanılmaktadır. Sonlu elemanlar ile hazırlanan 3 boyutlu piston analizinde 3 boyutlu hacim elemanları kullanıldı. Bu çalışma ile dizel ve benzinli bir motor pistonunun ANSYS programında modellenmesi, kalınlığı ve genişliği değişen çeşitli kademelerde “Termal Bariyer” MgZrO<sub>3</sub>, NiCrAl malzeme kaplanmalarının oluşturulması, sınır şartlarının tanımlanması ve ANSYS programı içerisinde termal gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir.

## **2.2. Piston ve Havuz Geometrisi**

Piston, gazın genişlemesi sırasında gaz basıncından aldığı kuvvetin etkisi ile öteleme hareketi yapar. Meydana gelen kuvveti perno pim vasıtası ile biyel kola ve krank

miline ileterek doğrusal hareketin dairesel harekete dönüştürülmesini sağlayan bir motor parçasıdır. Pistonun üst yüzeyi, yanma odasını yüzeylerini bir kısmını oluşturur. Aynı zamanda üzerinde bulunan kompresyon segmanları yardımı ile sıkıştırmanın oluşturmasını ve gazların kaçmamasını, yağ segmanlarıyla da silindirin yüzeyinin yağlanması ve yağın sıyrılmasını sağlar. Piston motorun diğer elemanlarına göre en fazla mekanik ve ısı zorlanmalarının etkisi altındadır. Pistona etki eden zorlanmalar gaz basıncı, kütlelerin ivme kuvvetleri ve ısı kuvvetleridir.

Sıcak gazlar, pistonun yapısı nedeni ile eşit olmayan sıcaklık dağılımlarını meydana getirir. Dolayısı ile ısı gerilmeler ve değişik uzamalar meydana gelir. Bu nedenle pistonla silindir arasında boşluk buna uygun olarak seçilir. Bu boşluk piston kafasında çok ve etekte daha az olur. Büyük dizel motor pistonlarında perno pim eksenine ve 90 derecedeki piston çapı birbirinden farklıdır. Belirli bir ovalliğe sahiptir.

Pistonun boyutlandırılmasında, mekanik ve ısı zorlanmalar göz önüne alınarak hesaplama yapılır. Pistonu boyutlandırabilmek için pistonun uzunluğu, pistonun yüzünün biçimi, et kalınlığı, piston perno piminin yeri, piston eteği, en üst segmanın yeri, kompresyon ve yağ segmanlarının sayısı ve boyutları, pistonun ağırlığı öncelikli olarak belirlenir ve hesaplanır.

### **2.2.1. Piston Boyu**

Pistonun boyutlandırılmasında ilk seçilecek değer pistonun uzunluğudur. Bunun seçiminde, motorun yapısı, tipi, kullanım amacı ve ömrü dikkate alınmalıdır. Piston uzunluğu yağ tüketimi bakımından da önemlidir. Piston uzunluğu artarsa yağın yanma odasına kadar olan yolu uzar ve daha az yağ yanma odasına gelebilir. Bu nedenle yağ tüketimi azalır.

### **2.2.2. Piston yüzeyinin şekli ve et kalınlığı**

Piston yüzünün şekli, benzin ve dizel motorlarının yanma odası şekline, bujinin veya enjektörün yerine, sıkıştırma oranına bağlıdır.

1. Benzin Motorları Piston Yüzey Şekilleri;



- a.Düz form; Bu tip pistonlara taşıt motorlarında veya küçük motorlarda rastlanmaktadır. Piston üst yüzeyi düz veya hafif bombelidir.
- b.Yarı küresel form; Yüksek güç istenen motorlarda kullanılmakta ve sıkıştırma oranı daha yüksektir.
- c.Çatı form; Yüksek sıkıştırma gerektiren iki ve dört zamanlı motorlarda kullanılır.

## 2. Dizel Motorlarda Piston Yüzey Şekilleri:

- a.Hafif oyuk yüzeyli pistonlar; Taze hava ve yakıt karışımının daha iyi olması istenen yerlerde tercih edilmektedirler.
- b.Küresel oyuklu Piston Yüzü; Üst kısma küresel bir oyuk açılmakta ve yakıt buraya püskürtülmektedir.
- c. Çift oyuklu piston yüzü; Üst kısma iki veya daha fazla küresel oyuk açılması ile oluşturulmuş yanma odalı ve püskürtmenin direkt yapıldığı, yüksek güç istenen yerler kullanılmaktadır.

### 2.3. Segman Kanalları

Segmanın görevi; piston ve silindirle birlikte yanma odasındaki gazların kartere, katredeki yağında yanma odasına sızmasını önlemek, silindir çeperlerinin yağlanmasını sağlamak ve piston ısısını silindir çeperlerine iletmektir. Benzin motorlarında sıkıştırılan yakıt hava karışımı ve yanmış gazlar, dizel motorlarında sıkıştırılmış hava ve yanmış gazların kartere sızması segmanlar tarafından önlenir. Yanma odasındaki gazların kartere sızması önlenirse basınç kaybı olmaz ve motordan istenen güç elde edilir. Aynı şekilde karterdeki yağın yanma odasına sızması önlenerek, gerek motor yağının yanarak azalması gerekse yanma odası çeperlerinde segman yuvalarında ve supaplar da kurumun (kokun) birikmesi önlenir. Segmanların kötü tertiplenmesi sonucu segmanlarda oluşan aşınma halinde gaz kaçağı yapacağı için yanma odası basıncı (kompresyon) düşer ve aynı zamanda yağ sarfiyatı artar. Sızdırmazlığın sağlanması segmanın silindir çeperlerine radyal teması ve segman yuvasına oturan yüzeyinin yuvasına dayanması şeklinde olur. Radyal temas iş strokun da segmanın arkasındaki yanma basıncı ve segmanın esneme özelliği ile olur. Bunun dışındaki zamanlarda kendi teğetsel gerilmesi ile sağlanır.

Segman yuvasındaki basınç segmanı radyal yönde silindire bastırır ve sürtünme işi artar. Radyal basınç 50-250 KPa'dır. Bu basınç yüksek dönem sayılı motorlarda büyük, alçak dönme sayılı motorlarda küçüktür. Deneysel çalışmalara göre sürtünme işinin %60'ı 1.segmanda, %30'u 2.segmanda, %10'da 3. segmanda olduğu saptanmıştır [9]. Buna göre mekanik kayıpların mekanik kayıpların %50-60'ı segmanla ile olmakta ve motorun dönme sayısı arttıkça artmaktadır. Bunun azaltılması segmanların sayılarının ve kalınlılarının azaltılması ile mümkün olur. Segmanlar ayrıca pistondaki ısının %50-60'ının silindir çeperlerine iletilir. Bu daha çok ilk iki segmanda olur ve üçüncü segman ısı iletimi yönünden etkili değildir.

Pistonun yapısındaki en önemli konulardan birisi segmanların yeri, konumu ve sayısıdır. Yanma odasında oluşan sıcaklıklar pistonu ısıtır ve segmanlar yoluyla layner çeperine piston üzerinde oluşan ısının büyük bir kısmı iletilir ve oradan da soğutucu suya geçmesi sağlanır (Şekil 2.1.).

Birinci Segman Yuvasının Yeri; Birinci segman yuvasından piston üst yüzey kenarına kadar olan bölgeye ateş bölgesi, bu bölgedeki segmana da ateş segmanı denir. Bu yuvanın yeri çok önemlidir. Bu segman yuvası, piston üst ölü noktada iken, laynerin su ile soğutulan kısmında olmalıdır. Bu şekilde dizayn edilen segman oldukça iyi bir şekilde soğutulmuş olur. Kovanlı laynerlerde dikkat edilmelidir. Ayrıca segman, yanma gazlarının direkt etkisinden korumak için piston yüzeyinden belli bir uzaklıkta olmalıdır. Pistonun segman yuvaları civarında oluşan aşırı sıcaklıklar malzemenin mukavemetinin azalmasına sebep olur. Birinci segman yuvası piston üst yüzeyinin sıcaklığının düşülmesi için üst yüzeye yakın yapılır. Fakat yanmış gazların etkisinden uzak tutmak içinde piston layner boşluğu minimum olarak imal edilir. Benzinli motorlarda ait pistonların ateş bölgesi yükseklikleri dizel motorlarına göre daha küçüktür.

Segman Yuvaları Arasındaki Mesafe; Genel olarak birinci segman yuvası arasındaki uzaklık değer aralığına göre, daha fazla alınır. Bu mesafe

Benzinli motorlarda  $S=0.05D$

Dizel motorlarda  $S=0.0065D$

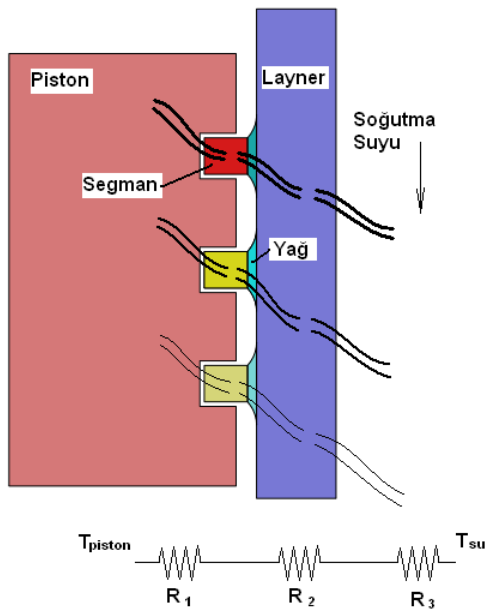
değerinde olur. Buradaki  $S$  piston üst mesafesi ile segman arasındaki ölçü,  $D$  ise piston çapını ifade etmektedir. Segman sayısı; segman sayısı dizel ve benzinli motorlarda farklı olmaktadır. Dizel motorlarda iki yağ segmanı olması halinde ikincisi segman eteğe yerleştirilir. Yağ segmanlarının alt kısmında fazla yağın birikmesi için açılı kanallar olmalıdır.

## 2.4. Piston Eteği

Pistonun yağ segmanı ile pistonun ucu arasındaki kısma, piston eteği veya piston shaftı denir. Piston eteği; pistonun layner içinde merkezlenmesini ve hareketini, biyel kolunun normal (yan) kuvvetlerinin taşınmasını, piston ile layner arasındaki yağlamanın ayarlanmasını, silindir çeperlerine ve yağa ısı geçişini sağlamaktadır.

## 2.5. Sıcaklık dağılımları

Yakıt içerisindeki enerjinin ısı enerjisine dönüşümü sıcak yanma gazlarından piston üst yüzeyine taşınım ve çok az miktarda ışınlı ısı geçişi, yanma odasını oluşturan çeperlerde periyodik sıcaklık değişimlerine neden olmaktadır.

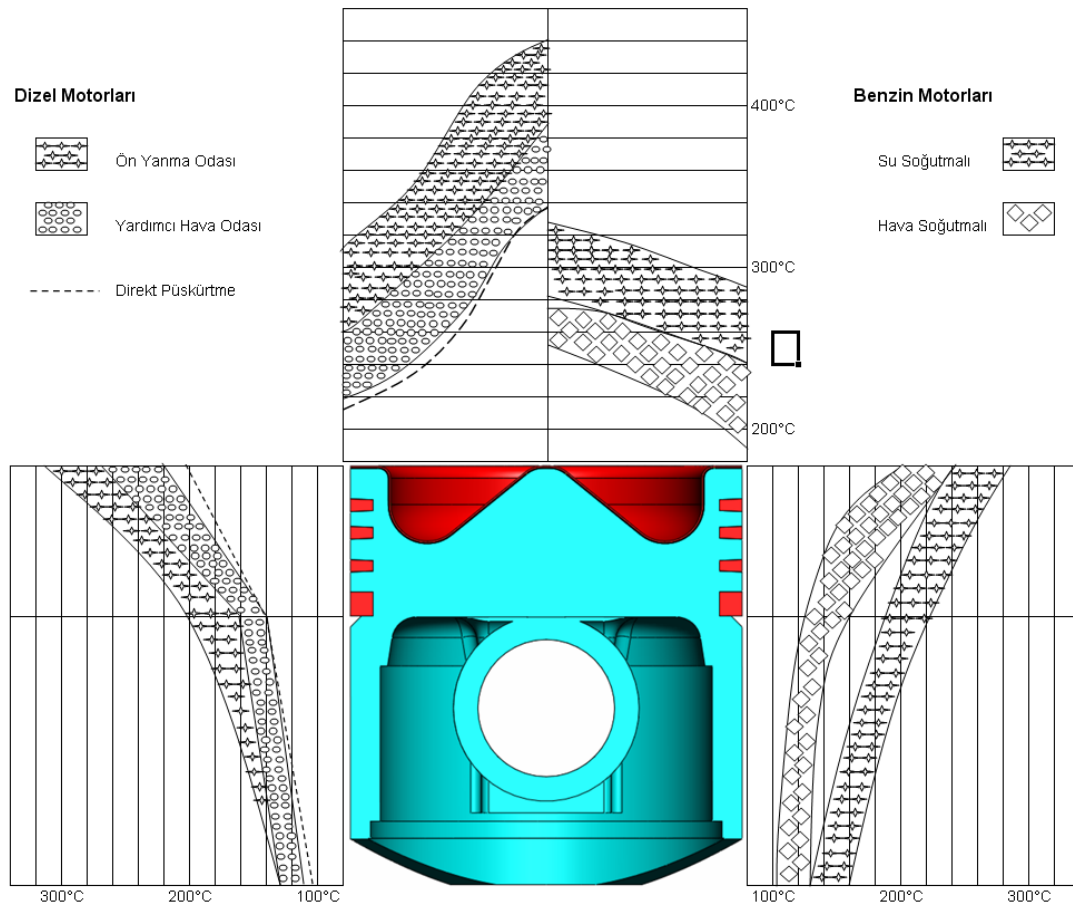


Şekil 2.1. İçten Yanmalı Motorda Piston, Segman ve Layner Üzerinden Soğutma Suyuna Geçen Isı Transferi

İş zamanında piston başı tarafından ısının büyük bir bölümü segmanlar piston kenarlarından layner çeperi ve dolayısı ile soğutucuya ulaşır (Şekil 2.1.).

Alüminyum alaşımlı pistonlarda ısı iletiminin daha iyi olması nedeni ile sıcaklık dağılımı daha unifomdur. Dört zamanlı benzin ve dizel motorlarının hafif metal malzemeli pistonu için sıcaklık dağılımı şekil 2.2. 'de görülmektedir.

Aynı şekilde yapılan çeşitli deneysel sonuçlara göre gerek benzin gerekse dizel motorlarında pistonun çeşitli bölgelerindeki sıcaklıklar tablo 2.1.'de görülmektedir.



Şekil 2.2. Dört Zamanlı Motorlarda Hafif Metal Alaşımlı Pistonun Sıcaklık Dağılımı

Tablo 2.1 Pistonlardaki Genel sıcaklık Dağılımı (°C)

	Zamanlama	Soğutma Tipi	Üst Yüzey Ortası	Üst Yüzey Kenarı	1.Segman	Etek Üst Kenarı	Etek Alt Kenarı
Benzin	2Z	Su	290-340	260-280	200-250	180-210	110-150
Benzin	2Z	Hava	320-360	270-320	210-260	200-250	140-190
Benzin	4Z	Su	240-290	190-260	170-210	125-170	100-140
Benzin	4Z	Hava	280-330	230-300	190-260	190-240	130-160
Dizel	2Z	Su	300-360	210-300	200-240	150-200	110-140
Dizel	2Z	Hava	320-410	220-300	220-270	160-210	120-150
Dizel	4Z	Su	290-340	210-285	180-230	130-180	100-140
Dizel	4Z	Hava	290-360	220-290	190-240	160-200	120-150

Pistonlarda yüksek sıcaklıklar genellikle piston üst yüzeyinin ortasında görülmektedir. En yüksek sıcaklık ise bujide ve egzoz supabına yakın olan kısımlarında oluşur. Pistonun üst yüzeyinden piston eteğine doğru sıcaklıklar azalır. Piston eteğinde ise sıcaklıklar en düşüktür. Benzin motorlarında 230 derece sıcaklık kritik olarak nitelendirilir ve 250 derece ise uzun süre devam etmemelidir. Dizel motorlarında ise piston sıcaklıkları 360 dereceyi geçmemelidir. Yanma tekniği açısından düz piston yüzeylerinde görülen simetrik sıcaklık dağılımları piston yüzeylerindeki çıkıntılar nedeni ile asimetrik sıcaklık dağılımı şekline dönüşür.

Piston sıcaklığına etki eden etkenler.

1. Soğutma şekli
2. Motor yükü
3. Ateşleme veya püskürtme başlangıcı
4. Dönme sayısı
5. Sıkıştırma oranı
6. Yanma olayı
7. Piston yapısı
8. Segmanın dönmesi

Kararlı halde çalışan bir içten yanmalı bir motordaki en yüksek sıcaklığın görüldüğü üç nokta; buji çevresi, egzoz valfi ve portu, piston yüzeyidir. Yanma gazlarının

yüksek sıcaklıklarına maruz kalan bölgeler sadece bunlar değildir. Fakat bu bölgeler soğutulması en güç olan bölgelerdir.

Yanma sırasında buji çevresinde oluşan yüksek sıcaklıklar kritik bir ısı transferi problemi doğurur. Bujinin (dizel motorlarda enjektörün) yanma odası duvarında (üstünde) yer alması soğutma çeketlerinde bir ayrılma oluşturduğundan, bu bölgede lokal bir soğutma problemi meydana gelir.

Hava soğutmalı motorlarda buji, soğutucu kanatçık bloğu ikiye ayırır. Soğutma problemi hava soğutmalı motorlarda da devam eder. Egzoz gazlarının akış bölgesinde yerleştiği için yüksek sıcaklığa maruz kalan egzoz valfi ve port bölgesi, bujinin oluşturduğu bölgeye benzer şekilde soğutulması güç bir bölge oluşturur. Egzoz valf mekanizması ve egzoz mani foldu bağlantıları, etkili bir soğutma için gereken soğutma sıvısını dolaşım kanallarını veya soğutucu kanatçık konulmasını güçleştirir [10].

Soğuk bir motor kararlı durum sıcaklığına ısıtmak, bütün motor elemanlarında bir termal genişlemeye neden olur. Bu termal genişlemenin büyüklüğü, elemanların sıcaklıklarına ve üretildikleri malzemelere bağlı olarak her bir motor elemanında farklı değerlerde olacaktır. Silindir çapı, pistonun termal genişmesini sınırlar. Daha yeni bir motorun çalışma sıcaklığı, piston segmanları, piston eteği ve silindir duvarları arasında daha yüksek zorlanmalar ortaya çıkabilir. Bu nedenler; motorun çalışması sırasında, silindir duvarları üzerindeki yağ filminde yüksek viskoz ısınmalar oluşturur.

Çeşitli elemanlardaki sıcaklık artışının, soğuk motorun çalışmasından sonra nasıl oluştuğunu göstermektedir. Soğuk havada, motorun kararlı hale ulaşması 20-30 dakikadan uzun sürebilir. Otomobilin bazı parçaları bundan daha az bir zamanda tam kararlı hale gelirken bazı parçalarda gelmeyebilir. Yeterli normal çalışma koşulları birkaç dakika içinde oluşabilir ancak en uygun yakıt tüketim oranına ulaşılması bir saat kadar uzun sürebilir. Motor tam olarak ısınmasından önce otomobilin sürülmesi durumunda, bazı güç ve yakıt ekonomisi kayıplarına neden olabilir. Otomobillerin

büyük bir kısmı, ise mesafeler için motor tam olarak ısınmadan kullanılır. Hava kirliliğinin en büyük nedenlerinden biri budur [10].

İlk olarak, motorun silindiri içindeki yakıt hava karışımı, düzgün kararlı hal için, başlıca üç temel ısı transferi mekanizmasını (iletim, taşınım, ışıyım) çalıştırır. Ek olarak, silindir içindeki sıcaklık, sıvı yakıtın buharlaşması ile oluşan faz değişiminden etkilenir. Yakıt hava karışımı, emme stroğu boyunca silindir duvarından sıcak ve soğuk olarak silindire girer, her iki yönde de ısı transferi mümkündür. Sıkıştırma stroğu boyunca ve yanmanın başlaması ile gaz sıcaklığı artar. Bu durumda silindir duvarına bir taşınım ısı transferi oluşur. Silindir içinde yanma boyunca en yüksek gaz sıcaklığı 2400 °C civarındadır. Silindir duvarının aşırı ısınmasından korunması için, etkili bir ısı transferine ihtiyaç duyulur. İletim ve taşınım ile ısı transferi, enerjinin yanma odasından uzaklaştırılması ve silindir duvarının erimesinin önlenmesi için temel ısı transferi türleridir.

Isı transferi her bir yüzey için şöyledir.

$$q' = \frac{Q'}{A} = \frac{(T_g - T_c)}{\left(\frac{1}{hg}\right) + \left(\frac{\Delta x}{k}\right) + \left(\frac{1}{hc}\right)} \quad (1.1)$$

$T_g$  = Yanma odasındaki gaz sıcaklığı (°C)

$T_c$  = Soğutma sıcaklığı (°C)

$hg$  = Gaz tarafına ait taşınım ısı transferi katsayısı ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$hc$  = Soğutucu tarafına ait taşınım ısı transferi katsayısı ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$\Delta x$  = Yanma odası duvar kalınlığı (m)

$k$  = Silindir duvarının ısı iletim katsayısı ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

Denklem 5'deki ısı transferi çevrimseldir. Yanma odasındaki gaz sıcaklığı  $T_g$ , yanma anındaki en büyük değerden, emme anındaki en düşük değerine kadar, motor çevrimi ile büyük oranda değişir. Emme stroğunun başlangıcındaki, silindir duvarı sıcaklığında bile düşük değerde olabilir, bir an için ısı transferi ters yönde olur. Soğutucu akışkan sıcaklığı “ $T_c$ ” oldukça kararlıdır. Uzun çevrim sürelerine karşılık

soğutucu akışkan sıcaklığında bir değişiklik olmaz. Silindir gazlarından silindir duvarına taşınım ısı transferi katsayısı “hg”, gaz hareketlerinin değişimine türbülansa, girdaplara ve gazın hızına göre bir çevrim süresince sürekli değişir. Silindir içindeki aynı nedenlerle, bu katsayı büyük değişiklikler gösterir. Silindir duvarından soğutucu akışkan tarafına ısı taşınım katsayısı oldukça karardır ve soğutucu akışkanın hızına bağılı olarak oluşur. Silindir duvarının ısı iletim katsayısı “k”, silindir duvarının sıcaklığına bağılıdır ve oldukça karardır. Silindirin iç yüzeyinde oluşan taşınım ısı transferi;

$$q' = \frac{Q'}{A} = hg(Tg - Tc) \quad (1.2)$$

Yağlama yağının ısıl kararlılığının ve silindir duvarının yapısal dayanımının sağlanabilmesi için: silindir duvarının sıcaklığının (Tw) 180-200 °C'yi aşmaması istenir. Çeşitli boyutlarda, geometrilerde ve hızlardaki motorlarda akış karakteristikleri ve ısı transferleri için; Reynold sayısının tespit edilmesinde kullanılan birçok yöntem vardır. En iyi karakteristik boyu ve hızı seçmek bazen zor olabilir [11, 12]. Motor dataları ile ilgili olarak reynolds sayısını tanımlayan aşağıdaki bağlantı oldukça iyidir [12].

$$Re = \frac{(m'_a + m'_f)B}{A_p \mu_g} \quad (1.3)$$

Burada:

$m'_a$  = Silindir içindeki havanın kütle akış oranı (kg/sn)

$m'_f$  = Silindir içindeki yakıtın kütle akış oranı (kg/sn)

B = Silindir çapı (m)

$A_p$  = Silindir yüzey alanı (m<sup>2</sup>)

$\mu_g$  = Silindir içindeki gazın dinamik viskozite ( $\frac{kg}{m * sn}$ )



Gaz sıcaklığının çok yüksek olmasına rağmen, benzinli motorların yanma odası duvarına olan ışıınım toplam ısı transferinin yaklaşık %10'u kadardır. Bunun nedeni, gazların özel dalga boylarında oluşan düşük yayınım (ışıınım) özellikleridir. Yanma öncesi gazların büyük oranını oluşturan N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub>, çok az ışıınım gösterirler. Yanma sonu oluşan CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O, ışıınımla ısı transferine daha fazla katkıda bulunurlar [10].

Dizel motorlarda yanma sonu ürünlerinden olan katı karbon partikülleri, bütün dalga boylarında iyi yayıcıdır ve bu tip motorlarda ışıınım ısı transferinin oranı toplam ısı transferinin %25-%35'i kadardır. Silindir duvarlarına ışıınla olan ısı transferinin büyük bir oranı, güç stroğundan erken oluşur. Bu noktada yanma sıcaklığı en üst değerdedir ve termal ışıınım (yayınım) potansiyeli T<sup>4</sup>'e eşittir. Büyük bir ısı akısı oluşur. Bu aynı zamanda, benzinli motorlarda ışıınım (yayınım) ısı akısının daha fazla arttığı, karbon kurumu miktarının en yüksek olduğu andır. Benzinli motorlarda, çevrimin bu noktasında anlık ısı akısı 10 MW/m<sup>2</sup> kadar tecrübe edilmiştir [10].

## BÖLÜM 3. KAPLAMA MALZEMELERİ

### 3.1. Giriş

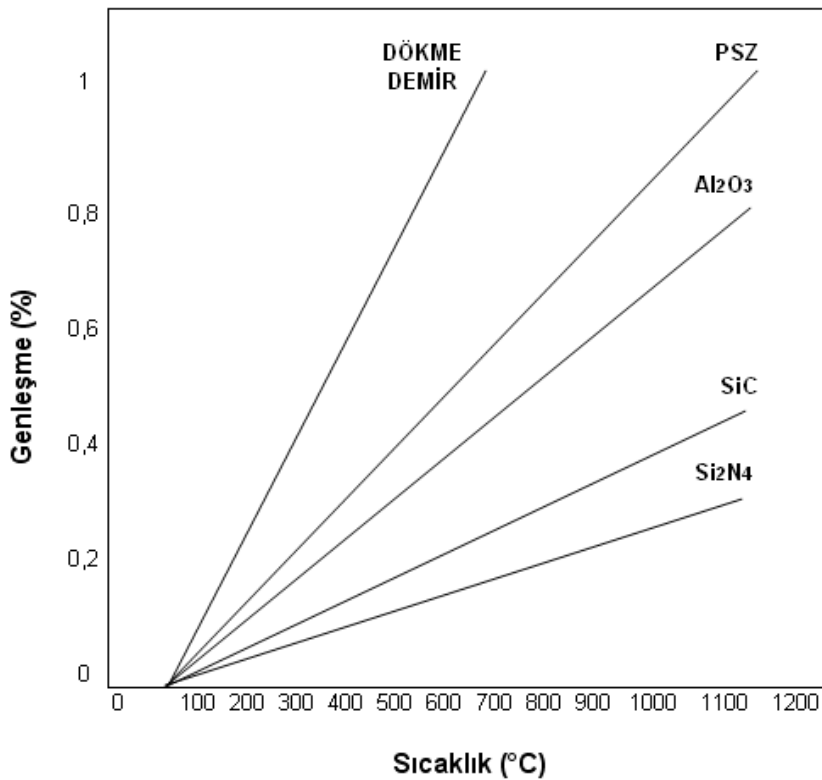
Termal bariyer kaplamaları malzemenin çalışma sıcaklığını yükselterek sistemin verimini artırmak amacı ile kullanılır. Genelde metal alt tabakanın üzerine homojen seramik kalama seklinde uygulanmaktadır. Bu tür kaplamalarda çalışma esnasında görülen en önemli problem, metal alt tabaka ile seramik kaplamanın termal genleşme sabitlerinin farklı olması nedeniyle ortaya çıkan büyük termal gerilmelerdir. Bu gerilmeler sonucunda sistemde çatlaklar ve metal/seramik ara yüzeyinde ayrılmalar görülmektedir. Söz konusu çatlakları ve ayrılmaları önlemek için fonksiyonel derecelendirilmiş malzemelerden yapılmış kaplamalar geliştirilmiştir. Bu tür kaplamalarda malzeme özellikleri kaplama kalınlığı boyunca fonksiyonel olarak değiştirilmekte ve bu sayede kaplama ile alt tabaka arasında uyumsuz ve termal gerilmeler en düşük dereceye indirilebilmektedir. Bu çalışma tek ve beş katmanlı seramik kaplama yapılan dizel ve benzinli pistonlar üzerinde yapılmıştır. Beş katlı kaplamanın tek katlı kaplamaya göre üstünlükleri incelenmiştir.

Bir termal bariyer kaplama dizaynında, aşağıdaki ilkeler ışığında hareket edilmesi, daha iyi sonuçlara ulaşılmasını sağlayacaktır.

1. Uygun kaplama kalınlığının belirlenmesi,
2. Yanma yüzey sınırlarının belirlenmesi ve kaplanması,
3. Tasarım karmaşıklığının minimize edilmesi,
4. Yüksek termal genleşmeye sahip seramik kullanmak,
5. Güvenilirliğin sağlanması,
6. Uzun süre dayanıklılık,
7. Yüksek alaşım çeliklerinden kaçınmak,
8. Performansı artırmak.

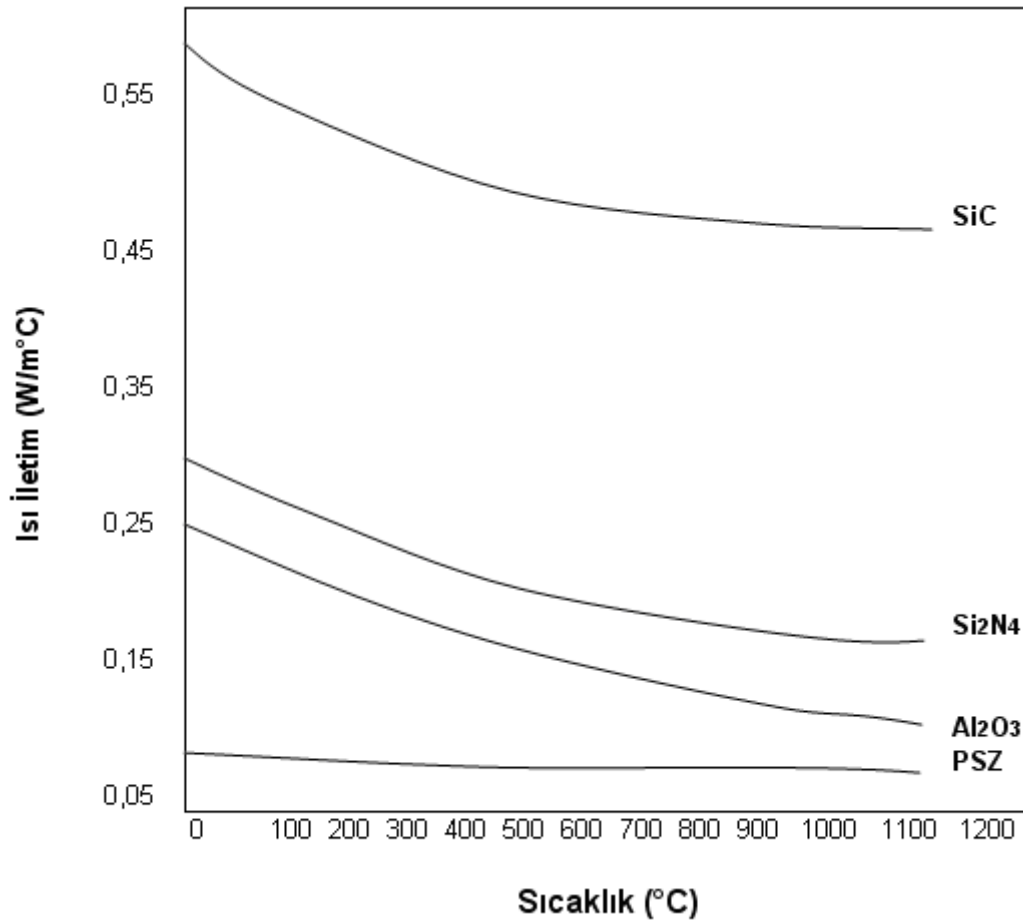
Bazı bileşimlerde en düşük kompleks yapıyı elde etmek için tek bir bileşim (örneğin: seramikten yapılmış bir piston) gereksinimine rağmen, seramiğe bağlı başarısızlık riskinin düşürülmesi için, seramik-metal oluşturan tasarımlar tercih edilmektedir. Buna ilaveten metal kısmın üzerine yerleştirilecek yüksek genleşme oranına sahip seramik malzemesi, tasarım karmaşıklığını minimize etmek için en uygun yoldur.

Seramik seçiminde kaplama için en iyi yöntem ile ideal seramik malzemesi çok önemlidir. İdeal malzemeler aşırı derecede düşük ısı iletkenliğe ve çok düşük termal genleşme katsayısına sahip olmalıdır. Bu değerlerin sıfır olması ideal bir durumdur, fakat gerçekte mümkün değildir. İdeal malzemenin düşük ısı genleşme katsayısı, sıcaklık dağılımlarının incelenmesi ile hesaplanabilir. Bazı tasarımlarda bileşim tek bir seramik parça, diğerlerinde ise seramik-metal bileşimi olmalıdır. İdeal malzeme, tasarım elamanlarının elastiklik modülüne sahip olmalıdır. Sapmaların kontrolü etkilediği tasarımlarda, yüksek elastiklik modülüne sahip olan malzemeler daha kullanışlıdır.



Şekil 3.1. Bazı Seramik ve Dökme Demir Genleşme Katsayıları

Seramiklerin metallere üzerine kaplanması iki malzemenin (metal-seramik) ısı genleşme katsayılarının uygunluğu ile doğrudan ilgilidir. Bugün mevcut çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre, (Partially-Stabilized Zirconia) PSZ cinsi seramikler için en uygun metal malzemenin dökme demir olduğu ifade edilmektedir [13, 14]. Şekil 3.1. 'de bazı seramik ve dökme demir malzemelerinin genleşme katsayılarını gösteren grafik, Şekil 3.2. de ise dört ayrı seramik malzemesi için ısı iletim katsayıları gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Bazı Seramiklerin Isı İletim Katsayısı

Isı geçişini engellemek amacıyla yapılan kaplamalar ince ve kalın kaplama olmak üzere iki gruba ayrılır. İnce kaplamalar, 0,5 mm kadar olan kaplama kalınlığı olarak tabir ettiğimiz kaplamalar ise 6,5 mm kadar olan kaplamalardır. İnce termal bariyer kaplamalar gaz türbinlerinde, dizel ve benzin motorlarının piston ve sübaplarında kullanılır. Bunlar ZrO<sub>2</sub>, MgZrO<sub>3</sub> termal bariyer olarak yüzeyde kullanılan malzemelerdir. Bağlayıcı tabaka olarak ta Ni-Cr, Ni-Al, yada MCrAlY malzemeler

kullanılır. Bu çalışmada NiCrAl bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Isı yalıtımı amacı ile yapılan kaplamalarda, kaplama tekniği, kaplama kalınlığı ve kaplama malzemesi kaliteye etti eden en önemli faktörlerdir. Her şeyden önce temiz bir yüzey ve iyi bir bağ tabakası gereklidir. Genleşme katsayısı seramik tabaka ile çok farklı olan metal yüzeylere çok katlı kaplama tekniği uygulanabilir.

Malzemelerin bazı yüzeylerinde meydana gelen çentik, çizik, oyuk ezilme ve aşınma gibi kusurların, metalle kaplanarak onarılmasının yanı sıra, metal spreyn altında kalan ana metalin aşınmasını ve korozyona uğramasını engeller. Aşınma direnci gösteren kaplamalar genellikle statik makine parçalarında kullanılmalarına karşın, hareketli kısımlarda da yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Genelde yapısal amaçlı ileri teknoloji seramikleri olarak oksit seramikler grubunda  $Al_2O_3$ ,  $ZrO_2$  dikkat çekerken, oksit olmayan seramikler grubunda ise  $Si_3N_4$ , SiC, BC, BN,  $Ti_2B$ , gibi üstün özellikli malzemeler bulunmaktadır. Bu malzemeler hafiflikleri ve yüksekliklerinin yanı sıra, üstün ısı ve korozyon dayanımları iyi yüzey özellikleri ve bazı elektriksel özelliklerinden dolayı değişik endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır.

Seramik kaplamalar, sert ve gevrek olması nedeni ile ısı darbelere maruz kaldıklarında pullanmaya sebep olurlar. Ancak bu kaplamalar oksidasyona ve korozyona karşı mükemmel direnç gösterdiklerinden statik parçalar için oldukça uygundur. Seramik kaplamalar;  $ZrO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CeO_2$  gibi katkılı kompleks silikatlar olup  $1250\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıklara kadar dayanıklıdırlar. Ni-CrSi sanayi türbinlerinde kullanılmakta ve sıvı Sn-Al fazı Mo ve Nb alaşımlarına kaplanan, gözenekli silikat kaplamada çatlakları doldurmaktadır. Karbürler, Nitrürler veya borürler sert kaplamaların yapımında kullanılan bileşikler olup özellikle piston veya sübaplar üzerine TiN, TiC ve Ti(CN), demir alaşımları için  $TiB_2$ , kaplamaları başarı ile kullanılmaktadır [15].

Malzemenin özelliklerine göre değişik kullanım alanlarına sahip olan seramiklerin başlıca özelliklerini ise şöyle sıralaya biliriz.

1. Yüksek kullanım sıcaklıklarına dayanıklıdırlar
2. Isı iletkenlikleri ve özgül ısıları düşüktür

3. Kimyasal ve mekanik aşınmalara karşı oldukça dayanıklıdırlar
4. Yoğunlukları düşüktür
5. Termal şok dirençleri iyidir
6. Sürtünme kayıpları düşüktür
7. Çok iyi ısı yalıtımı sağlarlar
8. Elastiklik modülü düşüktür

Tablo 3.1.'de görüldüğü gibi en iyi kaplama malzemesi olarak Transformation Toughened Zirconia (TTZ) veya Partially Stabilized Zirconia (PSZ)'dir. Çeşitli kaplama teknikleri ile V, Ti, Zr, Hf, Nb ve Ta'nın nitrür ve karbonitrürlerini ihtiva eden sert kaplamalar ve çeşitli oksit esaslı seramik kaplamalar ile feldispat, boraks, kuvars, ihtiva eden kaplamalar metal üzerine uygulanabilir [15]. En yaygın ev kullanılması en kolay seramik kaplama işlemi, toz halindeki seramik plazma sprey yöntemiyle metal üzerine tutturulmasıdır.

Eriyebilen seramik malzemeler için, ark, alev veya detonasyon teknikleri kullanılarak kaplama olayı gerçekleştirilebilir. Fakat plazma püskürtme yönteminde sıcaklık pek önemli olmamasına rağmen çalışma atmosferi çok önemlidir. Seramik malzemeler diğer kaplama malzemelerinden daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun tek sebebi ise kolayca eriyebilmesidir. Zor eriyen malzemeler olarak bilinen borürler, karbürle ve nitrürlerin kaplamasında kullanılan metot Fiziksel Buhar Çöktürme veya Kimyasal Buhar çöktürme teknikleridir.

Tablo 3.1. Bazı Yüksek Teknoloji Seramiklerinin Özellikleri

Malzeme	Ergime Sic. (°C)	Yoğunluk (g/cm)	Mukavemet (MPa)	Elastiklik Modul (GPa)	Sertlik kg/mm <sup>2</sup>	Tokl K1c
ZrO <sub>2</sub>	2050	3,96	250-300	36-40	1300	4,5
ZrO <sub>2</sub>	2700	5,6	113-130	17-25	1200	6-9
SiC	3000	3,2	310	40-44	2800	3,4
Si <sub>3</sub> Ni <sub>4</sub>	1900	3,24	410	30,7	1300	5,0
WC	2700	15,7	350-550	57-70	2000	5-8

### 3.2. Yanma Odalarının Yalıtımında Kullanılan Bazı Seramik Malzemeler ve Özellikleri

Zirkon (Zirconia): Çok düşük termal değerlerine, iyi mukavemete, metallere benzer termal genleşme katsayılarına ve yüksek sıcaklıklarda metallere daha tok bir yapıya sahiptir. Ancak, bir dezavantajı sıcaklığı çok yüksek seviyelere çıktıkça faz değiştirme karakteristiğine sahip olmasıdır. Faz değişiklikleri moleküler seviyede gerçekleşip moleküler bağın ve yapının değişmesine de sebep olur. Kısmen stabilize olmuş zirkon (PSZ), bu faz değişikliği etkilerini azaltmak amacıyla geliştirilmiş ve motor parçaları için iyi bir alternatif malzeme olmuştur.

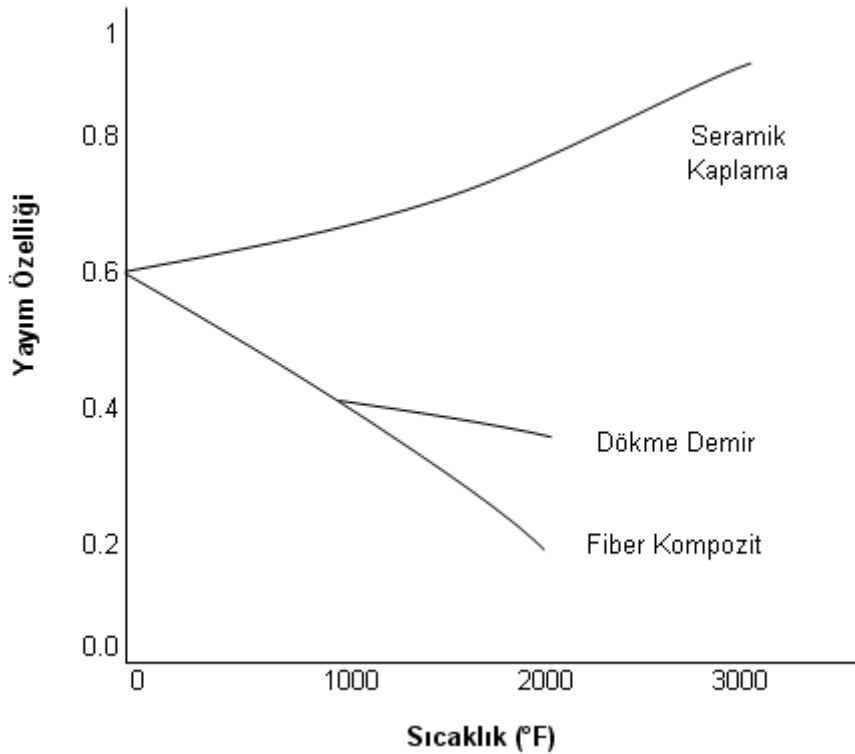
Kısmen stabilize olmuş zirkon'a magnezyum yada nikel eklenerek mukavemet ve sünenlilik karakteristikleri iyileştirilmiştir. Magnezyumlu kısmi stabilize zirkon, (MgPSZ), demir ve çeliğinkine yakın bir termal genleşme katsayısı ve elastisite modülüne sahip yanma odasında bulunan, supap kılavuzları ve yatakları, supaplar ve piston yüzeyleri için uygun bir malzemedir. MgPSZ'nin %20-24'ü magnezyumdan oluşmaktadır. Bu alaşım, şu ana dek geliştirilmiş tüm PSZ'ler içerisinde en yüksek kırılma tokluğuna sahip olanıdır.

Alüminyum Magnezyum Silikat (AMS): Düşük termal genleşme katsayısına ancak kötü mukavemete sahip bir malzemedir. Özellikle düşük termal genleşme katsayısı ve termal şoklara karşı yüksek direnci, bu malzemenin, kısa süreli sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan termal yüklerin mevzu bahis durumlar için uygulamasını sağlamaktadır. Metal yapısıyla birleşimindeki zorluk, genleşme katsayısındaki büyük farklılıklardan kaynaklanmaktadır.

Alüminyum Titrinat ( $Al_2O_3TiO_2$ ): Oldukça makul olan düşük termal iletkenliğe sahiptir. Ancak, düşük malzeme mukavemeti, destekleyici bir baz malzemesine gereksinim duyulmasına neden olmaktadır. Bu malzemedeki düşük özgül ağırlık, parça kütlelerinin önem kazandığı salınım yapan parçalar için aranan bir malzeme olmasını sağlamaktadır. Pistonlar ve egzoz sistemleri, alüminyum titrinat için uygun kullanım alanlarıdır.

Nikel PSZ: Diğer seramiklerden daha sünen bir malzeme üretmek amacı ile geliştirilmiş bir malzemedendir. Nikel PSZ sünen yapısı ile, yanma odasında oluşacak termal ve mekanik streslerin etkilerini azaltmak amacıyla içten yanmalı motorların yalıtımında kullanılabilir bir malzeme olabilir. Nikel, malzeme moleküllerinin birbiri üzerine kaymasına olanak tanınmasından dolayı moleküler seviyede bilyeli rulman görevi üstlenmektedir. Bu özellik, malzemenin ani kırılma olasılığını düşürmektedir.

Sialon seramik (Si-Al-O-N): Silikon, Alüminyum, Oksijen ve Azot sistemleri [17]. Bu malzemenin önemli avantajlarından birisi yüksek sıcaklıklardaki düşük deformasyon karakteristiğidir. Özelliklerini 1400 °C'ye kadar korur. Malzeme, aynı zamanda düşük özgül ağırlık ve düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Salınım yapan parçalar için uygun özelliklere sahiptir.



Şekil 3.3. Seramik Kaplamanın Yayım (ışınım) Kabiliyeti

Birçok seramik malzeme, sahip oldukları yayım (ışınım) kabiliyeti ile yanma esnasındaki ısının büyük kısmını yansıtmak suretiyle ısı transferi etkilerini



azaltmaktadır. Şekil 3.3. seramik malzemelerin yayım kabiliyetleri göstermektedir. Bazı araştırmacılar tarafından yayım kabiliyetlerinin ısı transferi karakteristiklerinden daha önemli olduğu düşünülmektedir. Seramik malzemelerde ısının yüzeyden geri yansıtılması, yüzey sıcaklığı tehlikesi seviyeye ulaşmadan gerçekleşmektedir. Seramik malzemelere karbon karası ilavesi, mukavemetten biraz feragat etmek koşuluyla yayım kabiliyetlerini daha da arttırabilir. Bu malzemeler aynı zamanda korozyona dirençli, dayanıklı, zehirsiz ve alev almaz özelliklerde malzemelerdir [16].

Düşük ağırlıktaki seramik malzemelerin hareketli parçalarda kullanılması, bu parçalardaki harekete tepki süresini de iyileştirmektedir. Düşük termal iletkenlik, seramik yüzeyden ana malzemeye daha az ısı dağılması anlamına gelmektedir. Seramik ve dolayısıyla yanma odası yüzeyi, yanma odasının istenen çalışma koşullarına, benzer metal yüzeylere oranla daha hızlı ulaşacaktır [16].

Yanma odasının yalıtılmasında kullanılan seramik kaplama malzemesi ile kaplanan parçalar arasındaki bağlanma genellikle zayıftır ve pek çok değişkene bağlıdır. Kaplamalarda en çok rastlanılan bağlanma hatalarıdır. Bu sorunun çözümünde yönelik olarak pek çok ara kaplama malzemesi geliştirilmekte ve kullanılmaktadır. Ara kaplama, kaplanacak malzemeye an kaplamadan önce uygulanan ince bir kaplama tabakasıdır. Buradaki amaç daha iyi dayanım ve kaplamanın kaplanacak malzemeye daha güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlamaktır.

Ara kaplama uygulamasının diğer bir nedeni de, kaplama sisteminin kimyasal özelliklerini geliştirmektedir. Paslanmaz çelik gibi malzemeler, yüzey kabalaştırma esnasında ve işleme esnasında korozyona dirençli koruma tabakalarını kaydedebilirler. Bu tür malzemeler üzerine direkt olarak oksitli bir seramik kaplamanın uygulanması, kaplama boyunca ana malzemeyi paslandırabilir. Nikel krom gibi bir ara kaplamanın uygulanması bu ara durumu önler. Yüksek sıcaklık reaksiyonu direncini arttırmak için Nikel-Krom-Alüminyum kompozit tozu geliştirilmiştir [18].

Y.Miyairi tarafından yapılan ve dizel motor yanma odasının farklı özellikler ve kalınlıkta seramik malzemeler ile yalıtılmasının motor performansına etkilerinin incelendiği çalışmada yalıtım ile sağlanan adyabatiklik;  $(QB-QY)/QB$  olarak ifade edilmiştir.

Burada:

QB: Baz motorda oluşan ısı kayıpları,

QY: Yalıtılmış motorda oluşan ısı kayıplarıdır.

Bu çalışma sonunda piston üstü yüzeyinin, silindir içi yüzeyinin ve silindir kapağının 1mm kalınlığında  $ZrO_2$  ile kaplanması durumunda %30 adyabatiklikte morto termal veriminin %2,7 oranında artacağı belirtilmiştir.

I.TIKIZ tarafından yapılan çalışmada; bir dizel motorunun egzoz supabı, silindir gömleği ve pistonunun kaplamasız ve kaplamalı modelleri bilgisayar ortamında oluşturulmuş, daha sonra sonlu elemanlar modeli oluşturulup sınır şartları tanımlanarak termal analizleri yapılmıştır. İlk olarak kaplamasız pistonun daha sonra piston üst yüzeyinin 150  $\mu m$  kalınlığında NiCrAl ve 350  $\mu m$  kalınlığında MgZiO<sub>3</sub> ile kaplandığı pistonun analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma sonucunda kaplamasız pistonun yüzeyindeki en yüksek sıcaklık değerinin 383 °C olduğu görülmüş, tek tabaka seramik kaplama uygun olan pistonun kaplama yüzeyindeki sıcaklık değerinin %11,2 arttığı ve 426 °C olduğu bulunmuştur. Aynı çalışmada kaplama kalınlığın değiştirilerek piston üst yüzeyinin 150  $\mu m$  kalınlığında NiCrAl ve 600  $\mu m$  kalınlığında MgZiO<sub>3</sub> ile kaplandığı pistonun analizleri sonucunda pistonun üst yüzeyindeki sıcaklık değerinin %14.6 artarak 436 °C ulaştığı görülmüştür. Çalışmada değişik kaplama kalınlıkları kullanılarak gerçekleştirilen analizler sonucunda, sıcaklık ve ısı akı değerlerinin belirli bir kaplama kalınlığı değerinden sonra azalmayıp, artmaya geçtiği, yani kaplama kalınlığını belli bir değerden sonra daha fazla artırılmasının herhangi bir olumlu etkisinin olmadığı ifade edilmiştir [18].

## **BÖLÜM 4. SONLU ELEMANLAR METODU**

### **4.1. Giriş**

Sonlu elemanlar metodunun temelindeki fikir, karmaşık problemlerin eşdeğer veya daha basit bir problem konularak çözüme gidilmesidir. Gerçek problemin yerine başka bir problem yerleştirildiği için alınacak sonuçlar emniyetli kabul edilen değerlerin içerisinde kalan sonuçlardır. Mevcut matematiksel yöntemler ve bilgisayar problemleri yardımıyla sonlu elemanlar metodu ile hemen her problemde tatmin edici yaklaşımlarla sonuçlar elde etmek mümkündür.

Sonlu elemanlar metodunda, çözüm bölgesinin çok sayıda küçük ve birbirine bağlı alt bölgelerden oluştuğu kabul edilir. Bu alt bölgelere sonlu eleman ismi verilmektedir. Çözüm aşamasında tüm bu küçük sonlu elemanlar için yaklaşık sonuçlar bulunur, sınır koşulları ve denklemleri kullanılarak tüm yapı için sonuca gidilir.

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte sonlu elemanlar metodunun yayılması da büyük hız kazanmıştır. İlk olarak Przemieniecki'nin kitabında sonlu elemanlar metodunun gerilme analiz problemlerine uygulanması gösterilmiştir. Zienkiewicz ve Cheung ise bu yöntemin geniş olarak uygulanmasını göstermiş ve tüm alan problemlerine uygulanabilirliğini ortaya koymuştur.

### **4.2. Katı Modelleme**

Katı modelleme teknikleri tamamıyla bilgilendirme üzerine kurulmuştur. Nesnelerin tereddütsüz şekilde gösterilmesini sağlar. Basitçe nesnelerin üzerinde, içinde ve dışında olan bir noktanın konumunun verilebilmesi olarak düşünülebilir. Eğer modelleme tekniği ile tam olarak tanımlama, geçerlilik ve tereddütsüzlük sağlanamaz

ise kullanıcı devreye girerek model üzerinde unsur azaltması yapar ve tekrardan model yapılandırılmasını gerçekleştirir.

Bu çalışmadaki modellerin oluşturulması; koordinatları belirlenen noktaların atanması, noktalardan çizgilerin oluşturulması ve çizgilerle yüzeylerin elde edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Yüzeyler bir eksen etrafında döndürülmüş ve bir doğru üzerinde süpürülerek katı hacimler oluşturulmuştur. Katı hacimlerden farklı hacimler çıkarılarak modelin son şekli elde edilmiştir.

### **4.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Avantajları ve Sınırları.**

Sonlu farklar yöntemi, ağırlıklı artıklar yöntemleri gibi sayısal yöntemlerin çoğu, bilgisayar çağı başlamadan önce gelişmiştir ve sonradan bilgisayara uyarlanmıştır. Bunun aksine sonlu elemanlar metodu bilgisayar çağının bir ürünüdür. Bu nedenle sonlu elemanlar metodu'nun diğer sayısal yöntemlere göre yüksek hızlı bilgisayarlara daha uygun gelen özellikleri vardır. Bu özelliklerin başlıcaları aşağıda belirtilmiştir.

1. Bu yöntem ile karmaşık geometriye sahip şekiller kolayca incelenebilmektedir. Çözüm bölgesinin alt bölgelere ayrılması ve değişik sonlu elemanların birlikte kullanılabilmesi mümkündür. Bazı bölgelerde hassasiyeti özellikle artırarak hesaplama yapabilmektedir. Bu yönleriyle sonlu elemanlar yöntemi, mühendislik problemlerinde diğer sayısal yöntemlerden daha esnek ve kullanışlıdır.
2. Sonlu elemanlar metodu, değişik ve karmaşık malzeme özellikleri olan sistemlere kolaylıkla uygulanabilir. Noktadan noktaya değişen, anizotropik, non-lineer, histerezis, zamana bağlı, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri dikkate alınabilir.
3. Sonlu elemanlar metodu'nda sürekli, süreksiz veya değişken yükler kolaylıkla ele alınabilir.
4. Sistemin temel denklemleri kurulduktan sonra sınır şartları basitçe denklemler dahil edile bilmektedir. Bu, sonlu elemanlar metodu'nun en önemli özelliklerinden biridir çünkü sınır şartları ile değişken fonksiyonlarını değiştirme gereği ortadan kalkmaktadır.

5. Sonlu elemanlar metodu, matematik alt yapı bakımından genelleştirilebilir ve çok sayıda farklı türde problemin çözümünde kullanılabilir.

Sonlu elemanlar metodunun yukarıdaki avantajlarının yanı sıra sınırlarının olduğu da bilinmelidir.

1. Bu günkü hali ile yöntemin bazı karmaşık olaylara uygulanmasında, diğerlerine göre daha büyük zorluklarla karşılaşmakta ve her zaman istenen sonuçlar alınmaya bilmektedir. Örneğin çatlama kırılma davranışı, temas problemler, yumuşayan non-lineer malzeme davranışı gibi.
2. Genellikle büyük bilgisayar hafızasına ve uzun hesaplama zamanına ihtiyaç duyulmaktadır.
3. Ancak malzeme parametreleri ve katsayıları son derece doğru tanımlanmışsa ve sürekli ortamın sonlu elemanlara bölümü doğru biçimde yapılmışsa gerçeğe yakın sonuçlar alınabilmektedir. Buralarda yapılacak hatalar, sonucun gerçekten çok büyük miktarlarda sapmasına sebep olmaktadır.
4. Diğer yaklaşık sayısal yöntemlerde de olduğu gibi sonlu elemanlar metodu'ndan alınan sonuçlar dikkatlice değerlendirilmelidir. Formülasyonda kullanılan varsayımlar ve yaklaşıklıklar sonuçların değerlendirilmesinde dikkate alınmalıdır. Gerektiğinde sonuçlar deneylerle kontrol edilmelidir.

#### **4.4. Sonlu Elemanlar Metodunun Uygulanması**

Sonlu elemanlar metodunun elastik ve sürekli ortamlara uygulanmasında aşağıdaki adımlar uygulanır [19].

##### **4.4.1. Yapının parçalara ayrılması**

Sonlu elemanlar metodunda ilk adım yapının veya çözüm bölgesinin alt bölgelere veya elemanlara ayrılmasıdır. Yapının kaç adet, hangi türde ve hangi boyutlarda elemanlara ayrılacağına kadar verilmelidir.

#### 4.4.2. Uygun bir interpoasyon veya yer değişimi modelinin seçimi.

Karmaşık bir yapının herhangi belli bir termal gerilme değeri altında yer değişim cözümü tamamen doğru tayin edilemeyeceği için elaman içinde uygun bir cözümün bilinmeyen cözüme yakın olduğu kabul edilmektedir. Kabul edilen cözüm hesap açısından basit olmalı, belli uyumluluk ve sınır şartlarını sağlamlıdır. Genel olarak, cözüm veya interpolasyon modeli bir polinom olarak alınmaktadır.

#### 4.4.3. Element katılık matrislerinin ve yük vektörlerinin elde edilmesi

Kabul edilen yer değişim modelinden, katılık matrisi  $[K]$  ve yük vektörü  $[P]$ , denge koşulları veya uygun bir varyasyon yöntem kullanılarak elde edilir.

#### 4.4.4. Element denklemlerinin birleştirilmesiyle toplam denge denklemlerinin elde edilmesi

Yapı çok sayıda sonlu elemandan oluştuğu için, tek tek eleman katılık matrisleri ve yük vektörleri uygun bir biçimde birleştirilir ve toplam denge denklemleri,

$[K]$  = ile ifade edilir.

Burada,  $[K]$  birleştirilmiş katılım matrisi, nodal yer değişimleri vektörü, ise tüm yapı için nodal kuvvetler vektörüdür.

#### 4.4.5. Bilinmeyen nodal yer değişimler için cözüm

Sınır değerler hesaba katılarak toplam denge denklemleri değiştirilmelidir. Sınır durumların da hesaba katılmasıyla genel denklem,

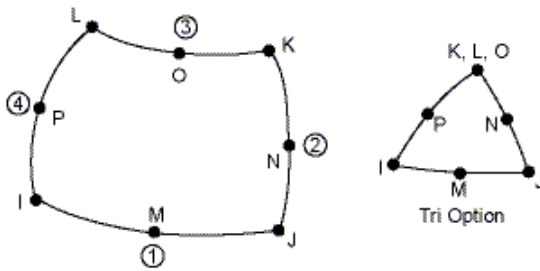
$[K]$  = haline gelmektedir.

Lineer problemlerde, vektörü kolayca çözülebilir. Ancak non-lineer denklemlerde, çözüme ancak her aşamada katılık matrisi  $[K]$  ve/veya yük vektörü 'nin değiştirilmesi ile gidilebilir.

Bilinen nodal yer değişimlerden, ilgili matrislerin çözülmesi ile gerilimler ve şekil değişikliği elde edilir. Yöntemin değişik disiplinlerde uygulanması ile yukarıdaki adımlarda ufak değişiklikler görülse de tüm sonlu elemanlar hesapları genel olarak bu sırayı takip etmektedir.

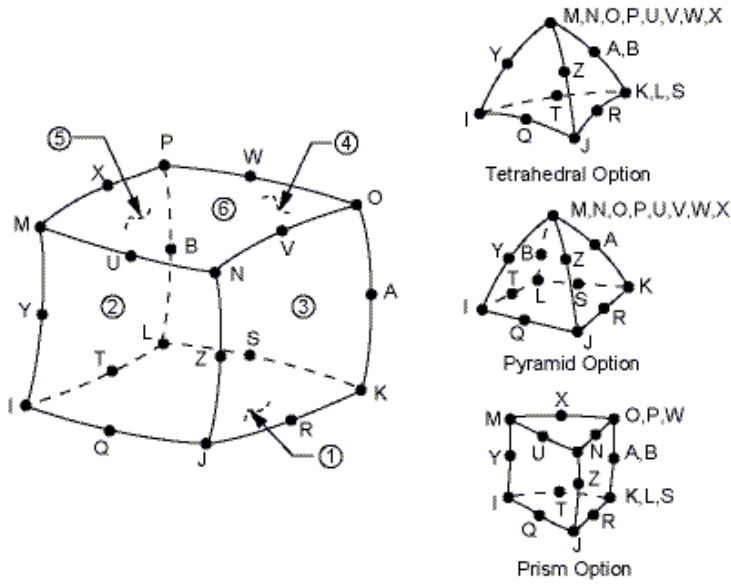
#### 4.4.6. Elementlerin belirlenmesi

Doğru sonucun elde edilmesi için ortamın iyi bir biçimde sonlu elamana bölünmesi gerekir. Buda problemi çözen kişinin tecrübesine bağlıdır. Öncelikle, sürekli ortamın boyutuna, yapının veya cismin geometrisine uygun olarak sonlu elemanın şekli seçilmelidir. Çözümleme yapılacak olan geometrinin sonlu elemanlar yönteminin uygulanacağı için bir, iki ve üç boyutlu olabilir. Teorik olarak sistem sonsuz sayıda ve sonsuz küçüklükte sonlu elamana bölündüğünde gerçek sonuca ulaşılır. Gerçekte bu mümkün olmadığı için amaç belirli bir sayıda eleman kabul edilir ve hata payına sahip bir sonuç için çözüm yapılır. Gereğinden daha fazla eleman kullanmak daha büyük bilgisayar gücü gerektirecek ve hesap zamanı uzayacaktır. Sonlu eleman metodunun güvenilir bir sonuç vermesi için belirli bir eleman sayısının kullanılması gerekmektedir. Ancak, bir aşamadan sonra eleman sayısındaki artış çok büyük gerilme değişimlerine sebep olmaz. Bu çalışmada kullanılan dizel motor pistonun mesh yapısında Plane 223 nolu iki boyutlu düzlem elenti kullanılmıştır (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. Düzlem Elementi Plane 223

Çalışma da kullanılan ikinci pistonun mesh yapısının oluşturulmasında couple field , Brick 20 Node 226 numaralı üç boyutlu element kullanılmıştır (Şekil 4.2.).



Şekil 4.2. Hacim Elementi, Brick 20 Node 226

Sonlu elaman metodunda termal gerilme analizi yapılacak olan parça kartezyen koordinatlarda modellenmiş ve hesaplatılmıştır.

Sonlu elamanlar metodu sırasıyla model oluşturma ve özellikle çözüm aşamasında bilgisayarda yapıldığı için, bu yöntemin etkili ve güvenilir sonuçlar vermesi bilgisayar kapasitesine bağlıdır. Bu çalışmada kapasitesi artırılmış bir bilgisayarın kullanılmıştır.

Tablo 4.1. Hesaplamada Kullanılan Bilgisayarın Teknik Özellikleri

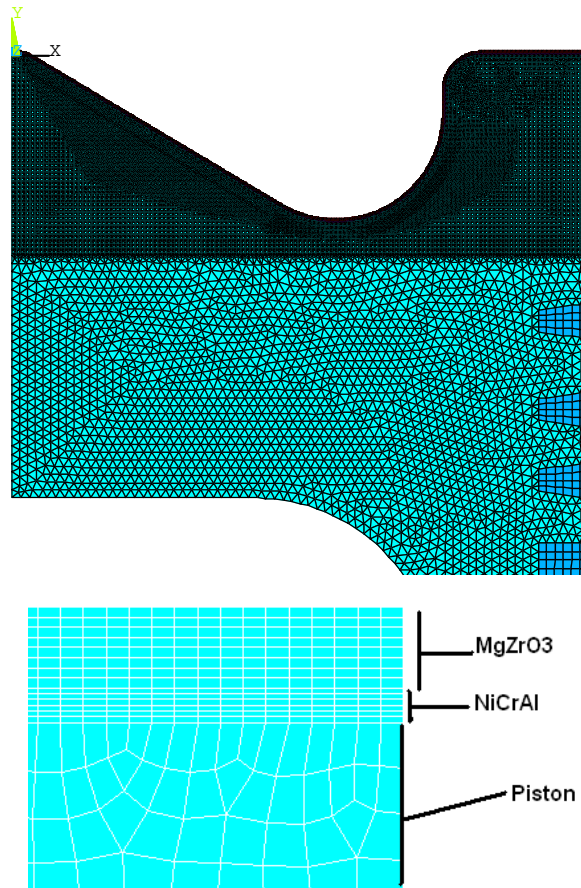
Bilgisayar	Özellikleri
İşlemci	HP, Hewlett-Packard HPxw 4600 Workstation CPU 2.66 GHz
Ram	7.98 GB
Harddisk	230 GB
Ekran kartı	Quadro FX 1700 (HP L2245w)
İşletim Sistemi	Microsoft Windows XP 2003



Çözüm bölgesi tamamen düzgün bir ağ ile bölünmeli veya gerilmelerin daha hızlı değişmesi beklenen bölgelerde daha küçük sonlu elemanlar ile yaklaşım gösterilmelidir. Eğri kenarlı eş parametrelili sonlu elemanlar ile çözüm bölgeleri daha net tanımlanmalıdır. Termal bariyer kaplı pistonun kaplama tabakaları mapped mesh, ana piston free mesh yöntemi ile elementlere bölünmüştür (Şekil 4.3., Şekil 4.4. ).

Tablo 4.2. Tek Katmanlı Dizel Motor Pistonu Element Bilgileri

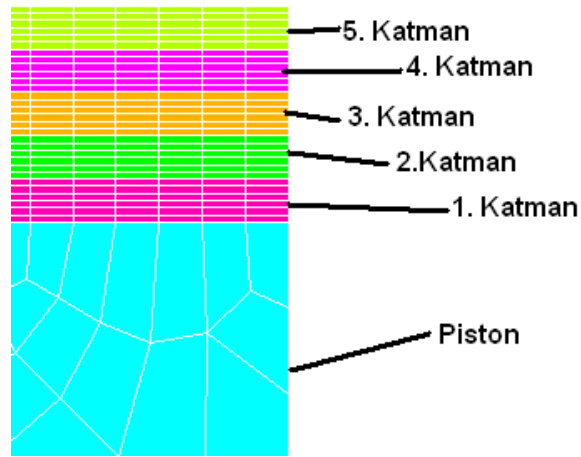
Ana malzeme / Termal Tabaka No:	Mesh Yöntemi.	Element sayısı	Element Tipi
Ana Malzeme	Serbest (Free Mesh)	33000	Plane 223
Ara bağ tabakası NiCrAl	Düzenli (Mapped Mesh)	4980	Plane 223
Termal Bariyer MgZrO <sub>3</sub>	Düzenli (Mapped Mesh)	6640	Plane 223



Şekil 4.3. Tek Katmanlı Dizel Motor Pistonu Mesh Yapısı

Tablo 4.3. Beş Katmanlı Dizel Motor Pistonu Element Bilgileri

Ana malzeme / Termal Tabaka No:	Mesh Yöntemi.	Element sayısı	Element Tipi
Ana Malzeme	Serbest (Free Mesh)	28086	Plane 223
NiCrAl	Düzenli (Mapped Mesh)	4950	Plane 223
%75NiCrAl+%25 MgZrO <sub>3</sub>	Düzenli (Mapped Mesh)	4950	Plane 223
%50NiCrAl+%50 MgZrO <sub>3</sub>	Düzenli (Mapped Mesh)	4950	Plane 223
%25NiCrAl+%75 MgZrO <sub>3</sub>	Düzenli (Mapped Mesh)	4950	Plane 223
MgZrO <sub>3</sub>	Düzenli (Mapped Mesh)	4950	Plane 223



Şekil 4.4. Beş Katmanlı Dizel Motor Pistonu Mesh Yapısı

Tablo 4.4. Tek Katmanlı Benzinli Motor Pistonu Element Bilgileri

Ana malzeme / Termal Tabaka No:	Mesh Yöntemi.	Element sayısı	Element Tipi
Ana Malzeme	Serbest (Free Mesh)	53121	Brick 20 Node 226
Ara bağ tabakası NiCrAl	Düzenli (Mapped Mesh)	1500	Brick 20 Node 226
Termal Bariyer MgZrO <sub>3</sub>	Düzenli (Mapped Mesh)	2100	Brick 20 Node 226

Tablo 4.5. Beş Katmanlı Benzinli Motor Pistonu Element Bilgileri

Ana malzeme / Termal Tabaka No:	Mesh Yöntemi.	Element sayısı	Element Tipi
Ana Malzeme	Serbest (Free Mesh)	53121	Brick 20 Node 226
NiCrAl	Düzenli (Mapped Mesh)	1500	Brick 20 Node 226
%75NiCrAl+%25 MgZrO3	Düzenli (Mapped Mesh)	1500	Brick 20 Node 226
%50NiCrAl+%50 MgZrO3	Düzenli (Mapped Mesh)	1500	Brick 20 Node 226
%25NiCrAl+%75 MgZrO3	Düzenli (Mapped Mesh)	1500	Brick 20 Node 226
MgZrO3	Düzenli (Mapped Mesh)	1500	Brick 20 Node 226

#### 4.5. Dizel ve Benzinli Motor Pistonunun 3 Boyutlu Modellenmesi

Termal gerilme problemi statik bir problem olarak kabul edilmiş olup, atalet etkileri göz ardı edilmiştir. Bu durum sıcaklığın zamanla değişiminin çok ani olmadığı problemler için doğru bir varsayımdır. Bu çalışmada yer alan piston ve termal kaplam içinde bu problem doğru bir yöntemdir. Tabakanın düzlem gerinim altında olduğu farz edilmiştir. Homojen olmayan kademeli termal kaplama malzemeleri içeren gerilme problemlerini basitleştirmek için genelde her eleman içinde malzemenin termomekanik özellikleri sabit kabul edilmiştir. Bu yöntemle geometrideki değişiklikler ve adım adım oranlanan malzemenin özelliklerinde doğru çözümler elde edebilmek için çok küçük elemanlar kullanılmıştır.

Sonlu elemanlar programı içerisinde kullanılan MVM 518 TBRHS V16 dizel makinesine ait piston ve benzinli pistonunun şekil ve boyutları Şekil 4.5., 4.6., 4.7., 4.8.'de verilmiştir.

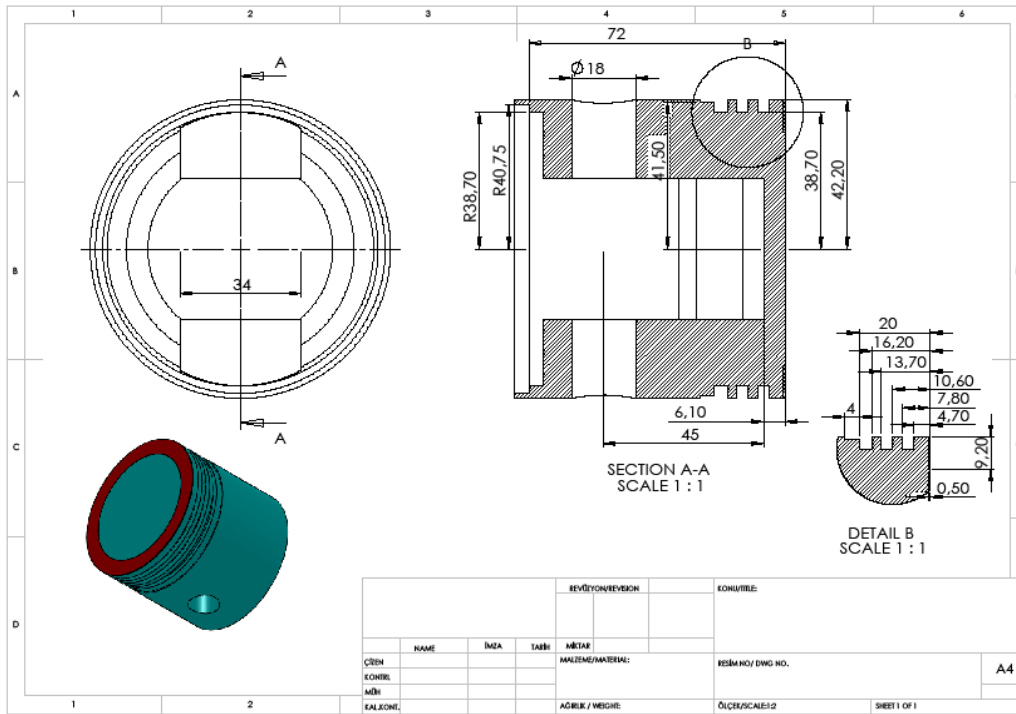


Şekil 4.5. MVM 518 TBRHS V 16 Dizel motor pistonu



Şekil 4.6. Benzinli Motor Pistonu.





Şekil 4.8. Benzinli Motor Piston ölçüleri

#### 4.6. Kullanılan Analiz Programı

##### ANSYS

Bu çalışmada ANSYS programı kullanılmıştır. Bu program her tipte lineer ve nonlinear gerilme analizlerini, dinamik analiz ve titreşim analizlerini yapabilmekte, ayrıca ısı problemlerinin de çözümüne izin vermektedir. Program geniş bir element kütüphanesine sahiptir. Bu kütüphanede 281 çeşitli element tipi mevcuttur.

#### 4.7. Pistonu ve Termal Bariyeri Oluşturan Elemanların Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada içten yanmalı benzinli ve dizel motor pistonları kullanılmış olup, piston üzerine uygulama yapılan iki tip kaplama değerlendirmeye alınmıştır.

1. Tek katmanlı termal bariyer kaplama
  - a. Benzinli Piston
    - i. Al esaslı
  - b. Dizel Piston
    - i. Fe esaslı
    - ii. Al esaslı
2. Beş katmanlı termal bariyer kaplama
  - a. Benzinli Piston
    - i. Al esaslı
  - b. Dizel Piston
    - i. Fe esaslı
    - ii. Al esaslı

Benzinli motor pistonlarında alüminyum (Al) esaslı ana malzeme ve dizel motor pistonlarında demir (Fe) ile alüminyum (Al) esaslı ana malzemeler üzerinde çalışma yapılmıştır. Referans alınan dizel ve benzinli pistonda farklı kaplama kalınlığına ve genişliğine sahip modeller türetilmiş ve çalışma zenginleştirilmiştir. Tablo 4.6., 4.7., 4.8.'da bulunan termal bariyer kaplamalarının kalınlık ve genişliğe bağlı değişen etkilerinin piston üzerindeki meydana getirdiği termal ve gerilme değerleri grafiksel olarak elde edilmiştir.

Tablo 4.6. Dizel Motor Pistonda Termal Bariyer Kaplama Kalınlığı

SN	Ara Bağ Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Üst Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Toplam Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
1	150	350	500
2	100	100x4	500

Tablo 4.7. Benzinli Pistonda Termal Bariyer Kaplama Kalınlığı

SN	Ara Bağ Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Üst Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Toplam Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )
1	150	150	300
2	150	250	400
3	150	350	500
4	150	450	600
5	150	550	700

Tablo 4.8. Benzinli Pistonda Termal Bariyer Kaplama Genişliği

SN	Ara Bağ Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Üst Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Kaplama Kalınlığı ( $\mu\text{m}$ )	Kaplama Genişliği (mm)
1	150	350	500	5,2
2	150	350	500	7,2
3	150	350	500	9,2
4	150	350	500	11,2
5	150	350	500	13,2

Çalışma yapılan piston ve termal bariyer tabakanın malzemelerini içeren teknik özellikler analiz yapılan model tiplerine göre aşağıdaki tablolarda sıra ile verilmiştir. Kaplamanın en altında piston malzemesinin özellikleri, ara bağ tabakası Nikel esaslı seramik ve en üstünde ise Zirkonya seramiği kullanılarak iki sınır arasında lineer interpolasyon (%0, %25, %50, %75, %100) yapılmış ara katman için metal/seramik karışımı olan malzeme özellikleri hesaplanmıştır. Üst katman ve çoklu katmanların



derecelendirilmiş malzeme özelliklerini hesaplamak için aşağıda verilen lineer interpolasyon formülleri kullanılmıştır.

$$E = V_1 E_1 + V_2 E_2 \quad (4.1)$$

Bu denklemlerde E Elastiklik Modülünü ve V hacmi ifade etmektedir.

Tablo 4.9. Benzinli Piston ve Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri

Malzeme ve Termal Bariyer	Elastiklik Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Isı İletim Katsayısı (W/mmK)	Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)
Piston (Al)	$90 \times 10^3$	0.33	$155 \times 10^{-3}$	$21 \times 10^{-6}$
NiCrAl	$90 \times 10^3$	0.27	$16.1 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-6}$
MgZrO <sub>3</sub>	$46 \times 10^3$	0.2	$0.8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-6}$

Tablo 4.10. Benzinli Piston ve Beş Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri

Malzeme ve Termal Bariyer	Elastiklik Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Isı İletim Katsayısı (W/mmK)	Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)
Piston (Al)	$90 \times 10^3$	0.33	$155 \times 10^{-3}$	$21 \times 10^{-6}$
NiCrAl	$90 \times 10^3$	0.27	$16.1 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-6}$
%75NiCrAl+%25 MgZrO <sub>3</sub>	$79 \times 10^3$	0.26	$12.2 \times 10^{-3}$	$11 \times 10^{-6}$
%50NiCrAl+%50 MgZrO <sub>3</sub>	$68.5 \times 10^3$	0.24	$32 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-6}$
%25NiCrAl+%75 MgZrO <sub>3</sub>	$56.5 \times 10^3$	0.22	$4.6 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-6}$
MgZrO <sub>3</sub>	$46 \times 10^3$	0.20	$0.8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-6}$

Tablo 4.11. Demir Esaslı Dizel Piston ve Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri

Malzeme ve Termal Bariyer	Elastiklik Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Isı İletim Katsayısı (W/mmK)	Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)
Piston (Fe)	$200 \times 10^3$	0.3	$79 \times 10^{-3}$	$12.2 \times 10^{-6}$
NiCrAl	$90 \times 10^3$	0.27	$16.1 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-6}$
MgZrO <sub>3</sub>	$46 \times 10^3$	0.2	$0.8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-6}$

Tablo 4.12. Alüminyum Esaslı Dizel Piston ve Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri

Malzeme ve Termal Bariyer	Elastiklik Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Isı İletim Katsayısı (W/mmK)	Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)
Piston (Al)	$90 \times 10^3$	0.33	$155 \times 10^{-3}$	$21 \times 10^{-6}$
NiCrAl	$90 \times 10^3$	0.27	$16.1 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-6}$
MgZrO <sub>3</sub>	$46 \times 10^3$	0.2	$0.8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-6}$

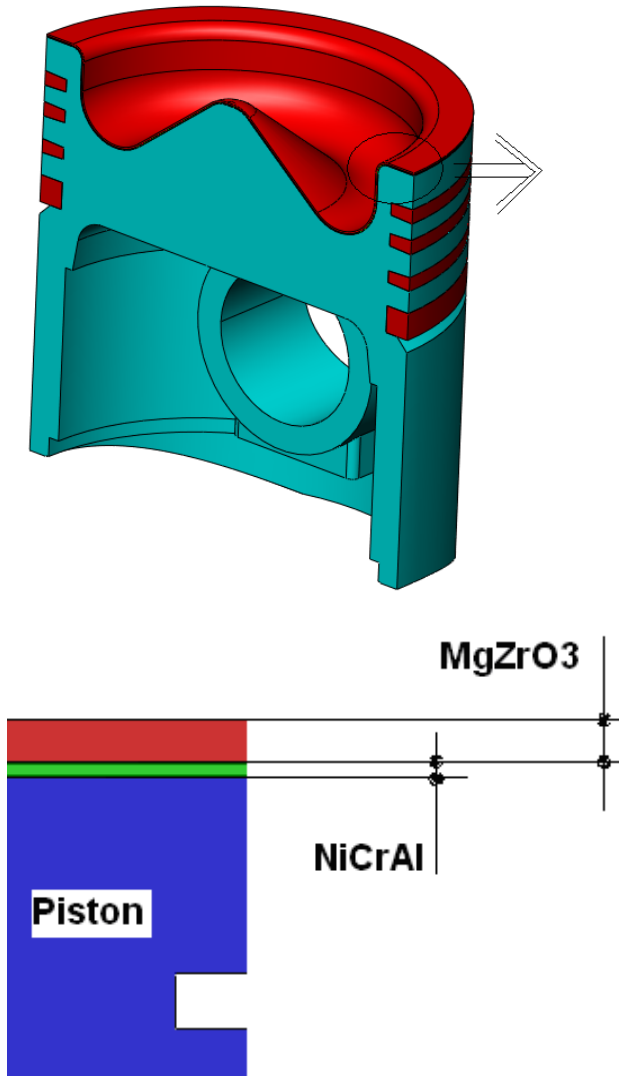
Tablo 4.13. Demir esaslı Dizel Piston ve Beş Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri

Malzeme ve Termal Bariyer	Elastiklik Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Isı İletim Katsayısı (W/mmK)	Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)
Piston (Fe)	$200 \times 10^3$	0.3	$79 \times 10^{-3}$	$12.2 \times 10^{-6}$
NiCrAl	$90 \times 10^3$	0.27	$16.1 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-6}$
%75NiCrAl+%25 MgZrO <sub>3</sub>	$79 \times 10^3$	0.26	$12.2 \times 10^{-3}$	$11 \times 10^{-6}$
%50NiCrAl+%50 MgZrO <sub>3</sub>	$68.5 \times 10^3$	0.24	$32 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-6}$
%25NiCrAl+%75 MgZrO <sub>3</sub>	$56.5 \times 10^3$	0.22	$4.6 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-6}$
MgZrO <sub>3</sub>	$46 \times 10^3$	0.20	$0.8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-6}$

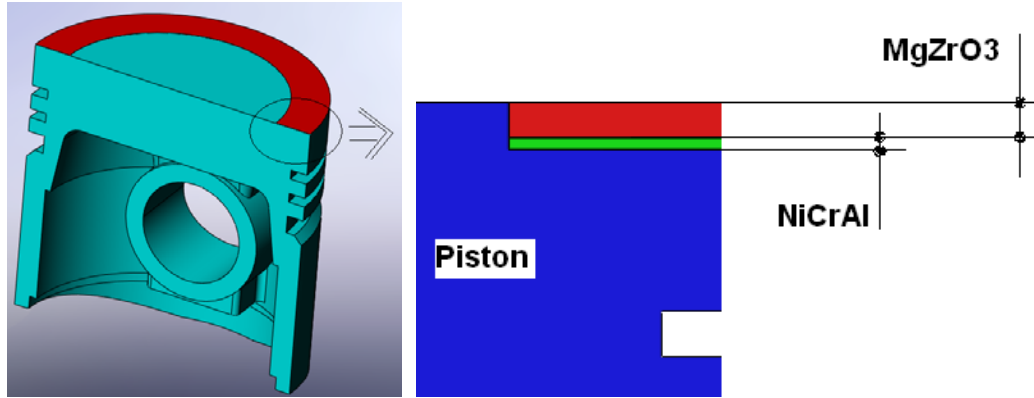
Tablo 4.14. Alüminyum esaslı Dizel Piston ve Beş Katmanlı Termal Bariyer Kaplama Malzemesinin Teknik Özellikleri

Malzeme ve Termal Bariyer	Elastiklik Modülü (MPa)	Poisson Oranı	Isı İletim Katsayısı (W/mmK)	Isıl Genleşme Katsayısı (1/°C)
Piston (Al)	$90 \times 10^3$	0.33	$155 \times 10^{-3}$	$21 \times 10^{-6}$
NiCrAl	$90 \times 10^3$	0.27	$16.1 \times 10^{-3}$	$12 \times 10^{-6}$
%75NiCrAl+%25 MgZrO <sub>3</sub>	$79 \times 10^3$	0.26	$12.2 \times 10^{-3}$	$11 \times 10^{-6}$
%50NiCrAl+%50 MgZrO <sub>3</sub>	$68.5 \times 10^3$	0.24	$32 \times 10^{-3}$	$10 \times 10^{-6}$
%25NiCrAl+%75 MgZrO <sub>3</sub>	$56.5 \times 10^3$	0.22	$4.6 \times 10^{-3}$	$9 \times 10^{-6}$
MgZrO <sub>3</sub>	$46 \times 10^3$	0.20	$0.8 \times 10^{-3}$	$8 \times 10^{-6}$

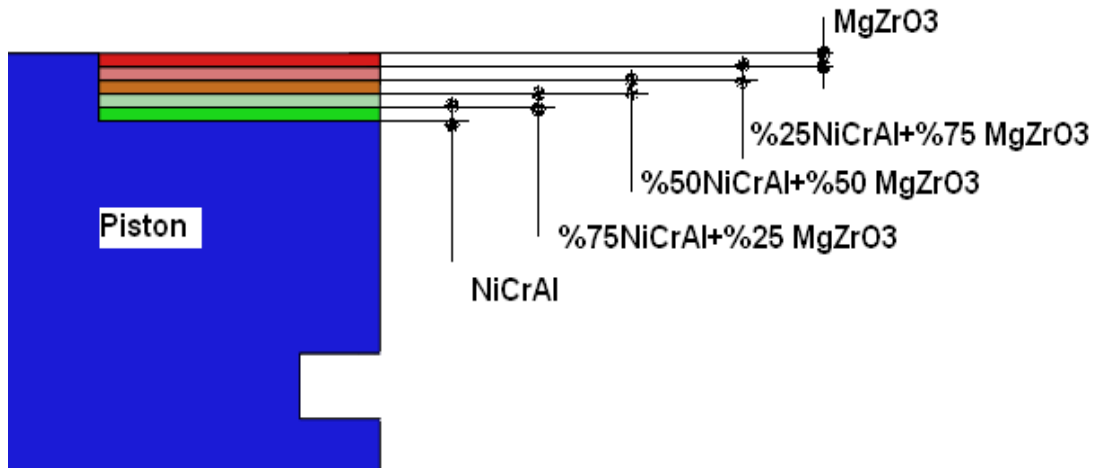
#### 4.8. Piston ve Termal Bariyeri Oluşturan Tabaka Modeli



Şekil 4.9. Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplı Dizel Piston

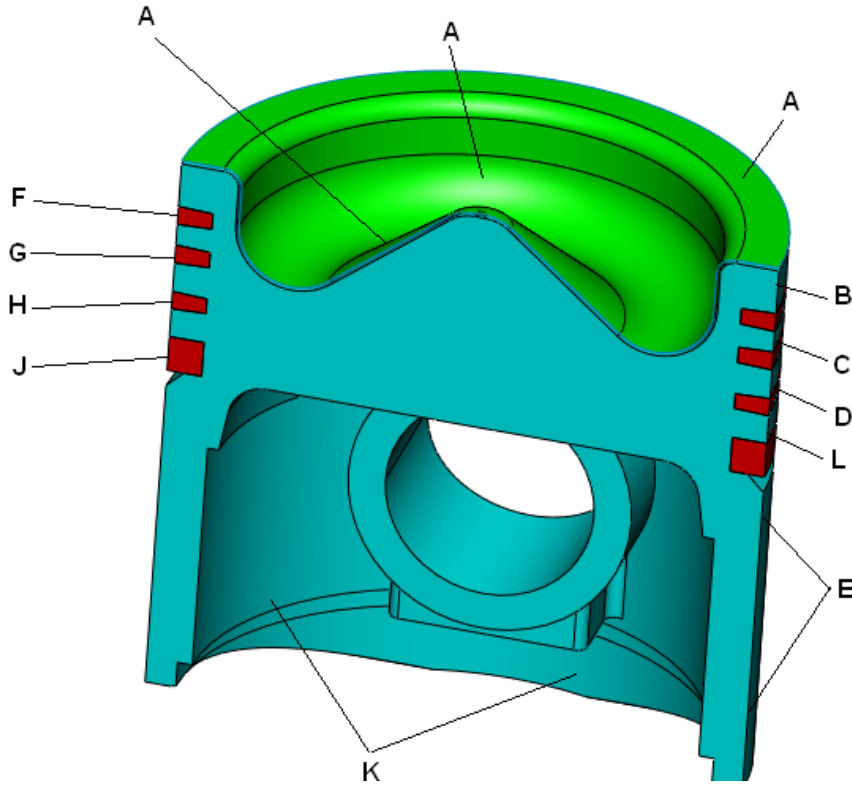


Şekil 4.10. Tek Katmanlı Termal Bariyer Kaplı Benzinli Piston



Şekil 4.11. Beş Katmanlı Termal Bariyer Kaplı Piston

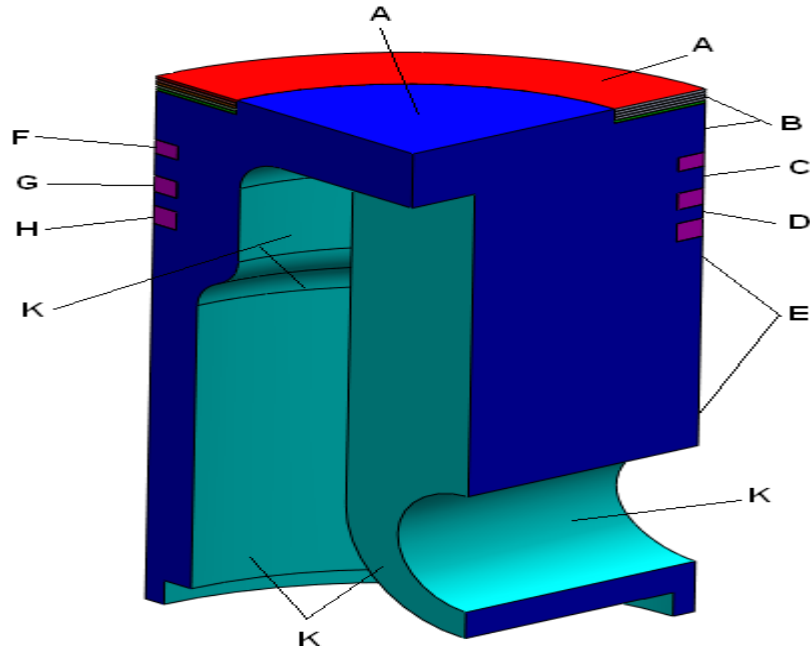
#### 4.9. Dizel Motor Pistonu İçin Sınır Şartların Belirlenmesi



Tablo 4.15. Dizel motor pistonu için sınır şartları

Sınır Şart Yerleri		Sıcaklık (°C)	Isı Transferi (W/m <sup>2</sup> K)
Piston Üst Yüzeyi	A	600	600
Ateş segman üst yüzeyi	B	500	350
2. Segman üst yüzeyi	C	180	300
3. Segman üst yüzeyi	D	170	400
Yağ segman üst yüzeyi	L	160	400
Etek	E	110	400
1. Kompresyon Segman	F	200	
2. Kompresyon Segman	G	180	
3. Kompresyon Segman	H	170	
Yağ segmanı	J	160	
Piston iç yüzeyi	K	95	400
Piston ön ısısı		130	

#### 4.10. Benzinli Motor Pistonu İçin Sınır Şartların Belirlenmesi



Tablo 4.16. Benzinli motor pistonu için sınır şartların belirlenmesi

Sınır Şart Yerleri		Sıcaklık (°C)	Isı Transferi (W/m <sup>2</sup> K)
Piston Üst Yüzeyi	A	500	600
Ateş segman üst yüzeyi	B	500	350
2. Segman üst yüzeyi	C	180	300
Yağ segman üst yüzeyi	D	170	400
Etek	E	110	400
1.Kompresyon Segman	F	200	
2. Kompresyon Segman	G	180	
Yağ segmanı	H	170	
Piston iç yüzeyi	K	95	400

## BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tasarım aşamasında olan piston veya yeni geliştirilen termal bariyerli pistonların, üretime geçmeden önce analizlerinin yapılması, tasarımlarının doğrulanması ve yapılan pistonun güvenilirliği açısından çok önemlidir. Sonlu eleman analizleri sonunda bulunan gerilme değerleri, kullanılan malzemenin gerilme mukavemetlerine göre dayanımı veya pistonun yorulma ömrü gereksinimlerine göre, yada tasarımcının önemli gördüğü diğer kriterlere göre değerlendirilir. Bu değerlendirmeler doğrultusunda tasarımcı tasarımında mukavemet açısından kritik gördüğü yerleri belirler ve seri üretimden önce bu bölgelerde değişiklik yapabilir.

Sonlu eleman analiz sonuçları, sadece mukavemet açısından kritik görülen yerlerin düzeltilmesi anlamına gelmemelidir. Aynı zamanda aşırı güvenli görülen yerlerde optimum tasarımı yakalaya bilmek için sadeleştirmeler de yapılabilir. Yapı geometrisinin değiştirilmesi yada kesit alanlarının azaltılması ile aşırı güvenli olan bölgeler, güvenilirlik, ağırlık ve malzeme sarfiyatı kavramları göz önünde bulundurularak optimum hale getirilir.

Termal bariyer kaplanmış pistonun üzerindeki daha güvenilir sonuçlar alınması istenen bölgelerde, element yoğunluğu artırılmıştır. Bu sayede bütün yapının eleman sayısını artırmaktansa, sadece ilgilenilen eleman sayısı artırılarak iş yükü azaltılmaya çalışılmıştır.

Sonuç olarak tasarımcı güvenilirlik, dayanıklılık, ağırlık, malzeme kullanımı ve hacim gereksinimleri doğrultusunda optimum tasarımı bulana kadar tasarımını bilgisayar ortamında değiştirebilir ve sonuçlarını değerlendirebilir.

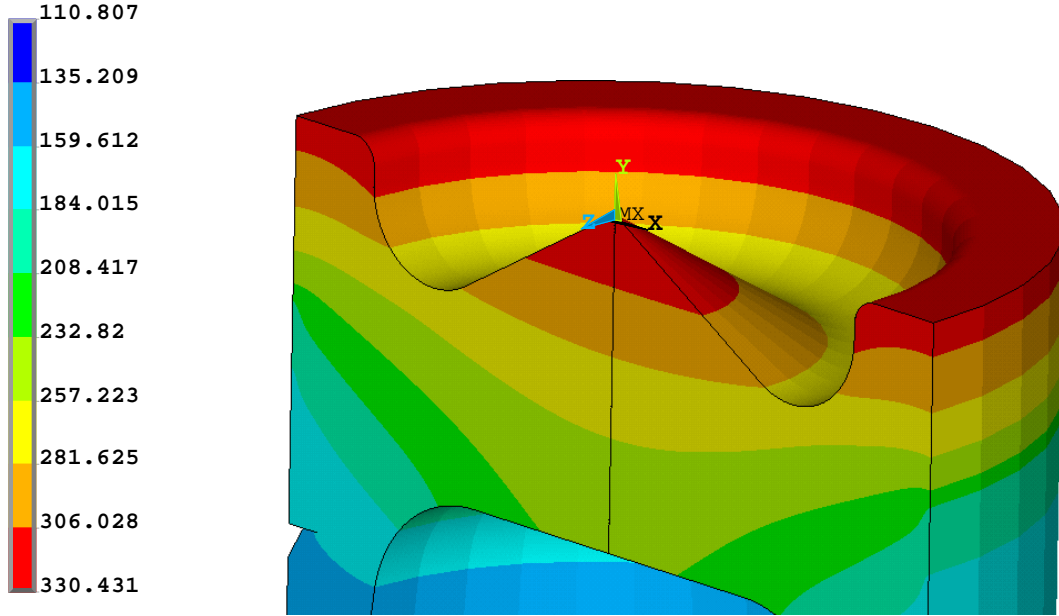


Sonlu elemanları her ne kadar klasik mukavemet hesaplamaları ile yapılan hesaplamalardan daha iyi sonuçlar verse de hata yapma olasılığı yada hata oranının yüksel olma olasılığı her zaman vardır.

Bu tez çalışmasında yapılan termal gerilme analizi neticesinde pistonun yapısal özellikleri hakkında çok önemli sonuçlara ulaşılmıştır.

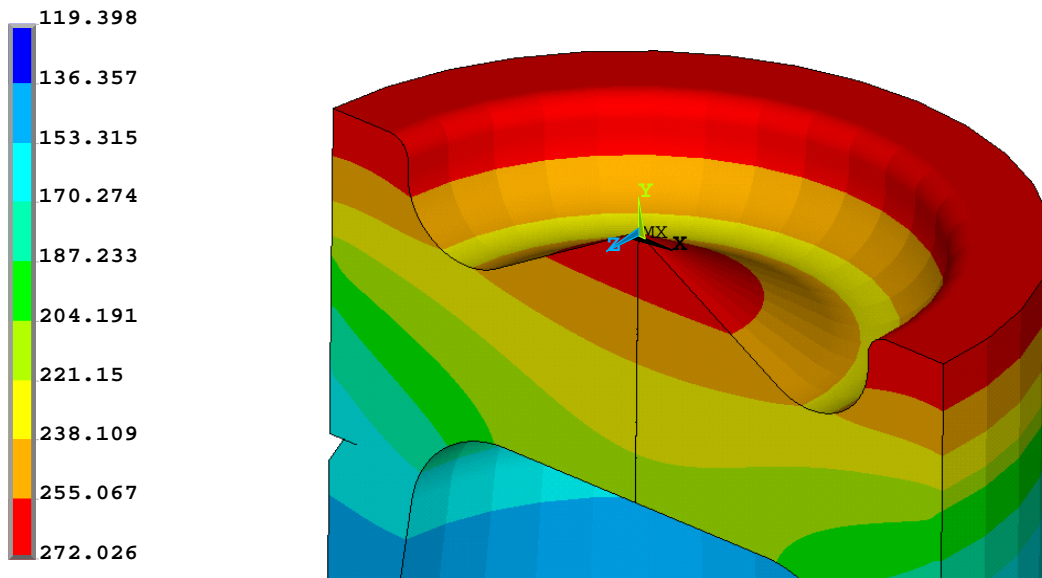
## 5.1.Sıcaklık Dağılımları

### 5.1.1. Demir (Fe) esaslı dizel motor pistonu için yüzey sıcaklık değişimi



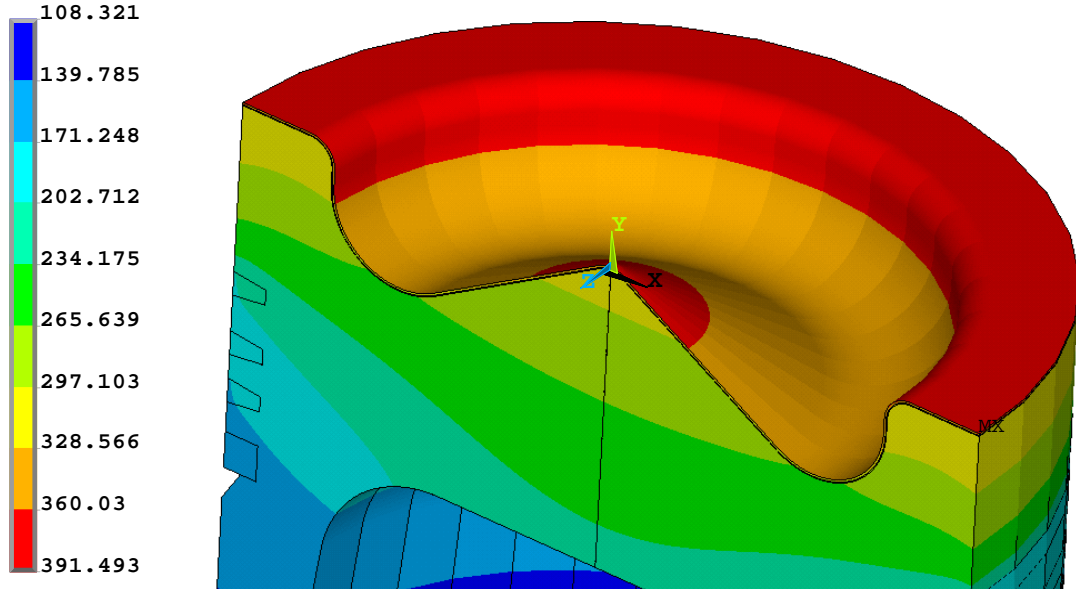
Şekil 5.1. Demir esaslı dizel motor pistonu için yüzey sıcaklık dağılımı

### 5.1.2. Alüminyum (Al) esaslı dizel motor pistonu için yüzey sıcaklık değişimi



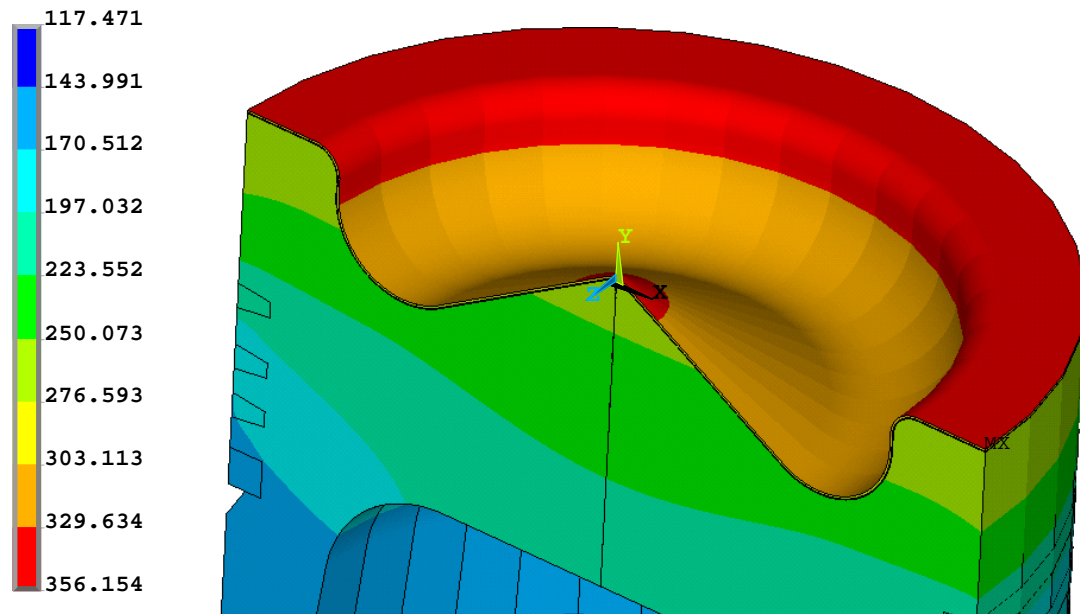
Şekil 5.2. Alüminyum esaslı dizel motor pistonu için yüzey sıcaklık dağılımı

### 5.1.3. Tek katmanlı termal bariyer kaplı Fe esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık değişimi



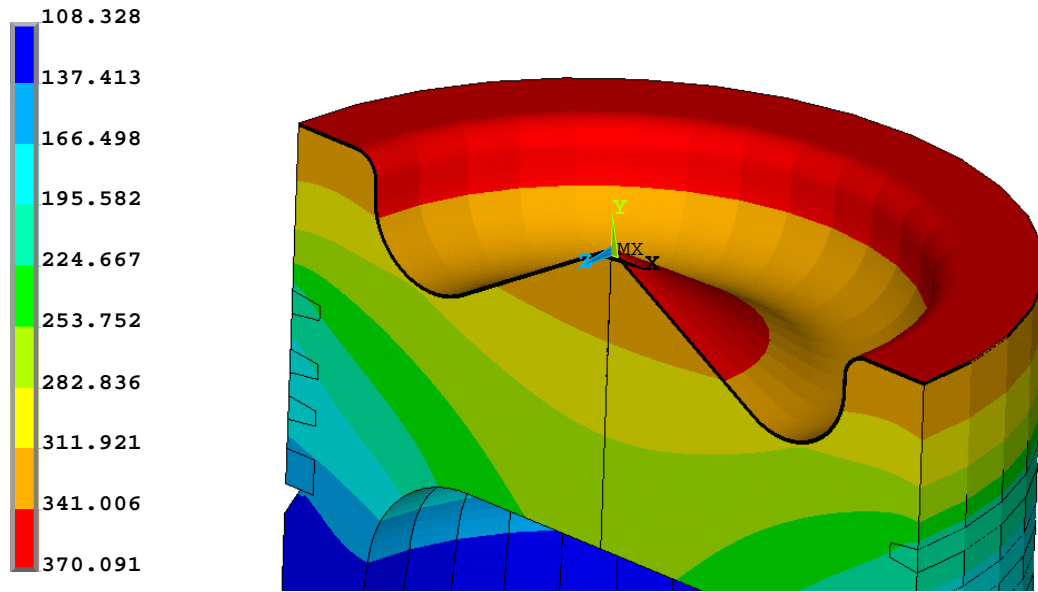
Şekil 5.3. Tek katmanlı demir esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı

### 5.1.4. Tek Katmanlı termal bariyer kaplı Al esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık değişimi



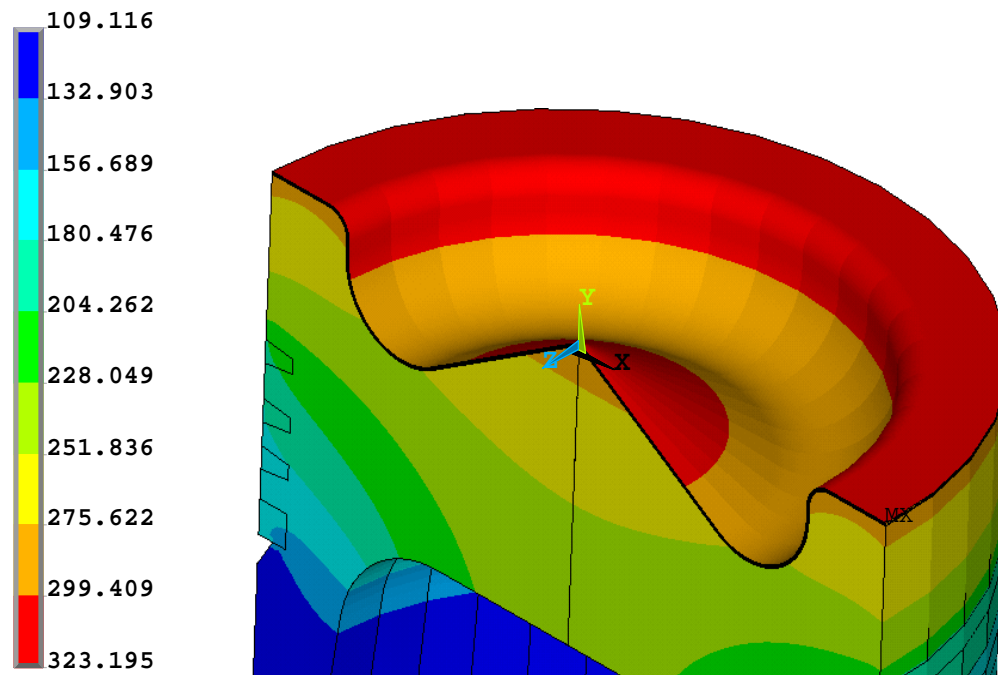
Şekil 5.4. Tek katmanlı Alüminyum esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı

### 5.1.5. Dört katmanlı termal bariyer kaplı Fe esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık değişimi



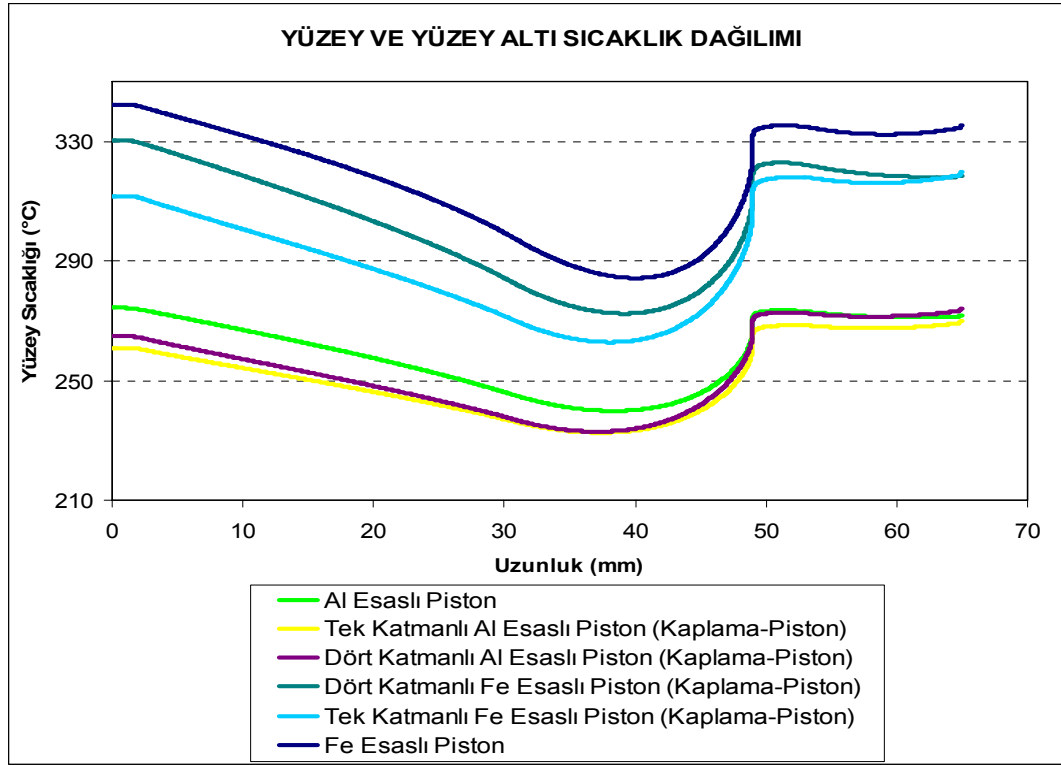
Şekil 5.5. Dört katmanlı demir esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı

### 5.1.6. Dört katmanlı termal bariyer kaplı Al esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık değişimi



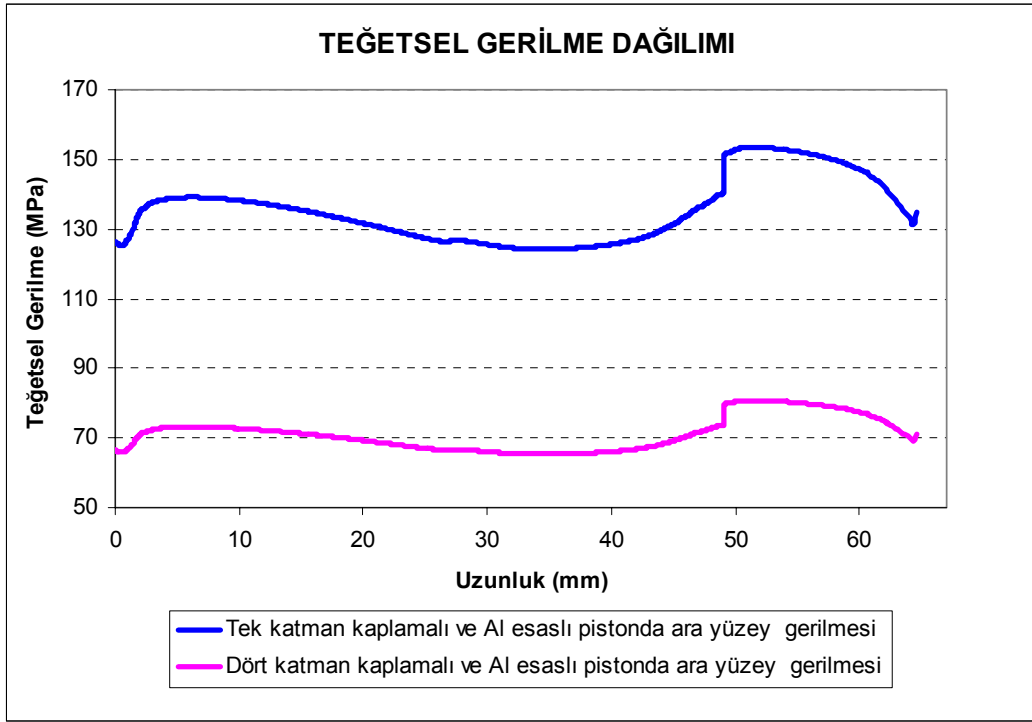
Şekil 5.6. Dört katmanlı Alüminyum esaslı dizel motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı

### 5.1.7. Dizel motor pistonlarının termal bariyerli ve bariyersiz yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması

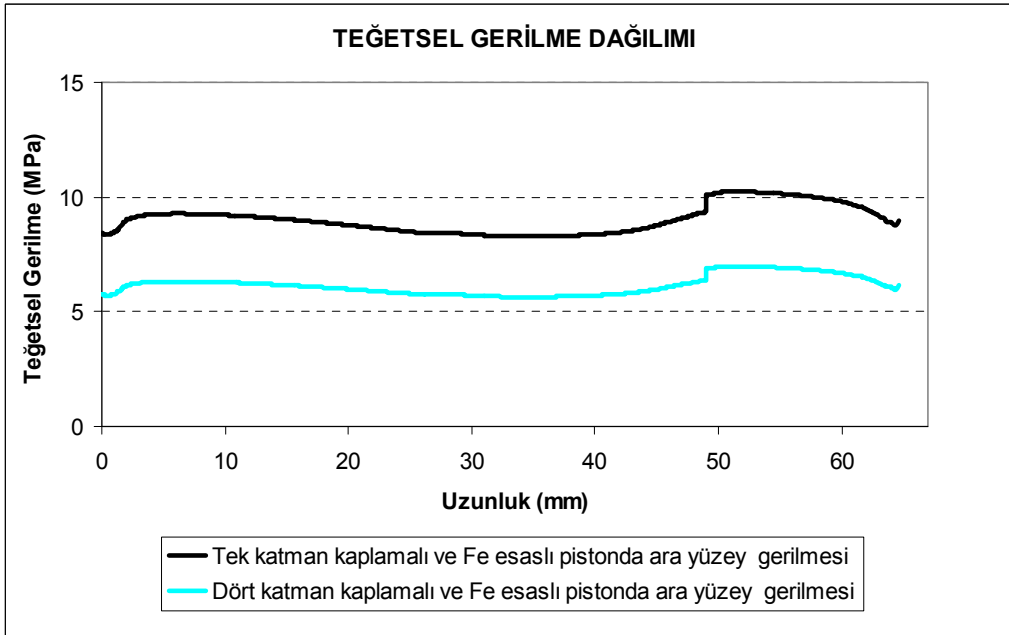


Şekil 5.7. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyinde ve kaplama alt yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılım grafiği

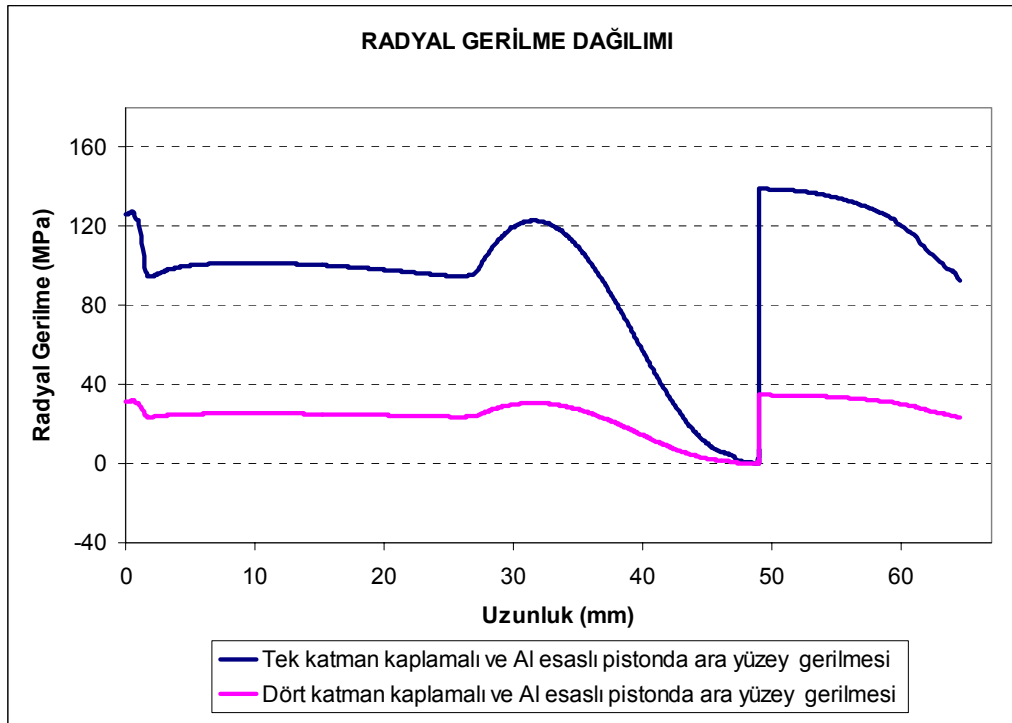
### 5.1.8. Dizel motor pistonu ile termal bariyer arası gerilmeler



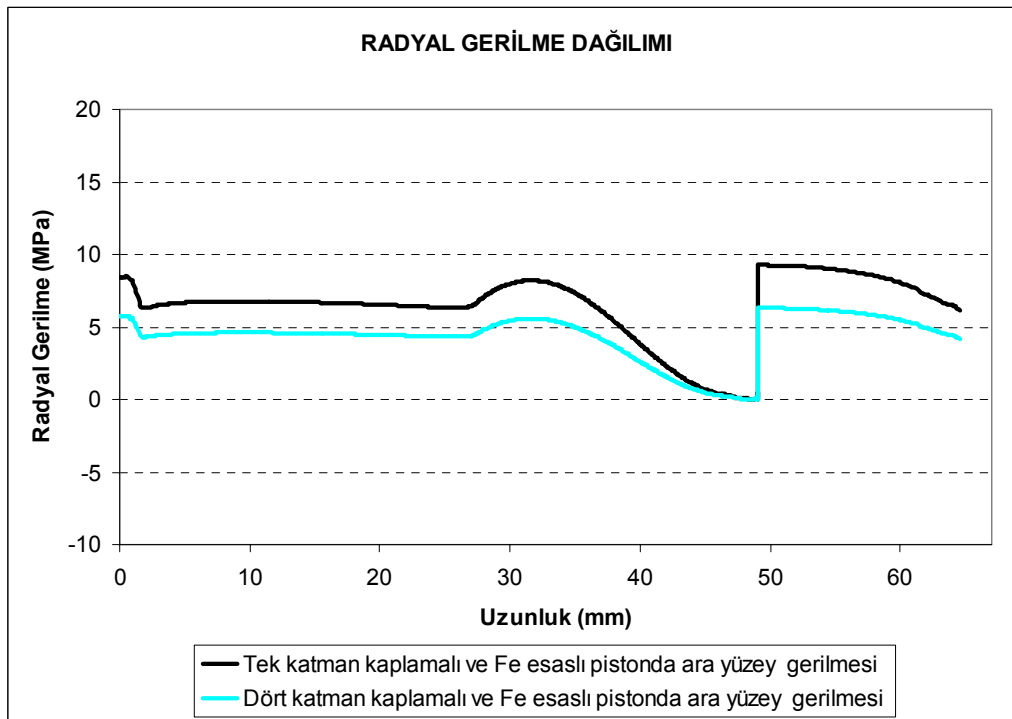
Şekil 5.8. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyinde ve kaplama alt yüzeyinde meydana gelen Teğetsel gerilme dağılım grafiği



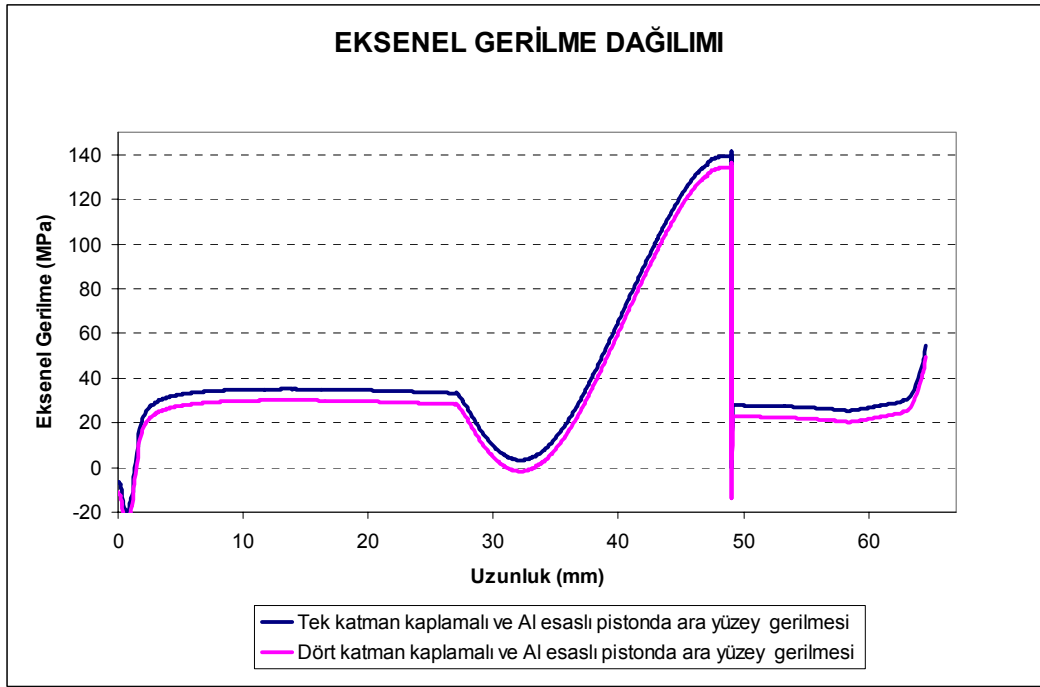
Şekil 5.9. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyinde ve kaplama alt yüzeyinde meydana gelen Teğetsel gerilme dağılım grafiği



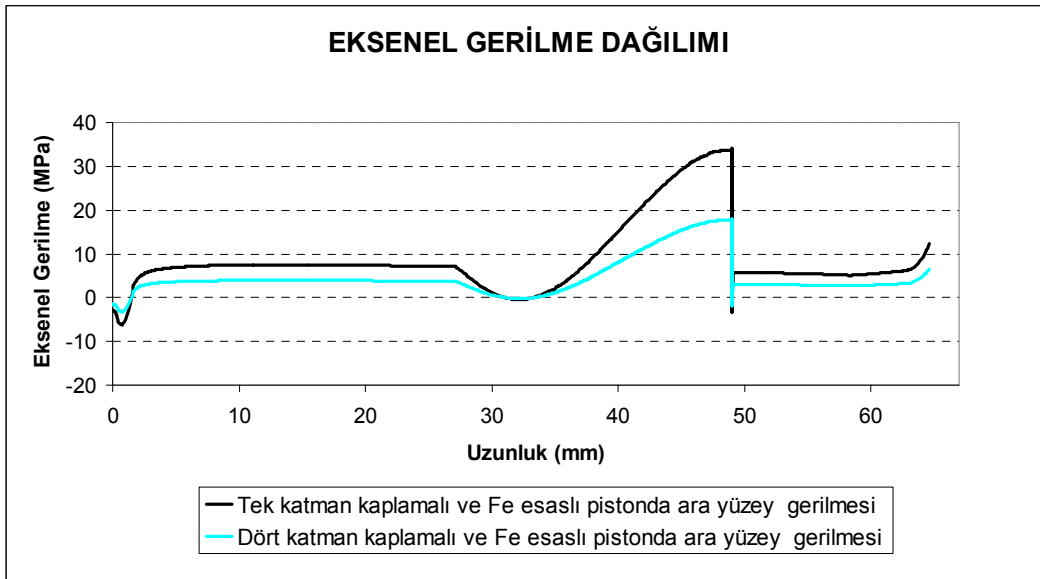
Şekil 5.10. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Radyal gerilme dağılım grafiği



Şekil 5.11. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Radyal gerilme dağılım grafiği

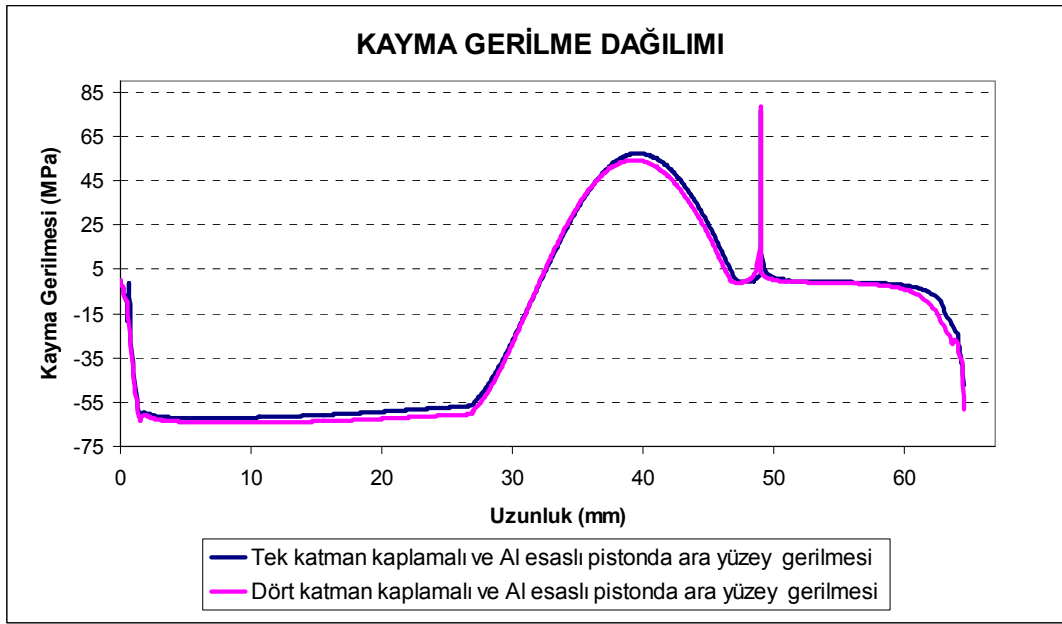


Şekil 5.12. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Eksenel gerilme dağılım grafiği

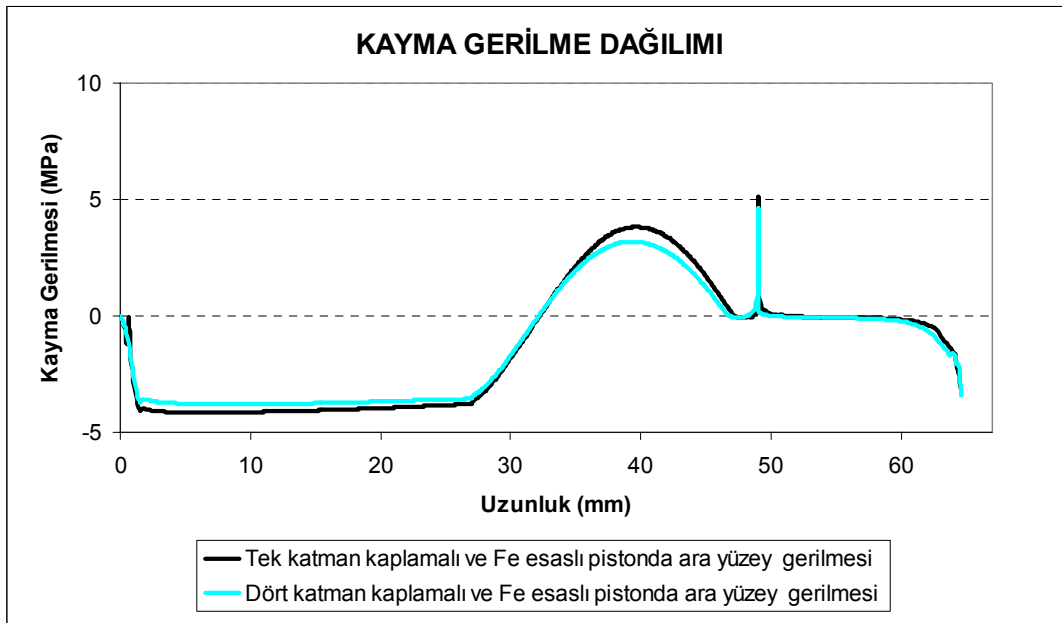


Şekil 5.13. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Eksenel gerilme dağılım grafiği

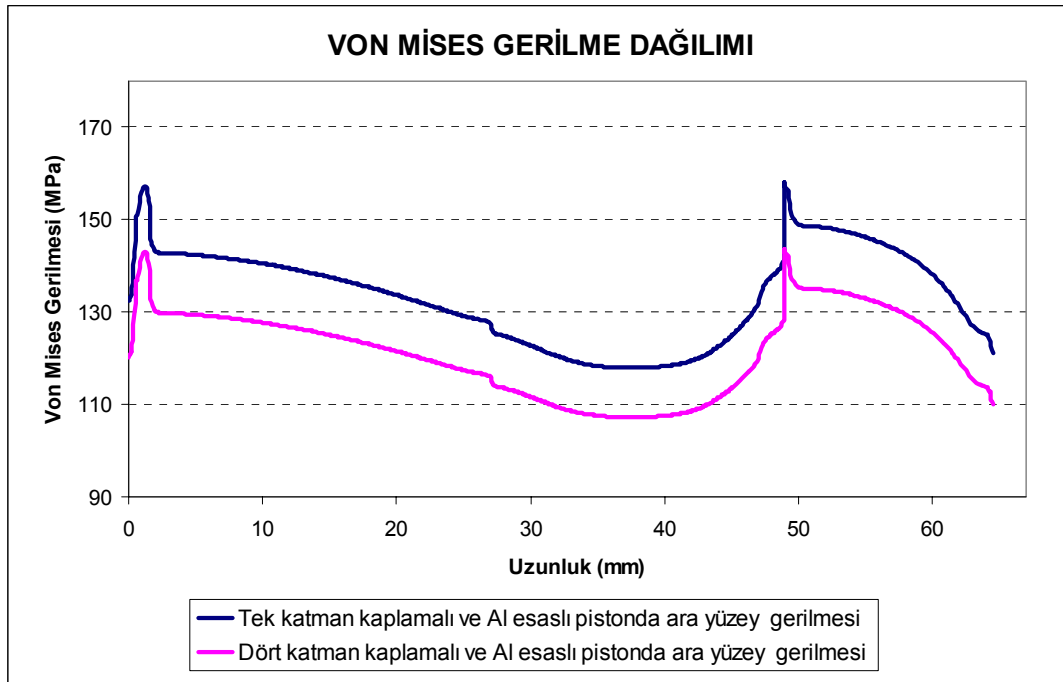




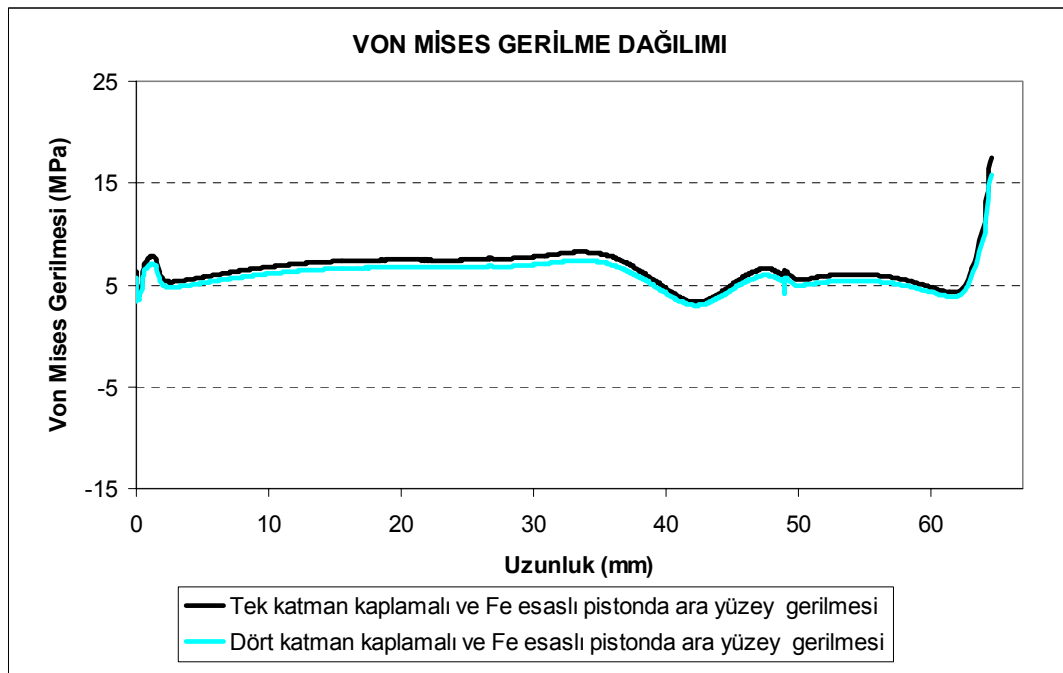
Şekil 5.14. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Kayma gerilme dağılım grafiği



Şekil 5.15. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Kayma gerilme dağılım grafiği

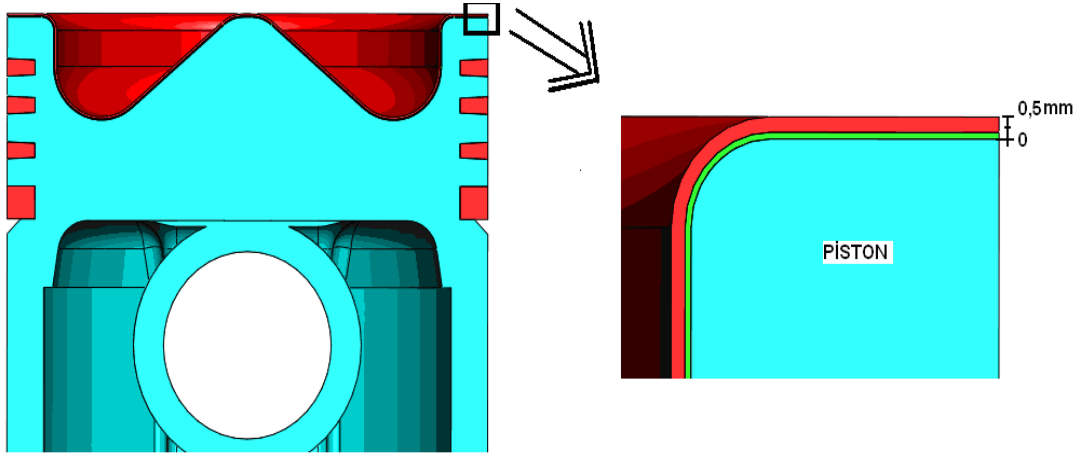


Şekil 5.16. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Von Mises gerilme dağılım grafiği

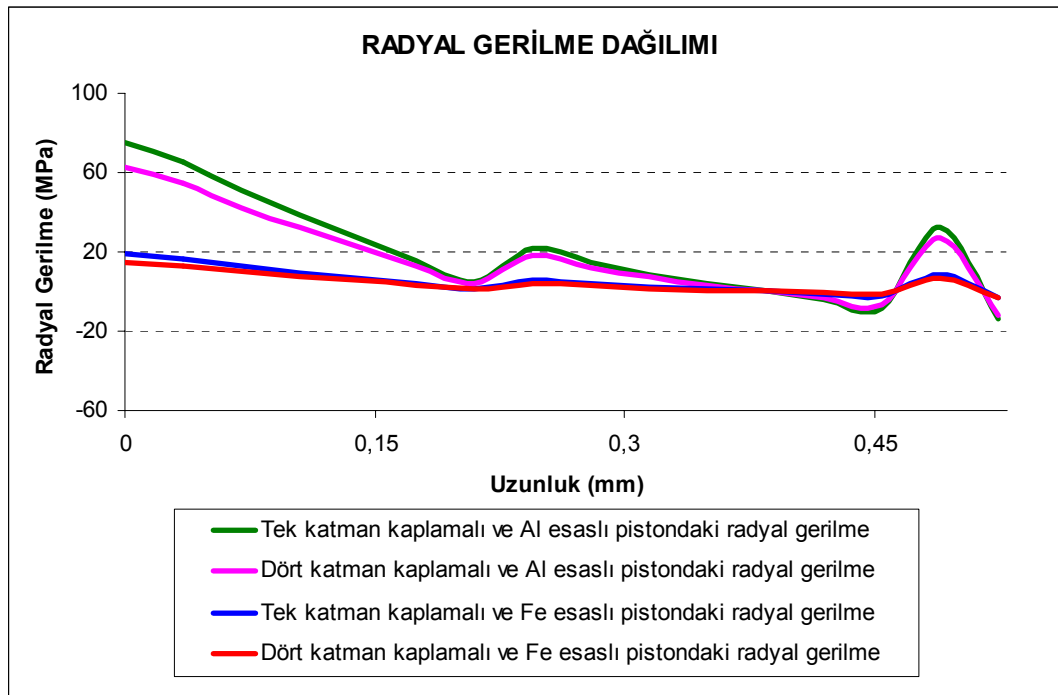


Şekil 5.17. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu üst yüzeyi ve kaplama alt yüzeyinde oluşan Von Mises gerilme dağılım grafiği

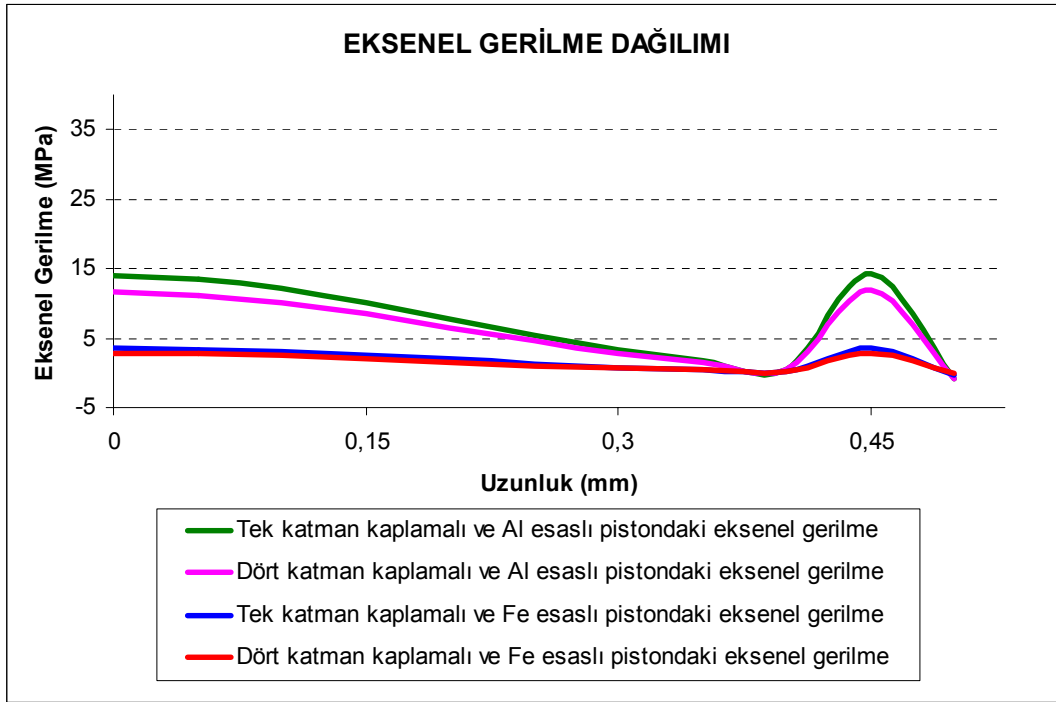
### 5.1.9. Termal bariyer kaplı dizel motor piston kenarı üzerindeki gerilmeler



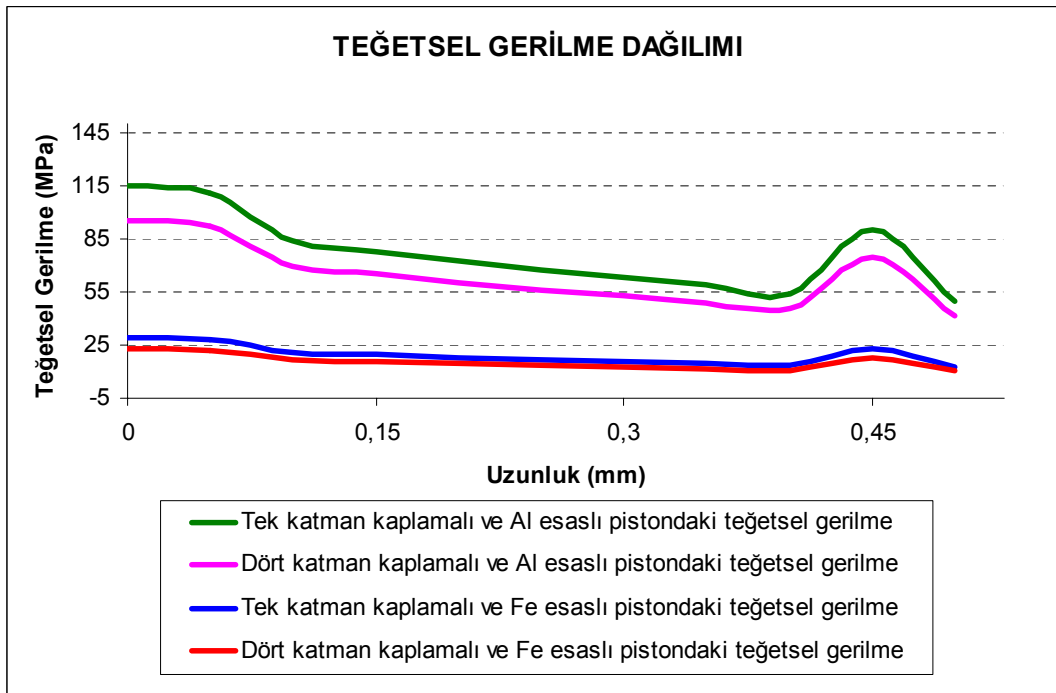
Şekil 5.18. Termal bariyer kaplı dizel motor pistonu



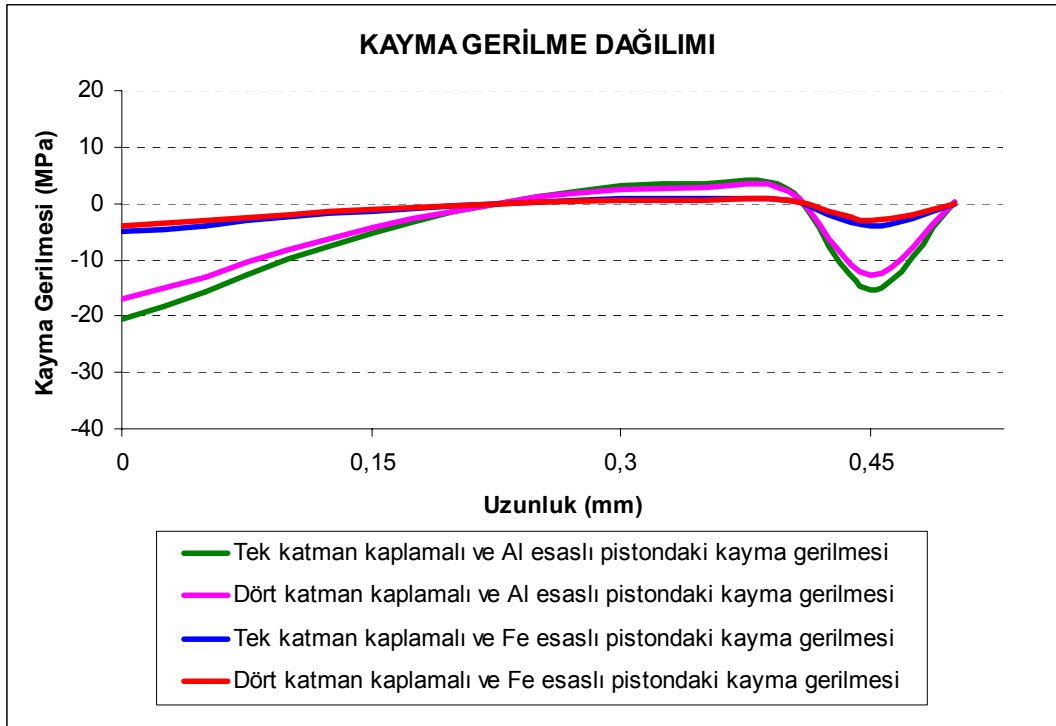
Şekil 5.19. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki radyal gerilme dağılım grafiği



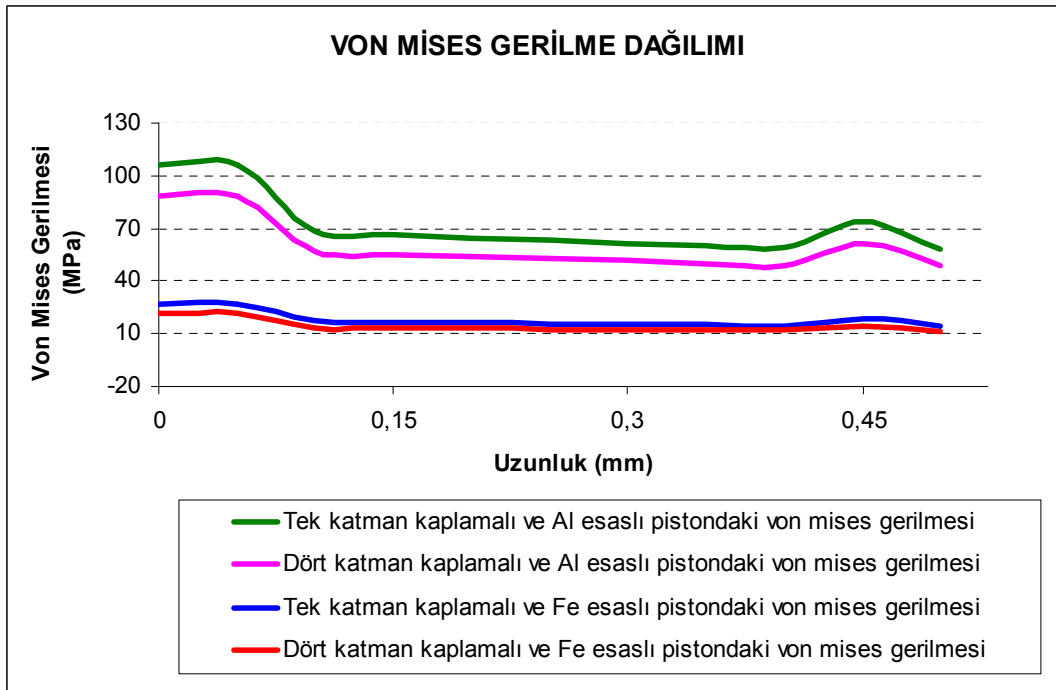
Şekil 5.20. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki eksenel gerilme dağılım grafiği



Şekil 5.21. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki teğetsel gerilme dağılım grafiği

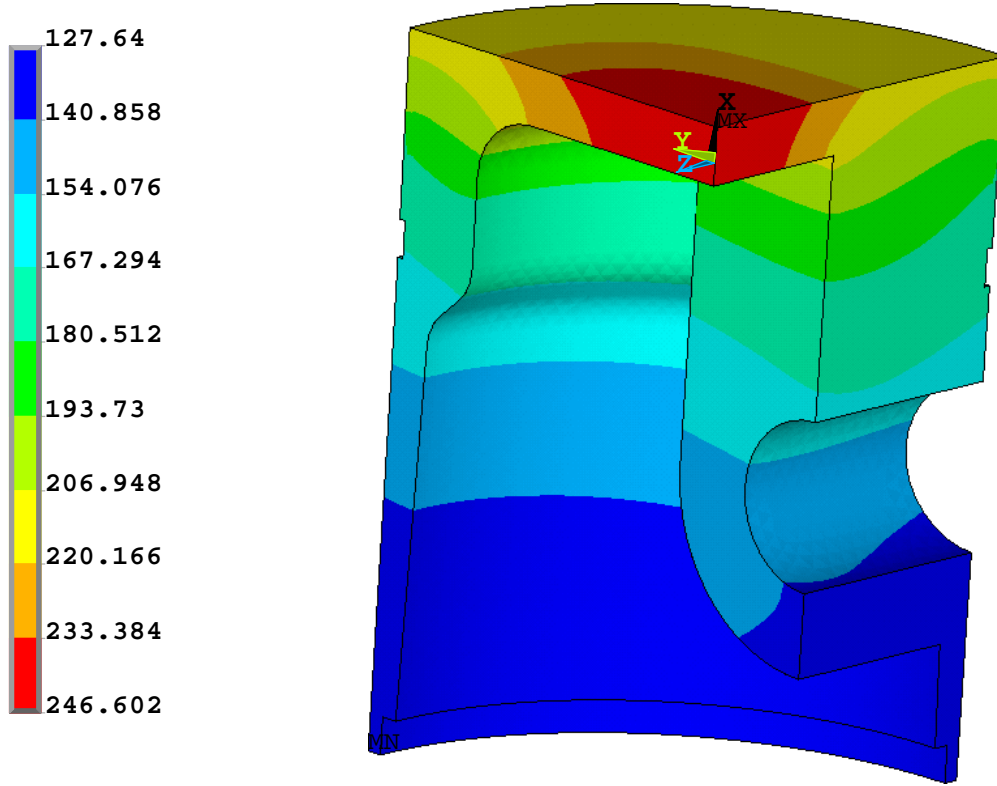


Şekil 5.22. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki kayma gerilme dağılım grafiği



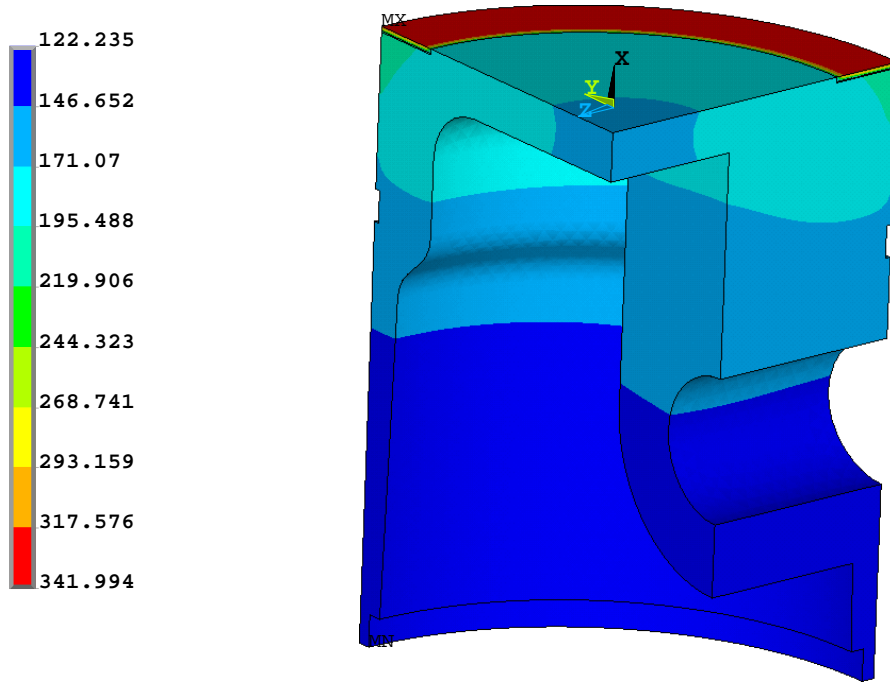
Şekil 5.23. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı dizel motor pistonu kenar yüzeyindeki von mises gerilme dağılım grafiği

### 5.1.10. Alüminyum esaslı benzinli motor pistonu için yüzey sıcaklık dağılımı

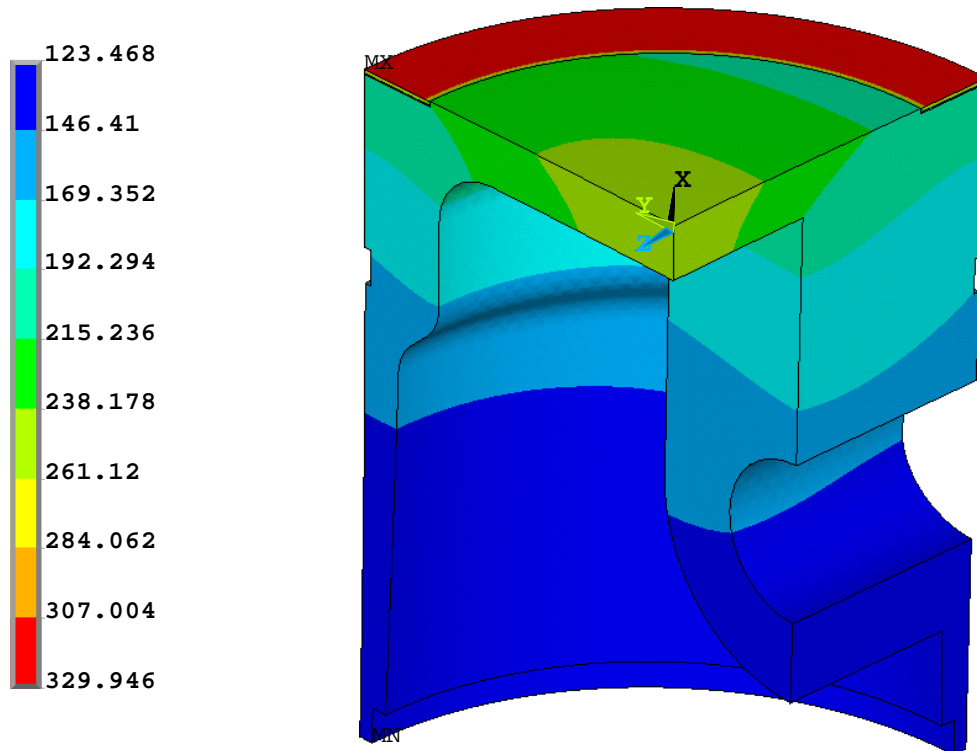


Şekil 5.24. Alüminyum esaslı benzinli motor pistonu için yüzey sıcaklık dağılımı

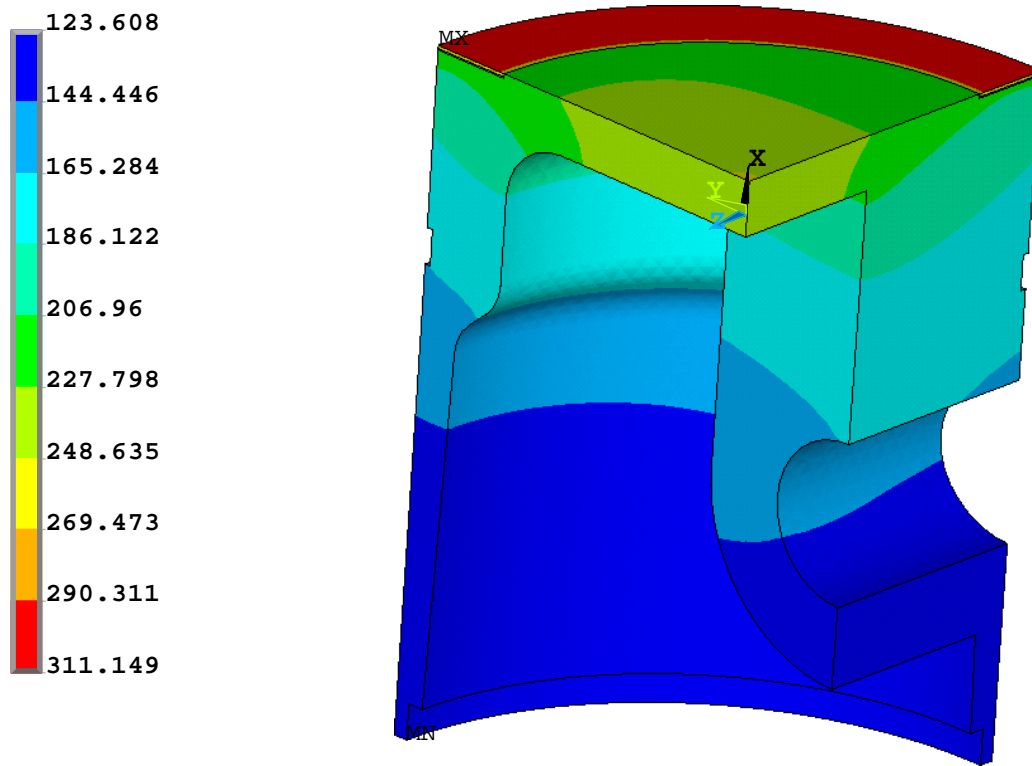
### 5.1.11. Çeşitli termal bariyer kaplı benzinli motor pistonunda yüzey sıcaklık dağılımı



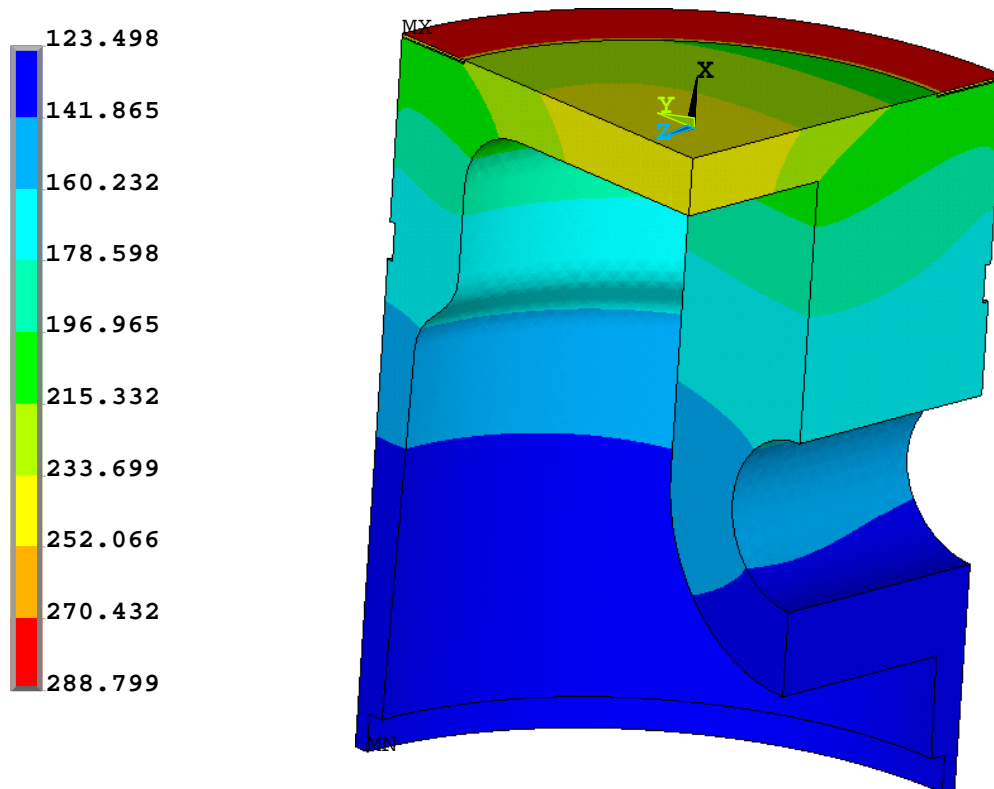
Şekil 5.25. Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.55 (MgZrO<sub>3</sub>) mm termal bariyer kaplama



Şekil 5.26. Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.45 (MgZrO<sub>3</sub>) mm termal bariyer kaplama

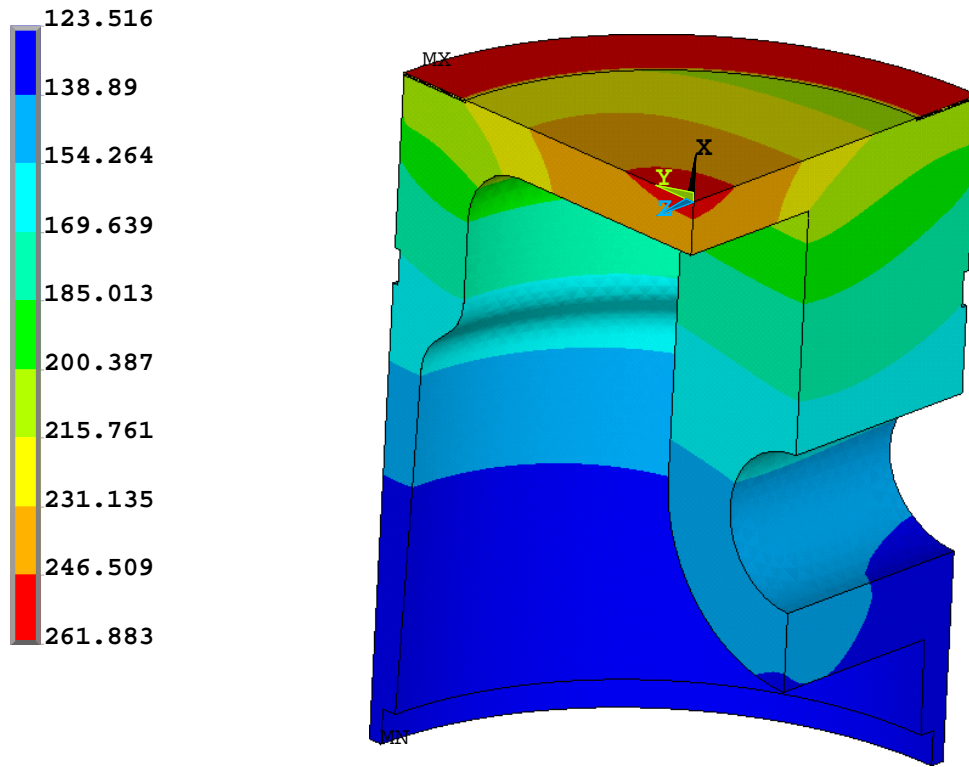


Şekil 5.27. Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO<sub>3</sub>) mm termal bariyer kaplama

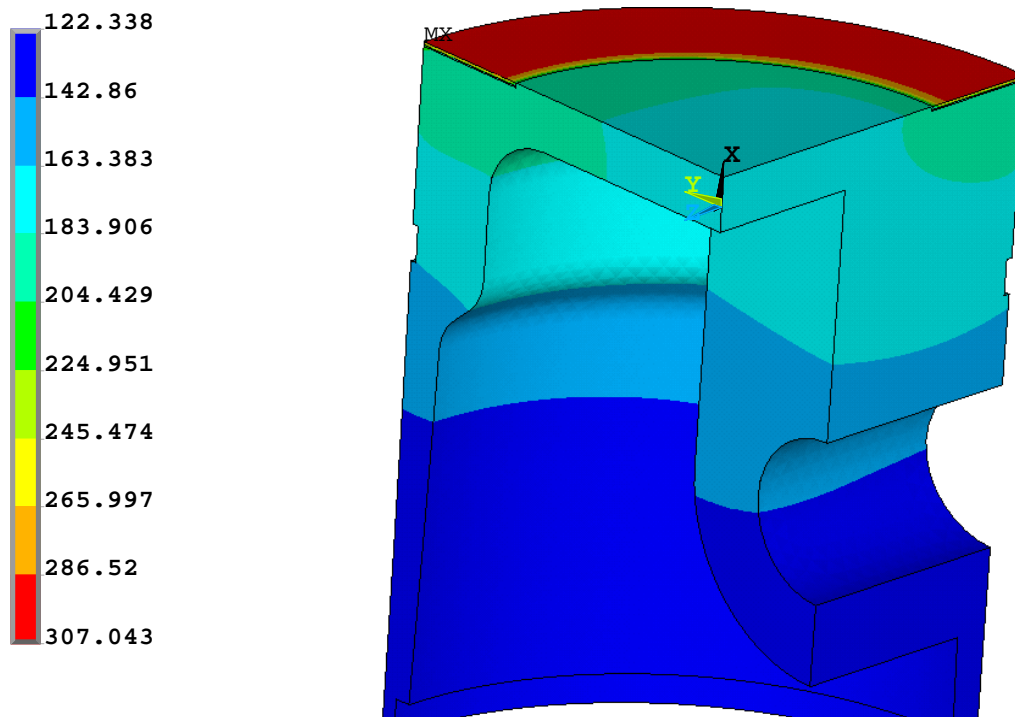


Şekil 5.28. Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.25 (MgZrO<sub>3</sub>) mm termal bariyer kaplama

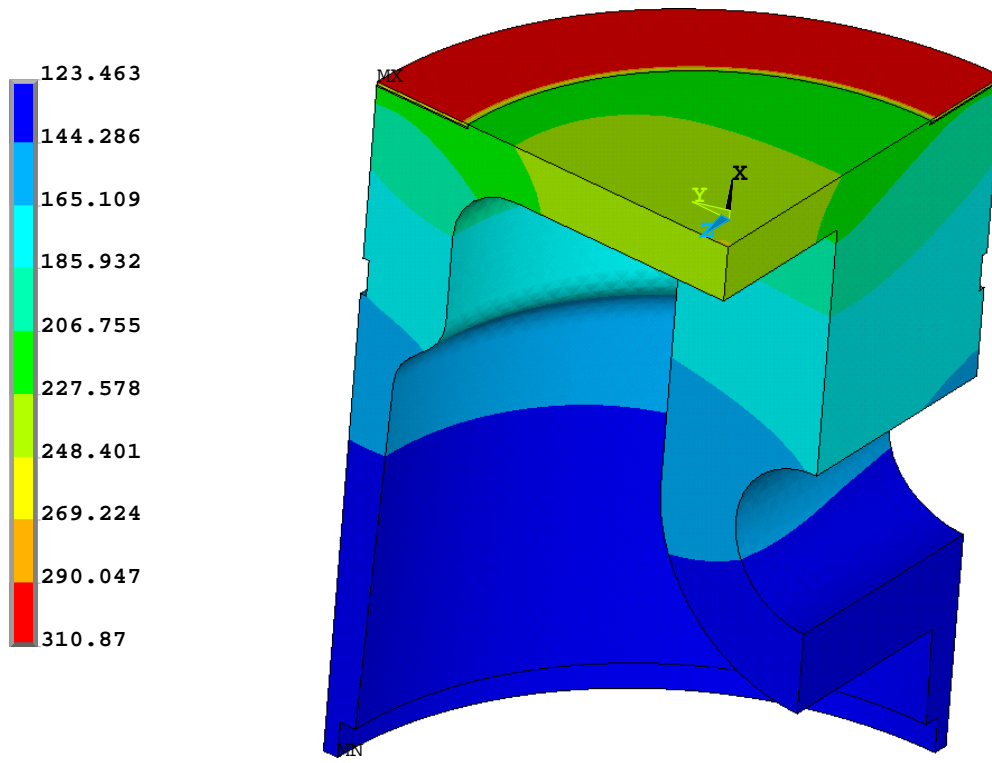




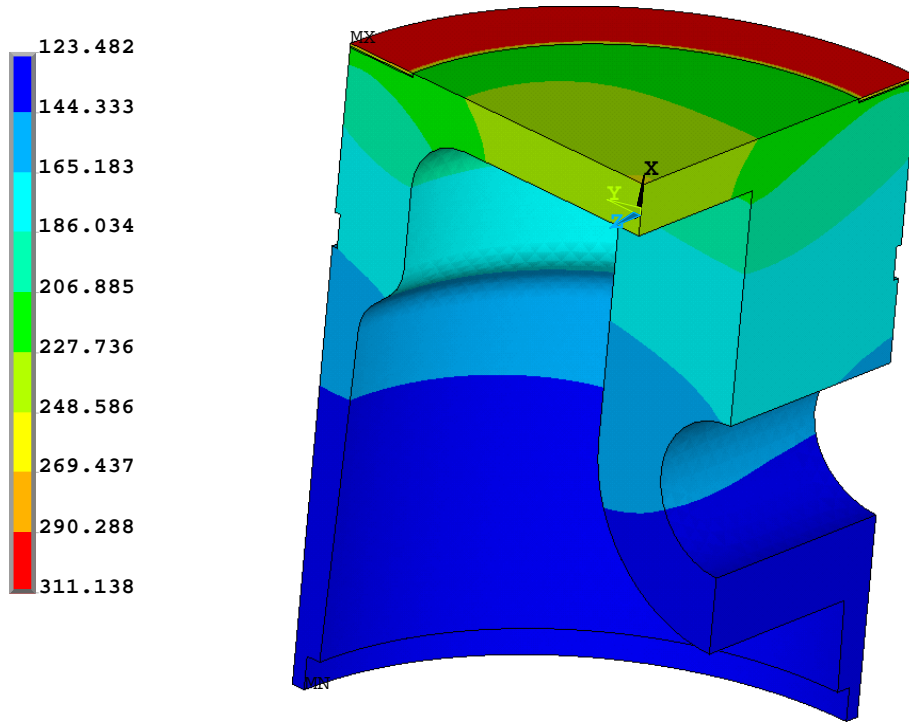
Şekil 5.29. Tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.15 (MgZrO<sub>3</sub>) mm termal bariyer kaplama



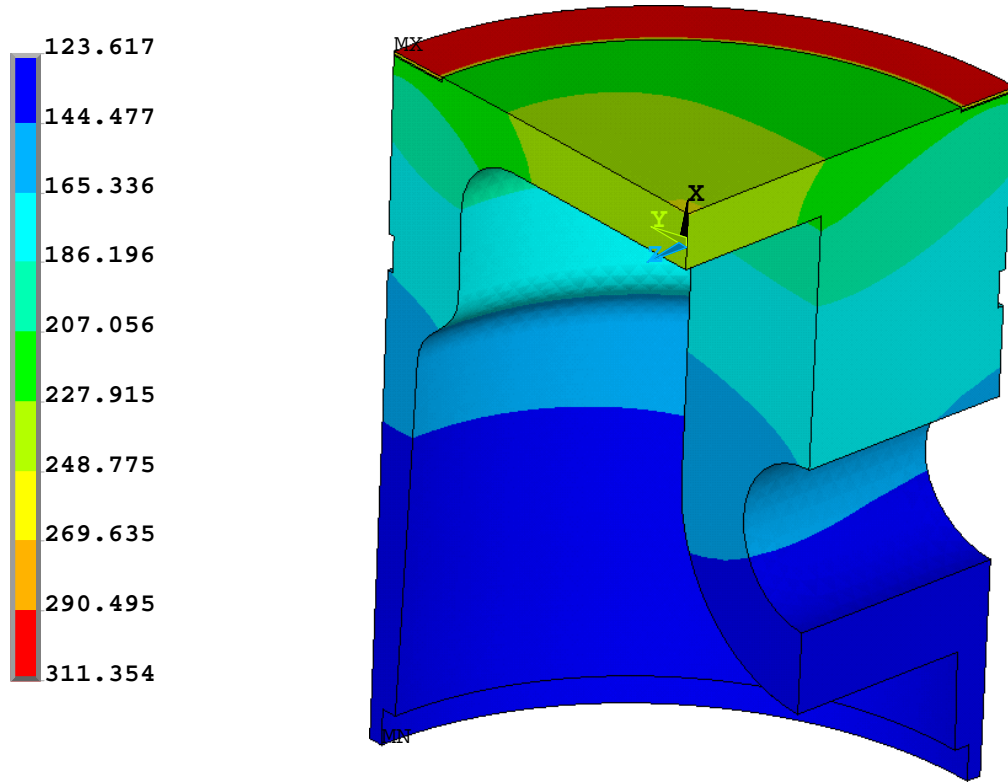
Şekil 5.30. 13,2 mm genişlik ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO<sub>3</sub>) mm termal bariyer kaplama



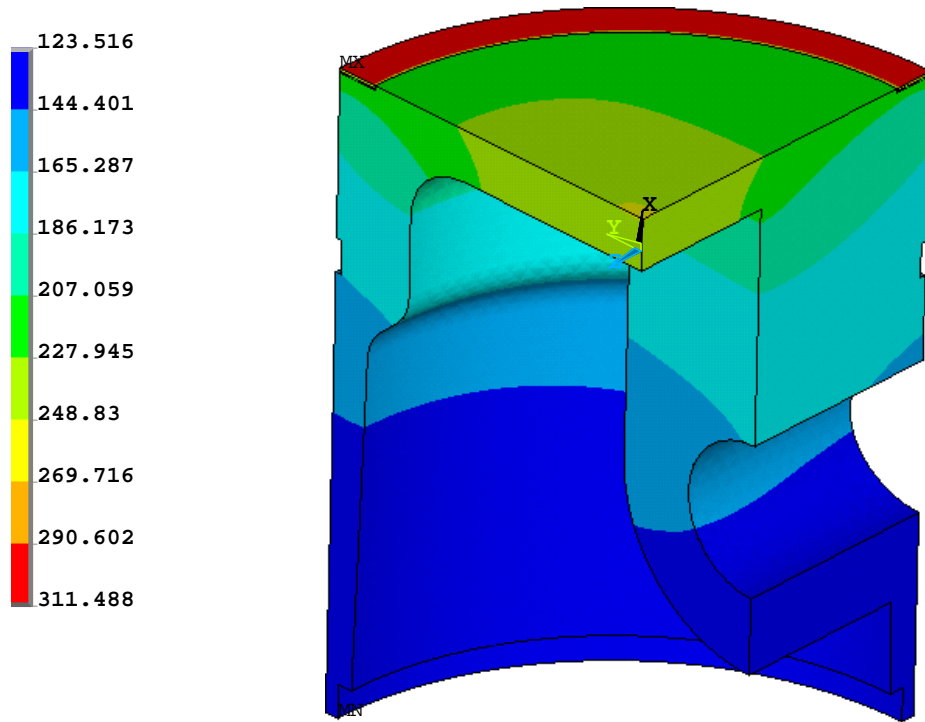
Şekil 5.31. 11,2 mm genişlik ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO3) mm termal bariyer kaplama



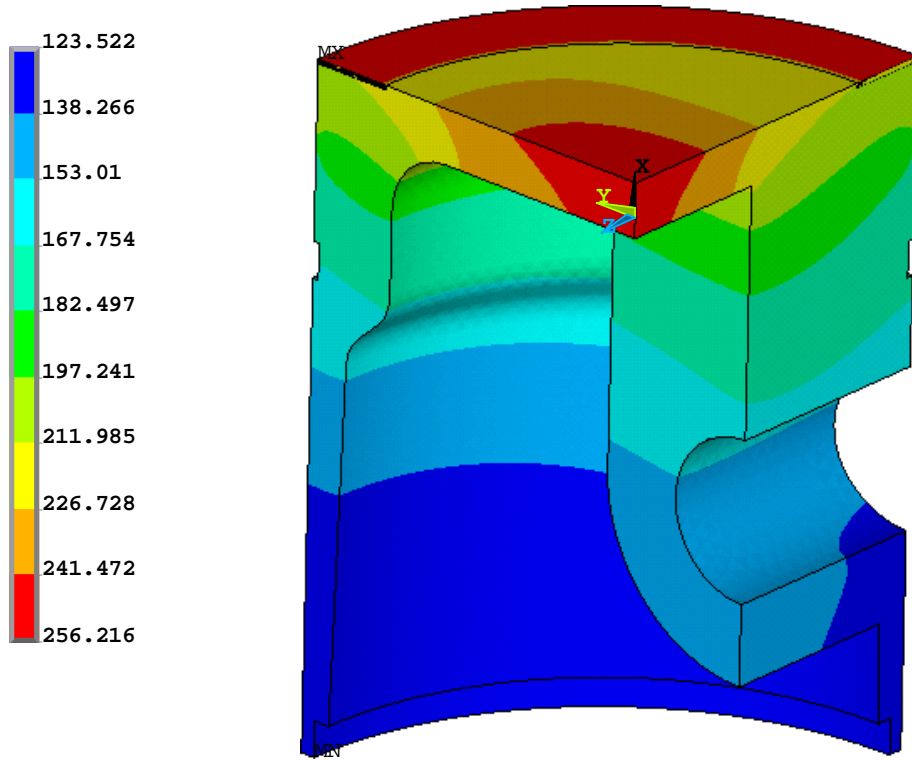
Şekil 5.32. 9,2 mm genişlikli ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO3) mm termal bariyer kaplama



Şekil 5.33. 7,2 mm genişlikli ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO3) mm termal bariyer kaplama



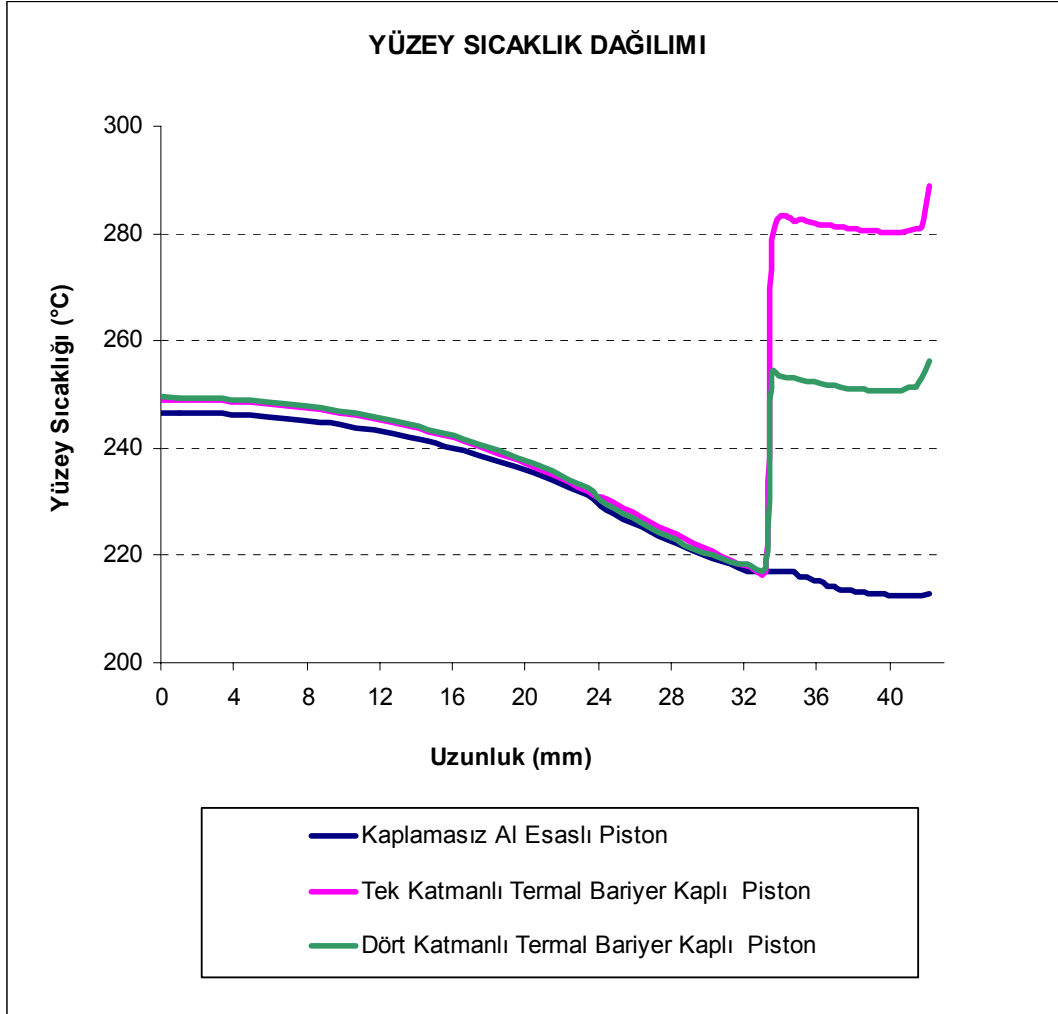
Şekil 5.34. 5,2 mm genişlikli ve tek katmanlı 0.15 (NiCrAl) mm+0.35 (MgZrO3) mm termal bariyer kaplama



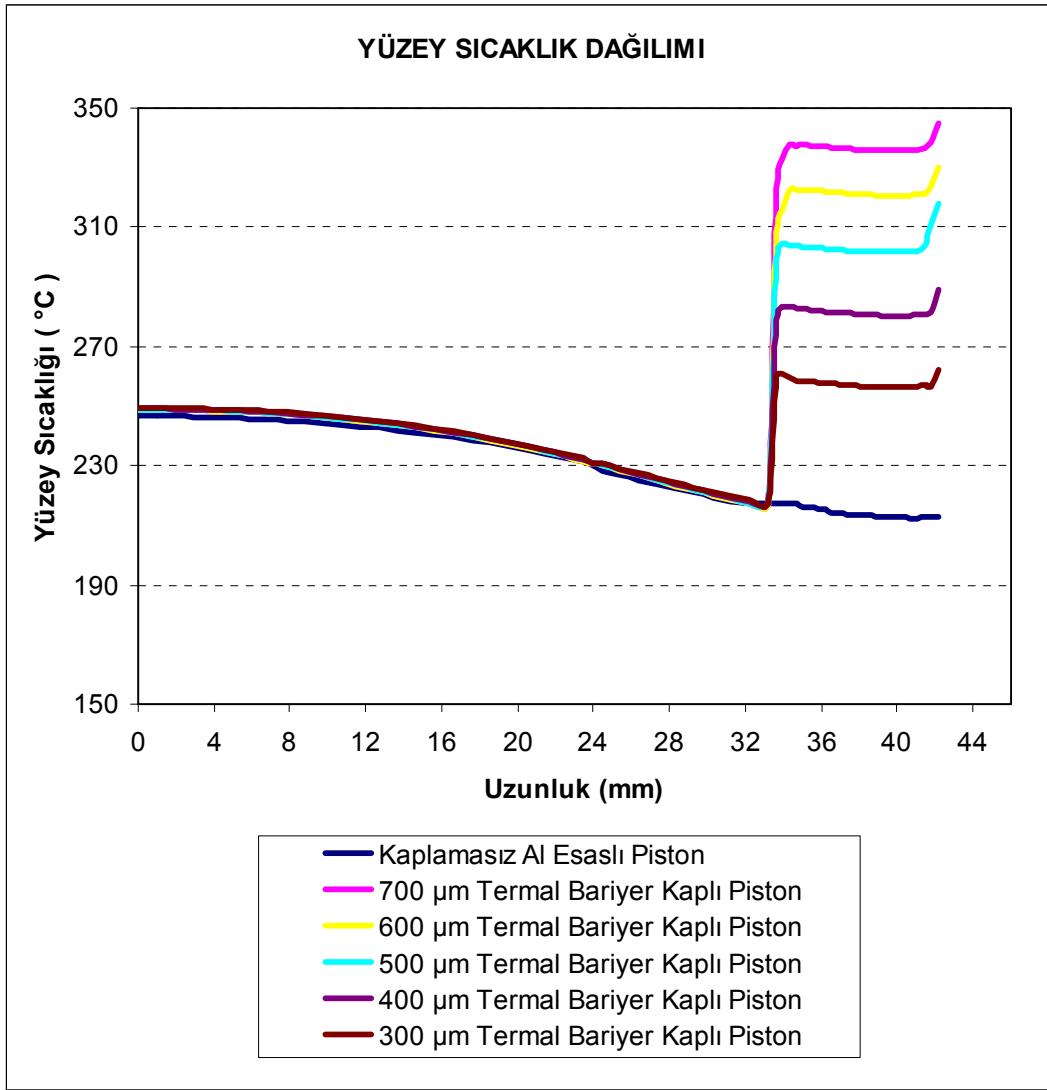
Şekil 5.35. 9,2 mm genişlik ve beş katmanlı 0.1 (NiCrAl) mm+0.1 (%75NiCrAl+%25 MgZrO3) mm +0.1mm (%50NiCrAl+%50 MgZrO3) + 0.1mm(%25NiCrAl+%75 MgZrO3) + 0.1 mm (MgZrO3)termal bariyer kaplama

## 5.2. Termal Gerilmeler

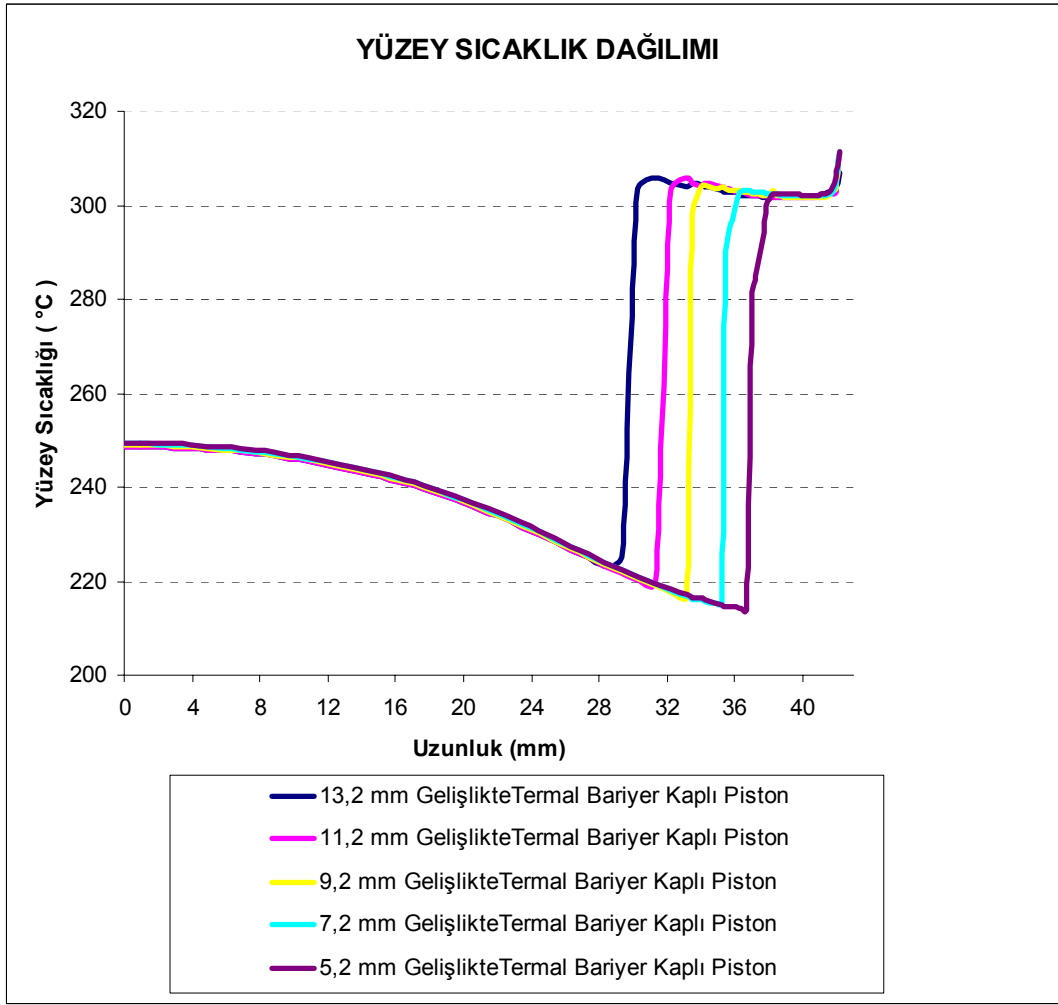
### 5.2.1. Termal bariyerli ve bariyersiz benzinli motor pistonu üst yüzeyinde oluşan yüzey sıcaklıklarının karşılaştırılması



Şekil 5.36. Kaplamasız, tek ve dört termal bariyer kaplamalı benzinli motor pistonu üst yüzeyinde oluşan yüzey sıcaklık dağılım grafiği

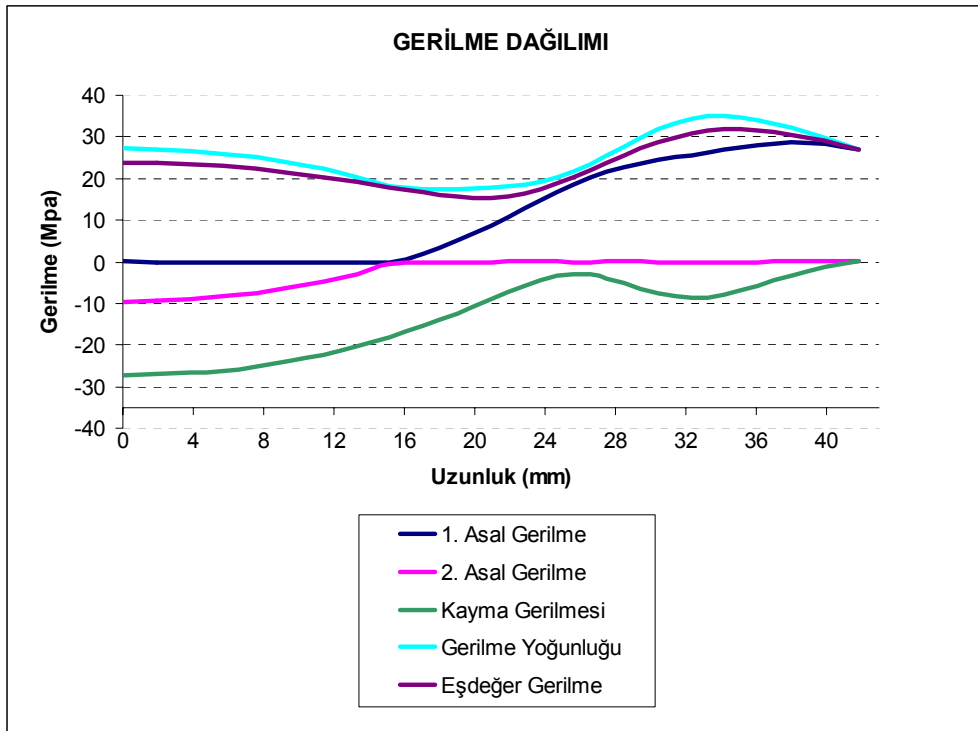


Şekil 5.37. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplı piston üst yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılım grafiği

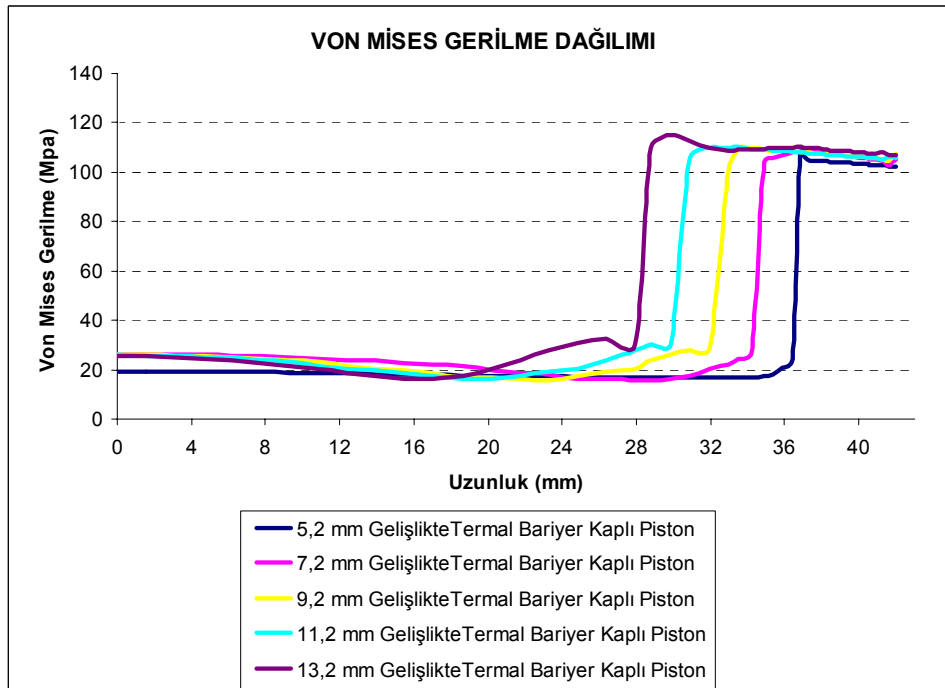


Şekil 5.38. Değişken genişlikteki termal bariyer kaplı piston üst yüzeyinde oluşan sıcaklık dağılım grafiği

### 5.2.2. Benzinli motor pistonu üst yüzeyinde meydana gelen gerilmeler

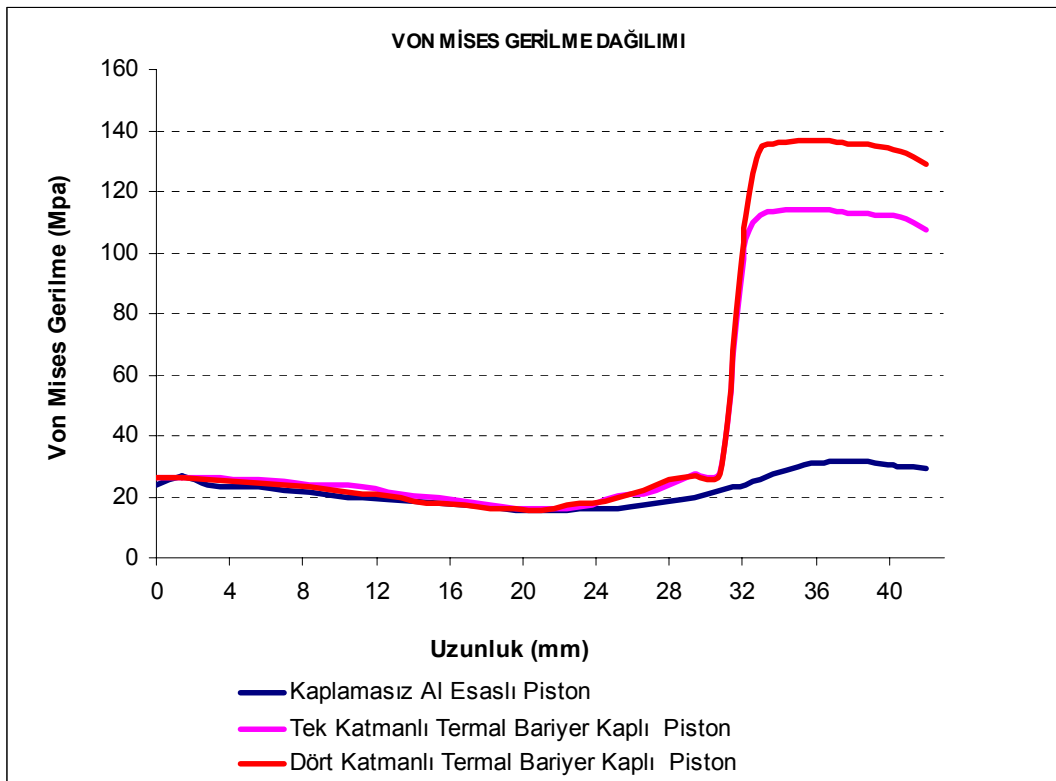


Şekil 5.39. Benzinli motor pistonu üzerinde meydana gelen gerilme dağılım grafiği



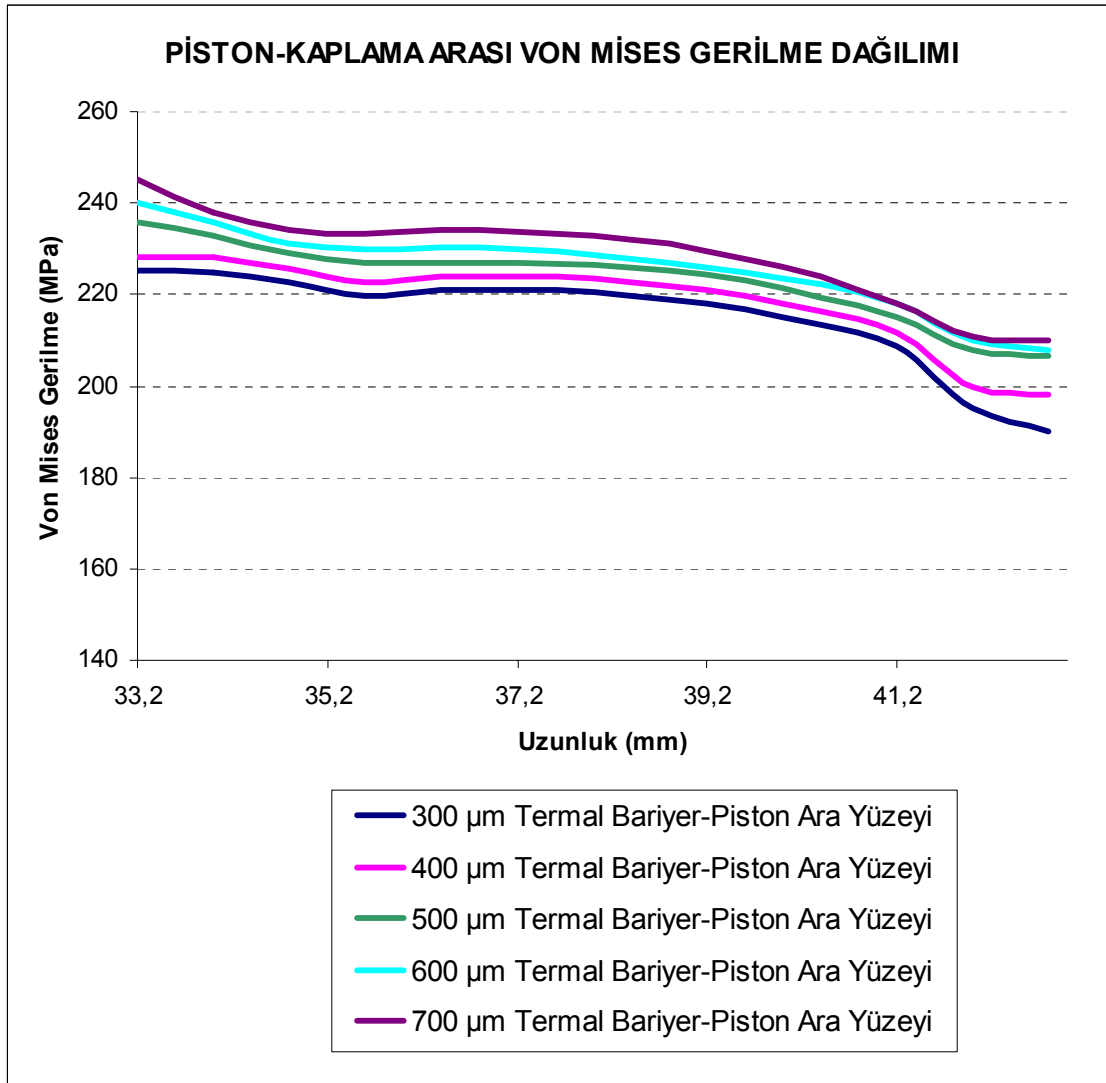
Şekil 5.40. Değişken genişlikteki termal bariyer kaplama ve piston ara yüzeyinde meydana gelen Von Mises gerilme dağılım grafiği





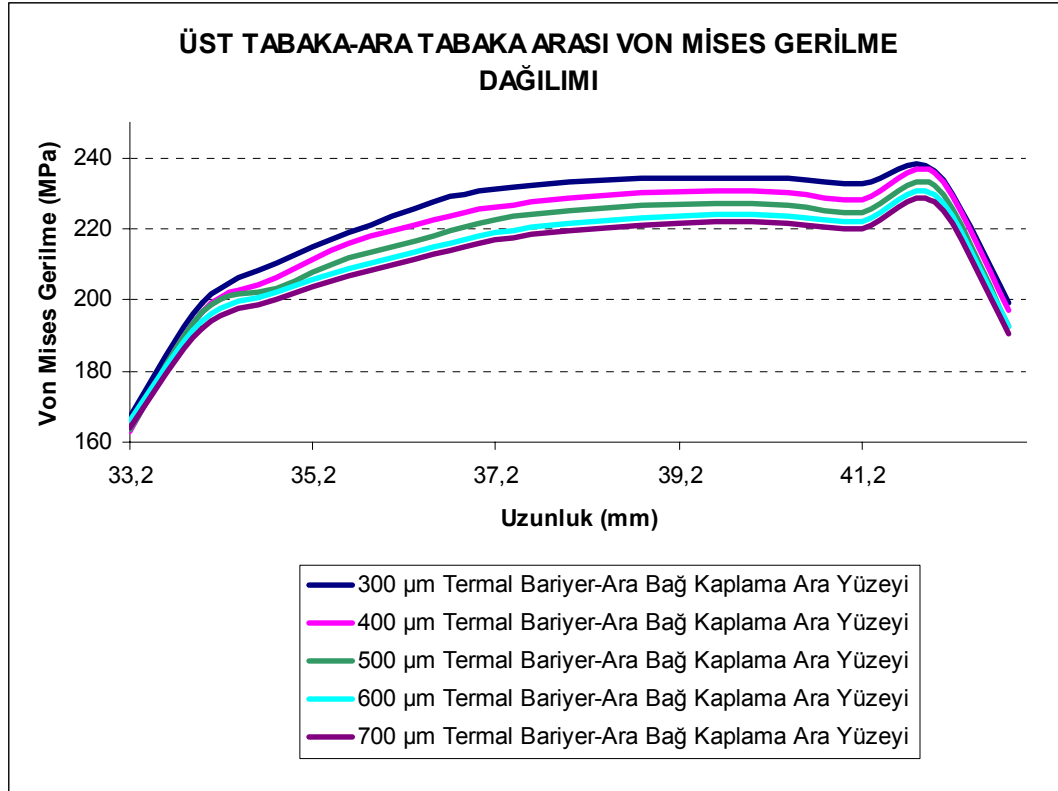
Şekil 5.41. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplama ve piston ara yüzeyinde meydana gelen Von Mises gerilme dağılım grafiği

### 5.2.3. Benzinli motor pistonu ile termal bariyer ara yüzey gerilmeleri



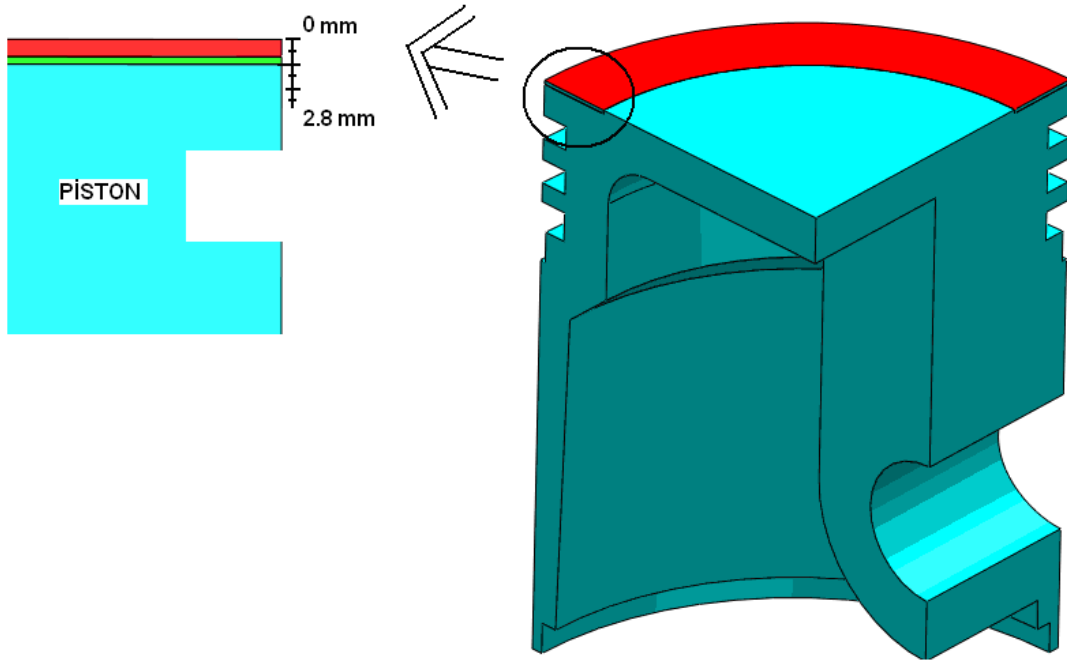
Şekil 5.42. Değişken kalınlıktaki termal bariyer kaplama ve piston ara yüzeyinde meydana gelen gerilme dağılım grafiği.

#### 5.2.4. Benzinli motor pistonundaki tek tabaka termal bariyer kaplamalar arasındaki ara yüzeylerde oluşan gerilmeler

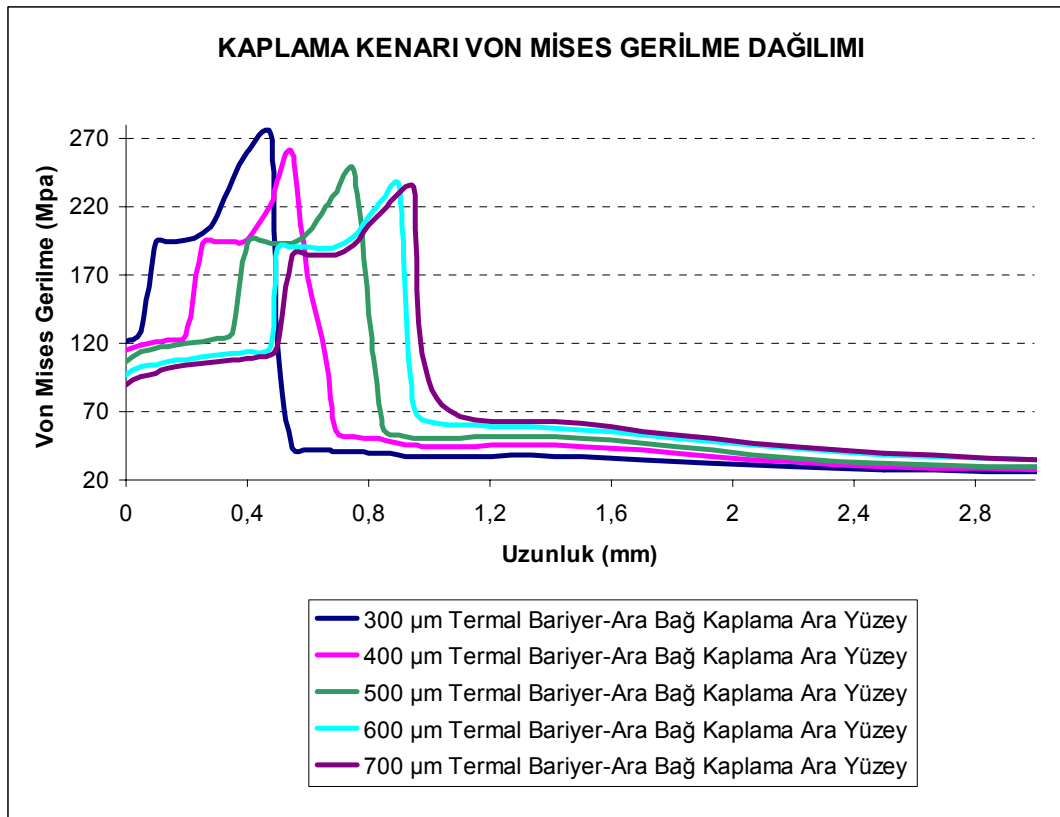


Şekil 5.43. Kaplamasız, tek ve dört termal bariyer kaplamalı benzinli motor pistonu üst yüzeyinde oluşan yüzey sıcaklık dağılım grafiği

### 5.2.5. Termal bariyer kaplı benzinli motor piston kenarı üzerindeki gerilmeler



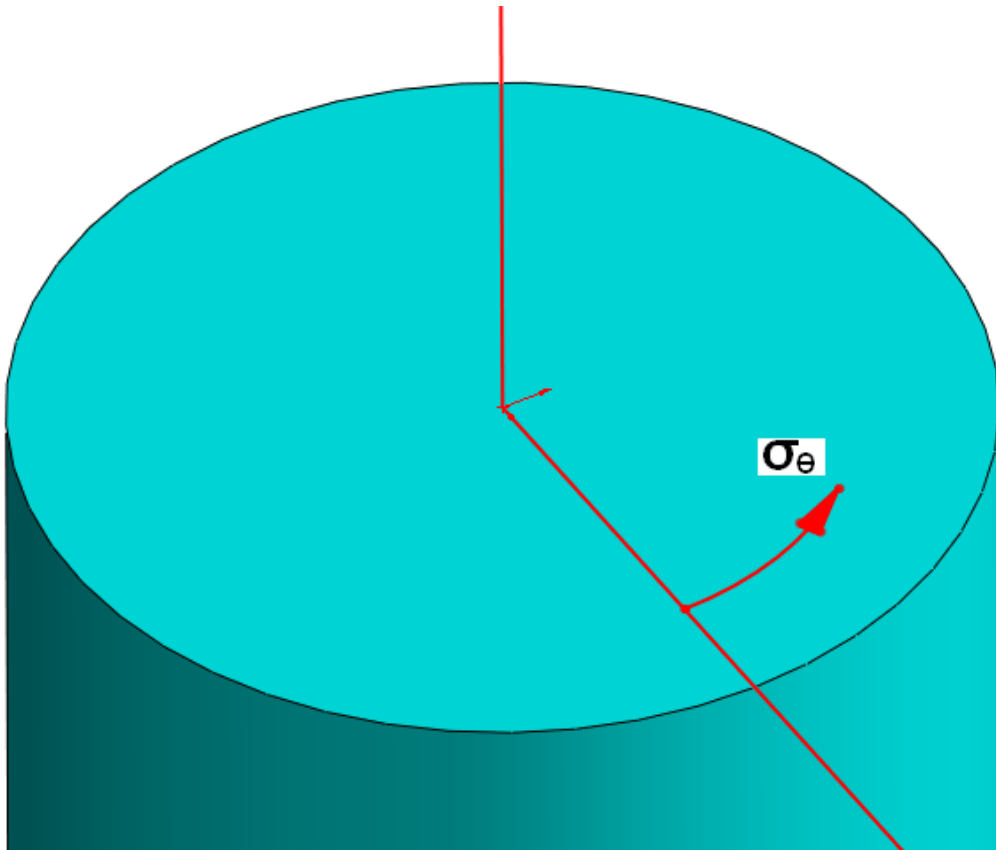
Şekil 5.44. Farklı kalınlıklardaki tek termal bariyer kaplamalı benzinli motor pistonu



Şekil 5.45. Tek termal bariyer kaplamalı benzinli motor pistonu dış kenarında oluşan Von Mises gerilme dağılım grafiği

### 5.2.6. Teğetsel gerilimlerin dağılımı ( $\sigma_{\theta}$ )

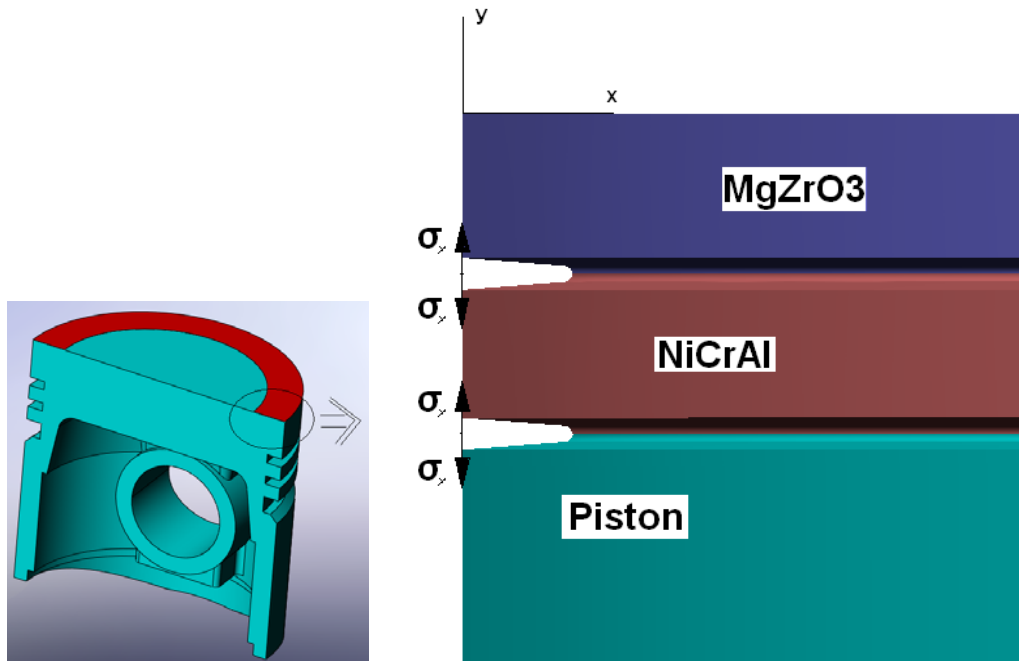
Termal bariyer kaplamalarda katmanların birbirinden ayrılması sonucu oluşan ara yüz çatlakları ile birlikte sıcak ortama ilk maruz kalan kaplamanın en üst yüzeyinde ve ara tabaka yüzeylerine dik kenar çatlakları da görülmektedir. Bu çatlakların oluşmasında rol oynayan gerilim kaplamanın en üst yüzeyinde, merkezden dışa doğru teğetsel gerilimdir. Teğetsel gerilmelerde tekil bir nokta yoktur ve gerilimler pistonun merkezinde, yanma havuz çukuru ve kenarında artmakta ve diğer bölgelerde azalmakta olduğu görülmüştür. Bu nedenle kaplamanın üst yüzeyinde merkeze yakın ve yanma havuz bölgesinde yüzeye dik çatlakların oluşma ihtimali yüksektir. Yine termal bariyerde kaplama sayısının artması ile teğetsel gerilim değerinin düşmekte olduğu görülmüştür (Şekil 5.46.).



Şekil 5.46. Termal Bariyer Katmanlar ve piston yüzeyi arasında oluşan teğetsel gerilmeler

### 5.2.7. Aksel (Düsey) gerilmelerin dağılımı ( $\sigma_z$ )

Katmanlı termal bariyer kaplamalarda görülen en önemli problem katmanlar arasındaki ısı genleşme sabitinin farklı olması nedeniyle ortaya çıkan termal gerilmelerdir. Bu gerilmelerin düşey olanları, silindirik parçalardaki katmanların dış yüzeyindeki kesişim noktalarında çok yüksek değerlere ulaşmakta ve katmanların birbirinden ayrılmasına sebep olmakta ve bundan dolayı ara yüz kenar çatlakları oluşmaktadır (Şekil 5.47). Bu noktalardaki gerilmelerin yüksek oluşunun nedeni katmanların kesiştiği köşe noktalarındaki tekilliklerdir. Bu çatlaklar zamanla ilerleyerek katmanların dökülmesine ve sistemin işleyişinin bozulmasına neden olmaktadır. Tekil düşey gerimler ne kadar küçük olursa ara yüz kenar çatlaklarının oluşma ihtimali o kadar az olacaktır. Tek katmanlı kaplama ile alt metal tabakanın kesiştiği dış noktada düşey gerilimde çok büyük bir sıçrama vardır. Tek bir kesişim olduğu için tek ve şiddetli bir sıçrama kaplamanın alt katmanı ile en alt metal tabakanın kesiştiği noktadır. İkinci sıçrama ise kaplamanın üst katmanı ile alt katmanın kesiştiği noktadır. Burada dikkat edilmesi gereken sıçrama (tekil düşey gerilim) sayısı artmasına rağmen büyüklükleri tek katmanlı kaplamadaki sıçramaya göre oldukça düşüktür.



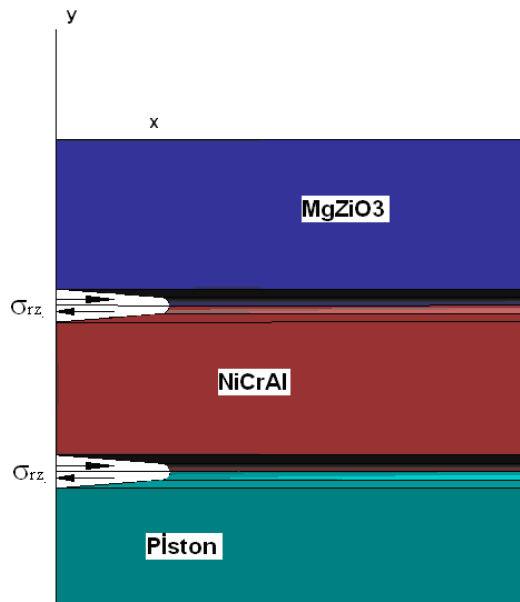
Şekil 5.47. Termal Bariyer Katmanlarının Kesiştiği Köşe Noktalarındaki Oluşan Ara Yüz Kenar Çatlakları

Buda katmanların ayrılmasını ve ara yüz kenar çatlaklarının oluşma ihtimalini düşürmektedir. Beş katmanlı kaplamada beş tane düşey gerilim sıçraması görülmektedir. Bu tekil gerilmeler her katmanın bir diğer ile kesiştiği noktalarda görülmektedir. Bu sıçramaların hepsinin büyüklükleri iki ve tek katmanlı kaplamalarda görülen sıçramalardan çok daha düşüktür. Buradan çıkabilecek sonuç katman sayısı arttıkça sıçrama sayısının arttığı ve tekil gerilmelerin büyüklüklerinin azaldığıdır. Bu şekilde güvenli termal bariyer kaplamaları elde edilmektedir.

### 5.2.8. Kayma gerilmelerinin dağılımı ( $\sigma_{rz}$ )

Termal bariyer kaplamalarda katmanlar arasında ayrılmalar ve çatlaklar meydana gelmesine neden olan diğer bir gerilim tekil kayma gerilimidir. Kayma geriliminde de düşey gerilimde olduğu gibi aynı noktalarda tekillik vardır.

Simetrik olan parçalarda merkezden dışarıya doğru kayma gerilmesi artmaktadır. Tek katmanlı kaplamada daha fazla, beş katmanlı kaplamada daha az ve çok katmanlı kaplamada kayma gerilmesi sıfıra yaklaşma eğilimi gösterecektir.

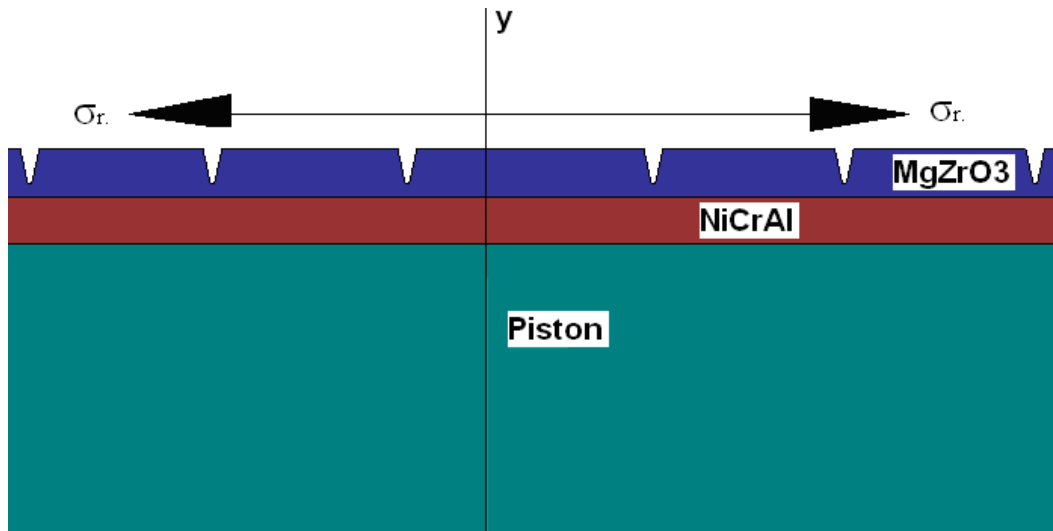


Şekil 5.48. Katmanların Kesiştiği Köşe Noktalarındaki Yüksek Tekil Kayma Gerilmeleri ve Ara Yüz Çatlakları

Bu tez çalışması sonunda elde edilen sonuçlarda kayma gerilmesini piston merkez bölgesi, yanma havuz çukur bölgesi ve kenarında oluştuğu görülmüştür (Şekil 5.48.).

### 5.2.9. Radyal (Yatay) gerilim dağılımları ( $\sigma_r$ )

Termal bariyer kaplamalarda katmanların birbirinden ayrılması sonucu oluşan ara yüz çatlakları ile birlikte sıcak ortama ilk maruz kalan kaplamanın en üst yüzeyinde ve ara tabaka yüzeylerine dik kenar çatlakları da görülmektedir. Bu çatlakların oluşmasında rol oynayan gerilim kaplamanın en üst yüzeyinde, merkezden dışa doğru yatay gerilimdir. Yatay gerilmelerde tekil bir nokta yoktur ve gerilimler pistonun merkezinde, yanma havuz çukuru ve kenarında artmakta ve diğer bölgelerde azalmakta olduğu görülmüştür. Bu nedenle kaplamanın üst yüzeyinde merkeze yakın ve yanma havuz bölgesinde yüzeye dik çatlakların oluşma ihtimali yüksektir. Yine termal bariyerde kaplama sayısının artması ile yatay gerilim değerinin düşmekte olduğu görülmüştür (Şekil 5.49.).



Şekil 5.49. Kaplamanın Üst Yüzeyindeki Yatay Gerilmeler ve Üst Yüze Dik Olarak Oluşan Çatlakları

### 5.2.10. Sıcaklık

Bu tez çalışması kapsamında yapılan demir esaslı dizel motor pistonu üzerindeki termal yüklemeye ile elde edilen en yüksek sıcaklık 330 °C, tek termal bariyer kaplı piston için 391 °C, dört termal bariyer kaplı piston için 370 °C'dir. Kaplama kalınlığı



artıkça yüzey sıcaklığının arttığı ve termal bariyer sayısının artması ile yüzey sıcaklığının düştüğü görülmüştür.

İkinci çözümlemede yapılan alüminyum esaslı dizel motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek sıcaklık 272 °C, tek termal bariyer kaplı piston için 356 °C, dört termal bariyer kaplı piston için 323 °C'dir. Kaplama kalınlığı arttıkça yüzey sıcaklığı artmakta ve termal bariyer sayısı artıkça yüzey sıcaklığı düşmektedir. Demir esaslı pistonu göre alüminyum esaslı pistondaki sıcaklıkların daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

### **5.2.11. Dizel motor pistonu**

Bu tez çalışması kapsamında yapılan demir esaslı dizel motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek sıcaklık 330 °C, tek termal bariyer kaplı piston için 391 °C, dört termal bariyer kaplı piston için 370 °C'dir. Kaplama kalınlığı arttıkça yüzey sıcaklığının arttığı ve termal bariyer sayısının artması ile yüzey sıcaklığının düştüğü görülmüştür.

İkinci çözümlemede yapılan alüminyum esaslı dizel motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek sıcaklık 272 °C, tek termal bariyer kaplı piston için 356 °C, dört termal bariyer kaplı piston için 323 °C'dir. Kaplama kalınlığı arttıkça yüzey sıcaklığı artmakta ve termal bariyer sayısı artıkça yüzey sıcaklığı düşmektedir. Demir esaslı pistonu göre alüminyum esaslı pistondaki sıcaklıkların daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Termal bariyer kaplamalarda katmanların birbirinden ayrılması sonucu oluşan ara yüz çatlakları ile birlikte sıcak ortama ilk maruz kalan kaplamanın en üst yüzeyinde ve ara tabaka yüzeylerine dik kenar çatlakları da görülmektedir. Bu çatlakların oluşmasında rol oynayan gerilim kaplamanın en üst yüzeyinde, merkezden dışa doğru teğetsel gerilimdir. Teğetsel gerilmelerde tekil bir nokta yoktur ve gerilimler pistonun yanma havuz duvarında ve dış kenarlara doğru artmakta ve diğer bölgelerde azalmakta olduğu görülmüştür. Bu nedenle kaplamanın bu bölgelerinde yüzeye dik

çatların oluşma ihtimali yüksektir. Yine termal bariyerde kaplama sayısının artması ile teğetsel gerilim değerinin düşmekte olduğu görülmüştür.

Katmanlı termal bariyer kaplamalarda görülen en önemli problem katmanlar arasındaki ısıl genişleme sabitinin farklı olması nedeniyle ortaya çıkan termal gerilmelerdir. Bu gerilmelerin düşey olanları, çalışma yapılan dizel motor pistonunda yanma havuz duvarı ve piston dış yüzeyine doğru kesişim noktalarında çok yüksek değerlere ulaşmakta ve katmanların birbirinden ayrılmasına sebep olmakta ve bundan dolayı ara yüz kenar çatlakları oluşmaktadır. Bu çatlaklar zamanla ilerleyerek katmanların dökülmesine ve sistemin işleyişinin bozulmasına neden olmaktadır. Düşey gerimler ne kadar küçük olursa ara yüz kenar çatlaklarının oluşma ihtimali o kadar az olacaktır. Tek katmanlı kaplama ile alt metal tabakanın kesiştiği yanma havuz duvarı ve piston dış yüzeyine doğru düşey gerilimde çok büyük bir sıçrama vardır. Gerilme kaplamanın alt katmanı ile en alt metal tabakanın kesiştiği noktadır. İkinci yüksek gerilme ise kaplamanın üst katmanı ile alt katmanın kesiştiği noktalardır. Burada dikkat edilmesi gereken sıçrama (düşey gerilim) sayısı artmasına rağmen büyüklükleri tek katmanlı kaplamadaki sıçramaya göre oldukça düşüktür. Buda katmanların ayrılmasını ve ara yüz kenar çatlaklarının oluşma ihtimalini düşürmektedir. Beş katmanlı kaplamada beş tane düşey gerilim sıçraması görülmektedir. Bu tekil gerilmeler her katmanın bir diğeri ile kesiştiği yanma havuzu duvarı ve piston dış yüzeylerine doğru görülmektedir. Bu sıçramaların hepsinin büyüklükleri iki ve tek katmanlı kaplamalarda görülen sıçramalardan çok daha düşüktür. Buradan çıkabilecek sonuç katman sayısı arttıkça sıçrama sayısının arttığı ve düşey gerilmelerin büyüklüklerinin azaldığıdır. Bu şekilde güvenli termal bariyer kaplamaları elde edilmektedir.

Termal bariyer kaplamalarda katmanlar arasında ayrılmalar ve çatlaklar meydana gelmesine neden olan diğeri bir gerilim kayma gerilimidir. Analizi yapılan dizel motor pistonunda kayma gerilme değerleri piston merkezinde, yanma havuz çukurunda ve kenarında artmaktadır. Tek katmanlı kaplamada kayma gerilme değeri artmakta ve beş katmanlı kaplamada gerilme değerinin düştüğü görülmektedir.

Termal bariyer kaplamalarda katmanların birbirinden ayrılması sonucu oluşan ara yüz çatlakları ile birlikte sıcak ortama ilk maruz kalan kaplamanın en üst yüzeyinde ve ara tabaka yüzeylerine dik kenar çatlakları da görülmektedir. Bu çatlakların oluşmasında rol oynayan gerilim radyal gerilimdir. Radyal gerilmelerde tekil bir nokta yoktur ve gerilimler pistonun merkezinden, yanma havuz çukuru ve kenarında artmakta ve diğer bölgelerde azalmakta olduğu görülmüştür. Bu nedenle kaplamanın üst yüzeyinde merkeze yakın ve yanma havuz bölgesinde yüzeye dik çatlakların oluşma ihtimali yüksektir. Yine termal bariyerde kaplama sayısının artması ile yatay gerilim değerinin düşmekte olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışma sonunda piston üzerindeki termal bariyer kaplamanın merkez ve yanma havuz çukuru ve duvarında eşdeğer gerilme değerlerinin arttığı görülmüştür. Alüminyum esaslı piston malzemesinin demir esaslı piston malzemesine göre daha çok gerilmenin oluştuğu görülmüştür. Termal bariyer katman sayısının artması ile gerilme değerlerinin azaldığı görülmüştür.

#### **5.2.11.1. Teğetsel gerilim dağılımları ( $\sigma_{\theta}$ )**

Demir ve alüminyum esaslı dizel motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek teğetsel gerilme değeri tek termal bariyer kaplı alüminyum esaslı piston için 153,515 MPa, dört termal bariyer kaplı alüminyum piston için 84,43 MPa olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça radyal gerilme değeri artmış ve termal bariyer sayısının artması ile radyal gerilme değerinin düştüğü görülmüştür.

#### **5.2.11.2. Radyal (Yatay) gerilimlerin dağılımı ( $\sigma_r$ )**

Demir ve alüminyum esaslı dizel motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek radyal gerilme değeri tek termal bariyer kaplı alüminyum esaslı piston için 143 MPa, dört termal bariyer kaplı alüminyum piston için 38 MPa olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça radyal gerilme değeri artmış ve termal bariyer sayısının artması ile radyal gerilme değerinin düştüğü görülmüştür.

### 5.2.11.3. Eksenel (Düsey) gerilimlerin dağılımı ( $\sigma_z$ )

Demir ve alüminyum esaslı dizel motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek eksenel gerilme değeri tek termal bariyer kaplı alüminyum esaslı piston için 138 MPa, dört termal bariyer kaplı alüminyum piston için 130 MPa olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça eksenel gerilme değeri artmış ve termal bariyer sayısının artması ile eksenel gerilme değerinin düştüğü görülmüştür.

### 5.2.11.4. Kayma gerilimlerinin dağılımı ( $\sigma_{rz}$ )

Demir ve alüminyum esaslı dizel motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek kayma gerilme değeri tek termal bariyer kaplı alüminyum esaslı piston için 74 MPa, dört termal bariyer kaplı alüminyum piston için 70 MPa olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça kayma gerilme değeri artmış ve termal bariyer sayısının artması ile kayma gerilme değerinin düştüğü görülmüştür.

### 5.2.11.5. Eşdeğer (Von Mises ) gerilme dağılımı

Demir ve alüminyum esaslı dizel motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek Von Mises gerilme değeri tek termal bariyer kaplı alüminyum esaslı piston için 153 MPa, dört termal bariyer kaplı alüminyum piston için 145 MPa olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça Von Mises değeri artmış ve termal bariyer sayısının artması ile Von Mises değerinin düştüğü görülmüştür.

## 5.2.12. Benzinli motor pistonu

### 5.2.12.1. Radyal (Yatay) gerilimlerin dağılımı ( $\sigma_r$ )

Benzinli alüminyum esaslı motor pistonuna termal yüklerle elde edilen en yüksek sıcaklık 246 °C, tek termal bariyer kaplı piston için 341 °C, dört termal bariyer kaplı piston için 256 °C'dir. Kaplama genişliğini 13.2, 11.2, 9.2, 7.2, 5.2 mm aralığına kadar değiştirilmiş ve kaplama üst yüzey sıcaklığını 5°C'nin altında bir değişimle azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Buda kaplama genişliğinin artırılması sonucunda piston

sıcaklığının fazla bir değişime uğramadığını göstermiştir. Kaplama kalınlığı 0.7, 0.5, 0.4, 0.3 mm aralığında değiştirilmiş ve kaplama kalınlığı arttıkça yüzey sıcaklığının, eşdeğer gerilmelerin arttığı ve piston sıcaklığının düştüğü görülmüştür. Kalınlığa bağlı olarak değişen termal bariyer kaplama ve ara bağ kaplaması arasında meydana gelen gerilmeler kalınlıkla ters orantılı olarak eşdeğer gerilmeler azalmıştır. Termal bariyer sayısı arttıkça üst yüzey sıcaklığı düşmekte ve oluşan gerilme değerleri azalmaktadır.

Alüminyum esaslı benzinli motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek radyal gerilme değeri tek termal bariyer kaplı alüminyum esaslı piston için 163 MPa, dört termal bariyer kaplı alüminyum piston için 37 MPa olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça radyal gerilme değeri artmış ve termal bariyer sayısının artması ile radyal gerilme değerinin düştüğü görülmüştür.

#### **5.2.12.2. Eksenel (Düşey) gerilmelerin dağılımı ( $\sigma_z$ )**

Alüminyum esaslı benzinli motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek eksenel gerilme değeri tek termal bariyer kaplı alüminyum esaslı piston için 222 MPa, dört termal bariyer kaplı alüminyum piston için 52 MPa olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça eksenel gerilme değeri artmış ve termal bariyer sayısının artması ile eksenel gerilme değerinin düştüğü görülmüştür.

#### **5.2.12.3. Kayma gerilmelerinin dağılımı ( $\sigma_{rz}$ )**

Alüminyum esaslı benzinli motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek kayma gerilme değeri tek termal bariyer kaplı alüminyum esaslı piston için 145 MPa, dört termal bariyer kaplı alüminyum piston için 36 MPa olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça kayma gerilme değeri artmış ve termal bariyer sayısının artması ile kayma gerilme değerinin düştüğü görülmüştür.

#### 5.2.12.4. Eşdeğer (Von Mises ) gerilme dağılımları

Alüminyum esaslı piston motor pistonu üzerindeki termal yükleme ile elde edilen en yüksek Von Mises gerilme değeri tek termal bariyer kaplı alüminyum esaslı piston için 302 MPa, dört termal bariyer kaplı alüminyum piston için 59 MPa olarak elde edilmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça Von Mises değeri artmış ve termal bariyer sayısının artması ile Von Mises değerinin düştüğü görülmüştür.

Motor dizaynında kullanılacak olan piston, layner, supap ve kaverlerin termal bariyer kaplama sonrasında ağırlık yönünden de daha hafif olacağı sonuçlarına ulaşılmıştır. Bundan dolayı termal bariyer kaplamalı malzemelerde oluşan hafiflik, doğrusal hareket eden parçalarda, dairesel hareket eden turbo rotorları gibi parçalarda ortaya çıkan dinamik ve motor iç kuvvetlerinin azaltılmasında dizaynda doğrudan etkili olacaktır. Hacimsel kazanımlarda Daha hafif motordan veya taşıttan sağlanan daha fazla güç, güç yoğunluğu artışı sağlar. Isı kayıplarının azaltılması sebebiyle sıkıştırma ile ateşlenen motorlarda sıkıştırma sonu gaz sıcaklığı artacağından daha kolay ilk hareket sağlanır. Tutuşma gecikmesinin azaltılmasıyla da, kontrolsüz yanmadan kaynaklanan vuruntu ve gürültü azalarak daha sessiz çalışma imkanı elde edilir.

## KAYNAKLAR

- [1] YAŞAR, H., “Termal Bariyer Kaplamanın Türbo Doldurmalı Bir Dizel Motorunun Performansına Etkileri”, İTÜ, Doktora Tezi, Mart 1997.
- [2] PARLAK, A., “Aşırı Doldurmalı Seramik Kaplı Bir Dizel Motorunda Optimum Püskürtme Avansı ve Sıkıştırma Oranının Deneysel Olarak İncelenmesi”, SÜ. Doktora Tezi, Sakarya Eylül 2000.
- [3] LEISING, C.J., “PUROHIT, G.P., “Waste Heat recovery IN Truck Engines” SAE National West Coast Meeting, California, 1983.
- [4] BÜYÜKKAYA, E., “Bir Dizel Motorunda Seramik Kaplama Uygulamaları ve Performans Analizi”, İTÜ. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul 1994.
- [5] HOCKING, M.G., VASATASREE, V., SIDKY, P.S., “Metallic and Ceramic Coatings, Production High Temperature and Applications”, London 1989.
- [6] KAMO, R., BRYZIK, W., “Cummins/TACOM Advanced Adiabatic Engine”, SAE International Congress, Michigan, 1984.
- [7] GARBINCIUS, G., BARTULIS, V., PECELIUNAS, R., PUKALSKAS, S. “The Influence Of Coolant Scale Deposit Inside The İnternal Combustion Engine On The Piston And Cylinder deformations,” ISSN 1648-4142 Transport, 2005.
- [8] ERŞAN, M.N., “Seramik Kaplı Dizel Motor Pistonun Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Yapısal ve Termal Analizi,” SAÜ fen Bilimleri Enstitüsü, Y.Lisans Tezi, 2004.
- [9] SAFGÖNÜL,B., “MOTORLARIN YAPISI VE TASARIMI” İTÜ, 1998
- [10] WILLARD, W.P., “Engineering Fundamental of Internal Combustion Engine,” Prentice Hall.
- [11] FERGUSON, C.R., “Internal Combustion Engines”, New York: Willey, 1986.
- [12] TAYLOR, C.F., “Internal Combustion Engine in Theory and Practice,” Cambridge, MA: M.I.T.Press, 1977.

- [13] BRYZIK, W., KAMO, R., “TAKOM/Cummings Adiabatic Engine Progrme”, SAE İnternational Congress, Michiman, 1983.
- [14] WOODS, M.E., And ODA I., “PSZ Ceramics for Adiabatic Engine Componenet”, SAE İnternational Congress, Michiman, 1983.
- [15] ÇEVİK, İ., “Zirkonya Esaslı Seramik Kaplamanın Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerinin Değiştirilmesi”, Doktora Tezi, İTÜ, 1990.
- [16] CHURCHILL, R. A., SMITH, J. E., CLARK, N. N. VE TURTON, R.A., “Low-Heat Rejection Engines\_A Concept Review,” Society of Automotive Engineers, Sayfa:25-36
- [17] LUMBY, R.J., HODGSON, P., COTHER, N.E., ve SZWEDA, A., “Syalon Ceramics for Advenced Components,” SAE 850521.
- [18] TIKIZ, İ., “Seramik Kaplı Bir Dizel Motorunda Isı Transferi Olayının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Analiz,” SAÜ fen Bilimleri Entitüsü, Y.Lisans tezi, 2004
- [19] RAO, S.S., The Finite Element Method in Engineering Second Edition, Pergamon Pres, Oxfor, 1988.



## ÖZGEÇMİŞ

Suat CEYLAN, 02.02.1977 de Ereğli' de doğdu. İlk, orta eğitimini Ayrancı/Karaman İlinde, 1994 yılında Karaman Teknik Lisesi, Makine Bölümünden mezun oldu. 1996 yılında başladığı Erciyes Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünü 2002 yılında bitirdi. 2007 yılında Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, M.T.İ. Bölümüne girdi ve 2009 yılında mezun oldu. 2002–2003 yılları arasında Silver Fab./Kayseri'de mühendis olarak çalıştı. Bu süre içerisinde şirketin yeni ürün projeleri yanı sıra verimlilik projeleri ve toplam kalite yönetimi projelerinde aktif rol aldı. Şu anda Gölcük Tersanesi Kom.lığı 240 Baş Müh.liğinde, Makine Dizayn Şube Müdür yardımcısı olarak görev yapmaktadır.