

# Thermal Analysis of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and SiC Coatings Combustion of a Diesel Engine Piston 3D Finite Element Method

Erdinc Vural (Corresponding author)  
Bitlis Eren University, Faculty of Engineering and Architecture, 13000-Bitlis, Turkey.  
E-mail: erdinc009@hotmail.com

## Abstract

In this study, computer-aided modeling program that SolidWorks software 3D modeled an internal combustion diesel piston (AlSi) and layered binding call on the piston (NiCoCrAlY) on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and SiC thermal barrier by coating with a material, thermal analysis in SolidWorks Simulation software It is made. Soil work / simulation program made to assign materials and mathematical model has been developed. In the thermal analyses of thermal barrier coated pistons compared to standard pistons, an increase of 32-34% was determined in the combustion chamber temperature of the piston, a decrease of 16-18% was determined in the pin housing of piston and a decrease of 34-39% was determined in the piston skirts.

**Key Words:** 3D Models with Diesel Piston, Piston Ceramic Coating, Thermal Analysis.

## 3D Sonlu Elemanlar Yöntemi Kullanarak İçten Yanmalı Bir Dizel Motor Pistonunun Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> ve SiC Kaplamalarının Termal Analizi

### Özet

Bu çalışmada, bilgisayar destekli modelleme programı olan solidworks programında 3D olarak modellenen içten yanmalı bir dizel pistonu (AlSi) ve bu piston üzerine ara bağlama tabakalı (NiCoCrAlY) üzerine, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> ve SiC termal bariyer malzemesi ile kaplama yapılarak, solidworks simülasyon programında termal analizleri yapılmıştır. Solidwork/simülasyon programında malzeme ataması yapılmış ve matematiksel modeli oluşturulmuştur. Standart piston, termal bariyer kaplama yapılmış pistonlar ile karşılaştırılarak termal analizleri incelenmiştir. Termal bariyer kaplama yapılmış pistonların, standart pistonlara oranla termal analizlerinde, piston yanma odası sıcaklıklarında %32 ile %34 oranında artış, piston pim yuvalarında %16 ila %18 ve piston etek kısımlarında %34 ila %39 azalma tespit edilmiştir.

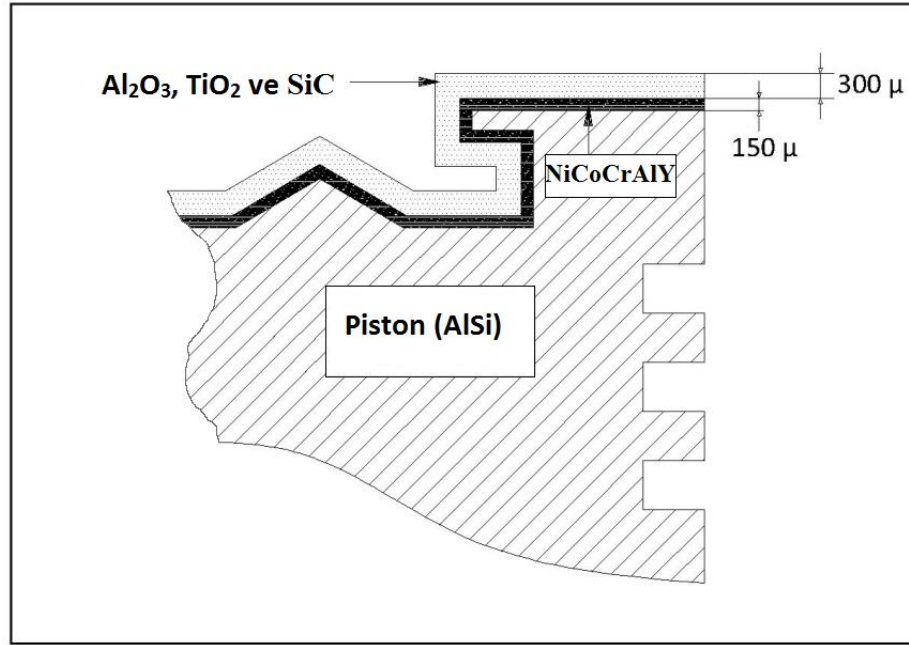
**Anahtar Kelimeler:** 3D Modellenmiş Dizel Piston, Piston Seramik Kaplama, Termal Analiz.

### 1. Giriş

Hızlı gelişen teknolojiyle birlikte yüksek performanslı malzemelere olan ihtiyaçlarda artmaktadır. Bu yüksek performanslı malzemelerin kullanıldığı alanların bir tanesi de içten yanmalı motorlardır [1]. İçten yanmalı motorlarda yanma reaksiyonunun gerçekleştiği, gücün üretildiği yer yanma odasıdır. İçten yanmalı motorların yanma odası elemanlarının (silindir gömleği, supap, piston, piston kafası vs) yüzeylerinde yanma reaksiyonu sonucunda ve özellikle yanmayan yakıtın birden yanması ile meydana gelen termal şok, basınç ve yanmış gazların olumsuz etkileri kimyasal aşınmaya ve deformasyona sebep olmaktadır. Oluşan bu kimyasal aşınma belli bir süre sonra malzemenin mekanik ömrü azaltmakta, motorda performans düşüklüğü, yakıt tüketimi artışı ve emisyon değerlerinde kötüleşmeye sebep olmaktadır. Yanma odası elemanlarının yüzey deformasyonlarını engellemek yanma olayı esnasındaki kimyasal erozyonun ana malzeme yüzeyine direkt olarak temas etmesini engellenmesiyle mümkün olmaktadır [2]. Yanma odasının en önemli parçalarından biri pistondur. Pistonlar içten yanmalı



Dizel motor pistonunun 3D modellemesinde standart piston malzemesi olarak alüminyum silisyum (AlSi) esaslı olarak, solid-work bilgisayar programında malzeme atamasında tanımlanmıştır. Gerçek kaplama koşulları göz önüne alınarak, ara bağlayıcı malzemesi olarak 150  $\mu$  kalınlığında NiCoCrAlY malzemesi kaplanmış ve sonrasında 300  $\mu$  kalınlığında  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  ve SiC malzemeleri ile kaplama işlemi ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Gerçek kaplama koşullarında kaplanacak malzemelerin, kaplama malzemesi kadar yüzeyinden taşlanması gerekmektedir. Bu nedenle malzemenin tüm boyu, kaplama sonrasında da değişmemiştir. Termal bariyer kaplamanın şematik resmi Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. Termal bariyer kaplanmış piston ve kaplamaların şematik resmi.

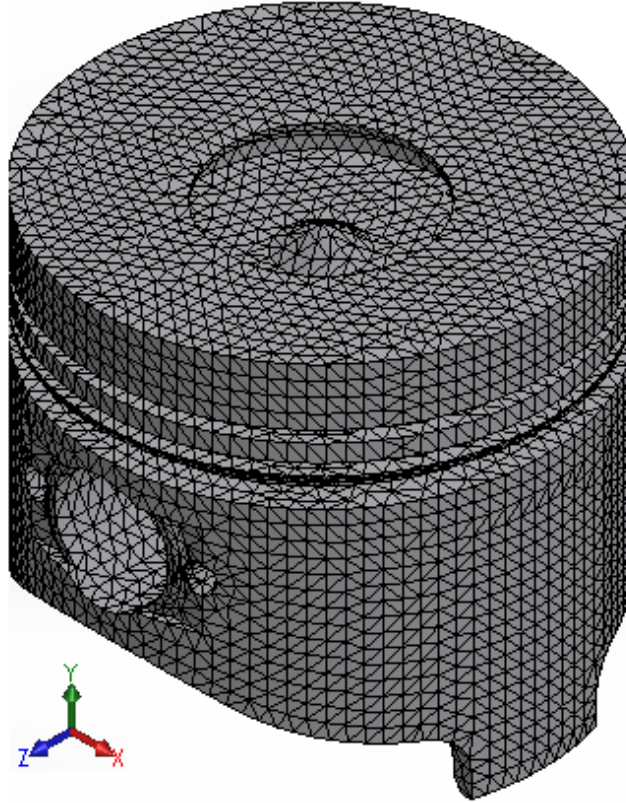
Analiz öncesinde, kaplama yapılan malzemeler Solid-Work programında yeni malzeme tanımlaması yapılmıştır. Standart piston (AlSi), ara bağlayıcı tabaka (NiCoCrAlY) ve seramik kaplama malzemelerinin özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Dizel motor pistonu ve kaplama malzemelerinin özellikleri.

Material Properties	Piston (AlSi) [9] [10]	Ara Bağ Kaplama (NiCoCrAlY) [11] [12]	$Al_2O_3$ [13]	$TiO_2$ [14]	SiC [15]
Elastikiyet modülü (GPa)	69	225	375	282	476
Poisson’s oranı	0.33	0.30	0.22	0.27	0.19
Termal iletkenlik (W/mK)	155	6.0	35	11.7	41
Termal genleşme katsayısı ( $10^6[1/^\circ C]$ )	21	12	7.4	9.2	5.12
Yoğunluk ( $kg/m^3$ )	2700	7320	3890	4000	3210
Öz ısı ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ )	960	501	880	711	750

### 3. Piston Termal Analizi

İçten yanmalı tek silindirli bir dizel motor pistonu Solidworks programında 3D olarak modellenmiştir. Modellenen dizel motoru "Solidworks simulation" programında "MESH" komutu ile matematik modeli oluşturulmuştur. Mesh komutu ile modellenen piston Şekil 3'te görülmektedir. Dizel motor pistonu Solidworks Simulation programında AISi malzemesi olarak tanımlanarak malzeme ataması yapılmıştır. Termal analizler öncesinde pistonun içten yanmalı motorda yanmanın başladığı anda kabul edilmiştir. Yağ filmi ve yağın ısı iletim katsayısı ihmal edilmiştir.

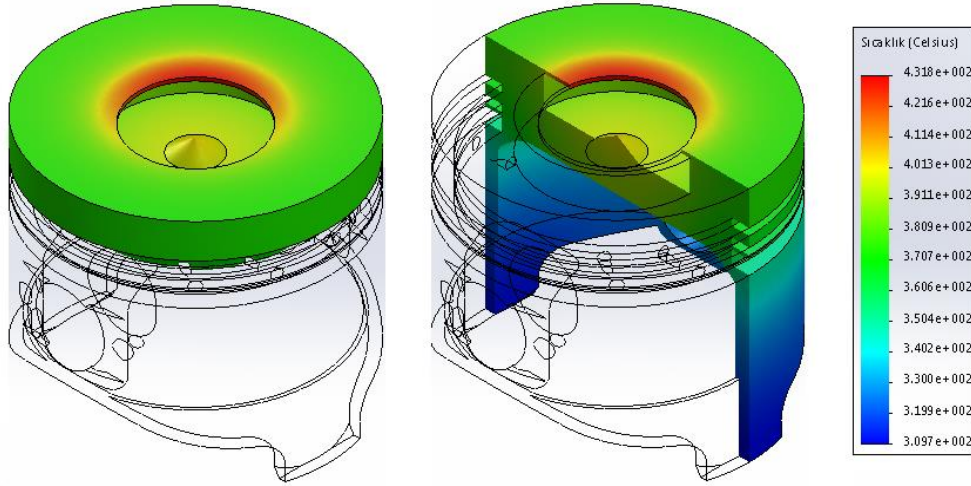


Şekil 3. Dizel piston matematiksel modeli (MESH).

Tek silindirli dört zamanlı dizel motorların silindir içi sıcaklık değişimleri ile ilgili değerler birçok literatür çalışmasında yer almaktadır [16] [17] Yapılan literatür araştırmalarında, yazarların geçmiş deneyimleri ve ölçümleri esas alınarak, termal analizler yapılmıştır. Bu araştırmalar doğrultusunda pistonu ısı transfer sistemi yani konveksiyonel şekilde termal analiz yapılmıştır. Dizel pistonu uygulanan konveksiyonel şekildeki ısılarda, Piston yanma odası sıcaklığı 650 °C ve 800 W/m<sup>2</sup>K, Piston Yanal yüzey sıcaklığı 300 °C ve 230 W/m<sup>2</sup>K, Piston segman yuva sıcaklığı 160 °C ve 200 W/m<sup>2</sup>K, Piston etek ve pim sıcaklıkları 85 °C ve 60 W/m<sup>2</sup>K olarak tanımlanmıştır [12] [18].

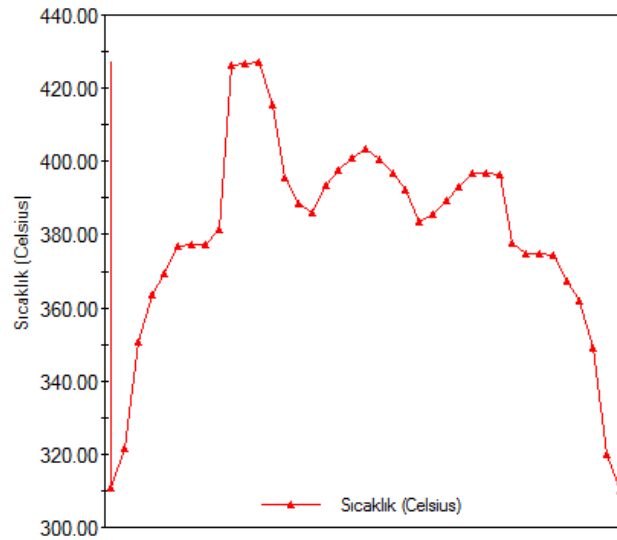
### 4. Bulgular ve Tartışmalar

Standart dizel motor pistonu solid works ortamında 3 boyutlu olarak tasarlanmış ve solidworks simülasyon programında, AISi malzemesi olarak tanımlanarak termal analizleri yapılmıştır. Sonrasında ise standart piston boyu değişmeden termal bariyer kaplama malzemesi ile kaplama yapılarak, aynı şartlarda termal analizleri yapılmıştır. Yapılan tüm termal analizler, şekilsel ve grafiksel olarak sonuçları elde edilmiştir. Termal bariyer kaplamalı pistonlar, standart piston ve kendi aralarında kıyaslama yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Bu sayede standart piston ile kaplama yapılmış dizel pistonların sıcaklık altındaki termal karakteristikleri daha net gözlenmektedir. Standart dizel motor pistonuna uygulanan termal analizi Şekil 4'de görülmektedir.



Şekil 4. Standart AISi alaşımlı pistonun sıcaklık dağılımı.

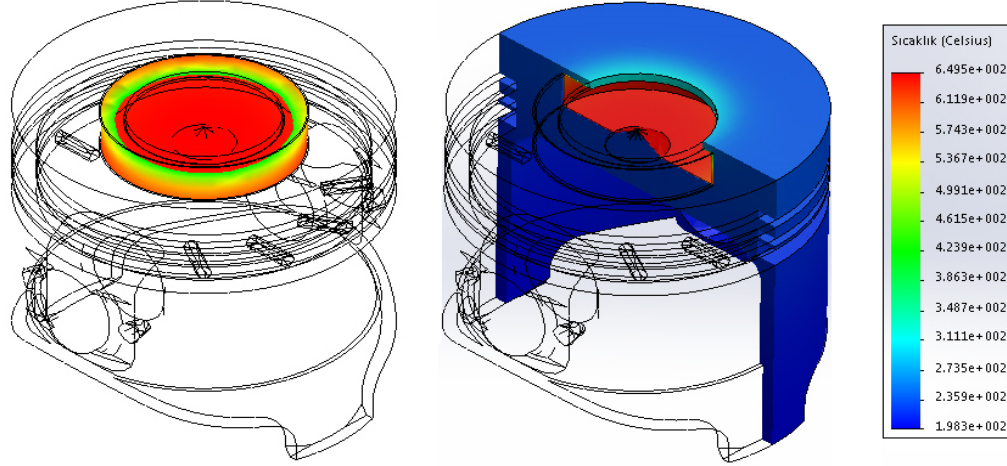
Standart dizel motor pistonunun ısı iletim katsayısı  $155 \text{ W/mK}$ 'dir [9] [10]. Isı iletim katsayısı, bir malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısına bağlı olarak o malzemenin ısıyı ne kadar ilettiğinin ifadesidir. Standart dizel motor pistonunun ısı iletim katsayısının yüksek olması, yanma odasından başlayan sıcaklığın, piston eteklerine kadar iletimini hızlandırmaktadır. Şekil 4 incelendiğinde, sıcaklık dağılımının piston tepesinde yoğunlaştığı görülmektedir. Aynı zamanda piston tepesinde görülen sıcaklık değeri, piston eteklerine kadar iletilmektedir. En yüksek sıcaklık, piston yanma odası üst cidar kenarlarında  $431,8 \text{ }^\circ\text{C}$  olarak görülmektedir. En düşük sıcaklık ise piston etek ucunda  $286,3 \text{ }^\circ\text{C}$  olarak tespit edilmiştir. Piston tepesinde oluşan termal stres'in % 66,31'i piston eteklerine kadar iletilmiştir. Bu da piston eteklerine etkiyen ısının motor yağ ömrünü etkilediğini bildirmektedir [19]. Piston pim yuvasında tespit edilen sıcaklık  $330 \text{ }^\circ\text{C}$  ile  $350 \text{ }^\circ\text{C}$  arasında değişen sıcaklıklar tespit edilmiştir. Piston tepesinde oluşan termal sıcaklığın %77 ile %82 'isini piston pim yuvasına kadar ilettiği tespit edilmiştir.



Şekil 5. Standart AISi alaşımlı pistonun dış referans yüzeyden alınan sıcaklık noktaları.

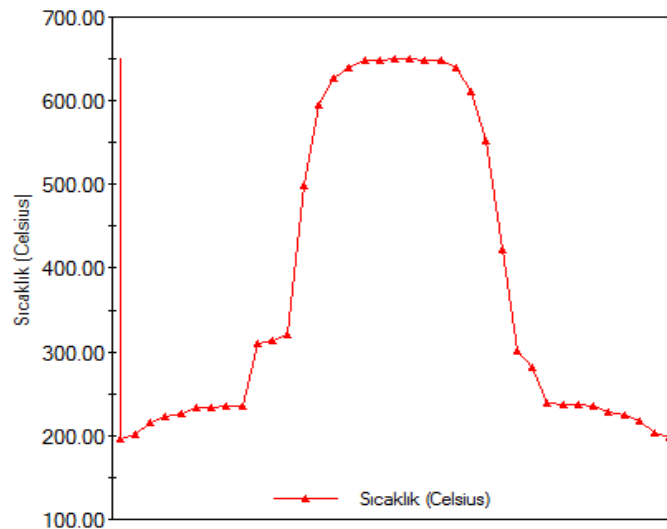
Standart dizel motor pistonunun yüzey sınır sıcaklık değişimleri Şekil 5'te grafiksel olarak görülmektedir. Şekil 5 incelendiğinde, yakıtın püskürtülerek yanmanın gerçekleştiği piston yüzeyindeki, piston oyuğu alanın, dayanma yüzeyine yakın imal edildiğinden pistonun bu bölgede sıcaklığının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca sıcaklığın piston tepesinde yoğunlaştığı ve piston tepe, piston segman yuvaları,

piston pim yuvasında yakın sıcaklıklar tespit edilmiştir. Isı iletim katsayısının da yüksek olması, yanma odasında gerçekleşen yanma sıcaklığının, piston eteklerine kadar iyi iletildiği görülmektedir. Şekil 6'da NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı  $Al_2O_3$  kaplamasının dizel piston üzerindeki termal analizi görülmektedir. Oksit esaslı seramik malzemelerin başında, yaygın olarak bulunması ve ucuz olması nedeniyle alümina ( $Al_2O_3$ ) gelmektedir. Sert bir refrakter malzeme olan  $Al_2O_3$ , iyi korozyon direnci göstermektedir. Günümüzde kullanılan mühendislik seramik malzemeler grubu içerisinde  $Al_2O_3$ 'ün payı % 85'dir [20].



Şekil 6. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı,  $Al_2O_3$  kaplamalı pistonun termal analizi.

$Al_2O_3$  malzemesinin ısı iletim katsayısı 35 W/mK'dır [13], ara kaplama tabakasına sahip (NiCoCrAlY) malzemesinin ısı iletim katsayısı ise 6.0 W/mK olarak belirlenmiştir [11] [12]. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı  $Al_2O_3$  kaplamalı dizel pistonun yapılan termal analizlerde, piston oluşunda termal stresin yoğunlaştığı görülmektedir. Sıcaklık termal bariyer kaplamadan dolayı piston oluşunda hapsolmuştur. Standart dizel pistonun oranla sıcaklık piston oluşunda daha yüksek görülürken, piston segman, pim ve eteklerinde daha düşük sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Piston etek noktasından başlayarak piston dış yüzey sınırları boyunca alınan sıcaklıkların değişimi grafiksel olarak Şekil 5'te görülmektedir.

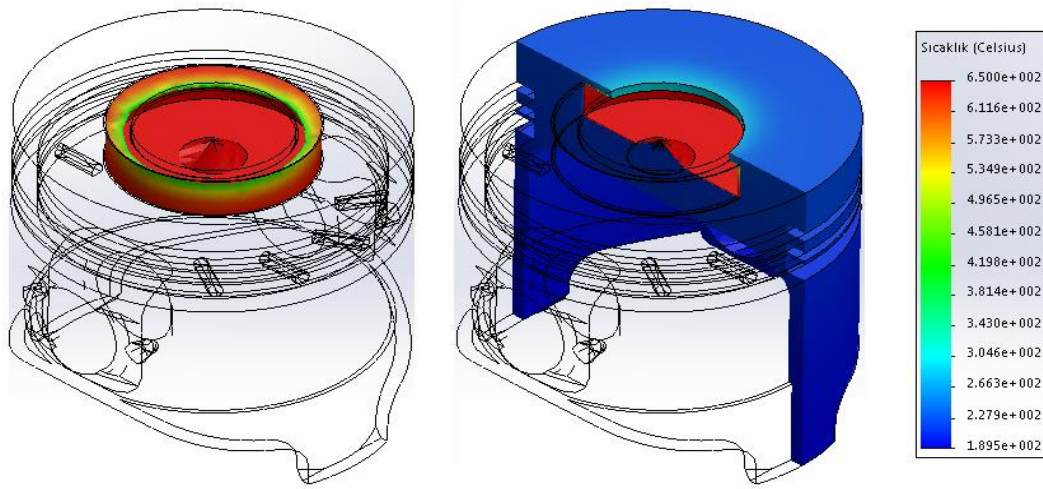


Şekil 7. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı,  $Al_2O_3$  kaplamalı dizel pistonun dış referans yüzeyden alınan sıcaklık noktaları.

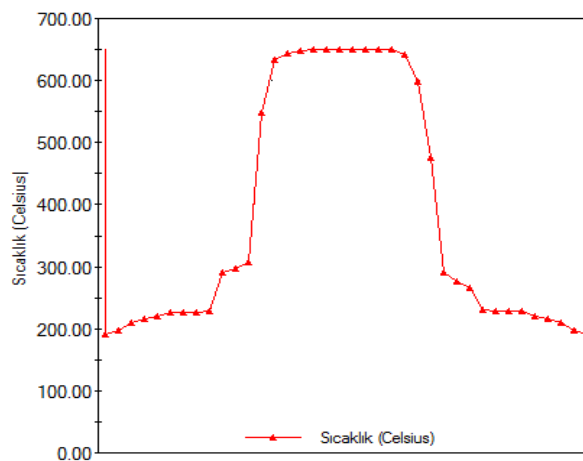
NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı,  $Al_2O_3$  kaplamalı dizel pistonun en yüksek sıcaklık değeri, piston yanma odası sivri noktasında 649,5 °C olarak, en düşük sıcaklık ise 196,8 °C olarak tespit edilmiştir.

Dizel pistonunun en yüksek sıcaklıkların görüldüğü yanma odasından, en düşük sıcaklığın görüldüğü piston eteklerine kadar sıcaklığın % 30,03'ünü aktarmıştır. Buda piston yüzeyinde oluşan termal stresi azalttığı görülmüştür. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalı dizel pistonu standart pistona oranla en yüksek sıcaklıkta % 33,51 °C daha yüksek, piston pim yuvasında %17,64 °C daha düşük sıcaklık ve piston eteklerinde %35,97 °C daha düşük sıcaklık tespit edilmiştir. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamalı dizel piston üzerindeki en yüksek sıcaklık, standart pistona oranla yüksek olmasına karşın kaplamalı bir yüzey olduğundan sıcaklık stresi kaplama yüzeyine etki etmiş, AISI alaşımlı dizel piston üzerine daha az termal stres gözlemlenmiştir.

Şekil 7'de NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı TiO<sub>2</sub> kaplamasının dizel piston üzerindeki termal analizi görülmektedir. Titanyum, fiziksel ve kimyasal açıdan üstün özellikler gösteren bir metaldir. Ancak elde edilmesi ve işlenmesi çok zor olduğundan metal olarak kullanılması, çok özel alanlarla sınırlıdır. Titanyumun mineralleri ve TiO<sub>2</sub> boya, kâğıt üretimi, seramik ve cam endüstrisi, uzay ve havacılık endüstrisi, savunma sanayi ile tıp alanında geniş kullanıma sahiptir [14].



Şekil 8. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı, TiO<sub>2</sub> kaplamalı dizel pistonun dış referans yüzeyden alınan sıcaklık noktaları.



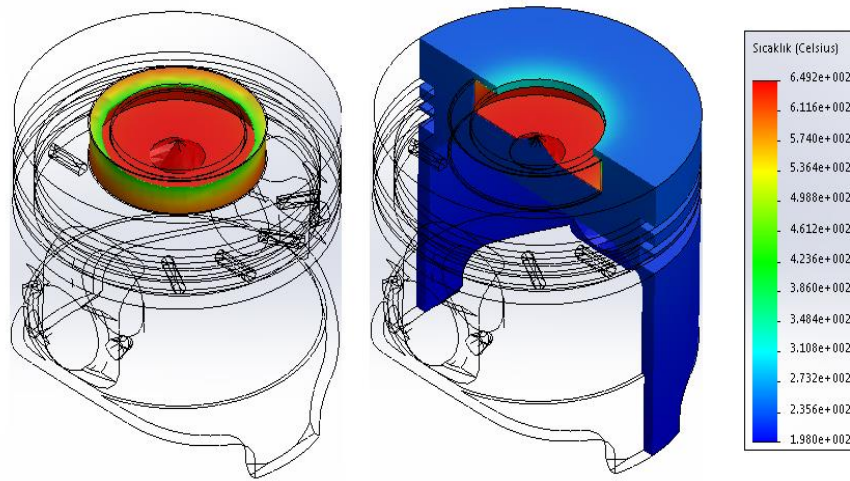
Şekil 9. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı, TiO<sub>2</sub> kaplamalı dizel pistonun dış referans yüzeyden alınan sıcaklık noktaları.

TiO<sub>2</sub> malzemesinin ısı iletim katsayısı 11,7 W/mK'dır [14]. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı TiO<sub>2</sub> kaplamalı dizel pistona yapılan termal analizlerde, dizel piston yanma odasında yoğunlaşmıştır. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı TiO<sub>2</sub> kaplamalı pistonda sıcaklığın piston yanma odasına hapsediği,

piston yanma odasında yoğunlaşan sıcaklık, piston yanal yüzeylerinde, segman, pim ve piston eteklerinde termal stresin azaldığı gözlemlenmiştir. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı TiO<sub>2</sub> kaplamalı dizel pistonunun etek noktasından başlayarak piston dış yüzey sınırları boyunca alınan sıcaklıkların değişimi grafiksel olarak Şekil 7'de görülmektedir.

NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı, TiO<sub>2</sub> kaplamalı dizel pistonun en yüksek sıcaklık değeri, piston yanma odası sivri noktasında 650 °C olarak, en düşük sıcaklık ise 189,5 °C olarak tespit edilmiştir. TiO<sub>2</sub> kaplamalı dizel pistonun en yüksek sıcaklıkların görüldüğü yanma odasından, en düşük sıcaklığın görüldüğü piston eteklerine kadar sıcaklığın % 29,5'ini aktarmıştır. Buda piston malzemesi olan AlSi alaşımly yüzeylere uygulanan termal streslerin azaldığı gözlemlenmiştir. TiO<sub>2</sub> kaplamalı dizel pistonu standart pistona oranla en yüksek sıcaklıkta % 33,56 °C daha yüksek, piston pim yuvasında %17,94 °C daha düşük sıcaklık ve piston eteklerinde %38,81 °C daha düşük sıcaklık tespit edilmiştir. Standart dizel pistona oranla yanma odasında termal stres artarken, AlSi alaşımly dizel piston üzerine etkileyen stresi azaltmıştır.

Şekil 10'da NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı SiC kaplamasının dizel piston üzerindeki termal analizi görülmektedir. Silisyum karbür (SiC) kuvvetli kovalent bağ yapısına sahip yapay bir malzemedir. SiC sert, ısıya dayanıklı, ayrıca korozyona karşı yüksek dayanım göstermektedir. Bu yüzden yaygın olarak hem aşındırıcı hem de refrakter olarak kullanılmaktadır. SiC, aşındırıcı, deoksidasyon ve alaşım malzemesi olarak, refrakter malzemesi olarak genellikle çubuk ve tüp şeklindeki ürünler olarak elektrikli fırınlarda, dökme demirin erimesi sırasında SiC ilavesi karbürizasyon ve silikanizasyona yardım eder. Aynı zamanda çekirdeklendirici görevini görerek dökme demirin kalitesinin artırılmasında ve kaymalı yataklar gibi alanlarda kullanılmaktadır [1].

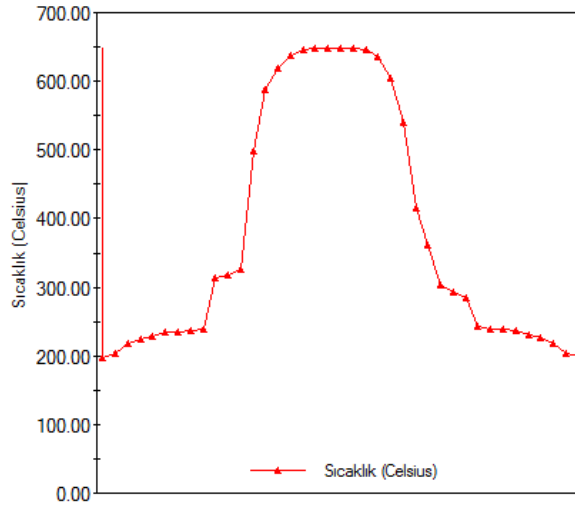


Şekil 10. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı, SiC kaplamalı dizel pistonun dış referans yüzeyden alınan sıcaklık noktaları.

SiC malzemesinin ısı iletim katsayısı 41 W/mK'dır [15]. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı SiC kaplamalı dizel pistona yapılan termal analizlerde, yüksek sıcaklıklar piston yanma odasında görülmektedir. SiC'li termal kaplamada yüksek sıcaklıklar yanma odasında hapsedilmiş, piston yanal yüzeylerinde, segman, pim ve piston eteklerinde termal stresin azaldığı gözlemlenmiştir. SiC termal bariyer kaplamalı dizel pistonunun etek noktasından başlayarak piston dış yüzey sınırları boyunca alınan sıcaklıkların değişimi grafiksel olarak Şekil 11'de görülmektedir.

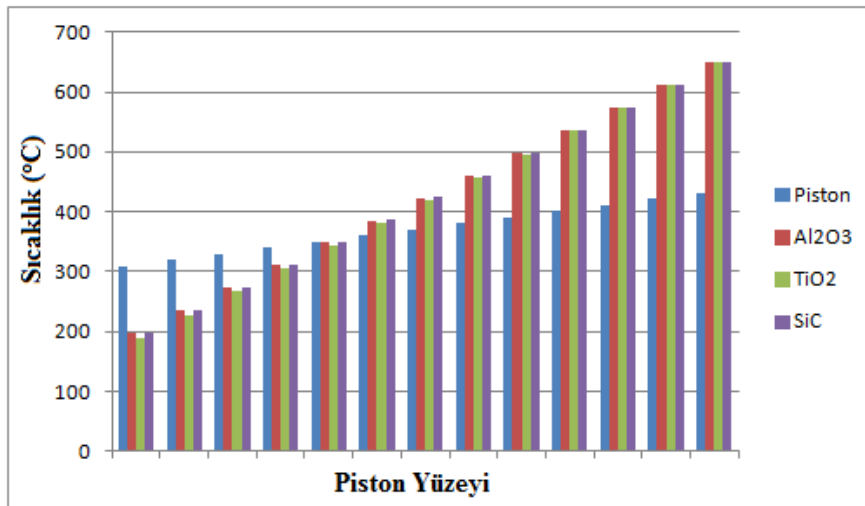
NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı, SiC kaplamalı dizel pistonun en yüksek sıcaklık değeri, piston yanma odası sivri noktasında 649,2 °C olarak, en düşük sıcaklık ise 198 °C olarak tespit edilmiştir. SiC kaplamalı dizel pistonun en yüksek sıcaklıkların görüldüğü yanma odasından, en düşük sıcaklığın görüldüğü piston eteklerine kadar sıcaklığın % 30,49'unu aktarmıştır. SiC kaplamalı dizel pistonu standart pistona oranla en yüksek sıcaklıkta % 33,48 °C daha yüksek, piston pim yuvasında %17,58 °C daha düşük sıcaklık ve piston eteklerinde %36,06 °C daha düşük sıcaklık tespit edilmiştir. Standart dizel pistona oranla yanma odasındaki sıcaklıklar artarken, AlSi alaşımly dizel piston üzerindeki sıcaklık oranlarında azaltma tespit edilmiştir.





Şekil 11. NiCoCrAlY ara kaplama tabakalı, SiC kaplamalı dizel pistonun Malzemelerin Dış Referans Yüzeyden Alınan Sıcaklık Noktaları.

Şekil 12'de standart piston ve kaplamalı malzemelerin yüzey sıcaklık değişim grafiği genel olarak verilmektedir. Grafik incelendiğinde en yüksek sıcaklık ve en düşük sıcaklık değerleri termal bariyer kaplamalı malzemelerde görülmektedir. Standart piston sıcaklığı 300 °C ile 450 °C arasında değişirken, termal bariyer kaplamalı malzemelerde 180 °C ile 650 °C arasında değişmektedir.



Şekil 12. Dizel Piston Yüzeyine Etkileyen Sıcaklık Değerleri

Şekil 12'deki grafik incelendiğinde en yüksek sıcaklığın görüldüğü TiO<sub>2</sub> kaplamalı pistonun: piston yanma odasındaki sıcaklığı standart pistonla oranla %33.56, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e oranla %0,769, SiC'e oranla %0,123 daha yüksek sıcaklık, piston pim yuvasında, standart pistonla oranla %19.30, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e oranla %2,16, SiC'e oranla %2,52 daha düşük sıcaklık, piston eteğinde, standart pistonla oranla %38.81, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>'e oranla %3.7, SiC'e oranla %4.29 daha düşük sıcaklık tespit edilmiştir.

## 5. Sonuçlar

Dizel motor pistonunda yapılan termal analizlerde, termal bariyer kaplı pistonlar genel olarak, standart pistona oranla, piston tepesinde %30 ile %35 arasında daha yüksek sıcaklık, piston pim yuvasında %15 ile %17 oranında ve piston etek kısımlarında %55 ile %39 arasında değişen daha düşük sıcaklıklar elde edilmiştir. Termal bariyer kaplamalı dizel pistonlardaki en yüksek sıcaklıklar, piston yanma odasında görülmektedir ve sıcaklıklar kaplama yüzeyinde stres oluşturmaktadır.  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$  ve SiC malzemeleri sıcaklık ve termal streslere karşı dayanıklı seramik tabanlı malzemeler olduğundan, piston ana malzeme yüzeyindeki termal stresleri üzerine çekerek, standart piston malzemesi olan AlSi malzeme üzerine fazla etkilememiştir. Buda standart pistonun sıcaklıktan kaynaklı malzeme yorulmasını önleyerek ömrünü uzatacağı, ayrıca piston eteklerinde görülen daha düşük sıcaklıklar ise motor sıcaklığını etkileyeceğinden, motor yağ ömrünü uzatacağı, soğutma sistemi yükünün azaltacağı düşünülmektedir [21] [22].

Bu sonuçlar doğrultusunda, çift kaplama tabakası ile deney sonuçları incelenebilir. Seramik tabanlı termal kaplama malzemelerin stabile olmuş malzemeleri ile deneyleri incelenerek sonuçlar karşılaştırılabilir. Tutuşma sıcaklığı yüksek olan yakıtlar ile motor test dinamometresinde motor performans ve egzoz emisyon sonuçları araştırılarak, termal bariyer kaplamaların yakıtlara göre davranışları belirlenebilir.

## Kaynaklar

- [1] Vural E (2014). Tek Silindirli Dizel Motora Uygulanan Seramik Kaplamaların Motor Performans ve Egzoz Emisyonlarına Etkisinin İncelenmesi. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği A.B.D., Karabük Üniversitesi, Karabük.
- [2] Gurbuz H, Gokkaya H (2014). Termal Bariyer Kaplamanın Motor Yakıt Sarfiyatı Egzoz Sıcaklığı ve Emisyonlara Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 20, Sayı 1, Denizli.
- [3] Uyaroglu A, Yucesu HS, Citak R (2010). Piston Arızalarının Analizi, Selçuk Üniversitesi, Journal of Technical-Online Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Volume 9, Number:2, Konya.
- [4] Crouse WH (1970). Automotive Engine Design. New York: Mc Graw Hill, Book Publishing, New York.
- [5] Heisler H (1999). Vehicle And Engine Technology 2nd ed. SAE International, London.
- [6] Silva FS (2006). Fatigue on engine pistons – A compendium of case studies, Engineering Failure Analysis 13 480–492.
- [7] Zhou H, Yi D, Yu Z, and Xiao L (2007). Preparation and thermophysical properties of CeO<sub>2</sub> doped La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> ceramic for thermal barrier coatings. J. Alloys Compds, 438: 217–221.
- [8] Afrasabi A, Saremi M, and Kobayashi A (2007). A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Mater Sci Eng A., 478 (1-2): 264-269.
- [9] Cerit M (2011). Thermo mechanical analysis of a partially ceramic coated piston used in an SI engine. Surface and Coatings Technology, Volume 205, Issue 11, Pages 3499–3505.
- [10] Cerit M, Ayhan V, Parlak A, Yasar H (2011). Thermal analysis of a partially ceramic coated piston: Effect on cold start HC emission in a spark ignition engine, Appl. Therm. Eng. 31 (2–3) 336.
- [11] Khor KA, Gu YW (2000). Effects of stress on the performance of plasma sprayed functionally graded ZrO<sub>2</sub>/NiCoCrAlY coatings. Materials Science and Engineering: A, Volume 277, Issues 1–2, 31, Pages 64–76.
- [12] Helmisyah AJ, Abdullah S and Ghazali MJ (2011). Structure Integrity Analysis of Piston Crown Against Thermal Stress For Compressed Natural Gas Direct Injection Engine. Regional Tribology Conference, Bayview Hotel, Langkawi Island, 22-24, Malaysia.
- [13] Erisim tarihi: 05 Temmuz 2015, [http://www.ferroc ceramic.com/alumina\\_99\\_table.htm](http://www.ferroc ceramic.com/alumina_99_table.htm)
- [14] Ozel S (2009). Alüminyum alaşımı ve bronzu yüzeyine oksit ve karbür bileşiklerinin plazma sprey

- yöntemiyle kaplanmasının araştırılması. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [15] Shackelford JF, Alexander W (2001). Frontmatter” Materials Science and Engineering Handbook Ed. James F. Shackelford & W. Alexander Boca Raton: CRC Press LLC.
- [16] Wang X, Zhao H, Xie H (2015). Effect of piston shapes and fuel injection strategies on stoichiometric stratified flame ignition (SFI) hybrid combustion in a PFI/DI gasoline engine by numerical simulations. *Energy Conversion and Management*, Volume 98, Pages 387–400.
- [17] Sroka ZJ (2012). Thermal load of tuned piston. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 12, 342 – 347.
- [18] Stang JH (1978). Designing adiabatic engine components. SAE Paper, vol. 780069.
- [19] Brouwer MD, Gupta LA, Sadeghi F, Peroulis D, Adams D, (2012). High temperature dynamic viscosity sensor for engine oil applications. *Sensors and Actuators A: Physical*, Volume 173, Issue 1, Pages 102–107.
- [20] Kaya AO (2007). Plazma püskürtme ve HVOF yöntemleri kullanılarak, Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr(75/25) ve CrNiBSi+%80 WC-Co tozlarıyla kaplanan çeliğin yapısı ve yüzey özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [21] Azadi M, Baloo M, Farrahi GH, Mirsalim SM (2013). A review of thermal barrier coating effects on diesel engine performance and components lifetime. *International Journal of Automotive Engineering* Vol. 3, Number 1.
- [22] Vedharaj S, Vallinayagam R, Yang WM, Chou SK, Chua KJE, Lee PS (2014). Experimental and finite element analysis of a coated diesel engine fueled by cashew nut shell liquid biodiesel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 53, Pages 259–268.