

**TERMAL BARIYER KAPLAMANIN DİZEL MOTOR  
PERFORMANS VE EMİSYONLARINA ETKİSİNİN  
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**2011  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Hüseyin GÜRBÜZ**

**TERMAL BARIYER KAPLAMANIN DİZEL MOTOR PERFORMANS VE  
EMİSYONLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Hüseyin GÜRBÜZ**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
ŞUBAT 2011**

Hüseyin GÜRBÜZ tarafından hazırlanan "TERMAL BARIYER KAPLAMANIN DİZEL MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARINA ETKİSİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Ünvanı, Adı ve Soyadı

.....  

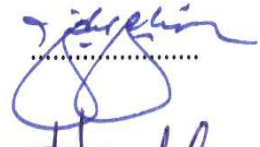

Tez Danışmanı, Doç. Dr. Hasan GÖKKAYA Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında. Yüksek Lisans / Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 04/02/.2011

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Doç. Dr. Yakup SEKMEN (KBÜ)

.....  


Üye : Doç. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

.....  


Üye : Yrd. Doç. Dr. Hakan GÜRÜN (GÜ)

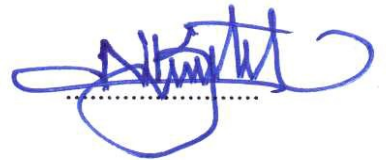
.....  


Tarih .... / .... / 2011

KBÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Bu tez ile Yüksek Lisans/Doktora derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

.....  


*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Hüseyin GÜRBÜZ

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **TERMAL BARIYER KAPLAMANIN DİZEL MOTOR PERFORMANS VE EMİSYONLARINA ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

**Hüseyin GÜRBÜZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Doç. Dr. Hasan GÖKKAYA**

**Şubat 2011, 51 sayfa**

İçten yanmalı motorlarda motor performansını iyileştirme ve kirlenici emisyonları azaltma yöntemlerinin biride yanma odası elamanlarının termal bariyer amaçlı bir malzeme ile kaplanmasıdır. Bu çalışmada, tek silindirli bir dizel motorun yanma odası elamanları olan piston, silindir kapağı ve supaplar Plazma Sprey (PS) kaplama tekniği kullanarak,  $Al_2O_3-ZrO_2$  (%20-80) ve  $Al_2O_3-TiO_2$  (%87-13) seramik malzemeleri ile kaplanmıştır. Toplam Termal Bariyer Kaplama (TBK) kalınlığı 0,3 mm'dir. Elde edilen düşük ısı kayıplı motorda seramik malzemelerin motor performans ve emisyonlara olan etkisi incelenmiştir. Kaplamalı motorun standart motora göre moment, güç ve ısıl veriminde artış, özgül yakıt tüketiminde azalma belirlenmiştir. Ayrıca, kirlenici emisyonlarda (CO ve HC) azalma görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler** : Termal bariyer kaplama, dizel motor performansı, emisyonlar.

**Bilim Kodu** : 914:1.090

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECTS OF THE THERMAL BARRIER PLATING OVER DIESEL ENGINE PERFORMANCE AND EMISSIONS**

**Hüseyin GÜRBÜZ**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA**

**January 2011, 51 pages**

One of the processes to improve the engine performance and to reduce the pollutant emissions in combustion engines is plating the combustion chamber elements with a material as a thermal barrier. In this, study, piston, cylinder cover and valves, which are the combustion chamber elements of a one-cylinder diesel engine, were plated with  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  (%20-80) ve  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  (%87-13) ceramic materials using Plasma Spray (PS) plating technique. Total thermal barrier plating (TBP) thickness is 0.3 mm. The effect of ceramic materials on the engine performance and emissions in the gained engines with low heat dissipation was studied. When compared to the standard engine, in the plated engine an increase in moment, power, heat performance and a decrease in specific fuel consumption was found. Also, a decrease in pollutant emissions (CO ve HC) was found.

**Key Words** : Thermal barrier plating, diesel engine performance, emissions.

**Science Code** : 914.1.090

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmamın her aşamasında öneri ve eleştirileriyle bana yol göstererek manevi destek veren, tez maliyetini üstlenip maddi her türlü olanağı sunarak çalışmalarımın şekillenmesini ve tamamlanmasını sağlayan değerli hocam Doç. Dr. Hasan GÖKKAYA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın deney aşamasında, tezin yazımı ve sonuçların yorumlanmasında görüşlerinden yararlandığım, değerli zamanlarını ayıran sayın hocam Doç. Dr. Yakup SEKMEN'e içten teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana her türlü manevi desteklerini esirgemeyip güç ve destek veren sevgili annem Nuriye GÜRBÜZ'e ve bütün aileme sonsuz teşekkür ederim.

Deneylerin yapım aşamasında yardımcı olup emeği geçen tüm arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
BÖLÜM 1. ....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. ....	4
TERMAL BARIYER KAPLAMA.....	4
2.1. TERMAL BARIYER KAPLAMA YÖNTEMLERİ .....	6
2.1.1. Plazma Sprey .....	6
2.1.2. Alev Sprey Kaplama .....	8
2.1.2.1. Alevle Toz Sprey Kaplama .....	9
2.1.2.2. Alevle Tel Sprey Kaplama .....	10
2.1.3. CVD Kaplama.....	10
2.1.4. PVD Kaplama .....	10
2.1.5. Yüksek Hızlı Oksi Yakıt Püskürtme .....	11
2.1.6. Detonasyon Tabancası Tekniği.....	12
2.1.7. Sol-Jel Kaplama .....	12
2.1.8. Elektrik Ark Sprey .....	12
2.2. TERMAL BARIYER KAPLAMA MAZEMELERİ .....	13



BÖLÜM 3. ....	16
LİTARETÜR ARAŞTIRMASI.....	16
BÖLÜM 4. ....	24
METARYAL VE METOT.....	24
4.1. DİZEL MOTOR VE ÖZELLİKLERİ .....	24
4.2. DİNAMOMETRE .....	26
4.3. SICAKLIK VE YAKIT ÖLÇÜMÜ .....	26
4.4. EGZOZ GAZ ANALİZÖRÜ .....	28
4.5. KAPLANAN MOTOR PARÇALARI .....	28
4.6. KAPLAMA MALZEMELERİ .....	29
4.7. DENEY DÜZENEGİ VE YÖNTEMİ.....	31
BÖLÜM 5. ....	33
DENEY SONUÇLARI .....	33
5.1. KAPLAMALARIN MOTOR PERFORMANSINA ETKİLERİ.....	33
5.1.1. Motor Momenti ve Gücü .....	33
5.1.2. Efektif Verim .....	36
5.1.4. Yakıt Tüketimi .....	37
5.1.5. Egzoz Gazı Sıcaklığı.....	39
5.2. KAPLAMALARIN EMİSYONLARA ETKİSİ .....	40
5.2.1. CO Emisyonu.....	40
5.2.4. HC Emisyonu.....	41
BÖLÜM 6. ....	43
SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER.....	43
KAYNAKLAR.....	45
ÖZGEÇMİŞ.....	51

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Genel bir TBK sistemi .....	4
Şekil 2.2. PS prosesinin şematik gösterimi .....	7
Şekil 2.3. Seramik kaplama ve bağlayıcı katman .....	8
Şekil 2.4. Alev püskürtme tabancası .....	9
Şekil 2.5. Alevle toz Püskürtme .....	9
Şekil 2.6. HVOF tabancasının şematik gösterimi .....	11
Şekil 3.1. Seramik kaplamanın özgül yakıt tüketimine etkisi .....	17
Şekil 3.2. NO <sub>x</sub> emisyonunun kaplama ile değişimi .....	18
Şekil 3.3. Egzoz sıcaklıklarının kaplama ile değişimi .....	19
Şekil 3.4. Seramik kaplamanın CO emisyonlarına etkisi.....	20
Şekil 4.1. Deneilerde kullanılan Solax 178FE dizel motor görüntüsü. ....	24
Şekil 4.2. Kullanılan test ünitesi görüntüsü. ....	25
Şekil 4.3. Kullanılan elektrikli fren dinamometre görüntüsü .....	26
Şekil 4.4. Egzoz sıcaklık ölçüm cihaz görüntüsü. ....	27
Şekil 4.5. Yakıt ölçme tüpü.....	27
Şekil 4.6. MRU Delta 1600L emisyon ölçüm analizör cihazı görüntüsü. ....	28
Şekil 4.7. Yanma odası elemanlarının kaplama yapılmadan önceki görüntüsü.....	29
Şekil 4.8. Yanma odası elemanlarının talaş kaldırıldıktan sonraki görünüşleri. ....	31
Şekil 4.9. Deney düzeneğinin şematik görünümü .....	31
Şekil 5.1. Kaplamanın motor momentine etkisi .....	34
Şekil 5.2. Kaplamanın motor gücüne etkisi .....	35
Şekil 5.3. Kaplamanın efektif verime etkisi.....	37
Şekil 5.4. Kaplamanın özgül yakıt tüketimine etkisi. ....	38
Şekil 5.5. Kaplamanın egzoz sıcaklığının etkisi.....	39
Şekil 5.6. Kaplamanın CO emisyonuna etkisi. ....	40
Şekil 5.7. Kaplamanın HC emisyonuna etkisi. ....	42

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Bazı yüksek teknoloji seramiklerinin özellikleri.....	15
Çizelge 4.1. Deneyde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri. ....	25
Çizelge 4.2. MRU Delta 1600L emisyon cihazının özellikleri .....	28

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$b_e$	: Özgül Yakıt Tüketimi
$P_e$	: Efektif güç
$NO_x$	: Azot Oksit
HC	: HidroKarbon
CO	: Karbon Monoksit
$CO_2$	: Karbon dioksit
$Al_2O_3$	: Alüminyum Oksit
$ZrO_2$	: Zirkonyum Oksit
NiCrAl	: Nikel Krom Aliminyum
MgO	: Magnezyum Oksit
BeO	: Berilya Oksit
Ar	: Argon
$Al_2O_3$	: Alümina
$ZrO_2$	: Zirkonya
MgO	: Magnezya
BeO	: Berilya
$Si_3N_4$	: Silisyum Nitrür
SiC	: Silisyum Karbür
BC	: Bor Karbür
BN	: Bor Nitrür
$Ti_2B$	: Titanyum Borür
MCrAlY	: Nikel-krom-alüminyum-itriyum
Al	: Alüminyum
$H_2$	: Hidrojen
$N_2$	: Azot

CH <sub>4</sub>	: Metan
CO	: Karbon Monoksit
NO <sub>x</sub>	: Azotoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
HC	: HidroKarbon
Al <sub>2</sub> -TiO <sub>5</sub>	: Alüminyum-Titanat
Ti	: Titanyum
TiN	: Titanyum Nitrür

## KISALTMALAR

CVD	: Kimyasal Buhar Çöktürme
KSZ	: Kısmi stabilize Zirkonya
PVD	: Fiziksel Buhar Çöktürme
TBK	: Termal Bariyer Kaplama
IBO	: Isıyla Büyüyen Oksit
DG	: Detonasyon Tabancası
IP	: Reaktif iyon Kaplama
HIP	: Sıcak İzostatik Presleme ile Kaplama
EBE	: Elektron Hüzme Buharlaştırmasıyla Kaplama.
HVOF	: Yüksek hızlı oksit-yakıt püskürtme
PS	: Plazma sprej
APS	: Atmosfer Plazma sprej
IPS	: İnert Plazma sprej
VPS	: Vakum plazma sprej
DİK	: Düşük Isı Kayıplı
SKM	: Seramik Kaplı Motor
NM	: Normal motor
AZ	: $Al_2O_3-ZrO_2$
AT	: $Al_2O_3-TiO_2$
STDM	: Standart Deney Motorunun
KSZ	: Kısmi stabilize zirkonya

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Değişen dünya şartlarında artan enerji ihtiyacı ve gelişen teknolojinin enerjiye bağımlılığı, bu enerjiyi karşılayacak kısıtlı olan hammadde ve fosil yakıt kaynaklarını tehlike altına sokmaktadır. Bu tehlike bilim adamlarını mevcut kaynakları daha verimli bir şekilde kullanmaya yöneltmektedir. Son yıllarda, bilim adamları tarafından içten yanmalı motorların yanma odası elemanlarının (piston, supap, silindir ve silindir gömleği) yüzey karakteristiklerini değiştirme, güç ve performans artırma ve zararlı emisyonları azaltma konularında, geniş ve önemli çalışmalar yapılmıştır. Yanma odası elemanlarına uygulanan yüzey kaplama işlemleri ile mevcut malzemelerin yüzey kalitesi artmakta, çalışma ömürleri uzamakta ve ağır çalışma şartlarına dayanıklı hale getirmektedir.

Dizel motorların çalışma şartları sonucunda; yanma odası elemanlarının yüzeyinde yüksek sıcaklık, termal şok, yüksek basınç, düzensiz termal gerilimler, kimyasal aşınma, sürtünme gibi istenmeyen etkenler meydana gelmektedir. Bu etkenler malzeme yüzeyinde hasarlara sebep olarak yüzey kalitesini düşürmektedir. Bunlara bağlı olarak motor performansı ve verimi azalırken, kalitesiz bir yanma ve yanma odası elemanlarının aşınmaları sonucu emisyon değerlerinin yükselmesine neden olarak doğaya ve atmosfere zarar verir hale gelmektedir. Bir süre sonrada malzemenin mekanik ömrü azalacaktır. Meydana gelen bu olumsuz etkileri engellemede yada gidermede en etkin çözüm yollarından biri olarak yüzey yenilemeleri ve değişimleri görülmektedir. Bu çözüm yollarından en uygun yöntemlerden biri malzemenin yüzeyini seramik bir kompozit malzemeyle kaplayarak ana malzeme üzerinde termal ve fiziksel bir bariyer oluşturmak olacaktır [1].

Yapılan birçok araştırmada, motor tasarımında yapılabilecek yeni ekler ile motorun verimini iyileştirilebileceği görülmüş ve bu düşünce günümüzde de oldukça önem kazanmış durumdadır. Bir içten yanmalı motorun performansını artırabilmek için yapılması gereken, kullanılan toplam enerjinin mümkün olduğunca faydalı enerji haline dönüştürülmesi gerekmektedir [2]. İçten yanmalı bir motorda kullanılabilir enerjinin %30-40 civarında olduğu bilinmektedir. Geri kalan kısmının bir miktarı, motor parçalarını yüksek sıcaklıktan korumak amacıyla yapılmış olan soğutma sistemi için harcanır, geri kalan kısmı ise ortalama 400-600°C sıcaklıktaki egzoz gazlarına geçerek atmosfere atılırlar [3-5].

Termal bariyer kaplamalar (TBK), türbinlerde verimi artırmak, yakıt ekonomisi sağlamak ve taban malzemenin çalışma, kullanılabilirlik ve ömrünü uzatmak amacıyla kullanılır [6]. TBK kavramı; süper alaşım altlığı, ana parçaya ısı transferini engelleyecek veya azaltacak sıcaklık yalıtımı sağlayan seramik bir üst kaplamayı, seramik üst kaplamanın metalik altlığa yapışmasını sağlayan ve altlığı oksitlenmeye karşı koruyan bir bağ kaplamayı içermektedir [7]. Isı transferini engellemek amacıyla yapılan termal bariyer kaplamalarda bu katmanların toplam kalınlığı ince ve kalın olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Genelde, 0,5mm'ye kadar olan kaplamalar ince, 5-6mm'ye kadar olanlar kaplamalar ise, kalın kaplamalar olarak isimlendirilmektedir. İnce TBK'lar gaz türbinlerinde, benzinli ve dizel motorlarının piston tepesi, silindir kapağı ve supapların kaplanmasında kullanılır [3,8-9].

TBK'larda, kaplama malzemesi olarak genelde seramik alaşımlı birçok malzeme kullanılır. Kullanıldığı yere göre seramik kaplamalardan ısı yalıtımı, yorulma dayanımı, sürtünmeye karşı direnç vb. gibi beklenen özellikler değişmektedir [10]. Dizel motorlarında kaplama malzemesi olarak seramik malzeme kullanılmasının nedeni; yanma odasındaki ısı kaybını azaltmak, buna ağlı olaraktan soğutma sistemine giden enerjiyi düşürmektir. İleri teknoloji seramik malzemelerin daha da gelişmesiyle beraber motor soğutma sisteminin ortadan kaldırılması hedeflenmektedir. Soğutma sistemi elemanları olan pompa, vantilatör, su ceketleri, radyatör ve benzerlerinin ortadan kaldırılması ile motor ağırlığında ve parça maliyetinde azalma ile motor gücünde artma beklenmektedir [4].



Termal bariyer kaplamada, yanma odasından, silindir cidarlarından ve soğutucu ile transfer olan kayıp ısıyı azaltma amacı vardır. Bu kayıp ısı, en fazla soğutma suyu sıcaklığının azalması ile gerçekleşeceğinden soğutma suyu ile temas halinde olan motor bloğunun, silindir kapağı ile çevrimin gerçekleştiği silindir ve pistonun soğumasını sağlamaktadır. Silindir duvarının sıcaklığının azalması, silindir etrafını dolanan soğutma suyuna geçen ve kayıp enerji olarak nitelendirilen ısı enerji oranının artmasına neden olmaktadır. Böylelikle, sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklığının dolayısıyla fren ortalama efektif basıncının azalmasına ve yakıt sarfiyatının artmasına neden olmaktadır [11-12]. TBK ile elde edilen yalıtım sonucunda faydalı güçte artış, kaybolan sıcaklıkta ise azalma olmaktadır [6].

Termal bariyer kaplı motorlarda, soğutma sisteminin küçültülmesi veya ortadan kaldırılması ısı kaybı ve tutuşma gecikmesindeki azalma ile birlikte özgül yakıt tüketimi de azalmaktadır. Daha küçük tutuşma gecikmesi ve daha düşük sıkıştırma oranı ile çalışmaya imkan vermektedir. Böylelikle daha yüksek bir mekanik verim elde edilmekte ve yakıt ekonomisinde de iyileşme elde edilmektedir [8].

Bu çalışmada, termal bariyer kaplama malzemesi olarak seramik kullanımı sonucunda kaplamanın motor performansına ve emisyonlara etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Dizel motorun çalışma şartlarında uygulanabilirliği mümkün olan, yanma odası elamanları piston, silindir kapağı ve supapların ısı geçirgenliği düşük seramik tozlar ile  $Al_2O_3-ZrO_2$  – (%20-80) ve  $Al_2O_3-TiO_2$  – (%87-13) 0,3 mm kalınlığında Plazma Sprey (PS) kaplama tekniği ile kaplanmıştır. Kaplama malzemelerin birleşim ve birleşim oranı olarak ilk defa kullanılmış olması çalışmamızı özgün hale getirmiştir. Kaplama işlemi piston, silindir kapağı ve supaplara uygulanmıştır. Çalışmamızda her bir kaplama malzemesinin farklı yanma odası elamanlarına uygulanması yanma odasının aynı şartlar altında kalmasını sağlamıştır.

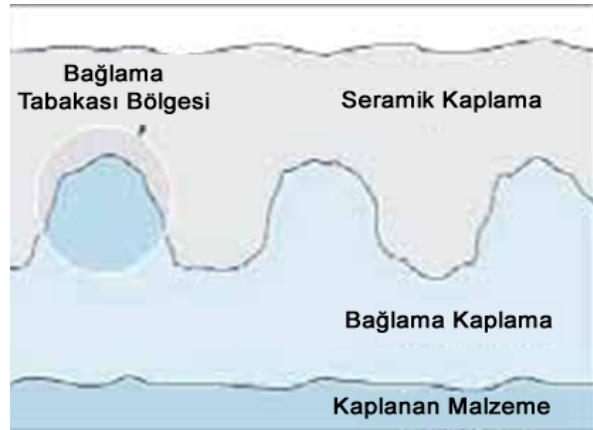
Kaplamasız motor ve kaplamalı motorlar aynı şartlarda test edilmiştir. Elde edilen verilere göre kaplamaların performans parametrelerine ve emisyonlara etkileri karşılaştırılıp sonuçlar ayrı ayrı mukayese edilerek uygulanan kaplamaların hangisinin daha uygun olduğu araştırılmıştır.

## BÖLÜM 2

### TERMAL BARIYER KAPLAMA

Termal bariyer kaplamaların temel amacı gaz türbini, dizel motor gibi yüksek sıcaklık koşullarında çalışan sistemlerin metalik bileşenlerini yüksek sıcaklıktan kaynaklanan olumsuzluklara karşı korumaktır. Termal bariyer kaplamalar sayesinde metalik bileşenlerin yüzey sıcaklığını, kaplamanın kalınlığına ve termal özelliklerine bağlı olarak 100-300 °C civarında düşürmek mümkündür. Sıcaklıktaki bu azalma, metalik bileşenlerin yüksek sıcaklıklardaki oksitlenme hızı ve mekanik mukavemeti göz önüne alındığında oldukça önemli bir değerdir [13].

Termal bariyer kaplamalar genel olarak; kaplanacak malzeme, seramik kaplama ve aralarında bulunan bağlayıcı tabakadan oluşmaktadır [4]. Termal Bariyer kaplamada en çok kullanılan malzeme %6-8 itriyum ile stabilize edilmiş zirkonya seramiğidir. Genel bir TBK sistemi Şekil 2.1’de görüldüğü gibidir [4].



Şekil 2.1. Genel bir TBK sistemi [4].

Kaplama malzemesinin düşük ısı iletkenliği çok önemlidir. Kaplama malzemesi ana malzemeyi yüksek ısıdan, korozyondan ve asidik ortamdan koruyabilecek özellikte olmalıdır. Üst kaplama malzemesi olumsuz şartlar altındaki ortama doğrudan olarak

maruz kaldığı için zamanla yıpranmakta ve üzerinde oluşan gerilmeler ana parçaya da bir yük getirmektedir. Artan yüzey sıcaklığı seramiğin yüksek sıcaklık kararlılığını olumsuz yönde etkiler veya sinterlenmeyi arttırarak kaplamanın ısı iletkenliğini artırır [14]. İtiryum oksit ile kısmen kararlı hale getirilmiş zirkonyum oksit kaplamalar, dönen türbin parçaları üzerinde en dayanıklı kaplama olma özelliğine sahiptirler [14-15].

Ana parçanın malzemesi ile kaplama malzemesinin ısıl genişleme kat sayıları bir birine, sonradan oluşan yüksek sıcaklıktan dolayı genişmelerin kaplama malzemesine ve ana parçaya zarar vermemesi için yakın olmalıdır. Bağlama katmanının görevi seramik katman ile taban malzeme arasındaki uyumsuzluğu azaltarak daha iyi bir bağlanma sağlamaktadır. Bağlanma katmanının üzerine seramik katman atılması sırasında ara yüzeyde Isıyla Büyüyen Oksit (IBO) tabakası oluşur ve bu tabaka metalik katman ile seramik katmanın birbirine bağlanmasını sağlar. Oluşan oksidin bileşimi  $Al_2O_3$ 'tür ve ısıya maruz kaldıkça kalınlığı artar [16]. Yüksek sıcaklık ve sıcak gaz korozyonuna dirençli olabilmek için metaller, uzun süre boyunca IBO oluşumunu sağlayacak ve altlık alaşımında tükenmeye neden olmayacak kadar yüksek Al içeren bir tabakayla kaplanır. Bağ kaplama olarak adlandırılan bu tabaka ayrıca metal ve seramiğin farklı genişleme katsayılarının ayarlanmasına da yardımcı olur [17].

Termal bariyer kaplamanın içindeki metalik bağlayıcı tabaka Nikel-krom-alüminyum-itiryum ( MCrAlY – burada M, Ni veya Ni+Co bileşimi olabilir. Y ise itiryum'dur) yaklaşık olarak 0,13 mm kalınlığındadır [18-19]. Bağlayıcı tabaka, altlığı oksidasyona karşı korur ve aynı zamanda üst kaplamanın yapışması için kaba bir yüzey imkanı sağlar [18-19]. Bağ kaplama alaşımı, diğer oksitlere göre  $\alpha$ -alümina oluşumunu sağlamak için oldukça yoğun Al içerikli olarak tasarlanırlar. Üstün yapışma özellikleri ve düşük oksijen difüzyon hızı nedeniyle alümina tercih edilen oksittir [20].

Termal bariyer kaplamaların bağlanma katmanı (MCrAlY) bileşimindeki nikel ve kobalt miktarı değişebilmekle birlikte ağırlıkça toplamaları %55-60 arasındadır. Krom

içeriği %30-35 arasında değer alırken alüminyum miktarı %10-12,5 civarında, itriyum ise %0,5 dolayında bulunur [21-22].

## **2.1. TERMAL BARIYER KAPLAMA YÖNTEMLERİ**

Termal sprej yöntemleri genel olarak kaplama malzemesinin ergimiş ya da yarı ergimiş hale getirilerek kaplanacak yüzeye püskürtülmesi prensibine dayanır [23]. Bütün termal sprej prosesleri aynı prensibe dayanır. Isıtılan toz veya tel materyal parçacıklar hızlandırılarak kaplanacak yüzeye çarptırılır. Yüzeye çarptırılan bu materyaller kaplama yüzeyine yapışır. Milyonlarca toz parçacığı kaplama yüzeyine mekanik yada metalik bağlarla bağlanır ve parçacıkların üst üste binmesi ile kaplama istenilen hali alır [24].

Metallerin yüzeyine seramik kaplamak için uygulanan değişik yöntemler kaplamanın kullanım amaçlarına uygun olarak, kaplanacak metal ve seramik tozun özelliğine göre değişir. Kaplama teknikleri şu şekildedir [25].

- Plazma Sprej (PS)
- Alevle Sprej (AS)
- Kimyasal Buhar Çöktürme (CVD)
- Fiziksel Buhar Çöktürme (PVD)
- Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme (HVOF)
- Detonasyon Tabancası (DG)
- İyonla Kaplama (IP)
- Sol-Jel (SG)
- Sıcak İzostatik Presleme ile Kaplama (HIP)
- Elektron Hüzme Buharlaştırmasıyla Kaplama (EBE)
- Sıçrama ile Kaplama

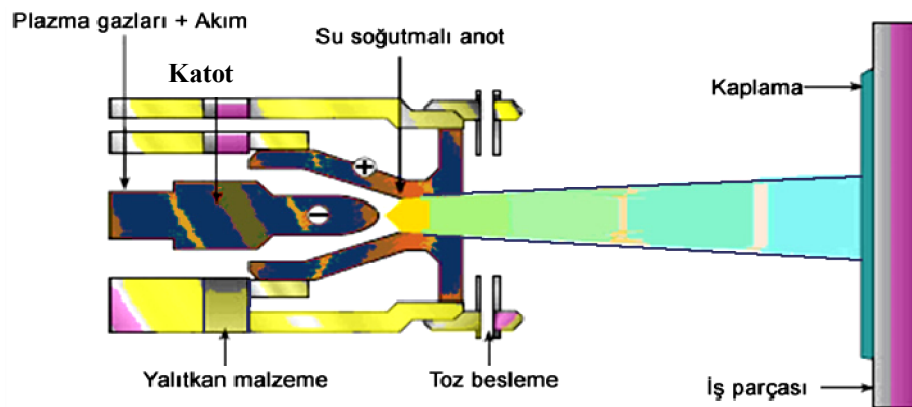
### **2.1.1. Plazma Sprej**

Plazma, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran, genellikle maddenin dördüncü hali olarak adlandırılan yoğunlaştırılmış bir gazdır. Bu yöntemin başlıca iki

önemli üstünlüğü vardır. Bilinen bütün malzemeleri eritebilecek derecede yüksek sıcaklık elde edilebilir ve diğer malzemelere daha iyi ısı transferi sağlar. Plazma Sprey (PS) tekniğinin yüksek işlem sıcaklığı, ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarla çalışmaya imkan sağlamaktadır. Plazma sprejde argon, hidrojen veya azot gibi soy gazlar kullanıldığından kaplanacak malzemenin oksitlenme sorunu asgariye inmektedir [26].

Argon (Ar) gazı birincil gaz olarak adlandırılır ve elektrot ile nozul arasından akar. Nozul ve elektrot arasında yüksek bir frekans veya alternatif akım arkı oluşturulur. Bu sayede akan gaz iyonize hale gelir. Ark akımının artırılması ile ark yoğunluğu ve iyonizasyon derecesi yükselir. Bu durum güç artışı ile birlikte aynı zamanda gazın genişlemesinden dolayı gaz akısının hızlanmasını sağlar. Toz şeklinde ve belirli tane büyüklüğünde üretilen tüm malzemeler bu işlemde kullanılabilir [8]. Kullanılan kaplama tozları, plazma hüzmesinin içerisine taşıyıcı Ar gazı yardımıyla beslenir. İyonize gaz içerisinde eriyen tozlar, çok hızlı bir şekilde önceden hazırlanmış parçanın yüzeyine püskürtülür. Yüzeye çarpan ergimiş veya yarı ergimiş partiküllerin toz taneleri yassılaştır, lamelli bir hal alır ve çok ani soğuma sonucu ( $10^{-6}$  °K/s) katılaşır [27].

Püskürtme oranı büyük ölçüde tabanca dizaynına, plazma gazlarına, toz akıtma düzenine, malzeme özelliklerine ve özellikle boyut, erime noktası, morfoloji, yoğunluk ve dağılım gibi partikül özelliklerine bağlıdır. Şekil 2.2’de bir plazma tabancası kesiti görünmektedir [28].



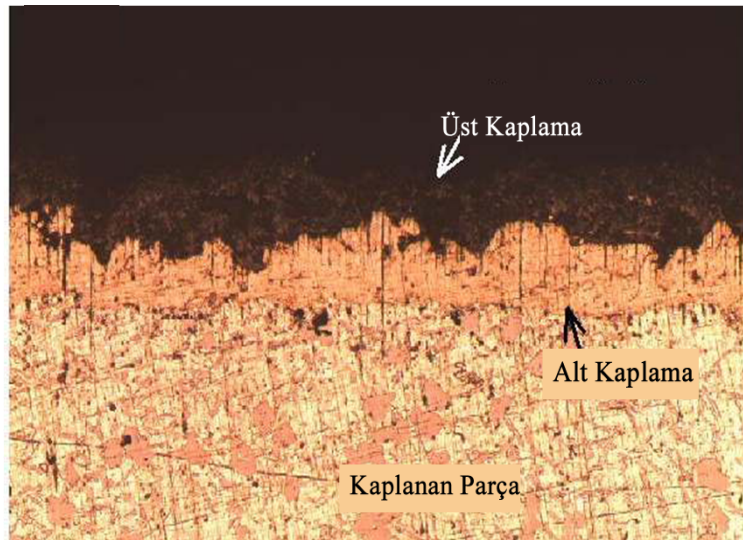
Şekil 2.2. PS prosesinin şematik gösterimi [6].

Plazma spreyn varyasyonları, temelde aynı fiziksel prensip ile çalışmaktadır. Sınıflandırma kaplama işleminin yapıldığı ortama göre gelişmektedir. Kaplama tabancası, açık atmosfer ortamı ve basıncında bulunuyorsa Atmosferik Plazma Sprey (APS), eğer inert ise Inert Plazma Sprey (IPS), gaz veya vakum altında bulunuyor ise Vakum Plazma Sprey (VPS) olarak isimlendirilir [29].

Plazma spreyle kaplamanın yüzeye iyi yapışabilmesi için kaplanacak yüzeyin, oksit, yağ, kir ve tozlardan arındırılmış olması ve yüzeyin pürüzlü olması gerekmektedir. Kaplama yüzeyinin pürüzlülüğü, genelde kum veya alümina gibi yüzey aşındırıcı bir tozun kaplanacak yüzeye, basınçlı hava ile püskürtülmesi ile sağlanır [23].

### 2.1.2. Alev Sprey Kaplama

Alev spreyle kaplama yöntemi ile seramik kaplama yapılmadan önce, oksitlenmeyi önlemek amacıyla, nikel-krom alaşımı kaplanacak parçanın yüzeyine alt katman olarak uygulanır. Aksi halde seramik kaplama yüzeye tam olarak yapışmaz [9]. Alt katman görünümünü şekil 2.3'te [1], alevle spreyle kaplamalarda kullanılan püskürtme tabancası görünümünü de Şekil 2.4'de gösterilmiştir [30].



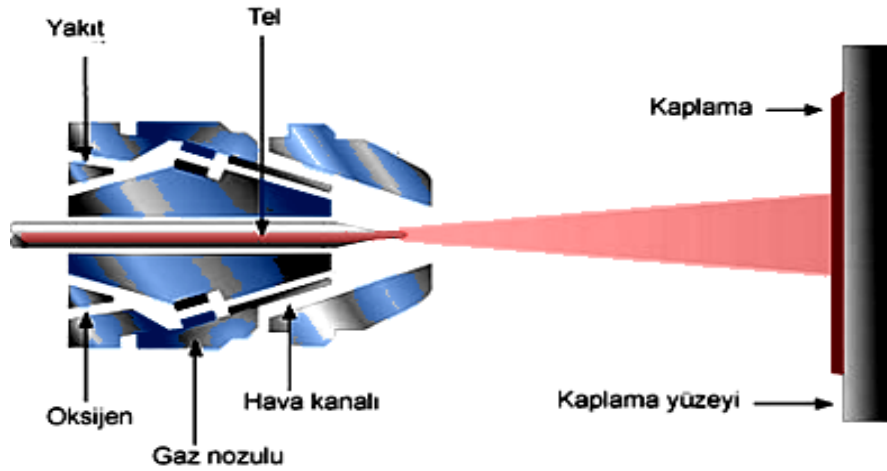
Şekil 2.3. Seramik kaplama ve bağlayıcı katman [1].



Şekil 2.4. Alev püskürtme tabancası [30].

### 2.1.2.1. Alevle Toz Sprey Kaplama

Alevle toz püskürtme yönteminde alev sıcaklığı  $3300^{\circ}\text{C}$  civarındadır. Yapışma mekaniktir. Alevle toz sprej yöntemi başta seramikler olmak üzere, metaller ve sermetlerin (metal + seramik oksit karışımı) kaplama malzemesi olarak püskürtülmesinde uygundur [8]. Kaplama işlemi esnasında parçanın sıcaklığı  $200^{\circ}\text{C}$ 'yi geçmediğinden dolayı soğuk sistem olarak adlandırılır. Kaplama kalınlığı püskürtülecek malzemenin ve iş parçasının şekline bağlı olarak 0,05-2,5 mm arasında değişmektedir. Alevle toz sprej yönteminin çalışma sistemi Şekil 2.5'te verilmiştir [9].



Şekil 2.5. Alevle toz püskürtme [28].

Rulman yatakları, mil muyluları, kompresör pistonları, kam milleri, burçlar, kovanlar, hidrolik silindir ve pistonlar bu yöntemle kaplanmaktadır [8-9].

### **2.1.2.2. Alevle Tel Sprey Kaplama**

Alevle tel sprej kaplama yöntemi, tel halinde ve ergime sıcaklığı yanıcı gaz olarak kullanılan oksijen-asetilen gazı alev sıcaklığından daha düşük olan bir metalin, ergimiş halde kaplanacak yüzeye püskürtülmesi ile gerçekleştirilir [8]. Kaplama malzemesi olarak kullanılan metal tel, sprej tabancasının nozulundan geçerken oksijen ve yanıcı gaz aleviyle eritilmektedir. Yakıcı gaz olan oksijenle beraber kullanılan yanıcı gazlar; asetilen, propan ve hidrojenidir. Düşük donanım maliyeti, yüksek sprej hızları ve püskürtme tabancasının tel çapları için ayarlanabilmesi bu yöntemin olumlu yönleridir. Diğer yöntemlere göre elde edilen kaplama yoğunluklarının ve yapışma mukavemetinin düşük olması başlıca olumsuz yönleridir. Rulman yatakları, hidrolik piston milleri, her türlü yatak, şaft, millerin aşınan yüzeyleri, piston segmanları, senkromençler, krank milleri ve debriyaj baskı plakaları alevle tel sprej yöntemi ile kaplanabilmektedir [8].

### **2.1.3. CVD Kaplama**

Kimyasal buhar biriktirme (CVD) tekniği, sıcak bir yüzey ile gaz fazları arasındaki reaksiyon sonucunda difüzyon etkisi ile ince film tabakası şeklinde yapılan bir kaplama türüdür [28]. Gaz türbini kanatlarının ön yüzeylerinde erozyon dirençli kaplamalara ihtiyaç duyulmaktadır. CVD yöntemi ile Krom Karbür ( $Cr_7C_3$ ) kullanılması iyi ısı ve mekanik şok direncinin yanı sıra erozyona karşı da iyi direnç sağlar. CVD yöntemi ile kaplamalar 850-1050°C aralığında yapılır. Gaz olarak da Hidrojen ( $H_2$ ), Azot ( $N_2$ ), Metan  $CH_4$  ve Karbon Monoksit ( $CO$ ) gazları kullanılır [3].

### **2.1.4. PVD Kaplama**

Fiziksel buhar çöktürmede (PVD) tekniği, motor parçalarına seramik termal bariyer kaplaması uygulamak amacıyla kullanılan, kaplanacak malzemenin ertilmesi, vakum altında buharlaştırılması ve iş parçasının üzerine biriktirilmesi ile

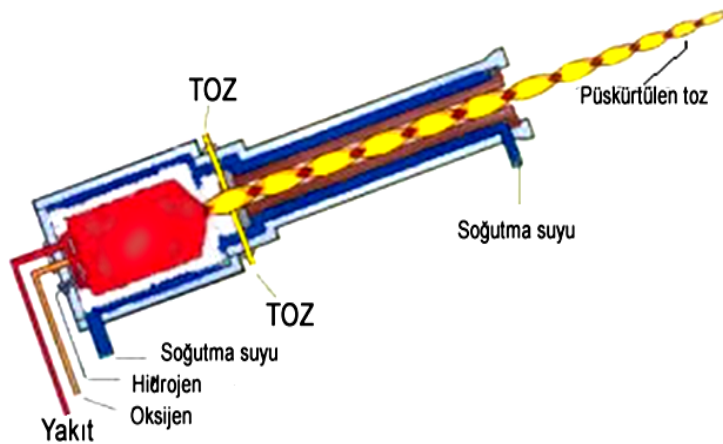


gerçekleştirilen bir kaplama tekniğidir. Bu yöntemde üretilen kaplamalar termal şoklara ve mekanik gerilmelere çok iyi dayanım sağlayan kolonsal mikro yapı gösterirler [31]. PVD yöntemi kaplama sıcaklığı 300-600 °C arasındadır [3].

PVD yöntemin en önemli avantajı en küçük yüzeysel şekil değişimlerini tolere edebilen bir yapıya sahip olmasıdır. Bu kaplama yönteminin diğer avantajları hem pürüzlü hem de düzgün yüzeylere mükemmel ölçüde tutunma kabiliyetine sahip olmasıdır. Aynı zamanda kaplanmış yüzeyin düzgün olmasından dolayı yüzey işlemlerine gerek kalmaz ve buharlaştırma yöntemi, bıçaklar üzerindeki iğne başı büyüklüğündeki delikleri tıkamaz [4].

### 2.1.5. Yüksek Hızlı Oksi Yakıt Püskürtme

Yüksek hızlı oksiyakıt püskürtme (HVOF) tabancasının (Şekil 2.7) yanma odasında propan, propilen ve hidrojen karışımından oluşan gaz halindeki yakıt oksijen karışımı ile yanar. Yanıcı gaz basıncı 4-6 bar arasında değişmektedir. Püskürtme hızı da değişebilir olması kontrollü olarak sık dokulu ve sert kaplamalar yapmak mümkündür. Partikül hızı 350-1000 m/s, alev sıcaklığı 2500-3000°C civarındadır. Bu proses ile yapılan kaplamaların yapışma direnci plazma püskürtmeye göre daha yüksektir. Kaplama kalınlığı uygulamaya bağlı olarak 0,05-1,5 mm arasında değişmektedir [8]. Plazma prosesinden farklı olarak toz yanma odasından geçerek ısıtılmakta ve namlu çıkışına yönelerek taban malzemeye ulaşmaktadır [28].



Şekil 2.7. HVOF tabancasının şematik gösterimi [32].

Plazma sprey yöntemine göre HVOF sprey yönteminde kaplama malzemesi olan tozlar, daha az ısı enerjisi alarak, daha yüksek bir hızla, önceden yüzey hazırlığı yapılmış taban malzemeye püskürtülür. Yüzeğe daha yüksek bir kinetik enerjiyle çarpan partiküller, daha yoğun ve yüzeğe daha iyi yapışan kaplamalar üretilmesine olanak tanır [23].

#### **2.1.6. Detonasyon Tabancası Tekniğı**

Detonasyon tabancası tekniğı, oksijen-asetilen karışımının özel bir odada kontrollü bir şekilde yanması sonucuna dayanır. Yanma odası genellikle 20-30 mm çapında ve 1-1,5 m uzunluğunda olup, bir su soğutucusunu içerir. Kaplanacak seramik tozları yanmadan önce gaz karışımında süspansiyon haline getirilir [8,33].

Bu esnada meydana gelen patlama şokları, kaplama tozlarının taneciklerini hızlandırır, erime noktasına kadar ısıtır ve yüksek bir hızla (800 m/s) kaplanacak yüzey üzerine püskürtülür. Bu olay saniyede 4-7 defa tekrarlanır. Seramik toz, tabancadan her atılışında 25 mm çapında ve bir kaç mikron kalınlığında bir tabaka meydana gelir [3,8].

#### **2.1.7. Sol-Jel Kaplama**

Sol-jel (SG) metodu inorganik ve hibrid organik-inorganik malzemelerin üretim yöntemlerinden biridir. Sol-jel uygulamalarında "sol" kelimesi sıvı içindeki katı kollojidal parçacıkları, "jel" ise katı ve sıvı faz arasındaki faz farkını sembolize eder [34].

Bu yöntemle yapılan kaplamalar hibrid malzemelerden oluşan cam, metal ve polimer gibi birçok yüzeğe iyi yapışır. Kaplama sonrası sertleşme düşük sıcaklıklarda (<200°C) gerçekleşir. Toksik madde içermemesinin yanı sıra, ekonomik olması, nemli ortama dayanıklı olması, yüksek elektriksel dirençleri, homojen ve şeffaf olması, istenilen özelliklerin ilave bileşenlerle kolayca sağlanabilmesi, pigment, boyar ve dolgu maddelerinin ilave edilebilmesi, aşınmaya ve yırtılmaya karşı dirençli olması önemli avantajlarıdır [35].

### 2.1.8. Elektrik Ark Sprey

Elektrik ark sprey yönteminde, metal tel tabanca içerisine sürülür. Pozitif ve negatif kutuplarla yüklenmiş nozullardan geçen teller birbiri ile temas edince ark meydana gelir. Ark etkisiyle eriyen metal, basınçlı hava ile yüzeye püskürtülerek kaplama gerçekleştirilir [8].

## 2.2. TERMAL BARIYER KAPLAMA MAZEMELERİ

Termal bariyer kaplama malzeme seçiminde, tasarım ve çalışma koşulları gibi birçok parametre göz önünde bulundurularak oldukça hassas ve dikkatli davranılması gerekmektedir. Uygulama esnasında uygun sonuçları alabilmek için seçilecek kaplama malzemeleri [36];

- Yüksek ergime noktası
- Düşük termal iletkenlik
- Yüksek termal genleşme katsayısı
- Faz kararlılığı
- Yüksek oksidasyon ve korozyon direnci
- Yüksek aşınma ve erozyon direnci
- Düşük sinterleme oranı
- Yüksek deformasyon dayanım
- Yüksek termal şok dayanımı
- Düşük yoğunluk
- Elastik modül
- Sertlik gibi özelliklere sahip olmalıdırlar.

Düşük ısı kayıplı TBK motorların tasarımı esnasında dikkat edilmesi gereken hususlar şunlardır [3];

- Uygun kaplama kalınlığının tayini
- Yanma yüzeylerinin kaplanması

- Tasarım karmaşıklığının minimize edilmesi
- Güvenilirliğin sağlanması
- Bağımsız soğutma
- Uzun süre dayanıklılık
- Yüksek alaşım çeliklerinden kaçınmak
- Motor tasarım değişikliklerini minimize etmek
- Motor performansının artırılması

Bu ilkelere uygun düşük ısı kayıplı motorlar elde edilebilmesi için kullanılabilen en uygun malzeme seramiklerdir. Düşük termal geçirgenliğe sahip olan seramik malzemelerin seçilmesi yanma odası elamanları yüzeyinde kaplamadan beklenen özellikleri sağlayacaktır [3].

Son yıllarda TBK için oldukça uygun özellikli seramik malzemeler geliştirilmiş olup bunlar ileri teknoloji seramikler diye adlandırılır. İleri teknoloji seramikler başlıca, Alümina ( $Al_2O_3$ ), Zirkonya ( $ZrO_2$ ), Magnezya ( $MgO$ ), Berilya ( $BeO$ ) gibi saf oksitlerden oluşur. Oksit olmayan seramikler grubunda ise Silisyum Nitrür ( $Si_3N_4$ ), Silisyum Karbür ( $SiC$ ), Bor Karbür ( $BC$ ), Bor Nitrür ( $BN$ ), Titanyum Borür ( $Ti_2B$ ) gibi üstün özellikli malzemeler bulunmakta olup fiziksel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir [3,8,19]. Bu malzemelerin genel özellikleri şöyle sıralanabilir [3,19].

- Yüksek sıcaklığa dayanıklı olmaları
- Kimyasal kararlılıklarının yüksek olması
- Çok seri olmaları
- Yoğunluklarının düşük olması
- Tabiatında ham madde olarak bol miktarda bulunma
- Aşınmaya karşı dayanıklı olmaları
- Isı iletim katsayılarının düşük olması
- Basma mukavemetlerinin yüksek olması.

Çizelge 2.1. Bazı yüksek teknoloji seramiklerinin özellikleri [8,19].

<b>Malzeme</b>	<b>Ergime Sic. (°C)</b>	<b>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Mukavemet (MPa)</b>	<b>Elastik Modül (Gpa)</b>	<b>Gerilme (kg/mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Tokluk (K<sub>c</sub>)</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	2050	3,96	250-300	36-40	1300	4,5
<b>ZrO<sub>2</sub></b>	2700	5,6	113-130	17-25	1200	6,9
<b>SiC</b>	3000	3,2	310	40-44	2800	3,4
<b>Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub></b>	1900	3,24	410	30.7	1300	5,0
<b>Wc</b>	2700	15,7	350-550	54-70	2000	5-8

## BÖLÜM 3

### LİTARETÜR ARAŞTIRMASI

TBK çalışmaları yaklaşık 50 yıl öncesinden başlayıp, uygulanan yöntemlerde günümüze kadar birçok gelişim göstermiştir. İlk TBK çalışmaları genel olarak gaz türbinlerinin kanatları üzerine yoğunlaşmıştır daha sonra içten yanmalı motorlarda, özellikle de dizel motorları da geniş uygulama alanları bulmuştur.

Dalkılıç, türbin kanatçıklarının TBK sistemi ile kapladığı çalışmasında, termal bariyer kaplama sistemlerinin uygulanmasında daha çok plazma sprey ve elektron demetiyle fiziksel buhar çöktürme olmak üzere iki temel yöntemin yaygın olarak kullanılmakta olduğunu belirtmektedir [14].

Yaşar, endüstride yaygın olarak kullanılan Termal Sprey yöntemleri olarak; alevle toz sprey, tel sprey, elektrik ark sprey, detonasyon tabancası tekniği, yüksek hızlı oksiyakıt sprey ve plazma sprey olduğunu belirtmektedir [8].

Büyükkaya, kompresörlerin çelik kanatlarının üzerine daha iyi koruma sağlamak için Titanyum (Ti) yerine, kimyasal buhar çökeltme yöntemi ile Krom Karbür ( $Cr_7C_3$ ) kullanılmasının daha iyi ısı ve mekanik şok direnci, aynı zamanda erozyona karşı da iyi direnç sağlayacağını belirtmektedir [2-3].

Gatowski, tek silindirli doğal emişli bir dizel motorun yanma odası elamanlarını seramikle kapladığı çalışmasında,  $NO_x$  emisyonunda %23 artış meydana geldiğini belirtmektedir [10].

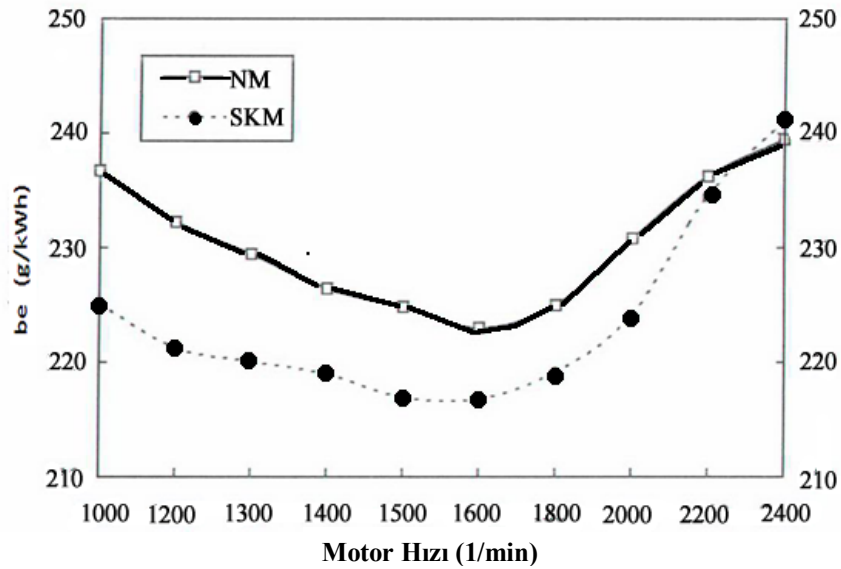
Yeşildal ve Günay, türbin ve jet motorlarının yanma odası, türbin paletleri gibi elamanları Plazma Sprey ile kapladığı araştırmasında Plazma Sprey kaplamalarda

bağlama mukavemetini artırmak için kaplama öncesi ana malzeme yüzeyinin pürüzlendirilmesi gerektiğini belirtmektedirler [37].

Osawa ve arkadaşları, tek silindirli, hava soğutmalı düşük ısı kayıplı bir dizel motor üzerinde yaptıkları çalışmada, seramik kaplı motorun kaplamasız motora göre özgül yakıt sarfiyatında %8 oranında daha iyi performans sağladığını belirtmiştir [38].

Parlak ve arkadaşları, türboşarjlı, direkt enjeksiyonlu dizel motorun yanma odası yüzeylerini seramik malzeme ile kaplayarak elde ettikleri LHR motoru standart dizel motora göre karşılaştırıldığında, özgül yakıt tüketimi ( $b_e$ ) % 6 oranında azaldığını belirtmişlerdir [39].

Yaşar, türbo şarjlı Seramik Kaplı Motor (SKM) ile Normal Motor (NM) kullanarak uygulamış olduğu dizel motorun yanma odasını seramik malzeme ile kapladığı çalışmasında, SKM motorun NM motora göre özgül yakıt tüketiminin ( $b_e$ )'de önemli bir azalış (Şekil 3.1) olduğunu belirtmektedir [8].

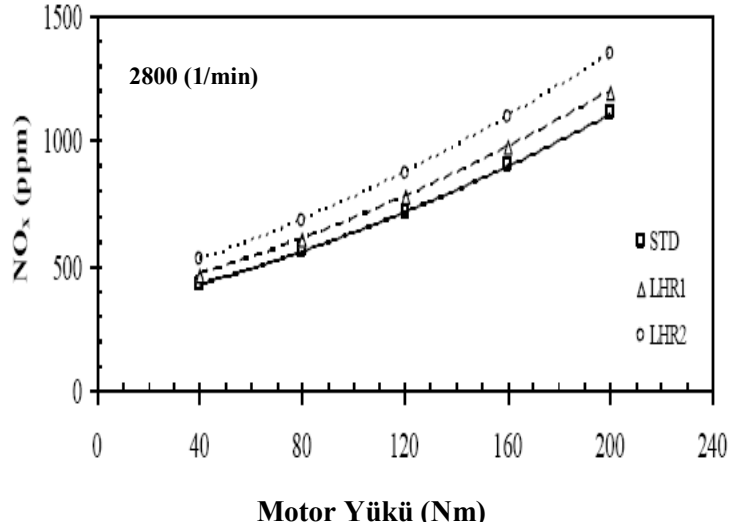


Şekil 3.1. Seramik kaplamanın özgül yakıt tüketimine etkisi [8].

Hazar ve Öner, dizel motorun piston, silindir kapağı ve supapları seramik kaplayarak yaptığı çalışmada yanma odası elemanlarından transfer edilen ısının azaldığını böylelikle yanma odası sıcaklığının arttığını belirtmiştir. Yanma odası sıcaklığının

artması sonucu meydana gelen kimyasal reaksiyonda hidrokarbonlar, daha fazla oksijenle reaksiyona girerek yanmamış olarak dışarı atılan hidrokarbonların bir kısmının yanması sağlanmıştır. Böylece egzoz emisyonlarındaki HC miktarının azalacağını vurgulamışlardır [40].

Haşimoğlu ve arkadaşları, Standart Deney Motorunun (STDM) silindir kapağı ve supaplarını plazma sprej yöntemi ile Yitriya Stabilize Zirkonya ( $Y_2O_3-ZrO_2$ ) kaplayarak düşük ısı kayıplı 1 (LHR1) motorunu, daha sonrada aynı motorun pistonlarını da aynı malzeme ile kaplayarak düşük ısı kayıplı 2 (LHR2) motorunu oluşturmuşlardır. Bu çalışmalarında motor yükündeki artışla birlikte  $NO_x$  emisyonunun arttığını tespit etmişlerdir.  $NO_x$  emisyonu LHR1 için yaklaşık %8 artarken, LHR2 için ise %21,5 arttığını belirtmişlerdir (Şekil 3.2) [41].



Şekil 3.2.  $NO_x$  emisyonunun kaplama ile değişimi [41].

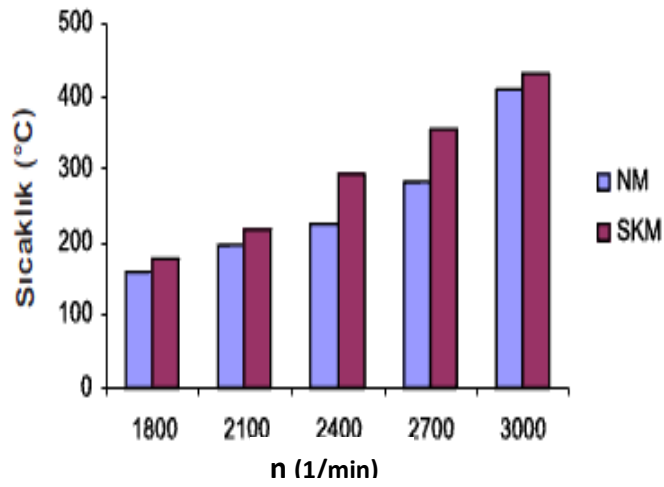
Havstad ve arkadaşlarının seramik kaplı tek silindirli bir dizel motorda yaptığı çalışmada, yanma sırasında oluşan ısı kaybında %25, özgül yakıt tüketiminde %9'lık bir azalma olduğu tespit etmişlerdir [42].

Ciniviz ve arkadaşlarının, 4 silindirli, 4 zamanlı ve direkt püskürtmeli bir dizel motorda silindir kapağı ve supapların seramik ile kaplanması performans ve egzoz emisyonlarına etkileri araştırdıkları çalışmalarında, tam yük hız testinde normal motor göre özgül yakıt tüketiminde (ÖYT) % 4 azalma ve motor gücü ve



torkunda ise %6-7'lik artış ile egzoz gazı sıcaklığında %13'lük bir artış meydana geldiğini emisyonlarda ise NO<sub>x</sub>'de % 20 artış ve dumanda %10 azalma olduğunu bildirmişlerdir [43]

Hazar ve Öner, bir dizel motorun silindir yüzeyi, segman ve supapları CrN kaplayarak yaptıkları araştırmalarında, SKM motorun NM motora göre egzoz sıcaklığında artış (Şekil 3.3), emisyonlarda da iyileşmeler olduğunu belirtmişlerdir [44].



Şekil 3.3. Egzoz sıcaklıklarının kaplama ile değişimi [44].

Parlak, seramik kaplı aşırı doldurmalı, tek silindirli bir dizel motorunun en iyi performansını veren püskürtme avansı ve sıkıştırma oranını belirlemek amacıyla deneyler yapmıştır. Bu amaçla motorun yanma odasını termal bariyer MgO — ZrO<sub>2</sub> malzemesi ile kaplamıştır. Ara bağlayıcı malzeme kalınlığı 0,15 mm, seramik malzeme kalınlığı ise 0,35 mm kalınlığında kaplamıştır. Normal motor ve kaplamalı motor ile aynı sıkıştırma oranı ve püskürtme avansında 17,5/1 ve 16,8/1 sıkıştırma oranlarında özgül yakıt tüketiminin sırasıyla normal motora göre ortalama %2 ve %1,5 oranlarında düştüğünü gözlemlemiştir [45].

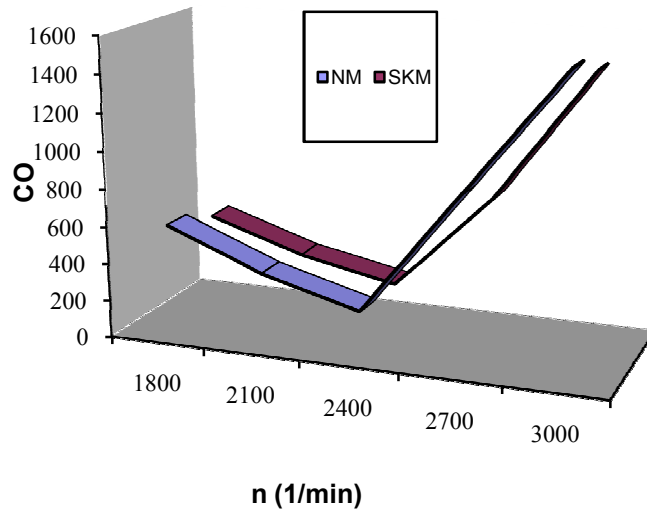
Ramaswamy ve arkadaşları, doğrudan enjeksiyonlu dizel motorunda, silindir kapağı, supap ve pistonu sırasıyla 0,1 mm, 0,26 mm ve 0,45 mm termal bariyer amaçlı kaplamışlardır. Kaplama sonucunda özgül yakıt tüketimi %1-2 azaltırken egzoz sıcaklığında ise %5-6 oranlarında artma meydana geldiğini belirtmişlerdir [46].

Parlak ve arkadaşları, tek silindirli, aşırı doldurmalı ve sıkıştırma oranı değişebilir bir DİK motorda yaptıkları deneylerde, sıkıştırma oranını 18,2/1'den 16,8/1'e düşürerek güçte fazla bir kötüleşme olmadan özgül yakıt tüketimini iyileştirmişlerdir. Ayrıca  $NO_x$  emisyonlarında yaklaşık %14'lük azalma olduğunu belirtmişlerdir [47].

Leising ve Purohit, termal bariyer kaplamadan istenen sonuçların alınabilmesi için dizel motorlarının türbo doldurmalı ve ara soğutuculu olması gerektiğini ve mevcut tasarım şartlarında yakıt ekonomisinde %6 civarında bir iyileşmenin mümkün olduğunu söylemektedirler. Bir dizel motoru performansının, motora türbo doldurmalı, türbo kombine ve rankin sistemlerinin ilavesiyle %20, DİK dizel motorda ise %40 civarında artırılabileceğini ifade etmektedirler [48].

Taymaz ve arkadaşları, doğrudan enjeksiyonlu 6 silindirli bir türbo dizel motorun yanma odası elamanlarını, 0,15 ara bağlayıcı malzeme 0,35 mm seramik malzemeyle kaplamışlardır. Sonuç olarak, soğutma suyuna giden enerji %5-25 oranında azalma, egzoz enerjisinde ise %5-20 arasında bir artış meydana geldiğini belirtmektedir [49].

Hanbey ve Öner, bir dizel motorunun silindir yüzeyini, PVD yöntemi kullanılarak seramik bir malzeme ile kapladığı çalışmasında, yüksek hızlarda seramik kaplamanın normal motora göre daha iyi sonuç verdiğini ve egzoz emisyonlarının iyileştiğini belirtmişlerdir (Şekil 3.4) [50].



Şekil 3.4. Seramik kaplamanın CO emisyonlarına etkisi [50].

Afify ve arkadaşları, tek silindirli doğrudan enjeksiyonlu bir dizel motorun yanma odası elamanlarından piston tepesini 0,25 mm, silindir kapağı ve supapları 0,5 mm termal bariyer ile kaplamışlardır. Sonuç olarak egzoz gaz sıcaklığında %3-5 arasında artış olduğunu, özgül yakıt tüketiminde ise yaklaşık olarak %10 civarında bir azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir [51].

Ciniviz, dizel motorun yanma odası elamanlarını plazma sprej yöntemi ile zirkonyum kapladığı çalışmasında özgül yakıt tüketiminin tam yük durumunda %9 oranında bir azalma sağladığını belirtmiştir [9].

Woods ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada, titanyum malzemedan imal edilen yanma odası elemanlarının, yanmaya maruz kalan yüzeylerini, piston, silindir gömleği ve silindir kapağını farklı kalınlıklarda seramik malzeme ile kaplayarak elde etmiş oldukları düşük ısı kayıplı motoru 100 saat çalıştırarak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda, motorun soğutma suyuna olan ısı transferinde %52 azalma olduğunu belirtmişlerdir [52].

Rasihhan ve Wallace, tek silindirli doğrudan püskürtmeli bir dizel motorunda farklı kaplama kalınlıkları kullanarak yaptıkları çalışmada, farklı iki kaplama kalınlığında gazlardan pistonu olan ısı kayıplarında sırasıyla %51,9 ile %68,4 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Ayrıca pistondan silindir gömleğine iletim yoluyla olan ısı geçişinde de sırasıyla %49,2 ve %66,5 oranında bir düşüş gözlemlemişlerdir [53].

Hazar ve Öztürk, bir dizel motorun piston-silindir kafası, egzoz ve emme supaplarının yüzeylerini plazma sprej yöntemiyle  $Al_2O_3-TiO_2$  ile kaplayarak dizel yakıtı ile beraber farklı yakıtlarda kullandığı çalışmalarında, egzoz sıcaklığında kaplama sonucunda %11'lik bir artış, özgül yakıt sarfiyatında yaklaşık %4 ve CO emisyonunda ise %19 bir azalma sağlamışlardır [54].

Badgley ve arkadaşları, 6 silindirli bir dizel motorunda yanma odasını düşük ısı kayıplı seramik malzeme ile kaplamışlardır. Yaptıkları test sonuçlarında, motorun özgül yakıt tüketiminde %5'lik bir azalma olduğunu gözlemlemişlerdir [55].

Bruns ve arkadaşları, aşırı doldurmalı bir dizel motorun yanma odası elamanlarını izole ederek yaptıkları çalışmalar sonucunda, yakıt tüketiminde %16 ile %37 arasında değişen oranlarda azalma olduğunu ifade etmişlerdir [56].

Chang ve arkadaşları, düşük ısı kayıplı bir motor üzerinde yaptıkları deneysel çalışma sonucunda seramik kaplı motorun normal motora kıyasla tüm yük şartlarında düşük performans gösterdiğini, bunun sebebinin ise seramik kaplama sonucunda yanma odasındaki sıcaklığın artması sonucu olarak silindir cidar sıcaklıklarının artmasıyla volümetrik verimde düşmeden kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Egzoz gaz sıcaklıklarında ise %20'den fazla artış olduğunu tespit etmişlerdir [57].

Alkidas, tek silindirli bir dizel motorunda yanma odasını seramik ile kaplayarak gerçekleştirdiği deneysel çalışmada seramik kaplı motorun; özgül yakıt tüketimi azatlığını, NO<sub>x</sub> emisyonlarının artırdığını, HC ve is emisyonlarının ise azalttığını belirtmektedir [58].

Walzer ve arkadaşları, aşırı doldurmalı bir motor üzerinde yaptıkları bir çalışmada, yanma odası yüzeylerinin %80'nini 3mm kalınlığında Zirkonyum Oksit ile kaplamışlardır. Yaptıkları çalışmalar sonucunda soğutma sistemine giden ısı transferinde %13 azalma, şehir içi taşıt çevrimi deneylerinde ise yakıt sarfiyatında %5 iyileşme sağlamışlardır [59].

Hazar, dört zamanlı, direkt enjeksiyonlu, tek silindirli dizel motorun silindir kapağı, piston yüzeyleri, egzoz ve emme supaplarını plazma sprej yöntemi seramik kapladığı çalışmasında. Özgü yakıt sarfiyatının %6 oranında azaldığını belirtmiştir [60].

Parlak ve arkadaşları kaplamanın turboşarjlı, direkt enjeksiyonlu dizel motor performansına etkisini incelediği çalışmasında özgül yakıt sarfiyatında normal motora göre %6 oranında azalma olduğunu tespit etmişlerdir [61].

Ciniviz, turbo şarjlı bir dizel motorun yanma odasını itrium ile stabilize edilmiş ZrO<sub>2</sub> ile kapladığı çalışmasında egzoz sıcaklığının, motor gücünün ve momentinin

kaplama neticesinde arttığını, yakıt sarfiyatının ve emisyon değerlerinin düştüğünü belirtmiştir [62].

Wallace ve arkadaşları, yanma odası elamanlarına termal bariyer kaplama uygulanmış tek silindirli bir dizel motorda yaptıkları teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda termal bariyerli pistonlara sahip motorun, kaplamasız motora göre egzoz gazlarının entalpisinde ve egzoz gazlarının sıcaklığında önemli miktarlarda artış olmasına karşın, volümetrik verimde bir miktar düşüş olduğu kaydedilmiştir [63].

Toyama ve arkadaşları, türboşarjlı bir dizel motorunun yanma odasını  $ZrO_2$  malzemesi ile kaplayarak yapmış oldukları çalışmalarında, ısı transferinde %50'ye varan bir azalma ve yakıt sarfiyatında ise %11'e varan iyileşmenin mümkün olduğunu belirtmişlerdir [64].

Yapılan literatür araştırmasının sonunda TBK amaçlı kaplamalara en uygun malzeme stabilize edilmiş zirkonyum olduğu tespit edilmekle beraber birçok farklı seramik malzemelerinde kullanıldığı tespit edilmiştir. Yapılan kaplamalarda üst kaplama ile kaplanan elamanın termal genleşme uyumsuzluğunu gidermek için önce ara bir malzeme ile kaplandığı anlaşılmış ve kullanılan en yaygın altlık malzeme ise NiCr-Al olduğu tespit edilmiştir. Kaplamaların toplam kalınlıkları farklı kalınlıklarla beraber yaygın olarak 0,3-0,5 mm arasında olduğu görülmüştür. Kaplama yapılmadan önce yanma odası hacminin değişmemesi için kaplanan parçalardan kaplama kalınlığı kadar talaş kaldırılmıştır.

Seramik kaplamanın motor performansında iyileşmeler sağladığı, egzoz sıcaklığında artışlar, özgül yakıt sarfiyatında ve volümetrik verimde de düşüşler gerçekleştiği anlaşılmıştır. Egzoz emisyonlarında ise CO, CO<sub>2</sub>, HC'da azda olsa düşüş, NO<sub>x</sub>'de ise artış sağladığı görülmüştür.

## BÖLÜM 4

### MATERYAL VE METOT

#### 4.1. DİZEL MOTOR VE ÖZELLİKLERİ

Deneyleerde hava soğutmalı, tek silindirli, doğrudan püskürtmeli, 4 zamanlı ve marşlı Solax marka 178FE tipi dizel motoru kullanılmıştır. Motorun görüntüsü Şekil 4.1’de teknik özellikleri ise Çizelge 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Deneyleerde kullanılan Solax 178FE dizel motor görüntüsü.

Dizel motorun yanma odası elamanlarını seramik malzeme ile kaplayarak emisyon ve performans karakteristiklerine etkisi belirlenmiştir. Deneyleer esnasında motor, krank miline bağlı olan bir elektrikli DC dinamometre ile yüklenmiştir. Deneyle motorunun dinamometreye bağlı hali Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Deneyde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri.

<b>Markası ve Modeli</b>	<b>Solax, 178FE</b>	
Motor tipi	Tek Silindirli, 4 zamanlı hava soğutmalı	
Yakıt sistemi	Direkt püskürtme	
Piston çapı ve yolu (mm)	78 x 62	
Silindir hacmi (cm <sup>3</sup> )	296	
Motor hızı (1/min)	3600	
Maksimum güç (kw)	5	
Çalıştırma sistemi	İpli ve marşlı	
Depo hacmi (L)	3.5	
Yakıt sarfıyatı (gr/HP/h)	215	
Yağ kapasitesi (L)	1.1	



Şekil 4.2. Kullanılan test ünitesi görüntüsü.

## 4.2. DİNAMOMETRE

Deneyleerde motorun yüklenmesi için Kemsan marka, 10 kW gücünde elektrikli dinamometre kullanılmıştır (Şekil 4.3). Dinamometre kontrol ünitesi ile motorun istenilen hızda hassas olarak yüklenmesi ve marş yaptırılması sağlanmaktadır.



Şekil 4.3. Kullanılan elektrikli fren dinamometre görüntüsü.

Kuvvet ölçümü, dinamometrenin moment kolu ucundaki bir yük hücresi tarafından gerçekleştirilmektedir. Motorun frenlenmesi sırasında oluşan kuvvet yük hücresi tarafından fark gerilimine dönüştürülür. Gerilim sinyali düşük olması durumunda enstrümantasyon yükseltici tarafından yükseltilir.

## 4.3. SICAKLIK VE YAKIT ÖLÇÜMÜ

Egzoz gazı sıcaklık ölçümü için NiCr-Ni K tipi termokopul kullanılmıştır. Kullanılan sıcaklık ölçüm cihazı Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Termokopullar özellikle egzoz gazlarını ölçen kısmının gazdan etkilenmesini önlemek ve dayanıklılığını artırmak amacıyla bir vida içerisine gömülerek akışkana temas ettirilmiştir. Ölçümler egzoz çıkışından yaklaşık 60 cm uzaklıkta egzoz yolu üzerinde açılan bir delik vasıtası ile anlık yapılmıştır.





Şekil 4.4. Egzoz sıcaklık ölçüm cihazı.

Yakıt ölçüme tüpü (Şekil 4.5), belli miktar yakıtın ( $10 \text{ cm}^3$ ) ne kadar zaman (s) içinde tüketildiğini tespit etmek için kullanılan, camdan yapılmış silindirik tüptür.



Şekil 4.5. Yakıt ölçme tüpü.

Yakıt tüketiminin belirlenmesinde zaman ölçümleri dijital göstergeli ve 0.01s hassasiyetindeki kronometre (sürat ölçer) kullanılmıştır.

#### 4.4. EGZOZ GAZ ANALİZÖRÜ

Emisyon ölçümünde egzozdaki kirletici bileşen düzeyinin belirlenmesinde MRU marka Delta 1600L tipi emisyon ölçüm analizör cihazı kullanılmıştır (Şekil 4.6). Emisyon ölçümlerine başlamadan önce cihaz kalibre edilmiştir. MRU Delta 1600L emisyon cihazı CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve HC gazlarını ölçebilmektedir.



Şekil 4.6. MRU Delta 1600L egzoz gaz analizör cihazı.

Egzozda kirletici birleşenlerin analiz ölçümü için egzoz borsuna, ucu yandan delinmiş bir metal boruya bağlı hortum, özel tasarlanmış vidalı delikten içeri salınarak her bir motor hızında anlık ölçümleri yapılmıştır. MRU Delta 1600L emisyon cihazının teknik özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. MRU Delta 1600L emisyon cihazının özellikleri.

Ölçüm	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
CO (% hacimsel)	0-15,00	+/- 0,06
HC (ppm)	0-20000	+/- 12

#### 4.5. KAPLANAN MOTOR PARÇALARI

Çalışmalarımızda orijinal motorun yanında yanma odası elamanları olan piston, supap ve silindir kapağı, 3 farklı kaplama malzemesi ile kaplatılmak için, motorun üretim firmasından, orijinal yedek parça olarak temin edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Yanma odası elamanlarının kaplama yapılmadan önceki görüntüsü.

Kaplama yapılmadan önce parçaların kaplama yapılacak bölgeleri üzerinde kaplama kalınlığı kadar talaş kaldırılmıştır. Talaş kaldırılmasının sebebi her bir deneyde yanma odası hacminin aynı kalmasını sağlamak içindir. Böylelikle yanma odası hacmi değişmemiştir.

#### 4.6. KAPLAMA MALZEMELERİ

Yanma odası elamanlarını Alüminyum oksit-Zirkonyum oksit ( $Al_2O_3-ZrO_2$ ), Alüminyum oksit-Titanyum oksit ( $Al_2O_3-TiO_2$ ) ve Bor Karbür ( $B_4C$ ) olmak üzere üç farklı kaplama malzemesi ile kaplayarak çalışma yapılması planlanmıştır. Fakat Bor kaplama malzemesi, alüminyum esaslı malzemeler üzerine iyi yapışma yapamayacağı nedeniyle bu çalışmadan vazgeçilmiştir. Bu olumsuzluğa rağmen alüminyum esaslı malzemelerin kaplanacak bölgeleri Nikelkrom-Alüminyum (NiCr-Al) malzemesi ile kaplanarak Bor kaplama yapılması denenmiştir. Fakat olumsuz sonuç alınmıştır. Bu nedenle diğer iki farklı kaplama malzemesi kullanarak yanma odası elamanları kaplatılmıştır.

Kaplama malzemeleri olarak  $Al_2O_3-ZrO_2$  (%20-80) ile  $Al_2O_3-TiO_2$  (%87-13) kullanılmıştır. Literatürde karışım oranlarına rastlanılmayan  $Al_2O_3-ZrO_2$  (%20-80)

malzemesi ilk olarak denenecek olması çalışmayı özgün hale getirmiştir. Alt kaplama malzemesi olarak NiCr-Al kullanılmıştır.

Alt kaplama malzemesi olarak NiCr-Al kullanılmasının nedeni, kaplanan malzeme ile kaplama malzemesi arasındaki termal genişleme uyumluluğunu daha iyi hale getirmek, kaplanan parçayı oksidasyona karşı korumak ve üst kaplama malzemesine daha iyi yapışma mukavemeti kazandırmak içindir [2,19].

Alüminyum esaslı olan yanma odası elamanları ile kullanılan  $Al_2O_3-ZrO_2$  ve  $Al_2O_3-TiO_2$  kaplama malzemeleri arasında termal genişleme uyumsuzluğu vardır. Yani kaplanan parçalar ile kaplama malzemeleri farklı oranlarda genişlemektedirler. Alt kaplama malzemesi NiCr-Al'un termal genişleme katsayısı yanma odası elamanlarının ve kullanılan kaplama malzemesinin genişleme katsayısı arasında bir değere sahiptir. Bu sayede üst kaplama malzemelerinde çatlama, kopmalar ve parçalanmalar meydana gelmemekte, böylelikle servis ömrü uzamaktadır.

Üst kaplama malzemesi olarak  $Al_2O_3-ZrO_2$  (%20-80) ve  $Al_2O_3-TiO_2$  (%87-13) kullanılmasının nedeni, literatür araştırması sonucunda en yaygın kaplama malzemeleri olmasındandır. Farklı oranlarda ve farklı malzemelerle stabilize edilen  $ZrO_2$ , TBK seramikleri arasında en olumlu sonuç veren bir kaplama malzemesidir.

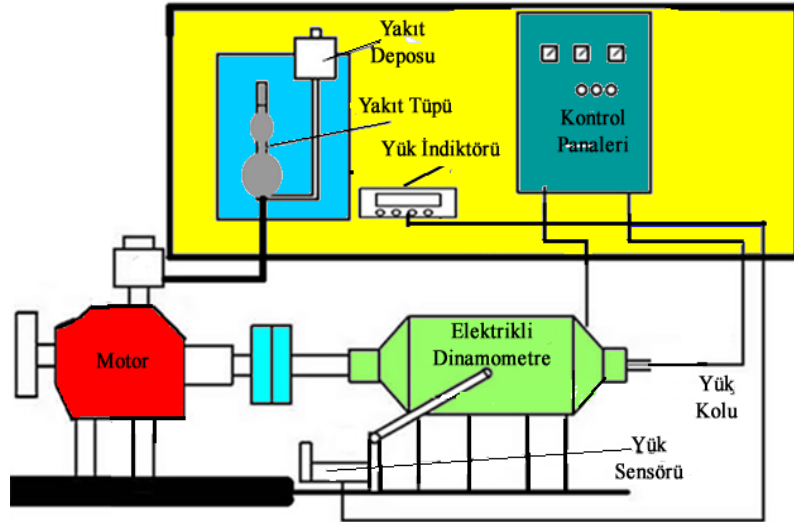
Kaplama esnasında malzeme tozunun yüzeye iyi yapışabilmesi için yüzeyler pürüzleştirilmiştir. Silindir kapağı, piston ve supap yüzeylerindeki kir, yağ, toz vb. istenmeyen maddelerin giderilmesi ve kaplamanın yüzeye daha iyi yapışabilmesi için yüzey pürüzlülük değeri ( $R_a$ ) 4-5  $\mu m$  olacak şekilde kumlama ile pürüzlendirilmiştir. Kaplanacak yüzeyler PS yöntemi ile yaklaşık 0,1 mm kalınlığında NiCr-Al astar tabaka ile kaplanmıştır. Daha sonra astar tabakanın üzerine yaklaşık 0,2 mm kalınlığında ayrı ayrı  $Al_2O_3-ZrO_2$ ,  $Al_2O_3-TiO_2$ , PS yöntemi ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi sonrası silindir kapağı, piston ve supapların görüntüsü Şekil 4.8'da gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Yanma odası elamanlarının kaplama yapıldıktan sonraki görünüşleri.

#### 4.7. DENEY DÜZENEGİ VE YÖNTEMİ

Deneylerde kullanılan deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Test ünitesinde; elektrik fren dinamometresi, yakıt tüketim ölçüm tüpü, sıcaklık ölçüm termometresi ve kumanda paneli bulunmaktadır.



Şekil 4.9. Deney düzeneğinin şematik görünümü.

Deneyler 1600 1/min ile 3200 1/min hızları arasında 400 1/min hız aralıklarında ve tam yük şartları altında %100 dizel yakıtı ile yapılmıştır.

Deneylere ilk önce normal motorun performans ve emisyon değerlerini tespit etmek için orijinal, kaplamasız yanma odası elamanları kullanılarak başlanmıştır. Kaplamasız motor dinamometreye eksenleri çakışacak şekilde bağlandıktan sonra sistemin doğru çalışabilirliğini kontrol edilmesi açısından bir müddet çalıştırılmış ve deneme testleri yapılmıştır. Yapılan testler ile cihazların sağlıklı çalıştığı anlaşıldıktan sonra deneylere başlanmıştır.

Dinamometreye bağlanmış kaplamasız standart motor kontrol panelinden marş verilerek orta hızlarda, motor sıcaklığı 150°C ye çıkana kadar yükleme yapılmadan boşa çalıştırılmıştır. Gerekli sıcaklığa ulaşan dizel motora 3200 1/min'den başlayarak yükleme yapılmıştır. Hızı sabitlenen motorun ölçülen tüm verileri kararlı hale gelinceye kadar deneye devam edilmiştir. Yakıt sarfıyatı, tork ve emisyon ölçümleri yapıp ölçülen değerler kayıt altına alındıktan sonra kontrol panelinden motorun hızı 2800 1/min indirilmiştir. Aynı ölçümler tekrar 2800 1/min içinde yapıp ölçülen değerler kaydedildikten sonra diğer hızlar içinde tekrarlanmıştır. Deneylerin sonunda motor düşük hızlarda bir müddet çalıştırılmaya devam ettirilip daha sonra stop ettirilmiştir.

Deneylerin sonunda standart motor dinamometreden sökülerek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> kaplı yanma odası elamanlarını motora takmak için motor dağıtılmış ve alınan yeni segmanları ile beraber Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> kaplı piston, silindir kapağı ve supaplar kaplamalara zarar vermeden yerlerine monta edilmiştir. En son olarak da Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> kaplı motor toplanmıştır. Montajı tamamlanan motorlar fabrika ayarlarına tekrar getirilerek orijinal halini almıştır. Standart normal motorda uygulanan deneyler tekrar kaplamalı motorlar içinde aynı şartlar altında uygulanmış ve ölçüm değerleri tespit edilmiştir.

Tespit edilen her bir ölçüm aralığı için ölçülen değerler, kaplamasız ve kaplamalı motorlar için hesaplamalar yapılmıştır. Bu motorların; özgül yakıt tüketimi, efektif güç, döndürme momenti, efektif verim, egzoz sıcaklığı ve emisyon değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler grafikler halinde karşılaştırmalı olarak yorumlanmıştır.

## BÖLÜM 5

### DENEY SONUÇLARI

İçten yanmalı motorlarda performans karakteristiklerinin iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmaların biride yanma odası elamanlarının termal bariyer özellikli bir seramik malzeme ile kaplamaktır. Böylelikle yanma odasından kaybolan ısı transferi azaltılarak yanma odasının sıcaklığı artırılmış olacaktır. Artan sıcaklıkla yanmada iyileşmeler sağlanmaktadır. Bu çalışmada, yanma odası elamanlarını  $Al_2O_3-ZrO_2$  (%20-80) ve  $Al_2O_3-TiO_2$  (%87-13) malzemeleri ile kaplamanın dizel motorun performansına ve emisyonlarına etkisi incelenmiştir.

Deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, seramik kaplamaların motor performansına ve emisyonlarına etkisini analiz etmek için, 1600-3200 1/min hızları arasında 400 1/min aralıklarla, tam yükte dizel yakıtı ile test edilmiştir.

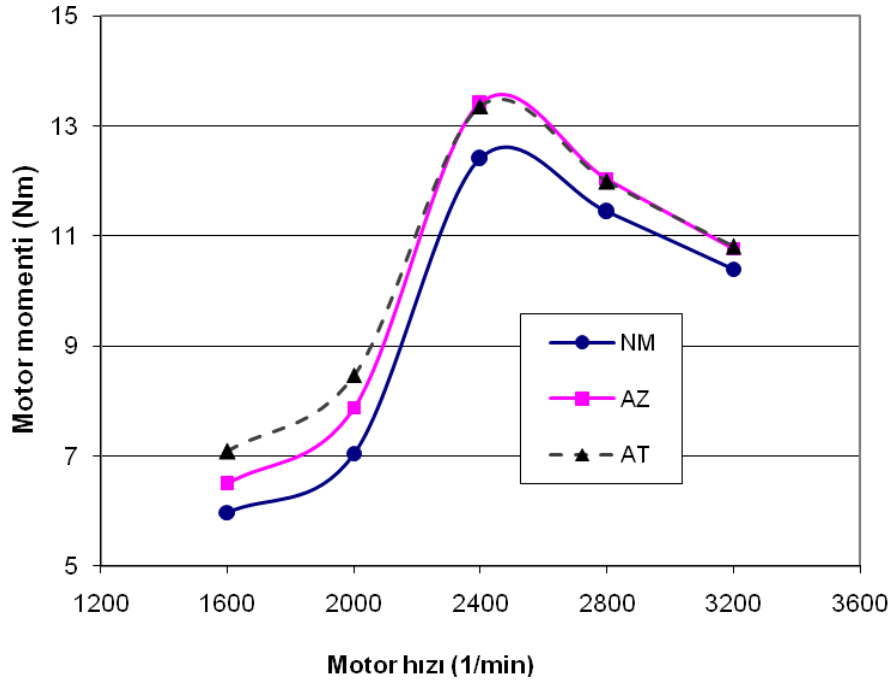
Deneysel sonuçlar, özgül yakıt tüketimi, egzoz gaz sıcaklığı, efektif güç, efektif verim, CO, HC, emisyonları belirlenmiştir. Ölçüm sonuçları kaplamasız motor sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Grafiklerde Normal Motor NM ile  $Al_2O_3-ZrO_2$  kaplı motor AZ ile ve  $Al_2O_3-TiO_2$  kaplı motor AT ile gösterilmiştir.

#### 5.1. KAPLAMALARIN MOTOR PERFORMANSINA ETKİLERİ

AZ (%20-80) ve AT (%87-13) kaplamaların motor performansına etkileri normal motorun performans değerleri tam yükte hızlara bağlı olarak karşılaştırılmıştır.

##### 5.1.1. Motor Momenti ve Gücü

Tam yükte motor döndürme momentinin motor hızı ile değişimleri Şekil 5.1'de verilmiştir.

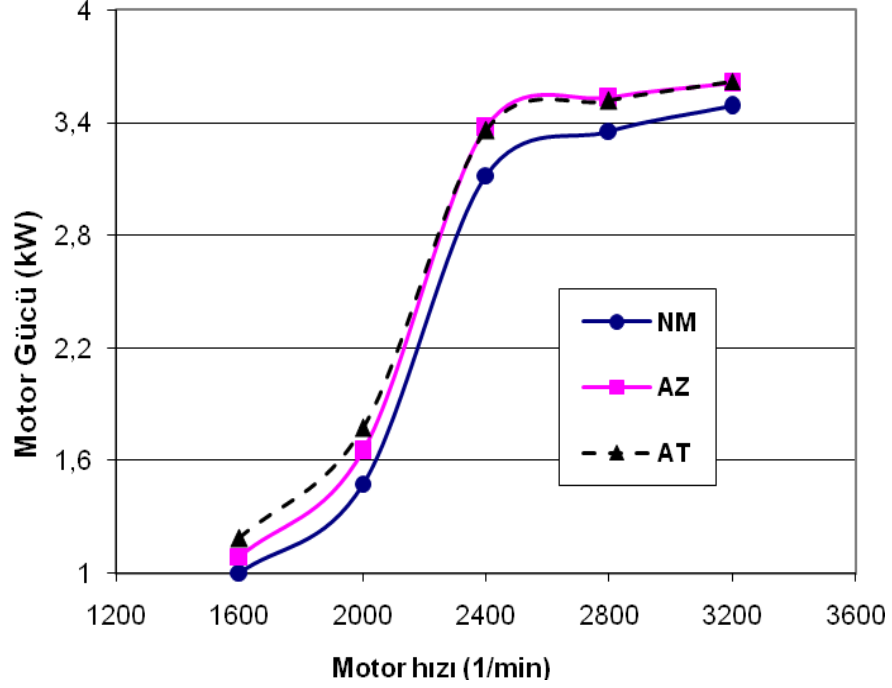


Şekil 5.1. Kaplamanın motor momentine etkisi.

İçten yanmalı motorlarda motor hızı arttıkça, motor momentinde artış görülmekte ve bu artış bir maksimum noktadan geçerek tekrar düşüş göstermektedir [65]. Motor momentinde hız arttıkça yükselme görülmektedir. Yüksek hızlarda ise bir miktar düşmektedir. Bu düşüşün sebebi yanma odası sıcaklığının artması ile emilen hava miktarının yeterince olmaması sonucunda volümetrik verimdeki azalma olarak düşünülmektedir. Şekle göre AZ kaplı motorun normal motora göre momentinde %7 oranında, AT kaplı motorda ise %10 arasında bir artış, meydana geldiği görülmektedir. AT kaplı motorda, AT kaplı motora göre ise %3 oranında bir artış gerçekleşmiştir.

Tam yükte motor gücü ( $P_e$ )'nün motor hızı ile değişimleri Şekil 5.2'de verilmiştir. AZ kaplı motorun standart motora göre motor gücünde %7 oranında, AT kaplı motorda ise %10 oranında bir artış meydana geldiği görülmektedir. AT kaplı motor gücü, AZ kaplı motor gücüne göre ise %3 oranında daha yüksektir.





Şekil 5.2. Kaplamanın motor gücüne etkisi.

Motor gücünün 2400 1/min'den sonra eğrilerin bir birine yaklaşmasının sebebi; seramik kaplama sonucunda silindir cidarlarında ve gaz sıcaklıklarındaki artış ile oluşan volümetrik verimdeki azalma ve yüksek hızlarda artan sürtünme kayıpları olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, kaplama neticesinde artan sıcaklıklar tutuşma gecikmesi periyodunu kısaltması ile yanma daha da erken başlayıp dizel vuruntusuna sebebiyet vermesinin motor gücünü azaltığı düşünülmektedir.

Piston tepesinin oyuk kısmından talaş kaldırma işlemi yapılmamasının sıkıştırma oranını kısmen arttırdığı bunun neticesinde artan sıcaklık ve basınç sayesinde motor gücünü maksimum motor momenti bölgesinde ve yüksek hızlarda normal motora göre daha da arttırdığı sanılmaktadır.

Kaplama neticesinde silindir içi sıcaklığın yükselmesinden dolayı volümetrik kayıpların artması ile gerçekleşen güçteki düşüş oranından, yanmanın iyileşmesi ve piston tepesinden talaş kaldırılmayan kısmın sıkıştırma oranını kısmen artırması ile oluşan güçteki artış oranının daha fazla olduğu, 2800 1/min hızında da bu sebepten NM'ye göre güç artışı olduğu sanılmaktadır.

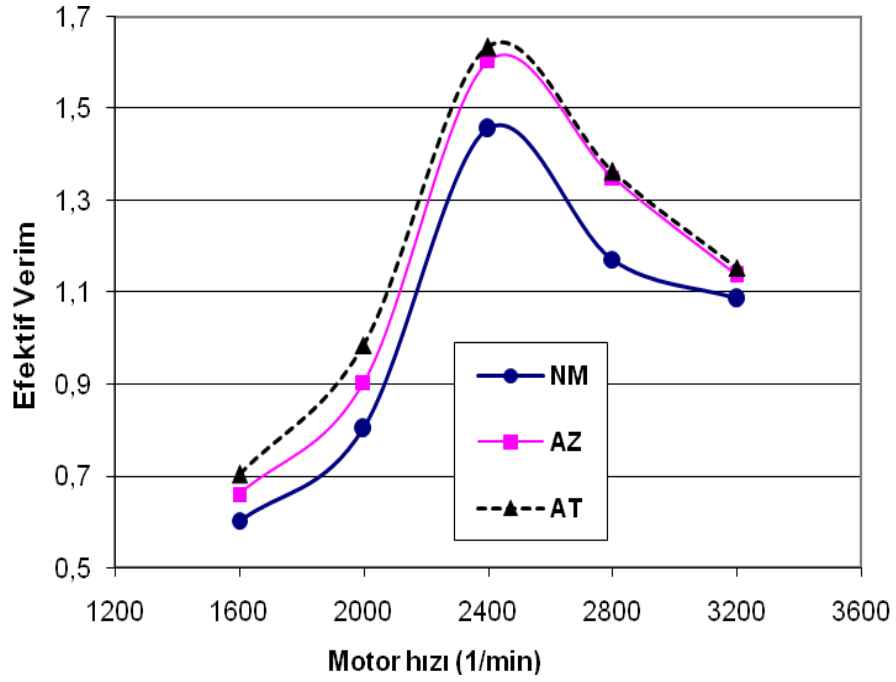
Volumetrik verim silindirlerin ne ölçüde doldurulabilirliğinin bir ölçüsü olup motorun çalışma ve ortam şartlarına bağlıdır. Yanma odasında oluşturulan termal bariyer kaplama sonucunda; ısı yalıtımıyla birlikte ısı kaybı azalmış, yanma odası duvarlarının sıcaklığı artmıştır. Silindir içine giren havanın, yüksek sıcaklığa sahip yanma odasından çıkan ısı ile sıcaklığı artacaktır. Böylelikle içeri giren hava genişerek emilen hava miktarı azaltmasına yoğunluğunun düştüğü ve volumetrik verimin azaldığı düşünülmektedir.

Yaşar, seramik kaplamalı bir dizel motor ile yapılan çalışma sonucu düşük ve orta hızlarda efektif güçte artış olurken, hız artışıyla birlikte efektif güçteki artışın yavaşladığını belirtmiştir [8].

Chang ve arkadaşları, ise seramik kaplı motorun normal motora kıyasla tüm yük şartlarında düşük performans gösterdiğini, bunun sebebinin ise seramik kaplama sonucunda yanma odasındaki sıcaklığın artması sonucu olarak silindir cidar sıcaklıklarının artmasıyla volümetrik verimdeki düşüştürten kaynaklanabileceğini belirtmiştir [57].

### **5.1.3. Efektif Verim**

Efektif verimin tam yükte motor hızı ile değişimleri Şekil 5.3 verilmiştir. Seramik kaplı motorlarda standart normal motora göre efektif verimi iyileşmiştir. Motor momentinin en yüksek olduğu hızlarda seramik kaplı motorların efektif verimi en yüksek değerlere ulaşmıştır. AZ kaplı motorun standart normal motora göre motor efektif veriminde %10 arasında, AT kaplı motorda ise %15 arasında bir artış, meydana geldiği görülmektedir. AT kaplı motor, AZ kaplı motora göre ise %4 oranında bir artış belirlenmiştir.

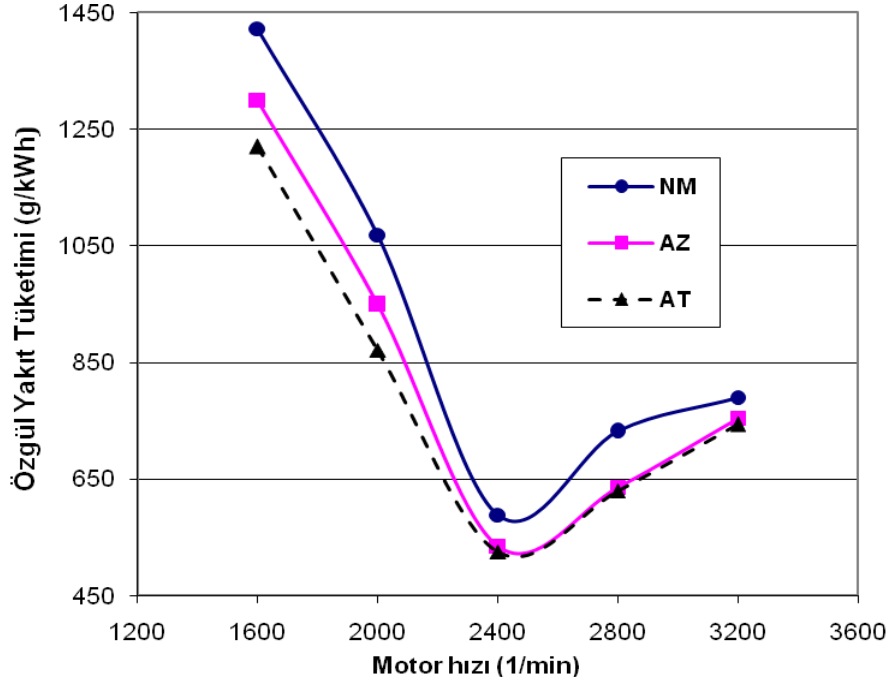


Şekil 5.3. Kaplamanın efektif verime etkisi.

Kaplama neticesinde motor parçalarının normal çalışması için soğutma sistemine giden ısı kayıplarının minimuma inmesi, soğutma sistemi yükünü ve buna harcanan gücü azaltması, faydalı enerjiyi arttıracak ve böylece motor verimi de yükseltmiş olacaktır [67].

#### 5.1.4. Yakıt Tüketimi

Değişik hızlara bağlı olarak tam yük şartlarında elde edilen özgül yakıt tüketimi Şekil 5.4'de verilmektedir. AZ ve AT kaplı motorların özgül yakıt sarfiyatları, NM'nin özgül yakıt sarfiyatına göre ortalama yaklaşık %11 azalmaktadır. Özgül yakıt sarfiyatındaki iyileşmenin nedeni yanma odası elemanlarının seramik kaplı olması nedeniyle artan silindir içi gaz sıcaklıklarının artmasının olumlu etkisi, tutuşma gecikmesindeki kısalmanın etkisi ve yanma sıcaklığının bir miktar düşmesiyle ön yanma safhasında yanmaya katılan yakıtın miktarının artmasıdır. Şekillerde görülen ve tam yük şartlarında NM ve SKM'nin özgül yakıt sarfiyatındaki ait olan eğriler, seramik kaplama sonucunda motorun özgül yakıt sarfiyatının önemli ölçüde azaldığını göstermektedir.



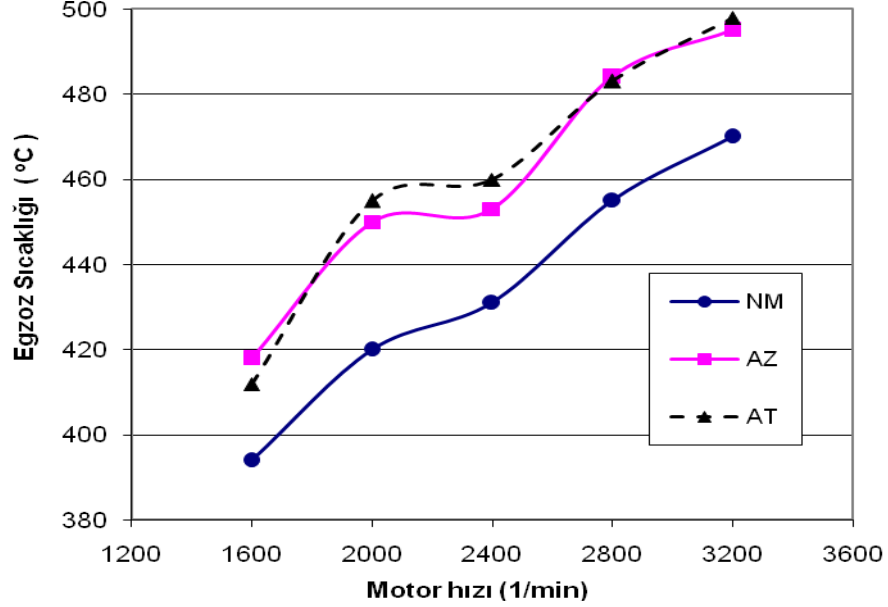
Şekil 5.4. Kaplamanın özgül yakıt tüketimine etkisi.

Dizel motorda yanma reaksiyonları yüksek basınç ve sıcaklık altındaki yanma odasına, yakıt püskürtülür püskürtülmez başlar. Bununla birlikte reaksiyonun başlangıcındaki ilk kısa zaman dilimlerinde reaksiyonlar çok yavaştır ve basınçta belirgin bir artış görülmez. Tutuşma gecikme zamanının (yakıtın atomize olması, hava ile karışması ve kimyasal reaksiyonlar ile yanmanın başlama zamanı) sonunda yanma odasında alev görülür ve basınçtaki yükseliş belirginleşir [11].

AZ kaplı motorun standart normal motora göre motor özgül yakıt sarfiyatında %9 arasında, AT kaplı motorda ise %12-13 arasında bir azalma, AT kaplı motor, AZ kaplı motora göre ise %4 oranında bir azalma gözlenmektedir. Deney sonucu daha önce yapılan benzer çalışmalara [9, 41,55, 64, 66, 67] benzerlik göstermektedir. Hazar ve ark., dizel motorun silindir iç yüzeyi, segman ve supapları, PVD yöntemi ile seramik kapladıkları çalışmalarında, özgül yakıt tüketimi tam yük durumunda, orta hızlarda bir miktar iyileştiğini vurgulamışlardır [68]. Schwarz ve ark., düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda yaptıkları deneyler sonucunda kaplamalı motorun tam yükte düşük hızlarda özgül yakıt tüketiminde iyileşme olurken, yüksek hızlarda kötüleşme olduğunu belirtmişlerdir [4].

### 5.1.5. Egzoz Gazı Sıcaklığı

Seramik kaplı motor ile kaplamasız normal motora ait egzoz gazı çıkış sıcaklıklarının motor hız sayısına göre değişimi Şekil 5.5’de karşılaştırılarak incelenmiştir.



Şekil 5.5. Kaplamanın egzoz sıcaklığının etkisi.

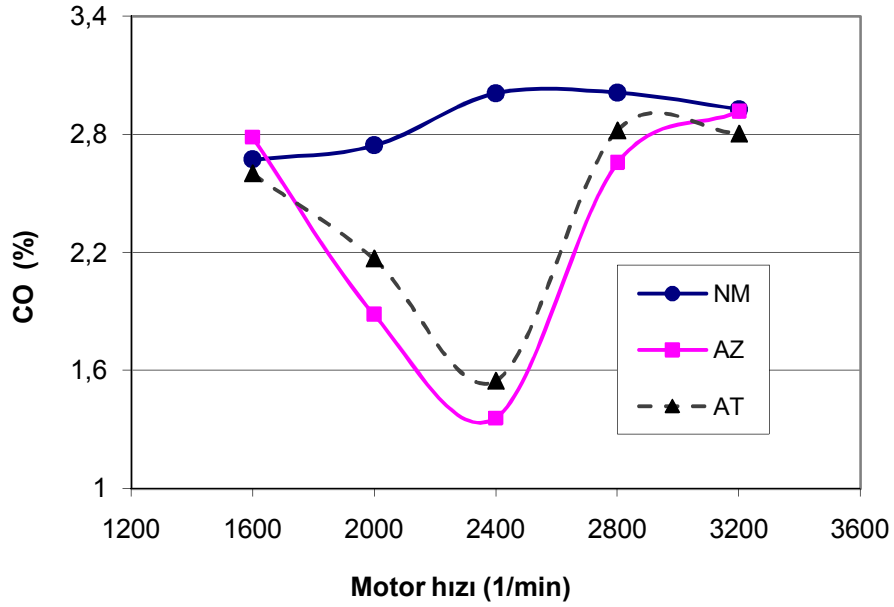
Ölçümler egzoz çıkışından yaklaşık 60 cm uzaklıkta egzoz yolu üzerinde açılan bir delik vasıtası ile yapılmıştır. Seramik kaplanmış motora ait egzoz gazı sıcaklığı diğer normal motora göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu yükseliş, seramik kaplama sonucunda, soğutucu akışkana geçmesi engellenen enerjinin bir kısmının egzoz gazlarına geçmesi ile meydana gelmiştir. AZ kaplı motorun normal motora göre egzoz gazı sıcaklığı %6 oranında, AT kaplı motorda ise %7 oranında bir artış, meydana geldiği görülmektedir. AT kaplı motor, AZ kaplı motora göre ise %1 oranında bir artış sağlamıştır.

Parlak ve ark., seramik kaplı motordaki egzoz gazı sıcaklıklarının normal motordakinden 65°C daha fazla olduğunu vurgulamışlardır [61]. Yaşar ve ark., seramik kaplı motorda egzoz gazı sıcaklıklarının STD motoru göre %5-13 yükseldiğini tespit etmişlerdir [66]. Hazar ve Öner dizel motorun supap, segman ve pistonları CrN ile kapladığı çalışmada seramik kaplamanın normal motora göre egzoz sıcaklığını daha da artırdığını belirtmiştir [44].

## 5.2. KAPLAMALARIN EMİSYONLARA ETKİSİ

### 5.2.1. CO Emisyonu

Şekil 5.6'de tam yükte motor hızına bağlı olarak kaplamaların CO emisyonlarının etkileri görülmektedir.



Şekil 5.6. Kaplamamın CO emisyonuna etkisi.

Dizel motorlarında yakıt karışım oranı, genellikle fakir karışımdır ve motorun yük durumu ile hızına göre değişmektedir. Yanma odasında yakıt dağılımının homojen olmaması [69], yanma olayının da homojen bir şekilde yayılmasını engellemektedir. Dolayısıyla tepkimeye hiç girmeyen ve eksik yanan hidrokarbon ürünleri artmaktadır. Ancak yanma sıcaklığının çok düşük olması, oksidasyon için yeterli zaman bulamaması veya oksijen miktarının az olması gibi durumlarda CO emisyonu artmaktadır.

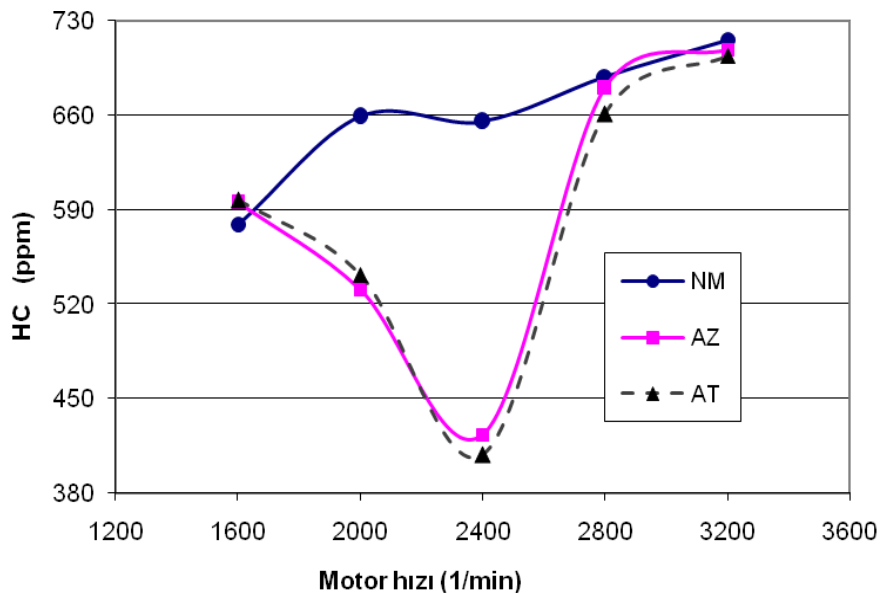
Yanma esnasında CO oluşumunda yanma odası sıcaklığının önemli bir etkisi vardır. Yapılan kaplamalar neticesinde yanma odası sıcaklığının arttığı, buna bağlı olarak da bu motorlarda CO konsantrasyonunun normal motora göre biraz daha düşük olduğu görülmektedir.

Şekil 5.6’de orta hızlarda CO oluşumunun azaldığı, orta hızlardan sonra ise her iki seramik kaplı motor için de yükseldiği görülmektedir. Bu da motorlardaki yanmanın maksimum moment hızı civarlarındaki noktalarda iyileşmesi ve yüksek hızlarda ise yeterince oksijen bulamaması ile açıklanabilir. AZ kaplı motorun AT kaplı motora göre CO emisyonların kaplamalar sonucunda %24 oranında iyileşme sağlamıştır.

Kaplanan parçalarda talaş kaldırma işlemi yeterli olması durumunda sıkıştırma oranı artacaktır. Sıkıştırma oranı artışı yanma verimini artırdığından CO emisyonlarını azaltığı düşülmektedir. Yanma odasındaki sıcaklığın artması, yakıtın daha fazla kimyasal tepkimeye girmesini sağlamakta, böylece yanmadan dışarı atılan egzoz gazları emisyonunu azaltmaktadır [67]. Motor yükü arttıkça, sıcaklıkta artacağından CO’un dönüşümünü sağlayan reaksiyonlar hızlanıp atacak ve CO emisyonu azalacaktır. Ancak motor yükünün artmasına karşın oksidasyon konsantrasyonu az olduğundan ve reaksiyon için zaman kısıtlı olduğundan CO emisyonu tekrar artış göstermektedir [65].

#### 5.2.4. HC Emisyonu

Zararlı emisyonlardan olan HC emisyonunun tam yükte hızlara göre değişim grafiği Şekil 5.9’da verilmiştir.



Şekil 5.9. Kaplamanın HC emisyonuna etkisi.

Seramik kaplama sonucunda artan yanma odası sıcaklığı ile tam yanma gerçekleşmiştir. Yüksek hızlarda sıcaklık artmasına rağmen HC emisyonunun artmasının sebebi, yanmanın kötüleşmesi, tam yanmanın gerçekleşmemesi böylelikle yanmayan yakıt oranının artmasındadır. Yeterli hava alınmadığında O<sub>2</sub> ile tepkimeye girmektedir. Yüksek hızlarda yeterince hava emme imkanı bulamayan motor volümetrik verim kayıpları yaşadığından yanma kötüleşerek HC emisyonları artmaktadır.



## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR

Çeşitli yöntemlerle motorların yanma odası elemanlarının seramik bir malzeme ile kaplanması, bu motorlarda soğutmaya harcanan enerjinin azalmasını sağlamaktadır. Yanma odası elemanlarının izolasyonu, yanma sıcaklığını arttırdığı için yanma tepkimesi de iyileşmektedir. Bu şekilde yanmamış hidrokarbonların tepkimeye katılması sağlanarak egzoz emisyonları iyileştirilebilmektedir.

Yapılan mukayeseler sonucunda, egzoz gazı sıcaklıklarında da oldukça önemli farklılaşmalar olduğu gözlenmiştir. Seramik kaplı motorda egzoz gazı sıcaklıkları normal motora kıyasla önemli derecede artmıştır. Bilindiği üzere, egzoz enerjisinin tekrar sisteme kazandırılarak faydalı hale dönüştürülmesi (aşırı doldurma sistemleri) türboşarj ve türbo kombine sistemleriyle sağlanabilmektedir. Fakat motorumuz da böyle bir sistem mevcut olmadığından bu enerjiden faydalanmak söz konusu değildir. Egzoz gazı sıcaklığı, egzoz borusu içersine yerleştirilen bir termokopul vasıtasıyla ölçülerek, sıcaklık artışları tespit edilmiştir. Aynı şartlarda, kaplamalı motordaki egzoz gazı sıcaklığı daha fazladır.

Yapılan uygulama sonuçlarının değerlendirilmesi sonucu yukarıda belirtilen ana ilkeler doğrultusunda olumlu sonuçlar elde edildiği, ancak kaplama uygulanan motorun doğal emişli ve hava soğutmalı olması, normal motorla kaplama yapılan motorun performans değerlerinde büyük farklılıklar ortaya çıkmasına mani olmuştur. Plazma Sprey kaplama yöntemi ile yapılan termal bariyer kaplamanın rahatlıkla motor çalışma şartlarında kullanılabileceği sonucu da yapılan uygulama ile ortaya konulmuştur. Konu ile ilgili araştırmalar için bir ön adım teşkil eden bu çalışma, hem kaplama şartları ve özellikleri açısından ve hem de motorlarla ilgili değişik yönlerden incelenmeye muhtaç olduğu açıktır.

Yapılan kaplama neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Termal bariyer kaplama ile yanma odasında izolasyon sağlandığı ve egzoz gaz sıcaklığının yükseldiği,
- Kaplamalı motorlarda yanmanın iyileşmesiyle motor gücünde ve efektif verimde artış,
- Yakıt sarfiyatında önemli ölçüde düşüş,
- CO emisyonunda düşüş,
- Her iki kaplamanın da verimi iyi olduğu fakat  $Al_2O_3-TiO_2$  kaplamanın  $Al_2O_3ZrO_2$  kaplamaya göre daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir.
- Kaplanabilinir malzeme çeşidi artırılabilir, BOR, TiAlN gibi malzemelerle de denenebilir.
- Gerçekleşen ısı kayıplarını daha da azaltmak için silindir gömleklerinin kaplama çalışması yapılabilir.
- Yanma odası elamanları malzeme içeriğinde seramik malzemeler olacak şekilde yeniden tasarlanabilinir.

## KAYNAKLAR

- 1- Hazar, H., ve Öztürk, U., “Bir dizel motorda Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> kaplanmış piston ve supapların yüzey mikro yapılarının incelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6 (1) : 11-16 (2009).
- 2- Gökkaya, H., ve Gürbüz, H., “An evaluation of the effects of coating with thermal barrier on engine performance in diesel engine”, *Technology*, 13 (1) : 49-57 (2010).
- 3- Büyükkaya, E., “Bir dizel motorunda seramik kaplama uygulamaları ve performans analizi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 1-70 (1994).
- 4- Taşdıvar, D., ve Erkmen, Z. E., “İçten yanmalı motorların termal bariyer kaplanması”, *Bilim - Teknoloji*, 16 : 119-127 (2006).
- 5- Topal, A., “Alüminyum alaşım piston malzemelerin seramik kaplanması ile performans artırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2-4 (2002).
- 6- Çiftiyürek, E., “%8 YSZ (itriyum ile stabilize edilmiş ZrO<sub>2</sub> termal bariyer kaplamaların (TBK) üretilmesi ve proses parametreleri optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4 (2009).
- 7- Dalkılıç, S., ve Tanatmış, A., “Termal bariyer kaplama sistemlerinde yüksek sıcaklıkta düşük çevrimli yorulma şartları altında oluşan hasarların incelenmesi”, *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4(2) : 15-27 (2009).
- 8- Yaşar, H., “Termal bariyer kaplamanın türbo doldurmalı bir dizel motorunun performansına etkileri”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 13-76 (1997).
- 9- Ciniviz, M., “Türboşarjlı bir dizel motorunun yanma odası yüzeylerinin Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>~ZrO<sub>2</sub> ile kaplanmasının performans ve emisyon etkileri”, Doktora Tezi, *Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 15-90 (2005).
- 10- Gataowski, J.A., "Evaluation of selectively-cooled single-cylinder 0.5-l diesel engine", *International Congress & Exposition, Society of Automotive Engineers, 900693*, 123-134 (1990).
- 11- Safgönül, B., Soruşbay, E., Arslan, M. ve Ergeneman, M., ”İçten yanmalı motorlar”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 34-35 (1999).

- 12- Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A., “İçten yanmalı motorlar”, *Teknik Eğitim Vakfı Yayınları*, Ankara, 1 : 48 (1995).
- 13- Ahmaniemi, S., Vuoristo, P. and Mantyla, T., “Mechanical and elastic properties of modified thick thermal barrier coatings”, *Materials Science and Engineering*, A (366) : 175-182 (2004).
- 14- Dalkılıç, S., “Bir termal bariyer kaplama sisteminin yorulma davranışının incelenmesi”, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 41-67 (2007).
- 15- Schulz, U., Fritscher, K., Leyens, C. and Peters, M.. “Influence of processing on microstructure and performance of EB-PVD thermal barrier coatings”, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* , 124(2): 229 (2002).
- 16- Bengi, T., “Termal bariyer kaplamaların ısıl özelliklerinin incelenmesi ve düşük termal iletkenlik için parametre optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 12-45 (2009).
- 17- Dalkılıç, S., ve Tanatmış, A., “Damage evaluation of thermal barrier coatings under high temperature low cycle fatigue conditions”, *Aerospace Sciences & Aviation Technology*, 13 : 13-12 (2009).
- 18- İnternet: Otomotiv Bilim ve Teknoloji Topluluğu “Makaleler” [http://www.Obitet.gazi.edu.tr/makale/Makaleler/T17\\_Seramik.htm](http://www.Obitet.gazi.edu.tr/makale/Makaleler/T17_Seramik.htm) (2011).
- 19- Çevik, İ., "Zirkonya esaslı seramik kaplamanın fiziksel ve kimyasal özelliklerinin değiştirilmesi", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 33 (1990).
- 20- Evans, A.G., He, M.Y. and Hutchinson, J.W., “Mechanics-based scaling laws for the durability of thermal barrier coatings”, *Progress in Materials Science*, 46 : 249-271 (2001).
- 21- Schmitt, G., Haindl, H. and Fu, D., “Modifications of thermal barrier coatings”, *Surface and Coatings Technology*, 95 : 149-154 (1997).
- 22- Guo, H., B., Vasen, R. and Stover, D., “Atmospheric plasma sprayed thick thermal barrier coatings with high segmentation crack density.”, *Surface and Coatings Technology*, 186 : 353–363 (2004).
- 23- Stokes, J., “The theory and application of the HVOF thermal spray process.”, *Dublin City University Press*, Ireland, 27-28 (2003).
- 24- Davis, J.R., “Introduction to thermal spray processing”, *Handbook of thermal spray technology editor, Asm International and the Thermal Spray Society*, America, 3-13 (2004).

- 25- Çelik, E., "Seramik kaplama teknolojisi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 45 (1993).
- 26- Akalın, Ö., "Motorlarda plazma sprej kaplı silindirlerin tribolojik özellikleri", *Makine Mühendisliği Odası Dergisi*, 486 : 30–33 (2000).
- 27- Üstel, F., "Plazma sprej kaplama teknolojisi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 43 (1995) .
- 28- Mert, Z., "Tek silindirli bir motorda sürtünmeye etki eden faktörlerin belirlenmesi ve sürtünme gücünün azaltılması", Yüksek Lisans, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 34 (2007).
- 29- Haşimoğlu, C., "Düşük ısı kayıplı bir dizel motorunda biyodizel kullanımının performans ve emisyon parametrelerine etkisi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 13-79 (2005).
- 30- Yetgin, S. H., "Alev püskürtme yöntemi ile  $Al_2O_3$  ve  $Cr_2O_3$  kaplanmış  $AlMg_3$  alaşımının kaplama özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi.", Yüksek Lisans Tezi, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 17 (2005).
- 31- Saral, U., "Alümina ilavesinin YSZ termal bariyer kaplamaların mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 21 (2007).
- 32- İnternet: Prokap Makine "HVOF kaplama sistemleri" <http://www.prokap.com.tr/hvof%20kaplama%20sistemleri.htm> (2011).
- 33- Kharlamov, Y.A., "Detonation spraying of protective coatings", *Materials Science and Engineering*, 93 : 1-37 (1987).
- 34- Boztoprak, Y., Kahraman, M. V. ve Güngör, A., "Sol-Jel tekniğiyle kaplanan polikarbonatların fiziksel özelliklerinin incelenmesi", *8.Uluslar Arası Kırılma Konferansı Bildiriler Kitabı*, 7-9 Kasım, İstanbul, 330-337 (2007).
- 35- Kahraman, M.V., Kuğu, M., Menciloğlu, Y., Apohan, N. and Güngör, A., "The novel use of organo alkoxy silane for the synmesis of organic—inorganic hybrid coatings", *Journal of Non-Crystalline Sojids*, 352 : 143-151 (2006).
- 36- Cao, X.Q., Vassen, R. and Stoeber D., "Ceramic materials for thermal barrier coatings," *Journal of the European Ceramic Society*, 24 : 1-10 (2004).
- 37- Yeşildal, R., ve Günay Y. Z., "Plazma sprej yöntemi ile kaplama ve sprej karakteristiklerinin incelenmesi", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 9(1) : 59-76 (2007).

- 38- Osawa, K., Kamo, R. and Valdmanis, E., "Performance of thin thermal barrier coating on small aluminum block diesel engine", *International & Congress and Exposition, Society of Automotive Engineers*, 910461, 24-30 (1991).
- 39- Parlak, A., Yaşar, H., Haşimoğlu, C. and Kolip, A., "The effects of injection timing on no<sub>x</sub> emissions of a low heat rejection indirect diesel injection engine", *Applied Thermal Engineering*, 25(17-18) : 3042-3052 (2005).
- 40- Hejwowski, T., and Weronki, A., "The effect of thermal barrier coatings on diesel engine performance", *Vacuum*, 65(3-4) : 427-432 (2002).
- 41- Haşimoğlu, C, Ciniviz. M., ve Salman M.S., "Değişik yalıtım seviyeleri için düşük ısı kayıplı bir dizel motorunun egzoz emisyonu değişimleri", *Teknolojik Araştırmalar Taşıt Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1(3) : 1-9 (2009).
- 42- Havstad, P. H., Gervin, I.J. and Wade, V.R., "A ceramic insert uncooled diesel engine", *Society of Automotive Engineers*, 860447, 21-30 (1986).
- 43- Ciniviz, M., Haşimoğlu, C., Salman, M. S., Aydın, F. ve Örs, İ., "Bir dizel motorunda termal bariyer kaplamanın performans ve emisyon parametrelerine etkisinin deneysel incelenmesi", *Teknoloji*, 10(3) : 223-233 (2007).
- 44- Hazar, H., ve Öner, C., "CrN kaplamanın bir dizel motoru üzerindeki etkileri", *Mühendis ve Makine*, 48(574) : 22-26 (2007).
- 45- Parlak, A., "Aşırı doldurulmalı seramik kaplı bir dizel motorunda püskürtme avansı ve sıkıştırma oranının deneysel olarak incelenmesi", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 60-61 (2000).
- 46- Ramaswamy, P., Seetharamu, S., Varma, K. B. R. and Rao, K. J., "Thermo mechanical fatigue characterization of zirconium (8% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - ZrO<sub>2</sub>) and mullite thermal barrier coatings on diesel engine components: effect of coatings on diesel engine performance", *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Proquest Science Journals*, 729 : 214 (2000).
- 47- Parlak, A., Yaşar, H. and Şahin, B., "Performance and exhaust emission characteristic of a lower compression ratio LHR diesel engine", *Energy Conversion and Management*, 44(1): 163-175 (2003).
- 48- Leising, C.J. and Purohit, G.P., "Waste Heat Recovery in Turck Engines" *National West Coast Meeting, Society of Automotive Engineers*, 780686, 45-49 (1978).
- 49- Taymaz, L, Çakır, K. and Mimaroglu, A., "Experimental investigation of heat losses in a ceramic coated diesel engine", *Surface and Coatings Technology*, 169-170(2) : 168-170 (2003).

- 50- Hazar, H. ve Öner C., “Dizel motorlarında termal bariyer kaplamanın egzoz emisyonlarına etkisi”, *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 3(1) : 50-57 (2004).
- 51- Afify, E., M. and Klett, D. E., "The effect of selective insulation on the performance, combustion, and no emissions of a diesel engine", *International Congress & Exposition, Society of Automotive Engineers, 960505*, 12-28 (1996).
- 52- Woods, M.E., Bryzik, W. and Schwarz, E., “100 hour endurance testing of a high output adiabatic diesel engine”, *International Congress & Exposition, Society of Automotive Engineers, 940951*, 11-16 (1994).
- 53- Rasihhan, Y. and Wallace, F.J., "Piston-liner thermal resistance model for diesel engine simulation", *Proceedings Institution of Mechanical Engineers*. 205 : 218 (1991).
- 54- Hazar, H., ve Öztürk, U., “Fındık yağı ve D2 yakıtı karışımının performans ve emisyonuna seramik kaplamanın etkileri”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, 13-15 (2009).
- 55- Badgley, P., Kamo, R., Bryzik, W. and Schwarz, E., "Nato durability test of and adiabatic truck engine", *International Congress & Exposition, Society of Automotive Engineers, 900621*, 14-21 (1990).
- 56- Bruns, L., Bryzik, W. and Kamo, R., "Performance assessment of u.s. army truck with adiabatic diesel engine", *International Congress & Exposition, Society of Automotive Engineers, 890142*, 350-360 (1989).
- 57- Chang, S.L. and Rhee, K.I., "Computation of radiation heat transfer in diesel combustion", *International of Highway Meeting, Wisconsin, Society of Automotive Engineers, 831332*, 327-341 (1983).
- 58- Alkidas, A.C., "On the performance and emissions of an uncooled heavy-duty single-cylinder diesel engine", *General Motors Research Labs, Society of Automotive Engineers, 880013*, 243-255 (1988).
- 59- Walzer, H., Heirjch and Langer, M., "Ceramic components in passenger-car diesel engines", *Society of Automotive Engineers, 850567*, 134-245 (1985).
- 60- Hazar, H., "Characterization and effect of using cotton methyl ester as fuel in a LHR diesel engine", *Energy Conversion and Management*, 52(1) : 258-263 (2011).
- 61- Parlak, A., Yasar, H. and Eldogan, O., “The effect of thermal barrier coating on a turbo-charged diesel engine performance and exergy potential of the exhaust gas”, *Energy Conversion and Management*, 46(3) : 489-499 (2005).

- 62- Ciniviz, M., "Performance and energy balance of a low heat rejection diesel engine operated with diesel fuel and ethanol blend", *Transactions of The Canadian Society for Mechanical Engineering*, 34(1) : 93-104 (2010).
- 63- Wallace, F., J., Kao, T., K., Tarabad, M., Alexander, W., D. and Cole, A., "Thermally insulated diesel engines", *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers*, 198A(5) : 21 (1984).
- 64- Toyoma, K., Yoshimitsu, T., Misfflyama, T. and Nakagaki, T., "Heat insulated turbocompound engine", *Society of Automotive Engineers*, 831345, 276-287 (1983).
- 65- Aydın, H , "Pamuk yağı biyodizelinin bir dizel motorunda motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkilerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 45-46 (2007).
- 66- Yaşar, H., Büyükkaya, E. and Çelik, V., "Application of thermal barrier coating in a turbocharged DI diesel engine", *5. Yanma Sempozyumu*, , Bursa 460-468 (1996).
- 67- Hazar, H. ve Öner, C., "İçten yanmalı motorlarda seramik kaplamanın motor performansına etkisi", *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 3(1) : 31-34 (2004).
- 68- Hazar, H. ve Öner, C., "Termal bariyer kaplamanın motor performansına etkisi", *8. Uluslararası Yanma Sempozyumu*, Ankara, 125-132 (2004).
- 69- Hazar, H. ve Öner, C., "Dizel ve benzin motorlarında vuruntu ve etkileri", *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi*, 3(1) : 101-105 (2004).



## **ÖZGEÇMİŞ**

Hüseyin Gürbüz 1985 yılında Tokat/Reşadiye’de doğdu. İlköğretimini Reşadiye Mehmet Akif Ersoy ve Esenler Mareşal Feyzi Çakmak ilköğretim okullarında tamamladı. Lise eğitimini Esenler Atışalanı lisesinde 2002 yılında tamamladı. 2005 yılında Z. Karaelmas üniv. Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Otomotiv Öğretmenliği bölümünü 2009 yılında tamamladı. Halen 2009 yılında kazandığı Karabük üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans programını sürdürmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Balıklarkayası Mevkii / KARABÜK  
E-posta: huseyinnurbuz@hotmail.com