

**TEK SİLİNDİRLİ DİZEL MOTORA UYGULANAN
SERAMİK KAPLAMALARIN
MOTOR PERFORMANS VE EGZOZ
EMİSYONLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**2014
DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Erdoğan VURAL

**TEK SİLİNDİRLİ DİZEL MOTORA UYGULANAN SERAMİK
KAPLAMALARIN MOTOR PERFORMANS VE EGZOZ
EMİSYONLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Erdoğan VURAL

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Haziran 2014**

Erdinç VURAL tarafından hazırlanan “TEK SİLİNDİRLİ DİZEL MOTORA UYGULANAN SERAMİK KAPLAMALARIN MOTOR PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Bülent ÖZDALYAN

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yrd. Doç. Dr. Serkan ÖZEL

Tez Danışmanı, Bitlis Eren Üniversitesi



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 27/ 06/ 2014

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

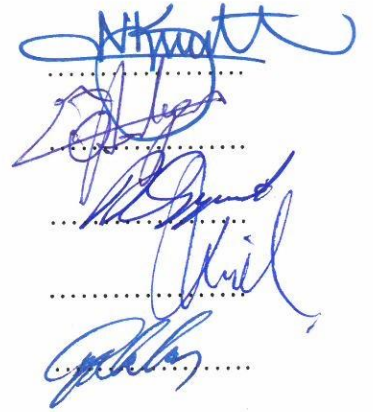
Başkan : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Bülent ÖZDALYAN (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ (GÜ)

Üye : Doç. Dr. Ahmet DURGUTLU (GÜ)



...../..... /2014

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ
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.”

Erdinç VURAL

ÖZET

Doktora Tezi

TEK SİLİNDİRLİ DİZEL MOTORA UYGULANAN SERAMİK KAPLAMALARIN MOTOR PERFORMANS VE EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Erdoğan VURAL

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Bülent ÖZDALYAN

Haziran 2014, 157 sayfa

Bu çalışmada dört zamanlı tek silindirli bir dizel motor kullanılmış olup, motora ait piston ve supaplar stabilize edilmiş zirkonyum (ZrO_2) magnezyum oksit (MgO) tozu içerisine değişik oranlarda alüminyum oksit (Al_2O_3) ilave edilerek, plazma sprej yöntemiyle kaplanmıştır. Motorun yanma odasına ait piston ve supaplar 5 farklı ($ZrO_2 + MgO$), ($ZrO_2 + MgO + \% 25 Al_2O_3$), ($ZrO_2 + MgO + \% 50 Al_2O_3$), ($ZrO_2 + MgO + \% 75 Al_2O_3$), (Al_2O_3) numune ile kaplanmıştır. Kaplanan motor parçalarının her birine scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) ve X-ray diffraction (XRD using Cu $K\alpha$ radiation) yüzey analiz yöntemleri ile malzeme deneyleri yapılmıştır. Kaplama tabakası ile altlık malzemesi olan piston yüzeyi arasındaki yapışma mukavemeti ve mikrosertlikleri test edilmiştir.

XRD incelemelerinde, ZrO_2+MgO ve Al_2O_3 ilaveli kaplamalarda ZrO_2 (Tetragonal), ZrO_2 (Monoclinic), MgO , Al_3Zr_5 , $\alpha-Al_2O_3$ ve $\gamma-Al_2O_3$ tür bileşikler tespit edilmiştir. İncelemeler sonucunda, en düşük gözeneklilik miktarı $ZrO_2+MgO+%50 Al_2O_3$ ile kaplanan numunede olmasından dolayı en iyi yapışma mukavemeti ve en yüksek sertlik değeri bu numunede tespit edilmiştir.

Motor deneyleri bir elektrikli dinamometrede her bir numune için, tam yükte 1600 d/d, 2000 d/d, 2400 d/d ve 2800 d/d motor hızlarında tekrarlanmıştır. Kaplamalı motorun standart motora göre moment, güç ve ısıl veriminde artış, özgül yakıt tüketiminde azalma belirlenmiştir. Malzeme analizleri ve motor deneyleri en iyi performansın ($ZrO_2 + MgO + \% 50 Al_2O_3$) ile gerçekleştiğini göstermiştir. $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamalı motorda, NO_x ve CO_2 emisyonlarında artış gösterirken, HC, CO ve is emisyonlarında azalma görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Seramik kaplama, plazma sprej, motor performans, egzoz emisyon, $ZrO_2 + MgO/Al_2O_3$.

Bilim Kodu : 916.1.196

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

THE INVESTIGATION OF EFFECT ON ENGINE PERFORMANCE AND EXHAUST EMISSIONS OF CERAMIC COATINGS APPLIED TO SINGLE CYLINDER DIESEL ENGINE

Erdoğan VURAL

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Bülent ÖZDALYAN

June 2014, 157 pages

The four-stroke single cylinder diesel engine has been used in this study, the pistons and valves of the engine has been stabilized, the aluminium oxide (Al_2O_3) in different ratios has been added in the power of zirconium (ZrO_2) magnesium oxide (MgO), and has been coated with the plasma spray method. The pistons and valves of the combustion chamber of the engine has been coated with 5 different ($\text{ZrO}_2 + \text{MgO}$), ($\text{ZrO}_2 + \text{MgO} + 25 \text{ wt. \% Al}_2\text{O}_3$), ($\text{ZrO}_2 + \text{MgO} + 50 \text{ wt. \% Al}_2\text{O}_3$), ($\text{ZrO}_2 + \text{MgO} + 75 \text{ wt. \% Al}_2\text{O}_3$), (Al_2O_3) sample. The material tests has been made for each of the coated engine parts with the scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD using $\text{Cu K}\alpha$ radiation) surface analysis methods. The microhardness and adhesive strength between the coating layer and the piston surface used as substrate material has been tested.

In XRD studies, such compounds as ZrO_2 (Tetragonal), ZrO_2 (Monoclinic), MgO , Al_3Zr_5 , $\alpha-Al_2O_3$ and $\gamma-Al_2O_3$ have been identified on ZrO_2+MgO and Al_2O_3 additive coatings. At the end of the analyzing, the best adhesion strength and maximum hardness value have been determined in this sample due to the fact that the lowest amount of porosity is in the sample coated with $ZrO_2 + MgO + 50wt. \%Al_2O_3$.

The engine tests have been repeated for each sample in an electric dynamometer in full power 1600 rpm, 2000 rpm, 2400 rpm and 2800 rpm engine speeds. 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. The material analysis and engine tests have shown that the best performance has been performed with ($ZrO_2 + MgO + \% 50 Al_2O_3$). $ZrO_2 + MgO + 50 wt. \%Al_2O_3$ coated engine, it was shown that NO_x and CO_2 emissions was increased while HC, CO and soot emissions were decreased.

Key Word : Ceramic coating, plasma spray, engine performance, exhaust emissions, $ZrO_2 + MgO/Al_2O_3$.

Science Code : 916.1.196

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocalarım Doç. Dr. Bülent ÖZDALYAN, Yrd. Doç. Dr. Serkan ÖZEL, Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK ve Doç. Dr. Behçet GÜLENÇ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Motor Performans deneylerinin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi öğretim üyesi Prof. Dr. M.Bahattin ÇELİK'e ve Öğr. Gör. Salih ÖZER'e teşekkür ederim.

Sevgili annem Dilber VURAL, Zeynel AKIN, Kamil ERGÜN ve Yrd. Doç. Dr. Ercan IŞIK'a manevi hiçbir yardımı esirgemediğim yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1.	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	4
DİZEL MOTORLARINDA YANMA ve YANMAYA ETKİ EDEN PARAMETRELER.....	4
2.1. DİZEL MOTORLARINDA YANMA	4
2.1.1. Yakıtın Yanma Süreci.....	7
2.1.1.1. Atomizasyon	7
2.1.1.2. Buharlaştırma	7
2.1.1.3. Karışım Oluşumu	8
2.1.1.4. Kendi Kendine Tutuşma	9
2.1.1.5. Yanma	9
2.1.2. Dizel Motorlarda Yanma	10
2.1.2.1. Tutuşma Gecikmesi Periyodu	10
2.1.2.2. Ani Yanma Periyodu.....	12
2.1.2.3. Difüzyon Kontrollü Yanma Periyodu.....	13
2.1.2.4. Art Yanma Periyodu	13
2.2. DİZEL MOTORLARINDA YANMAYA ve EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİ EDEN PARAMETRELER.....	14

	<u>Sayfa</u>
2.2.1. Giriş Basıncı ve Sıcaklığı	14
2.2.2. Sıkıştırma Oranı.....	15
2.2.3. Püskürtme Avansı.....	17
2.2.4. Yakıtın Özellikleri	19
2.2.5. Soğutucu Akışkanın Sıcaklığı	20
2.2.6. Yakıt/Hava Oranı.....	22
2.2.7. Girdap Oranı	22
2.2.8. Enjeksiyon Basıncı	23
2.2.9. Aşırı Doldurma	23
2.3. DİZEL MOTORLARINDA EMİSYONLAR.....	24
2.4. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ISI TRANSFERİ	26
BÖLÜM 3.	30
TERMAL BARIYER KAPLAMALI MOTORLARDA KULLANILAN SERAMİK MALZEMELER	30
3.1. SERAMİK MALZEMELER.....	32
3.1.1. Oksit Seramikler	34
3.1.1.1. Alümina (Al_2O_3)	34
3.1.1.2 Titanyum Oksit (TiO_2).....	35
3.1.1.3. Zirkonya (ZrO_2)	37
3.1.1.4. Magnezyum Oksit (MgO).....	39
3.1.2. Oksit Olmayan Seramikler(karbürler)	40
3.1.2.1. Bor Karbür (B_4C).....	40
3.1.2.2. Krom Karbür (Cr_3C_2).....	41
3.1.2.3. Silisyum Karbür (SiC)	42
BÖLÜM 4	44
TERMAL BARIYER KAPLAMA YÖNTEMLERİ.....	44
4.1. TERMAL SPREYLEME	46
4.1.2. Plazma Spreyleme	49
4.1.2.1. Kaplama Oluşum Prosesi	52
4.1.2.2. Plazma Spreylemenin Avantajları.....	53

	<u>Sayfa</u>
4.1.3. Ark Spreyleme Yöntemi	53
4.1.4. Detonasyon Alev Spreyleme	56
4.1.5. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Spreyleme (HVOF).....	59
4.1.6. Alev Spreyleme	61
4.1.6.1. Alev Spreyleme İşleminin Prensibi	61
4.1.6.2. Alev Püskürtme Cihazı	62
4.1.6.3. Kaplama Özellikleri	67
4.1.6.4. Alev Spreyleme Yöntemleri	68
BÖLÜM 5.	72
KONU İLE İLGİLİ BENZER LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	72
BÖLÜM 6.	82
MALZEME VE METOT	82
6.1. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER	82
6.1.1. Piston ve Supaplar	82
6.1.2. Kaplama Malzemeleri.....	83
6.1.3. Yüzey Pürüzlendirme İşlemi	83
6.1.4. Deney Numunelerin Kaplanması.....	84
6.1.5. Metalografik İncelemeler için Numune Hazırlanması	86
6.1.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları	87
6.1.7. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri	87
6.2. MEKANİK TESTLER	88
6.2.1. Yapışma Mukavemeti Testi	88
6.2.2. Sertlik Ölçümleri	89
6.3. TERMAL ŞOK TESTLERİ	90
6.4. MOTOR PERFORMANS TESTLERİ	91
6.4.1. Motorun Güç ve Moment Ölçümleri	92
6.4.2. Sıcaklık Ve Yakıt Ölçümleri	94
6.4.3. Egzoz Gaz Analiz Ölçümleri.....	95
6.4.4. Silindir İçi Basınç Ölçümleri	96
6.5. DENEY METODU	97

	<u>Sayfa</u>
6.5.1. Kaplanan Piston ve Supapların Motora Monte Edilmesi	97
6.6. MOTOR KARAKTERİSTİKLERİNİN HESAPLAMASI.....	99
6.6.1. Döndürme Momenti ve Efektif Güç	100
6.6.2. Ortalama Efektif Basınç	100
6.6.3. Özgül Yakıt Tüketimi	101
6.6.4. Efektif Verim	101
BÖLÜM 7.	102
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	102
7.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	102
7.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİ.....	114
7.3. YAPIŞMA MUKAVEMETİ TEST SONUÇLARI	115
7.4. YÜZEY SERTLİK TEST SONUÇLARI.....	117
7.5. TERMAL ŞOK TEST SONUÇLARI	118
7.6. KAPLAMA YAPILMIŞ MOTORUN PERFORMANS TEST SONUÇLARI	122
7.6.1. Deneyin Yapılışı	123
7.6.2. Motor Hızının ve Kaplanmış Motor Pistonlarının Silindir Basıncına Etkisi	123
7.6.3. Termal Bariyer Kaplamaların Motor Gücü ve Motor Momentine Etkisi	128
7.6.4. Termal Bariyer Kaplamaların Özgül Yakıt Tüketimine Etkisi.....	129
7.7. KAPLAMA YAPILMIŞ MOTORUN EGZOZ EMİSYON TEST SONUÇLARI.....	130
7.7.1. Termal Bariyer Kaplamaların Egzoz Gazı Sıcaklığına Etkisi	130
7.7.2. Termal Bariyer Kaplamaların HC (Hidro Karbon) Emisyonlarına Etkisi	131
7.7.3. Termal Bariyer Kaplamaların CO (Karbon Monoksit) Emisyonlarına Etkisi.....	133
7.7.4. Termal Bariyer Kaplamaların CO ₂ (Karbon Dioksit) Emisyonlarına Etkisi	134
7.7.5. Termal Bariyer Kaplamaların NO _x (Azot Oksit) Emisyonlarına Etkisi.....	135
7.7.6. Termal Bariyer Kaplamaların Partikül (İs) Oranına Etkisi	136

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 8.	138
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	138
8.1. SONUÇLAR	138
8.2. ÖNERİLER	142
KAYNAKLAR	144
ÖZGEÇMİŞ	157

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Dizel motorlarda yakıt hüzmesinin oluşumu	5
Şekil 2.2.	Püskürtme hüzmesinde karışım teşkili ve karışım oranlanma değişimi ...	6
Şekil 2.3.	Dizel motorlarda karışımın oluşumu ve yanma zaman ölçeği	10
Şekil 2.4.	Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanma periyotları	11
Şekil 2.5.	Ani ve difüzyon kontrollü yanma periyodu	14
Şekil 2.6.	Giriş basıncının tutuşma gecikmesine etkisi	15
Şekil 2.7.	Sıkıştırma oranının basınç-krank açısı diyagramına etkisi	16
Şekil 2.8.	Sıkıştırma oranının, fren özgül yakıt tüketimine etkisi.....	16
Şekil 2.9.	Sıkıştırma oranının is miktarına etkisi	17
Şekil 2.10.	Püskürtme avansının basınç-krank açısı diyagramına etkisi.....	18
Şekil 2.11.	Dinamik enjeksiyon avansının motor performansına ve emisyonlara etkisi	19
Şekil 2.12.	Setan sayısının tutuşma gecikmesine etkisi	20
Şekil 2.13.	Silindir ceket sıcaklığının basınç-krank açısı diyagramına etkisi.....	21
Şekil 2.14.	Yağ ve soğutma suyu sıcaklıklarının tutuşma gecikmesi süresine etkisi	21
Şekil 2.15.	Girdap oranının basınç-krank açısı diyagramına etkisi.....	22
Şekil 2.16.	Enjeksiyon basıncına bağlı olarak damlacık çapı değişimi	23
Şekil 2.17.	Direk püskürtmeli bir dizel motorunun egzozundaki kirletici konsantrasyonları	25
Şekil 2.18.	Bir motora birim zamanda giren ve çıkan enerjiler	27
Şekil 2.19.	Dizel motorlarında soğutma ile kaybedilen ısı miktarı.....	28
Şekil 2.20.	Direkt enjeksiyonlu 6 silindirli dizel motorundaki sürtünme kayıpları ..	29
Şekil 3.1.	Standart ve düşük ısı kayıplı motorun (DIKM), enerji dengesinin karşılaştırılması	31
Şekil 4.1.	Termal sprey kaplama yönteminin şematik olarak gösterimi	46
Şekil 4.2.	Plazma sprey kaplama yönteminin şematik resmi	51
Şekil 4.3.	Plazma sprey tabancasının elemanları	51

Sayfa

Şekil 4.4. Plazma sprej sisteminin şematik gösterimi	52
Şekil 4.5. Ark sprej tabancası	54
Şekil 4.6. Detonasyon (Patlamalı) püskürtme yönteminin şematik gösterimi	58
Şekil 4.7. Yüksek hızlı oksji-yakıt (HVOF) spreyleme tabancası.....	60
Şekil 4.8. Bir meme sisteminin şematik olarak gösterilişi	64
Şekil 4.9. Bir alevle püskürtme cihazında yanma kademeleri.....	64
Şekil 4.10. Püskürtme nozulu ile parça arasındaki olayın şematik gösterimi	65
Şekil 4.11. Metal püskürtme tabakasının yapısı	66
Şekil 4.12. Tel alev püskürtme tabancasının şematik görünümü	69
Şekil 4.13. Tel alev püskürtme sisteminin şeması.....	69
Şekil 4.14. Toz alev spreylemenin şematik gösterimi	71
Şekil 6.1. Yüzey pürüzlendirme cihazı.....	84
Şekil 6.2. Yüzeyi kaplanmış piston ve yapışma mukavemet test numuneleri.....	85
Şekil 6.3. Kaplama işleminin gerçekleştirildiği atmosferik plazma püskürtme sistemi.....	85
Şekil 6.4. Metalografik zımparalama ve parlatma cihazı	86
Şekil 6.5. Denejlerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu.....	87
Şekil 6.6. Testlerde kullanılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.	88
Şekil 6.7. Yapışma mukavemeti testi için numune sıkıştırma aparatı.....	89
Şekil 6.8. Testlerde kullanılan yapışma mukavemeti test cihazı	89
Şekil 6.9. Ölçümlerde kullanılan yüzey sertlik test cihazı.	90
Şekil 6.10. Kaplanmış termal şok test numuneleri	90
Şekil 6.11. Testlerde kullanılan yüksek ısı fırını.	91
Şekil 6.12. Testlerde kullanılan deney motoru	92
Şekil 6.13. Ölçümlerde kullanılan dinamometre.	93
Şekil 6.14. Ölçümlerde kullanılan dinamometre kontrol ünitesi.	93
Şekil 6.15. Ölçümlerde kullanılan yük hücresi ve indikatörün görünümü	94
Şekil 6.16. Ölçümlerde kullanılan egzoz gaz sıcaklık termokopulu.....	94
Şekil 6.17. Ölçümlerde kullanılan, Yakıt kabı, Dijital terazi, Kronometre	95
Şekil 6.18. Ölçümlerde kullanılan egzoz gaz analiz cihazı.	95
Şekil 6.19. Ölçümlerde kullanılan silindir içi basınç sensörü	96
Şekil 6.20. Ölçümlerde kullanılan osiloskop ve amfikatör	97

Şekil 6.21. Kaplama yapılan piston ve supapların monte edildikten sonra görünümleri	98
Şekil 6.22. Testlerde kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi	98
Şekil 7.1. Kaplama kesitlerinin optik mikroskop (om) görüntüleri.....	102
Şekil 7.2. ZrO ₂ +MgO kaplı numunenin SEM görüntüsü.	105
Şekil 7.3. ZrO ₂ +MgO kaplanan numunenin EDS analizi sonuçları.....	105
Şekil 7.4. ZrO ₂ +MgO kaplanan numunelerin XRD deney sonuçları.....	106
Şekil 7.5. ZrO ₂ +MgO+%25Al ₂ O ₃ kaplamanın element haritası ve SEM görüntüsü.....	107
Şekil 7.6. ZrO ₂ +MgO+%25 kaplanan numunenin EDS analizi sonuçları.	107
Şekil 7.7. ZrO ₂ +MgO+%25Al ₂ O ₃ kaplama kesitinin XRD deney sonuçları.....	108
Şekil 7.8. ZrO ₂ +MgO+%50Al ₂ O ₃ kaplamanın element haritası ve SEM görüntüleri	109
Şekil 7.9. ZrO ₂ +MgO+%50 kaplanan numunenin EDS analizi sonuçları.	109
Şekil 7.10. ZrO ₂ +MgO+%50 Al ₂ O ₃ kaplama kesitinin XRD deney sonuçları.....	110
Şekil 7.11. ZrO ₂ +MgO+%75 Al ₂ O ₃ kaplı numunenin SEM görüntüsü.....	111
Şekil 7.12. ZrO ₂ +MgO+%75 Al ₂ O ₃ kaplanan numunenin EDS analizi sonuçları..	111
Şekil 7.13. ZrO ₂ +MgO+%75 Al ₂ O ₃ kaplama kesitinin XRD deney sonuçları.....	112
Şekil 7.14. Al ₂ O ₃ kaplı numunenin SEM görüntüleri.	113
Şekil 7.15. Al ₂ O ₃ kaplanan numunenin EDS analizi sonuçları.	113
Şekil 7.16. Al ₂ O ₃ kaplama kesitinin XRD deney sonuçları.	114
Şekil 7.17. Deney numunelerine ait yüzey pürüzlülük test grafiği	115
Şekil 7.18. Yapışma mukavemeti test numuneleri.....	116
Şekil 7.19. Deney numunelerine ait yapışma mukavemeti test grafiği.....	116
Şekil 7.20. Deney numunelerine ait mikrosertlik grafiği	117
Şekil 7.21. Termal şok testleri sonucu tespit edilen hasar tipleri	119
Şekil 7.22. Kaplama numunelerinin termal şok testi sonrası görünümleri.....	120
Şekil 7.23. 1600 d/d'da kaplama yapılmış motorların silindir içi basınca etkisi	124
Şekil 7.24. 2000 d/d'da kaplama yapılmış motorların silindir içi basınca etkisi	125
Şekil 7.25. 2400 d/d'da kaplama yapılmış motorların silindir içi basınca etkisi	126
Şekil 7.26. 2800 d/d'da kaplama yapılmış motorların silindir içi basınca etkisi	127
Şekil 7.27. Kaplamaların motor gücüne etkisi	128
Şekil 7.28. Kaplamaların motor momentine etkisi.....	128

	<u>Sayfa</u>
Şekil 7.29. Kaplamaların özgül yakıt tüketimine etkisi	129
Şekil 7.30. Kaplamaların egzoz gazı sıcaklığına etkisi	130
Şekil 7.31. Kaplamaların HC emisyonlarına etkisi	132
Şekil 7.32. Kaplamaların CO emisyonlarına etkisi	133
Şekil 7.33. Kaplamaların CO ₂ emisyonlarına etkisi	134
Şekil 7.34. Kaplamaların NO _x emisyonlarına etkisi.....	135
Şekil 7.35. Kaplamaların is emisyonlarına etkisi	137

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Egzoz bileşenleri ve etkileri.....	24
Çizelge 3.1. Al ₂ O ₃ 'in fiziksel ve mekanik özellikleri.....	35
Çizelge 3.2. TiO ₂ 'in fiziksel ve mekanik özellikleri.....	37
Çizelge 3.3. ZrO ₂ 'in bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.....	39
Çizelge 3.4. MgO'nun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.....	39
Çizelge 3.5. B ₄ C'ün fiziksel ve mekanik özellikleri.....	40
Çizelge 3.6. Cr ₃ C ₂ 'ün fiziksel ve mekanik özellikleri.....	42
Çizelge 3.7. SiC'ün fiziksel ve mekanik özellikleri.....	43
Çizelge 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan pistonun kimyasal bileşimi.	82
Çizelge 6.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan supapların kimyasal bileşimi.....	82
Çizelge 6.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaplama tozları.....	83
Çizelge 6.4. Plazma püskürtme kaplama parametreleri.....	86
Çizelge 6.5. Deney motorunun teknik özellikleri.....	92
Çizelge 6.6. ITALO PLUS egzoz gaz analizörünün özellikleri.....	96

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al_2O_3	: Alüminyum oksit
AlN	: Alüminyum nitrit
AlSi12CuNi	: Piston alaşımı
B_4C	: Bor karbür
CaB_6	: Kalsiyum borür
CdS	: Kadmiyum sülfat
CO	: Karbon monoksit
CO_2	: Karbon dioksit
C	: Kübik
H	: Hekzagonal
HB	: Brinell sertliği
HC	: Hidro karbon
Hu	: Yakıtın alt ısı değeri
HV	: Vickers sertliği
MgO	: Magnezyum oksit
MİG	: Metal asal gaz kaynağı
MoS_2	: Molibden ikisülfür
Mo_2Si	: Silikat refrakter malzeme
MPa	: Mega Paskal
m_s	: Soğutucu akışkan debisi kg/h
m_y	: Kütleli debi
n	: Motor hızı (d/d)
NiCoCrAlY	: Metalik bağ esaslı termal bariyer kaplama
Ni-Cr	: Nikel Krom

NiCrAlY	: Nikel krom alüminyum yitriyum
NO _x	: Azot Oksit
NO	:Azot Monoksit
O ₂	: Oksijen (ppm)
P	: Basınç (N/m ²)
P ₁	: Pistona etkiyen indike güç
Pe	: Efektif güç, (Motor milinden alınan efektif güç), (kW)
PH	: Havanın yoğunluğu (kg/m ³)
Pme	: Ortalama efektif basınç (Pa)
p _y	: Yakıt yoğunluğu (kg/m ³)
R	: Romboedrik
Qe	: Egzoz gazlarının birim zamanda taşıdığı Isı (kW)
Q _E	: Birim zamanda egzoz ile kaybedilen enerji
Q _M	: Birim zamanda mekanik kayıplarla ısıya dönüşerek kaybolan enerji
Q _S	: Motor soğutma suyuna birim zamanda geçen Isı miktarı (kW)
Q _T	: Birim zamanda yakıt ile giren toplam enerji (ısı), (kW)
Si ₃ N ₄	: Silisyum nitrit
SiC	: Silisyum karbür
TaSi ₂	: Tantal silisid
TiCO	: Toplam ısı açığı çıkış oranı
TiB ₂	: Titanyum ikiborür
TiC	: Titanyum karbür
TİG	: Tungsten asal gaz kaynağı
TiN	: Titanyum nitrit
Tsg	: Çeperlerin gaz tarafı sıcaklığı
We	: Efektif iş
v _h	: Strok hacmi
w, C _m	: Ortalama piston hızı
WC	: Tungsten karbür
WSi ₂	: Tungsten silisid
Y ₂ O ₃	: Yitriya
z	: Silindir sayısı
ZnS	: Zirkonyum Sülfat

ZrC : Zirconium karbür
ZrN : Zirconium nitrat
ZrO₂ : Zirkonyum oksit
°F : Fahrenheit derece
β : Beta
α : Alfa
µm : Mikrometre
°K : Kelvin derece
°C : Santigrat derece

KISALTMALAR

AÖN	: Alt Ölü Nokta
ASTM-C633-79	: Alev Püskürtme Kaplamaların Birleşme Direnci Standart Test Metodu
bmep	: Fren Ortalama Efektif Basınç
d/d	: Devir / Dakika
DIKM / LHR	: Düşük Isı Kayıplı Motorlar
DIN	: Alman Standart Enstitüsü
EDS	: Enerji Dağılımlı X-Işınları Analizi
FOEB	: Fren Ortalama Efektif Basıncı (kPa)
FÖYT	: Fren Özgül Yakıt Tüketimi (g/kWh)
ft/sn	: Fit / Saniye
HFK	: Hava Fazlalık Katsayısı
İÇÖ	: Isı açığa Çıkış Oranı
KMA	: Krank Mili Açısı (°)
kW	: Kilo Watt
kPa	: Kilo Paskal
LB	: Pound-Kuvvet
VOF	: Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Sprey
ÖYT	: Özgül yakıt tüketimi (g/kWh)
ppm	: Milyonda bir (Parts Per Million)
PSI	: İnç kareye pound cinsinden uygulanan kuvvet
PSZ	: Kısmen stabilize zirkonya
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)
SS	: Setan Sayısı
TBK/TBC	: Termal Bariyer Kaplama (Thermal Barrier Coating)
TS	: Türk Standartları
ÜÖN	: Üst Ölü Nokta
Y/H	: Yakıt/Hava Oranı
XRD	: X ışını kırınımı (X Ray Diffraction)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Karayollarında kullanılan motorlu ilk taşıt 1769 yılında Josept Cugnot tarafından yapılmıştır. O tarihten bu tarihlere kadar motorlu araçlar büyük bir değişim göstermiştir. Bununla beraber dünyadaki değişim hızla birbiri ardına gelişerek devam etmiştir. Türkiye de ise ilk otomobil girişimi 1929'da Ford tarafından İstanbul da kurulmuş ve bunu diğer fabrikalar hızla izlemiştir. Bunu takip eden yıllarda ise piyasaya giren taşıt sayısı hızla artmıştır [1].

Motorlu araçların her alanda kullanılmaya başlanması ile birlikte yan sanayi de hızla gelişmiş ve tüm dünyada motorlu taşıtlar yan sanayisi ile birlikte büyük bir iş alanı haline gelmiştir. Bu gelişmelere paralel olarak eşyaların ve insanların motorlu taşıtlarla taşınması ve özel ulaşım araçlarının kullanımı, insanlara yarar ve kolaylıklar sağlamış, bunlar da motorlu taşıtların kullanımını iyice hızlandırmıştır. Bu nedenle motorlu taşıtların geliştirilmesi çalışmaları hızla devam etmekte ve çalışmalar aşağıdaki belirtilen aşamalarda devam etmiştir.

- Daha küçük daha hafif, daha verimli, daha çevreci motor ve aktarma organlarının geliştirilmesi
- Taşıt boyutların küçültülmesi, malzemesinin değiştirilerek hafifletilmesi
- Aerodinamik tasarım çalışmaları

Yukarıdaki aşamaların ortak noktası ise malzeme bilimidir. Motorlu taşıtların gelişim aşamaları izlendiğinde, malzeme bilimi ile bağlantılı olduğu da açıkça görülebilmektedir [2,3].

Hızlı gelişen teknolojiyle birlikte yüksek performanslı malzemelere olan ihtiyaç da artmaktadır. Bu alanlardan bir tanesi de motorlardır. İçten yanmalı motorlarda yanma odası elemanları, çeşitli yöntemlerle seramik malzemelerle kaplanmaktadır. Bu yöntemlerin başında, termal bariyer kaplamalar gelmektedir. Termal bariyer kaplamalar, motor içerisinde metal bileşenlerin sıcak bölümlerinin güvenilirliklerini, dayanıklılıklarını, motor verim ve performansını arttırmak için kullanılır. Termal bariyer kaplamalar, ara bağ tabakasının isteğe bağlı olarak kullanılmasıyla birlikte, genellikle oksidasyon direnci ve termal yalıtım sağlayan dayanıklı üst tabakalardan oluşmaktadır. Termal bariyer kaplanmış motor parçaları; piston, silindir kafası, silindir gömleği ve egzoz supaplarıdır. Termal bariyer uygulanmış motorlar düşük ısı kayıplı motorlar (LHR) olarak tanımlanmaktadır. LHR motorun yanma odası elemanlarının yalıtılması, silindir içerisindeki gaz ve silindir gömleği arasındaki ısı transferini düşürmektedir. LHR kavramı, ısının soğutucuya gitmesini baskı kontrol etmek ve enerjiyi faydalı şekilde geri kazanmak esasına dayalıdır [4,5].

Motor parçalarının çoğu, sıcaklığa duyarlı sertleştirilmiş parçalardır. Bu parçalardaki tribolojik sistemler; temas basıncı, temas sıcaklığı, yağlama veya yağsızlık, aşınma oranı ve sürtünme kaybı gibi faktörlere bağlı olarak çalışmaktadır [6].

Motorlarda uygulanan termal bariyer kaplamalar, kaplanacak malzemeyi yanmış gazların olumsuz etkilerinden (sıcaklık, korozyon, oksitlenme) ve aşınmadan korumaktadır [7]. Bu kaplamalar ile yanma sıcaklığı artırılarak ve soğutma havası miktarı azaltılarak, yakıt tüketiminin düşürülmesi sağlanmaktadır [8].

Dizel ve benzinli motorlarda enerji çevriminin gerçekleştiği yanma odası ve elemanları, yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalmaktadır. Yanma reaksiyonu sonucu meydana gelen termal şok, basınç ve yanmış gazların olumsuz etkileri, yanma odası elemanlarının (silindir gömleği, supaplar, piston, piston kafası vs.) yüzeylerinde kimyasal aşınmaya ve deformasyona sebep olmaktadır. Oluşan bu kimyasal aşınma, bir süre sonra malzemenin servis ömrünü azalttığı için, motorda kademe kademe performans düşüklüğü, yakıt tüketimi artışı ve emisyon değerlerinde bir artış olmaktadır. Meydana gelmesi muhtemel bu yüzey deformasyonlarını engellemek, oluşan yüksek sıcaklık, basıncın ve yanma olayı sırasında meydana gelen kimyasal

aşınmanın (korozyonun) ana malzeme yüzeyine direkt olarak temas etmesinin engellenmesiyle mümkün olmaktadır. Böylece, seramik kaplanmış malzemenin mekanik ve ekonomik ömrünün artması sağlanmaktadır. Bu korumayı sağlayan en uygun yöntemlerden biriside, malzemenin yüzeyini seramik bir malzemeyle kaplamak, yani ana malzeme üzerinde termal ve fiziksel bir arayüzey oluşturmaktadır.

Seramik kaplama uygulanmış dizel motorlara ait mevcut literatürlerdeki boşluğu gidermek amacıyla bu tez çalışmasında; plazma püskürtme sistemi kullanılarak içten yanmalı tek silindirli bir dizel motora ait piston ve supap yüzeyleri, $ZrO_2 + MgO$, $ZrO_2 + MgO + \%25 Al_2O_3$, $ZrO_2 + MgO + \%50 Al_2O_3$, $ZrO_2 + MgO + \%75 Al_2O_3$, Al_2O_3 tozları ile kaplanmış ve kaplama tabakalarının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca kaplama yapılan pistonlar ve supaplar içten yanmalı tek silindirli dizel motora bağlanarak, motor test dinamometresinde, motor performans ve egzoz emisyon değerlerinin, kaplama uygulanmamış standart dizel motora ait performans ve egzoz emisyon değerleriyle mukayese edilerek uygulanan kaplamaların hangisinin daha uygun olduğunun belirlenmesi hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2

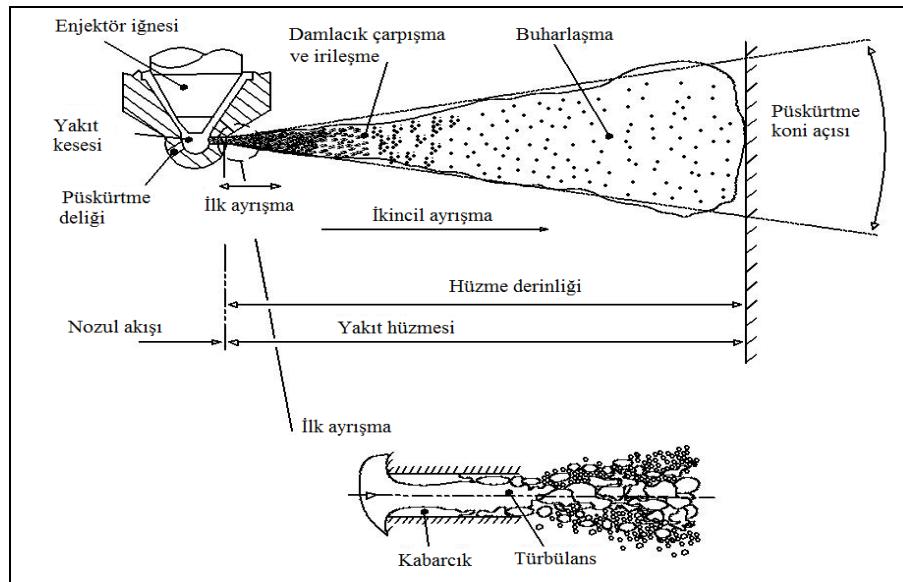
DİZEL MOTORLARINDA YANMA VE YANMAYA ETKİ EDEN PARAMETRELER

2.1. DİZEL MOTORLARINDA YANMA

Dizel motorlarında yanma olayı; yakıtın silindir içersine püskürtülmeye başladığı andan, yanma ürünlerinin egzoz supabından atılmaya başladığı ana kadar meydana gelen bir takım reaksiyonlarda oluşmaktadır. Bu reaksiyonlar; yakıtın püskürtüldüğü anda hacim genişlemesi nedeniyle parçalanması, hava ile karışması, buharlaşması, kendi kendine tutuşması, yanması ve silindir içersindeki basınç ile, sıcaklığın artışına etkilemektedir. Tüm bu olaylarda, motorun ve yakıt sisteminin tasarımı önemlidir. Ayrıca, silindire gönderilen yakıtın zamanlaması ve miktarının kontrolü de yanma olayında etkilidir [9].

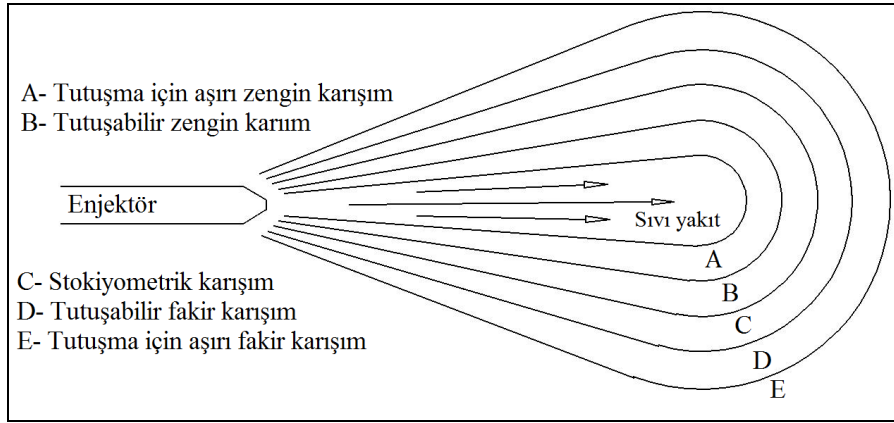
Yakıt püskürtme sisteminin ana görevi, çok kısa zaman diliminde yeterli buharlaşmanın ve hüzme derinliğinin sağlanması için, yakıtın yüksek akışta iyi atomizasyon olmasıyla gerçekleştirilmektedir. Yakıt püskürtme sistemi, motor yüküne ve hızına bağlı olarak, motorun ihtiyaç duyduğu yakıt miktarını ölçmeli, doğru zamanda istenilen hızda püskürtmelidir. Yanma odası da, püskürtmeye bağlı olarak, uygun hüzme şeklini ve yapısını sağlamaktadır. Genellikle yakıt besleme pompası, yakıt deposundan yakıtı alarak yüksek basınçlı yakıt pompasına taşımaktadır. Yakıt pompası, yakıt hat basıncını yükselterek yakıtı püskürtmesi için enjektöre, oradan da fazla yakıtı tekrar yakıt deposuna göndermektedir. Geleneksel yakıt püskürtme sistemindeki yüksek basınçlı yakıt pompası, motorun ihtiyaç duyduğu yakıtı (hacimsel olarak) ölçerek enjektöre göndermektedir.

Enjektör nozulu üzerindeki püskürtme deliklerinin çapları 0,1 - 1 mm arasında değişmektedir. Sıvı yakıtın enjektörü terk etme hızı, 100-200 m/s arasındadır. Enjektörü terk eden sıvı yakıtın tanecik çapı ise yaklaşık 0,01 mm veya daha küçüktür. Tanecik çapını etkileyen en önemli parametreler, enjektör nozulunun her iki tarafındaki basınç farkı, nozul çapı ve geometrisi, yakıt özellikleri, yanma odasındaki hava sıcaklığı ve türbülansdır. Enjektör nozulunun her iki tarafındaki yüksek basınç farkı, yakıt tanecik çapını önemli ölçüde azaltmaktadır. Püskürtülen yakıtın hızı, yanma odasındaki basınca, buharlaşmaya ve türbülansa bağlı olarak değişmektedir. Yakıt hüzmesi ilerlerken, yakıt hüzmesinin etrafında buharlaşma meydana gelmektedir. Bununla birlikte yakıt hüzmesinin çekirdeği çoğunlukla sıvı yakıttan oluşmaktadır [10,11]. Yakıtın enjektör nozulunu terk etmesinin hemen ardından, püskürtülen yakıt parçalanarak koni şeklini almaktadır. Sıvı yakıtın parçalanmaya başladığı ilk kısım, ilk ayrışma bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölge genellikle iri yakıt taneciklerinden oluşmaktadır. Yüksek basınçlı püskürtmede ana parçalanma mekanizmasını oluşturan etkenler, enjektör püskürtme deliklerinin içerisinde oluşan hava kabarcıkları ve türbülansdır. Mevcut iri yakıt taneciklerinin ayrışmasını takip eden parçalanma süreci, ikincil ayrışma bölgesi olarak adlandırılmaktadır. Bu bölgedeki yakıt tanecikleri daha küçüktür ve yanma odasındaki aerodinamik kuvvetler ve gazlardan dolayı hızı gittikçe azaltılmaktadır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Dizel motorlarda yakıt hüzmesinin oluşumu [10].

Yakıt hüzmesinin merkezindeki sıvı yakıt, hava/yakıt karışımından oluşan buhar tabakası tarafından çevrelenmektedir. Sıvı yakıtın büyük bir kısmı yakıt hüzmesinin merkezinde yoğunlaşır. Hava/yakıt karışım oranları, yakıt merkezinden uzaklaştıkça ve hava ile karışıkça artmaktadır (Şekil 2.2). Yakıt taneciklerinin hızları hüzme ekseninde en yüksek seviyededir. Aynı zamanda, hüzme merkezinde yakıt taneciklerinin birbirleri ile çarpışma ihtimalide de daha yüksektir. Hüzme merkezindeki tanecik çarpışmaları tanecik hızını yavaşlatırken, yakıtın kütlesini de arttırmaktadır. Bu bölgede, yakıt tanecikleri daha küçük parçalara ayırırken, daha sonra tekrar birleşerek daha iri yakıt tanecikleri de oluşturabilirler [11].



Şekil 2.2. Püskürtme hüzmesinde karışım teşkili ve karışım oranlanma değişimi [11].

Yakıt hüzmesinin derinliği, enjektör nozulu ile yanma odası yüzeyleri ile sınırlıdır. Tam yük (uzun püskürtme periyodu), yüksek püskürtme basıncı veya erken püskürtme (yanma odasında püskürtme öncesi düşük gaz yoğunluğu) durumlarında, yakıt hüzmesi silindir yüzeylerine çarparak silindir yüzeylerinde sıvı yakıt filmi oluşturmaktadır. Silindir yüzeylerinde oluşan yakıt filmi, hava yakıt karışımını olumsuz etkileyerek, yanma odası cidarlarındaki yanma sıcaklığını düşürmektedir. Ayrıca hidrokarbon (HC) ve is emisyonların oluşumunada sebep olmaktadır. Çünkü silindir yüzeylerindeki sıvı yakıt filminin buharlaşması zordur ve bu durum eksik yanmaya sebep olmaktadır. Yakıt hüzme derinliğinin çok kısa olması ise, aşırı zengin karışım oluşmasına is ve HC emisyonlarının artmasına sebep olmaktadır [10,11].

Yakıtın fiziksel özelliklerinin (viskozite, yoğunluk yüzey gerilmesi gibi), püskürtme karakteristikleri üzerine etkisi büyüktür. Yüksek yakıt viskozite, enjektördeki yakıtın

hava ile karışım hızını azaltmak atomizasyonu güçleştirmektedir. Geleneksel dizel püskürme sistemleri, silindirlere gönderilecek yakıtı hacimsel olarak ölçmektedir. Kütle hacim ve yoğunluk arasındaki ilişkiden dolayı, değişen yakıt yoğunluğu, püskürtülen yakıt miktarını etkilemektedir. Yakıtın yüzey gerilimi ise, püskürtülen yakıt tanecikleri birbirleri ile yapışma eğilimini ifade etmektedir. Özellikle yakıt hüzmesinin merkezindeki yüksek hızlı yakıt taneciklerinin birbiri ile çarpışarak daha büyük yakıt tanecikleri oluşturmasına ve atomizasyonun kötüleşmesine sebep olurlar [10-13].

Püskürmenin sonunda enjektör iğnesi püskürtme deliklerini kapatırken, püskürtme hızı da azalmaktadır [10]. Bu durum hüzme ekseninde bozulmaya sebep olur. Püskürtme hızının azalması ve yakıt taneciklerinin ebatlarının büyümesi yakıtın atomizasyonunu kötüleştirmektedir. İri yakıt taneciklerinin is ve HC emisyonları üzerindeki negatif etkisini azaltmak için, enjektör iğnesinin püskürtme deliklerini hızlı bir şekilde kapatması gerekir. Yakıtın yanma odasına püskürtülmesinden sonra uygun bir yanma süreci sağlamak için; atomizasyon, buharlaşma, karışım oluşumu, kendi kendine tutuşma ve yanma gibi çeşitli olaylar serisi başlar.

2.1.1. Yakıtın Yanma Süreci

2.1.1.1. Atomizasyon

Enjektörün püskürtülen iri yakıt taneciklerinin küçük yakıt taneciklerine ayrışması atomizasyon sürecini oluşturmaktadır. Atomizasyon süreci, enjektörden püskürtülen yakıt taneciklerinin boyutlarının daha küçük olması ile, daha hızlı ve etkili olarak gerçekleşmektedir.

2.1.1.2. Buharlaşma

Küçük boyutlu sıvı yakıt taneciklerinin, yanma odasından buharlaşma sürecidir. Buharlaşma süreci, yüksek sıkıştırma oranından dolayı, aşırı ısınan hava yardımı ile kısa süreli olarak gerçekleşmektedir. Püskürtülen yakıtın % 90'ı, püskürtmeden hemen sonra 0,001 saniyede buharlaşmaktadır. Buharlaşma süreci için gereken

yüksek hava sıcaklığının oluşması için ihtiyaç duyulan minimum sıkıştırma oranı 12:1 civarındadır. Yakıt hüzmesinde ilk buharlaşma başlarken buharlaşmanın soğutma etkisinden dolayı hüzme etrafındaki atmosfer hızlı bir şekilde soğumaktadır. Bu durum, müteakip buharlaşmaları da etkilemektedir. Hüzme çekirdeğinin yakındaki yüksek yakıt konsantrasyonu ve soğutma etkisi, yakıt yoğunlaşmasına sebep olmaktadır. Bu durumda, bu bölgedeki buharlaşma durur ve sadece ilave karışım ve ısı buharlaşmayı tekrar başlatabilir [11].

2.1.1.3. Karışım Oluşumu

Buharlaşma sürecinden sonra yakıt buharı, tutuşabilir aralıklarda hava yakıt oranına sahip bir karışım oluşturmak için hava ile karışırken yanma odasındaki türbülans ve yakıt püskürtme hızı da karışım oluşturma sürecine yardım etmektedir. Püskürtülen yakıt hüzmesi etrafında oluşan hava/yakıt oranı dağılımı heterojendir (Şekil 2.2). Eşdeğerlik oranının 1,8 (zengin) ile 0,8 (fakir) olduğu aralıklarda yakıtın tutuşması gerçekleştirilmektedir [10,11].

Dizel motordaki güç artışı, motora emilen hava azaltılmadan yanma odasına püskürtülen yakıt miktarı ile kontrol edilmektedir. Dizel motorlarda, sıkıştırma ile sıcaklığı artan havanın yardımıyla yakıt yüksek basınçta yanma odasına püskürtülmektedir. Yanma odasına yüksek basınçta püskürtülmüş yakıt, küçük tanecikler veya yakıt buharı şeklinde hava ile karışmaktadır. Sıkıştırılmış hava, yanma odasındaki püskürtülmüş yakıt, ısıtır ve böylece buharlaşma gerçekleşir. Buharlaşan yakıt, yanma odasındaki mevcut oksijenle karışarak yakıt/hava karışımını oluşturmaktadır. Tutuşabilir özellikte uygun hava/yakıt oranı oluşturan karışım belli bir tutuşma gecikmesinden sonra, birkaç ayrı noktadan aniden tutuşur ve alevler yanma odasına ilerler. Oluşan alev cephesi ilerlerken, yanmamış yakıt tanecikleri de buharlaşarak, reaksiyona dahil edilmektedir. Belirtilen bu yanma olayları, karışım oluşumundan sonra, kendi kendine tutuşma ile başlamakta ve genişleme zamanının sonuna kadar devam etmektedir.

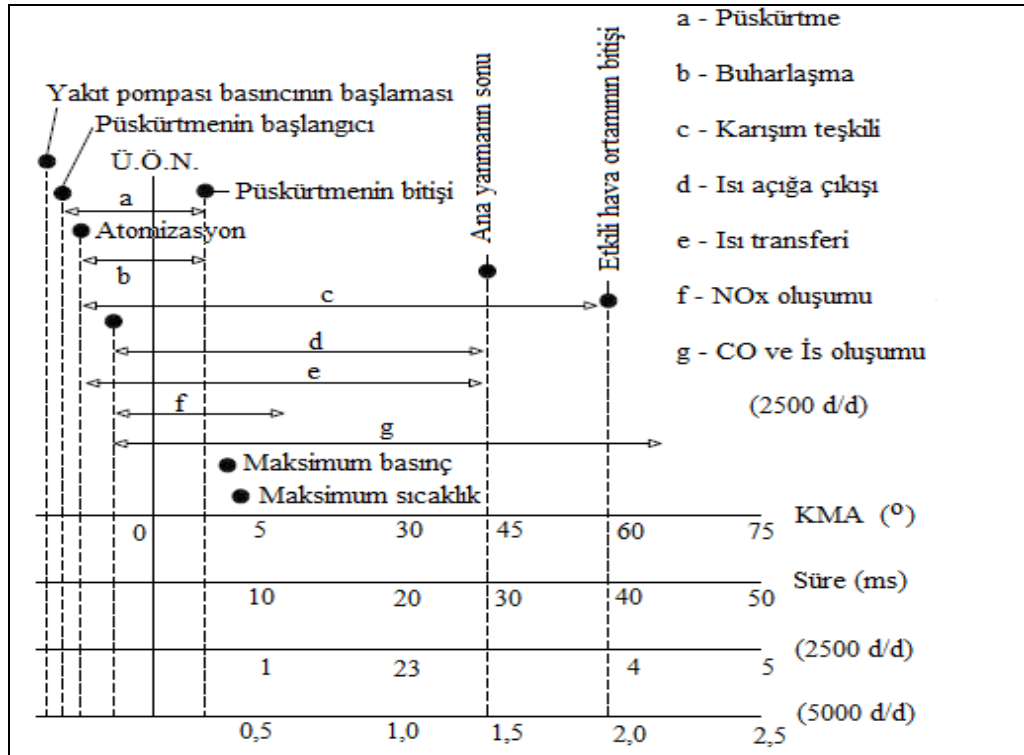
2.1.1.4. Kendi Kendine Tutuşma

Püskürtmenin üst ölü noktadan (ÜÖN) 6-8 derece sonrasında buharlaşmış yakıtın, karışım oluşturarak, kendi kendine tutuştuğu belirlenmiştir [10]. Püskürtölen yakıt hüzmesi etrafındaki eşdeğerlik oranının 1.8 (zengin) ila 0.8 (fakir) olduğu aralıklarda yanma geręekleřmektedir [11]. İş ve büyük hidrokarbon moleküllerinin ayrışmasından oluşan ikincil reaksiyonlar yardımı ile, yanma devam etmektedir. Yanma odasındaki yüksek hava sıcaklığından kaynaklanan bu reaksiyonlar ekzotermiktir (ısı veren) ve yanma odasındaki hava sıcaklığını daha fazla arttırılmaktadır. Bu durum, kararlı yanma sürecine öncölük etmektedir.

2.1.1.5. Yanma

Püskürtölen yakıtın kendi kendine tutuşmasından sonra, eşdeğerlik oranının 1-1,5 arasında olduğu püskürtme hüzmesinde yanma, yakıtça zengin bölgelerindeki birkaç noktada yanma ani olarak başlamaktadır. Yanmanın başladığı anda, yanma odasına püskürtölen yakıtın %70-%95'i buhar halindedir. Yanma odasında yanma başladığında, biręok tutuşma noktasından dolayı oluşan ęoklu alev bölgeleri yanma odasında yayılırken, tutuşmanın başlamadığı bölgelerdeki gaz karışımlarını tüketmektedir. Bu durumda, yanma odasındaki sıcaklık ve basınçlarda ani artışlar gözlenmektedir. Yanma odası sıcaklığının ve basıncının artışı, yanma odasındaki yanmamış bölgelerde bulunan yakıt paręacıklarının sıcaklığını ve basıncını da arttırarak buharlaşma ve tutuşma süresini kısaltır ve yanmayı daha da geliştirir. İlk tutuşmanın başlamasından sonra, silindire yakıt püskürtölmesine devam edilmektedir. Yanma sürecinin geri kalan kısmı püskürtölen yakıtın hızlı atomizasyonu, buharlaşması ve uygun özelliklerle hava yakıt oranı oluşturulması ile kontrol edilmektedir. Yakıtın püskürtölmesi kontrol edilen bu yanma sürecinde, silindirin basıncı artış hızı ani yanma periyoduna göre daha yavaştır. Toplam yanma süresi, krank mili açısına göre 40° ila 50° sürer ve bu sürecin 20°'den daha fazla kısmı yakıtın püskürtölmesini kapsar [11]. ęünkü bazı yakıt taneciklerinin hava ile karışarak uygun özellikleri kazanması biraz zaman alır. Bu yüzden yanma genişleme zamanında sona ermektedir.

Yanma odasındaki karışım oluşumu, maksimum sıcaklık ve basınç ölçeği Şekil 2.3'te verilmiştir. Yanma olayı periyotları, silindir içi sıcaklık ve basınç etkisi ihmal edildiğinde, (krank mili açısı cinsinden), bütün motor hızları için yaklaşık aynıdır. Zaman ölçeği değerlendirildiğinde ise motor hızının artışı ile birlikte, yanma olaylarını periyotlarının değiştiği de görülmektedir. Bu durum, motor hızına bağlı olarak optimum performans ve emisyon parametrelerinin elde edilmesi için önemlidir.

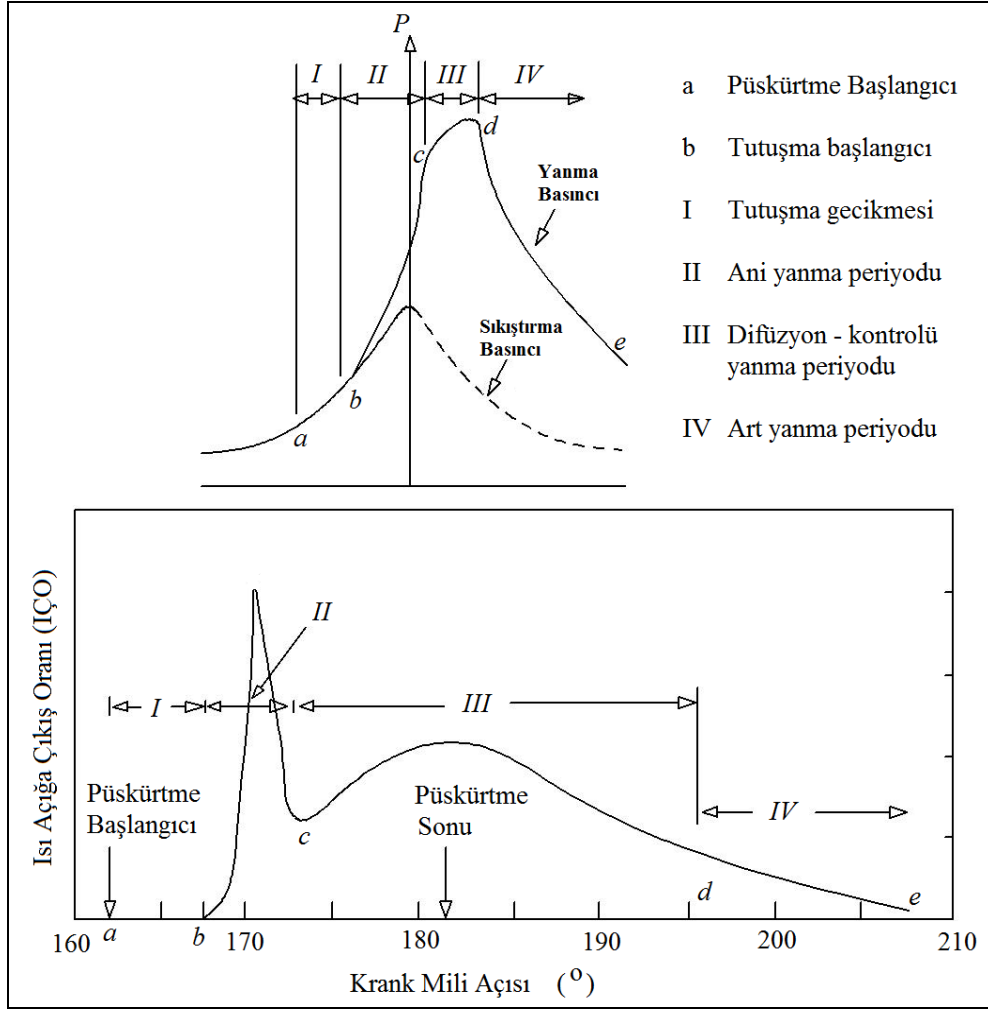


Şekil 2.3 Dizel motorlarda karışımın oluşumu ve yanma zaman ölçeği [14].

2.1.2. Dizel Motorlarda Yanma

2.1.2.1. Tutuşma Gecikmesi Periyodu

Isı açığa çıkış oranı (İÇÖ) ve silindir basıncına bağlı olarak yanma periyotları, Şekil 2.4'te verilmiştir. Yakıtın silindirlere püskürtülme zamanı yakıt hat basıncından veya enjektör iğnesinin kalkma miktarına göre belirlenmektedir. Tutuşmanın başlaması ise, ısı açığa çıkış oranına (İÇÖ) veya silindir içi basınç eğrisinin ikinci türeve göre belirlenmektedir.



Şekil 2.4 Sıkıştırma ile ateşlemeli motorlarda yanma periyotları [15].

Yakıtın yanma odasına püskürtmesi ile tutuşmasının başlaması arasında geçen süre tutuşma gecikmesi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.4, a-b arası). Motorun emiş hattındaki koşullar (basınç, sıcaklık ve hız) ve yakıt hüzmelerinin oluşumunu etkileyen fiziksel faktörler tutuşma gecikmesini de etkilemektedir. Bu değişkenler, özellikle yanma odası ile yakıt püskürtme sisteminin tasarımına ve motorun çalışma koşullarına bağlıdır. Yakıt hüzmelerinin oluşumunu büyük ölçüde etkileyen yakıt sistemi parametreleri, püskürtmenin zamanlaması (avansı) püskürtmenin basıncı, miktarı, hızı, hüzmeye şekli ve damlacık çapıdır. Motorun emiş veya dolgu koşulları ise, yanma tasarımı, emme basıncı ve sıcaklığı, sıkıştırma oranı, püskürtme avansı, soğutma suyu ve yağlama sıcaklığı, motor hızı ve silindir içindeki atık gaz koşullarına bağlıdır. Tutuşma gecikmesi, fiziksel ve kimyasal tutuşma gecikmesi olarak ikiye ayrılmaktadır. Fiziksel tutuşma gecikmesi, yakıtın püskürtülmesi ile

yakıtın kimyasal reaksiyonlara başladığı koşullara ulaştığı zaman aralığıdır. Fiziksel tutuşma gecikmesi bölümünde püskürtülen yakıt atomize olur, buharlaşma, hava ile karışma ve kendi kendine tutuşma sıcaklığına ulaşmaktadır.

Fiziksel tutuşma gecikmesi, yakıtın türüne ve yakıtın fiziksel özelliklerine bağlıdır. Hafif yakıtlarda fiziksel tutuşma gecikmesi az, ağır yakıtlarda ise fazladır. Fiziksel tutuşma gecikmesi, püskürtme basıncının artırılması, yüksek yanma sonu sıcaklıkları, yüksek türbülans ve atomizasyon ile azaltılabilmektedir. Kimyasal tutuşma gecikmesi boyunca, reaksiyonlar yavaş başlar ve alevlenme veya tutuşma görülene kadar hızlanır. Genellikle, kimyasal tutuşma gecikmesi fiziksel tutuşma gecikmesinden daha büyüktür. Bununla birlikte, kimyasal tutuşma gecikmesi büyük oranda silindir için sıcaklıklara bağlıdır. Yüksek silindir için sıcaklıklarda, kimyasal tutuşma gecikmesi kısalmış ve fiziksel tutuşma gecikmesinde ise daha küçüktür. Buji ile ateşlemeli motorların tutuşma gecikmesi, sıkıştırma ile ateşlemeli motorların kimyasal tutuşma gecikmesine yaklaşık olarak eşittir. Sıkıştırma ile ateşlemeli motorların çoğunda, tutuşma gecikmesi püskürtme periyodundan daha kısadır [16].

2.1.2.2. Ani Yanma Periyodu

Yanma odasında tutuşmanın başlaması ile ısı açığa çıkış oranı'nın (İÇÖ) maksimum değere ulaştıktan sonraki ilk çukur arasındaki süre ani yanma periyodu olarak adlandırılır. Ani yanma periyodunda, tutuşma gecikmesi periyodu boyunca tutuşabilir aralıkta karışım teşkili oluşturan yakıt/hava karışımının yanması hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir (Şekil 2.4, b-c arası). İÇÖ'nun maksimum olduğu yanma periyodu ani yanma periyodudur. Ani yanma periyodunda, silindir içi basıncı ve İÇÖ'nun maksimum değeri büyük oranda tutuşma gecikmesine bağlıdır. Uzun tutuşma gecikmesi periyodunda, ani yanma periyodundan önce silindire püskürtülen yakıt miktarı birikir ve ani yanma periyodunda hızlı bir şekilde yanarak silindir basıncını ve İÇÖ'yu arttırmaktadır. Bu durum yanma sonu sıcaklık ve basınçları ile birlikte basınç artış hızlarını da arttırmaktadır.

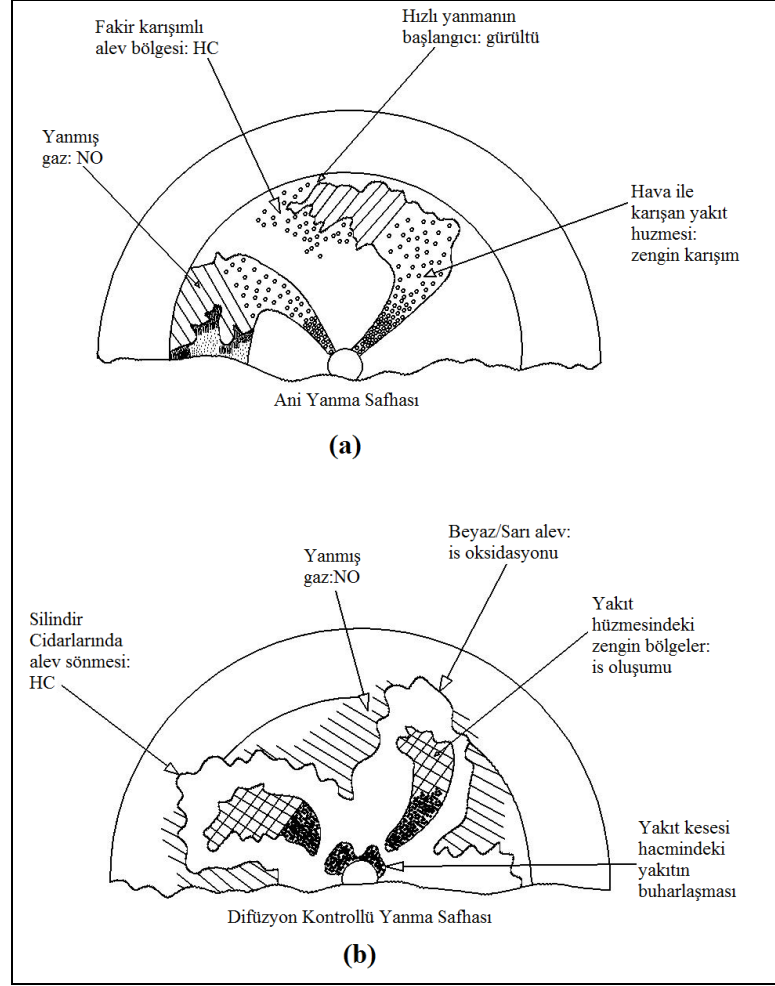
2.1.2.3. Difüzyon Kontrollü Yanma Periyodu

Ani yanma periyodunda, tutuşma gecikmesi periyodu boyunca tutuşabilir aralıkta karışım teşkili oluşturan yakıt/hava karışımının yanması hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Difüzyon kontrollü yanma periyodu, ani yanma periyodundan geri kalan yanmamış yakıt/hava karışım tarafından veya püskürtülmeye devam edilen yakıt tarafından kontrol edilmektedir. Difüzyon kontrollü yanma periyodundaki İÇÖ bazen İÇÖ grafiğinde ikinci pik noktasına ulaşarak kendini gösterebilir. Ancak ani yanma periyodundaki maksimum İÇÖ'dan (İÇÖmaks) daha düşüktür. Difüzyon kontrollü yanma periyodu, ani yanma periyodunun bitimi ile başlamaktadır. Toplam ısı açığı çıkış oranının (TIÇÖ) %90-%95 olduğu zamana kadar veya genel bir yaklaşımla yanma sonu sıcaklıklarının maksimum olduğu zaman kadar sürmektedir [15].

2.1.2.4. Art Yanma Periyodu

Püskürtme periyodunda yanma hemen bitmez ve yanma odasında arta kalan yanmamış veya eksik yanmış yakıt tanecikleri yanma odasında oksijenle teması sonucu yanmaya başlamaktadır. Art yanma periyodu, difüzyon kontrollü yanma periyodunun bittiği ve maksimum yanma sonu sıcaklığının olduğu noktada başlayarak ve genişleme zamanının bir kısmında devam etmektedir. Art yanma periyodu İÇÖ, genişleme zamanına doğru azalarak gerçekleşmektedir. Çünkü çok az miktardaki yanmamış yakıt is parçacıkları veya zengin yanma ürünleri, art yanma periyodunda ısı açığa çıkışı sağlamaktadır. Bu periyotta, silindir içerisindeki ortalama gaz sıcaklıkları azalmaktadır [15].

Şekil 2.5'te ani ve difüzyon kontrollü yanma periyodunda karışım oluşumu, alevin oluşması ve ilerlemesi, yanmanın çeşitli emisyonlar üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Genellikle, azot oksit (NO) emisyonları ani yanma safhasında oluşurken, is emisyonları daha çok difüzyon kontrollü yanma periyodunda oluşmaktadır [17,18]. Motor egzozunda görülen kirletici emisyonların oluşumu, yanma periyotları ile doğrudan ilişkilidir.

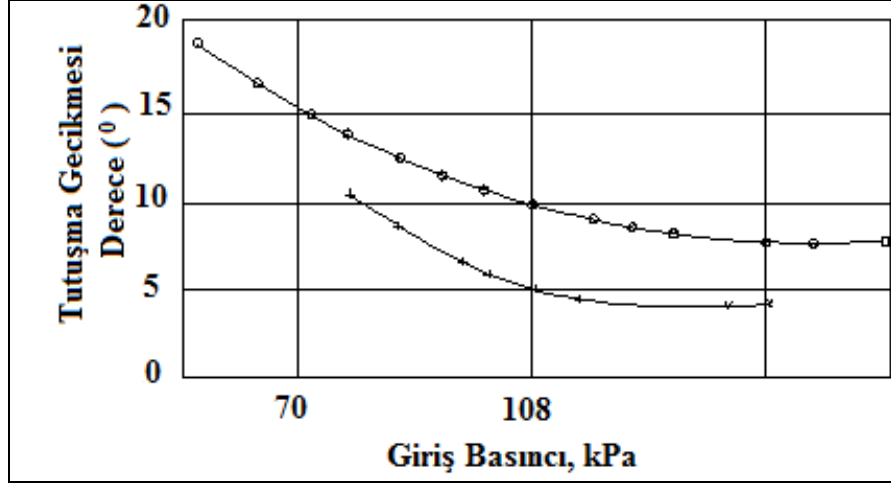


Şekil 2.5 Ani ve difüzyon kontrollü yanma periyodu, a) Yanmanın oluşumu, b) Emisyonların oluşumu [19].

2.2. DİZEL MOTORLARINDA YANMAYA ve EGZOZ EMİSYONLARINA ETKİ EDEN PARAMETRELER

2.2.1. Giriş Basıncı ve Sıcaklığı

Emme zamanında silindire alınan havanın giriş basıncı artarken, sıkıştırma sonu basıncı ve sıcaklığı arttığı için, tutuşma gecikmesi süresi azalmaktadır. Şekil 2.6'da giriş basıncının tutuşma gecikmesine etkisi görülmektedir. Giriş basıncının artmasıyla, silindire daha fazla hava alındığı için, volümetrik verim de artmaktadır. İçeriye daha fazla yakıt püskürtülerek, güç artırılabilir. Ancak bu durum, maksimum basıncın da artmasına neden olmaktadır [20].

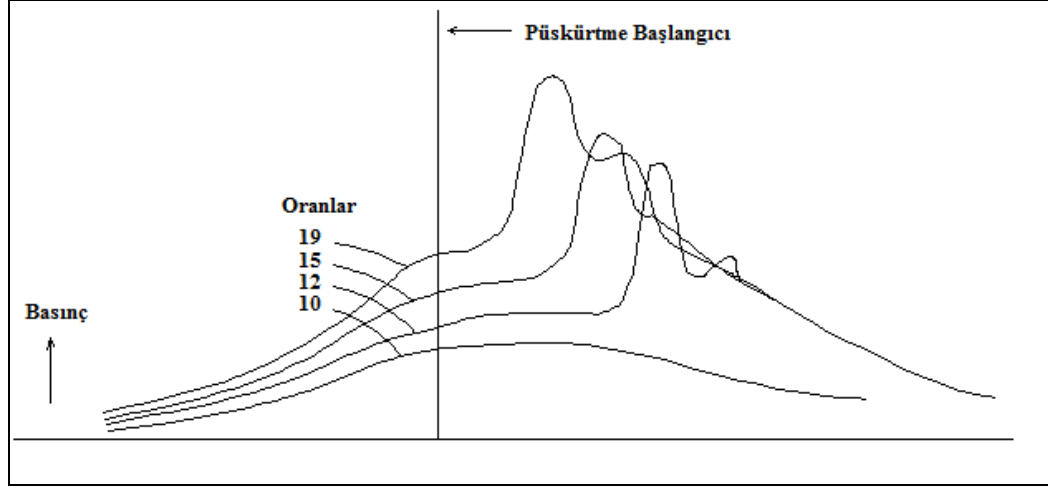


Şekil 2.6. Giriş basıncının tutuşma gecikmesine etkisi [20].

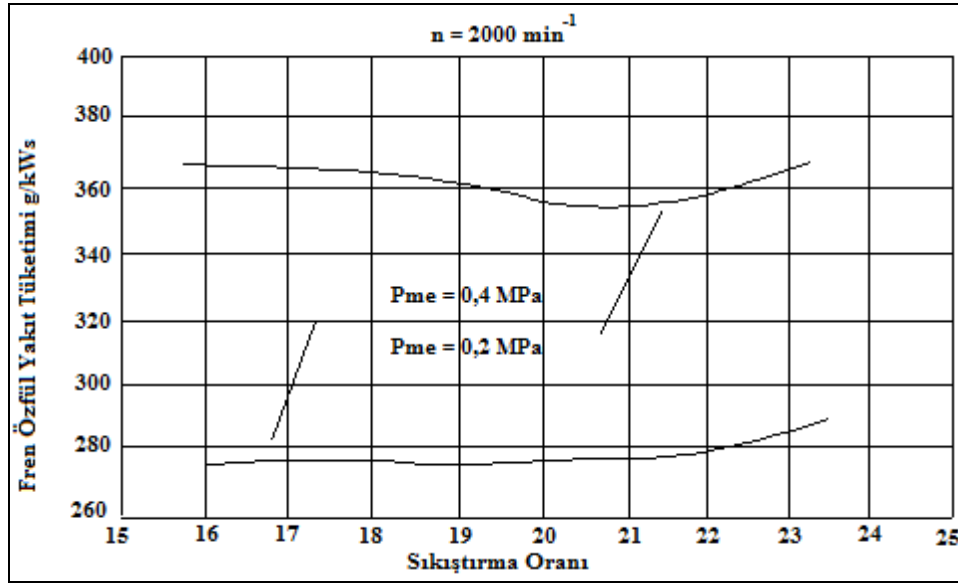
Sabit giriş sıcaklığı, düşük yakıt/hava oranında sabit yakıt miktarı ve giriş sıcaklığının artması da, tutuşma gecikmesi süresinin azalmasına neden olmaktadır. Ancak daha yüksek sıcaklıkta yakıt tanecikleri daha kolay buharlaşmaktadır. Fakat giriş sıcaklığı arttıkça havanın yoğunluğu azaldığı için, volümetrik verim de azalmaktadır [20].

2.2.2. Sıkıştırma Oranı

Sıkıştırma oranının artması, sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklığının yükselmesine neden olmaktadır. Şekil 2.7'de sıkıştırma oranının, açık indikatör diyagramına etkisi görülmektedir. Yüksek sıkıştırma oranında, maksimum basınç daha erken ve daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Ancak, maksimum basıncın artması, krank biyel mekanizmasının daha dayanıklı bir malzemedan yapılmasını gerektirmektedir. Ayrıca, kompresyon kaçaklarının artması ve motorun ilk harekete geçişinin zorlaşması, mekanik verimi azaltmaktadır [20].

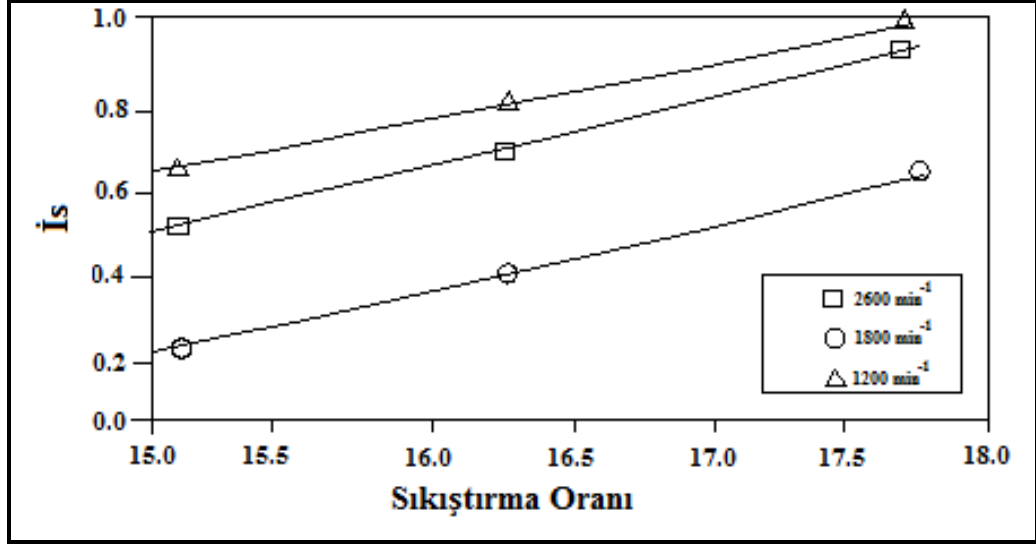


Şekil 2.7. Sıkıştırma oranının basınç-krank açısına etkisi (82,6x114,3 silindir, 600 d/d Y/H=0,05 Püskürtme avansı=12°) [20].



Şekil 2.8. Sıkıştırma oranının, fren özgül yakıt tüketimine etkisi [21].

Şekil 2.8'de sıkıştırma oranına bağlı olarak, fren özgül yakıt tüketiminin değişimi görülmektedir. Sıkıştırma oranı arttıkça sıkıştırma sonu basınç ve sıcaklığı artmaktadır. Buna bağlı olarak piston üzerine etki eden efektif basınç artmakta ve fren özgül yakıt tüketimi azalmaktadır. Ancak, belirli bir sıkıştırma oranından sonra kompresyon kaçaklarının artması ve mekanik verimin azalmasıyla fren özgül yakıt tüketimi artmaya başlamaktadır [21,22].



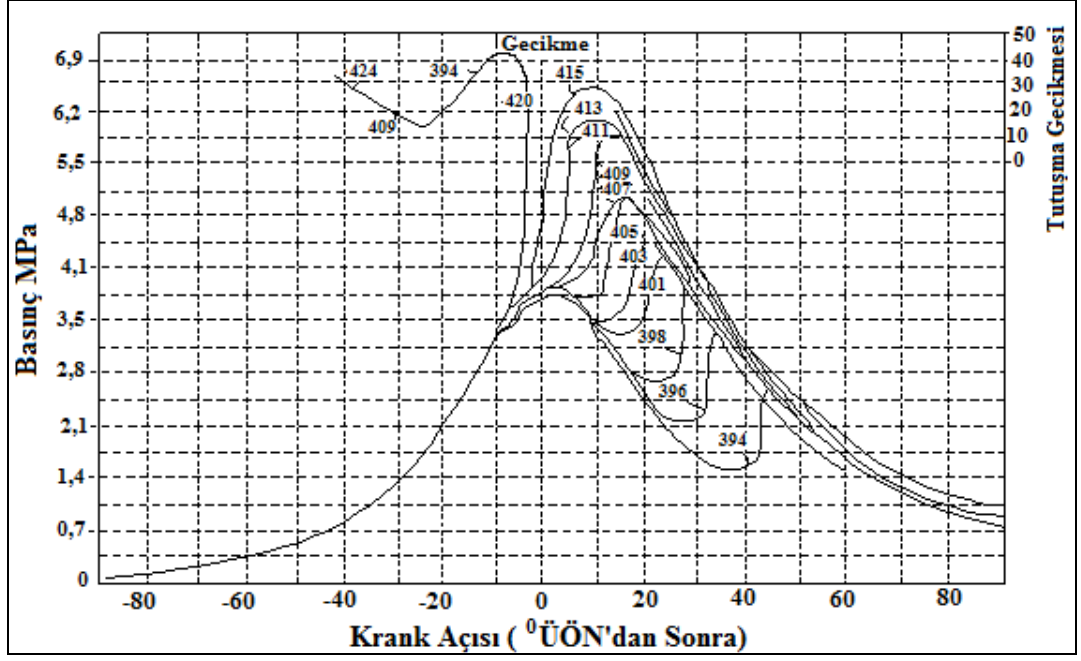
Şekil 2.9. Sıkıştırma oranının is miktarına etkisi [22].

Şekil 2.9'da sıkıştırma oranına bağlı olarak is miktarının değişimi görülmektedir. Sıkıştırma oranının artmasıyla, is miktarı da buna bağlı olarak artmaktadır. Ancak, sıkıştırma oranının artmasıyla, yanma odası içerisindeki girdabın azalması ve hava yakıt karışım formasyonunun bozulması, is miktarının artmasına neden olmaktadır [21,22].

2.2.3. Püskürtme Avansı

Püskürtme avansı, yakıtın kendi kendine tutuşması ve yanması sonucunda oluşan maksimum basıncın, piston iş zamanında ÜÖN'ya yakın olduğu bir anda oluşması için; yakıtın, sıkıştırma zamanı sonuna doğru silindir içerisine enjekte edilmeye başlanmasıdır.

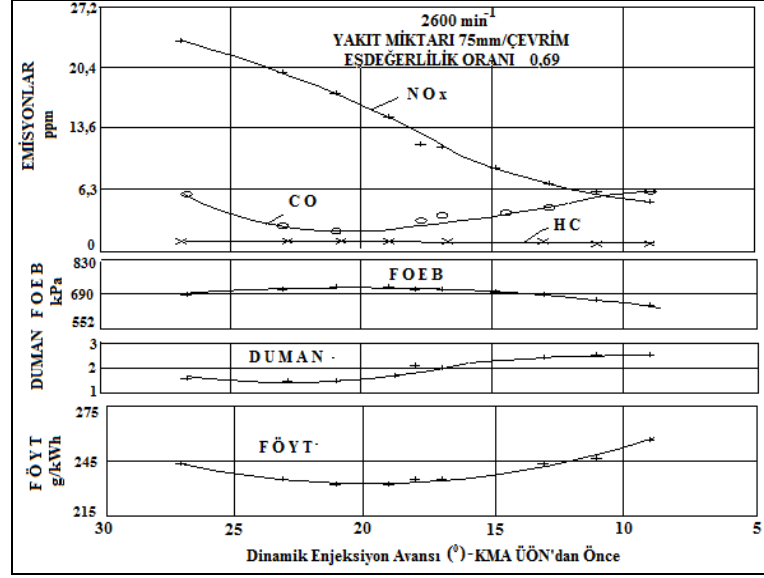
Optimum püskürtme avansı; motorun ve yakıt sisteminin tasarımına, silindire alınan havanın basıncına, sıcaklığına, motor yüküne ve devrine bağlıdır. Yani sıkıştırma oranı, yanma odasının şekli ve püskürtme karakteristikleri, verilmesi gereken avans miktarını etkilemektedir [23].



Şekil 2.10. Püskürtme avansının basınç-krank açısına etkisi [24].

Motorun çalışma şartlarına göre, verilmesi gereken avans miktarı artırılırsa yakıt, silindir içerisine püskürtülmeye başlandığı anda, silindir içerisindeki basınç ve sıcaklık daha düşük olduğu için, tutuşma gecikmesi süresi de artmaktadır. Bu durumda, silindirde biriken yakıt, ani yandığı için basınç artma oranı yükselmektedir. Sonuç olarak, motor sert çalıştığı için, krank-biyel mekanizmasının zorlanmasına neden olmaktadır. Ayrıca, yanma sıcaklığı arttığından NO_x (azot oksitler) emisyonları artarken, HC emisyonları azalmaktadır [25].

Püskürtme avansı azaltıldığında, yakıtın silindir içerisine püskürtülmeye başlandığında, silindir içerisindeki basınç ve sıcaklık daha yüksek olduğu için, tutuşma gecikmesi süresinde azalır ve motor daha yumuşak çalışır. Ancak yanmanın önemli bir kısmının kontrollü yanma safhasında oluşması ve pistonun ÜÖN'dan uzaklaşması nedeniyle, motor gücünü düşürmektedir. Yanma sıcaklığı azaldığından NO_x emisyonları azalırken, HC emisyonları artmaktadır [26].



Şekil 2.11. Dinamik enjeksiyon avansının motor performansına ve emisyonlara etkisi [27].

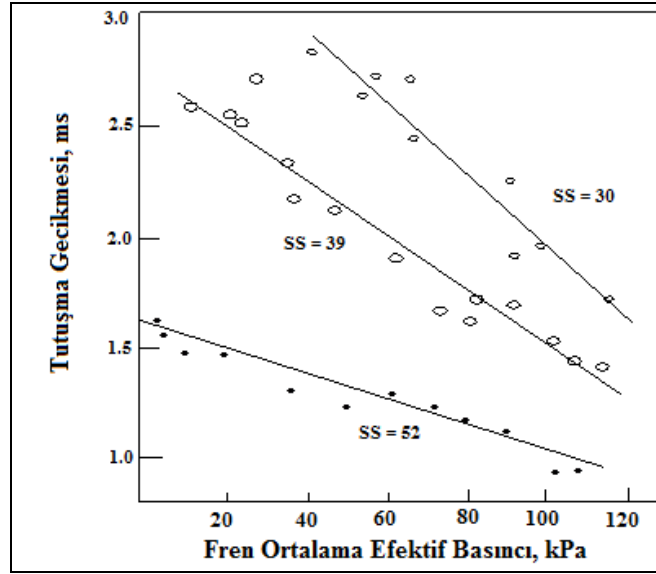
Şekil 2.11'de dinamik enjeksiyon avansının, motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisi görülmektedir. Bu grafikte yaklaşık olarak 20°deki dinamik enjeksiyon avansında, fren özgül yakıt tüketiminin minimum olduğu ve bu noktada fren ortalama efektif basıncının en yüksek değeri aldığı görülmektedir. Bu avans değerinden itibaren avans rötara alındıkça, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi hacim genişlemesi nedeniyle piston üzerine etki eden basınç azalmakta ve fren özgül yakıt tüketimi artmaktadır. 20°de dinamik enjeksiyon avansı değerinden itibaren avans arttıkça, basınç artma oranı ($dp/d\alpha$) arttığından dolayı, motor vuruntulu çalışmakta ve fren ortalama efektif basıncı azalmakta, fren özgül yakıt tüketimi ise artmaktadır. Dinamik enjeksiyon avansının egzoz gazlarına etkisi incelendiğinde, avans, 9°den itibaren arttırıldıkça is miktarı azalırken, NO_x emisyonlarının arttığı görülmektedir [13,27].

2.2.4. Yakıtın Özellikleri

Dizel motorlarında yakıt olarak kullanılan motorin ve mazot, çeşitli hidrokarbon moleküllerinin bileşiminden oluşmaktadır. Bu hidrokarbonlardan, parafinik hidrokarbonlar, yakıtın setan sayısının yükselmesine neden oluşmaktadır. Setan

sayısı, dizel yakıtının ateşlenme kalitesini, yani tutuşma eğilimini ifade etmektedir [28].

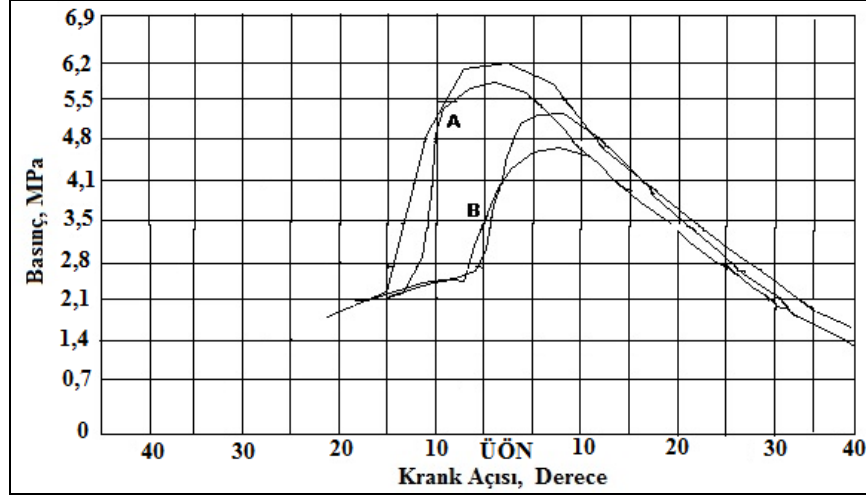
Şekil 2.12' de, setan sayısının tutuşma gecikmesine etkisi görülmektedir. Setan sayısı yüksek olan yakıtın, tutuşma gecikmesi süresinin daha kısa olduğu görülmektedir. Tutuşma gecikmesinin kısalması, ani yanma safhasındaki basınç artma oranını azalmaktadır. Yakıtın çoğunluğu, kontrollü yanma safhasında yandığından dolayı, silindir içerisinde oluşan maksimum basınç daha düşük olmaktadır. Ayrıca, tutuşma gecikmesinin azalmasıyla, karışımın sağlanabilmesi için daha az süre olması ve yakıtın yanma odası içerisinde iyi dağılamaması nedeniyle yanma hızı da azalmaktadır [28].



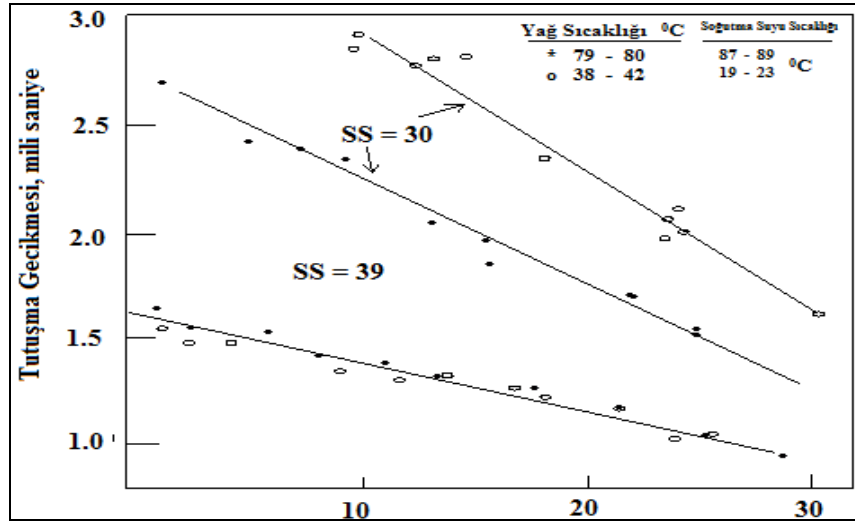
Şekil 2.12. Setan sayısının tutuşma gecikmesine etkisi [29].

2.2.5. Soğutucu Akışkanın Sıcaklığı

Soğutucu akışkan sıcaklığı arttıkça, tutuşma gecikmesi süresi ve basınç artış oranı da azalmaktadır. Şekil 2.13'de silindir ceket sıcaklığının basınç-krank açısı diyagramına etkisi görülmektedir. Ceket sıcaklığı arttıkça püskürtme anında yakıt, daha yüksek sıcaklıktaki hava içerisine püskürtme olduğundan dolayı, daha kolay buharlaşmaktadır. Şekil 2.13'de görüldüğü gibi daha yüksek sıcaklıkta, basınç eğrisi daha erken bir yükseliş göstermektedir [20,22,28].



Şekil 2.13. Silindir ceket sıcaklığının basınç-krank açısına etkisi (570 d/d Püskürtme avansı A=20°, B=10° Ceket sıcaklığı; 149 °C, 66 °C) [21].



Şekil 2.14. Yağ ve soğutma suyu sıcaklıklarının tutuşma gecikmesi süresine etkisi [29].

Şekil 2.14'de, yağ ve soğutma suyu sıcaklıklarının tutuşma gecikmesine etkisi görülmektedir. Aynı şartlarda, 30 ve 39 setan sayısına sahip yakıtlar kullanılmıştır. Setan sayısı 39 olan yakıt kullanıldığında, yağ ve soğutma suyu sıcaklıklarının etkisinin belirgin olmadığı görülmektedir. Ancak, setan sayısı 30 olan yakıt kullanıldığında, daha yüksek yağ ve soğutma suyu sıcaklığında tutuşma gecikmesi süresinde önemli bir azalma meydana gelmektedir [29].

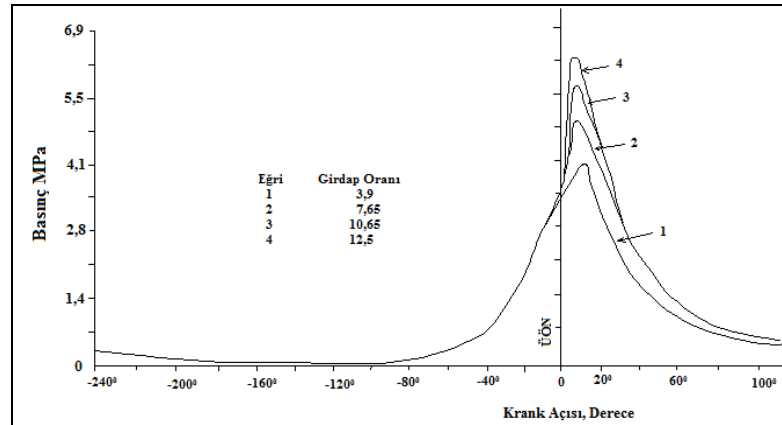
2.2.6. Yakıt/Hava Oranı

Yakıt/hava oranı üzerinde, yanma yönünden bir sınırlama yoktur. Ayrıca, silindir içerisinde yakıt/hava oranının aynı olmadığı ve bu oranın sıfır ile sonsuz arasında değiştiği birçok nokta bulunmaktadır. Bu nedenle, yanma olayı, en uygun yakıt/hava oranına sahip nokta veya noktalardan başlamaktadır. Dizel motorlarında düşük yakıt/hava oranında, silindire püskürtülen yakıt yanabilmektedir. Ancak, püskürtme karakteristiklerinin istenilen düzeyde tutulması güçtür [20].

Silindir içerisine gönderilen yakıt taneciklerinin yanmayı tamamlayabilmeleri için yeterli hava bulamamaktadırlar. Eşdeğerlik oranı arttıkça, NO_x emisyonu da artmaktadır. Yakıt miktarının artması, silindir içerisindeki basınç ve sıcaklığı arttırdığından dolayı, NO_x oluşumu hızlanmaktadır [20].

2.2.7. Girdap Oranı

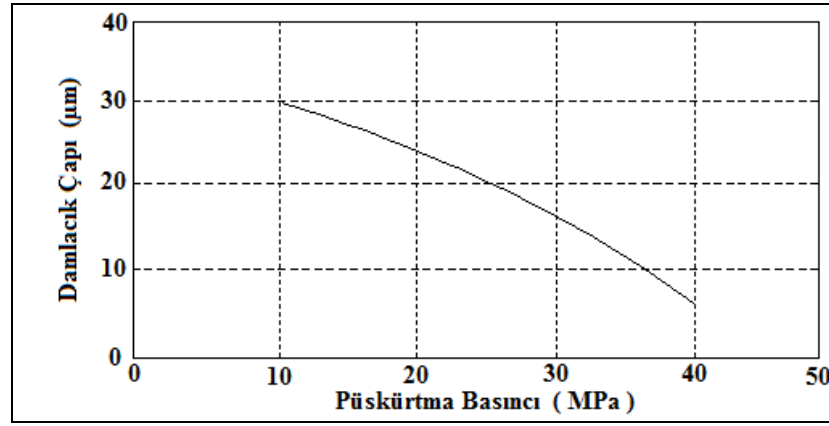
Girdap, yani silindir içerisindeki hava hareketi, yakıtın hava ile karışımına, dolayısıyla yanma sürecine ve emisyonlara doğrudan etki etmektedir. Şekil 2.15' de bir dizel motoruna ait basınç-krank açısı diyagramı üzerinde girdap oranının etkisi görülmektedir. Girdap oranı arttıkça, tutuşma gecikmesi süresinde herhangi bir değişim olmadığı, ancak, maksimum basıncın ve basınç artma oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca, ortalama efektif basınç ve verim de artmaktadır.



Şekil 2.15. Girdap oranının basınç-krank açısı diyagramına etkisi (N =Girdap hızı min^{-1} n =Motor hızı d/d , Yakıt Hat Basıncı MPa) [24].

2.2.8. Enjeksiyon Basıncı

Enjeksiyon basıncı, yakıtın atomizasyonuna, dolayısıyla karışım formasyonuna etki eden faktörlerden birisidir. Enjeksiyon basıncı arttıkça, yakıt daha iyi parçalanarak, damlacık çapı küçülmektedir. Şekil 2.16'da enjeksiyon basıncına bağlı olarak, yakıt damlacık çapı değişimi verilmektedir. Burada, enjeksiyon basıncı arttıkça damlacık çapının azaldığı görülmektedir [20,30].



Şekil 2.16. Enjeksiyon basıncına bağlı olarak damlacık çapı değişimi [7].

Şekil 2.16'da yakıt taneciği küçüldükçe ataleti de azaldığından dolayı, yakıtın yanma odasındaki nüfuz derinliği azalabilmektedir. Silindir duvarlarına yakın bölgelerdeki havanın kullanılamaması nedeniyle, yanma olumsuz etkilenmektedir. Şekil 2.16'da da görüldüğü gibi yüksek basınçlarda, özellikle yüksek girdap oranında, fren özgül yakıt tüketimi artmaktadır. Düşük enjeksiyon basınçlarında damlacık çapının artması, yakıtın buharlaşmasının daha uzun zaman almasına neden olmaktadır. Bu durum yanmayı olumsuz etkilediği için, düşük enjeksiyon basıncında fren özgül yakıt tüketimini arttırmaktadır [20,30].

2.2.9. Aşırı Doldurma

İçten yanmalı bir motor tarafından üretilen güç, yaklaşık olarak motor silindirleri içerisinde yakılan yakıt için gerekli olan hava miktarı ile orantılıdır. Normal emişli bir motorda silindir içerisine alınan hava miktarı, kurs hacmine bağlı olarak değişmektedir. Silindir içerisine bir çevrimde alınan hava miktarını artırabilmek için,

ek bir kaynağa ihtiyaç vardır. Bu amaçla, mekanik aşırı doldurma, egzoz turbo kompresörü ve basınç dalga etkili aşırı doldurma yöntemleriyle silindire alınan hava miktarı, normal emişli motorlara göre arttırmaktadır [31].

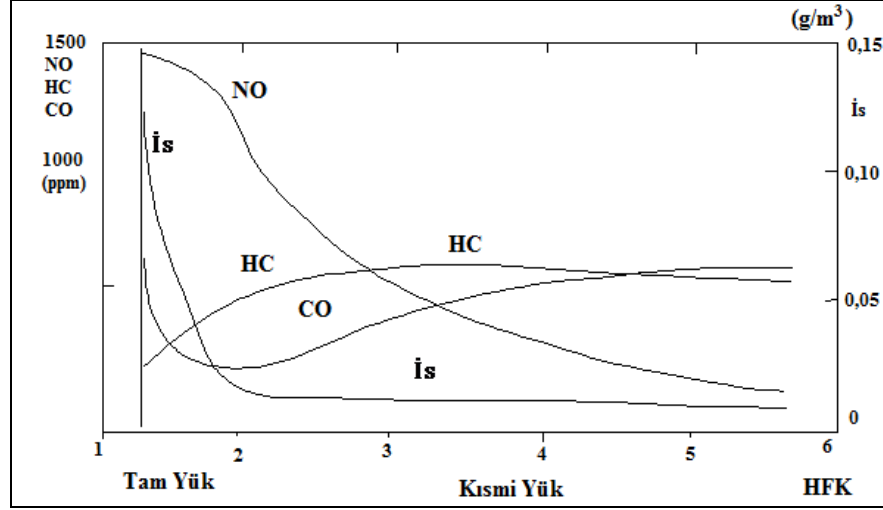
2.3. DİZEL MOTORLARINDA EMİSYONLAR

Egzoz gazının bileşenleri ve çevre üzerindeki etkileri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 Egzoz bileşenleri ve etkileri [32].

Egzoz Bileşeni	Kimyasal Sembolü	Kaynağı	Etkileri
Karbon Monoksit	CO	Yakıttaki karbon ile yanma havasındaki oksijenin tamamlanmamış kimyasal bileşimi	Çok zehirlidir, alyuvar hücrelerinde (hemoglobin) birikir.
Karbon Dioksit	CO ₂	Yakıttaki karbon ile yanma havasındaki oksijenin kimyasal bileşimi	Kısa vadede zararsız ancak atmosferdeki sera etkisi oluşumunda istenmeyen etkileri vardır
Hidrokarbonlar	HC	Yanmamış ve kısmen yanmış yakıt	Sağlığa zararlıdır, NO _x ile birlikte dumanlı sis ve ozon oluşumunda etkilidir.
Nitrojen Oksitler	NO _x	Havadaki nitrojen ile oksijenin yüksek sıcaklıklarda meydana gelen kimyasal bileşimi	Sağlığa zararlıdır, paslanmaya ve HC ile birlikte dumanlı sis ve ozon oluşumunda etkilidir.
Oksijen	O	Havadaki oksijenin herhangi bir kimyasal bileşim oluşturmamış hali	Yok
Nitrojen	N ₂	Havadaki nitrojenin her hangi bir kimyasal bileşim oluşturmamış hali	Yok
Su	H ₂ O	Yakıttaki hidrojen ile havadaki oksijenin kimyasal bileşimi, ayrıca yakıt içerisinde de olabilir	Yok
Kükürt Dioksit	SO ₂	Kükürt (çoğunlukla dizel yakıtta) ile yanma havasındaki oksijenin kimyasal bileşimi	Zararsızdır, ancak asit yağmuru halini aldığı hayvanlar ve bitki örtüsü için zararlıdır.
Madde Parçacıkları	PM	Katı maddeler (kurum, is bunlardan biridir), örneğin dizel motorlar tarafından üretilen egzoz gazındaki maddeler.	Hidrokarbonlar kuruma yapıştıklarından sağlığa zararlıdır.

Dizel motorları, genellikle fakir karışım oranlarında çalışmakta ve hava/yakıt oranı, motorun yük durumuna göre değişmektedir. Şekil 2.17'de, hava fazlalık katsayısının emisyonlara etkisi görülmektedir. Karışımın belli bir oranın üzerinde zenginleşmesini sınırlayan belli bir is sınırı mevcuttur. Özellikle; hava fazlalık katsayısı (HFK) 2'den az olduğunda, is miktarı önemli derecede artmaktadır [20,31].



Şekil 2.17. Direkt püskürtmeli bir dizel motorunun egzozundaki kirletici konsantrasyonları [20].

CO emisyon oluşumu; hava/yakıt oranı ile ilişkilidir. Ayrıca, yanma olayının ara kademelerinde oluşan CO'nun CO₂'ye dönüşmesi için, ortamda yeterli oksijenin bulunması gerekir. Ancak, CO₂'nin oluşabilmesi, oksijenin yanı sıra reaksiyon için yeterli sıcaklık ve yanma zamanı da gerekmektedir. Düşük yüklerde sıcaklığın az olması nedeniyle, CO'nun oksidasyonu için gerekli reaksiyonlar gerçekleşemediğinden dolayı CO miktarı yüksektir. Yük arttıkça salınan CO miktarı da artmaktadır. Tam yüke doğru, oksijen miktarının ve reaksiyon süresinin azalması nedeniyle, CO miktarı tekrar artış göstermektedir [26,28].

Hidrokarbonlar ve aldehitler, alevin söndüğü silindir duvarlarında, yanma sürecinin başında veya sonuna doğru hava tarafından yanmanın kalitesinin bozulduğu bölgelerde oluşmaktadır. Yani, silindir cidarlarında soğuyan yakıt damlacıkları HC emisyonunu arttırmaktadır. Yükün artışı ile silindire alınan yakıt miktarının artmasına rağmen, sıcaklık yükselişi, reaksiyonları hızlandırmakta ve yanmamış HC emisyonunu azalmaktadır [26,28].

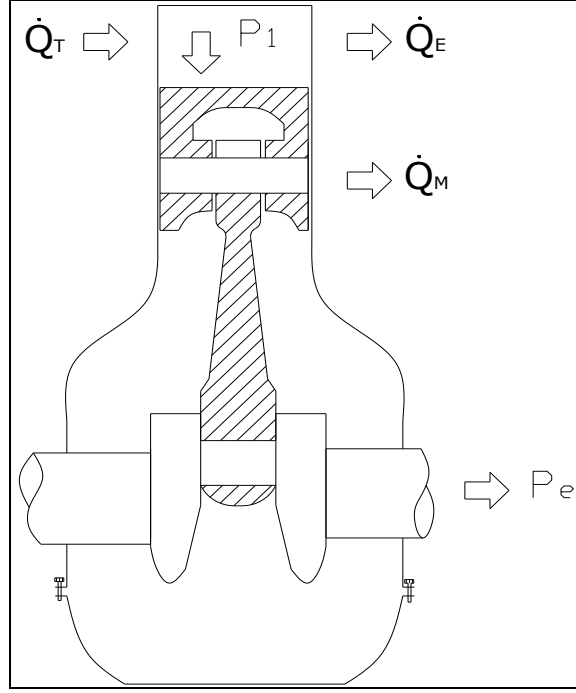
Azotoksitlerin oluşumu, yanma odasındaki basınç ve sıcaklığa, karışımın formasyonuna ve tutuşma gecikmesi süresince silindirde biriken yakıt miktarına bağlıdır. Azot oksitler, yüksek sıcaklıkta yanmış gaz bölgelerinde oluşmaktadır. Ancak, yanmış gazlar içerisinde sıcaklık ve hava/yakıt oranı üniform olmadığından,

azot oksitlerin oluşum hızı stokiyometrik bölgelere yaklaştıkça artmaktadır. Şekil 2.17'de HFK'nın NO_x'e etkisi görülmektedir. NO_x miktarı, yük arttıkça, buna bağlı olarak sıcaklığın artması ve hava/yakıt oranının stokiyometrik (ideal yakıt/hava oranı) orana yaklaşması ile artmaktadır [26,28].

Dizel motorlarında, motorun yük durumuna göre hava/yakıt oranı değişmektedir. Verimli bir yanma için, yanma odası içerisinde yeterli havanın, sürenin ve sıcaklığın olması gerekmektedir. Isı oluşumu, hava miktarına, yanma odası içerisindeki sıcaklığa ve yanma için tanınan süreye bağlı olarak değişmektedir. Dizel motorlarında, düşük devirlerde hava hareketlerinin az olması, yüksek devirlerde ise, volümetrik verimin azalması ve yetersiz süre nedeniyle, karbon tanecikleri is oluşumuna neden olmaktadır. Şekil 2.17'de, HFK'nın is oluşumuna etkisi görülmektedir. Isı miktarı, yük arttıkça, artmaktadır. Şekil 17'de görüldüğü gibi, yük arttıkça HFK azalmakta ve buna bağlı olarak yanma odası içerisindeki hava miktarının azalmasıyla karbon tanecikleri, yanmasını tamamlayamadıklarından is oluşumuna neden olmaktadır. Ayrıca devir arttıkça, yanma için tanınan süre azaldığından is oluşumu hızlanmaktadır. Bu nedenle dizel motorlarında izin verilen is emisyonu sınırı, motor gücünü sınırlayan bir faktör olmaktadır [26].

2.4. İÇTEN YANMALI MOTORLARDA ISI TRANSFERİ

İçten yanmalı motorlarda, motor çıkışından alınan faydalı işin, motora yakıt ile verilen enerjiye oranı, efektif verimi veya fren termik verimi vermektedir. Bir başka deyişle efektif verim, indike termik verim ile mekanik verimin çarpımına eşittir. İndike termik verim, işe çevrilen ısı enerjisinin motora verilen ısı enerjisine oranıdır. Motora verilen yakıtın sahip olduğu ısı enerjisini mekanik enerjiye dönüştürürken, bazı kayıplar söz konusudur. Bu kayıplar egzoz, soğutma ve sürtünme gibi nedenlerle oluşmaktadır. Efektif verimin artırılabilmesi için, bu kayıpların azaltılması ve toplam kayıptaki paylarının bilinmesi gerekmektedir. Dolayısıyla, kayıp enerjilerin ve efektif gücün değerlendirilmesine, ısı balansı denilmektedir. Isı balansı, bir motorun ekonomikliğini belirlediği gibi, çeşitli kayıplar hakkında da fikir vermektedir. Şekil 2.18'de bir motora birim zamanda verilen enerji, efektif olarak alınan enerji ve oluşan kayıp enerjiler görülmektedir [20].



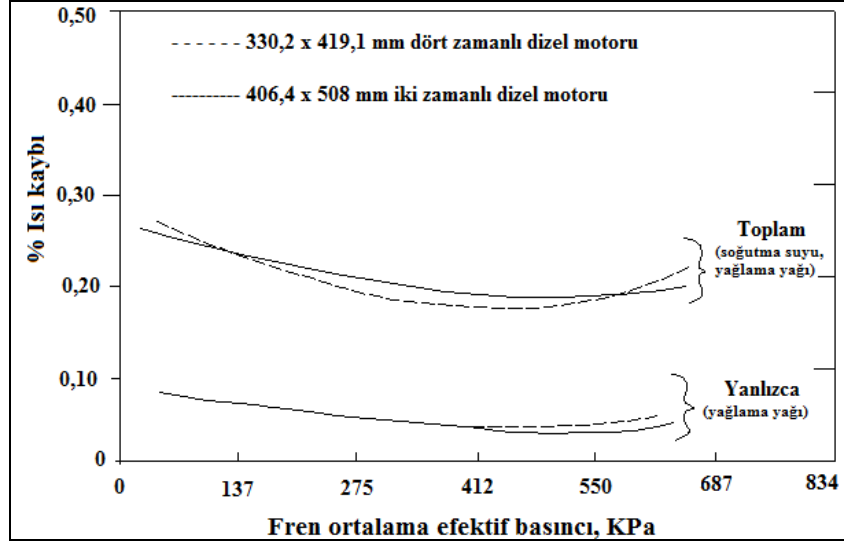
Şekil 2.18. Bir motora birim zamanda giren ve çıkan enerjiler [20].

- Q_T : Birim zamanda yakıt ile giren toplam enerji
 P_1 : Pistona etkiyen indike güç
 P_e : Motor milinden alınan efektif güç
 Q_E : Birim zamanda egzoz ile kaybedilen enerji
 Q_M : Birim zamanda mekanik kayıplarla ısıya dönüşerek kaybolan enerji

Bir motorun efektif verimi genel olarak 0,20 – 0,45 değerleri arasındadır. Bir dizel motorunda tam yükte yaklaşık %45'lik bir ısı enerjisi, piston üzerinde faydalı iş yapmaktadır. Dolayısıyla fren gücü %34–38 arasındadır. Soğutma yoluyla kaybedilen ısı %16 – %35, egzoz ile kaybedilen ısı ortalama %30, sürtünme yoluyla kaybedilen ısı %4 ve radyasyonla kaybedilen ısı yaklaşık %4 civarındadır [33,34].

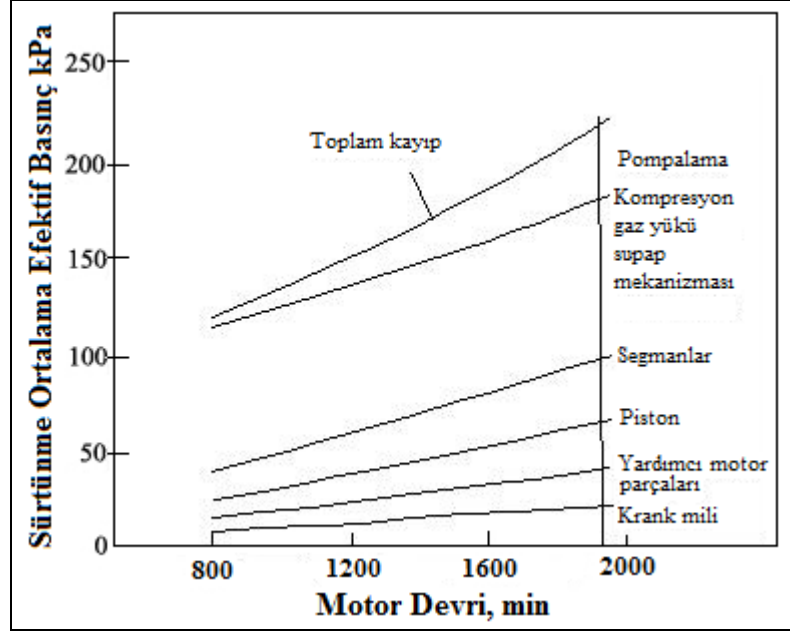
İçten yanmalı motorlarda, maksimum çevrim sıcaklığı, yapısal özellikler nedeniyle sınırlandırılmıştır. Bu nedenle, pistonlu içten yanmalı motorlarda, motor parçalarının sıcaklıklarının kontrol edilebilmesi için soğutma sistemine ihtiyaç vardır. Şekil 2.19'da iki ve dört zamanlı dizel motorlarında soğutma yoluyla kaybedilen ısı, fren ortalama efektif basıncına göre değişimi görülmektedir. Fren ortalama efektif basıncı arttıkça, her iki motorda soğutma yoluyla kaybedilen ısı azalmaktadır. Dört

zamanlı dizel motorunda soğutmaya giden ısı kaybı, %20-%28 arasında değişmektedir. Bu ısı kaybı, soğutma suyuna ve yağlama yağına geçen ısıyı kapsamaktadır. Yalnızca yağlama yağında ortalama %8'lik bir kayıp söz konusudur [35,36].



Şekil 2.19. Dizel motorlarında soğutma ile kaybedilen ısı miktarı [37].

Pistonlu motorlarda, çevrimin devamlılığını sağlayabilmek ve egzoz zamanındaki pompalama kaybını azaltabilmek için, egzoz supabının AÖN'dan önce açılması gerekir. Böylece egzoz gazlarının taşıdıkları ısı dışarıya atılır. Egzoz gazı yoluyla yaklaşık %30'luk bir kayıp söz konusudur. Silindir içerisine sürülen ısının bir kısmı da radyasyonla (ısı transferi nedeniyle) kaybedilmektedir. Radyasyonla ısı transferi, enfraruj ışınları ile gerçekleşmektedir. Bu ışınlar, etki alanları içerisine giren cisimlerin moleküllerinin hareketlerini hızlandırarak, onların ısınmalarına neden olmaktadır. Sürtünme kayıpları, çalışan motor parçaları arasında oluşan sürtünmeler, emme ve egzoz kanallarındaki kayıplar ve su pompası, yağ pompası gibi yardımcı motor elemanlarında oluşmaktadır. Şekil 2.20'de direkt enjeksiyonlu, altı silindirli bir dizel motorunda, motor devrine bağlı olarak oluşan toplam sürtünme kaybı ve sürtünmeye neden olan motor parçalarının etkileri görülmektedir. Piston mekanizması, segman, biyel ve kompresyon yükleri de dahil olmak üzere, toplam sürtünmenin %50'sini oluşturmaktadır. Supap düzeni %25, krank mili yataklarında %10 ve yardımcı motor parçaları ise %15'lik bir sürtünmeye neden olmaktadır [20,38,39].



Şekil 2.20. Direkt enjeksiyonlu 6 silindirli dizel motorundaki sürtünme kayıpları [20,40].

BÖLÜM 3

TERMAL BARIYER KAPLAMALI MOTORLARDA KULLANILAN SERAMİK MALZEMELER

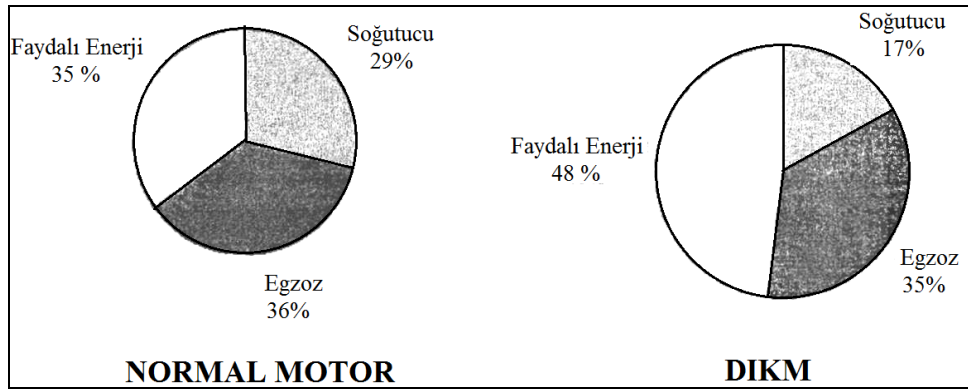
Günümüzde, bilim adamları tarafından seramiği teknolojiye kazandırmak için büyük çaba harcanmaktadır. Bu çabalardan biri de, adyabatik (ısı ve kütle kaybının olmadığı) motor projesinin gerçekleştirilmesi ve istenen amaca ulaşılmasıdır. Adyabatik motor projesinin en önemli amaçları, soğutma sistemini kaldırma, ısı kaybını düşürme ve termik verimi artırma olarak sıralanabilir [41].

Isı kayıplarını azaltarak motorda verimi artırmak için, yanma odasının, pistonların, silindir kapağının ve supapların termal yalıtkan malzeme ile kaplanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Şayet silindir gömlekleri de seramikten yapılırsa segmanlara uygun termal genişmeli ve aşınmaya dayanıklı kaplama gereklidir. Bazı seramik malzemeler, 870 °C'ye kadar kendi kendine yağlayıcıdır [42].

Günümüzde motorların metalden yapılması ve yanma odasındaki elemanların yüksek sıcaklığa maruz kalmalarından dolayı, metal parçalarda bozulmalar olduğu görülmektedir. Isı kayıplarını azaltmak için dizel motorlarında yapılan kaplamalar, soğutma sistemini ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Soğutma sistemi elemanlarının (vantilatör, su kanalları, pompa, radyatör vb.) ortadan kalkmasıyla ağırlık, parça maliyeti ve ekonomisi yanı sıra, %40 oranında da yakıt tasarrufu sağlamaktadır. Bu amaçla yapılmış olan çalışmalarda, yüksek sıcaklık yatakları ve yağları gibi problemler öne sürülmüşse de, yapılan uygulamalar ümit vericidir [43].

Bugün tam adyabatik olmasa bile, düşük ısı kayıplı motor yapımı özellikle soğutmaya giden ısı kayıplarının azaltılması, soğutma yükünün ve harcanan gücün azaltılması sebebiyle faydalı enerji arttırılarak motor verimi yükseltilmektedir [44].

Adyabatik motor projesinin diğerk bir amacı da ısı kayıplarını azaltarak, yanma odasının cidar sıcaklıklarını arttırma ve egzoz gazlarının sıcaklığını yükseltmektir. Egzoz gazlarının sıcaklığını arttırmakla oluşan egzoz enerji işindeki artış, daimi emmeli bir dizel motoruna turboşarj veya turbokombine düzeneğinin eklenmesiyle dışarı atılan ısı enerjisinin, mekanik enerjiye dönüştürülmesini sağlamaktadır bu durumda da motorun performansını arttırmaktadır. Yanma odasındaki sıcaklık artışı ile yanmadan atılan hidrokarbonlar tamamıyla yanmakta ve karbonmonoksit çıkışı azaltılmaktadır. Ayrıca egzoz sıcaklıkları da standart bir dizel motorunda 400-600 °C olmasına karşılık kaplamalı motorda 700-900 °C'dir [45]. Turbokombine bir motorda ise egzoz sıcaklıkları 1100 °C'ye kadar ulaşabilmektedir. Bu atık ısıların birtakım düzeneklerin kurulmasıyla tekrar kazanılıp faydalı hale dönüştürülmesi için değişik çalışmalar sürdürülmektedir. Şekil 3.1'de standart ve adyabatik bir motor için enerji dengelerinin karşılaştırılması görülmektedir.



Şekil 3.1. Standart ve düşük ısı kayıplı motorun (DIKM), enerji dengesinin karşılaştırılması [46].

Yüksek ısı yalıtımını sağlamak amacıyla kaplanan yanma odası elemanlarında kullanılan bazı seramik türleri, çok iyi ısı yalıtımı nedeniyle sıcaklığın yükselmesini sağlamakta, dolayısıyla özgül yakıt tüketiminin düşmesini sağlamaktadır. Ancak yanma sıcaklığının yükselmesi, sadece dizel motorlarında arzu edilmektedir. Isı enerjisinin dışarı atılmasını engelleyerek mekanik enerjiye dönüştüren turbo kombine ünitesiyle, termik verimde de artış sağlamaktadır. Cidar sıcaklıklarının artması tutuşma gecikmesini de engelleyerek, motorun daha sessiz çalışmasını sağlamaktadır.

İleri geri hareket eden parçalarda seramik kullanılmasıyla sağlanan hafiflik, dairesel hareket eden turbo rotorlar gibi parçalar için de önemlidir. Bu parçaların seramikten üretilmesiyle birlikte, yüksek sıcaklıkta kopma ve kırılmaya karşı dayanıklılık da sağlanmaktadır [47]. Özellikle askeri amaçlar için hedef küçültme bakımından, taşıtın küçültülmesi veya taşıtın kullanım alanının artırılması yanında, azalan ağırlığı sebebiyle daha az yakıt tüketme ve daha seri hareket kabiliyeti kazanması da performans açısından önemlidir.

Isı kayıplarının azaltılması sebebiyle, sıkıştırma ile ateşlenen motorlarda sıkıştırma sonu gaz sıcaklığı arttığı için, ilk hareket daha kolay sağlanmaktadır. Tutuşma gecikmesinin azaltılmasıyla da, kontrolsüz yanmadan kaynaklanan vuruş ve gürültü azalarak motorun daha sessiz çalışması sağlanmaktadır.

Adyabatik motor projesinin en önemli amaçları, motorda soğutucuya giden ısı kayıplarını önleyerek soğutma yükünü azaltmak, cidar sıcaklıklarını artırarak tutuşma gecikmesini azaltıp yanmayı iyileştirmek, egzoz gazı sıcaklıklarını artırarak aşırı doldurmak sistemlerde daha fazla güç elde etmek ve kısaca termik verimi iyileştirmek gibi hususlar sıralanmaktadır. Bu amaca ulaşabilmek için de ilk adımda piston, silindir kapağı ve supapların kaplanması gerekmektedir. İleri teknoloji seramiklerinin gelişmesiyle birlikte son yıllarda, dizel motorlarının yanma odası elemanlarında kaplama malzemesi olarak kullanılmaları üzerine geniş araştırmalar yapılmaktadır [47,48]. Seramik kaplamalı motorların 1980'lerde başlayan uygulamaları özellikle ısı kayıplarını azaltmayı ve motor performansını arttırmayı amaçlamaktadır [48].

3.1. SERAMİK MALZEMELER

Seramik malzemeler, iyonik ve kovalent bağlarla bağlanmış, genellikle metallerle metal olmayan elementlerin oluşturduğu inorganik kimyasal bileşiklerdir. Seramik kelimesi, Yunanca'da pişirilmiş eşya anlamına gelen “keramas” kelimesinden gelmektedir. Seramik üretimi eski çağlardan beri yapılmaktadır. Arkeolojik buluntular seramik üretiminin M.Ö. 6500 yıllarından beri yapılmakta olduğunu ortaya koymaktadır. Seramikler genel olarak, geleneksel ve mühendislik seramikleri

olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Mühendislik seramikleri, geleneksel seramiklerden başlıca hammadde üretim yöntemleri ve mikro yapı açısından farklılıklar göstermektedir. Geleneksel seramikler doğal hammaddelerden üretilirken, mühendislik seramiklerin hammaddesi sentezleme yöntemi ile yapay olarak gerçekleştirilmektedir. Geleneksel seramikler kapsamına kil, çimento ve cam gibi "silikat sanayii" ürünleri girmektedir. Mühendislik seramikleri, geleneksel seramiklerden ayıran en önemli özellik ise, mühendislik seramiklerinin pudra halinde çok ince tozlardan üretilmeleridir. Öyle ki, günümüzde üretilen ince seramiklerde bir mikronun altındaki tozlar kullanılmakta ve böylece, tamamen yoğun yapılu seramikler üretilmektedir. Dolayısıyla ince seramiklerin mekanik özellikleri, geleneksel seramiklerden çok üstün olmaktadır. Geleneksel seramiklerin mükemmel bir refrakter malzeme olduğu bilinmesine karşın, çok yüksek sıcaklık ve yükler altında kullanımları sınırlıdır. Oysa mühendislik seramiklerin saflık derecelerinin yüksek ve yapılarının çok kontrollü olması nedeniyle, kullanım alanları çok genişir [49]. Mühendislik seramikleri olan ileri teknoloji seramikler, cinslerine göre başlıca oksit ve oksit olmayan seramiklerden oluşmaktadır. Oksit seramikler Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO , BeO vb. seramiklerdir. Oksit seramikler, kristal yapılarından kaynaklanan oksitlenme direnci, kimyasal ve ısıl kararlılık gibi özellikler göstermektedir [50]. Oksit olmayan seramikler ise, karbürler (SiC , TiC , B_4C , ZrC vb.), nitrürler (Si_3N_4 , AlN , TiN , ZrN vb.), sülfürler (MoS_2 , CdS , ZnS vb.), silisitler (Mo_2Si , $TaSi_2$, WSi_2 vb.) ve borürler (TiB_2 , CaB_6 , ZrB_2 vb.) gibi seramiklerdir [49,51]. Seramik malzemeler bileşiminde kristal ve cam yapılu fazları içermektedir. Bu farklı yapı bileşenlerinin miktarı ve dağılımları seramik malzeme özelliklerini önemli ölçüde etkilemekte ve belirlemektedir. Örneğin yapıda mevcut düzenli fazların yerleşim düzenini değiştirmek, yalıtkan olan seramik malzemeyi iletken hale getirmekte ya da bunun tersi olabilmektedir. Seramik endüstrisinin en önemli özelliği, birçok endüstriyel alanın temel taşlarından biri olmasıdır. Örneğin refrakterler; metalurji endüstrisi, aşındırıcılar, makine, takım ve otomobil endüstrisi, cam, inşaat, elektronik, otomobil endüstrisi, uranyum oksit yakıtlar; nükleer güç santrallerinin en önemli bileşenlerindedir. Çeşitli özel seramikler, bilgisayar ve diğer birçok elektronik devrelerin yapı bileşenlerinde kullanılmaktadır [49,52,53].

Seramik malzemelerin kullanılmasının başlıca nedenleri:

- Yüksek sıcaklıklara dayanıklılık,
- Kimyasal kararlılığın yüksek olması,
- Çok sert olmaları, metallere daha hafif olmaları,
- Seramik malzemelerin hammadde olarak bol miktarda bulunması ve
- genellikle metallere kıyasla ucuz olması,
- Pahalı ve stratejik metallere ihtiyaç göstermemesi,
- Aşınmaya karşı dayanıklı, oksitlenmeye karşı dirençlerinin yüksek olması,
- Sürtünme katsayısının düşük olması,
- Basma kuvvetinin yüksek olması,
- Düşük ısı ve elektrik iletkenliğine sahip olması.

Bütün bu üstün özelliklere rağmen, seramik malzemelerin en büyük dezavantajı gevrek olmalarıdır [54].

3.1.1. Oksit Seramikler

Mühendislik seramiklerinin diğer bir kısmını oluşturan oksit seramikler alümina, zirkonya, magnezya, berilya vb. seramiklerdir. Oksit seramikler; yüksek sıcaklıkta kullanılması mümkün olan metal veya metaloid elementlerinin oksijenle yaptıkları bileşiklerdir. Oksit seramikler, iyonik bağlı olduklarından saydamlık, elektrik ve ısı iletimine direnç, diamanyetizma ve kimyasal kararlılık gibi genel karakteristiklere sahiptir. Bu özelliklerin yanı sıra yüksek elastiklik modülü, yüksek sertlik, gevreklik, refrakterlik, düşük termal genleşme ve korozyona karşı dirençlidirler. Diğer taraftan, oksit seramikler, endüstride sert aşındırıcı olarak da kullanılmaktadır [55].

3.1.1.1. Alümina (Al_2O_3)

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 'in payı % 85 ve üzerinde en çok araştırma yapılan Al_2O_3 - TiO_2 malzemeler, bu gruba dahildir [55]. Ergime noktası 2000 ± 30 °C olan

alüminyum oksit, yüksek sıcaklıklarda kimyasal maddelere ve mekanik yüklere karşı dayanıklı refrakter malzemelerden birisidir. Doğal alümina, korundum halinde, fakat feldspat ve killerde olduğu gibi, genellikle silikatlarla birlikte bulunmaktadır. Alümina aynı zamanda boksit, diasporit, kriyolit, silimanit, kyanit ve diğer birçok mineralin bileşiminde yer almaktadır. Saf alümina, düşük sıcaklıklarda birkaç şekilde bulunmaktadır. Fakat bütün bu şekiller, zaman, kristal boyutu ve atmosfer koşullarına bağlı olarak 750-1200 °C arasında α -Al₂O₃'e dönüşmektedir. 1600 °C'nin üzerinde yapılan ısıtma, bu dönüşümü hızlandırmaktadır. Al₂O₃'in α -fazına dönüşümü tersinir değildir. Yüksek sertliği ve aşınmaya karşı direnci nedeniyle kesici takımlarda, parlatma sektöründe, iplik mekiklerinde, yüksek sıcaklıkta çalışan makine parçalarında, sprej nozullarında, ayrıca öğütme bilyesi ve laboratuvar malzemesi olarak da kullanılmaktadır. Yoğun yapıli alümina, buji üretiminde de kullanılmaktadır. Al₂O₃ ürünler slip dökümle, ekstrüzyonla, indüksiyon kalıbyıla, soğuk ve sıcak presleme ile şekillendirilmektedir. Çok ince toz boyutuna sahip ve tamamen saf olan alümina, ancak sol-jel yöntemi ile üretilebilmektedir. MgO ilavesi Al₂O₃'in yoğunluğunun, % 99'un üzerine çıkmasını sağlamaktadır [49]. Al₂O₃'in bazı fiziksel, mekanik ve ısıli özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Al₂O₃'in fiziksel ve mekanik özellikleri [56].

Yoğunluk (gr/cm ³)	3,95
Sertlik HV	1800-2000
Elastiklik Modülü E GPa	300
Kırılma Tokluğu K _{iç} (MPa.m ^{1/2})	3,5
Çekme Dayanımı R _m (N/mm ²)	200-250
Young's Modülü E (GPa)	375
Isıl İletkenlik c (W/m.K)	18
Isıl Genleşme Katsayısı α (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	7
Isıl Şok Direnç Sınırı (°C)	200

3.1.1.2. Titanyum Oksit (TiO₂)

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. Buna karşılık, gerek titanyum mineralleri gerekse titanyum oksidin (TiO₂) geniş kullanım alanları vardır. TiO₂, şu an için bilinen en beyaz boya

maddesidir. Titanyumun mineralleri ve TiO_2 boya, kâğıt üretimi, seramik ve cam endüstrisi, uzay ve havacılık endüstrisi, savunma sanayi ile tıp alanında geniş kullanıma sahiptir.

Titanyumun ilmenit ve titanlı manyetit minerallerinden rutil (TiO_2 bileşiği) üretilmektedir. Bu üretim iki farklı yöntemle gerçekleştirilmektedir.

Bunlar;

- Sülfat yöntemi
- Klorit yöntemi

Sülfat yönteminde, % 45-65 TiO_2 içeren ilmenit ya da % 70-72 TiO_2 içeren cüruf kullanılmaktadır. Titanyumlu cüruf, genellikle demiri bol ilmenitlerin elektrotermal ergitilmesi ile demiri ayrıştırarak elde edilmektedir. Eldeki cevher, sülfirik asitle çözülerek titanil sülfat ve demir sülfat açığa çıkarılmaktadır. Titan hidrolizle çökeltilir. Yıkama filtre edildikten sonra TiO_2 elde etmek amacıyla kalsinin edilmektedir. Demir sülfat, atık olarak elde edilmektedir.

Klorit yönteminde ise, kullanılan cevherin TiO_2 içeriğinin çok yüksek olması gerekmektedir. Bu da rutil ve sentetik rutildir. Sentetik rutil, yüksek kaliteli ilmenitten redüksiyon yoluyla kimyasal olarak TiO_2 dışındaki maddelerin ayrıştırılması ile elde edilmektedir. Daha sonra bu yüksek tenörlü cevherden, 850-950 °C'de petrol kokuyla ve klor gazıyla titanyum tetraklorür üretilmektedir. Bundan da, atmosferik ortamda ya da oksijen ortamında kalsinasyon yoluyla TiO_2 , yan ürün olarak klorik asit ve klor elde edilmektedir. Mevcut teknolojilerin karmaşık olması nedeniyle ürün fiyatları yüksektir. Fiyatların yüksekliği de, tüketimi ile sınırlamaktadır. 880 HV sertliğe sahip TiO_2 'in bazı fiziksel, mekanik ve ısıl özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. TiO₂'in fiziksel ve mekanik özellikleri [56].

Yoğunluk, (gr/cm ³)	4
Sertlik (HV)	880
Poisson Oranı	0,27
Kırılma Tokluğu K _{ic} , (MPa.m-1/2)	3,2
Isıl İletkenlik, (W/m.K)	11,7
Isıl Genleşme Katsayısı α(10-6 °C-1)	9,2
Young's Modülü (GPa)	282
Kayma Modülü G, (GPa)	90
Öz Direnç W _s , (ohm.cm)	10 ²

3.1.1.3. Zirkonya (ZrO₂)

Oksit esaslı seramik malzemelerden birisi olan zirkonya (ZrO₂), seramik kaplamaların yapıldığı ilk günden itibaren özellikle "Termal Bariyer Kaplama" olarak uzay ve havacılık endüstrisinde çok geniş bir kullanım alanı bulmuştur [57]. Zirkonya içeren seramikler, ileri teknoloji malzemeleri olarak kabul edilmektedirler. Bunun nedeni ise, sahip olduğu özelliklerdir.

Bu özellikler;

- Ergime sıcaklığının yüksek olması,
- Asidik kimyasal maddelere, cürufa ve cama karşı direncinin yüksek olması,
- Korozyon, erozyon ve aşınmaya karşı dayanıklı olması,
- Düşük termal genleşme katsayısına sahip olması,
- Yüksek sıcaklıkta iyonik iletkenliğe sahip olmasıdır.

Zirkonya içeren seramiklerin kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir;

- Refrakter malzeme olarak,
- Isıtıcı eleman olarak,
- Abrasiv olarak ve kesici aletlerin üretiminde,
- İzolasyon malzemesi ak
- Ekstrüzyon kalıplarında ve aşınmaya dayanıklı makine parçalarında,

- Oksitlenmeye karşı ve termal bariyer amacıyla yapılan seramik kaplamalarda,
- Seramik filtre üretiminde,
- Yakıt hücrelerinde,
- Piezoelektrik ve elektro optik devrelerde, kapasitörlerde,
- Dizel ve ısı motorlarında, türbin kanatlarında kullanım alanı bulmaktadır [49,57].

Zirkonya üç farklı yapıda bulunmaktadır. Bunlar monoklinik, tetragonal ve kübik yapılarıdır. Monoklinik yapı, oda sıcaklığında 1170 °C'ye kadar kararlıdır ve bu sıcaklığın üzerinde yapı tetragonal yapıya dönüşmektedir. Tetragonal yapıda, 2370 °C'ye kadar kararlıdır. Bu sıcaklığın üzerinde ise yapı kübiktir. Monoklinik yapıdan tetragonal yapıya geçiş, % 8 mertebesindeki hacim değişikliği içerdiğinden teknolojik açıdan sorun oluşturmaktadır. Bu faz dönüşümü sonucu zirkonya genellikle kırılmaktadır. Bu durumu önlemek için (yapıyı oda sıcaklığında kübik yapıda kararlı kılmak amacıyla) zirkonyaya, (ZrO₂) CaO, MgO ve Y₂O₃ gibi oksitler ilave edilerek yapı kararlı hale getirilmelidir. Bu çalışmada kullanılan ve içerisine % 8 Y₂O₃ katılmış ZrO₂'nin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri, Çizelge 3.3'de verilmiştir. Kübik yapıdaki zirkonyanın özellikleri zayıftır. Tetragonal zirkonyadan monoklinik zirkonyaya dönüşüm ise, 850-1000 °C gibi düşük sıcaklıkta meydana gelmektedir. Bu dönüşüm, su verilmiş çeliklerde görülen martenzitik dönüşüm karakteristiğine sahiptir. Zirkonyada yer alan bu martenzitik dönüşümün önemi ve mekanik özellikleri geliştirmesi nedeniyle, tamamen kararlı kübik yapı yerine içerisine çökelti halinde monoklinik veya tetragonal faz içeren kısmen stabilize edilmiş zirkonya tercih edilmektedir. Seramik matris içerisine çökelmiş veya dağıtılmış zirkonyanın, tetragonal yapıdan monoklinik yapıya dönüşümü sonucu seramik malzemelerin tokluğu ve mukavemeti artırmaktadır. Toklaşmanın asıl sebebi, faz dönüşümü sırasında meydana gelen hacim ve şekil değişikliğidir [49,58].

Çizelge 3.3. ZrO₂'in bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Yoğunluk, (g/cm ³)	6,52
Ergime noktası	1855 °C
Kristal yapısı	Hegzagonal
İyonlaşma enerjisi (kJ/mol)	640.1
Isıl iletkenlik (W/(m·K))	22.6
Young's Modülü (GPa)	205
Isıl Genleşme Katsayısı $\mu\text{m}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (25°C'de)	5,7
Sertlik (MPa)	903

3.1.1.4. Magnezyum Oksit (MgO)

Magnezyum oksit ya da magnezyum, bir alkalın toprak esaslı metal oksittir. Bugün üretilmiş magnezyum oksidin bir kısmı doğal olarak oluşan mineraller, magnezit, MgCO₃ kalsinasyonu ile elde edilmektedir. MgO yer kabuğunun %12'de bulunmaktadır. Kostik kalsine manyezit (MgO, Magnezyum Oksit) Ni, Co ve U gibi metallerin saflaştırılması işleminde asit liçi çözeltilerde çöktürücü olarak kullanılır. MgO endüstride refrakter malzeme olarak; nükleer ve kimya sanayinde kullanılan potalarda, bağlayıcı madde olarak çimentolarda, ısıtma elemanlarında, termokopul tüplerde ve fren astarlarında kullanılmaktadır. Çizelge 3.4'de MgO'nun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri verilmektedir [49,58].

Çizelge 3.4. MgO'nun bazı fiziksel ve mekanik özellikleri.

Yoğunluk, (g/cm ³)	3.58
Ergime noktası	2852 °C
Kristal yapısı	Kübik
Molar kütle (g / mol)	40,304
Isıl iletkenlik (W/(m·K))	45-60
Kaynama noktası °C	3600
Sertlik (HV)	910

3.1.2. Oksit Olmayan Seramikler (Karbürler)

3.1.2.1. Bor Karbür (B₄C)

Yüksek ergime sıcaklığı, yüksek sertlik, düşük yoğunluk (2.4 gr/cm³), kimyasal maddelere karşı üstün direnç ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle bor karbür, günümüzde ileri teknolojinin önemli bir malzemesidir [58]. Bor karbür (B₄C), elmas ve kübik nitrür'den sonra gelen en sert malzemedir. Karbon miktarının sertliğine bağlı olan etkisi konusunda birbirinden farklı sonuçlar ileri sürülmektedir. Yüksek sıcaklık sertlik ölçümlerinde 1300 °C'ye kadar olan sıcaklıklar için sertlikte bir azalma gözlenmemiştir. Literatürde bor karbür bileşikleri için belirtilen sertlik değerleri 2000-7800 HV arasında değişiklik göstermekle birlikte, B₄C bileşimi için genel kabul görmüş Vickers sertliği 3200 HV (32 GPa) civarındadır [59]. Yüksek sertliğinden dolayı, bor karbürün aşınma direnci de oldukça yüksektir. Saf B₄C kristalleri metalik gri parlak renktedir. Yoğunluğu, bileşiğin yapısında bulunan ve bileşimdeki oranı % 8-20 arasında değişebilen karbon miktarına bağlı olarak değişmektedir. Yüksek sertliği ve ergime noktasının yanı sıra, mekanik özellikleri de oldukça yüksektir. Özellikle mukavemet/yoğunluk oranı göz önüne alındığında, B₄C ideal bir malzemedir. Kristal yapıdaki atomların kovalent bağlarla birbirine bağlı olması yüksek mukavemetin bir göstergesidir. Bor karbürün bazı fiziksel ve mekanik özellikleri, Çizelge 3.4'te verilmektedir [60-62].

Çizelge 3.5. B₄C'ün fiziksel ve mekanik özellikleri [56].

Elastiklik Modülü E, (GPa)	306-460
Tokluk K _{iç} , (MPa m ^{1/2})	2,9-3,7
Sertlik H (HV)	3200
Yoğunluk r, (gr/cm ³)	2,5-2,52
Possion Oranı (n)	0,14-0,22
Isıl Genleşme Katsayısı α (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	4,73x10 ⁻⁶
Isı İletim Katsayısı c, (W/mK)	2
Young's Modülü (GPa)	460
Özgül Isı Q, (J/gK)	1,13

Bor karbürün kırılma enerjisinin çeşitli araştırmacılar tarafından [56,60,61], 1,6 ile 1,9 J/m² gibi çok geniş bir aralıkta bulunacak şekilde literatürde verilmiş olması, bu

büyükliğün ölçümünde önemli hataların yapıldığını göstermektedir. Kovalent bağlı malzemeler için bağlanma modelinden hareket edilerek bor karbür için yapılan teorik hesaplamalar kırılma enerjisinin $11,8 \text{ J/m}^2$ olduğu ifade ederken, Griffith teorisi kullanılarak yapılan hesaplamalarda bu değer 14 J/m^2 olarak bulunmuştur [63].

Bor karbür bilinen en kararlı bileşiklerden birisidir. Standart oluşum entalpisi 9,3 ile 17.1 kcal/mol arasındadır. Asit ve bazlar ile kolaylıkla reaksiyona girmez. Fakat HF–H₂SO₄ ve HF-HNO₃ karışımlarında çok uzun sürelerde çözünmektedir. Ufak boyutlu bor karbür tozları nemli havada veya oksijen ile yavaşça oksitlenebilir ve taneciklerin yüzeyinde zamana bağlı olarak B₂O₃, HBO₃ veya H₃BO₃ filmleri oluşmaktadır [63]. Günümüzde ekonomik olarak bor karbür toz üretimi borik asit kullanılarak yapılmaktadır. Bor karbür sahip olduğu aşırı sertlik nedeniyle onu metalurji sektöründe aşındırıcı toz olarak kullanılmaktadır. Boyut dağılımı 1-100 µm arası değişen tozlar WC ve diğer teknik seramiklerin taşlanması ve parlatılmasında kullanılmaktadır. Aşınmaya dayanıklı makine parçalarının üretiminde bor karbürün önemli bir yeri vardır. Kumlama ve su jeti kesme aletlerinin nozulları buna örnek olarak verilebilir. Bor karbür tozunun yüksek sertliğinin yanı sıra, yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk özelliklerinin de olması nedeniyle savunma saniyinde zırh malzemesi olarak kullanımı gündeme getirmiştir. Bor karbür esaslı bir zırh sisteminin, alışlagelmiş sistemlere göre % 20 daha hafif olması, askeri araçlara daha kolay hareket ve manevra yeteneği kazandırmaktadır. Bu nedenle bir askeri helikopterde alt kısımlar, motor kabini ve pilot kabininin yan yüzleri, bor karbürle kaplanmaktadır. Ayrıca florürler ile aktive edilmiş bor karbür tozları, çelik yüzeyine bor difüzyonu sağlamak için kullanılmaktadır. Bu işlem sonucunda, çelik yüzeyinde 100-200 µm kalınlığında çok sert ve aşınma direnci çok yüksek bir yüzey tabakası elde edilmektedir. Bor karbürün en yaygın kullanıldığı alanlardan biri de nükleer enerji santrallerinde radyasyondan korunma amaçlı ve yakıt yükleme çubuğu olarak kullanılmasıdır [62].

3.1.2.2. Krom Karbür (Cr₃C₂)

Krom karbür (Cr₃C₂) son derece sert olan bir refrakter seramik malzemedir. Genellikle sinterleme işlemine tabi tutulurlar. Ortorambik kristal yapısı ile gri renkte

bir görünüme sahiptir. $Cr_{23}C_6$ ve Cr_7C_3 olmak üzere iki farklı bileşimdedir. Krom karbür, metal malzemelerin yüzeylerinin sert olmasının, korozyona ve aşınmaya karşı dayanıklı olmasının istenediği yerlerde, ısı püskürtme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Mil yatakları, contalar ve vanalar gibi yerlerde vanadyum karbür gibi diğer sinterlenmiş karbürlerle birlikte kapla işlemi yapılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda (1000-1100 °C) oksidasyonunun olmayışı, krom karbürün korozyon direncini arttırmaktadır.

Krom karbürün ısı genleşme katsayısı hemen hemen çeliğin ısı genleşme katsayısına eşittir. Mekanik gerilmenin kaplama tabakasında azalması, tabakayı mukavemetlendirmektedir. Krom karbürün mekanik ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.6. Cr_3C_2 'ün fiziksel ve mekanik özellikleri [56].

Yoğunluk (gr/cm ³)	6,65-6,68
Young's Modülü (GPa)	373
Basma dayanımı (GPa)	4.138
Mol kütlesi (g/mol)	180,01
Kaynama noktası (°C)	3800
Ergime noktası (°C)	1890 (Cr_3C_2)
	1665 (Cr_7C_3)
	1250 ($Cr_{23}C_6$)
Isıl Genleşme Katsayısı α (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	11,2
Isıl İletkenliği (W/m.K)	189.77
Sertlik-VH (kg/mm ²)	1834

3.1.2.3. Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür (SiC) kuvvetli kovalent bağ yapısına sahip yapay bir malzemedir, Acheson tarafından 1891'de tesadüfen sentezlenmiştir. Al_2O_3 'den daha sert ve ısıya daha dayanıklıdır. Ayrıca korozyona karşı yüksek dayanım göstermektedir. Bu yüzden yaygın olarak hem aşındırıcı hem de refrakter olarak kullanılmaktadır. Demir-çelik üretiminde metalürjik katkı olarak da kullanılmaktadır. Elektriksel özellikleri nedeniyle ısıtıcı elementlerde ve elektrik devrelerinde kullanılırlar. SiC'ün kullanım alanları;

- 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 silikanizasyonayardımcı eder. Aynı zamanda çekirdeklendirici görevini göreyerek dökme demirin kalitesinin arttırılmasında,
- Kaymalı yataklarda.

Silisyum karbür, 2000 °C'nin altındaki sıcaklıklarda β formundadır. Bu durum, düşük sıcaklık yapısı olarak isimlendirilmektedir. Dönüşüm sıcaklığını arttıran etkiler yok ise, 2000 °C üzerinde sadece hegzagonal ve rombohedral tipler mevcuttur. Bu sıcaklıklarda ise, α formundadır. SiC'ün temel yapısı tetrahedral'dir. SiC'ün farklı formları, SiC tetrahedralarının birbirlerinin üzerine yığılmaları ile oluşan katmanlar ve tekrarlayan SiC birimlerinin oluşturduğu bu katmanların sayısı ile temsil edilmektedir. Acheson fırınında sentezlenen SiC kristallerinde, 4H, 6H, 15R veya 3C formları yaygın olarak görülmektedir. Bunların dağılımı, hammaddenin kalitesine ve üretim koşullarına göre değişmektedir. H-R-C sırasıyla hegzagonal, rombohedral ve kübik yapıları rakamlar ise katman sayılarını göstermektedir [58]. Çizelge 3.6. SiC'ün fiziksel ve mekanik özellikleri verilmektedir.

Çizelge 3.7. SiC'ün fiziksel ve mekanik özellikleri [56].

Elastiklik Modülü E (GPa)	235-290
Kırılma Tokluğu K_{Ic} (MPa m ^{1/2})	4,6
Sertlik (kg/mm ²)	2900-3100
Yoğunluk (gr/cm ³)	3.2
Poission Oranı (ν)	0,14
Isıl Genleşme Katsayısı (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	3,8-4,8 × 10 ⁻⁶
Isı İletim Katsayısı (W/cm°C)	3,6-4,9
Young's Modülü (GPa)	400
Ergime derecesi (K)	3103
Özgül Isı (j/KgK)	750

BÖLÜM 4

TERMAL BARIYER KAPLAMA YÖNTEMLERİ

Günümüzde metallerin yüzey özellikleri veya yüzey özelliklerinin değiştirilmesi çok önemli bir bilim ve uygulama alanı olma yolundadır. Metalik malzemelerin kütleli özelliğinin istenilen yönde değiştirilmesi yerine yüzeysel değişimlerinin yapılması, birçok bakımdan daha ekonomik ve pratik olmaktadır. Bu nedenle, metalik yüzeylerin aşılama, alaşımlandırma, değiştirme, boyama veya metalik/inorganik maddelerle kaplama yöntemleri ile değiştirilmesinin bir çok amacı vardır. Yüzeğe daha değişik fiziksel, mekanik veya elektriksel nitelik kazandırmak, korozyona dirençli hale getirmek veya ona dekoratif açıdan çekicilik vermek için yapılan "metalik kaplamalar" ise, en eski zamanlardan beri uygulanmaktadır [64].

Yüzey işlemleri, taban malzemeye kütleli olarak sahip olmadığı nitelikler kazandırmakta, daha ucuz ve daha kolay üretilebilen bir malzemenin sadece yüzeyini değiştirerek istenilen amaca ulaşılabilmesini sağlamaktadır. Yüzey işlemlerinin en önemli avantajı göreceli olarak ucuz bir taban malzemenin yüzeyine yapılan işlemlerle yüzey-ortam etkileşimine dayanan mühendislik özelliklerinin kazandırılmasıdır. Örneğin aşınmaya dayanıklı seramik bir kaplama ile kaplanan yüksek hız çeliği kombinasyonunda taban malzemenin tokluk ve mekanik özelliklerinden yararlanılırken, seramik malzemenin yüksek sertlik ve yüksek sıcaklık oksidasyon direncinden de yararlanılmaktadır [65].

Çoğu metal ürünlerin kalitesi, onların yüzey çalışma koşullarına ve yüzeylerin bozulması ile ilişkilidir. Yüzeylerin bozulması, mühendislik alanında çok önemlidir. Makina elemanlarının performansı ve ömürlerinin en önemli sınır şartı, malzeme yüzeylerinde meydana gelen bozulmalardır (deformasyon). Aşınma, çevre veya kullanım sonucunda kontrol dışı meydana gelen bozulma olarak tanımlanmaktadır

[66]. Metal yüzeylerinde meydana gelen deformasyonların önlenmesi, ancak uygun bir yüzey kaplama ile mümkündür.

Isı transferinin engellenmesi amacıyla yapılan kaplamalar, ince ve kalın olmak üzere iki gruba ayrılmaktadırlar. Genelde, 0,5 mm'ye kadar olan kaplamalar ince, 5-6 mm'ye kadar olanlar ise, kalın kaplamalar olarak isimlendirilmektedir. İnce termal bariyer kaplamalar (TBK) gaz türbinlerinde, otto ve dizel motorlarının piston tepesi, silindir kapağı ve supapların kaplanması için kullanılmaktadır. DIK motorlarının ilk uygulamalarında genellikle motor parçalarına monolitik seramik kaplaması yapılmıştır. Daha sonraları mevcut monolitik seramiklerin, dizel motorlarının çalışma şartlarına pek uygun olmadığı anlaşılmıştır. Bu yüzden TBK uygulamaları için yeni yaklaşımlar geliştirilmeye çalışılmıştır [67,68].

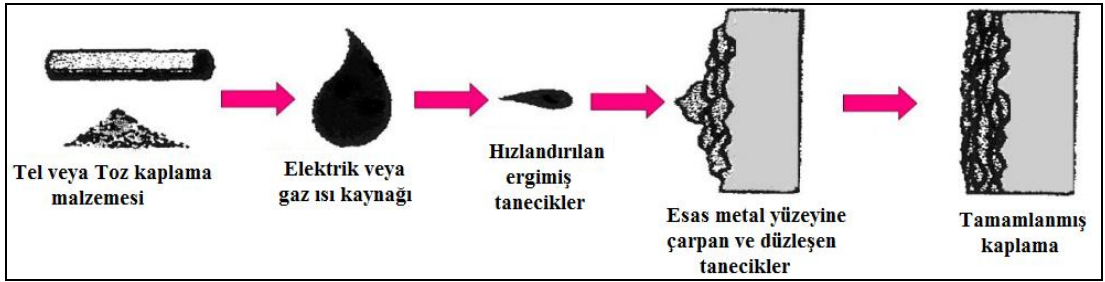
Seramik ve diğer malzemeler için kullanılan pek çok kaplama sistemi ve tipi mevcuttur. Bunlardan en önemlileri;

- Termal Sprey Kaplama: Plazma sprej, alevle toz ve tel sprej, elektrik ark sprej, detonasyon tabancası tekniği, yüksek hızlı oksijen yakıt sprej,
- Kimyasal Seramik Kaplama: Sol-jel, bulamaç, kimyasal buhar çökmesi, fiziksel buhar çökmesi, sert kaplama,
- Işın kaplama,
- Ark kıvılcım alaşımlandırması,
- İyon zenginleştirme yöntemleridir [67,68].

Seramik kaplama ile iyi yalıtım sağlanabildiği gibi, sürtünme-aşınma, erozyon-korozyon azaltılarak, malzeme kayıpları önlenmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemlerden termal sprej kaplama dışındakiler, çok ince kaplamalar için uygundur. Çok ince kaplamalar gaz türbin endüstrisinde, türbin ve stator kanatçıklarının ve yanma odasının kaplanması için başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Dizel motorlarında olduğu gibi daha kalın termal bariyer kaplama için, genelde plazma sprej ve alev sprej işlemleri kullanılmaktadır [68].

4.1. TERMAL SPREYLEME

Termal spreyl işlemlerinde kaplanacak yüzey, boyanın püskürtülmesindeki mantığa benzer şekilde, ergimiş damlacıklar ile bombardıman edilmektedir. Boyamadan farklı olarak kaplama malzemesi, oda sıcaklığında sıvı değildir ve bir yüksek enerji ısı kaynağı tarafından ısıtılmak üzere ısıtılmakta ve kaplanacak malzemenin yüzeyine spreylenecektir. Kaplanacak malzeme, oksidasyondan ve çarpılmadan kaçınmak için, düşük sıcaklıklarda (200-300 °C) tutulmaktadır. Yüzeye düşen damlacıklar, kaplama yapılan malzeme ile ısı transferinin yüksek olması nedeni ile, kısa sürede yassılaşıp ve soğumaktadır [69]. Temizlenmiş ve pürüzlendirilmiş yüzeye parçacıkların kuvvetli bağlanması, Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1. Termal spreyl kaplama yönteminin şematik olarak gösterimi [69].

Termal spreyl işlemi, tipik olarak tozlaştırılmış formdaki malzemenin ısıtılarak, bir yüzey üzerine ısıtılan malzemenin biriktirilmesiyle yapılmaktadır. Darbe etkisi üzerinde, malzeme bağlanmış, katılaşmış haldedir. Bu şekildeki kaplamalarda, boşluklar ve bir miktar oksitlenmiş parçacıklar ile karıştırılmış ince mercer parçacık tabakalarını bağlanmaktadır. Toplam kaplama kalınlığı, spreylene malzemenin gerilim sınırlamalarına dayalı olarak 0,0025- 10 µm aralığındadır [70].

Termal spreyleme, metalik olan ve metalik olmayan kaplamaların biriktirilmesinde kullanıldığından dolayı, bazen metalleştirme (metallizing) olarak da bilinmektedir. Kaplamalar, çubuk ya da tel stoğundan veya tozlaştırılmış malzemenin spreylenebilir [71]. Termal spreyl yöntemlerinde kullanılan malzeme besleme türleri ve yöntemlerin bazı özellikleri, Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Termal sprey yöntemlerinin bazı karakteristik özellikleri [72].

Biriktirme yöntemi	Isı kaynağı	Yönlendirici gaz	Malzeme besleme	Tabanca içindeki sıcaklık °C	Tipik Toz hızı (m/sn)	Ortalama sprey hızı (kg/sa)
Alev püskürtme	Oksijen-asetilen Oksijen-hidrojen	Hava	Tel Toz	3000	40	2 - 6
Elektrik ark püskürtme	Elektrotlar arası ark	Hava	Tel	6000	100	12
Hava plazma püskürtme	Plazma ark	Soy gaz	Toz	12000	400	3 - 9
Düşük basınçlı plazma püskürtme	Plazma ark	Soy gaz	Toz	12000	400	3 - 9
Detenasyon alev püskürtme	Oksijen-asetilen-azot gaz detenasyonu	Detenasyon dalgaları	Toz	4500	800	0.5
Yüksek hızlı oksî gaz	Oksi-gaz yanması	Eksoz gazı	Toz	3000	400 - 600	2 - 4

Termal spreyleneş kaplamaların göze çarpan en önemli özelliği geniş bir alanda uygulanabilir olmasıdır. Bu uygulanabilirliğin iki nedeni vardır. Birincisi; malzeme bileşimindeki belirsizlik ve özel uygulamalar için termal sprey metodlarının uygulanabilir olmasıdır. İkincisi ise, işlem sırasında parça sıcaklığının (100-260 °C) arasında oksidasyonu, çarpılması ve faz dönüşümlerini minimize etmek için düşük tutulmasıdır [72].

Termal sprey işlemlerin sıcaklıkları ve hızları, işlem parametrelerinin ölçümünü ve kontrolünü güçleştirmektedir. Bundan dolayı, yaygın olarak kullanılmasına rağmen, kaliteli kaplamaların üretimi büyük ölçüde kullanıcılara bağlıdır [73]. Termal spreyle kaplamalarda yüksek parçacık hızı, bağ mukavemetini, gözenekliliği ve yoğunluğu ve aşınmaya karşı direncine neden olmaktadır [70,74].

Bazı termal kaplama işlemleri, kaplama ile kaplama yapılan malzeme arasında bir yüksek sıcaklık difüzyonunu içermesine rağmen, kaplamaların çoğunda kaplanılacak malzeme ile kaplama malzemesi mekanik olarak bağlanmaktadır. Bu yüzden, kaplama bağ dayanımı için kaplama yapılan malzeme ve ara yüzey bağ dayanımları, kaynaklı kaplamalarda olduğu kadar yüksek değildir. Daha ileri boyutta, kaplamalar

bir miktar gözeneklilik ve oksidasyonu göstermektedir. Kalın spreyleneş kaplamaların biriktirilebildiği (örneklerinin mevcut olmasına rağmen), kaynaklı kaplamalarla karşılaştırıldığında termal spreyleneş kaplamaların daha ince olduğu görülmüştür.

Termal spreyleme, kaynaklı kaplamadan farklı iki ayrı avantaj göstermektedir. Bunlardan birincisi seramik gibi kaynak edilebilir olmayan kaplama malzemelerine uygulanabilir olmasıdır. İkincisi ise, bileşim veya çarpılma eğilimleri nedeniyle, kaynakla kaplamaya uygun olmayan malzemelere uygulanabilirliğidir. Genel olarak, kaplama yapılan malzemede çok az çarpılma olabilmektedir [75].

Temizlenmiş alt tabakaya kum püskürtülerek veya pürüzlendirilerek kaplama malzemesinin yapışması arttırılmaktadır. Kaynaklı kaplamalar haricinde kaynaklanması (birleşmesi) ile, ya kaplama yapılan malzeme veya kaplamanın yoğunluğunda düşme meydana gelmez. Kaplama malzemesinin ergime derecesi, kaplama yapılan malzemenin ergime derecesinden daha yüksek olabilmektedir. Spreylemenin bir avantajı da, ön veya son ısıl işlemleri gerektirmesidir [75,76].

Termal spreyleneş kaplama özelliklerinin, servis şartlarında ölçülmesi zordur. Çekme gerilmesi, elastikiyet modülü, termal iletkenlik ve kırılma tokluğu önemli kaplama özellikleridir. Ancak en önemli özellik, yapışmadır. Bu da yapışma mukavemet testi olan ASTM-C633-79 standardı ile belirlenmektedir. Erozyon ya da korozyon direnci gibi performansla ilişkili diğer özellikler rutin olarak ölçülmekte ve belirli uygulamalardaki işletim şartları ile ilişkilendirilmektedir [77].

Termal spreyleneş kaplama, koruyucu bir bariyer veya yıpranmış boyutların onarımında, iş parçası üzerine ergimiş metal biriktirme olayıdır. Bundan dolayı, metal alaşımları ve seramik kaplamalar, abrazyon, sürtünmeden dolayı ısınma, erozyon, korozyon ve kavitezyon gibi yüksek sıcaklık oksidasyonundan yüzeylerin korunmasını ihtiva eden bazı problemler söz konusudur. Yataklar pompalar, valfler, valf yatakları, türbin kanatları vb. gibi işlemler termal spreyleneş kaplama uygulamalarını kapsamaktadır. Termal spreyleneş kaplamalar uzay ve havacılık, çelik, otomotiv ve petrol endüstrilerinde

yaygın olarak kullanılmaktadır. En önemli kullanım alanları, uçakların türbin-motor üretimidir [78].

Termal spreyci uygulamaları, otomatik sistemlerle de kullanılmaktadır. Dünyada üretilen ticari uçaklarda bulunan yardımcı güç ünitelerinin %85'ini üreten Birleşik-Işık Uzay'ın Garrett yardımcı güç bölümü (Garrett Auxiliary Power Division of allied-Signal Aerospace), dünya pazarındaki payını korumak için, teknoloji ve robotik konularında ciddi araştırmalar yapmaktadır.

Birleşik-Işık Uzay'ın Garrett bölümlerindeki robotik destekli spreyci kullanımı 1980'lerin başlarında başlamıştır. Metal spreycilemeyi gerçekleştirmek için temel tahrik kuvveti, iki unsurdan oluşmaktadır. Bunlardan birisi komplike parça geometrisine kaplama yapmaya ihtiyaç duyulması, diğeri ise güvenlik sorunları yüzünden bir operatöre ihtiyaç duyulmasıdır [79].

Termal spreycileme genel olarak dört grup altında incelenebilir [80].

Bunlar;

- Alev spreycileme
- Plazma spreycileme
- Ark spreycileme
- Detonasyon alev spreycileme

Termal spreyci grubuna katılan en son ilave, Yüksek Hızlı Oksi-yakıt spreycileme (HVOF) yukarıda belirtilen yöntemlere alternatif bir yöntemdir [75,77,81].

4.1.2. Plazma Spreycileme

Kaplamada 25 yıldan daha uzun bir süredir plazma spreycileme yöntemi kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu teknolojiye yönelik çalışmalar sınırlıdır. 1950 ve 1960'lı yıllarda ilk önemli incelemeler, temel refrakter malzemelerinin spreycilenmesi için plazma torçları kullanılarak rapor edilmiştir [82]. Bugün, kaplama,

herhangi bir malzeme üzerine plazma spreyleme ile kaplanabilmektedir. Bu esneklik, bu teknolojinin hızlı gelişmesindeki temel nedenlerden biridir [82].

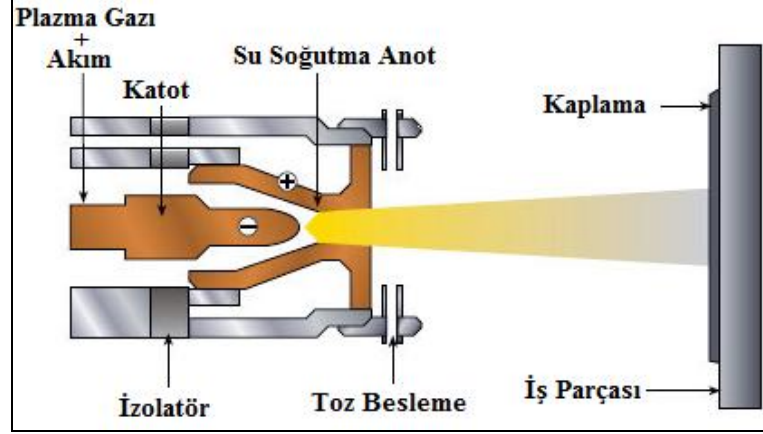
Plazma spreyleme uygulamaları korozyon, sıcaklık ve abrazyon direnç kaplamalarını ve aynı zamanda hızlı soğuma işleminin avantajını (monolitik ve son ürün şekillerini) kapsamaktadır. Cam metallerin tozları, onların amorf yapılarını değiştirmeden plazma ile spreylenebilmektedir. Son zamanlarda yüksek sıcaklık süper iletken malzemeler, plazma spreyleme işlemleri ile biriktirilmektedir [83].

Plazma spreylemede, plazma arkının ısı, malzeme yüzeyinin ergimesine yardımcı olmaktadır. Plazma arkı terimi, metallerin işlenmesinde yüksek yoğunlukta termal enerji sağlamak için elektrik arkının yoğunlaştırılmasında kullanılan işlemlerin tümü olarak bilinmektedir. Ark yoğunlaştırılması genellikle bir su soğutmalı bakır boru boyunca, ark plazma kuvveti oluşturulmaktadır. Bunun amacı, arkın akış yoğunluğunu arttırmak ve kontrol etmektir. Plazma ark işlemi, metallerin kaynatılması, kesilmesi ve yüzeylerin kaplanmasında kullanılmaktadır. Plazma ünitesi bir tabanca, güç kaynağı, spreyleme malzeme temini, durağan ve hareketli ekipmanlardan oluşmaktadır [80]. Şekil 4.2.'de plazma spreyleme tabancası, Şekil 4.3'te de plazma spreyleme tabancasının elemanları görülmektedir.

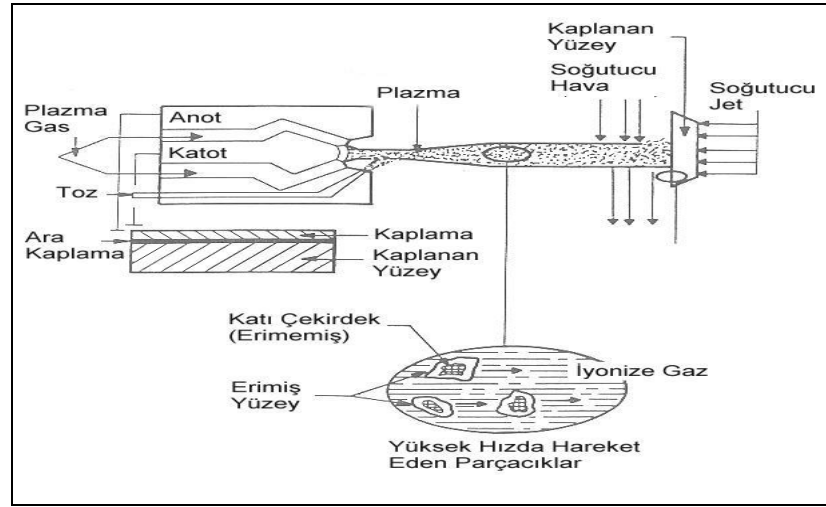
Plazma spreyleme, metalik veya metalik olmayan malzemelerin, bir spreyleme çökeltisi oluşturularak ergimiş veya yarı ergimiş halde kaplama yapılan malzeme üzerine çökeldiği, termal spreyleme işlemlerinin bir parçasıdır. Bu işlemde kaplama yapılan malzeme, spesifik soğutma aygıtlarıyla, nispeten düşük sıcaklıklarda tutulabilmektedir [83].

Plazma, elektriği ileten iyonize olmuş bir gaz akımıdır. Püskürtme işleminde kullanılan plazma alevi, en etkili olanıdır. Prensipte olarak direkt su ile soğutulan ve ucu bir meme şeklinde daralan ve de anot olarak kullanılan bir zarf ve merkezinde izole edilmiş olan katottan oluşmaktadır. Bu üfleçten geçen gaz (argon, helyum, hidrojen içeren azot) anot ve katot arasında oluşan arkta ısınarak, iyonize şekilde memeden bir plazma jeti halinde çıkarmaktadır. Bu jetin çıkış hızı 5000 - 6000 m/sn,

sıcaklığı ise 15000-25000 °C'dir. Toz halindeki püskürtme malzemesi, plazma jetinde eritilerek parça üzerine püskürtülmektedir [84,85].



Şekil 4.2. Plazma spray kaplama yönteminin şematik resmi [56].

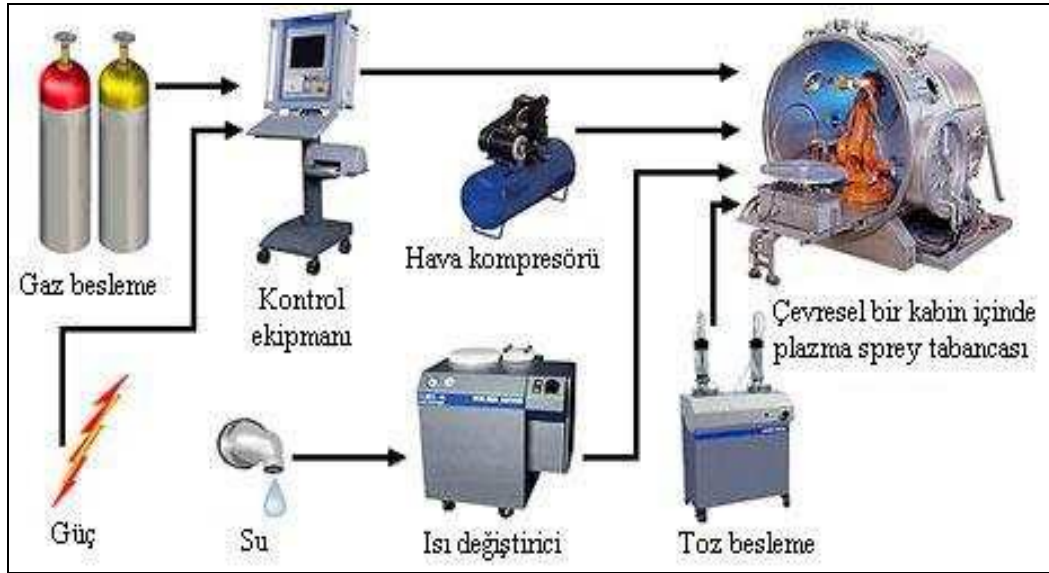


Şekil 4.3. Plazma spray tabancasının elemanları [86].

Plazma spray yönteminde ark, nozul ile elektrot arasında oluşmaktadır. Soy gaz (genellikle argon) veya soy gaz karışımları ile gücü arttırmak için, az miktarda ilave edilen hidrojen gazı, plazma jeneratörünün ark bölgesine gönderilmekte ve sistem elektrik arkı ile ısıtılmaktadır. Gaz karışımı, 8300 °C'ye kadar ısınarak, iyonize hale (plazma) gelmektedir. Böylece, yüksek sıcaklık plazma huzmesi, tabancanın nozulundan çıkmaktadır. Bu sistemde, seramik tozları plazma alevine, taşıyıcı gaz huzmesinden süspanse halinde beslenmektedir. Yüksek sıcaklığın etkisiyle ergiyen

tozlar, kaplama yapılacak yüzeyin üzerine hızlı bir şekilde biriktirilmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar, Argon/Helyum gaz karışımının gaz akış hızının, böylece parçacıkların hızını arttırdığını göstermiştir [87,88].

Şekil 4.4'de temel bir plazma sprej sisteminin içerdiği modülleri ve kontrol edilmesi gereken değişkenler gösterilmektedir. Güç düzeyi, ark gazlarının basınç ve akışı ve toz ile taşıyıcı gazın akışının hızı sistemin mesnetinde kontrol edilmektedir. Sprey-tabanca konumu ve tabanca iş mesafesi genel olarak önceden ayarlanmaktadır. İş parçasının hareketi otomatik veya yarı otomatik araçla kontrol edilmektedir. Kaplama yapılan malzeme sıcaklıkları, ön ısıtma ve kesintili spreyleme işlemi sırasında sıcaklık artışı sınırlandırılarak kontrol edilebilmektedir [89].



Şekil 4.4. Plazma sprej sisteminin şematik gösterimi [86].

4.1.2.1. Kaplama Oluşum Prosesi

Kaplamalar, kaplama yapılan malzeme üzerine gönderilen parçacık akışının çarpmasıyla oluşturulduğu için, kaplamanın yapısını kontrol eden başlıca faktörler, parçacıkların sıcaklığı, hızı ve boyut dağılımıdır. Parçacık boyutu, beslenen malzeme tarafından belirlenmektedir. Fakat hız ve sıcaklık dağılımları, plazma torcunun tasarımına ve çalışma şartlarına bağlıdır. Bir plazma torcu içerisinde parçacık hızı ve sıcaklık ölçümlerinin direkt ölçümleri, kaplama oluşum işlemleri ile

ilişkilendirilmektedir. İdeal olarak, kaplama yapılan malzemeye çarpan parçacıkların tümü, tamamı ile ergimiş olmalıdır. Ergimemiş parçacıklar sıçrayarak, çökeltme verimini azaltmaktadır. Kısmen ergimiş parçacıklar ise, çökelti içerisine dahil olmaktadır. Bu parçacıklar, mikro yapı ve özellikleri etkilemektedir [90].

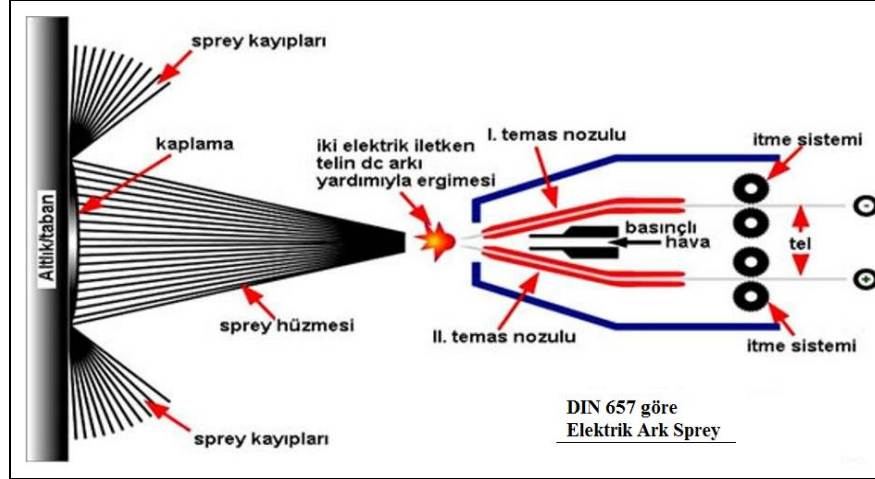
4.1.2.2. Plazma Spreylemenin Avantajları

Plazma spreylemenin kaynakla yüzey dolgusuna göre büyük bir avantajı, ana metalde meydana gelen ısıl gerilmenin göreceli olarak düşük seviyede olmasıdır. Buna rağmen, plazma püskürtmesiyle bile, püskürtme parametrelerine bağlı olarak ısı girdisi, sıcaklığa duyarlı kristal yapı ve fazlar için, fazla yüksek olabilmektedir. Sıcaklığa duyarlı parçalara yüksek püskürtme temposuyla plazma püskürtmesi uygulanması ve bunun mümkünse araya soğuma dönemleri sokulmadan basınçlı hava ile yapılması faydalıdır. Bu işlemde, püskürtme sırasında ana metalin soğutulması, ön ısıtma ile kaplamada meydana gelen ilave gerilmeleri azaltmaktadır [90]. Bu yöntemde, düşük sıcaklıktan dolayı (200°C) çarpılma olmadığından dolayı, son hal de işlenmiş malzemeler kaplandığında, mikro yapılarında değişme meydana gelmektedir. Ayrıca, kaplanan malzeme ile kaplama yapılan malzeme, birbirinden bağımsız olarak seçilebilmektedir [69].

Plazma spreyleme işleminin koruyucu bir gaz altında veya su içinde yapılması bir avantaj olarak kabul edilmektedir [91].

4.1.3. Ark Spreyleme Yöntemi

Ark spreyleme, kullanılışı kolay ve termal veya metal spreyleme yöntemlerine göre maliyeti düşüktür. Bu yöntemle üretim, ana malzemelere metal kaplamalarda kullanılmaktadır. Tel formundaki herhangi bir elektrik iletken malzeme, ark spreyleme yöntemiyle kaplanabilmektedir [92]. Bu işlemde iki adet sürekli tüketilebilir tel kullanılmaktadır. Teller atomlaştırıcı meme önündeki bir noktada otomatik olarak beslenmektedir. Ark, eritilecek iki tel arasına yerleştirilmektedir. Atomlaştırma memesi, parçacıkların alt tabaka üzerine yönlendiren gaz buharını erime bölgesine doğru hızlı bir şekilde yönlendirmektedir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Ark sprej tabancası [93].

Ark spreyleme düzeneği, DC güç kaynağı, iki tel besleyici, sprej tabancası ve sıkıştırılmış hava için bir dağıtıcı sistemi kapsamaktadır. Güç kaynağı 18 - 40 Volt'a kadar dağıtma kapasitesine sahip olmalıdır. Tipik olarak, ark dengesinin kalıcı olması için voltaj mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. Çünkü voltaj arttırıldığında, parçacık boyutu da artmaktadır [94].

Ark spreyleme için temel uygulama, çelik yapıların korunmasıdır. Örneğin bu yapılar, atmosfer ve deniz korozyonundan etkilenen köprüler ve sahile yakın platformlardaki çelik yapılardır. Yıllardır bu yapılarda çinko, temel kaplama olarak kullanılmıştır. Fakat çelik yapıların asidik sanayi atmosferleri ve kirliliğe karşı korunması gerektiğinde, özellikle alüminyum kullanılmaktadır. Ark spreyleme düşük karbonlu çelik, %13 kromlu çelik ve alüminyum bronzları gibi malzemelerle, eskimiş miller, yataklar ve muyluların doldurulmasında kullanılmaktadır [77].

Ark spreyleme işlemi, aşınma ve korozyona karşı alt tabakayı korumak için çeşitli endüstriyel uygulamalarında kullanıldığından dolayı, kaplamanın verimi, kaplamada oluşturulan gözenek seviyesi ve alt tabaka ile kaplama arasındaki bağ kuvvetiyle ilişkilidir.

Kaplamalarda diğer önemli bir özellik, yüzeyinin pürüzlülük derecesidir. Örneğin, düz bir yüzeyin üretilmesi, sonraki işlemeyi azaltmak için her zaman tercih

edilmektedir. Fakat pürüzlü yüzeye, kaymayı önlemek veya yüzeyler arası sürtünmeyle gücü iletmek için ihtiyaç duyulmaktadır [95].

Gözeneklilik, katılaşılan parçacıklar arasındaki boşluklar doldurulmadığında ve kaplama içine yerleştiğinde meydana gelmektedir. Gözeneklilik, yüksek hızda küçük damlacıklar üreten şartlar kullanılarak minimize edilmektedir [96].

Ark spreyleme ile üretilen kaplamalar yüksek seviyede gözenek içermekte ve bu nedenle de, alt tabaka ile düşük bağ kuvvetine sahiptirler. Gözenek, korozyon akışkanlarının kaplama geçmesine izin verdiği ve böylece alt tabakayı koruma yeteneğini azalttığı için zararlıdır. Düşük bağ dayanımına sahip kaplamalar, servis şartlarına bağlı olarak zamanından önce deformasyona uğradığında tabaka tabaka ayrılmaktadır. Bundan dolayı, ark spreyleme işlemi genellikle yüksek gözenek seviyesinin kabul edilebildiği, istenmeyen kaplama hatalarının ciddi hasara neden olmadığı ve hasara uğramış kaplamaların kolaylıkla değiştirilebileceği yerlerdeki uygulamalarda tercih edilmektedir.

Ark spreyleme işlemi, kaplamanın karakteristiğini belirleyecek birçok anahtar parametreye sahiptir. 1991 yılında Mohammed Amin [95] tarafından yapılan çalışmada, ark akımı, ark voltajı, hava basıncı ve püskürtme mesafesi etkileri yumuşak çelik üzerindeki alüminyum-silikon kaplamaların yüzey pürüzlülüğü ve gözenek seviyesi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, yüzey pürüzlülüğünün, ark akımı ve ark voltajındaki değişimlere karşı hassas olmadığı, fakat hava basıncı veya ara mesafe artarken, hassasiyetin lineer olarak azaldığı görülmüştür. Kaplamaları en düşük gözenekle biriktirmek için, ara mesafenin 150 mm'yi geçmemesi, hava basıncının artmasıyla gözenekliliğin lineer olarak azaldığı, sıfır gözenek için önerilen 5 bar basıncın yaklaşık 7 bar'a çıkarılması gereklidir, minimum gözenekli kaplamalar elde etmek için, optimum ark voltajının 27,5 volt olması gerektiği belirlenmiştir [95].

Ark spreyleme işleminde, MİG ve TİG kaynağı için yaygın olarak kullanılan katı teller kullanılmaktadır. Ark spreyleme kaplamalarının kullanıldığı çok sayıda mühendislik uygulamaları mevcuttur. Altlığın istenilen şekilde hazırlanmış olduğu kabul edilerek,

kaplama kalitesi, boyutu, sıcaklık ve hızı, sprey parçacık karakteristikleri ile ilişkilidir. Bu karakteristikler, püskürtme mesafesi, tel besleme hızı (veya akımı), ark voltajı ve atomize hava basıncını kapsayan, sprey işlem parametrelerine bağlıdır. Parçacık karakteristiklerinin üzerine kaplanabildiği, kaplama yapılan malzemesinin etkisi önemsiz olarak kabul edilmektedir.

1992 yılında yapılan başkibir çalışmada, düşük karbonlu çelikler üzerinde yapılmış ark spreylemenin, korozyona direnç gösteren uygulamalar için alüminyum veya çinkonun dış ortamlarda kalan çelik yapıların yüksek depolama hızında kaplanmasında yaygın olarak kullanılabilir olduğu, en önemli kaplama karakteristiğinin bağ dayana olduğu, spreyleneş kaplamanın altlığa yapışması, kaplamanın, kaplama yapılan malzemededen kalkmasını önlemek için genellikle oksidasyon seviyesi ve kaplama içindeki artık gerilmelerin minimize edilerek sağlandığı ve minimum gözeneklilik için optimum spreyleme parametreleri minimum yüzey pürüzlülüğü için gerekli olan parametrelere eşdeğerdir [96].

Arklı püskürtme yönteminde yapılan yeni geliştirmeler, yöntemin vakum veya koruyucu gaz atmosferinde refrakter metal tabakaların elde edilmesinde de kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Arklı püskürtme birçok yerde kullanılmasına rağmen, belli başlı kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir: [85,86,91].

- Aşınan parçaların (millerin) doldurulmasında,
- Üretilen parçalardaki ölçü düşüklüklerinin tamamlanmasında,
- Döküm parçaların üzerindeki, hatalarının giderilmesinde,
- Aşınma ve korozyona dayanıklı yüzeylerin elde edilmesinde
- Atmosferik tesirlere karşı yüzeylerin korunmasında, yüzeylere ince bir tabaka halinde çinko, alüminyum, kurşun ve kalay püskürtmektedir.

4.1.4. Detonasyon Alev Spreyleme

Detonasyon alev spreyleme, özel olarak tasarlanmış bir tabanca ile yapılmaktadır. Tabancada, oksijen, asetilen ve azot içinde asılı olan tozlaştırılmış kaplama malzemesinin enjeksiyon miktarlarının ölçüldüğü bir hücre bulunmaktadır.

Oksi-asetilen karışımı, saniyede birkaç kez elektrik kıvılcımı ile patlatılmaktadır. Bu detonasyon sıcak, yüksek hızlı bir gaz akışına neden olmaktadır. Bu işlem yapılırken önce tozu plastik durumuna ısıtılmakta, daha sonra parçacıklar tabanca namlusundan yaklaşık olarak 2500 ft/sn (1 ft = 30,48 cm) hıza ivmelendirilmektedir. Ergimiş parçacıklar, iş parçasının yüzeyine çarparak, istenilen kalınlık için biriktirme işlemini sağlamaktadır [80].

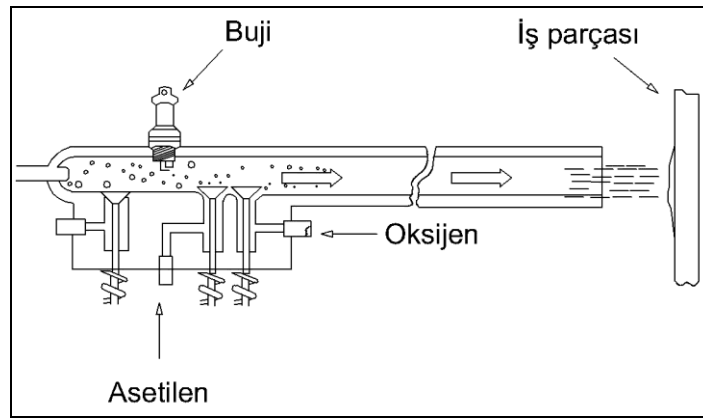
Detonasyon yöntemiyle spreyleme işleminde, kinetik enerji kontrollü bir patlama oluşmaktadır. Bu amaçla toz halindeki ilave metal, boru biçimindeki bir reaksiyon odasına sevk edilmekte ve asetilen ve oksijenle karıştırılmaktadır. Oluşan karışım, elektriksel olarak ateşlenmektedir. Oluşan patlamayla açığa çıkan enerji, toz kabarcıklarını eriterek yüksek hızlara çıkarmaktadır. Bu yüksek kinetik enerji, parçacıkların kaplanan yüzeye çarpmaları sırasında kısmen ısıya dönüşmektedir. Böylece parça yüzeyi ile çarpan damlacıklar arasında mikrokaynak olayı gerçekleşmektedir. Patlamalı püskürtme yönteminde, saniyede 4 ila 8 püskürtme olayı gerçekleşmektedir. Her patlamadan sonra yanma atıklarının uzaklaştırılması için, reaksiyon odası azotla süpürülmektedir. Detonasyon püskürtmede, tane büyüklükleri tam olarak modife edilmiş (tane büyüklüğü 5 µm ila 60 µm) tozlar kullanılmaktadır.

Detonasyon yöntemiyle püskürtme, yüksek sıcaklık kaplamaları için kullanılan püskürtme yöntemidir. Detonasyon tabancasına veya plazma torcuna ek olarak, başarılı bir kaplama uygulamak ve kontrolü sağlamak için (doğru akım güç kaynağı, kontrol paneli, ön ısıtıcı, basınç ölçer, su soğutucu gibi) başka teçhizatlar da kullanılmaktadır [91].

Detonasyon spreyli biriktirmelerin yüksek bağ bütünlüğü, parçacıkların altlığa yüksek hızla çarpmasıyla meydana gelmektedir. Parçacıkların hızı, plazma veya toz alev spreyleme tabancasından 2,5-5 kez daha hızlıdır. Kinetik enerji, hızın karesinin fonksiyonu olduğundan dolayı, detonasyon alev spreyleme tabancasından çıkan parçacıklar alev spreyleme tabancasından çıkan parçacıklardan en az 25 kat daha büyük bir enerji ile yüzeye çarpmaktadır. Sonuç olarak, sadece % 0,25-1 gözeneklilik aralığına sahip kaplamalar yaygın olarak bu ekipmanla gerçekleştirilmektedir.

Spreyleme işlemi, hızlı detonasyonlar dizisi olduğundan dolayı, gürültü düzeyi oldukça yüksektir. Bundan dolayı spreyleme işlemi özel olarak yapılmış bir uygulama odasında yapılmaktadır [80].

Detonasyon tabanca işlemi, çoğunlukla merdanelerin termal spreyle kaplanmalarında kullanılmaktadır. Detonasyon tabancası, yaklaşık olarak 1 inç çapında ve birkaç fit uzunluğunda su soğutmalı namludan oluşmaktadır. Şekil 4.6'da patlamalı püskürtme yöntemi şematikolarak gösterilmektedir.



Şekil 4.6. Detonasyon (Patlamalı) püskürtme yönteminin şematik gösterimi [97].

Bu işlemde dikkatli bir şekilde ölçülen gazlar (oksijen ve asetilen) toz şarjı ile namluya gönderilmektedir. Buji, gazı ateşledikten sonra, toz namludan aşağıya doğru hareket ederken ısınarak ve ivmelenmektedir. Yeterli bir mesafede gaz içindeki tozun köpük saçması, süpersonik hıza (760 m/sn) ivmelenmesine neden olmaktadır [70].

Geleneksel olarak detonasyon, kaplamanın patlaması ya da dairesel biriktirme ile sonuçlanmaktadır. Bir yüzey üzerindeki kaplama biriktirmesi, patlayan tabakaların birkaçının üst üste gelmesi ile meydana gelmektedir. Otomatik olarak patlamaların yerleşmesi, kararlı bir kalınlık ve düzgün bir yüzey oluşumu sağlamaktadır. Bu işlemle üretilen kaplamalar, diğer detonasyon tabanca işlemi ile karşılaştırıldığında, daha düşük gözeneklilik, daha yüksek bağ dayanımı ve geliştirilmiş aşınma direncine sahiptirler. Gelişmiş kaplamaların, daha iyi yoğunluğa sahip olmasından dolayı, geniş kaplanmış merdaneler üzerinde 0,025 μm 'dan küçük (ayna gibi) yüzeyler elde etmek mümkündür [70].

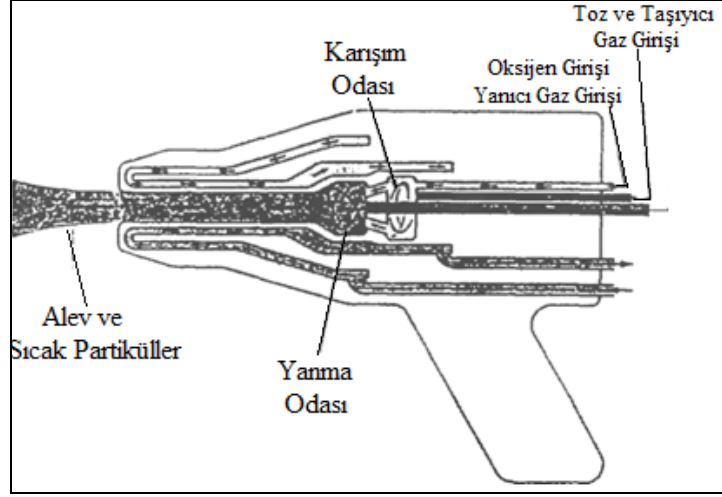
Bu işlem ile yüzey sertliği 50-60 HRC'den daha yüksek sertliğe sahip tüm malzemeler kaplanabilmektedir. Fakat metalik olmayan malzemeler bu yöntem ile kaplanamazlar. Çünkü, yüksek hızdaki gaz akışı, yüksek erozyona neden olmaktadır [69].

Patlamalı püskürtme yöntemi, ana malzemenin özelliklerini kaplama sırasında değiştirmektedir. Presizyon parçalarının çarpılma, veya fiziksel değişimi, soğutucu sıvı karbondioksit püskürtmesi ile iş parçasında sıcaklığı aşağıda tuttuğuna göre az olur. Her ne kadar tabancada sıcaklıklar 3315°C'in üstünde iseler de, kaplanan parçaların sıcaklığı 150 °C'nin altında kalır [90].

4.1.5. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Spreyleme (HVOF)

Yüksek hızlı oksiyakıt spreyleme (High Velocity Oxyfuel), ısıl spreyleme katılımı içinde artan bir uygulama alanıdır. Çünkü bu yöntemle yoğun şekilde, iyi bağlanmış kaplamaları üretmek mümkündür. Son zamanlarda plazma spreylemiş çok sayıda malzeme, HVOF alev spreyleme tabancaları ile spreylemektedir [98].

Termal spreyleme grubundaki son pekişme yüksek hızlı oksiyakıt spreyleme yöntemidir. Yüksek hızlı oksiyakıt spreyleme, geleneksel alev spreylemeden farklıdır. Bu işlemde yanma işlemi dahilidir ve gaz akış oranları ile dağıtma basınçları atmosferik yanma alev spreyleme işleminden daha yüksektir. Yüksek yakıtlı gaz ve oksijen akışı hızlıdır. Yanma odasındaki yüksek basınç, karakteristik şok elmasları ile süpersonik alev üretimini sağlamaktadır. 2000 m/sn'lik alev hızları ve 600-800 m/sn'lik parçacık hızına sahiptir. Propilen, propan, hidrojen ve asetileninde içinde olduğu, bir gaz yakıt aralığı kullanılmaktadır. HVOF sisteminde yakıt tipine ve akış oranına bağlı olarak, 100 kW'tan büyük bir güç yanma odası içinde üretilmektedir. Temelde çok basit olmasına rağmen toz besleme konumu, gaz akış oranı ve oksijen/yakıt oranı gibi, önemli potansiyel özelliklere sahiptir [75,77]. Şekil 4.7'de, yüksek hızlı oksiyakıt spreyleme tabancası görülmektedir.



Şekil 4.7. Yüksek hızlı oksji-yakıt (HVOF) spreyleme tabancası [76].

HVOF spreylemede, yakıt olarak hidrojen kullanımı ile hava plazmayla spreyleneş alümina'ya göre, aşınma performansı yüksek kaliteli alümina kaplamalar üretilmektedir. HVOF işlemlerinin bazı farklı uygulamaları, olarak kullanılmaktadır. Bu işlemlerin tasarımında bazı farklılıklar olmasına rağmen, temel prensiplere dayanmaktadır [72].

HVOF sistemleri yaygın olarak yüksek ergime noktalı malzemelerin spreyleneşmesinde kullanılmaktadır. Örneğın, Al_2O_3 kaplamalarda, yanma odasındaki toz besleme sırasında parçacıkların ısı transferi maksimum seviyededir.

Malzemelerin ergime noktaları aralığının genişliğı, toz boyutu ve yanma odası uzunluğunun belirlenmesinde önemlidir. Genel olarak, yüksek ergime noktalı seramik malzemeler, ince toz boyutuna (5-15 μm) sahiptir ve bu nedenle parçacıkları yumuşatmak için, daha uzun yanma odası gereklidir. HVOF kaplamaları, geleneksel spreyleme işleminin en yüksek bağ dayanımı > 70 MPa, en düşük gözeneklilik < %1 ve en düşük oksit içeriğı %1-%5'dir. HVOF spreyleme uygulamaları, hava motoru ve uçak parçaları, engel supapları ve mühendislik parçalarının (aşınma plakaları vb.) kaplamasında kullanılmaktadır [75].

HVOF işleminde, parçacıkların tabancadan altlığa çarpma anına kadar olan hareketi süresince ulaştıkları sıcaklık, özel HVOF ekipmanına, yakıt gazına ve kullanılan spreyleme şartlarına bağlıdır [72].

Ticari olarak HVOF yöntemi, aşınma ve boyut kararlılığı açısından emniyetli bir teknolojidir. HVOF spreyleme, uzay ve havacılık sanayinde, jet motorlarının parçaları üzerine astar kaplamalarda tercih edilmektedir.

Yüksek bağ mukavemeti, hemen hemen gözeneksiz yapısı ve düşük gerilimli olması gibi nedenlerden dolayı, HVOF teknolojisinin kullanımı artmaktadır. Bu durum, şirketleri pahalı olmayan, dayanıklı ve HVOF parçalarıyla mukayese edilebilir alternatif malzemelere yönlendirmektedir [99].

4.1.6. Alev Spreyleme

4.1.6.1. Alev Spreyleme İşleminin Prensibi

Metal püskürtmede esas, erimiş haldeki metalin, bir yüzeye püskürtülerek, yüzeyde tabaka oluşturulmasıdır. Bir metal veya alaşım, alev veya elektrik arkı ile ergitildikten sonra, basınçlı hava ile küçük parçacıklar halinde püskürtülmektedir. Bu püskürtülen metal, daha önce hazırlanan yüzeyde tutunarak bir tabakası meydana getirilmektedir. Günümüzde, sanayinin çeşitli kollarında ve çeşitli amaçlar için hem üretimde hem de onarımda kullanılmaktadır.

İlk defa 1910 yılında gazlı (alevle) püskürtme tabancasını bulunmuştur. İkinci Dünya Savaşından sonra Sovyetler Birliği ve Çekoslovakya'da, arklı püskürtme konusunda çalışmalar yapılmıştır. Günümüzde, bu yöntemler geliştirilerek çeşitli endüstri kollarında kullanım alanı bulmuştur [87].

Termal spreyleme işlemlerinin en basit ve en ucuzu olan alevle spreyleme de hem tel hem de toz teknikleri uygulanabilmektedir. Bu işlemde asetilen ve propan içeren yakıt gazları kullanılmaktadır. Fakat düşük basınç ve düşük akış oranı, parçacıkları da düşük hızlı (40 m/sn) olmasına neden olmaktadır. Bundan dolayı kaplamalar, daha

gözenekli ve bağ gücü de zayıftır. Sistemlerin uygulanması çok basit ve elle kullanılabilir [77].

Alev spreylemede, tüketilebilir tel veya toz, oksijen-yakıt alevi ile ergitilmektedir. Tel, kendi ucunu eriten alevin içine kontrollü bir hızda yönlendirilmektedir. Sıkıştırılmış hava, alt tabaka üzerindeki sıvı ya da yarı sıvı parçacıkları ivmelendiren nozulun dış çevresine doğru beslenmektedir. Hava, gaz akışları ve basınçlar, tel çapı ile birlikte, tel besleme hızını ve kaplama özelliklerini de etkilemektedir. Modern donanımlarda, bütün bu parametreler kontrol edilmekte ve özel kaplamalar yapılabilmektedir [100].

Alev spreyleme yönteminde, çubuk ya da toz halindeki kaplama malzemesini ısıtmak için, 3300 °C sıcaklığa sahip oksijen-asetilen alevi kullanılmaktadır. Sıkıştırılmış hava ile birlikte seramik toz malzeme üzerine 200 m/sn hızla gönderilmektedir. Düşük spreyleme hızları ve düşük sıcaklıktan dolayı sadece daha düşük ergime noktalı oksit seramikleri depolanabilmektedir. Kaplamalar genellikle diğer işlemler uygulanarak kullanılanlardan daha yüksek gözeneye, daha zayıf kaliteye ve daha düşük yapışma direncine sahiptirler. Dezavantajlarına karşılık işlem, oksit seramik kaplamaların spreylemesi için kurulu bir yöntem olmuştur ve düşük maliyet ile yüksek kumanda edilebilirliğe sahip bir yöntemdir [81,97].

Alev spreyleme ile yüzey metalinin ergitilmesi için gerekli ısı, oksijen ve yakıt gazının kombinasyonunu ile üretildiğinden dolayı, bu işlemde yakıt gazı olarak asetilen, MPS, propan, hidrojen ve doğal gaz kullanılmaktadır. Asetilen yüksek ısı üretme kapasitesinden dolayı sık kullanılır fakat, daha ekonomik olduğu için düşük sıcaklık yakıt gazları da bu işlemde kullanılabilir. Yakıt gazı alt tabaka üzerine yüzey malzemesini yönlendirmek için değil, sadece yanma için kullanılmaktadır [93].

4.1.6.2. Alev Püskürtme Cihazı

Alev spreyleme işleminde kullanılan tabanca tasarımı, spreylenen malzemenin tipine ve fiziksel özelliğine bağlıdır. Tabanca otomatik olduğunda ya da iş parçasına veya her ikisi birden istenilen biriktirme kullanılmaktadır [80].

Bir alevle püskürtme cihazının üç önemli fonksiyonu vardır.

Bunlar;

- Püskürtülecek malzemenin transferi (püskürtülecek telin sarılı olduğu bobinden itibaren cihazdan geçerek eriyinceye kadar takip ettiği yol).
- Telin bir yanıcı gaz-oksijen aleviyle eritilmesi.
- Ergimiş telin püskürtülecek metale transferi.

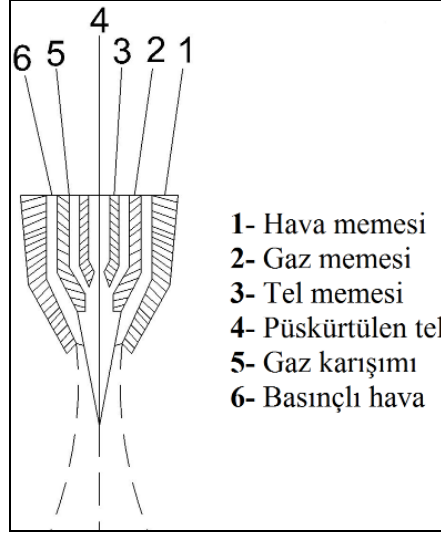
Bu üç esasa göre, alevle püskürtme cihazlarının konstrüksiyon tarzı da değişmektedir. Tahrik sistemi, nozul sistemi ve ventil sistemi olmak üzere, her alevle püskürtme cihazında üç ana kısım mevcuttur [85,87,91].

Tahrik Sistemi

Sistem, telin çeşitli hızlarda sevk edilmesini sağlamaktadır. Kademesiz ayarlanabilmesi, tespit edilen devir sayısını koruyabilmesi, hafif ve emniyetli olması istenmektedir. Tahrik sistemi, elektrik motorları veya basınçlı hava yardımı ile çalışmaktadır.

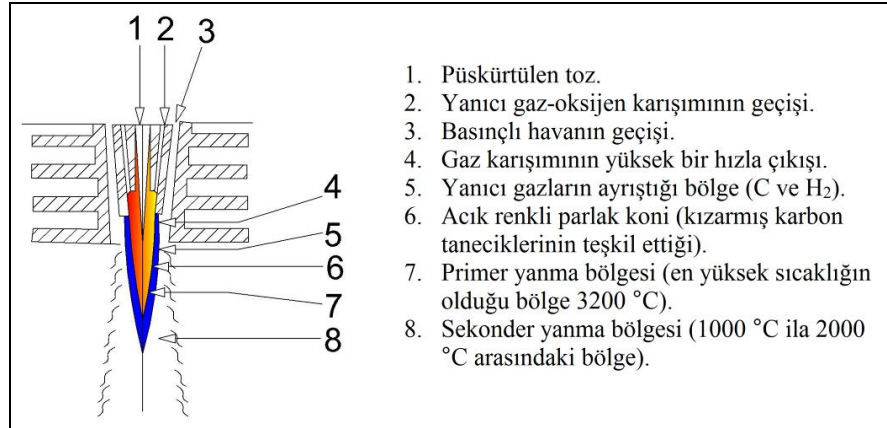
Meme Sistemi

Şekil 4.8'de bir alevli püskürtme memesi görülmektedir. Tel, meme sisteminin simetri eksenini boyunca ilerlemektedir. Telin etrafındaki kanaldan, oksijen- yanıcı gaz karışımı tele sürünerek çıkmaktadır. Bunun etrafındaki kanaldan da, püskürtme veya nakil işlemi yapacak olan gaz dışarıya püskürtülür. Meme içerisindeki gaz karışımını temin eden kısmı, ilk uygulamalarda eş basıncı olarak kullanılmaktaydı. Fakat bu sistemde gaz karışım oranlarının zaman zaman değişmesi ve geri tepmelerin meydana gelmesi nedeniyle, enjektörlü sistemler geliştirilmiştir [91].



Şekil 4.8. Bir meme sisteminin şematik olarak gösterilişi [91].

Yanıcı gaz-oksijen alevinde püskürtülen telin erimesi için rölatif olarak yüksek bir alev sıcaklığına ihtiyaç vardır. Bu da ancak, oksijen-yanıcı gaz aleviyle sağlanabilmektedir. En fazla kullanılan yanıcı gazlar, asetilen ve propandır. Asetilenin oksijenle oluşturduğu alevin sıcaklığı 3200 °C ve propanın ise 2800 °C'dir. Korozyona karşı daha ziyade ergime derecesi düşük olan metaller söz konusu olduğunda, propan gazı kullanılmaktadır. Fakat yüksek derecede ergiyen metallerin püskürtülmesinde asetilenin kullanılması gerekir. Bir oksi-asetilen alevinin yanma kademeleri Şekil 4.9'da verilmiştir. Burada oksi-asetilen kaynak alevi ile arasında belirgin bir fark yoktur. Fark, yanmanın yüksek çıkış hızlı bir hava demeti içerisinde olması ve yüksek bir ısı gücüne sahip olmasıdır [87].

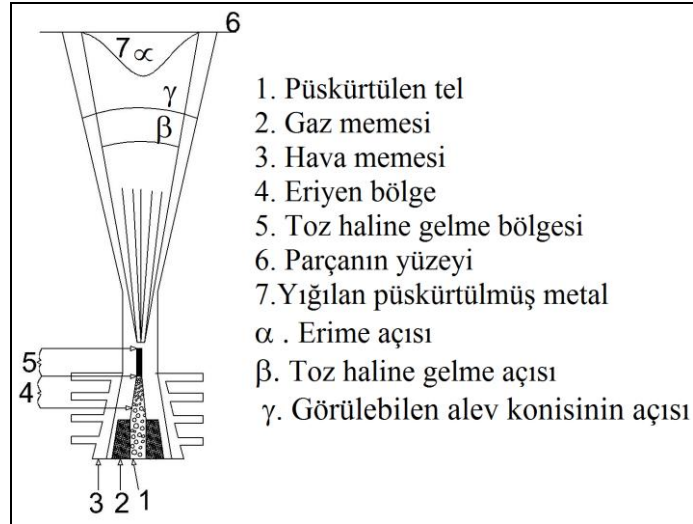


Şekil 4.9. Bir alevle püskürtme cihazında yanma kademeleri [91].

Bir alevle püskürtme cihazında yanma kademeleri şunlardır [85].

- Püskürtülen toz
- Yanıcı gaz-oksijen karışımının geçişi
- Basınçlı havanın geçişi
- Gaz karışımının yüksek bir hızla çıkışı
- Yanıcı gazların ayrıştığı bölge (C ve H₂)
- Acık renkli parlak koni (kızarmış karbon taneciklerinin teşkil ettiği)
- Primer yanma bölgesi (en yüksek sıcaklığın olduğu bölge 3200 °C)
- Sekonder yanma bölgesi (1000 °C ila 2000 °C arasındaki bölge)

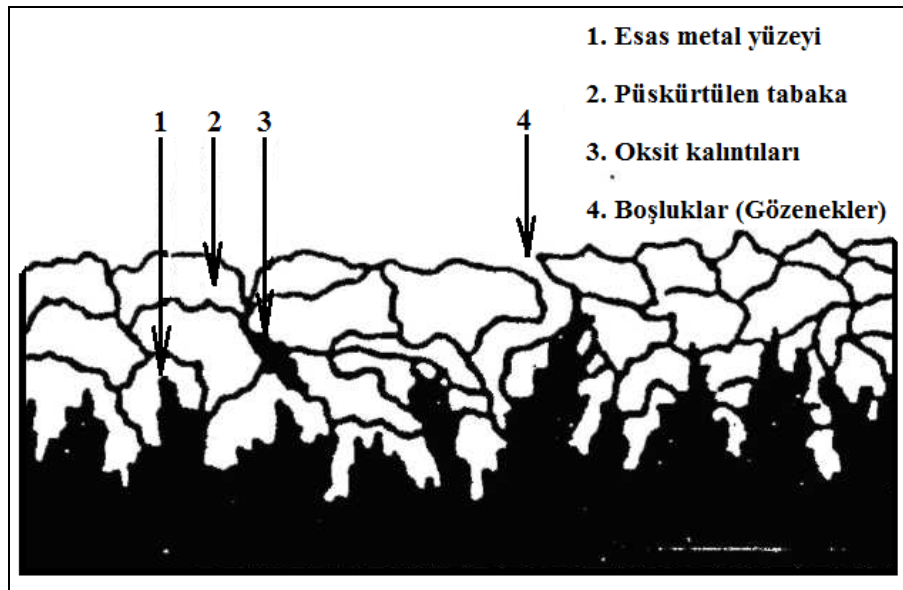
Şekil 4.10'da püskürtme memesinin ucu ile parça arasındaki işlem görülmektedir. Ergime (a) ve toz haline gelme (β) açısı küçüldükçe ergime ve yığılma derecesi (verim) artmaktadır. Yüksek yığılma derecesi, aynı zamanda düşük özgül gaz sarfiyatına tekabül etmektedir. Yığılma derecesi, püskürtülen esas metal üzerine yığılan metal veya telin ağırlığıdır. Bu uygulamada da dikkat edilmeyen bir faktördür. Çinkonun yığılma derecesi, diğer metallere nazaran çok düşüktür (%60 - %85 arasında).



Şekil 4.10. Püskürtme nozulu ile parça arasındaki olayın şematik gösterimi [87].

Yığılma derecesi, toz haline gelme açısı genişledikçe, azalmaktadır. Bunun için dar açık bir püskürtme demetinin sağlanması gereklidir. Örneğin, geniş toz haline gelme açısı, daha ziyade boya püskürtme tabancalarında kullanılmaktadır ve ekonomik değildir. Diğer taraftan ince taneli bir püskürtme tabakası, düşük yığılma derecelerinde sağlanmaktadır. Telden püskürtülen taneciklerin boyutu 50 µm - 200 µm, arasındadır ve püskürtme basıncına ve ısı gücünün nispetine (püskürtme gücü) bağlıdır. Alevin ayarı aynı kalmak şartıyla, telin ilerleme hızı azaldığı takdirde tane boyutlarının küçüldüğü görülmüştür [87,91].

Telden hemen ayrılan taneciklerin sıcaklığı, ergime derecelerinden yaklaşık 10 °C daha yüksektir ve ortalama 160 m/sn'lik bir hızla parçaya çarpmaktadır. Parçaya çarpan taneciklerin sıcaklığı da, ergime derecesine yakındır ve henüz plastik haldedir. 140-160 m/sn hızla kaplanacak malzemeye çarpan tanecikler, pul şeklinde deforme olmaktadır. Böylece parçacıklar esas metalin küçük boşluklarına kadar dolmaktadır (Şekil 4.11). Parçacıklar başlangıçta oda sıcaklığında olan ana metal ile temas etmeleri ve püskürtme havasının da soğutucu tesiri dolayısıyla çabuk soğumaktadır. Alevle püskürtmede ana metalin yüzeyinde sıcaklık 100 °C'nin altındadır ve sıcaklık 40-80 °C arasında değişmektedir [87].



Şekil 4.11. Metal püskürtme tabakasının yapısı [85].

4.1.6.3. Kaplama Özellikleri

Alev spreyci kaplamalarda yaklaşık 50 µm birkaç mm'ye kadara kalınlıklar elde edilmektedir. İhtiyaç duyulan kaplama kalınlığı, uygun kaplamanın seçiminde önemlidir. Alev spreyleme, yıpranmış parçaların onarımı, yüksek sıcaklık ve ortam sıcaklığında korozyonu önlemek için kullanılabilmesine rağmen, bu işlemin amacı aşınmaya, erozyona veya aşındırmaya karşı dirençli malzemelerden üretilmektedir. Püskürtme sırasında, sıcaklık nedeniyle yağ kusabilecek parçalar, önce, trikloretilen veya benzeri maddeler ile yıkanmalı ve ardından kumlanmalıdır [100]. Oksi-asetilen işleminde spreylenen termal bariyer kaplamalar özel önem kazanmıştır. Bu tür seramik/metalik kaplamalar gaz türbin motorlarında, metal işleme sıcaklıklarını ve yanma çemberleri, aktarma boruları ve yakıcı kaplamalardan sonraki termal geçicilerin etkilerini azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Genelde, termal bariyer kaplamaların da beklenen özellikler şunlardır.

- Düşük termal iletkenlik,
- Kaplama ve alt tabaka arasındaki metalik ve seramik elemanlarının termal genişleme karakteristiklerinin yakın uyumu,
- Çatlama sonucu oluşan konsantre mekaniksel gerilimlere karşı direnç ve kaplamanın kaybını kolaylaştırmak,
- Termal kristal yapısının uygun stabilizasyonu,
- Yüksek yansıtıcılık,
- Kaplamanın metalik elemanlarının sıcak korozyon ve maksimum oksitlenme direnci,
- İmalat sırasında ve arazi servis işletiminden sonraki gözden geçirmelerde tamir edilebilirlik.

Magnezyum kaplanmış çinko oksite dayalı çeşitli alev spreylenmiş seramik/metalik termal bariyer kaplama sistemleri, son yıllarda başarıyla uygulanmaktadır. Günümüzde, daha yüksek gaz türbin performansı için artan gereksinimler, termal bariyer kaplamaların geliştirilmesini sağlamaktadır. İki yada üç katmanlı alev spreyleme sistemleri, artan ihtiyaçları kalite açısından karşılayamaz, fakat sürekli

bölümlenmiş plazma spreylili kaplamalar, iyileştirilmiş performansı ve fazla kaplama dayanımı gösterirler [101].

Alev spreyleme, diğer spreyleme işlemlerindeki gibi bir soğuk işlem olarak kabul edilmektedir. Bu işlemde kaplama yapılan malzeme, sınırlı bir sıcaklık yükselmesine neden olmaktadır. Bu sıcaklık yükselmesi yaklaşık olarak 200 °C'dir.

Alev spreyleme yöntemi, aynı zamanda kendi kendine akış yapan (self-fluxing) sistemleri depolamak, 950 °C ile 1150 °C arasındaki sıcaklıklara yükseltmek için kullanılmaktadır. Baz alaşımların grup bu işlemde biriktirilebilmektedir. Ayrıca, bu alaşımlara kendi kendilerine flax yapan alaşımlar da denilmektedir [81].

4.1.6.4. Alev Spreyleme Yöntemleri

Alev spreyleme yöntemleri püskürtülen ilave metalin konumuna bağlı olarak sınıflandırılırlar [91].

Bunlar;

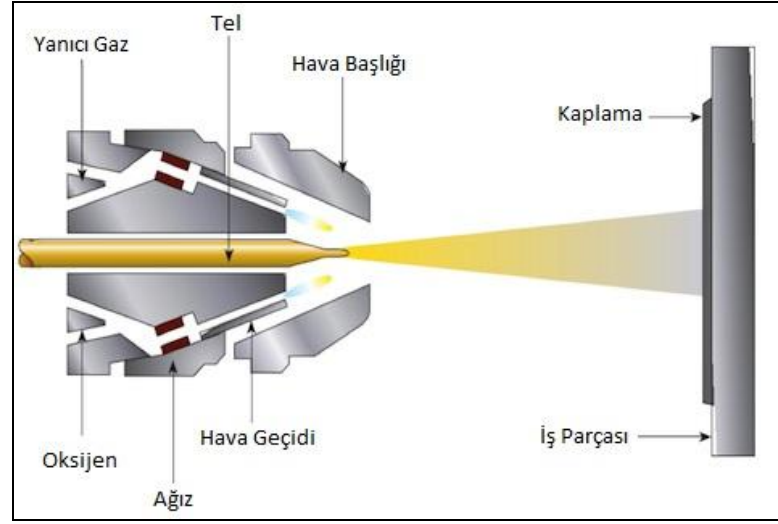
- Tel alev spreyleme
- Toz alev spreyleme

Tel Alev Spreyleme

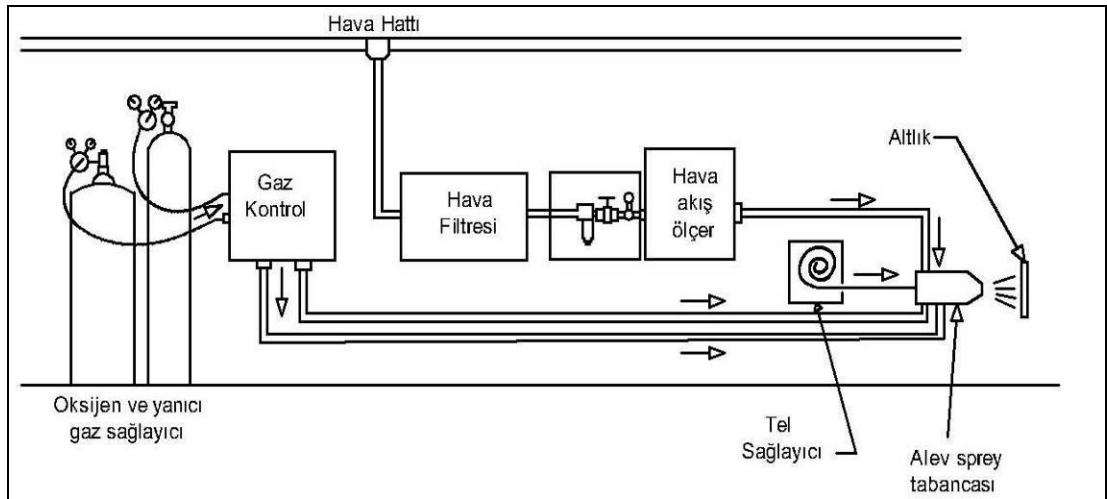
Tel alev spreyleme ile, biriktirilecek metal tel makara veya halkadan tabancaya (sürekli bir şekilde) gönderilmektedir. Bazı durumlarda ise kesilmiş metal çubuklar kullanılmaktadır [80]. Tipik bir tel alev spreyleme düzeneği;

- Alev spreyleme tabancası,
- Malzeme yüzey kaynağı ve besleme aletine bağlantısı,
- Oksijen ve yakıcı gaz gereçleri, basınç manometresi ve flovmetre,
- Gerekliğinde sıkıştırılmış hava kaynağı ve kontrol ünitesi,
- İş parçasını tutma aletinde oluşmaktadır.

Tipik tel alev spreyleme tabanca sistemi Şekil 4.12'de görülmektedir.



Şekil 4.12. Tel alev püskürtme tabancasının şematik görünümü [80].



Şekil 4.13. Tel alev püskürtme sisteminin şeması [90].

Şekil 4.13'de Tel alev püskürtmenin şeması görülmektedir. Tel kullanılan tabanca temel olarak iki parçadan oluşmaktadır. Bunlar; teli besleyen sürme ünitesi ve sıkıştırılmış hava, diğeri oksijen ve yakıt gazının akışını kontrol eden gaz başlığıdır. Bütün tel kullanılan tabancaların çalışma prensipleri birbirine çok benzerdir. Tel sürme ünitesi, motor ve sürme çubuklarını kapsamaktadır. Hız kontrolleri, güç tipine bağlı olarak mekanik, elektromekanik, elektronik pnömatik olabilmektedir.

Toz alev spreyleme işlemine göre telden alev spreyleme, daha ekonomiktir. Telalev spreyleme endüstrinin çeşitli alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bununla beraber, işlemin uygun tel formunda üretilen ve ayrıca yanma alevinde eritilebilen malzemelerle sınırlandırıldığına dikkat edilmelidir [102]. Bu sistem gaz başlığı, yakıt gazı, oksijen ve sıkıştırılmış havayı kontrol etmek için vanalar, gaz memesi ve hava kapağından meydana gelmektedir. Tel numunedeki merkezi orifise doğru beslenir.

Seramik Çubuk Alev Spreyleme

Seramik çubuk alev spreyleme, tel alev spreylemeye benzemektedir. Seramik çubuğun doğrusal uzunlukları, tabancadaki plastik silindirlerle sürülecek alev içine beslenmektedir. Seramik malzeme alevde eritildikten sonra atomize edilmektedir. Yapışan sıvı parçacıklar alt tabakaya çarparak, yoğun ve yapışık birikinti oluşturmaktadır. Seramik birikinti ve alt tabaka arasındaki bağ teması mekaniktir. İşlem sırasında sıvı parçacıklar deforme olarak, hazırlanan yüzeyin şeklini alırlar. Uygun yüzey hazırlama, sıkıca bağlanmış birikinti için ön koşuldur.

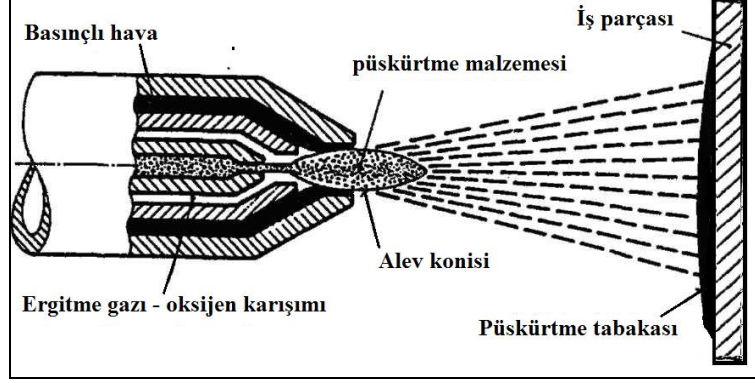
Seramik çubuk spreyleme donanımı (tabancadaki silindirleri sürmek için tel besleme ünitesi yerini alan bir mekanizma hariç), tel spreyleme donanımı ile benzerdir. Gaz memesi, hava kapağı ve besleme sisteminin tasarımı ise farklıdır. Metallerle göre seramiklerin yüksek ergime noktasına ve daha düşük termal iletkenliklere sahip olmasından dolayı bu donanım, tel spreyleme donanımına göre (spreyleme değişkenlerini ayarlamada) daha fazla dikkat gerektirmektedir [80].

Toz Alev Spreyleme

Bu metotla, spreylenecek kaplama malzemesi, tabancaya toz halde gönderilmektedir. Toz, aleve hava besleme sistemi, oksijen akıntısı veya çekim kuvveti (ağırlık) ile taşınmaktadır. Toz, alev tarafından emilerek sıkıştırılmış hava jeti veya yanma gazlarıyla birlikte alt tabaka üzerine gönderilmektedir [80].

Toz alev spreyleme donanımı daha basit ve plazma spreyleme donanımından daha ucuzdur. Bununla beraber, alevle spreylemeyle spreyleme hızı daha düşüktür. Donanım

kolay taşınacak şekilde tasarlanmalıdır. Şekil 4.14'de toz alev püskürtme şematik olarak görülmektedir.



Şekil 4.14. Toz alev spreylemenin şematik gösterimi [90].

Metaller, seramikler ve seramik metal karışımları, toz metoduyla alevle spreylenebilmektedir. Bazı malzemelerin yüzeyini işlemek zordur. Bu gibi durumlarda, Ni-Al alaşım tozları bağ mukavemetini arttırıcı bağ tabakası kullanılmaktadır. Bu tozlarla, ekzotermik bir reaksiyon meydana gelmekte ve bağ mukavemeti artmaktadır [103]. Metaller genellikle, aşınma veya korozyon dirençli uygulamalar için kullanılan alaşımlardır. Karbür ve borid'ler gibi çok sert metalik bileşikler, aşınma dirençli kaplama oluşturmak için metal tozlarıyla harmanlanmaktadır. Sprey tozu parçacıklarının ergime derecesi, hem malzemenin ergime noktasına, hem de parçacıkların alev sıcaklığına bırakılma süresine (aynı yerde kalma zamanı olarak adlandırılır) bağlıdır. Düşük ergime noktalı tozlar, tamamıyla sıvı hale gelir ve seramikler gibi yüksek ergime noktalı malzemeler ise parçacık yüzeyinde ergimekte [80].

BÖLÜM 5

KONU İLE İLGİLİ BENZER LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Motor parçaları üzerinde, yüksek çevrim sıcaklıkları, yüksek çevrim kuvvetleri, kayma, erozyon ve korozyon sebebiyle meydana gelebilecek zararları azaltmak için birçok özel teknik geliştirilmiştir. Dökme demir ve diğer konstrüksiyon malzemelerinin temel özellikleri, yanma odasında yükselen sıcaklığı yeterince karşılayamadığından su ile soğutma ve silindir içerisindeki yanmış gazların ısılarını uzaklaştırmak için kalın çeperli yanma odaları ikinci dünya savaşı sonlarına kadar uygulanan teknikler olmuştur. Daha sonraları, cam ve türevleri ile ısı iletkenlikleri düşük malzemelerin denenmesi düşünceleri ortaya çıkmıştır. Cam, düşük genleşme oranı ve düşük maliyeti ile mükemmel bir yalıtım malzemesi olmasına karşın, yeterli mukavemetinin olmayışı yüzünden motorlarda kullanımı uygun olmamıştır. Cam seramik kaplamalarının motor parçalarında kullanımı 1950'li yıllara dayanmaktadır. Bu tarihlerde çok az miktarda da olsa bujilerde seramikler kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık uygulamaları için seramik kaplamalara duyulan ihtiyaç 1960'lı yıllarda artmaya başlamıştır. Özellikle hızla gelişen gaz türbini teknolojisinde metallerin ve değişik alaşımların yüksek sıcaklıklar altındaki çalışmada yetersiz kalması sebebiyle seramik kaplamalar kullanılmaya başlanmıştır. Başlangıçta havacılık ve uzay çalışmalarıyla gelişen bu ileri teknoloji 1970'li yıllardan sonra termal bariyer amaçlı olarak içten yanmalı motorlarda özellikle de dizel motorlarında uygulanmıştır. Bu tür sistemlerin performansının artması ve yakıt tüketimlerinin azalması bu konuya olan ilgiyi daha da arttırmıştır.

Motorlarda ısı kaybını azaltmak ve düşük ısı kayıplı motor haline getirmek için kullanılan termal bariyer kaplamalar ile kaplanmış bileşenlerin aşırı ısı yükü altında bozulmasını da önlemektedir. Termal bariyer amaçlı kaplamalarda ZrO_2 , ısı iletkenliğinin yüksek, ısı genleşme katsayısının düşük olması sebebiyle en çok tercih edilen malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda kullanılan ZrO_2 'in faz dönüşümleri

nedeniyle zarara uğramaması için stabilazörler yardımıyla tamamen veya kısmen stabilleştirme işlemi uygulanır. Bu işlem ile yapının genellikle kübik olmak üzere tek fazdan oluşması sağlanır. Stabilleştirici olarak genellikle MgO, CaO, CeO₂ ve Y₂O₃ gibi oksitler kullanılmaktadır.

Gatowski [104], tek silindirli, doğal emişli bir dizel motor üzerine yaptığı çalışmada, yanma odası elemanlarını, 0,013 mm seramik malzemeyle kaplamıştır. Kaplamalı motorda volümetrik verim standart motora göre %5 düşüş göstermiş ve Ö.Y.T.'de %10 ve NO_x emisyonunda da %23 artış meydana geldiğini söylemiştir.

Leising ve Purohit [105], yalıtımdan istenen sonuçların alınabilmesi için dizel motorlarının turbo doldurmalı ve ara soğutuculu olması gerektiğini ve mevcut tasarım şartlarında yakıt ekonomisinde %6 civarında bir iyileşmenin mümkün olduğunu söylemektedirler. Bir dizel motoru performansının, motora turbo doldurmalı, turbo kombine ve rankin sistemlerinin ilavesiyle %20, adyabatik dizel motorunda ise %40 civarında artırılabilceğini ifade etmektedirler.

Kamo ve Bryzik [106], turbo kombine bir dizel motorunun yanma odası elemanlarını farklı seviyelerde seramik kaplayarak sabit hava/yakıt oranında yaptıkları deneysel çalışmalarında özgül yakıt tüketiminde %10 oranında bir iyileşmenin yanında silindirlerden olan ısı kaybında %70 civarında bir azalma kaydetmişlerdir.

Wallace vd. [107], çalışma sonuçları, tam adyabatik bir motorda termik verimde %14, yarı adyabatik halde ise %7 artışı ifade etmektedir.

Kamo ve Bryzik [108], bir dizel motorunun yanma odasını Si₃N₄ ile kaplayarak motor performansında %7'lik bir iyileşme sağlamışlardır.

Kamo ve Bryzik [109], adyabatik turbo kombineli bir motorda yaptıkları simülasyon çalışmasında, motorun soğuk ilk hareketinde veya çok düşük yüklerde görülen is'in yük artımı sonucunda kaybolarak ortaya çıkan yoğunlaşmış yakıt buharının azaldığını ifade etmektedir.

Toyama vd. [110], bir dizel motorunun yanma odasını seramikle kaplanması sonucunda, ısı transferinde %50'ye varan bir azalma tespit etmişler ve yakıt sarfiyatında turbo kombine motorlar için %11'e varan iyileşmenin mümkün olabileceğini söylemişlerdir.

Ram vd. [111], bir dizel motorunun silindirinin ara yüzeyinde ince bir hava tabakası oluşturarak yan adyabatik hale getirdikleri bir dizel motorunun ısı kayıplarında %9 bir azalma ve ısı veriminde %3,5 civarında artış sağlamışlardır.

French vd. [112], turbo doldurmalı ve/veya turbo kombine bir dizel motorunun yanma odası elamanlarını çeşitli oranlarda seramik kaplayarak gerçekleştirdikleri çalışmalarında turbo doldurmalı motorda özgül yakıt tüketiminde %9 iyileşme ve turbo kombine motorda ısı veriminde %17 oranında bir artış elde etmişlerdir.

Sekar ve Kamo [113], dört silindirli ve direkt püskürtmeli adyabatik bir dizel motoru tasarımı yapmışlardır. Püskürtme avansının, egzoz emisyonlarına olan etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda; HC, CO, NO_x ve partikül emisyonları için sırasıyla 0.4, 3.4, 1 ve 0.2 g/mil değerlerine karşılık 0.13, 1.3, 1.65 ve 0.18 g/mil değerlerini bulmuşlardır.

Wallace vd. [114], termal bariyer kaplama uygulanmış tek silindirli düşük ısı kayıplı bir motorda yaptıkları teorik ve deneysel çalışmaları 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.

Morel vd. [115], aşırı doldurmalı bir motorda gerçekleştirdikleri diğer bir çalışmada da, kava/yakıt oranını sabit tutarak ve kaplamaları yine farklı kalınlıklarda kaplayarak elde ettikleri sonuçlarda ise termik verimde %6'lık bir artma ve toplam ısı kaybında da %60 civarında azalma kaydetmişlerdir.

Hoag vd. [116], turbo doldurmalı ve turbo kombine dizel motorunu farklı kalınlıkta yalıtım malzemeleri ile yalıtılmışlardır. Sabit hava/yakıt oranında her iki motorda da özgül yakıt tüketiminde sırasıyla %4 ve %2 oranlarında bir azalma görülürken her iki motorda silindirlerden olan toplam ısı kaybında ise %55 oranında azalma olduğunu belirtmişlerdir.

Morel vd. [117], farklı kaplama kalınlıkları kullanarak düşük ısı kayıplı motor haline getirdikleri aşırı doldurmalı bir dizel motoru üzerinde yaptıkları çalışmalar sonucunda toplam ısı kayıplarının %70 oranında azaldığını ve özgül yakıt tüketiminde %10 azalma sağlandığını belirtmişlerdir.

Walzer vd. [118], aşırı doldurmalı bir motor üzerinde yaptıkları bir çalışmada, yanma odası yüzeylerinin %80'nini 3 mm kalınlığında Zirkonyum oksit ile kaplamışlardır. Bu çalışmalar sonucunda soğutmaya giden ısı transferinde %13 azalma, şehir içi taşıt çevrimi deneylerinde yakıt sarfiyatında %5 iyileşme sağlamışlardır.

Hay vd. [119], turbo şarjlı düşük ısı kayıplı bir dizel motoru üzerinde bir motor simülasyon programı vasıtasıyla gerçekleştirdikleri çalışmalarda, silindir kapağı, egzoz supabı gövdesi ve supap yüzeylerini PSZ ile kaplayarak sonlu elaman ısı analizi ile sıcaklık dağılımları ve ısı akışlarını incelemişlerdir. Tüm motor yük ve hızlarında motor gücü ile özgül yakıt tüketiminde normal motora göre bir üstünlük belirlemişlerdir. Yalıtılmış motorda soğutucuya olan ısı geçişinde %30 civarında bir azalma kaydedilmiştir. Motordaki ısı geçişinin %30 düşürülmesiyle, radyatör alanının %21 ve soğutma fanı gücünün de 3 kW daha az azalma sağlamışlardır.

Havstad vd. [120], direk püskürtmeli, tek silindirli; giriş hava basıncı ve egzoz karşı basıncı ayarlanabilir bir motor üzerinde yapmış oldukları çalışmalarında özgül yakıt sarfiyatında %5-9 ve soğutmaya transfer edilen ısıda %30 civarında bir azalma tespit etmişlerdir.

Prasad vd. [121], bir dizel motorunun pistonunun yüzeyini PSZ (kısmen stabilize zirkonya) kullanarak seramik kapladıkları motorun pistonundan olan ısı kaybında %19 oranında bir azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Woschni ve Spindle [122], 8 silindirli turbo doldurmalı bir dizel motorunun pistonlarını 5 mm kalınlığında zirkonya ile kaplayarak bir simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma sonucunda, özgül yakıt tüketiminde düşük yüklerde azalma, yüksek yüklerde ise bir artış olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca maksimum hız ve yükte kaplamasız motorda radyatör ve fan tarafındaki maksimum ısı çekişi olmasına karşın kaplamalı motorda radyatör ve fan tarafından çekilen ısı miktarında %8 lik azalma olduğunu tespit etmişlerdir.

Kavvamura vd. [123], turbo kombine dizel motorunun yanma odasını yalıtarak oluşturdukları, düşük ısı kayıplı motorun simülasyonu sonucunda, motor parçalarını ısıya dayanıklı seramik malzemelerle yalıtmanın, bu parçaları tamamen seramik esaslı bir malzemedan imal etmekten daha kolay ve uygun olacağını ifade etmişlerdir.

Miyairi [124], turbo doldurmalı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunda yalıtım miktarının artması sonucu; termik verimin ve azot oksit emisyonlarının arttığını, seramik kaplı motorlardan daha iyi sonuçlar elde edilebilmesi için ise püskürtme avansının değiştirilmesi gerektiğini söylemektedir.

Alkidas [125], tek silindirli bir dizel motorunda gerçekleştirdiği deneysel çalışmada seramik kaplı motorun; özgül yakıt tüketiminin azaldığını, azot oksit emisyonlarının arttığını, hidrokarbon ve is emisyonlarının ise azaldığını belirtmektedir.

Cheng ve Wong [126], piston ve silindir kapağının %85'ini 1.52mm kalınlıkta zirkonya ile kapladıkları bir dizel motoru ile yaptıkları deneyler sonucunda tüm yüklerde motor performansında bir iyileşme sağlayamadıklarını, özgül yakıt tüketiminde %17 oranında bir artış gözlemlediklerini, egzoz ve yüzey sıcaklıklarında ise yanmanın bozulması sonucunda yükselmeler olduğunu ifade etmişlerdir.

Dickey [127], tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunun yanma odası elamanlarını seramik malzeme ile kaplayarak bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmasında emme ve egzoz supaplarını ve piston yüzeyini ve silindir gömleğinin

üst kısımlarının 0.13mm NiCrAlY ara tabaka ve 0,76mm Y_2O_3 ile stabilize edilmiş ZrO_2 ile kaplamışlardır. Bu çalışma sonucunda, seramik kaplı motorda yanma odasından soğutucu akışkana olan ısı kaybında %30 oranında bir azalma, egzoz gazı sıcaklığında ise önemli miktarda artışlar olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca aşırı yüklerde is ve partikül emisyonlarında artış, NO_x emisyonlarında azalma, CO emisyonlarında ise artış olduğunu ifade etmişlerdir.

Assanis [128], turbo kombine ve ara soğutmalı bir dizel motorunun silindir kapağını ve pistonlarını zirkonya ile kaplayarak düşük ısı kayıplı bir motor haline getirmiş ve yaptığı çalışmalar sonucunda, termik verimde %3, ısı kayıplarında ise %6 oranında bir azalma tespit etmişlerdir.

Alkidas [129], tek silindirli bir dizel motorunun yanma odası elemanlarını seramik esaslı bir malzemeyle kaplayarak yapmış olduğu deneysel çalışmaların sonucunda, seramik kaplamalı motorun normal motora göre yakıt tüketiminde ve partikül emisyonlarında azalma, NO_x ve HC (yüksek hızlarda) emisyonlarında ise artma olduğunu belirtmiştir. NO_x emisyonlarındaki artışın yanma sıcaklıklarının yüksek olması ile yakıtın erken tutuşmasından kaynaklandığını bunun içinde püskürtme avansının azaltılması durumunda bu artışın önüne geçilebileceğini ifade etmektedir.

Miyairi vd. [130], ise doğal emişli, tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunun yanma odası elemanlarını seramikle kaplanması üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda, özgül yakıt tüketiminde %7'lik bir azalma tespit etmişlerdir.

Chang vd. [131], düşük ısı kayıplı bir motor üzerinde yaptıkları deneysel çalışmalar 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 cidarları sıcaklıklarının artmasıyla volümetrik verimde düşmeden kaynaklanabileceğini belirtmiştir. Egzoz gaz sıcaklıklarında ise %20'den fazla artış olduğunu söylemişlerdir.

Bruns vd. [132], aşırı doldurmalı bir dizel motorunun yanma odası elamanlarını izole ederek yaptıkları çalışmalar sonucunda, yakıt tüketiminde %16 ila %37 arasında değişen oranlarda azalma olduğunu ifade etmişlerdir.

Kawamura [133], termal bariyer kaplamalar sonucunda açığa çıkan yüksek yanma sıcaklıklarından dolayı oluşan NO_x emisyonlarının diğer bir sebebinin de hava/yakıt oranının olduğunu ifade etmiştir.

Woods vd. [134], 150 mm çapındaki tek silindirli ve termal bariyer kaplı bir motorda yaptıkları deneysel çalışma sonucunda, 6242 titanyum alaşımlı pistonun üzerine 1.25 mm kalınlıktaki termal bariyer kaplamanın, piston yüzeyindeki sıcaklığı 128 °C, pistonun yanlarındaki sıcaklığı ise 28 °C azalttığı tespit etmişlerdir. Ayrıca kaplama yapılmaksızın 6242 titanyum alaşımı pistondan %85 oranında bir ısı geçişi azalması olduğunu belirtmişlerdir.

Rasihhan ve Wallace [135], tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunda, farklı kaplama kalınlıkları kullanarak silindir gömleği ısı direnç modeli simülasyonu ile çeperlerden olan ısı kaybının deneysel ve sayısal karşılaştırılmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada piston ve silindir gömleklerinin 1.5 ve 3 mm kalınlığında PSZ ile kaplanmışlardır. Farklı iki kaplama kalınlığında gazlardan pistona 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 gözlemlenmiştir.

Assanis vd. [136], tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motoru pistonunu 0.5 ve 1 mm kalınlığında seramik esaslı bir malzeme olan zirkonya ile kaplayarak motorun performans ve emisyon parametrelerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, 0.5 mm kaplamalı motorda normal motora nazaran %10 civarında performans iyileşmesi sağlanırken, 1 mm kaplamalı motorda %6 oranında kötüleşme olduğu belirtilmiştir. Bunun yanı sıra 0.5mm kaplamalı motorun CO emisyonlarında %30-%60, HC emisyonlarında %35-%40 ve NO_x emisyonlarında ise %10-%30 civarında azalmalar olduğunu ifade etmişlerdir. İS değerlerinde özellikle 1

mm kaplamalı motorda önemli düşüşler kaydedilirken, 0.5 mm kaplamalı motorda yüksek hızlarda kötüleşme olduğunu bildirmişlerdir.

Winkler ve Parker [137], bir diesel motorunun yanma odası elamanlarını, 0,08 mm termal bariyer amaçlı olarak kaplamışlardır. Sonuç olarak, NO_x ve is emisyonlarında sırasıyla %3.3 ve %52.6 oranlarında azalma sağlamışlardır. Ö.Y.T.'de de azalma olduğunu bildirmişlerdir.

Winkler ve Parker [138], bir diesel motorunun yanma odası elamanlarını, 0,08 mm termal bariyer amaçlı olarak kaplamışlardır. Deneyler sonucunda, avansın azaltılmasıyla NO_x emisyonunda %26 azalmaya rastlamışlardır.

Schwarz [139], 4 zamanlı, tek silindirli, direk enjeksiyonlu bir dizel motor üzerinde yaptığı çalışmada 1,016 mm seramik malzeme zirkonya ve CrO ile yanma odası elamanlarını kaplamıştır. Kaplama sonucunda motorun egzoz sıcaklığının %6 oranında arttığını ve tam yükte yüksek hızlarda Ö.Y.T.'in %3 oranında daha iyi olduğunu gözlemiştir.

Woods vd. [140], yaptıkları bir çalışmada, titanyum malzemedan imal edilen yanma odası elemanlarını, yanmaya maruz kalan yüzeylerinde, pistonu 0.5 mm, silindir gömleği 0.75 mm, silindir kapağı 0.5 mm zirkonya ile kaplayarak elde etmiş oldukları düşük ısı kayıplı motoru 100 saat çalıştırarak başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Bu çalışmalar sonucunda, soğutma suyuna olan ısı transferinde %52 mertebelerinde azalma olduğunu görmüşlerdir. Dolayısıyla kaplamada kullanılan seramik malzemesini (zirkonyanın) motorlar için uygun termal genleşme ve iyi bir termal bariyer özelliğine sahip olmasından dolayı tercih edildiği belirtmişlerdir.

Sun vd. [141], dökme demir pistonlarını sıcak preslenmiş silikon nitrit (HPSN) pistonlar ile değiştirip silindir kapağını 7 mm, silindir gömleğini 2.5 mm ve çelik supapları 2 mm kalınlığında PSZ ile plazma sprey tekniği kullanarak kapladıkları dizel motoru ile yaptıkları deneyler sonucunda, soğutma sistemi tamamen kaldırılmış olan bu düşük ısı kayıplı motorda, silindir kapağı, silindir gömleği ve supaplarda en uygun termal bariyer kaplamanın PSZ, piston için ise HPSN olduğu sonucuna

varmışlardır. Ayrıca yanma odası çeperlerine taşınım ile olan ısı geçişi miktarlarında bir düşüş ve yakıt sarfiyatında da bir azalma tespit etmişlerdir. Soğutma sistemi ortadan kaldırıldığı için normal motora göre egzoz gazlarına daha fazla ısı geçişi olduğunu belirlemişlerdir.

Marks ve Boehman [142], tek silindirli, 4 zamanlı ve ön yanma odalı bir dizel motoru üzerinde yaptıkları çalışmada, NiCoCrAlY ve yitriya ile stabilize zirkonya seramik malzemelerini termal bariyer olarak kullanmışlardır. Sonuç olarak, özgül yakıt tüketiminde ortalama %2.5 ve is emisyonunda %28 azaldığını ancak NO_x emisyonunda ise %2 artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Beg vd. [143], sıkıştırma oranı değişebilen, tek silindirli, doğal emişli, ön yanma odalı bir dizel motor üzerinde yaptıkları çalışmada, pistonun tepesini 200 µm (0,2 mm) Y₂O₃ ile stabilize edilmiş ZrO₂ kaplamışlardır. Seramik kaplı motorun performansı, yüksek enjeksiyon açılarından daha iyi olduğunu bulmuşlardır. Normal motor ile seramik kaplı motoru karşılaştırdıklarında seramik kaplı motorda termal verimin %25 azalması ile birlikte Ö.Y.T.'de %8 arttığını denemeler esnasında görmüşlerdir.

Voss vd. [144], 6 silindirli, 2 zamanlı, turbo şarjlı bir dizel motorunda yanma odasını termal bariyer ile kaplamaları sonucunda is emisyonunda %27'lik bir azalma tespit etmişlerdir.

Uzun vd. [145], altı silindirli, direkt püskürtmeli, turbolu bir dizel motorunun silindir kapağı ve supaplarını (0,15 mm ara bağlayıcı malzeme + 0,35 mm) ZrO₂, MgZrO₃ ve NiCrAl seramik malzemeleri ile kaplamaları sonucunda egzoz sıcaklığında 15-65 °C ve volümetrik verimde %3 artış gözlemlemişlerdir. CO ve is emisyonlarında ise sırasıyla %40, %48 oranlarında azalma bulmuşlardır. Ayrıca efektif ve termal verimde sırasıyla %2, %10 oranında artma ve Ö.Y.T. ise %2 azalma meydana geldiğini bulmuşlardır.

Kamo vd. [146], 6 silindirli, direkt enjeksiyonlu, turbo şarjlı bir dizel motoru üzerinde yaptıkları çalışmada, piston ve silindir kapağı 0.13 mm silindir gömleği 0.5

mm kaplamışlardır. Çalışmanın sonucunda ise Ö.Y.T.'de %3.5-6 oranında azalma tespit etmişlerdir. Ayrıca NO_x emisyonlarında ise %40 artma görmüşlerdir.

Parlak [147], seramik kaplı aşırı doldurmalı, tek silindirli bir dizel motorunun termal bariyer oluşturmak amaçlı olarak MgO - ZrO₂ ile 0.15 ara bağlayıcı malzeme ve 0.35 mm kalınlığında seramik malzeme ile kaplamıştır. Normal motor ve kaplamalı motor ile aynı sıkıştırma oranı ve püskürtme avansında 17.5/1 ve 16.8/1, sıkıştırma oranlarında Ö.Y.T.'nin sırasıyla ortalama %2 ve %1.5 oranlarında normal motora göre daha az düştüğünü gözlemlemiştir.

Ramasvamy vd. [148], direkt enjeksiyonlu bir dizel motorunda yanma odası elamanları, silindir kapağı, supap ve pistonu sırasıyla 100 µm, 260 µm ve 450 µm termal bariyer olarak kaplamışlardır. Kaplama sonucunda özgül yakıt tüketimi %1-2 azaltırken egzoz sıcaklığında ise %5-6 oranlarında artma meydana gelmiştir.

Parlak vd. [149], tek silindirli, 4 zamanlı ve ön yanma odalı bir dizel motor üzerinde yaptıkları çalışmada, yanma odası yüzeylerini 0.15 mm kalınlığında NiCrAl +0,35 mm kalınlığında MgO - ZrO₂ ile kaplamışlardır. Yüksek sıkıştırma oranlarında kaplamalı motor gücü ve torkunda 18.20/1 sıkıştırma oranında %1.6-1.5 artış gözlemlemiştir.

Parlak vd. [150], tek silindirli direkt enjeksiyonlu bir turbo diesel motorun yanma odası elamanlarını 0.15 ara bağlayıcı malzeme ise 0.35 mm kalınlığında seramik malzemeyle kaplamışlardır. Sonuç olarak, termik verimde %2 artma, Ö.Y.T.'de %6'lık bir azalma meydana geldiğini tespit etmişlerdir.

Parlak [151], tek silindirli direkt enjeksiyonlu (standart enjeksiyonu 40°) bir turbo diesel motorun yanma odası elemanları, 0.15 ara bağlayıcı malzeme ile 0.35 mm seramik malzeme ile kaplamıştır. Sonuç olarak, 38° enjeksiyon zamanında termik verimde %2 artma, Ö.Y.T.'de %6'lık bir azalma, egzoz sıcaklığında ise %10.8'lik bir artış sağlamıştır.

BÖLÜM 6

MALZEME VE METOT

6.1. DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN MALZEMELER

6.1.1. Piston ve Supaplar

Deneysel çalışmalarda AlSi12CuNi alaşımından üretilen pistonlar ve CrSi'den üretilen supaplar kullanılmıştır. Çizelge 6.1'de deneysel çalışmalarda kullanılan pistonların, Çizelge 6.2'de ise supapların kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Çizelge 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan pistonun kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim (% ağırlık)					
Al	Si	Ni	Cu	Mg	Fe
Kalan	12,6	1,96	0,88	0,60	0,5

Çizelge 6.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan supapların kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim (% ağırlık)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
Emme Supabı (X45CrSi 93)	0.40- 0.50	2.70- 3.30	s0.80	s0.040	0.030	2.00- 10.00	---	Kalan
Egzoz Supabı (X53CrMnNiN219)	0.48- 0.58	s0.25	7.00- 10.00	s0.050	s0.030	20.00- 22.00	3.25- 4.50	Kalan

6.1.2. Kaplama Malzemeleri

Piston ve supap yüzeylerine plazma püskürtme yöntemiyle, Çizelge 6.3'te verilen seramik kaplama tozları kaplanmıştır. Kaplamalarda Sulzer Metco firmasına ait 210 NS standart tozu (ZrO_2+MgO) ve bu toz içerisine aşağıda belirtilen oranlarda Al_2O_3 tozu ilave edilerek elde edilen toz karışımları kullanılmıştır.

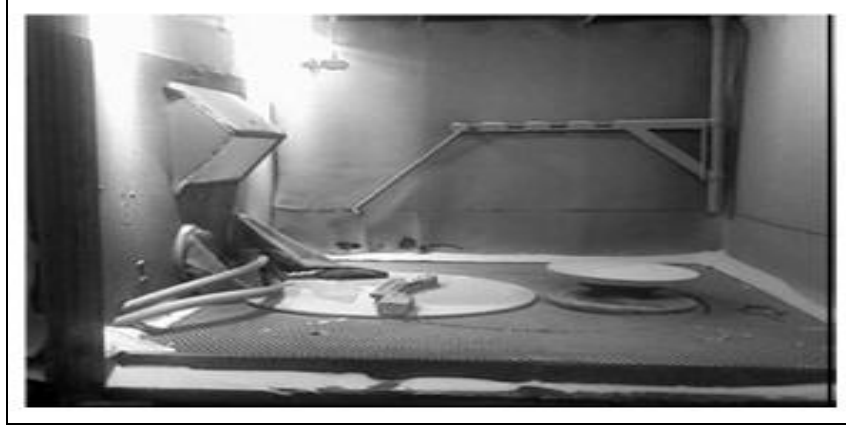
Çizelge 6.3. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaplama tozları.

Numune	Kaplama Tozları
A1	%100 $ZrO_2 + MgO$
A2	%75 $ZrO_2 + MgO + %25 Al_2O_3$
A3	%50 $ZrO_2 + MgO + %50 Al_2O_3$
A4	%25 $ZrO_2 + MgO + %75 Al_2O_3$
A5	%100 Al_2O_3

6.1.3. Yüzey Pürüzlendirme İşlemi

Kaplama yüzeyine iyi bir yapışmanın sağlanması için, öncelikle malzeme yüzeyinin yağ, pas ve kirden temizlenmesi gerekmektedir. Yağların yüzeyden uzaklaştırılması amacı ile, yağ çözücü kimyasal maddeler kullanılmıştır. Plazma püskürtme kaplaması uygulanacak malzemelerin kaplamanın yüzeye daha iyi bağlanması için, numune yüzeyleri pürüzlendirilmiştir.

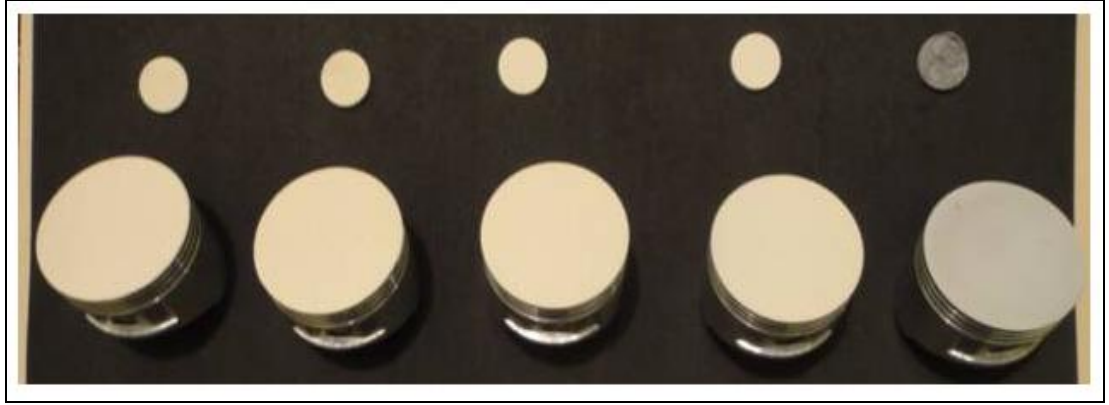
Yüzey pürüzlendirme işlemi, Şekil 6.1'de gösterilen, THY Teknik A.Ş. şirketindeki yüzey pürüzlendirme cihazında yapılmıştır. İşlemden önce 60 grit'lik Al_2O_3 toz tanecikleri kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün en iyi şekilde elde edilmesi amacıyla, Al_2O_3 tozları yüzeye 90° lik açıda püskürtülmüştür.



Şekil 6.1. Yüzey pürüzlendirme cihazı.

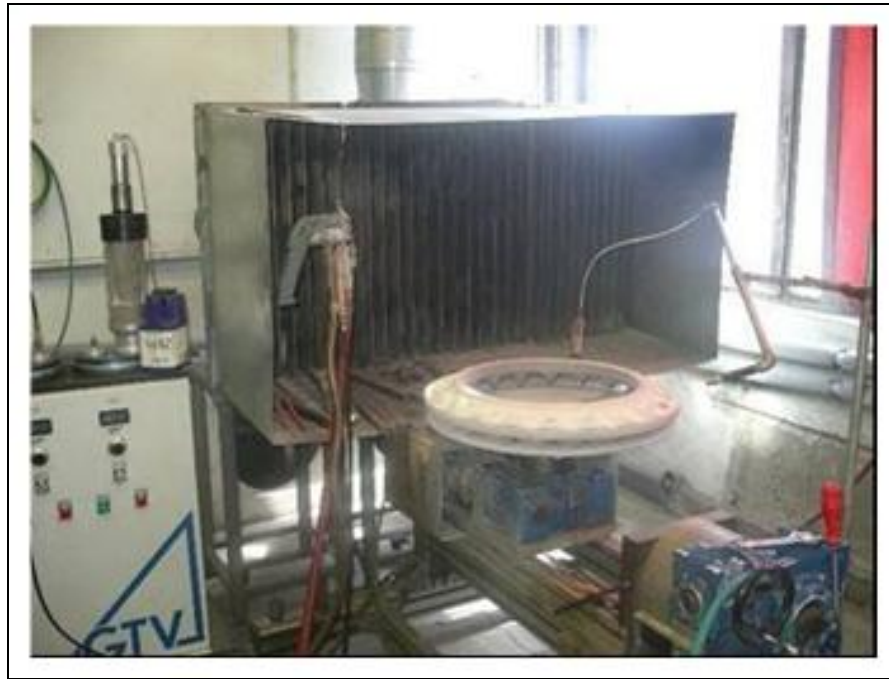
6.1.4. Deney Numunelerin Kaplanması

Farklı malzemelerden üretilen piston ve supaplar, Çizelge 6.3'de verilen kaplama tozları kullanılarak, atmosferik plazma püskürtme yöntemiyle kaplanmıştır. Kaplama tozları seramik esaslı tozlardır. Seramik tozlarının ergime derecelerinin yüksek olması nedeni ile termal sprej kaplama yöntemlerinin içerisindeki uygulama sıcaklığı en yüksek olan plazma sprej püskürtme yöntemi, kaplama yöntemi olarak tercih edilmiştir. Beş grupta yapılan kaplama işlemlerinde, her grup kaplama malzemesiyle 1 adet piston ve supap (emme, egzoz), 2 adet ise 25,4 mm çapında 4 mm kalınlığında yapışma mukavemet testi ve termal şok deneyi için hazırlanan numuneler kaplanmıştır. Piston ve supap yüzeylerinden talaş kaldırılması suretiyle, plazma sprej yöntemi kullanılarak $ZrO_2 + MgO$, $ZrO_2 + MgO + \%25 Al_2O_3$, $ZrO_2 + MgO + \%50 Al_2O_3$, $ZrO_2 + MgO + \%75 Al_2O_3$, Al_2O_3 seramik tozları kaplanmıştır. Farklı kaplama kalınlığında olan numuneler, tekrar tornada yüzeyleri tornalanmak suretiyle piston ve supapların standart boylarının değişmemesi ve böylece yanma odası hacminde değişiklik olmaması suretiyle standart piston ile kıyaslamada farklılık oluşturulmaması sağlanmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 6.2'de görülmektedir.



Şekil 6.2. Yüzeysel kaplanmış piston ve yapışma mukavemet test numuneleri.

Numunelerin kaplama işlemleri, Türk Hava Yolları (THY) Teknik A.Ş. Revizyon Atölye ve laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Kaplama işlemlerinin yapıldığı, atmosferik plazma spreyleme sistemi, Şekil 6.3’de verilmiştir.



Şekil 6.3. Kaplama işleminin gerçekleştirildiği atmosferik plazma püskürtme sistemi.

Plazma spreyleme sistemi ile yapılan kaplama işlemlerinde, manuel 3 MB tabancası kullanılmıştır. Kaplama işlemlerinde kullanılan spreyleme parametreleri Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Plazma püskürtme kaplama parametreleri.

Parametreler	ZrO ₂ + MgO/Al ₂ O ₃
Plazma Tabancası	3 MB
Akım (A)	500
Voltaj (V)	60
Plazma Gazları ve Akışı (l/dk)	Ar,80
	H ₂ , 15
Püskürtme Mesafesi (mm)	75
Nozul Çapı (mm)	7,6

6.1.5. Metalografik İncelemeler için Numune Hazırlanması

Deneysel çalışmalarda kullanılan numuneler, kaplama yapılmış pistonlardan kesilerek elde edilmiştir. Kesme işlemlerinde Struers marka kesme cihazı kullanılmıştır. SEM ve EDS incelemeleri için, 20×10×5 mm boyutlarında, XRD incelemeleri için 9×9×9 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır.

Metalografik işlemler için uygun boyutlara getirilen numuneler, standart metalografik işlemler ile SEM, EDS ve XRD analizleri için hazır hale getirilmiştir. Zımparalama ve parlatma işlemlerinde, Metkon Forcipol-2 marka cihaz kullanılmıştır. Şekil 6.4'de metalografik zımparalama ve parlatma cihazı görülmektedir.



Şekil 6.4. Metalografik zımparalama ve parlatma cihazı.

6.1.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Çalışmaları

Kaplanan malzemelerin birleşik yüzeylerinin incelenmesinde, LEO EVO040 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 6.5).

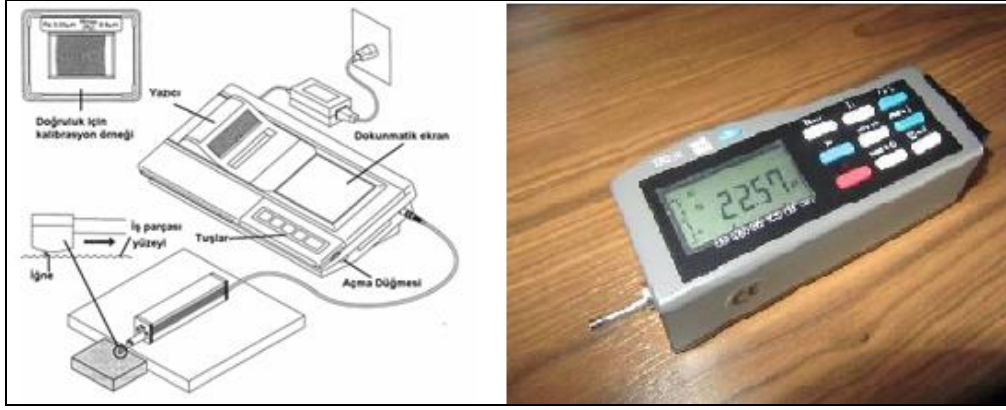


Şekil 6.5. Deneylerde kullanılan taramalı elektron mikroskobu.

Taramalı Elektron Mikroskobu veya SEM (Scanning Electron Microscope), çok küçük bir alana odaklanan yüksek enerjili elektronlarla yüzeyin taranması prensibiyle çalışır. Numunenin yüksek çözünürlüğe sahip topografik görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır. Kaplanan numunelerin SEM, EDS ve XRD analizleri İnönü Üniversitesi Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

6.1.7. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Kaplanan parçaların yüzey pürüzlülüğünün ve yüzey pürüzlülüğüne etkileyen parametrelerden birisi olan kesme hızı etkisinin belirlenmesi amacıyla yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde Time marka cihaz kullanılmıştır. Kaplanan parçaların yüzey pürüzlülüğü Ra (μm) cinsinden ölçülmüştür. Şekil 6.6'de deneysel çalışmalarda kullanılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı görülmektedir.



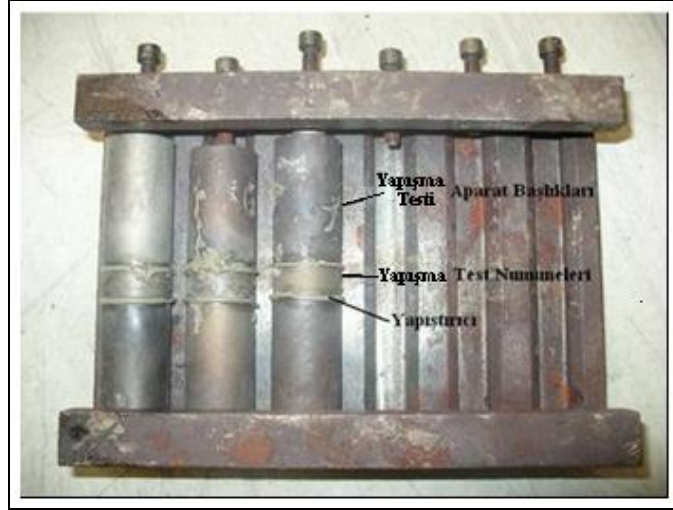
Şekil 6.6. Testlerde kullanılan yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.

6.2. MEKANİK TESTLER

6.2.1. Yapışma Mukavemeti Testi

Kaplama malzemelerinin yapışma mukavemeti değerleri, ASTM C633 (Termal Sprey Kaplamaların Yapışma ve Kohezyon Dayanımı) standartında belirtilen şartlarda, Dillon marka yapışma mukavemeti test cihazı kullanılarak tespit edilmiştir. Yapışma mukavemet testi için 25.4 mm (1 inch) çapında hazırlanan numuneler piston yüzeylerine uygulanan her bir kaplama parametresi için kaplanmış ve yapışma mukavemet test aparatında kullanılan başlıklara, 3M firmasına ait Scotch-W tipi sıcakta sertleşen epoksi reçine (epoxy) yapıştırıcı kullanılarak yapıştırılmıştır. Yapıştırma işlemi kaplanan numunelerin hem alt kaplanmamış yüzeyine, hem de kaplanmış üst yüzeyine, aynı dik ekseninde olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yapıştırılan numuneler Şekil 6.7'de gösterilen aparat ile sıkıştırılarak fırınlanmaya hazır duruma getirilmiştir. Hazırlanan numuneler ısıtma fırınlarında 200 °C sıcaklıkta iki saat bekletilerek yapıştırma işlemi tamamlanmıştır.

Yapıştırılan numuneler havada soğutulduktan sonra yapışma mukavemeti test aparatına adapte edilerek Dillon marka 85 MPa kapasiteli yapışma mukavemet test cihazında teste tabi tutulmuştur. Yapışma mukavemeti testi için kullanılan cihaz Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Yapışma mukavemeti testi için numune sıkıştırma aparatı.



Şekil 6.8. Testlerde kullanılan yapışma mukavemeti test cihazı.

6.2.2. Sertlik Ölçümleri

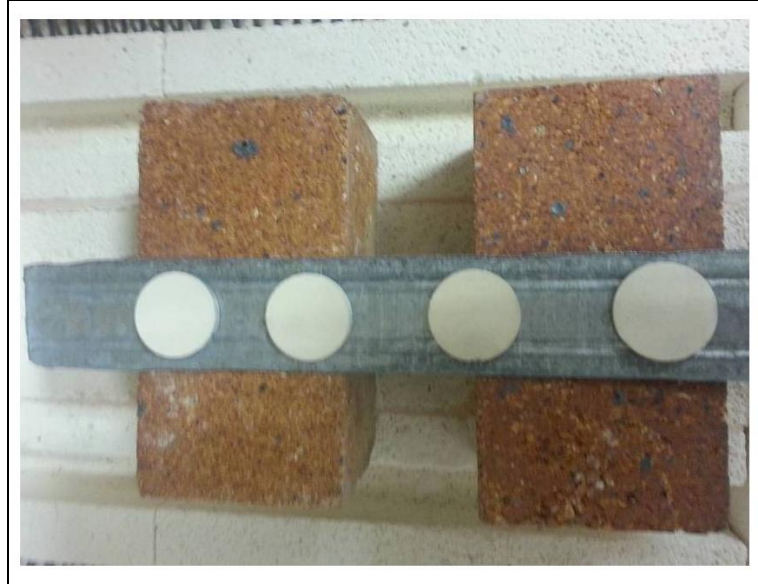
Malzeme yüzey sertlik ölçümleri için Qness marka mikrosertlik test cihazı (HV) kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri $HV_{0,02}$ (vickers) cinsinden 20 g. yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın görüntüsü, Şekil 6.9'da verilmiştir. Ölçümler kaplamaların kesit yüzeyinden, kaplamanın olduğu bölgeden alınmak suretiyle gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.9. Ölçümlerde kullanılan yüzey sertlik test cihazı.

6.3. TERMAL ŞOK TESTLERİ

Termal şok testi için 26 mm çapında AlSi12CuNi piston alaşımı yüzeyine, ZrO_2+MgO , $ZrO_2+MgO+%25Al_2O_3$, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$, $ZrO_2+MgO+%75Al_2O_3$ tozları plazma sprej püskürtme yöntemi ile kaplanmıştır. Termal şok testi için kaplanmış numuneler Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6.10. Kaplanmış termal şok test numuneleri.

Numunelere uygulanacak termal şok testleri, uygulanan sıcaklık farkları (ΔT) 300 °C, 600 °C ve 900 °C, numunelerin soğutma ortamları su ve hava olacak şekilde

seçilmiştir. Her bir sıcaklık farkı için, dört adet örneğe termal şok deneyi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalarda termal şok testleri için Mars marka fırın kullanılmıştır. Fırına ait resim Şekil 6.11'de verilmiştir. Termal şok çevrimi için belirlenen sıcaklıklarda 30 dakika fırında bekletilen numuneler, fırından çıkarılıp ortam sıcaklığındaki suya atılarak soğutulmuştur.



Şekil 6.11. Testlerde kullanılan yüksek ısı fırını.

6.4. MOTOR PERFORMANS TESTLERİ

Deneysel çalışmalarda, tek silindirli direkt püskürtmeli Alimar marka dizel motoru kullanılmıştır. Motorun yakıt pompası ve enjektörü orijinal motorun üzerinden kullanılmıştır. Şekil 6.12'de deneysel çalışmalarda kullanılan tek silindirli 4 zamanlı dizel motorun görüntüsü ve Çizelge 6.5'de ise bu deney motorunun teknik özellikleri verilmiştir. Motor performans testlerinde TS EN 590 standardına uygun dizel yakıt kullanılmıştır.



Şekil 6.12. Testlerde kullanılan deney motoru.

Çizelge 6.5. Deney motorunun teknik özellikleri.

Markası	Alimar marka, 4 zamanlı direk püskürtmeli, dizel motor
Silindir sayısı	1
Silindir çapı (mm)	78
Strok (mm)	62
Sıkıştırma oranı	18 /1
Maksimum güç (kW)	5
Supap düzenlemesi	Üstten kamlı, 2 supaplı
Maksimum motor devri (d/d)	3000
Depo hacmi (L)	3,5
Yakıt Sarfıyatı (gr/HP/h)	215
Yağ Kapasitesi (L)	1,1

6.4.1. Motorun Güç ve Moment Ölçümleri

Deneylede motorun yüklenmesi için Kemsan marka, 10 kW gücünde elektrikli dinamometre kullanılmıştır (Şekil 6.13). Deney seti, motor momentini, hızını ve sıcaklığını ölçebilecek donanıma sahiptir. Dinamometre kontrol ünitesi ile motorun istenilen devirde hassas olarak yüklenmesi ve marş yaptırılması mümkün olmaktadır (Şekil 6.14).



Şekil 6.13. Ölçümlerde kullanılan dinamometre.



Şekil 6.14. Ölçümlerde kullanılan dinamometre kontrol ünitesi.

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 yükselteci tarafından yükseltilir.

Dinamometre gövdesinde oluşan baskı kuvvetinin ölçülmesinde kullanılan Esit marka SP 100 kg C1 yük hücresi ve PWI-P marka indikatör kullanılmıştır. Deney sonunda ölçülen kuvvet, kuvvet kolu ile çarpılarak motor momenti hesaplanmıştır. yük hücresi ve indikatörün görünüşleri Şekil 6.15’de verilmiştir.



Şekil 6.15. Ölçümlerde kullanılan yük hücresi ve indikatörün görünümü.

6.4.2. Sıcaklık ve Yakıt Ölçümleri

Egzoz gazı sıcaklık ölçümü için TES marka 1320 type-K termokopul kullanılmıştır. Kullanılan sıcaklık ölçüm cihazı Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Termokopullar özellikle egzoz gazlarını ölçen kısmının gazdan etkilenmesini önlemek ve dayanıklılığını artırmak amacıyla bir vida içerisine gömülerek akışkana temas ettirilmiştir.

Yakıt ölçümü için 0.1 hassasiyetinde hassas terazi kullanılmış olup, 10 gr yakıt sarfiyatı saniye cinsinden ölçümü yapılmıştır. Yakıt tüketimi süresinin Charles Sernard marka bir kronometre kullanılmıştır. Kronometre 1 salise hassasiyetindedir. Kullanılan kronometre ve yakıt ölçüm düzeneği Şekil 6.17'de gösterilmiştir.



Şekil 6.16. Ölçümlerde kullanılan egzoz gaz sıcaklık termokopulu.

Egzoz gaz sıcaklıkları için kullanılan termokopul ölçümleri egzoz çıkışından yaklaşık 60 cm uzaklıkta egzoz yolu üzerinde açılan bir delik vasıtası ile anlık yapılmıştır.



Şekil 6.17. Ölçümlerde kullanılan, 1-Yakıt kabı, 2-Dijital terazi, 3-Kronometre.

6.4.3. Egzoz Gaz Analiz Ölçümleri

Deney motorunun egzoz emisyonları ölçümü için ITALO PLUS marka egzoz gaz emisyon analiz cihazı kullanılmıştır (Şekil 6.18). Egzoz gaz analizi ile HC, CO, CO₂, NO_x ve O₂ değişkenlerini ölçebilmek mümkündür. Bununla birlikte dizel motorları için de aynı değişkenler ve is emisyonları belirlenebilmektedir. Çizelge 6.6'da MRU ITALO PLUS egzoz gaz analiz cihazının teknik özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 6.18. Ölçümlerde kullanılan egzoz gaz analiz cihazı.

Çizelge 6.6. ITALO PLUS egzoz gaz analizörünün özellikleri.

Ölçüm	Ölçüm aralığı	Hassasiyet
CO (% hacimsel)	0-10,00	$\pm 0,06\%$
CO ₂ (% hacimsel)	0-20,00	$\pm 0,5\%$
NO _x (ppm)	0-2000	± 5
HC (ppm)	0-50000 n-hexan	± 12
O ₂ (% hacimsel)	0-21	$\pm 0,1$

6.4.4. Silindir İçi Basınç Ölçümleri

Deney motorunun silindir içi basınç ölçümü için kistler marka type 4065A2 modeli ile 500 bar' a kadar ölçüm yapabilen silindir içi basınç ölçüm sensörü (Şekil 6.19) ve basınç değerini sinyale dönüştüren kistler marka amplifikatör kullanılmıştır.

Amplifikatör PICO marka ADC-212 modeli ile silindir içi basınç değerleri, krank çıkışına bağlanan manyetik konum sensörünün pistonun üst ölü noktasındaki (ÜÖN) anlık basınç değeri 50 çevrim olacak şekilde ANSI değerlerinde kayıt altına alınarak bilgisayara aktarılmıştır. Bu değerlerin elli çevrim ortalaması alınarak tek çevrime dönüştürülmüştür. Tek çevrime dönüştürülen bu verilerde sapmalara rastlandığı için matlab programında filtreleme yapılarak kayıt altına alınmış ve grafiklere dönüştürülerek düzenlenmiştir. Kullanılan silindir içi basınç ölçüm sensörü, amplifikatör ve osiloskopun görüntüsü Şekil 6.20' de verilmiştir.



Şekil 6.19. Ölçümlerde kullanılan silindir içi basınç sensörü.



Şekil 6.20. Ölçümlerde kullanılan osiloskop ve amfikatör.

6.5. DENEY METODU

6.5.1. Kaplanan Piston ve Supapların Motora Monte Edilmesi

Kaplama işlemi yapılan seramik kaplı motor parçaları, motora monte edilmiştir. Kaplamalı motor deneyleri, standart motorun deney şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları, Microsoft Excel programında grafikler haline getirilerek düzenlenmiştir. Deneyler Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Otomotiv Anabilim Dalı Deney Laboratuvarında yapılmıştır. Şekil 6.21'de Kaplama yapılan piston ve supapların monte edildikten sonraki görünümleri verilmiştir.

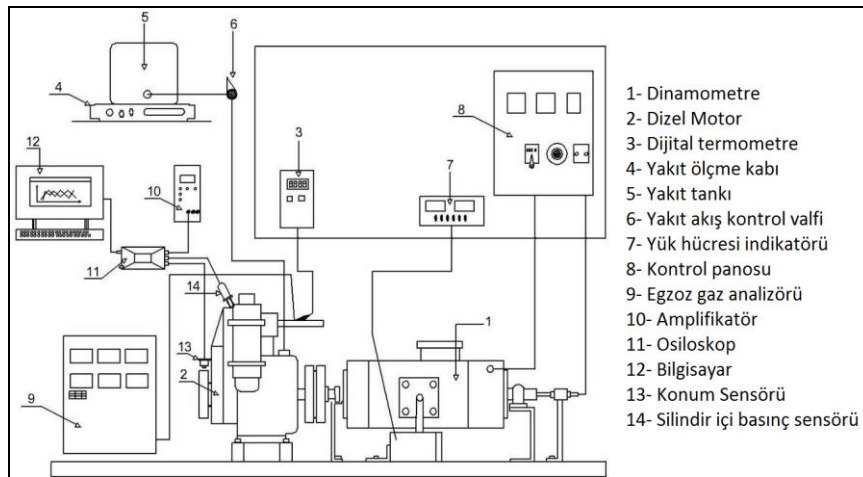
Kaplanan piston ve supaplar motora monte edildikten sonra motor performans ve emisyon testleri yapılmıştır. Şekil 6.22'de deney düzeneğinin şematik resmi verilmiştir. Kaplama yapılmış piston ve supaplar da malzeme bileşimine göre yapılan kodlamalar aşağıda verilmiştir.

- A0 nolu numune: Standart piston (AlSi12CuNi)
- A1 nolu numune: %100 ZrO₂ + MgO
- A2 nolu numune: %75 ZrO₂ + MgO + %25 Al₂O₃
- A3 nolu numune: %50 ZrO₂ + MgO + %50 Al₂O₃
- A4 nolu numune: %25 ZrO₂ + MgO + %75 Al₂O₃
- A5 nolu numune: %100 Al₂O₃

ZrO₂ + MgO, tozu ve bu tozu Al₂O₃ ilave edilerek 5 farklı kaplama yapılmıştır.



Şekil 6.21. Kaplama yapılan piston ve supapların monte edildikten sonraki görüntüleri.



Şekil 6.22. Testlerde kullanılan deney düzeneğinin şematik resmi.

Piston ve supap yüzeylerinden 150 µm kalınlığında talaş kaldırılması suretiyle plazma sprey yöntemi ile ZrO₂ + MgO, ZrO₂ + MgO + %25 Al₂O₃, ZrO₂ + MgO + %50 Al₂O₃, ZrO₂ + MgO + %75 Al₂O₃, Al₂O₃ seramik tozları ile piston ve supap yüzeyleri kaplanmıştır. Farklı kaplama kalınlığında olan numuneler, tekrar tornada yüzeyleri tormalanmak suretiyle piston ve supapların standart boylarının değişmemesi ve böylece yanma odası hacminde değişiklik olmaması suretiyle standart piston ile kıyaslamada farklılık oluşturulmaması sağlanmıştır. Deney motoru TS 1231 içten yanmalı motor deney esaslarında belirtilen şekilde standart halde çalıştırılmıştır.

Deneylere başlamadan önce supap ayarı motor katalogunda belirtilen değerlere göre ayarlanmış, motor yağı kontrol edilmiş ve motor çalışma sıcaklığına getirilmiştir. Tam yük ve değişik hızlarda, 1600 d/d, 2000 d/d, 2400 d/d ve 2800 d/d, motor devirlerinde yaklaşık 10 dakika motor çalıştırılmıştır. Püskürtme basıncı 200 bar olarak test edilerek, motor çalışma koşullarına hazır hale getirilmiştir.

Deney motoru, motor dinamometresine krank çıkışından uzatılan bir mille flanş şeklindeki dinamometreye bağlantı yapılarak motorun devir, güç ve tork değerleri ölçülmüştür. Daha sonra motorun egzoz çıkışından yaklaşık 1.5 m uzağından açılan kanala egzoz gaz analiz cihazı probu takılmak suretiyle emisyon değerleri ölçülmüştür. Testlerde silindir içi basınç ölçümü için, silindir kapağından silindir içerisine doğru kanal açılıp propil bağlantı yapılmıştır. Bu propil bağlantısının ucuna ise silindir içi basınç ölçüm sensörü bağlanmıştır. Sensör bağlantısı amplifikatöre oradan osiloskopa bağlantı kurularak bilgisayardan akım olarak basınç değişim değerleri kaydedilmiştir. Yakıt sarfiyatı ölçümü için motorun yakıt depo çıkışı bir boru ile yakıt kabına aktarılmıştır. Yakıt kabı 0.1'lik bir hassas terazi üzerine konmuş ve dijital kronometre ile 10 gr'lık yakıt azalışı salise cinsinden ölçülmüştür.

6.6. MOTOR KARAKTERİSTİKLERİNİN HESAPLAMASI

Dizel motorlarında, motor hızına bağlı olarak ölçülen güç, moment ve yakıt tüketim değerleri motor karakteristikleri olarak adlandırılmaktadır. Değişik yük ve devirlerde bu değerlerde meydana gelen değişimler eğrilerle gösterilmektedir. Bu değişimleri gösteren eğriye karakteristik eğri denilmektedir. Bu eğriler motorun gerçek çalışma şartlarındaki performansı hakkında bilgiler vermektedir. Motor performansının belirlenmesi için deneysel çalışmalarda doğrudan ölçülemeyen değerler, performans karakteristiklerini veren denklemlerle hesaplanmaktadır [48]. Bu denklemler vasıtasıyla hesaplanan en önemli performans karakteristikleri ise efektif güç, döndürme momenti, ortalama efektif basınç ve özgül yakıt tüketimidir.

6.6.1. Döndürme Momenti ve Efektif Güç

Güç ve döndürme momentinin ölçülmesinde mekanik, hidrolik ve elektrikli dinamometre gibi değişik ölçüm yöntemleri olmasına rağmen, bu çalışmada elektrikli dinamometre kullanılmıştır. Motor bir test ünitesine bağlanmakta ve motor mili dinamometre flanş ile birlikte dönmektedir. Dinamometre test düzeneğinin güç hesaplaması Eşitlik 6.1'de verilmektedir [152].

$$P_e = \frac{M_e \times n}{9549} \quad (6.1)$$

P_e : Motor gücü, kW

M_e : Motor torku, Nm

n : Motor devri, d/d

6.6.2. Ortalama Efektif Basınç

İçten yanmalı motorlarda ortalama efektif basınç motorun gerçek çevrimdekine eş değer bir P_e gücünü vermesi için bir strok boyunca pistonu etkimesi gereken sabit basınç olarak ifade edilir [152]. W_e (Nm/çevrim), çevrim işi ve V_H (m^3), toplam strok hacmi olmak üzere ortalama efektif basınç:

$$P_{me} = \frac{W_e}{V_H} = \frac{P_e}{n_c} \cdot V_H = \frac{P_e}{V_H \cdot n \cdot i} \quad (6.2)$$

P_{me} : Ortalama efektif basınç, Pa)

P_e : Efektif güç, kW

n_c : İş yapan devir sayısı, d/d

n_c : $n \cdot i$, çev./dk

i : Bir devirdeki çevrim sayısı, çev./dev.

n : Motor devri, d/d

i : 4 stroklu dizel motor için 1/2, 2 stroklu dizel için 1

6.6.3. Özgül Yakıt Tüketimi

Birim zamanda, birim güç başına harcanan yakıt miktarına özgül yakıt sarfiyatı denir. Laboratuvar şartlarında bir motorun yakıt tüketimini ağırlıksal olarak ölçmek mümkündür. Belli çalışma şartlarında motorun özgül yakıt tüketiminin hesaplanmasında kullanılan bağıntı, Eşitlik 6.3'te verilmektedir [152].

$$b_e = 3600 \times \Delta V \times \frac{P_y}{P_e} \times \Delta t = 3600 \times \frac{m_y}{P_e} \quad (6.3)$$

b_e : Özgül yakıt tüketimi, (g/kWh)

m_y : Kütlesel debi, (g/s)

P_y : Yakıt yoğunluğu, (g/cm)

ΔV : Tüketilen yakıt hacmi, (cm³)

Δt : Yakıt tüketme süresi, (s)

6.6.4. Efektif Verim

Efektif verim, motor milinden elde edilen (birim zamandaki) işin silindire verilen enerjiye oranı şeklinde tarif edilmektedir. İş ve güç oranlarının hesaplanmasında kullanılan bağıntı Eşitlik 6.4'de verilmektedir.

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_T} = \frac{W_e/t}{Q_T/t} = \frac{P_e}{m_y \cdot H_u} \quad (6.4)$$

Yukarıdaki ifade de m_y çekilip b_e (g/kWh) ve H_u (kJ/kg) alındığında, elde edilen denklem Eşitlik 6.5'te verilmektedir.

$$\eta_e = \frac{3,6 \times 10^6}{b_e \times H_u} \quad (6.5)$$

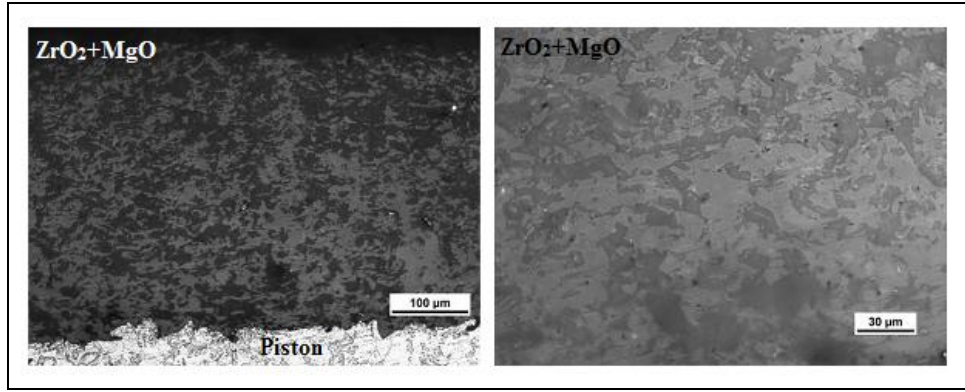
elde edilmektedir [152].

BÖLÜM 7

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

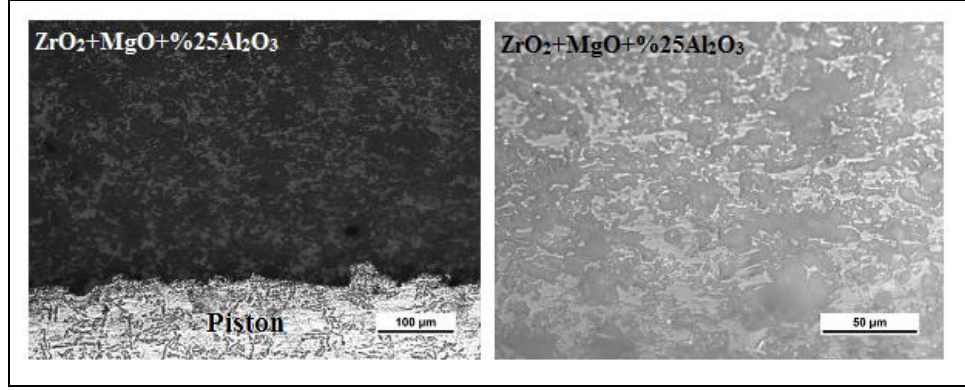
7.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Bu çalışmada plazma püskürtme sistemi kullanılarak içten yanmalı tek silindirli bir dizel motorun piston ve supap yüzeyleri farklı kaplama malzemeleri ($ZrO_2 + MgO$, $ZrO_2 + MgO + \%25 Al_2O_3$, $ZrO_2 + MgO + \%50 Al_2O_3$, $ZrO_2 + MgO + \%75 Al_2O_3$, Al_2O_3) ile kaplanarak, kaplama malzemelerinin motor üzerindeki performansları incelenmiştir. Bu amaçla, kaplama yapılan pistonların mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. Şekil 7.1'de kaplama kesitlerinin optik mikroskop (om) görüntüleri verilmiştir.

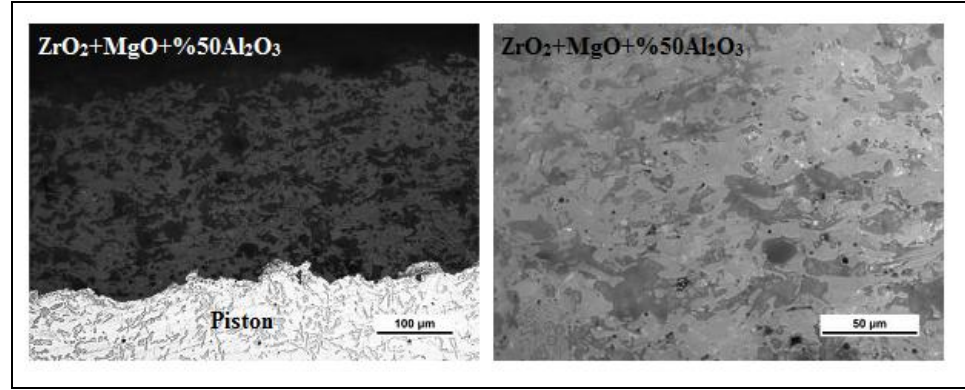


(a)

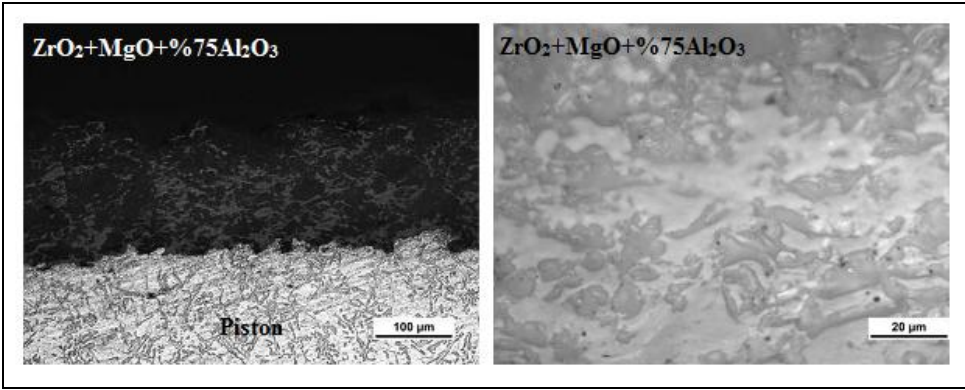
Şekil 7.1. Kaplama kesitlerinin optik mikroskop (om) görüntüleri a) ZrO_2+MgO b) $ZrO_2+MgO + \%25Al_2O_3$, c) $ZrO_2+MgO + \%50Al_2O_3$ d) $ZrO_2+MgO + \%75Al_2O_3$ e) Al_2O_3 .



(b)

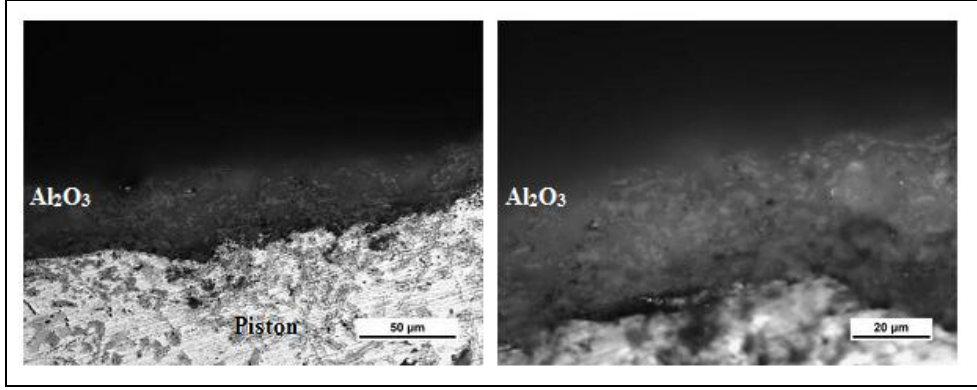


(c)



(d)

Şekil 7.1. (devam ediyor).

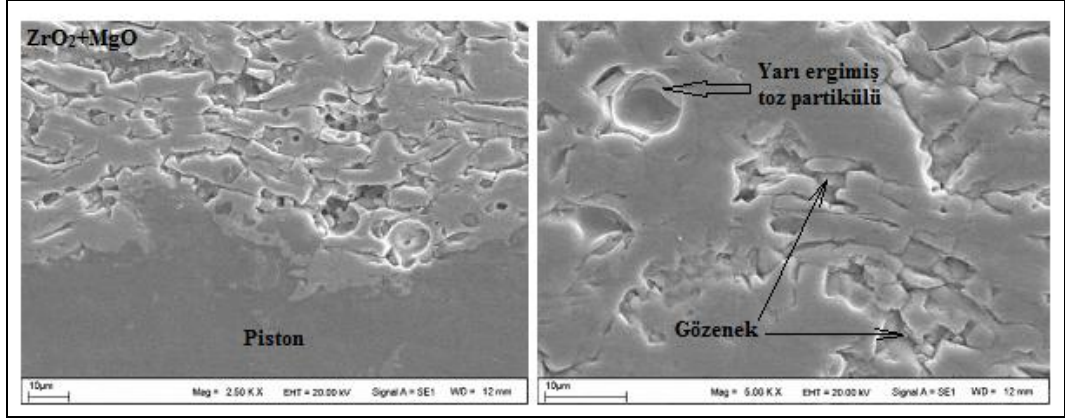


(e)

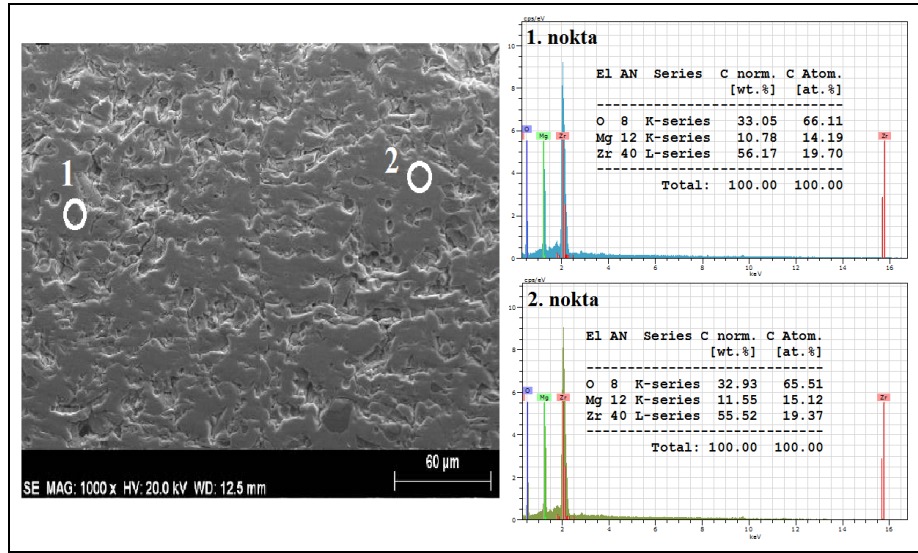
Şekil 7.1. (devam ediyor).

Deneysel çalışmalar kapsamında Piston yüzeylerine ZrO_2+MgO , $ZrO_2+MgO+%25Al_2O_3$, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$, $ZrO_2+MgO+%75Al_2O_3$ ve Al_2O_3 tozların plazma püskürtme sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1'de verilen optik mikroskopların görüntüleri incelendiğinde, kaplama işlemleri sonrasında pistonların yüzeylerindeki kaplama kalınlıklarının 150-300 µm arasında değiştiği anlaşılmaktadır.

Gözeneklilik, plazma spray kaplamalarda sıklıkla görülen bir durumdur. Kaplama tabakasının bu şekilde gözenekli olmasının nedeni, kaplama süresiyle ilişkilidir. Kaplama süresi kısa tutulduğunda, kaplama malzemelerinde tam ergime ve sinterleşme sağlanamamasından kaynaklanmaktadır. En düşük gözeneklilik miktarı, mikroyapı görüntülerinden de anlaşıldığı gibi, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ ile kaplanan A3 kodlu numunelerde tespit edilmiştir. Kaplama tabakaları ve kaplama yapılan malzeme ara yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelendiğinde, herhangi bir çatlak ve oksitlenme olmadığı görülmektedir (Şekil 7.2) A5 kodlu Al_2O_3 ile kaplanan pistonumuzda çok daha ince bir kaplama tabakası elde edilmiştir.

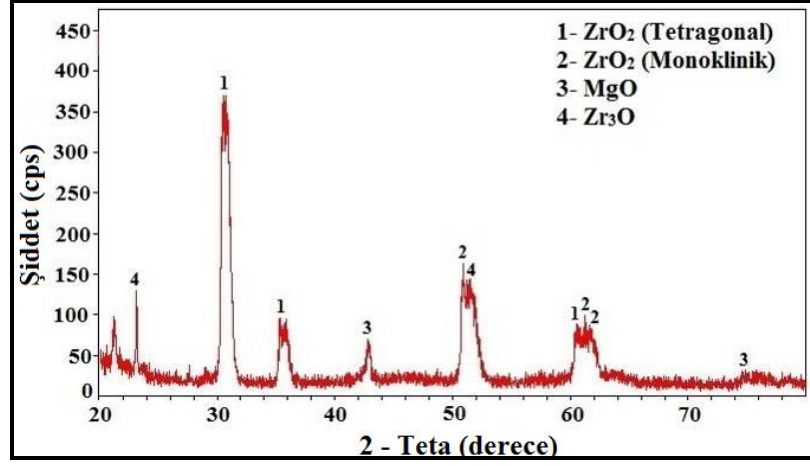


Şekil 7.2. ZrO₂+MgO kaplı numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 7.3. ZrO₂+MgO kaplanan numunenin EDS analizi sonuçları.

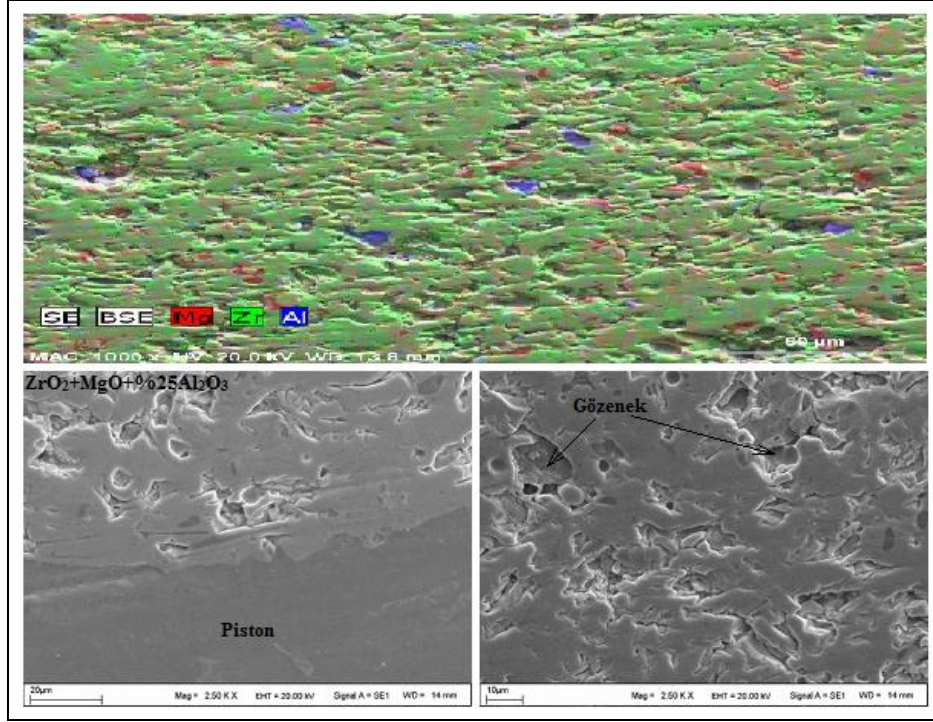
Piston yüzeyine ZrO₂+MgO kaplanan A1 kodlu numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 7.2'de, EDS analizleri Şekil 7.3'de verilmiştir. EDS analizi sonuçları incelendiğinde, Zr, Mg, ve O elementlerinin olduğu tespit edilmiştir. Şekil 7.3'de verilen 1. noktadaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça % 56,17 Zr, %33,05 O, %10,78 Mg, ve 2. noktadaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça %55,52 Zr, %32,93 O, %11,55 Mg olduğu anlaşılmaktadır. EDS analizi sonucunda elde edilen bu değerler, kaplama tabakasının Zirkonyum Oksit ve Magnezyum Oksitten oluştuğunu göstermektedir. Şekil 7.4'de verilen X-ışını kırınımı (XRD) analiz sonucunda EDS analizi sonuçlarını doğrulamaktadır.



Şekil 7.4. ZrO_2+MgO kaplanan numunelerin XRD deney sonuçları.

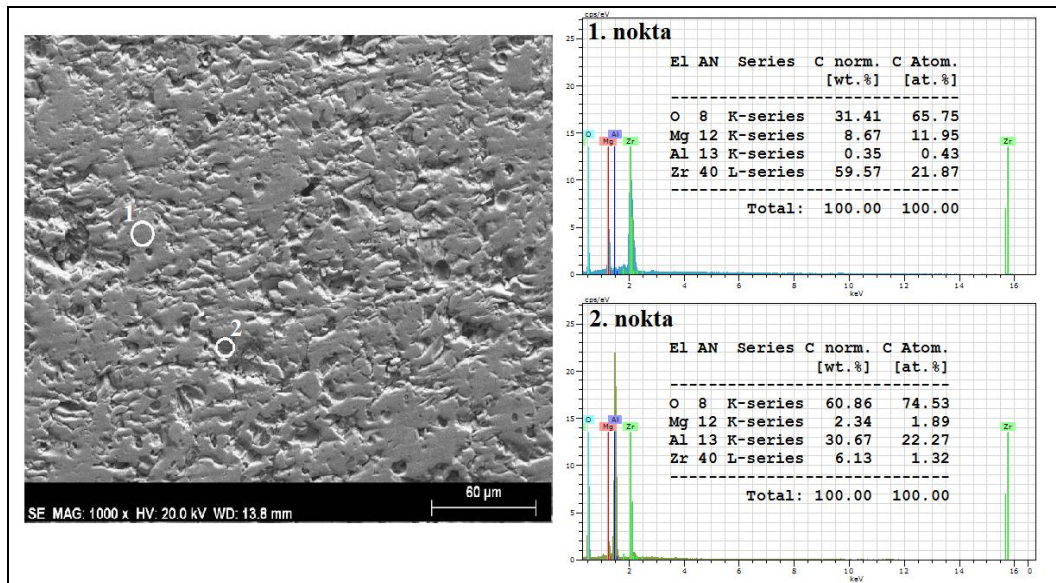
Şekil 7.4'de verilen XRD paternleri incelendiğinde yapıda ZrO_2 (Tetragonal), ZrO_2 (Monoclinic), bileşikleri tespit edilmiştir. ZrO_2 (Tetragonal) ve ZrO_2 (Monoclinic) fazlarının oluşma nedeni, atmosferik basınca bağlı olarak monoclinic yapının 1170 °C'ye kadar kararlı olmasıdır. Bu sıcaklıkta monoklinik faz (m-faz) tetragonal faza (t-faz) dönüştüğü ve oluşan t-faz ile 2370 °C'ye kadar kararlıdır [56,153]. Bununla birlikte XRD analiz sonucunda MgO, Zr_2O , Zr_3O fazlarının olduğu da belirlenmiştir.

Şekil 7.5'de $ZrO_2+MgO+%25Al_2O_3$ ile kaplanan A2 kodlu numunenin kaplama tabakasına ait elementel dağılım ve SEM görüntüleri verilmiştir.



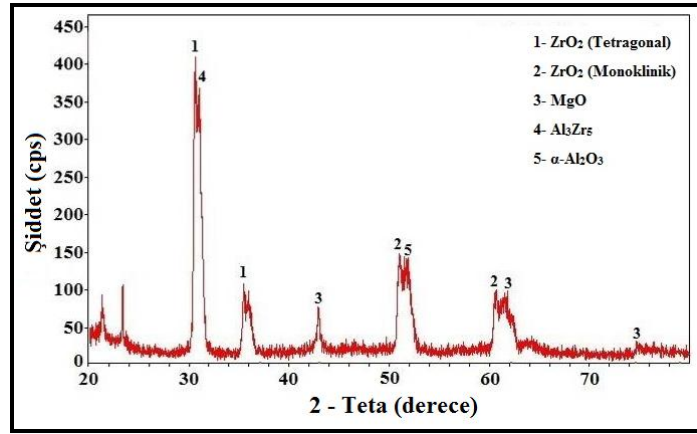
Şekil 7.5. $ZrO_2+MgO+%25Al_2O_3$ kaplamanın element haritası ve SEM görüntüsü.

Şekil 7.5'de verilen görüntüler incelendiğinde $ZrO_2+MgO+%25Al_2O_3$ kaplı numunede gözenek miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi gözeneklilik, plazma spray kaplamalarda görülen bir durumdur [154-156]. Ayrıca SEM görüntülerinden kaplamalarda boşluk, çatlak ve oksitlenme olmadığı da anlaşılmaktadır.



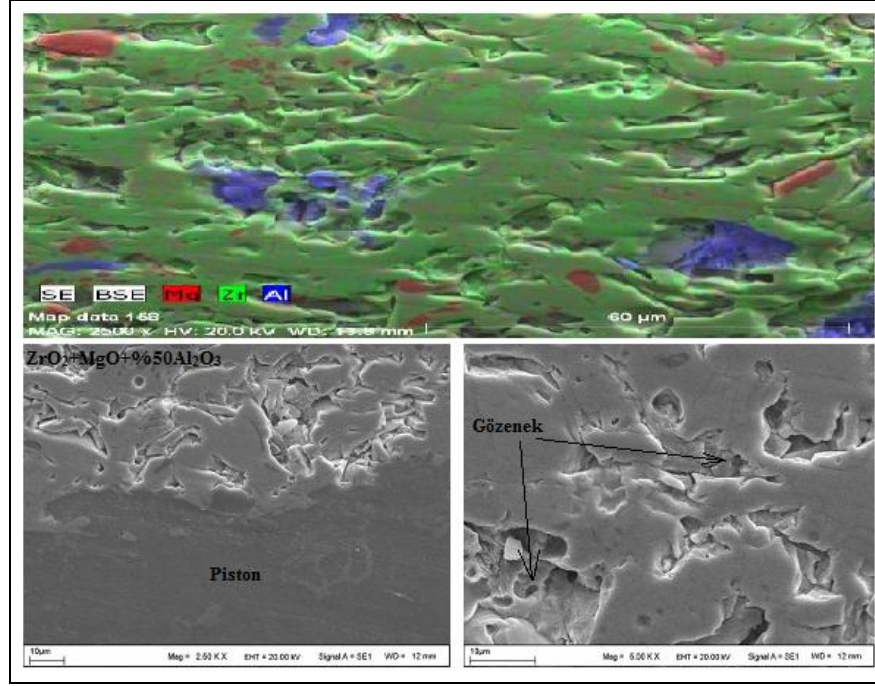
Şekil 7.6. $ZrO_2+MgO+%25Al_2O_3$ kaplanan numunenin EDS analizi sonuçları.

Şekil 7.6'da verilen EDS analizi sonuçlarında, yapıda Zr, Al, Mg, ve O elementlerinin olduğu belirlenmiştir. Şekil 7.6'da 1. noktasındaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça % 59.57 Zr, % 0,35 Al, %8.67 MgO, %31.41 O ve 2. noktasındaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça %6.13 Zr, % 30.67 Al, %2.34 MgO, %60.86 O fazlarının olduğu belirlenmiştir. 1'inci nokta EDS'de Zr ağırlıklı olan bölgeden, 2'inci nokta EDS'de ise Al kodlu numunenin ağırlıklı bölgesinin EDS analizi sonucudur. O miktarının yüksek olması; Zr ve Al malzemelerin bileşik sağlamasına olanak vermiştir. Şekil 7.7'deki XRD analizlerinde de bu durum teyit edilmektedir.

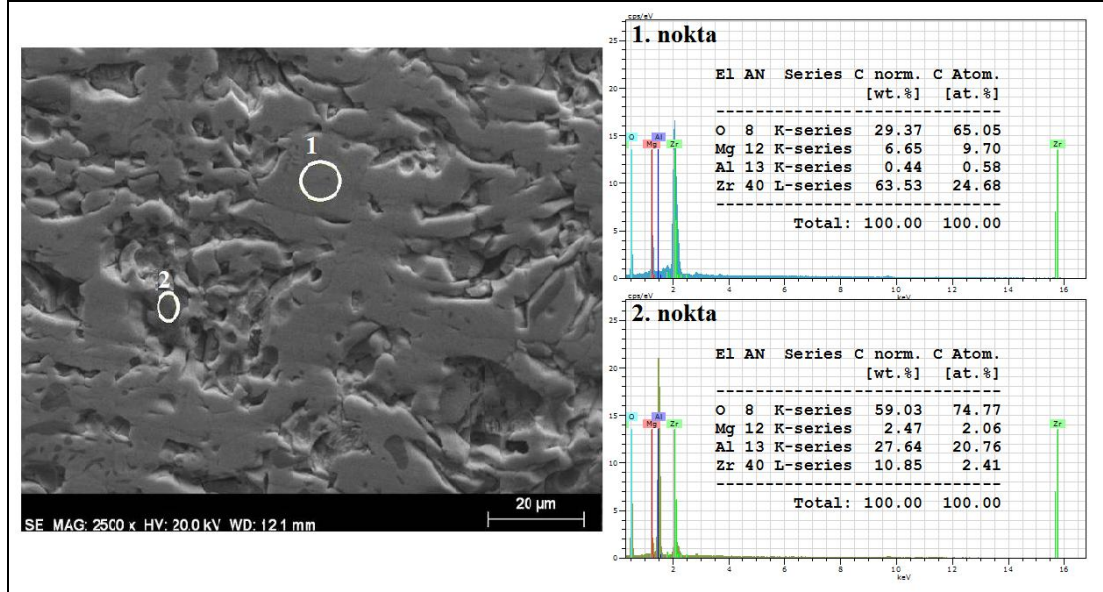


Şekil 7.7. $ZrO_2+MgO+%25Al_2O_3$ kaplama kesitinin XRD deney sonuçları.

Şekil 7.7'de XRD analizleri incelendiğinde yapıda ZrO_2 (Tetragonal), ZrO_2 (Monoclinic), MgO, Al_3Zr_5 ve $\alpha-Al_2O_3$ fazlarının olduğu anlaşılmaktadır. Bileşikler genel olarak oksijene bağlı bileşik oluştursa da, Alümina ve Zirkonya kendi içinde faz dönüşümüne uğradığı görülmektedir. Al_3Zr_5 fazı, Al-Zr ikili faz diyagramından [157] da anlaşıldığı gibi bir yüksek sıcaklık fazıdır. İkili faz diyagramında katılma sıcaklıklarına bağlı olarak, Al_3Zr_5 ve farklı intermetalik fazlar oluşturabilmektedir [158,159]. Şekil 7.8'de $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamanın elementel dağılım ve SEM görüntüsü verilmektedir.



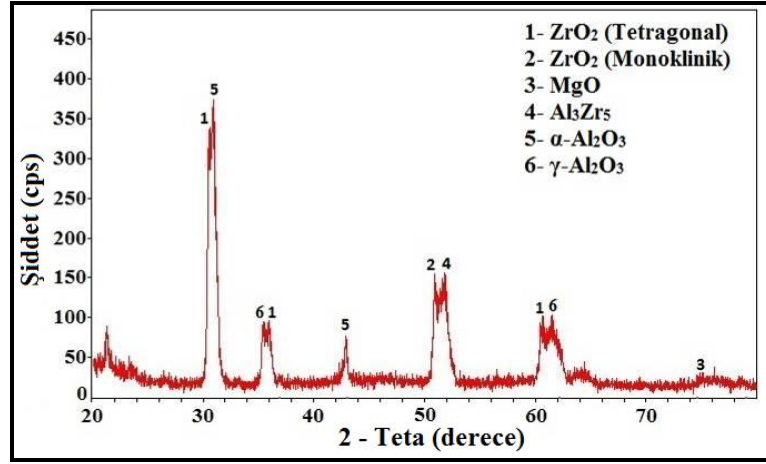
Şekil 7.8. $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamanın element haritası ve SEM görüntüleri.



Şekil 7.9. $ZrO_2+MgO+%50$ kaplanan numunenin EDS analizi sonuçları.

Şekil 7.8'de $ZrO_2 + MgO + %50 Al_2O_3$ tozu ile kaplanan pistonun kaplama tabakasına ait element haritası ve SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.9'da kaplama tabakasından alınan SEM mikroyapı görüntüsündeki EDS'si alınan bölgeler ve analiz sonuçları görülmektedir. $ZrO_2 + MgO + %50 Al_2O_3$ tozu ile kaplanan numunenin kaplama tabakasında Şekil 7.9'un 1. noktasındaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça

%63.53 Zr, %29.37 Mg, %0.33 Al, %29.37 O ve 2. noktasındaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça %10.85 Zr, %0.33 Al, %11.55 Mg, %32.93 O elementleri tespit edilmiştir. Bu değerler, kaplama tabakasının Zirkonyum oksit, Magnezyum Oksit ve alüminyum oksit bileşiklerinden oluştuğunu göstermektedir. Bu bileşikleri, Şekil 7.10'de verilen bu numuneye ait XRD analiz verileri doğrulamaktadır.



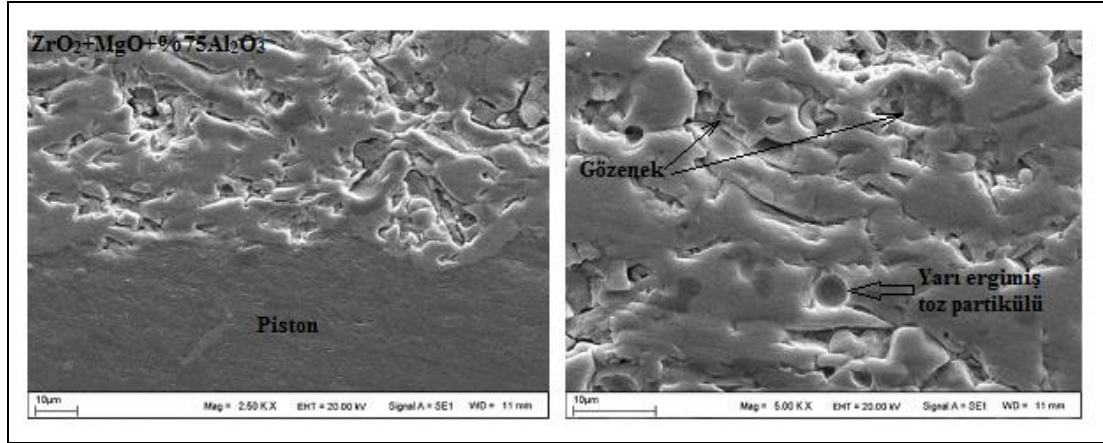
Şekil 7.10. $ZrO_2+MgO+%50 Al_2O_3$ kaplama kesitinin XRD deney sonuçları.

$ZrO_2+MgO+%50 Al_2O_3$ tozu ile kaplanan numunenin kaplama tabakasından alınan XRD analizi Şekil 7.10'da görülmektedir $ZrO_2+MgO+%50 Al_2O_3$ tozu ile kaplanan numunede, ZrO_2 (Tetragonal), ZrO_2 (Monoclinic), MgO, Al_3Zr_5 , Al_3Mg_2 , $\alpha-Al_2O_3$ ve $\gamma-Al_2O_3$ bileşikleri tespit edilmiştir.

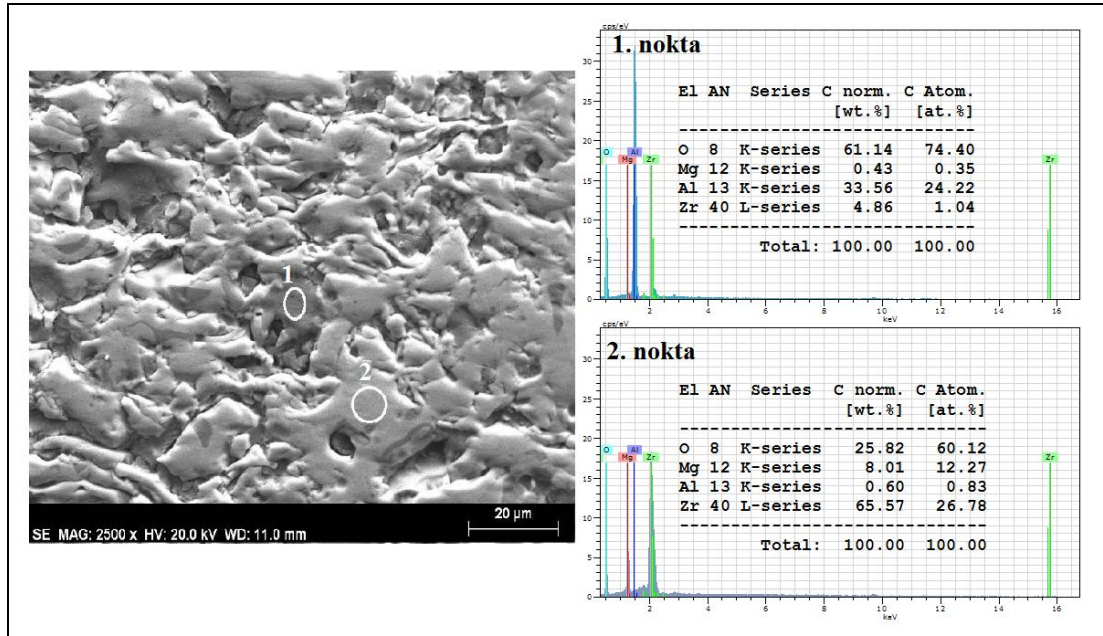
Daha öncede bahsedildiği gibi ZrO_2 (Tetragonal) ve ZrO_2 (Monoclinic) faz yapılarının oluşma nedeni atmosferik basınçta monoclinic yapı 1170 °C'ye kadar kararlı olur. Bu sıcaklıkta m-faz (monoclinic) t-faza (tetragonal) dönüşür ve oluşan t-faz, 2370 °C'ye kadar kararlı haldedir [56,160].

Al_3Zr_5 fazı, Al-Zr ikili faz diyagramından [157] da anlaşılacağı üzere bir yüksek sıcaklık fazıdır. İkili faz diyagramında katılma sıcaklıklarına bağlı olarak Al_3Zr_5 ve farklı intermetalik fazlar oluşabilmektedir [158,159].

α -Al₂O ve γ -Al₂O₃ nedeni plazma sprey kaplamadaki koşullara ve soğutma işlemi boyunca ısı koşullarına bağlıdır. Al₂O₃ yüksek sıcaklıklarda kalsine edildiğinde α formuna sahip hegzagonal kristal yapısına dönüşmektedir. Al₂O₃'ün diğer kristal yapısı ise γ -Al₂O₃ olarak gösterilen ortorombik sistemdir. Yine γ -Al₂O₃ 1200 °K sıcaklığı üzerinde α -Al₂O₃ yapısına dönüşmektedir [161,162].



Şekil 7.11. ZrO₂+MgO+%75 Al₂O₃ kaplı numunenin SEM görüntüsü.

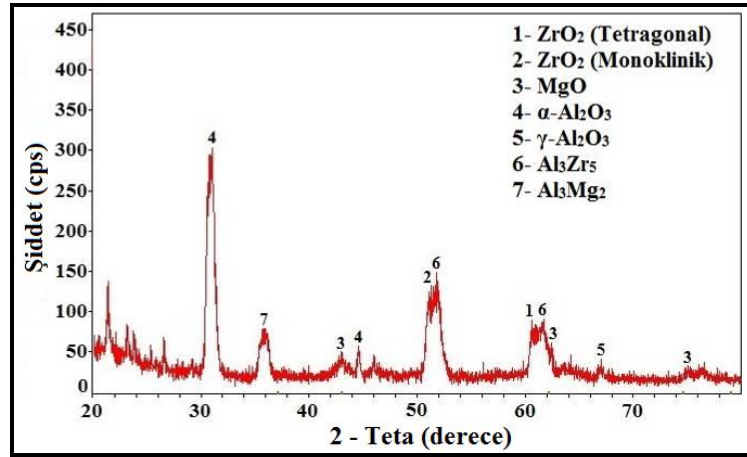


Şekil 7.12. ZrO₂+MgO+%75 Al₂O₃ kaplanan numunenin EDS analizi sonuçları.

Piston yüzeyine ZrO₂+MgO+%75 Al₂O₃ tozu kaplanan A4 kodlu numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 7.11'de, EDS analizleri Şekil 7.12'de verilmiştir. EDS analizleri

incelendiğinde Zr, Mg, Al ve O elementleri tespit edilmiştir. Şekil 7.12'de 1 noktasından alınan EDS analizi incelendiğinde, Al ve O elementlerinin yüksek miktarda olduğu görülmektedir. Şekil 7.12'de 1. noktasındaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça %4.86 Zr, %0.43 Mg, %33.56 Al, %61.14 O ve 2. noktasındaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça %65.57 Zr, %8.01 Mg, %0.60 Al ve %25.82 O elementleri tespit edilmiştir. Bu noktanın ağırlıkça Al₂O₃ bileşiğinden oluştuğu XRD sonucu ile doğrulanmaktadır. Kaplama tabakasında ZrO₂, MgO, Al₂O₃ elementlerinin de kaplama tabakası içerisinde oksitlerinin bulunabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

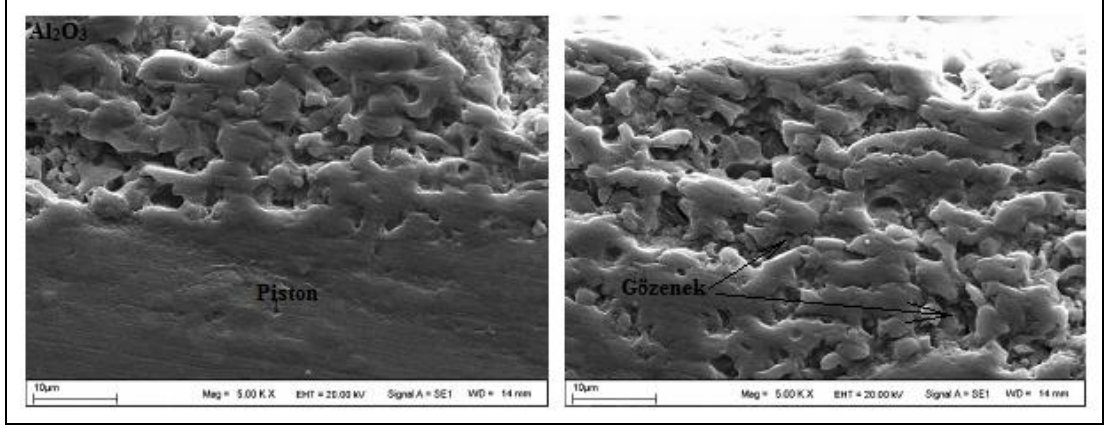
Ayrıca SEM görüntüsü incelendiğinde Alümina oranı arttıkça gözenekliliğin azaldığı görülmektedir. Fakat A3 kodlu numuneye oranla A4 kodlu numunenin gözenekliliğinin artmasının nedeni, plazma sprej kaplamadan kaynaklanmaktadır. Ayrıca literatür araştırmalarına dayanarak alümina kaplamalardaki lamel yapı Şekil 7.11'deki SEM görüntüsünde göze çarpmaktadır. Ayrıca SEM görüntüsünde görülen yuvarlak yüzey ise ergimemiş alümina tozudur. Plazma sprej kaplamalarda sık sık görülen bu yuvarlak yapı ergimemiş partikül olarak adlandırılır.



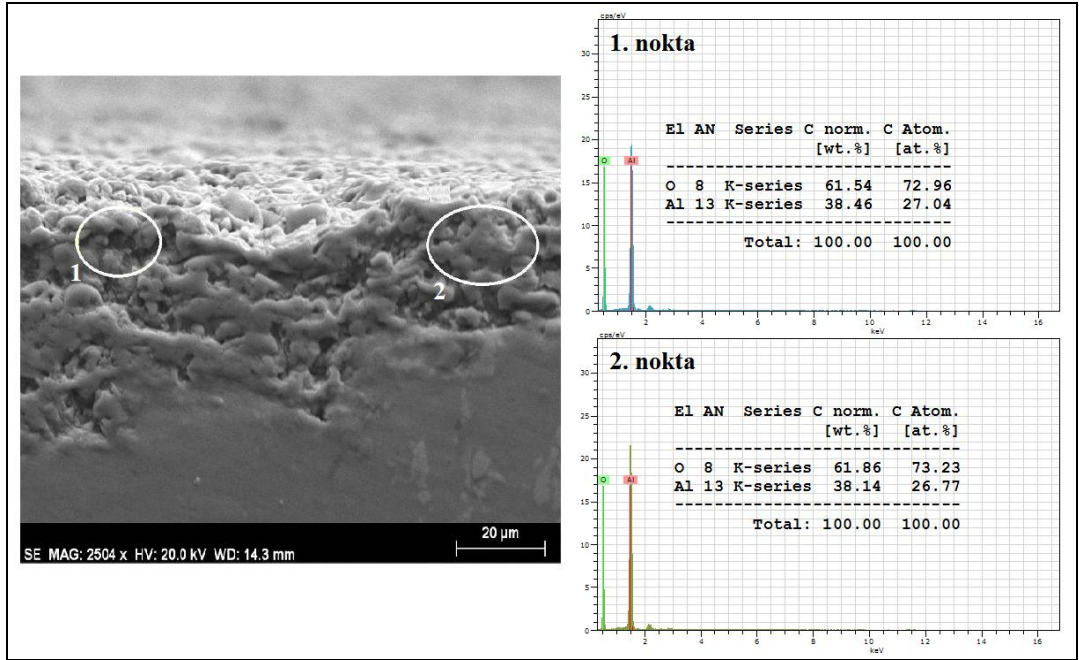
Şekil 7.13. ZrO₂+MgO+%75 Al₂O₃ kaplama kesitinin XRD deney sonuçları.

Şekil 7.13'de XRD analizleri incelendiğinde ZrO₂ (tetragonal), ZrO₂ (monoklinik), MgO, α-Al₂O₃, γ-Al₂O₃, Al₃Zr₅ ve Al₃Mg₂, bileşiklerine rastlanmıştır. Bileşikler genel olarak oksijene bağlı bileşik oluştursa da, Alümina ve Zirkonyumda kendi içinde bileşik oluşturmuştur. Al₂O₃ ilavesinin %75 gibi yüksek değere çıkmış olmasından dolayı, XRD analiz sonuçlarında Al elementinin farklı tür bileşikler oluşturduğu

görülmektedir. Al-Mg ikili faz diyagramından da anlaşılacağı üzere 450 °C sıcaklığın üzerindeki durumlarda Al_3Mg_2 intermetalik bileşiği oluşmaktadır [163].



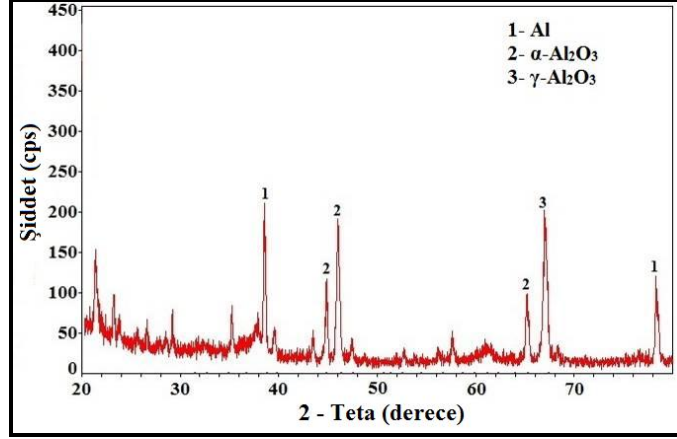
Şekil 7.14. Al_2O_3 kaplı numunenin SEM görüntüleri.



Şekil 7.15. Al_2O_3 kaplanan numunenin EDS analizleri sonuçları.

Piston yüzeyine Al_2O_3 ile kaplanan 5 kodlu numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 7.14'de ve EDS analizleri Şekil 7.15'de verilmiştir. EDS analizleri incelendiğinde Al ve O elementlerinin oranları görülmektedir. Şekil 7.15'de 1. noktasındaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça %61.54 O, %38.46 Al ve 2. noktasındaki EDS analizleri sonucunda ağırlıkça %61.86 O, %38.14 Al tespit edilmiştir. Bu noktalarda

muhtemel Al_2O_3 bileşiğinin olduğu XRD sonucuna dayanılarak söylenebilmektedir.

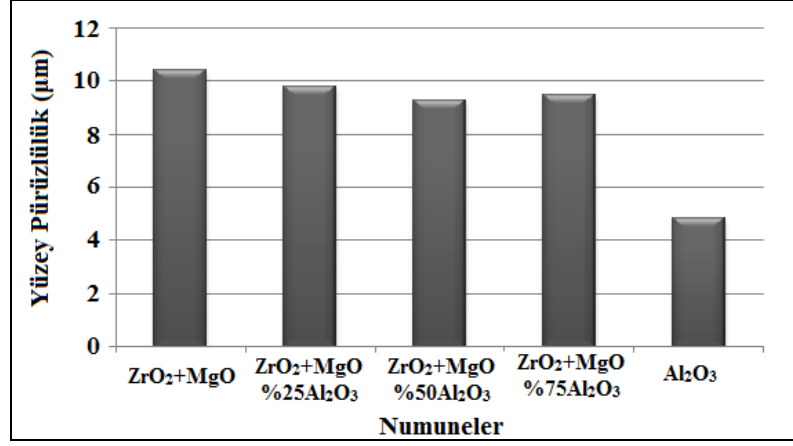


Şekil 7.16. Al_2O_3 kaplama kesitinin XRD deney sonuçları.

Şekil 7.16'da XRD analizleri incelendiğinde Al, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}$ ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, bileşiklerine rastlanmıştır. $\alpha\text{-Al}_2\text{O}$ ve $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ nedeni plazma sprey kaplamadaki koşullara ve soğutma işlemi boyunca ısı koşullarına bağlı olduğundan, Al_2O_3 yüksek sıcaklıklarda kalsine edildiğinde α formuna sahip hegzagonal kristal yapısına dönüşmektedir. Al_2O_3 'ün diğer kristal yapısı ise $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ olarak gösterilen ortorombik sistemi oluşturmuştur [161,162].

7.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK PARAMETRELERİ

A1, A2, A3, A4 ve A5 kodlu numunelerin kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Kaplama sonrası, kaplanmış malzemelerin yüzeylerine herhangi bir işlem uygulanmamıştır. Şekil 7.17.'de kaplamaların yüzey pürüzlülük değerlerini gösteren grafik verilmektedir.

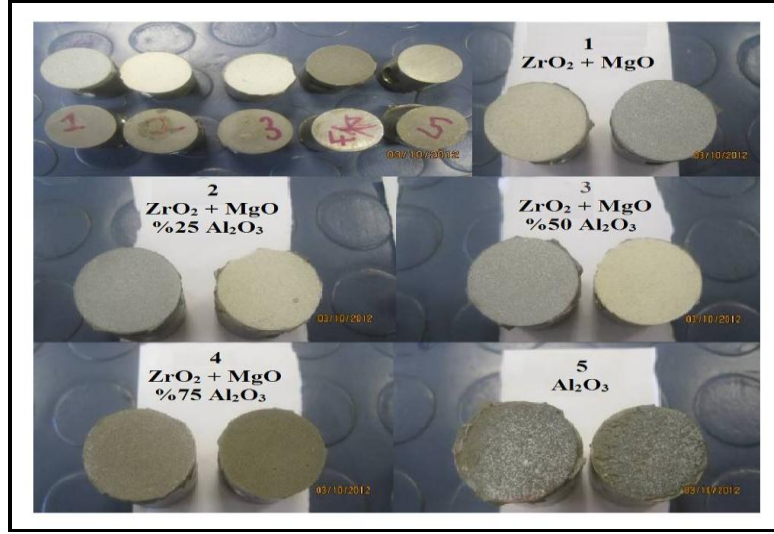


Şekil 7.17. Deney numunelerine ait yüzey pürüzlülük test grafiği.

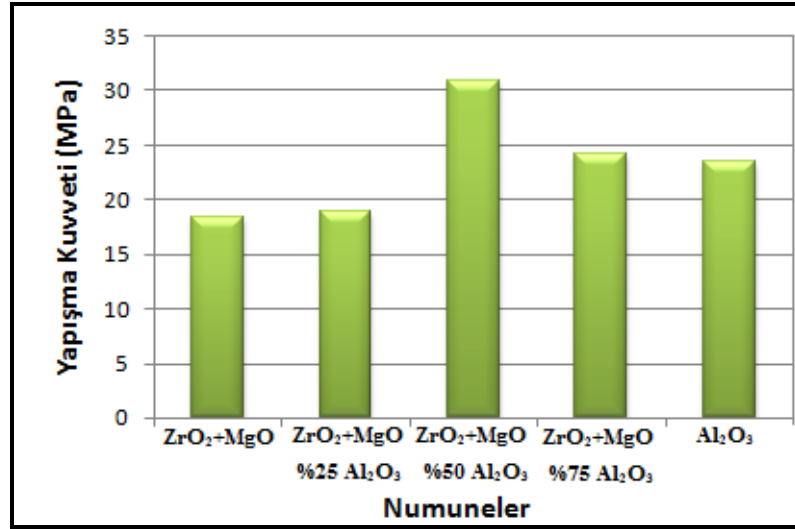
Al₂O₃ oranı arttıkça yüzey pürüzlülük değeri azalmıştır. Fakat A2 kodlu numunede pürüzlülük değerinin düşük çıkmasının nedeni, gözeneklilik miktarının az olduğundan kaynaklandığı düşünülmektedir. A1 kodlu numunede yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek çıkmasının nedeni ZrO₂+MgO oranı arttıkça sinterleşmesi kötüleşmekte ve bu da yüzey pürüzlülüğünün bir miktar yükselmesine neden olmaktadır. En düşük yüzey pürüzlülük değeri, 4,84 µm değer ile Al₂O₃ tozuyla kaplanan A5 kodlu numunede elde edilmiştir. ZrO₂ + MgO içerisine ilave edilen Al₂O₃ oranı arttıkça farklı yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri A1 kodlu numunede 10,43 µm olarak tespit edilmiştir. ZrO₂ + MgO ilaveli Al₂O₃ kaplamalı, A1 kodlu numunede 10,43 µm, A2 kodlu numunede 9,78 µm, A3 kodlu numunede 9,29 µm, A4 kodlu numunede 9,47 µm, pürüzlülük tespit edilmiştir. Al₂O₃ oranı arttıkça gözeneklilik miktarı düşmüştür, fakat A3 kodlu numunenin A4 kodlu numuneye oranla daha az pürüzlülüğünün olması gözeneklilik miktarının daha az olmasıyla ilişkilendirilmektedir.

7.3. YAPIŞMA MUKAVEMETİ TEST SONUÇLARI

Şekil 7.18'de A1, A2, A3, A4 ve A5 kodlu numunelerin yapışma mukavemeti test numunelerinin görüntüleri verilmiştir.



Şekil 7.18. Yapışma mukavemeti test numuneleri

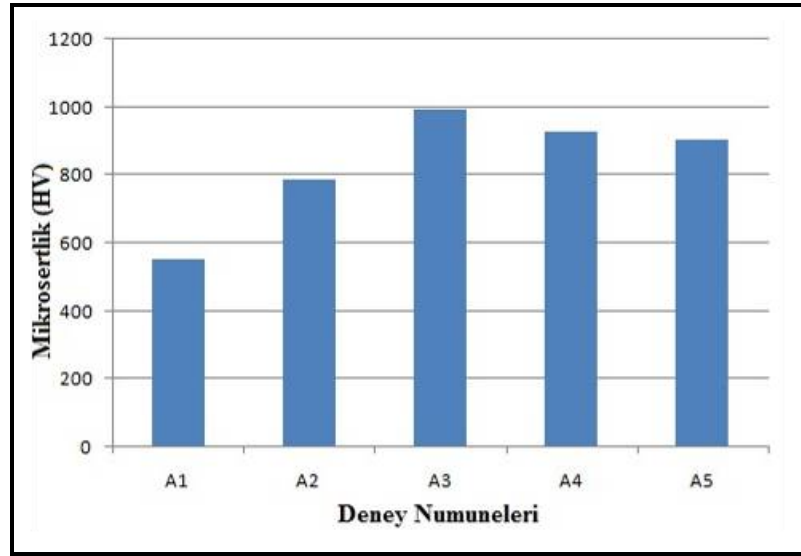


Şekil 7.19. Deney numunelerine ait yapışma mukavemeti test grafiği.

A1, A2, A3, A4 ve A5 kodlu numunelere ait çekme deneyi sonrası yapışma mukavemetini gösteren grafik Şekil 7.19'da verilmiştir. Deneyler Türk Hava Yolları A.Ş.'de ASTM C-633 yapışma mukavemeti test standartlarına göre yapılmıştır. Şekil 7.19 incelediğinde saf Al₂O₃ ile yapılan kaplamalarda 24,15 MP bir yapışma mukavemeti elde edilmiştir. A1 kodlu numune ile kıyaslandığında daha fazla bir yapışma mukavemeti elde edilirken, A4 kodlu ve A3 kodlu numuneye oranla daha küçük bir yapışma mukavemeti elde edilmiştir. Genel olarak baktığımızda yapışma mukavemetinde en iyi sonucu A3 kodlu numune vermiştir. Al₂O₃ ilavesi ile yapışma

mukavemetinin arttığı görülmektedir. $ZrO_2 + MgO + \%50 Al_2O_3$ tozu ile gerçekleştirilen kaplamalarda 30,83 MPa'lık en yüksek yapışma mukavemeti elde edilmiştir. $\%75 Al_2O_3$ ilave edilerek kaplanan numuneye göre, $\%50 Al_2O_3$ ilave edilerek kaplanan numunenin yapışma mukavemetindeki artış, gözenekliliğin daha az olmasından kaynaklanmaktadır.

7.4. YÜZEY SERTLİK TEST SONUÇLARI



Şekil 7.20. Deney numunelerine ait mikrosertlik grafiği.




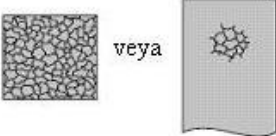

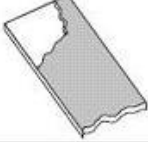



Şekil 7.20'de ZrO_2+MgO ve Al_2O_3 ilaveli tozlarla gerçekleştirilen kaplamalara ait mikrosertlik sonuçları görülmektedir. $ZrO_2 + MgO$ ile kaplanan numunede 550 $HV_{0,02}$ ile 580 $HV_{0,02}$, $ZrO_2 + MgO + \%25 Al_2O_3$ ile kaplanan numunede 770 $HV_{0,02}$ ile 800 $HV_{0,02}$, $ZrO_2 + MgO + \%50 Al_2O_3$ ile kaplanan numunede 950 $HV_{0,02}$ ile 1000 $HV_{0,02}$, $ZrO_2 + MgO + \%75 Al_2O_3$ kaplamalı numunede 850 $HV_{0,02}$ ile 950 $HV_{0,02}$ ve Al_2O_3 kaplamalı numunede 850 $HV_{0,02}$ ile 900 $HV_{0,02}$ arasında değişen mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Kaplamalarda ilave edilen Al_2O_3 oranının artmasıyla, mikrosertlik değerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Fakat $ZrO_2 + MgO + \%75 Al_2O_3$ ile kaplanan numunede Al_2O_3 oranının yüksek olmasına rağmen, $ZrO_2 + MgO + \%50 Al_2O_3$ ile kaplanan numunedeki gözeneklilik miktarının az olmasından dolayı, $\%50 Al_2O_3$ ilave edilerek kaplanmış numunede daha yüksek mikrosertlik

değeri tespit edilmiştir. En yüksek sertlik değeri $ZrO_2 + MgO + \%50 Al_2O_3$ ile kaplanan A3 kodlu numunede 996 $HV_{0,02}$ olarak llmştir.

7.5. TERMAL şOK TEST SONUÇLARI

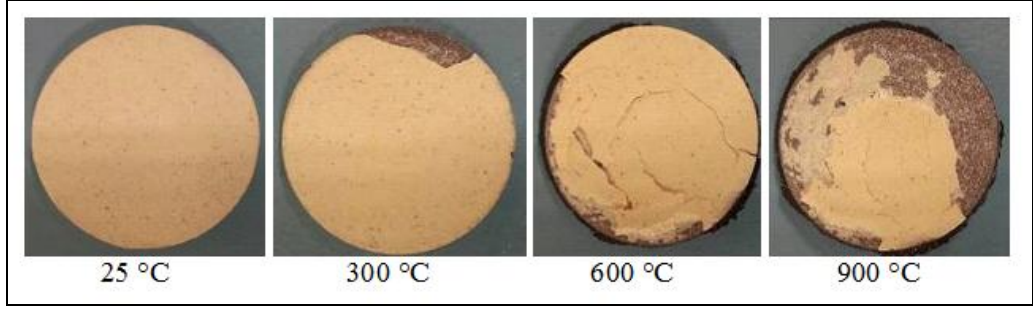
Yüksek alışma sıcaklıklarına çıkıldığında, TBK (Termal Bariyer Kaplama) uygulanmış parçaların ana malzemeleri ile kaplama katmanları arasındaki termal genleşme farklılıkları bu bölgede termal gerilimlere neden olmaktadır. Belirli bir süre boyunca çalışma sıcaklıklarında kalındığında bu gerilmeler belirli bir oranda azalmaktadır. Dolayısıyla maksimum gerilme, parçanın ilk ısınma ve soğuma zamanlarında meydana gelmektedir [164].

Literatürde plazma spre y kaplanmış numunelere uygulanan, termal şok testleri sonucunda, hasar mekanizmaları çerçevesinde farklı hasar tipi tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar hasar mekanizmaları ile açıklanmaya çalışılmıştır [86,165].

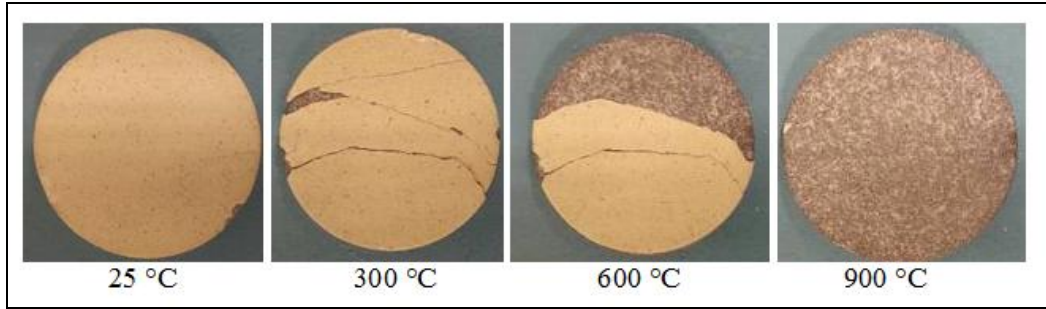
Üst tabaka komple delaminasyon	CD	
Üst tabaka arayüzey çatlağı	IC	
Üst tabaka dikey çatlak	VC	
Üst tabaka kalınlığı boyunca segmentasyon çatlağı	SC	
Üst tabaka alev alanı delaminasyonu	FD	
Üst tabaka kenar alev alanı delaminasyonu	ED	
Üst tabakanın numune kenarından dökülmesi	NO	
Şiddetli ara tabaka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

Sekil 7.21. Termal şok testleri sonucu tespit edilen hasar tipleri [165].

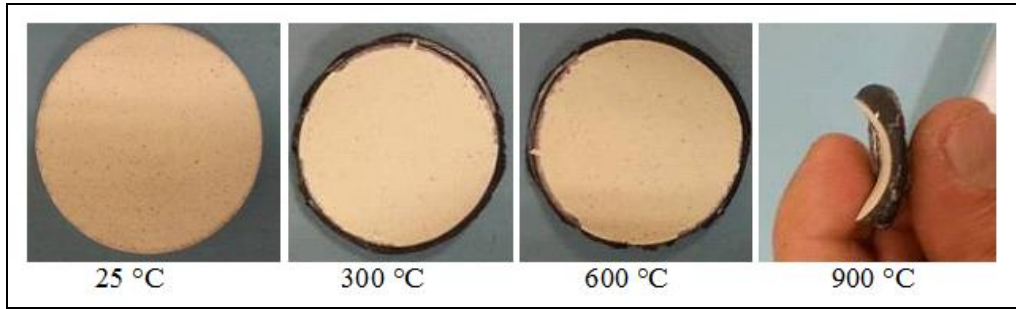
Numunelerin termal şok dayanımları, sabit çevrim sayısı sonunda kaplama üzerinde meydana gelen hasarların, Şekil 7.21'de belirtilen hasar tiplerine göre yorumlanmıştır.



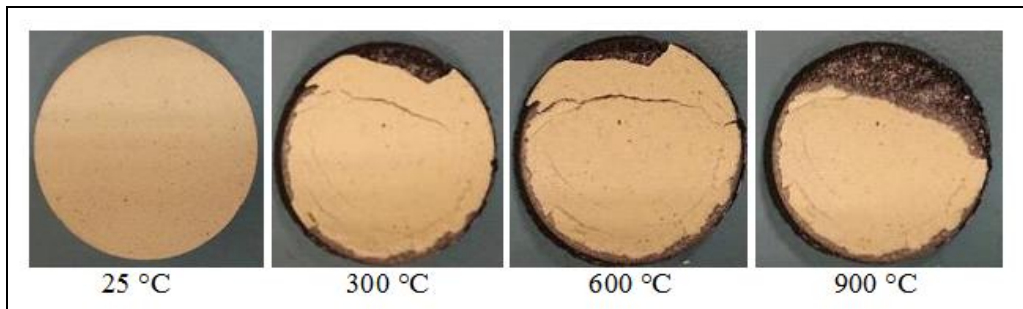
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 7.22. Kaplama numunelerinin termal şok testi sonrası görünüşleri
a) ZrO_2+MgO b) $ZrO_2+MgO + \%25Al_2O_3$, c) $ZrO_2+MgO + \%50Al_2O_3$ d) $ZrO_2+MgO + \%75Al_2O_3$.

Şekil 7.22'de numunelerin termal şok test görünüşleri verilmiş ve bu görüntüler doğrultusunda Şekil 7.21'e göre termal şok test sonuçları değerlendirilmiştir.

A1 kodlu numune incelendiğinde, üst tabaka kenar alev aşınmasına rastlanmıştır. Bunun nedeni genellikle alt malzemenin yüksek sıcaklıkla temas sonucu, alt malzemenin sıcaklıkla temas eden kısmının hafifçe eğilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir [86]. A2 kodlu numunede yüzey çatlaklığı 300 °C'de kendini göstermeye başlamış, 600 °C'de ise tamamen üst tabaka kalkmıştır. Bunun nedeninin kaplama tabakasındaki gözeneklilik miktarından olduğu düşünülmektedir. Gözeneklilik miktarının artışı ile yüzeyde bir tutunma gerçekleşmemesi ve alt tabaka ile kaplama malzemelerin genleşme katsayısının farklılığından dolayı izafi hareketlilikten (delaminasyon), kaplama tabakası ile kaplama yapılan malzeme arasında yüzey ayrışmasına neden olduğu düşünülmektedir. A3 kodlu numune incelediğinde beş çevrim (300 °C, 600 °C, 900 °C, 900 °C ve 900 °C) sonucu kaplama tabakasından herhangi bir kopma yada çatlak oluşmadığı, kaplama yapılan malzemenin ise eriyerek içe bükümlü eğilerek kaplama malzemesini yüzeyinden ayırmadığını, bunun da yapışma mukavemeti test sonuçlarıyla tutarlı olduğu görülmektedir. Yapışma mukavemeti test sonuçlarında gözeneklilik miktarının azalmasıyla yapışma mukavemetinin iyileştiği görülmektedir. Kapsama tabakasının kalınlığı ve gözeneklilik miktarı, malzemenin termal şok dayanımını etkilemektedir [164]. Metalografik incelemeler sonucunda en az gözenekliliğin, A3 kodlu numunede olduğu belirtilmiştir. Kapsama esnasında, pürüzlendirilmiş yüzey üzerine kaplanacak tozun çarpması ve kaplanacak alt malzeme yüzeyine mekanik olarak kilitlenmesi yapışma mukavemet değerini etkilemektedir. Bu nedenle kapsama tabakasındaki gözenek miktarı artışının alt malzemeye olan tutunma yüzey alanının düşmesine neden olduğu, dolayısıyla yapışma mukavemet değerini düşüreceği düşünülmektedir. Gözenek miktarına bağlı olarak gerçekleşen bu düşüşün termal şok esnasında da etkili olduğu düşünülmektedir. Gözenek miktarının azalması ile alt malzeme ile kapsama tabakası arasında temas alanı artacağından 300 °C'den, 600 °C ve 900 °C'ye ani sıcaklık çıkışlarında meydana gelen termal şok etkilerinde, en iyi sonucu A3 kodlu numunenin verdiği görülmüştür. A4 kodlu numunenin termal şok dayanımını incelediğinde, üst tabaka kenar alev alanı delaminasyonu görüntüsünü verdiği görülmektedir. A4 kodlu numunede gözeneklilik miktarı A3 kodlu numuneye oranla fazla olurken, A1 ve A2 kodlu numunelere oranla daha az olduğu, metalografik incelemelerde belirtilmiştir. Bu nedenle kenar alev delaminasyonunun A1 ve A2 kodlu numunelere oranla daha düşük olduğu görülmektedir.

Yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilen seramik malzemeler, ani sıcaklık değişimiyle oluşan termal gerilmelere karşı hassastır. Mekanik yüklerle birleşen termal gerilmelerin büyüklüğü malzemelerin taşıyabileceği gerilmeleri kabul edilemez düzeylere ulaştırılabilmektedir [166,167]. Termal şok testlerinde genellikle kare ve dikdörtgen numunelerde hasar, öncelikle köşe kısımlarından küçük küçük kopmalar şeklinde başlayıp, artarak devam etmektedir. Bunun sonunda numune kenarlarındaki üst tabaka kaplamasının dökülmesi ile (Nibbling off) ve numunenin ortasında kaplamanın kaldığı bir yapı oluşmaktadır [86]. Genel olarak incelendiğinde A1 ve A4 kodlu numunede bu durum gözlenmiştir. A2 kodlu numunede ise yapışma mukavemetinin düşüklüğüne bağlı olarak yüzey delaminasyonu yaşanmış ve kaplama malzemeye tam yapışmamıştır. Metalografik incelemede gözeneklilik miktarının en az olduğu A3 kodlu numune, termal şok testindeki en iyi sonuç tespit edilmiştir.

7.6. KAPLAMA YAPILMIŞ MOTORUN PERFORMANS TEST SONUÇLARI

Bu çalışmada, içten yanmalı bir dizel motorunun çalışma şartları yeterliliğinin tespit edildiği, hareketli deney şartlarında gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte değişik çalışma koşulları, (tozlu, kavisli, eğimli v.b.) yol şartları değişimleri bu deneyler sayesinde açıklığa kavuşturulabilmektedir. İçten yanmalı dizel motorunda yapılan bu deney, motorun değişik hız ve yük şartlarındaki çalışmasını ortaya koymaktadır. Motorun yanma odasında gerçekleşen değişik yanma koşullarının, ısıdan üretilen iş ve gücün çalışma şartlarındaki değişikliğini göstermektedir. Aynı şekilde yanma odasının seramik malzemeyle kaplanması, yanma odasındaki ısı transferini etkileyeceğinden motorun performans, güç, özgül yakıt sarfiyatı ve egzoz emisyonlarında bir takım değişikliğine neden olmaktadır. Bu nedenle yapılan bu deneyde ise seramik kaplamalı motorlar arasındaki performans ve egzoz emisyon değişimleri deneysel olarak araştırılacaktır.

7.6.1. Deneyin Yapılışı

Deneyle tam yük ve kısmi yük şartlarında içten yanmalı motor deney usullerine (TS-1231) göre yapılmıştır. Çalışma sıcaklığına getirilen motor, her bir devir için yaklaşık 10 dk. çalıştırılarak sabit devirlerdeki ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Deneyle, $ZrO_2 + MgO$, $ZrO_2 + MgO + \%25 Al_2O_3$, $ZrO_2 + MgO + \%50 Al_2O_3$, $ZrO_2 + MgO + \%75 Al_2O_3$, Al_2O_3 seramik tozu ile kaplı piston ve supaplar 1600 d/d' dan 2800 d/d'ya kadar 4 farklı devir aralığında ve 4 farklı yük kademesinde ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm aralıkları 1600, 2000, 2400 ve 2800 d/d da sabit gaz kolu konumu, değişik motor hızlarında ve sabit motor hızı, değişik gaz kolu konumunda yapılmıştır.

Yapılan bu ölçümlerde, ölçüm değerleri bilgisayarda excel programına atılarak hesaplamaları yapılarak grafiklere dönüştürülmüştür. Deney motorunun, döndürme momenti, efektif güç özgül yakıt tüketimi, ortalama efektif basınç, efektif verim değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerle birlikte egzoz emisyonları, HC, CO_2 , CO, NO_x ve is oranları değerleri yazılarak motor devrine göre grafiksel olarak hazırlanarak karşılaştırılmıştır.

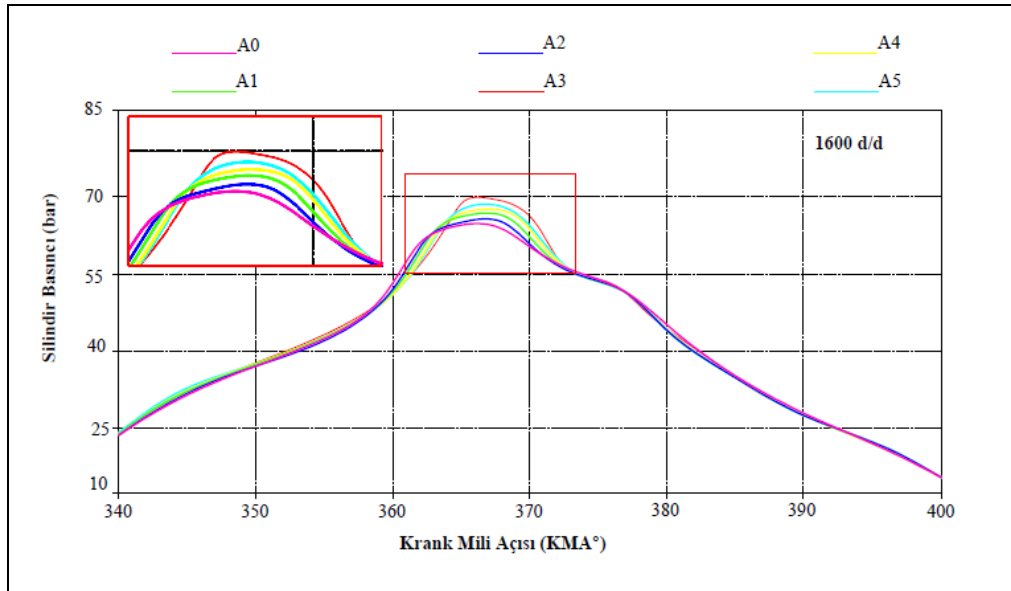
Deney motorunun, piston ve supap yüzeyine $ZrO_2 + MgO$ tozu ve bu toza farklı yüzde oranlarında ilave edilen Al_2O_3 ile yapılan kaplamaların, performans ve emisyon verileri, standart motor verileri ile karşılaştırılarak incelenmiştir.

7.6.2. Motor Hızının ve Kaplanmış Motor Pistonlarının Silindir Basıncına Etkisi

İçten yanmalı motorların silindir içerisinde oluşturdukları basınç itme gücü olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle içten yanmalı motorlar içten patlamalı motorlar olarak da tanımlanmaktadır [168]. Silindirler içerisinde pistonun sıkıştırma sonunda oluşan basınç, piston üzerine etki yaparak motorun momentini ve gücünü oluşturmaktadır. Silindirler içerisinde yanmayı daha iyi anlamak için silindir içerisindeki basıncın izlenmesi gerekmektedir.

Dizel motorlarda yanma reaksiyonları yüksek basınç ve sıcaklık altındaki yanma odasına, yakıt püskürtülür püskürtülmez başlar. Bununla birlikte reaksiyonun başlangıcındaki ilk kısa zaman dilimlerinde reaksiyonları 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 belirginleşmektedir [169].

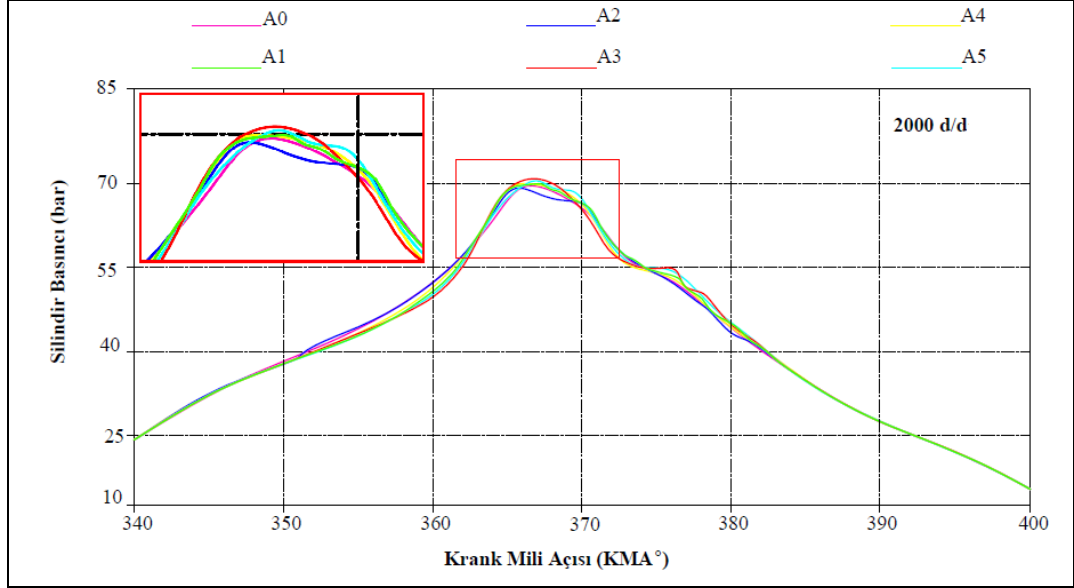
İçten yanmalı motorlarda motor gücünü oluşturan etken silindirler içerisine alınan yakıtın yanması sonucunda elde edilmiş yararlı iş ile ölçülmektedir. Silindirler içerisinde yararlı iş, ortalama indike basınç ile hesaplanmaktadır. Silindir içerisindeki basıncı oluşturan, yakıtın yanma sonu sıcaklığı ve silindir içerisindeki ani ısı artışıdır [170]. Burada motorun ürettiği kuvveti hesaplama yolu ile motor momentine çevrilmektedir. 1600, 2000, 2400 ve 2800 d/d'daki motor devirleri boyunca kaplamaların silindir içi basınçları ölçülmüştür. Şekil (7.23, 7.24, 7.25, 7.26,)da motor hızlarının; kaplanmış piston ve supapların motor silindir içerisindeki basınca etkileri görülmektedir.



Şekil 7.23. 1600 d/d'da kaplama yapılmış motorların silindir içi basınca etkisi.

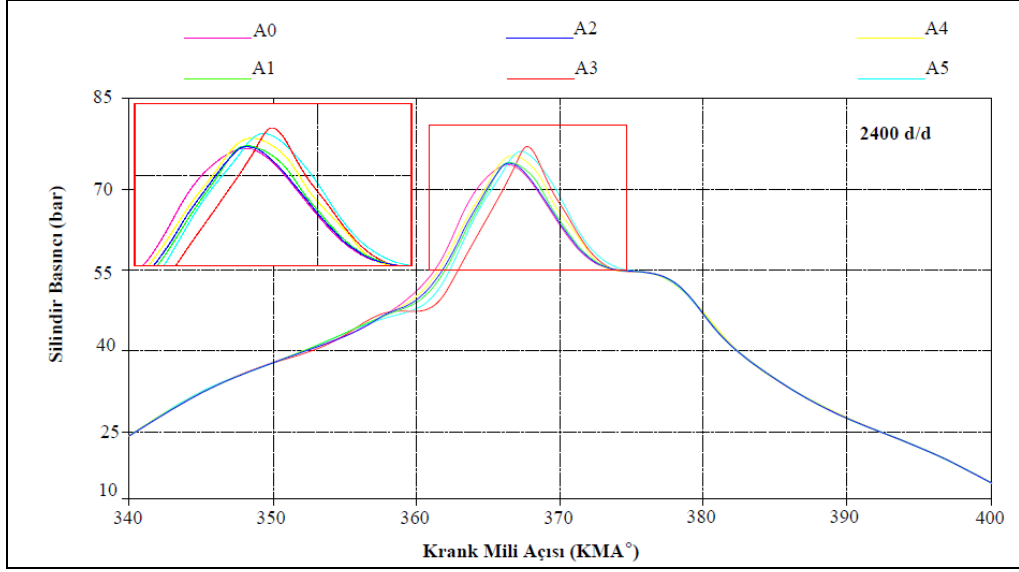
Şekil 7.23'de kaplama yapılmış motor parçalarının 1600 d/d'daki silindir içi basınç değişimleri incelenmiştir. Yanma zamanının başladığı andan itibaren kaplama

yapılmış motorlar standar motor ile kıyaslandığında birbirine yakın basınç değerleri görülmektedir. 1600 d/d'da yanma sonu sıcaklıklarının düşük olması silindir içi basıncı düşürmektedir. Kaplama yapılmış motorlar, standart motora oranla 1600 d/d'da daha yüksek basınç değeri görülmektedir. En yüksek basınç değeri A3 kodlu kaplamada görülmektedir. Standart motora oranla %3.8 oranında artış tespit edilmiştir.



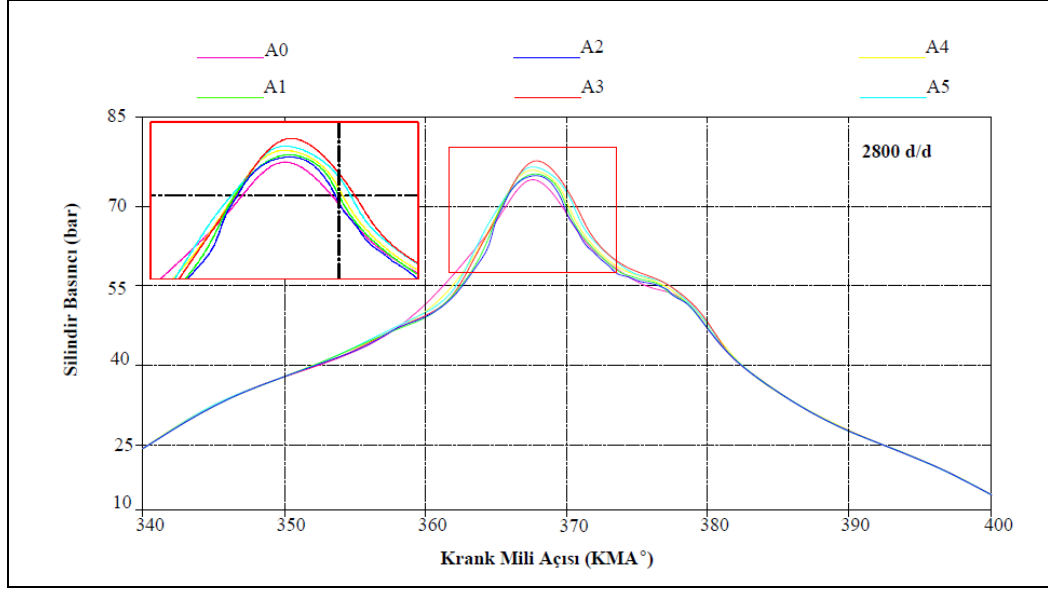
Şekil 7.24. 2000 d/d'da kaplama yapılmış motorların silindir içi basınca etkisi.

Şekil 7.24'de kaplama yapılmış motor parçalarının 2000 d/d'daki değişimleri incelenmiştir. Motor devrinin artmasıyla birlikte motor sıcaklıkları yükselmektedir. 2000 d/d'da yükselen motor sıcaklıkları ile silindir içi basınçlarda artmaktadır. Kaplama yapılmış motorlar, standart motora oranla 2000 d/d'da daha yüksek basınç değerleri görülmüştür. En yüksek basınç değeri A3 kodlu kaplamada standart motora oranla %4 oranında artış tespit edilmiştir.



Şekil 7.25. 2400 d/d'da kaplama yapılmış motorların silindir içi basınca etkisi.

Şekil 7.25'de kaplama yapılmış motor parçalarının 2400 d/d'daki değişimleri incelenmiştir. Kplama yapılmış motorların, standart motora oranla daha yüksek silindir içi basınç değerleri görülmüştür. En yüksek basınç değeri $ZrO_2 + MgO$ ilaveli Al_2O_3 %50 kaplı A3 kodlu numunede tespit edilmiştir. Metalografik incelemelerde kaplama yüzeyinde en az gözeneklilik miktarı ile daha iyi bir termal bariyer oluşmuştur. Kplama yapılmış motor parçaları soğutma sistemine giden ısı miktarını minimuma indirmektedir. Buda silindir içi sıcaklıkların artmasına dolayısıyla basınçın da yükseltmesine neden olmaktadır. En yüksek basınç değeri A3 kodlu kaplamada görülmüştür ve standart motora oranla %4.3'lük bir artış oranı tespit edilmiştir.



Şekil 7.26. 2800 d/d'da kaplama yapılmış motorların silindir içi basınca etkisi.

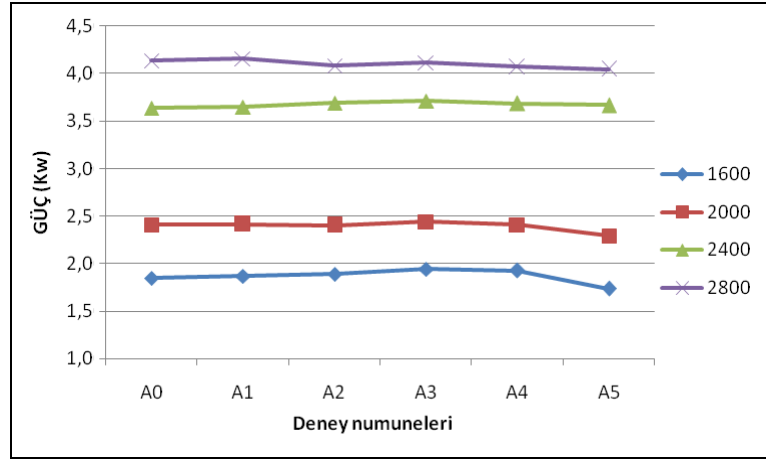
Şekil 7.26'da kaplama yapılmış motor parçalarının 2800 d/d'daki değişimleri incelenmiştir. 2800 d/d'da kaplamalı motorlarda sıcaklık artışıyla birlikte basınçta artış görülmüştür. Termal bariyerin en iyi olduğu A3 kodlu numunede en yüksek silindir içi basınç değeri görülmüştür. En yüksek sıcaklıklar 2800 d/d'da görülsede, 2400 d/d'ya oranla düşüş göstermiştir. Devrin artmasıyla motor sıcaklıkları aşırı yükselmekte bununla basıncı bir miktar azalttığı düşünülmektedir. 2800 d/d'da en yüksek basınç değeri A3 kodlu kaplamada görülmüştür. Standart motora oranla %4.2'lik bir artış tespit edilmiştir.

Düşük motor devrinde yapılan iş, yüksek motor devrinde çalışan motorlara oranla daha az olduğundan, sürtünmenin zamana bağlı azalması sıcaklığı düşürmekte ve basıncın düşük değerlerde görülmesine neden olduğu tahmin edilmektedir. Motor devrinin artmasıyla birlikte, motorda yapılan iş artmaktadır. Seramik kaplamalı motorda daha iyi bir termal bariyer oluşturmakta motor sıcaklığını yanma odasında tutmaktadır. Bununla birlikte yüksek devirlerde mekanik sürtünmeler de artmakta, sıcaklığın bir miktar daha yükselmesine neden olmaktadır. Buda silindir içi sıcaklıkların yükselmesiyle basıncı arttırmaktadır. Kaplama yapılan yanma odalarında termal bariyerden dolayı sıcaklık arttığından, yüksek devirlerde tutuşma gecikmesi zamanı ve vuruntu azalır. Dolayısı ile vuruntunun azalması iç basınç dalgalanmasını daha kararlı bir hale getirmektedir. Genel olarak silindir içi basınç

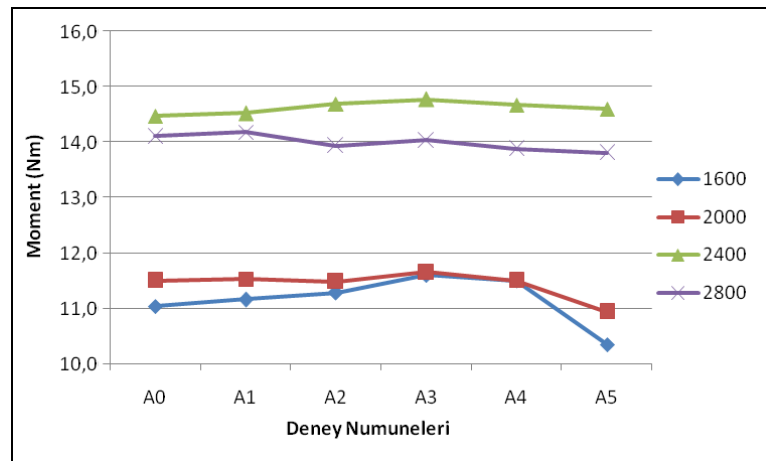
değerleri incelendiğinde, en düşük silindir içi basınç 1600 d/d'da, en yüksek silindir içi basınç ise 2400 d/d'da görülmüştür. Silindir içi basınç testleri incelendiğinde, 2400 d/d'da standart motorla A3 kodlu kaplamalı motor kıyaslandığında, motor milinden alınan efektif güçte % 4.3'lük bir artış tespit edilmiştir.

7.6.3. Termal Bariyer Kaplamaların Motor Gücü ve Motor Momentine Etkisi

Şekil 7.27'de kaplamaların, motor gücünün motor devrine göre değişimi ve Şekil 7.28'de motor momentinin motor devrine göre değişim grafiği görülmektedir.



Şekil 7.27. Kaplamaların motor gücüne etkisi.



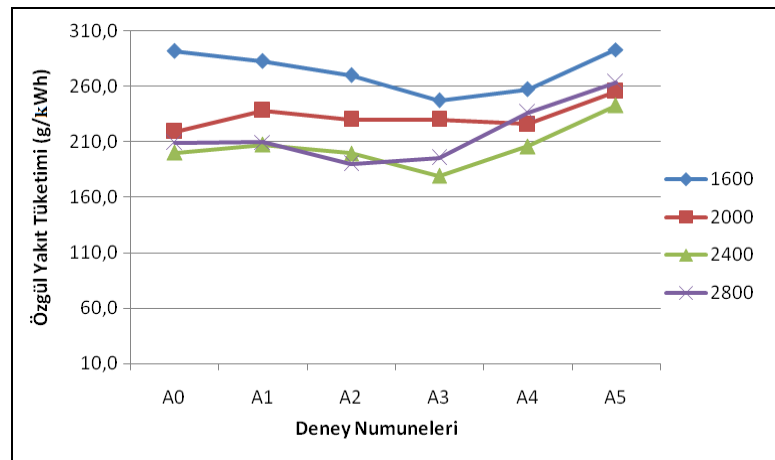
Şekil 7.28. Kaplamaların motor momentine etkisi.

Kaplama yapılmış motor parçalarının normal çalışması için soğutma sistemine giden ısı miktarını minimuma indirmekte, soğutmaya harcanan yükü azaltmaktadır. Buda faydalı enerjiyi arttırarak motor momentini yükseltmektedir. Termal bariyer kaplamalı piston ile yapılan deneylerde, devrin artmasıyla birlikte aşırı ısı oluştuğu, vurutuya sebep olduğu ve motor gücünde düşüş olduğu tespit edilmiştir. Literatür kaynaklara da bakıldığında düşük ve orta hızlarda efektif güçte artış olurken, hız artışıyla birlikte efektif güçteki artışın yavaşladığı belirtilmiştir [30,169].

Termal bariyer kaplamalı, A3 kodlu numunenin kaplamasındaki gözenek miktarının daha az olması, daha iyi bir termal bariyer kaplaması oluşturmaktadır. Şekil 7.8'deki A3 kodlu numunenin gözeneklilik miktarının diğer kaplamalara göre daha az olduğu görülmektedir. Gözenek miktarının fazla olması malzemede ara boşluğun olmasına buda ısı transferinde bir hızlanmaya neden olmaktadır. Isı transferinin artmasıyla birlikte silindir içerisindeki sıcaklıklarda azalma dolayısıyla basınçta ve momentte düşüş olduğu düşünülmektedir. Şekil 7.27'deki grafikte motor gücünde %1.4, Şekil 7.28'deki grafikte motor momentinde %1.7 arasında bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

7.6.4. Termal Bariyer Kaplamaların Özgül Yakıt Tüketimine Etkisi

Şekil 7.29'da kaplamaların motor devrine göre özgül yakıt tüketimi değişimi gösterilmektedir.



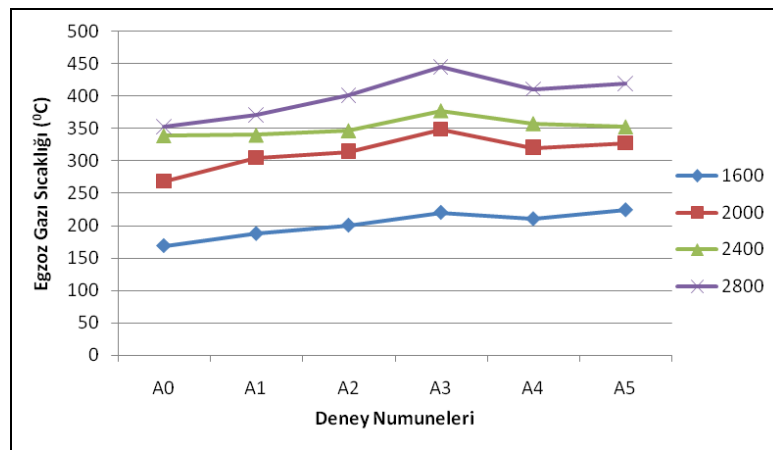
Şekil 7.29. Kaplamaların özgül yakıt tüketimine etkisi.

Birim zamanda birim güç başına harcanan yakıt miktarına özgül yakıt sarfiyatı denir. Şekil 7.29'daki grafiğe göre en düşük yakıt sarfiyatı 2400 d/d' da A3 kodlu numunede görülmüştür. Moment değerinin en yüksek olduğu değerde özgül yakıt sarfiyatının en düşük olduğu noktaya denk gelmektedir. Motor devrinin artmasıyla birlikte yanma odasına alınan yakıt miktarı süresi kısalmakta ve termal bariyerden kaynaklı sıcaklık miktarının artması özgül yakıt miktarını azaltmaktadır. Genel olarak termal bariyer kaplı motor devirlerine bakıldığında standart motora göre daha az yakıt sarfiyatına rastlanmıştır. Şekil 7.29'daki görüleceği üzere A3 kaplamalı numunede termal bariyer kaplamanın en iyi olduğu koşulda momentin en yüksek olduğu 2400 d/d'da, en az yakıt sarfiyatı görülmektedir. A3 kodlu termal bariyer kaplamalı motorlarda standart motor değerlerine göre %7.99 yakıt sarfiyatında azalma olmuştur.

7.7. KAPLAMA YAPILMIŞ MOTORUN EGZOZ EMİSYON TEST SONUÇLARI

7.7.1. Termal Bariyer Kaplamaların Egzoz Gazı Sıcaklığına Etkisi

Şekil 7.30'da kaplamaların motor devrine göre egzoz gazı çıkışı sıcaklık değişimi verilmektedir.



Şekil 7.30. Kaplamaların egzoz gazı sıcaklığına etkisi.

Termal bariyer kaplı yanma odası elamanlarının egzoz gaz sıcaklığı, standart motora oranla daha yüksek görülmüştür. Şekil 7.30'a bakıldığında değişik devirlerdeki en düşük sıcaklıklar standart motorumuzda görülmektedir.

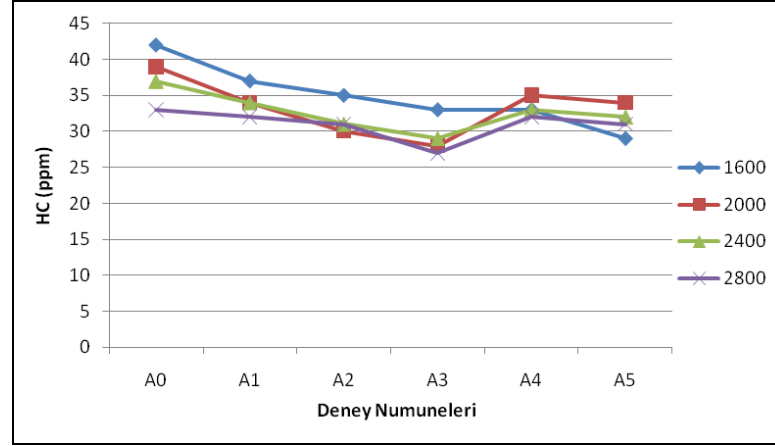
En yüksek sıcaklık 2800 d/d'da A3 kaplamalı numunede görülmüştür. Bunun nedeni gözeneklilik miktarının daha az olmasıyla birlikte daha iyi bir termal bariyer kaplama oluşturmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Devrin artmasıyla birlikte mekanik sürtünmeler arttığından en yüksek sıcaklık 2800d/d görülmüştür. A3 kodlu kaplamadaki sıcaklık oranlarını motor devrine göre bakıldığında, o devirdeki kaplamalar arasındaki en yüksek sıcaklık değerleri alınmıştır. A3 kodlu seramik kaplamada gözenek miktarının az olması daha sıkı bir kaplama yapısı oluşturmakta, standart piston oranla ısı iletkenlik katsayısının W/m.K oranını düşürmesiyle birlikte ısıyı yanma odasında hapseder ve yanma sonunda egzoz gazlarıyla birlikte dışarı atılmaya çalışılan ısıda artışa neden olmaktadır. 1600 d/d'ya bakıldığında standart motorun, seramik kaplamalı motorlara göre daha az sıcaklığa rastlanmıştır. Bunun nedeni devrin düşük olmasıyla birlikte sürtünme kayıplarının azalması ve harcanan gücün daha az olmasıyla birlikte ısı miktarında azalma olduğu tahmin edilmektedir. Kaplamaların malzeme analizlerindeki değerlerle egzozdan çıkan gaz sıcaklık değişimlerini mukayese edildiğinde alınan sonuçlar çalışmayı doğrulamaktadır. Şekil 7.30'a baktığında egzoz gaz sıcaklıkları standart içten yanmalı dizel motora oranla, 2800 d/d'da % 18.88 oranında artış olduğu tespit edilmiştir.

7.7.2. Termal Bariyer Kaplamaların HC (Hidro Karbon) Emisyonlarına Etkisi

Egzoz gazları içerisindeki hidrokarbon bulunması yakıtın tam olarak yakılmadığını göstermektedir. Hidrokarbon oluşumunun ana nedeni sıcaklıkların ve oksijenin yetersiz olması sonucunda (HFK 1'den küçük zengin karışım) yanmanın tamamlanamamasıdır. Bu durum silindir içinde bazı bölgelerde yakıt-hava karışım oranının çok zengin veya çok fakir olması sonucu oksidasyon reaksiyonlarının yavaşlaması veya yanmanın tamamlanamamasıdır. Silindir içerisindeki soğuk cidarlara (silindir, silindir kafası ve piston üst yüzeyi) ısı kayıpları nedeni ile bu

bölgeye ulaşan alevin, piston, silindir arası gibi dar bölgelerde ilerlemeyerek sönmesi nedeniyle oluşmaktadır [171].

Şekil 7.31'de kaplamaların motor devrine göre HC emisyon değişimleri görülmektedir.



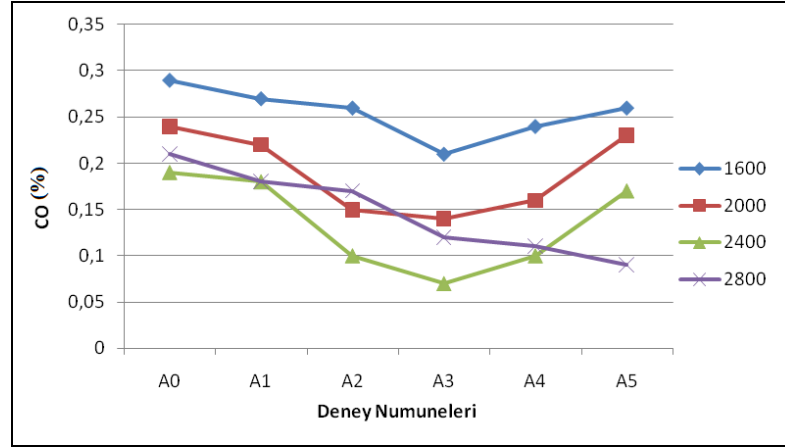
Şekil 7.31. Kaplamaların HC emisyonlarına etkisi.

Şekil 7.31'deki grafik incelendiğinde, termal bariyer kaplı numuneler standart motora oranla her devirde daha düşük HC emisyonları tespit edilmiştir. En yüksek HC oranı standart motorda (A0 kodlu numune) görülmektedir. HC'nun dizel motorlarında artmasının en büyük nedeni, yanma odası ısı kayıpları ve oksijen yetersizliğidir. En düşük oran A3 kodlu kaplamada 2800 d/d'da tespit edilmiştir. Egzoz gaz sıcaklıklarının en yüksek görüldüğü nokta, HC oranının en düşük olduğu noktadadır. Buda HC karbon oranlarının yanma odası sıcaklığının artmasıyla birlikte azaldığı tahmin edilmektedir. Kaplamaların HC (hidrokarbon) emisyon değişimleri incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, HC emisyon değerlerinin 2400 d/d'da %21.6 oranında azaldığı, en düşük olduğu 2800 d/d'da ise %18.18 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

7.7.3. Termal Bariyer Kaplamaların CO (Karbon Monoksit) Emisyonlarına Etkisi

Dizel motorlarında yakıt karışım oranı, genellikle fakir karışımdır ve motorun yük durumu ve hızına göre değişmektedir. Yanma odasında yakıt dağılımının homojen olmaması, 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 durumlarında CO emisyonunu arttırmaktadır [169].



Şekil 7.32. Kaplamaların CO emisyonlarına etkisi.

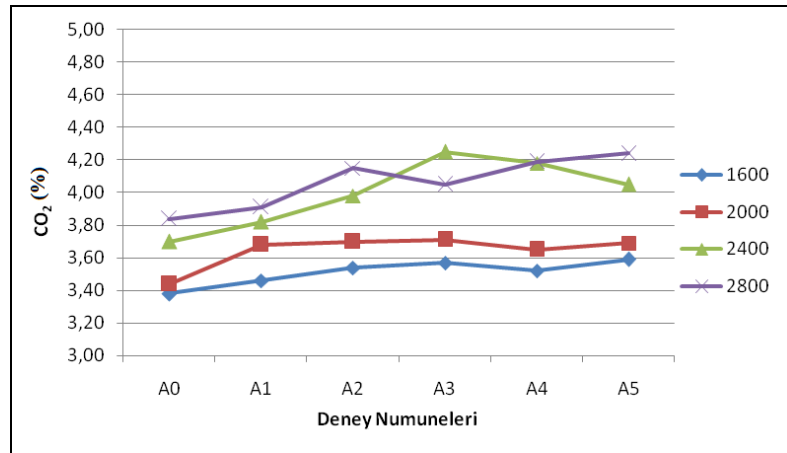
Şekil 7.32'de standart motor ve seramik kaplı motorların CO emisyon değişimi görülmektedir. Şekil 7.32'deki grafik incelendiğinde CO oranının termal bariyer kaplamayla birlikte azaldığı görülmektedir. Silindir içi sıcaklığın artmasıyla birlikte CO değişim reaksiyonu artmakta ve CO emisyonu azalmaktadır [48].

Şekil 7.32'deki grafik incelendiğinde CO oranının en düşük olduğu nokta 2400 d/d A3 kodlu kaplamalı motorda tespit edilmiştir. Bunun nedeni maksimum momentin en yüksek olduğu durumda yanmanın en iyi gerçekleştiği, yakıt hava oranının en iyi kullanıldığı bölge olduğu düşünülmektedir. A3 kodlu numunenin malzeme incelemesinde gözenek oranının daha düşük olması, daha iyi bir termal bariyer

oluşturmakta ve egzoz gaz sıcaklığını standart motora göre arttırmaktadır. Silindir içerisinde elde edilen ısı miktarının standart motora oranla daha yüksek olması, CO oranlarının düşmesine neden olmaktadır. En yüksek CO oranı 1600 d/d standart motorda görülürken en düşük oran 2400 d/d A3 kodlu numunede tespit edilmiş ve %63,15 oranında azalma görülmüştür.

7.7.4. Termal Bariyer Kaplamaların CO₂ (Karbon Dioksit) Emisyonlarına Etkisi

İçten yanmalı motorlarda CO₂,yanma esnasında silindirler içerisine alınan yakıt (HC) ile havadaki oksijenin (O₂) birleşmesiyle oluşan, kokusuz ve renksiz bir gazdır. CO₂ oluşumu, yanma sonucunca istenilen bir gazdır. Fakat aşırı oranda çevreye nüfus ettiğinde sera etkisi yaratmaktadır. Buda çevreyi direk kirletmese de küresel ısınmayı etkilemektedir. CO₂ gazı içten yanmalı dizel motorlarda silindir içinin tümü ile ele alındığından oksijen genel olarak yetersiz olabileceği gibi, karışımın tam homojen (silindir içinde her yerde aynı yakıt/hava oranı) olmaması durumunda silindir içinde belirli bir konumda yada noktada yetersiz olmasındandır. Dizel motorlarda içeri alınan hava miktarı benzinli motorlara oranla daha yüksektir. Silindir içerisindeki sıcaklık da CO₂ oranını etkilemektedir [171].



Şekil 7.33. Kaplamaların CO₂ emisyonlarına etkisi.

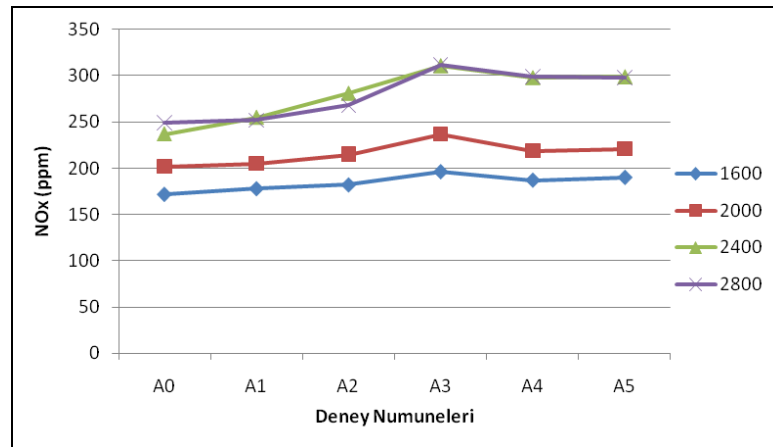
Şekil 7.33'de standart motor ve seramik kaplı motorların CO₂ emisyon değişimi görülmektedir. Şekil 7.33'deki grafikten de görüldüğü gibi kaplamalı motorların CO₂ oranında artış olduğu görülmektedir.

Şekil 7.33'deki grafik incelediğinde, CO oranının en az görüldüğü motor devirlerinde CO₂ oranının arttığı görülmektedir. CO₂ emisyonu en fazla 2400 d/d'da A3 kodlu termal bariyer kaplamalı numunede tespit edilmiştir. Maksimum momentin en yüksek olduğu noktada daha iyi bir yanma gerçekleşmekte ve CO₂ emisyon oranının yükselmesine sebep olduğu düşünülmektedir.

CO₂ emisyonu 2400 d/d'da standart motorla, A3 kodlu kaplamalı motorla kıyaslandığında %14.86'lık artış tespit edilmiştir.

7.7.5. Termal Bariyer Kaplamaların NO_x (Azot Oksit) Emisyonlarına Etkisi

Normal şartlar altında havanın içindeki azot (N) yanma sonucu reaksiyona girmez. Ancak motor içindeki yanma esnasında ulaşılan yüksek sıcaklıklarda (1600 °C' nin üstünde) havanın içerisindeki azotun oksijen ile reaksiyona girmesi sonucu azot oksitler meydana gelmektedir. Azot oksitler içerisinde ana eleman olarak genellikle NO bulunmaktadır. Egzoz gazlarının daha sonra atmosfere atılması sonucu oksijen ile NO'nun bir kısmı NO₂ ve NO_x'lere dönüşmektedir. Sonuç olarak azot oksit oluşumunu silindir içi sıcaklığın etkilediği, sıcaklık artışıyla birlikte azot oksidin hızla arttığı anlaşılmaktadır [171].



Şekil 7.34. Kaplamaların NO_x emisyonlarına etkisi.

Şekil 7.34'de standart motor ve seramik kaplı motorların NO_x emisyon değişim grafiği görülmektedir.

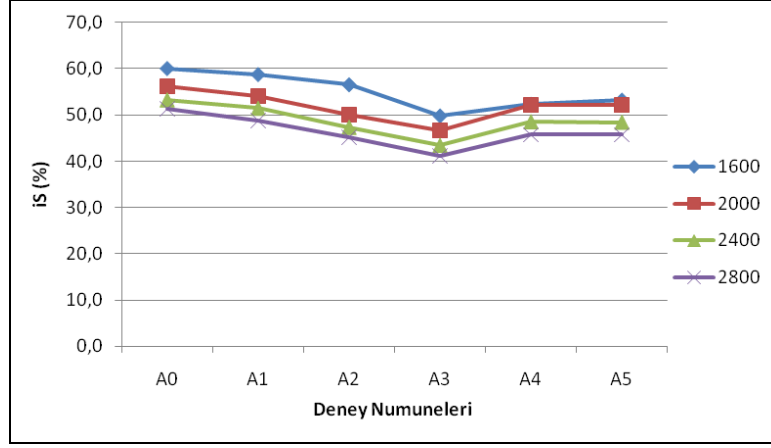
Şekil 7.34'deki grafik incelendiğinde, kaplamalı motorlarda NO_x oranında artış olduğunu görülmektedir. Termal bariyer kaplamalı motorun standart motora oranla ısıl geçirgenlikleri daha düşüktür. Buda yanma sonu sıcaklığını silindirler içerisine hapsedmesine neden olmaktadır. Böylece havadaki azot gazı yüksek sıcaklıklarda oksijenle reaksiyona girerek NO_x emisyonlarını oluşturmaktadır. Seramik kaplı motorlarda yanma sıcaklığının 50 °C ile 150 °C arasında bir sıcaklık artışı olduğu görülmüştür. Silindir içi sıcaklığın yükselmesiyle birlikte NO_x emisyonlarında da artış görülmüştür.

A3 kodlu kaplamanın malzeme gözeneklilik oranının az olması daha iyi bir termal bariyer oluşturmaktadır. Buda ısıyı yanma odasına hapsederek, egzoz gazı sıcaklıklarının yükselmesine, dolayısıyla NO_x emisyonlarının da artmasına neden olmaktadır. En yüksek NO_x emisyonu, sıcaklığın en yüksek görüldüğü 2800 d/d'da tespit edilmiştir.

NO_x emisyonlarının 2800 d/d'da incelendiğinde, standart motorla A3 kodlu kaplamalı motorla kıyaslandığında %17.8'lik bir artış tespit edilmiştir.

7.7.6. Termal Bariyer Kaplamaların Partikül (İs) Oranına Etkisi

Dizel motorlarında silindir içinde sıvı halde bulunan yakıt damlası içindeki H₂ molekülleri, hızlı bir şekilde reaksiyona girmekte (oksijenle birleşmekte) ve geriye kalan C'nin yeterli O₂'ni bulamadığından, yanamayarak is partikülü olarak dışarı çıkmaktadır. İs oluşumunun başlıca nedeni, dizel yakıtının silindir içinde yeterli hava bulamaması, zamanında hızlı bir şekilde hava ile karışamaması ve buharlaşmamasıdır [171].



Şekil 7.35. Kaplamaların is emisyonlarına etkisi.

Şekil 7.35'de standart motor ve seramik kaplı motorların is emisyon değişimi görülmektedir. Motor devrine göre incelediğinde 1600, 2000, 2400 ve 2800 d/d'larda benzer sonuçlar görülmektedir. Standart motorda en yüksek is oranı görülürken A3 kodlu kaplamada değişik devirlerde düşük is oranına rastlanmıştır. A3 kodlu kaplamada sıcaklık oranının yüksek olması yanmanın iyileşmesine ve is oranının azalmasına neden olduğu düşünülmektedir. Motor devrinin artmasıyla birlikte is oranları azalmakta, yakıt oranı ve püskürtme zamanı kısalmaktadır. Yüksek motor devirlerinde ısı artışıyla birlikte, yanma odasındaki yakıtın sıvılaşmasını azaltmakta ve is oranını düşürdüğü tahmin edilmektedir. İs oranı en yüksek 1600 d/d'da standart pistonda, en düşük oran ise 2800 d/d'da görülmüştür. Kaplamaların is emisyon değişimleri incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, is emisyon değerlerinin 2400 d/d'da %15.23 oranında azaldığı, en düşük olduğu 2800 d/d'da ise %15.97 oranında azaldığı tespit edilmiştir.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. SONUÇLAR

Bu çalışmada dört zamanlı tek silindirli bir dizel motora ait piston ve supaplar stabile edilmiş zirkonyum (ZrO_2) magnezyum oksit (MgO) tozu içerisine değişik oranlarda alüminyum oksit (Al_2O_3) ilave edilerek, plazma sprej yöntemiyle kaplanmıştır. Motorun yanma odasına ait piston ve supaplar 5 farklı ($ZrO_2 + MgO$), ($ZrO_2 + MgO + \% 25 Al_2O_3$), ($ZrO_2 + MgO + \% 50 Al_2O_3$), ($ZrO_2 + MgO + \% 75 Al_2O_3$), (Al_2O_3) numune ile kaplanmıştır. Kaplanan motor parçalarının her birine SEM, EDS ve XRD yüzey analizleri yapılmıştır. Kaplamaların yüzey pürüzlülük, yapışma mukavemeti, mikrosertlik ve termal şok gibi malzeme deneyleri yapılarak, motor performans ve egzoz emisyon ölçümleri alınmıştır. Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kaplama işlemleri sonrasında $ZrO_2 + MgO$ tozuna farklı oranlarda Al_2O_3 tozu ilave edilerek, plazma püskürtme sistemi ile kaplanabildiği tespit edilmiştir. Pistonların yüzeylerindeki kaplama kalınlıklarının 150-300 μm arasında değiştiği görülmüştür.
- Deneysel çalışma sonucu elde edilen bulgular incelendiğinde, farklı oranlarda yapılan Al_2O_3 , ilaveli termal bariyer kaplamalarda gözenek oranı artmaktadır. Ayrıca SEM görüntülerinden kaplamalarda boşluk, çatlak ve oksitlenme olmadığı da görülmüştür. En düşük gözenek miktarı $ZrO_2+MgO+\%50Al_2O_3$ ile kaplanan A3 kodlu numunelerde tespit edilmiştir.

- A1 kodlu numunenin, EDS analiz sonuçları incelendiğinde, Zr, Mg, ve O elementlerinin olduğu, 1. bölgesinde ağırlıkça % 56,17 Zr, %33.05 O, %10.78 Mg ve 2. bölgesinde ağırlıkça %55.52 Zr, %32.93 O, %11.55 Mg tespit edilmiştir. XRD paternleri incelendiğinde yapıda ZrO₂ (Tetragonal), ZrO₂ Monoclinic) bileşikleri tespit edilmiştir.
- A2 kodlu numunenin, EDS analiz sonuçları incelendiğinde, Zr, Mg, ve O elementlerinin olduğu, 1. bölgesinde ağırlıkça % 59.57 Zr, % 0,35 Al, %8.67 MgO, %31.41 O ve 2. bölgesinde ağırlıkça %6.13 Zr, % 30.67 Al, %2.34 MgO, %60.86 O, tespit edilmiştir. XRD paternleri incelendiğinde ZrO₂ (Tetragonal), ZrO₂ (Monoclinic), MgO, Al₃Zr₅ ve α -Al₂O₃ bileşikleri tespit edilmiştir.
- A3 kodlu numunenin, EDS analiz sonuçları incelendiğinde, Zr, Mg, Al ve O elementlerinin olduğu, 1. bölgesinde ağırlıkça %63.53 Zr, %29.37 Mg, %0.33 Al ve %29.37 O elementleri ve 2. bölgesinde ağırlıkça %10.85 Zr, %0.33 Al, %11.55 Mg, %32.93 O elementleri tespit edilmiştir. XRD paternleri incelendiğinde ZrO₂ (Tetragonal), ZrO₂ (Monoclinic), MgO, Al₃Zr₅, Al₃Mg₂, α -Al₂O ve γ -Al₂O₃ bileşikleri tespit edilmiştir.
- A4 kodlu numunenin, EDS analiz sonuçları incelendiğinde, Zr, Mg, Al ve O elementlerinin olduğu, 1. bölgesinde ağırlıkça %4.86 Zr, %0.43 Mg, %33.56 Al ve %61.14 O elementleri ve 2. bölgesinde ağırlıkça %65.57 Zr, %8.01 Mg, %0.60 Al ve %25.82 O elementleri tespit edilmiştir. XRD paternleri incelendiğinde ZrO₂ (tetragonal), ZrO₂ (monoklinik), MgO, α -Al₂O, γ -Al₂O₃, Al₃Zr₅ ve Al₃Mg₂, bileşikleri tespit edilmiştir.
- A5 kodlu numunenin, EDS analiz sonuçları incelendiğinde, Al ve O elementlerinin olduğu, 1. bölgesinde ağırlıkça %61.54 O, %38.46 Al elementleri ve 2. bölgesinde ağırlıkça %61.86 O, %38.14 Al elementleri tespit edilmiştir. XRD paternleri incelendiğinde Al, α -Al₂O ve γ -Al₂O₃, bileşikleri tespit edilmiştir.

- $ZrO_2 + MgO$ içerisine ilave edilen Al_2O_3 oranı arttıkça farklı yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. $ZrO_2 + MgO$ ilaveli Al_2O_3 kaplamalı, A1 kodlu numunede 10,43 μm , A2 kodlu numunede 9,78 μm , A3 kodlu numunede 9,29 μm , A4 kodlu numunede 9,47 μm , A5 kodlu numunede 4,84 μm , yüzey pürüzlülüğü tespit edilmiştir.
- Yapışma mukavemeti incelendiğinde $ZrO_2 + MgO + \%50 Al_2O_3$ tozu ile gerçekleştirilen A3 kodlu numunede 30,83 MPa'lık en yüksek yapışma mukavemeti tespit edilmiştir.
- A1 kodlu numunede 550 HV ile 580 HV, A2 kodlu numunede 770 HV ile 800 HV, A3 kodlu numunede 950 HV ile 1000 HV, A4 kodlu numunede 850 HV ile 950 HV ve A5 kodlu numunede 850 HV ile 900 HV arasında değişen mikrosertlik değerleri tespit edilmiştir.
- Termal şok testleri incelendiğinde, A1 kodlu numune üst tabaka kenar alev aşınması, A2 kodlu numunede yüzey çatlaklığı, A3 kodlu numunede herhangi bir kopma ya da çatlığa rastlamadığı ve kaplama yapılan malzemede eğilme, A4 kodlu numunede üst tabaka kenar alev alanı delaminasyonu gözlemlenmiştir.
- Silindir içi basınç testleri incelendiğinde, 1600 d/d'da efektif güçte %3.8, 2000 d/d'da efektif güçte %4, 2800 d/d'da efektif güçte %4.2 ile en yüksek basınç değeri ise 2400 d/d'da $ZrO_2+MgO+\%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu numunede tespit edilmiştir. 2400 d/d'da standart motorla A3 kodlu kaplamalı motor kıyaslandığında, motor milinden alınan efektif güçte % 4.3'lük bir artış tespit edilmiştir.
- Motor gücü ve momentin motor devrine göre incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+\%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, A3 kodlu numunenin motor gücü ve momentini yükselttiğini, motor gücünde %1.4, döndürme momentinde %1.7 arasında bir artış meydana geldiği tespit edilmiştir.

- Kaplamaların motor devri ve özgül yakıt tüketimine göre değişimi incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, özgül yakıt tüketiminin en az olduğu 2400 d/d'da %7.99 özgül yakıt tüketiminde azalma olduğu tespit edilmiştir.
- Kaplamaların motor hızına göre egzoz gazı çıkışı sıcaklık değişimi incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, egzoz gazı sıcaklığının en yüksek olduğu 2800 d/d'da % 18.88 oranında artış tespit edilmiştir.
- Kaplamaların HC (hidrokarbon) emisyon değişimleri incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, HC emisyon değerlerinin 2400 d/d'da %21.6 oranında azaldığı, en düşük olduğu 2800 d/d'da ise %18.18 oranında azaldığı tespit edilmiştir.
- Kaplamaların CO (karbonmonoksit) emisyon değişimleri incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, CO emisyon değerlerinin en düşük olduğu 2400 d/d'da %63,15 oranında azalma tespit edilmiştir.
- Kaplamaların CO_2 (karbondioksit) emisyon değişimleri incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, CO_2 emisyon değerlerinin en yüksek olduğu 2400 d/d'da % 14.86 oranında artış tespit edilmiştir.
- Kaplamaların NO_x (azot oksit) emisyon değişimleri incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, NO_x emisyon değerlerinin en yüksek olduğu 2800 d/d'da %17.8 oranında artış tespit edilmiştir.

- Kaplamaların is emisyon değişimleri incelendiğinde, $ZrO_2+MgO+\%50Al_2O_3$ kaplamalı A3 kodlu motorun standart motor ile kıyaslandığında, is emisyon değerlerinin 2400 d/d'da $\%15.23$ oranında azaldığı, en düşük olduğu 2800 d/d'da ise $\%15.97$ oranında azaldığı tespit edilmiştir.

Bu incelemeler sonucunda farklı çalışma koşullarında en iyi performansı $ZrO_2+MgO+\%50 Al_2O_3$ ilaveli A3 kodlu termal bariyer kaplı numunede tespit edilmiştir.

8.2. ÖNERİLER

ZrO_2+MgO tozlarına farklı oranda ağırlıkça Al_2O_3 tozu ile karıştırılarak, plazma püskürtme sistemi ile yanma odası elemanları kaplanabilir.

- Dizel motorlarında yapılan termal bariyer kaplamalarında $ZrO_2 + MgO$ tozuna, Al_2O_3 tozunun farklı oranlar ile yapılan deneylerde, bu karışımlardaki en stabil seramik kaplama $ZrO_2 + MgO + \%50Al_2O_3$ 'da tespit edilmiştir. Farklı kaplama kalınlıklarında yapılarak kaplamalar incelenebilir.
- $ZrO_2 + MgO$ ile Al_2O_3 arasındaki ısıl genleşmenin farklılığının fazla olması plazma spreylemeden sonra soğumadan kaynaklı malzeme bütünleşmesine ara bir seramik malzeme konulabilir.
- Yanma odasındaki yüksek sıcaklığın malzeme yorulmasına neden olacağından, yanma odası elemanları imal edilirken ısıya daha dayaklı malzemelerden üretilebilir.
- Termal bariyer kaplama kalitesi arttırmaya yönelik çalışmalar sürdürülebilir. Bu noktada üç dört katmanlı malzeme kaplaması üzerinde çalışmalar yapılabilir.
- Termalbariyer kaplı dizel motorlarda değişik devir ve yükte çalışma şartları (püskürtme basıncı, süresi v.b.) değiştirilerek performansa etkisi incelenebilir.

- Termal bariyer kaplı dizel motorlarda, kaplamaların tutuşma gecikmesi periyoduna etkisi incelenebilir.
- NO_x oranını azaltmak için silindirler içerisine hava yerine saf oksijen verilen sistem konulabilir. Bu da yanma odası içerisine alınan azot miktarını keserek yüksek sıcaklıklarda NO_x oluşmasının önüne geçer. Fakat ek bir maliyet getirdiğinden motorun maliyetini artırır.
- Motor momentindeki artışı daha da iyileştirmek için yanmaya karşı direnç gösteren yeni bir yakıt kullanılabilir.
- ZrO₂ +MgO+Al₂O₃ kaplamalı motorlarda uzun süreli motor testleri yapılarak, motor performansı, egzoz emisyonları ve kaplama malzemesine etkileri incelenebilir.

Genel olarak baktığımızda yanma odası hareketli parçaların termal bariyer ile kaplanması motor verimini ve egzoz emisyonlarını iyileştirmektedir. ZrO₂ + MgO ilaveli Al₂O₃ kullanılmasıyla yeni bir seramik kaplamanın olabileceği ortaya konulmuştur. Bununla birlikte azalan yakıt sarfiyatı ile ülke ekonomisine katkı, daha az egzoz emisyonu ile daha az çevre kirliliğine neden olacağı ortaya konmuştur.

KAYNAKLAR

1. Strong, A. B., "Fundamentals of composites manufacturing: materials, methods and applications", *Published By Society of Manufacturing Engineers Published*, 10 (5): 1121-1122 (2009).
2. Friedrich, K., Lu, Z., and Hager, A. M., "Recent advances in polymer composites tribology" *Wear*, 190 (2): 139-144 (1995).
3. Byett, J. H., and Allen, C., "Dry sliding wear behaviour of polyamide 66 and polycarbonate composites" *Tribology International*, 25 (4): 237-246 (1992).
4. Zhou, H., Yi, D., Yu, Z., and Xiao, L., "Preparation and thermophysical properties of CeO₂ doped La₂Zr₂O₇ ceramic for thermal barrier coatings" *J. Alloys Comps*, 438: 217-221 (2007).
5. Afrasabi, A., Saremi, M., and Kobayashi, A., "A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+Al₂O₃ and YSZ/Al₂O₃" *Mater Sci Eng A.*, 478 (1-2): 264-269 (2007).
6. Yasar, H., Buyukkara, E., ve Fidil, A., "Termal bariyer kaplamanın turbo doldurmalı bir dizel motorunun egsoz gaz ekserjisi akışına etkisi" *12. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Sakarya, 310-391 (2000).
7. Sharafat, S., Kobayashi, A., Chan, Y. and Ghoniem, N. M., "Plasma spraying of micro-composite thermal barrier coatings" *Vacuum*, 65: 415-425 (2001).
8. Leyens, C., Fritscher, K., Gehrling, R., Peters, M., and Kayser, W.A., "Oxide scale formation on an MCrAlY coating in various H₂-H₂O atmospheres" *Surface and Coatings Technology* 82: 133-144 (1996).
9. Wakuri, Y., Soejima, M., Ejima, Y., Hamatake, T. and Kitahara, T., "Studies on friction characteristics of reciprocating engines", *SAE Paper*, No: 952471 (1995).
10. Buyukkaya, E., " Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics", *Fuel*, 89: 3099-3105 (2010).
11. Zhu, L., Cheung, C. S., Zhang, W. G., and Huang, Z., "Combustion, performance and emission characteristics of a DI diesel engine fueled with ethanol-biodiesel blends", *Fuel*, 90 (5): 1743-1750 (2011).

12. Özener, O., Yüksek, L., Ergenç, A. T., and Özkan, M., "Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics", *Fuel*, 115: 875-883 (2014).
13. Gümüş, M., Sayın, C., and Çanakçı, M., "The impact of fuel injection pressure on the exhaust emissions of a direct injection diesel engine fueled with biodiesel–diesel fuel blends", *Fuel*, 95: 486–494 (2012).
14. Carmen, C., Barrios, Domínguez-Sáez, A., Martín, C., and Álvarez, P., "Effects of animal fat based biodiesel on a TDI diesel engine performance, combustion characteristics and particle number and size distribution emissions", *Fuel*, 117: 618-623 (2014).
15. Kowalewicz, A., "Combustion System of High-Speed Piston I.C. Engines", *Elsevier*, California University, (1984).
16. Masjuki, H.H., Kalam, M.A., Mofijur, M.J., Abedin I.M., and Fattah, R., "Effect of antioxidant on the performance and emission characteristics of a diesel engine fueled with palm biodiesel blends" *Energy Conversion and Management*, 79: 265-272 (2014).
17. Stone, R., "Introduction to internal combustion engines-2nd edition", *SAE Paper*, 978-0-7680-2084-7 (1997).
18. Baik, S., "Development of micro-diesel injector nozzles via MEMS technology and effects on spray characteristics", PhD Dissertation, *University of Wisconsin-Madison*, USA, 443-474 (2001).
19. Jaichandar, S., and Annamalai, K., "Combined impact of injection pressure and combustion chamber geometry on the performance of a biodiesel fueled diesel engine", *Energy*, 55: 330-339 (2013).
20. Topgül, T., "Tek silindirli direkt püskürtmeli bir dizel motorunda püskürtme avansı ve püskürtme basıncının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi", Y.Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 61-67 (2000).
21. Obiander, K., Kollmann, K., Kramer, M., and Kutschera, I., "The influence of high pressure fuel injection on performance and exhaust emissions of a high speed direct injection diesel engine", *SAE Paper*, No: 390438 (1989).
22. İçingür, Y., "Yakıtlar ve Yanma Ders Notları", *Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi*, Ankara (1994).
23. Gill, A. P., "Design choices for 1990's low emissions diesel engines", *SAE Paper*, No: 880350 (1988).
24. Taylor, C. F., "The internal-combustion engine in theory and practice", *The MIT Press*, USA (1992).

25. Schihl, P., Atreya, A., and Bryzik, W., " Development of a shear layer ignition model for application to direct-injection diesel engines", *Combustion and Flame*, 121 (3): 453–470 (2000).
26. Soruşbay, C., ve Gökten, A. G., "Motorlu taşıtlardan kaynaklanan çevre kirliliği ve kontrolü", *İTÜ 1. Hava Kirlenmesi ve Kontrolü Sempozyumu*, İstanbul, (1993).
27. Gardner, T. P., "Investigation of the Effects of Engine Design Parameters on Diesel Combustion and Emissions Using Taguchi Methods", *SAE Paper*, No: 920116 (1992).
28. Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A., "İçten Yanmalı Motorlar", *Teknik Eğitim Vakfı Yayınları*, Cilt 1, Ankara, (1995).
29. Wong, C. L. and Steere, D. E., "The effects diesel fuel properties operating conditions on ignition delay", *SAE Paper*, No: 821231 (1982).
30. Shimada, T., Shoji, T. and Takeda, Y., "The effect of fuel injection pressure on diesel engine performance", *SAE Paper*, No: 891919 (1989).
31. Balcı, M., "İçten yanmalı motorlarda aşırı doldurma", *Teknik Eğitim Vakfı Yayınları*, (1994).
32. Ünal, C., " Örnek dizel motorda püskürtmenin fazlara ayrılmasının NO_x ve is oluşumuna etkisinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).
33. Newton, K., Steeds, W., and Garrett, T. K., "The motor vehicle", *Butterworth Heinemann Press*, England, (1997).
34. Yalçıntepe, M. R., "Dizel Motorları Teknolojisi", Ankara, (1977).
35. Zammit, S. J., "Motor vehicle engineering science for technicians", *Longman Scientific & Technical*, 115-118 (1987).
36. Ball, W. F., Jackson, N. S., Pilley, A. D., and Porter, B. C., "The friction of a 1.6 litre automotive engine-gasoline and diesel", *SAE Paper*, No: 860418 (1986).
37. Vural, E., "Küçük hacimli bir dizel motorunda değişik avanslardaki püskürtmenin motor performansı ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel analizi", *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Eğitimi A.B.D., Karabük, 7-27 (2009).
38. Taylor, C. F., "The internal-combustion engine in theory and practice", *The MIT Press*, ABD (1985).
39. Wakuri, Y., Soejima, M., Ejima, Y., Hamatake, T., and Kitahara, T., "Studies on friction characteristics of reciprocating engines", *SAE Paper*, 10-01 (1995).

40. TSE 11365, "Karayolları taşıtları - trafikteki dizel motorlu taşıtlar için egzoz gazı kirleticileri ölçme metodu ve sınır değerleri", *Türk Standartları Enstitüsü*, (1998).
41. Woods, M.E., and Oda, I., "Ceramic Insulating Component for The Adiabatic Engine" *SAE Government Industry meeting Exposition*, Washington, (1984).
42. Hocking, M.G., Vasatasree, V., and Sidky, P.S., "Metallic and ceramic coatings" *Production High Temperature and Applications*, London, (1989).
43. Roger, B., Lurry, D., and Douglas, J., "Cummins uncooled 250 engine", *SAE International Congress*, Michigan, (1984).
44. Wacker, E., and Sander, W., "Piston desing for high combustion pressure and reduce heat rejection to coolant", *SAE International Congress*, Michigan, (1984).
45. Leising, C.J., and Purohit, G.P., "Waste heat recovery in truck engines", *SAE National West Coast Meeting*, California, (1978).
46. Büyükkaya E., "Bir Dizel Motorunda Seramik Kaplama Uygulamaları ve Performans Analizi", Yüksek Lisans Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, (1999).
47. Bryzik, W., and Kamo, R., "TACOM/Cummins adiabatic engine program", *SAE Paper*, No: 830314 (1983).
48. Ciniviz, M., "Türboşarjlı bir dizel motorunun yanma odası yüzeylerinin Y_2O_3 – ZrO_2 ile kaplanması performans ve emisyonlara etkileri" Doktora Tezi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuk Üniversitesi*, Konya, (2005).
49. Erdoğan, M., "Seramik malzemeler ve üretim yöntemleri", Gazi *Üniversitesi Tek. Eğt. Fak. Metal Böl. Ders Notları*, Ankara, (1998).
50. Abalı, S., "Ötektik seramik kompozitler ve üretim yöntemleri", *Metalurji Dergisi*, 143: 6 (2006).
51. Li, W.J., Tu, R., and Goto T., "Preparation of TiC-TiB₂-SiC ternary eutectic composites by arc-melting and their characterizations", *Materials Transactions*, 47 (4), 1193-1197(2006).
52. Hazar H., "Bir dizel motoru silindir yüzeyinin seramik malzeme ile kaplanarak aşınma davranışının deneysel incelenmesi", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 106-107 (2004).
53. Knotek, O., "Thermal spraying and detonation gun processes", *Handbook Of Hard Coatings*, ISBN: 0-8155-1438-7, New York, 77-107 (2001).

54. Akçıl, M., "Zirkonya esaslı seramik kaplama malzemelerinin termal-şok ve porozite özelliklerinin tayini", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 82 (1990).
55. Kaya, A. Ö., "Plazma püskürtme ve hvof yöntemleri kullanılarak, cr3c2-nicr(75/25) ve crnibi+%80 wc-co tozlarıyla kaplanan çeliğin yapısı ve yüzey özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2007).
56. Özel, S., "Alüminyum alaşımı ve bronz yüzeyine oksit ve karbür bileşiklerinin plazma sprey yöntemiyle kaplanmasının araştırılması", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2009).
57. William, J., and Miller, A. R., "TBC's for better engine efficiency", *Advanced Materials & Processes*, 41: 29-33, (1989).
58. Toplan, H. Ö., "İleri teknoloji seramik malzemeler", *Sakarya Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Ders Notları*, Sakarya, (2008).
59. Karabaş, K., "Bor karbür üretimi", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, (2006).
60. Mori, T., "Handbook on the physics and chemistry of rare earths", Chapter 238 *Higher Borides*, 38: 105-173 (2007).
61. Raman, V., Bhatia, G., Mishra, A., Sengupta, P.R., and Rashmi, M.S, "Development of carbon-ceramic composites", *Materials Science and Engineering: A*, 412 (1-2): 31-36 (2005).
62. Sarıkaya, Ö., "Al-12Si malzeme üzerine plazma püskürtme tekniği ile Al-Si+B4C kaplama", Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2003).
63. Lee J.H., Won, C.W., Joo, S.M., and Maeng Y.D., "Preparation of B4C powder from B₂O₃ oxide by SHS process", *Journal of Materials Science Letters*, 19: 951-954 (2000).
64. Çakır, A.F., "Korozyondan korunmada metalik kaplamalar", *Yüksek Lisans Ders Notları, İstanbul Teknik Üniversitesi*, İstanbul, (1988).
65. Ürgen, M., "Modern yüzey işleme teknolojileri ve Türkiye'deki gelişmeler", *9. Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 333-350 (1997).
66. Avner, S. H., "Introduction to physical metallurgy", *Mc Gran-Hill*, Second Edition, Singapore, 567-573 (1974).
67. Yasar, H., "Termal bariyer kaplamanın turbo doldurmak bir dizel motorunun performansına etkileri", Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (1997).

68. Kamo, R., Assanis, D., and Bryzik, W., "Thin thermal barrier coatings for engines", *SAE Paper*, No: 890143 (1989).
69. Pamuk, U., "Plazma spreylenemiş $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ ve $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$ kaplamaların abrazyon aşınma davranışlarının incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1996).
70. Phillips, B. A., and Knapp, J. K., "Thermal spray coatings reduce wear and corrosion on calender rolls", *Tappi Journal*, October, 78 (10): 197-205 (1995).
71. ASM Handbook Committee, *ASM Metals Handbooks*, USA, 2 (29): 1-54 (1986).
72. Sturgeon, A., "Thermal spraying gives a new look to substrate design", *TVVI Bulletin* 4, July/August, 464 (4): 94 (1994).
73. Sahoo, P., "High performance wear coating-the quest continues", *Powder Metallurgy International*, 25(2): 73-78 (1993).
74. Harvey, D., "The tough truth-wear resistant coatings using HVOF", *TWI Bulletin* 1, January/ February, 473(1): 95 (1995).
75. Harvey, D., "Surfacing armoury broadens to combat industry bane", *TWI Bulletin* 6, November/ December, 416 (6): 91 (1991).
76. Harvey, D., "The ultimate coating-thermal spraying at abington", *TWI Bulletin* 2, March/April, 456 (2): 28-30 (1994).
77. Dapkunas, S.J., "Nist-industry workshop on thermal spray coating research", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, May-June, 98 (3): 383-389 (1993).
78. Yeşildal, R., ve Günay, Y.Z., "Plazma spreylene yöntemi ile kaplama ve spreylene karakteristiklerinin incelenmesi", *Fen Bilimleri ve Mühendislik Dergisi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 9 (1): 59-76 (2007).
79. Abram, K.R., Bustamante, J., and Etzenhouser, R.D., "Automated metal spray applications", *Thermal Spray Research and Applications, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference*, USA, 655-661 (1990).
80. Kearns, W.H., "Resistant and solid-state welding and other joining processes", *Aws Welding Handbook*, ABD, 3: 12 (1984).
81. Jafari, M., Enayati, M.H., Salehi, M., Nahvi, S.M., and Park, C.G., "Comparison between oxidation kinetics of HVOF sprayed WC-12Co and WC-10Co-4Cr coatings", *Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 41: 78-84 (2013).

82. Pfender, E., "Fundamental studies associated with the plasma spray process", *Surface and Coatings Technology*, 34 (1): 1–14 (1988).
83. Fauchais, P., and Vardelle, M., "Plasma spraying: present and future", *Iupac, Pure& Appl. Chem.*, Britain, 66 (6): 1247-1258 (1994).
84. Cerit, A. M., "Metal Püskürtme", *Makina Mühendisliği El Kitabı, Üretim ve Tasarım*, Ankara, 2: 208-211 (1996).
85. Anık,S., "Kaynak Teknolojisi El Kitabı", **Ergör Matbaası**, İstanbul, (1983).
86. Karaali, E.İ., "TBK kaplamaların termal şok özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya (2008).
87. Geçkinli, A. E., "İleri teknoloji malzemeleri", *İTÜ Matbaası*, İstanbul, 246-251 (1992).
88. Under, R. H., "Comparision of thermal spray bond coats", *Thermal Spray Advances in Coating Technology Conference proceeding*, USA, 365- 370 (1978).
89. Pherson, R., "A review of microstructure and properties of plasma sprayed ceramic coatings", *Surface and Coatings Technology*, Netherlands, 39/40, 173-181 (1989).
90. Oğuz, B., "Aşınma sorunları ve dolgu kaynakları teori-uygulama", *Oerlikon kaynak Elektrotları ve Sanayi A.Ş. Yayınları*, İstanbul, 367-491 (1993).
91. Anık, S., Anık, E.S., Vural, M., "1000 Soruda Kaynak Teknolojisi El Kitabı", Cilt I, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, 270-290 (1993).
92. Howes, C. P., "Thermal spraying upgrades cookware quality", *Welding Journal*, ISSN 0043-2296 (1995).
93. <http://www.arksprey.net/>, (Erişim:09/03/2014), (2014).
94. AWS committee on thermal spraying, thermal Spraying, *Welding Journal*, 69-70 (1997).
95. Amin, M., "Surface quality in arc spraying-optimising the parameters", *TWI Bulletin 3*, 407 (5): 91 (1991).
96. Amin, M., "Coating quality in arc spraying-getting it right", *TWI Bulletin 3*, May/june, 424 (3), 90-91 (1992).
97. Sturgeon, A., "Ceramic coating-agrowing technology", *TWI Bulletin*, March/April, 421 (3): 92 (1992).

98. Kowalsky, M. A., Marantz, D. R., Smith, W.F., and Oberkamp, W. L., "HVOF: particle, flame diagnostics and coating characteristics", *Thermal Spray Research and Application, Proceedings of the Third National Thermal Spray Conference*, USA, 587-592 (1990).
99. Fillion, G., "Applying nickel-based alloys by HVOF", *Welding Journal*, 74: 45-47 (1995).
100. Agard Technical Bulletin, *Materials coating techniques* LS-106, March, London, 1-4 (1980).
101. Sulzer Metco (US) Inc., Copyright Westbury, NY 11590 (1995).
102. Saraç, A.S., "Metal kaplama ve elektro kimyasal teknolojiler", *Çağlayan Kitabevi*, İstanbul, 109 (1995).
103. Herman, H., Sampath, S., and Rangaswamy, S., "Ni-Al re-evaluated", *Proceedings of the National Thermal Spray Conference*, USA/Ohio, 47 (1988).
104. Gataowski, JA., "Evaluation of selectively-cooled single-cylinder 0.5-1 diesel engine", *SAE Paper*, No: 900693 (1990).
105. Leising, C.J., and Purohit, G.P., "Waste heat recovery in truck engines", *SAE Technical Paper*, No: 780686 (1978).
106. Kamo, R., and Bryzik, W., "Adiabatic turbo compound engine performance prediction", *SAE Paper*, No: 780068 (1978).
107. Wallace, F.J., Way, Rj.B., and Vollmert, H., "Effect of partial suppression of heat loss to the coolant on the high output diesel engine cycle", *SAE Paper*, No: 790823 (1979).
108. Kamo, R., and Bryzik, W., "Ceramics in heat engines", *SAE Paper*, No: 790645 (1979).
109. Kamo, R. and Bryzik, W., "Cummins-Taradcom adiabatic Turbo compound engine program", *International Congress & Exposition, SAE Paper*, 810070 (1981).
110. Toyoma, K., YoshimitsuT., Misfflyama,T., and Nakagaki,T., "Heat insulated turbocompound engine" *SAE Paper*, No: 831345 (1983).
111. Pradeepam, O., Arunachalam, M., Gopalkrishnan, K. V., Srinivasa, P. and Sejekhan, B.G., "Development and testing of semi-adiabatic engine", *Proc. 8th. National Conf. On I.C. Engines and Combustion*, India, F38-47 (1983).

112. French, C., "Ceramic in reciprocating internal combustion engines", *SAE Paper*, No: 841135 (1984).
113. Sekar, R.R., Kamo, R., and Wood, J.C., "Advanced adiabatic diesel engine for passenger cars", *International Congress & Exposition*, Detroit, Michigan, Feb./March *SAE Paper*, No: 850306 (1984).
114. Wallace, F., J., Kao, T., K., Tarabad, M., Alexander, W., D., and Cole, A., "Thermally insulated diesel engines", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 198 (A): N5 (1984).
115. Morel, T., Fort, E.F., and Blumberg, P.N., "Effect of insulation strategy and design parameters on diesel engine heat rejection and performance", *SAE Paper*, No: 850506 (1985).
116. Hoag, K.,L., Brando, M.,C, and Bryzik, W., "Cummins/Tacom adiabatic engine program", *SAE Paper*, No: 850306 (1985).
117. Morel , T., Keribar, R., Blumberg, P.N. and Fort, R.F., "Examination of key issues in low heat rejection engines" *SAE Paper*, No: 860316 (1983).
118. Walzer, P., Heinrich, H., and Langer, M., "Ceramic components in passenger-car diesel engines", *SAE Paper*, No: 850567 (1985).
119. Hay, N., Watt, P., M., Ormerod, M., J., Burnett, G., P., Beesley, P.,W., and French, B., A., "Desing study for a low heat loss version of the dover engine", *Proc. Instn. Mech. Engrs.*, 200 (1): 53-60 (1986).
120. Havstad, P.H., Gerginj.J., and Wade , W.R., "A ceramic insert uncooled diesel engine", *SAE Paper*, No: 860447 (1986).
121. Parasad, R.S., " Transient heat transfer analysis in an internal combustion engine piston ", *Computers & Structures*, 34 (5): 787–793 (1990).
122. Woschni, G., and Spindler, W., "Heat transfer with insulated combustion chamber walls and its influence on the performance of diesel engines", *Transaction of the ASME*, 110(3): 482-488 (1988).
123. Kawamura, H., "Development status of isuzu ceramic engine", *SAE Paper*, No: 880011 (1988).
124. Miyairi, Y., "Computer simulation of an LHR DI diesel engine", *SAE Paper*, No: 880187 (1988).
125. Alkidas, A.C., "On the performance and emissions of an uncooled heavy-duty single-cylinder diesel engine", *SAE Paper*, No: 880013 (1988).

126. Cheng, W.K., Wong, V.W., and Cao, F., "Heat transfer measurement comparisons in insulated and non-insulated diesel engines", *SAE Paper*, No: 890570 (1989).
127. Dickey, D.W., "The effect of insulated combustion chamber surfaces on direct-injected diesel engine performance, emissions and combustion", *SAE Paper*, No: 890292 (1989).
128. Assanis, D. N., "Effect of combustion chamber on the performance of a low heat rejection diesel engine with exhaust recovery", *Heat Recovery Systems & CHP*, 9 (5): 475-484 (1989).
129. Alkidas A.C., "Performance and emissions achievements with an uncooled heavy duty, single cylinder diesel engine", *SAE Paper*, No: 890144 (1989).
130. Miyairi, Y., Matsumsa, T., Ozawa, T, Odcawa, H. and Nakashima, N., "Selective heat insulation of combustion chamber wall, for a di diesel engine with monolithic ceramics", *SAE Paper*, 890141 (1989).
131. Chang, S.I. ve Rhee, K.I. "Computation of radiation heat transfer in diesel combustion" *SAE International of Highway Meating*, Wisconsin; 327-341 (1983).
132. Bruns, L., Bryzik, W., and Kamo, R., "Performance assessment of u.s. army truck with adiabatic diesel engine", *SAE Paper*, 890142 (1989).
133. Kawamura, H., "Study of construction and tribology in heat insulated ceramic engine", *SAE Paper*, 900624 (1990).
134. Woods, M., Schwarz, E., and Bryzik, W., "Advanced in high temperature components fort he adiabatic engine", *SAE Paper*, 910457 (1991).
135. Rasihhan, Y., and Wallce F.,J., "Piston-liner thermal resistance model for diesel engine simultion", *Journal of Mechanical Engineering Science*, 205 (5): 353-361 (1991).
136. Assanis, D., Wiese, K., Schwarz, E., and Bryzik, W., "The effects of ceramic coatings on diesel engine performance and exhaust emissions", *International & Congress and Exposition, SAE Paper*, 910460 (1991).
137. Winkler, M.,F., and Parker D.,W., "Ceramic thermal barrier coatings provide advanced diesel emissions control and improved management of combustion-exhaust system temperatures", *SAE Paper*, 931106 (1993).
138. Winkler, M.,F., and Parker D.,W., "The role of diesel ceramic coatings in reducing automotive emissions and improving combustion efficiency", *SAE No: 930158, International & Congress and Exposition*, Detroit, 1-5 (1993).

139. Schwarz, E., Reid, M., Bryzik, W., and Danieison, E., "Combustion and performance characteristics of a low heat rejection engine" *International & Congress and Exposition*, Detroit, 1-5 (1993).
140. Woods, M. E., Bryzik, W., and Schwarz, E., "100 hour endurance testing of a high output adiabatic diesel engine", *SAE Paper*, 940951 (1994).
141. Sun, X., Wang, W., G., Bata, R., M., and Gao, X., "Performance evaluation of low heat rejections engines", *Transactions of the ASME*, 2 (2): 2231-0843 (1994).
142. Marks, D.,A., and Boehman, A.,L., "The influence of thermal barrier coatings on morphology and composition of diesel particulates", *International Congress & Exposition*, Detroit, 51-60 (1997).
143. Beg, RA., Bose, P.K., Ghosh, B.B., Banerjee, T.Kr., and Ghosh, A. Kr., "Experimental investigation on some performance parameters of a diesel engine using ceramic coating on the top of the piston" *International Congress & Exposition*, Detroit, 24-27 (1997).
144. Voss, K., Cioffi, J., Gorel, A., Norris, M., Rotolico, T., and Fabel, A., "Zirconium based ceramic, in-cylinder coatings and after treatment oxidation catalysts for reduction of emissions from heavy duty diesel engines", *International & Congress and Exposition*, Detroit, 24-27 (1997).
145. Uzun, A., Çevik, İ., ve Akçıl, M., "Effects of thermal barrier coating on a turbocharged diesel engine performance", *Surface and Coatings Technology*, 116 (119): 505-507 (1999).
146. Kamo, R., Mavinahally, N. S., Kamo, L., Bryzik, W., and Schwartz, E.E., "Injection characteristics that improve performance of ceramic coated diesel engines", *SAE paper*, 1999-01-0972 (1999).
147. Parlak, A., "Aşırı doldurmalı seramik kaplı bir dizel motorunda püskürtme avansı ve sıkıştırma oranının deneysel olarak incelenmesi" doktora tezi", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2000).
148. Ramaswamy, P., Seetharamu, S., Varma, K, B., R., and Rao, K. J., "Thermo mechanical fatigue characterization of zirconium (8%Y₂O₃ - ZrO₂) 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*, 214 (5); 729 (2000).
149. Parlak, A., Yaşar, H., Şahin, B. "Performance and exhaust emission characteristics of a lower compression ratio lhr diesel engine" *Energy Conversion and Management*, 44: 163-175 (2003).

150. Parlak, A., Şahin, B., ve Yaşar, H., "Performance optimization of an irreversible dual cycle with respect to pressure ratio and temperature ratio-experimental results of a ceramic coated IDI diesel engine", *Energy conversion and management*, 45: 1219-1232 (2004).
151. Parlak, A., "The effect of heat transfer on performance of the diesel cycle and exergy of the exhaust gas stream in a lhr diesel engine at the optimum injection timing", *Energy conversion and management*, 46: 167-179 (2005).
152. Borat, O., Sürmen, A., ve Balcı, M., "İçten Yanmalı Motorlar", , *Teknik Eğitim Vakfı Yayınları*, Ankara, cilt1, baskı 5 (1995).
153. Peng W., and Zhang, Y., " Eutectic reaction and cored dendritic morphology in yttrium doped Zr-based amorphous alloys", *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 19 (8): 747-751 (2012).
154. Özel, S., Turhan, H., ve Sarsilmaz, F., "AA2024 alüminyum alaşımı yüzeyine $Al_2O_3/Al_2O_3+TiO_2$ tozunun plazma sprey yöntemiyle kaplanması", *Fırat Üniv. Fen ve Müh. Bil. Dergisi* 7 (3): 503-508 (2008).
155. Portinha, V., Teixeira, J., Carneiro, J., Martins, M.F., Costa, R. V., and Stoeber, D., "Characterization of thermal barrier coatings with a gradient in porosity", *Surface & Coatings Technology* , 195: 245– 251 (2005).
156. Kucuk, A., Berndt, C.C., Senturk U., and Lima, R.S., "Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. II: Acoustic emission response", *Materials Science and Engineering* , 284 (A): 41–50 (2000).
157. Li, C., She, J., Pang, M., Yang, W., and Zhan, Y., " Phase equilibria in the Al-Zr-Nd system at 773 K", *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 32 (1): 24-29 (2011).
158. Shea, J., Zhan, Y., Lia, C., Du, Y., Xu, H., and He, Y., "Phase equilibria of the Al-Pr-Zr ternary system at 773 K" , *Journal of Alloys and Compounds*, Volume 503 (1): 30–60 (2010).
159. Okamoto, H., " Al-Zr (aluminum-zirconium)", *Journal of Phase Equilibria*, 23 (5): 455–456 (2002).
160. Salle, C., Grosseau, P., Bernard, G., Iacconi, P., Benabdesselam, M., and Fantozzi, G., "Detection of tetragonal zirconia in alumina-zirconia powders by thermoluminescence", *Journal of the European Ceramic Society*, 23 (5): 667-73 (2003).

161. Taggart, A. F., "Handbook of mineral dressing-taggart, ores and industrial minerals", *Wiley Handbook Series*, John Willey-Sons Inc., New York, 1945-1905 (1945).
162. Gülfen, G., "Hidroklorik asit çözeltisinde milas boksit cevherlerinin çözünürlüğü", Yüksek Lisans Tezi, *SDÜ. Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 25-28 (1998).
163. Choia, D.-H., Ahna, B.-W., Quesnelb, D. J., and Jung, S.-B., "Behavior of β phase (Al_3Mg_2) in AA 5083 during friction stir welding", *Intermetallics*, 35: 120–127 (2013).
164. Diltemiz, S. F., "Plazma sprej termal bariyer kaplamaların ısı ve mekanik özelliklerinin optimizasyonu", Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, 38-40 (2010).
165. Koollos, M.F.J., Koolloos, S., and Schouten, M.J.W., "Thermal testing of low porosity microcracked thermal barrier coatings", *National Aerospace Laboratory*, NLR-TP, 2002-048 (2002).
166. Husovic, T., Jancic R., Cvetkovic M., Mitrakovic M., and Popovic Z., "Thermal shock behavior of based refractories: fracture resistance parameters and water quench test", *Materials Letters*, 38: 372-378 (1999).
167. Collin, M., and Rowcliffed, D., "Analysis and prediction of thermal shock in brittle materials", *Acta Material*, 48: 1655-1665 (2000).
168. Çetinkaya, S., "Motor Termodinamiği", *Nobel Yayınları*, Ankara, (2004).
169. Gürbüz, H., " Termal bariyer kaplamanın dizel motor performans ve emisyonlarına etkisinin deneysel olarak incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 34-42 (2011).
170. Çetinkaya, S., "Motorlu Taşıtlar Mekaniği", *Nobel Yayınları*, İstanbul, (2011).
171. Ergeneman, M., Arslan, H., ve Mutlu, M., Motorlu Taşıtlardan Kaynaklanan Kirleticiler Kitabı, İstanbul, (1998).

ÖZGEÇMİŞ

Erdiñ VURAL 1982 yılında Aydın'da doğdu; ilk ve orta öğrenimini Aydın'da tamamladı. Aydın Mimar Sinan Endüstri Meslek ve Teknik Lisesinin Motor Teknik Bölümünden mezun oldu. 2002 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Karabük Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Eğitimi Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2006 yılında mezun oldu. 2007 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Yüksek Lisans Programında öğrenimine başlayıp 2009 yılında iyi derece ile tamamladı. 2007 yılında dışardan görevlendirmeli öğretim görevlisi olarak, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesinde 2 yıl, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesinde 1 yıl çalıştı. 2010 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim Dalı'nda başlamış olduğu Doktora programından ayrılıp, 2011 yılında Başladığı, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora eğitimine devam etmektedir. 2009 yılında Bitlis Eren Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı. Halen aynı yerde çalışmaya devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Zeybek Mah. Zeybek Bul. Toki evleri
B1-4 Blok D:13

AYDIN

Tel : (530) 349 00 52

E-posta : erdinc009@hotmail.com