

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



PLAZMA SPREY YÖNTEMİYLE SERAMİK KAPLAMANIN EGZOZ
BORUSU ÜZERİNE ETKİSİ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERHAT ŞAP

121136103

Anabilim Dalı : Otomotiv Mühendisliği

Programı : Taşıt Dinamiği ve Kontrol

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hanbey HAZAR

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 9 Ağustos 2016

ELAĞİĞ-2016

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PLAZMA SPREY YÖNTEMİYLE SERAMİK KAPLAMANIN EGZOZ BORUSU
ÜZERİNE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SERHAT ŞAP

121136103

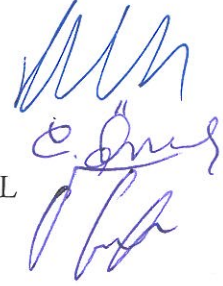
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 10/08/2016

Tezin Savunulduğu Tarih : 26/08/2016

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hanbey HAZAR

Diğer Jüri Üyeleri : Doç. Dr. Cengiz ÖNER

Yrd. Doç. Dr. Tahsin YÜKSEL



AĞUSTOS-2016

ÖNSÖZ

Yüksek Lisans eğitimim boyunca bilgi, tecrübe ve desteğini esirgemeyen Otomotiv Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi danışman hocam Prof. Dr. Hanbey HAZAR' a teşekkürü bir borç bilirim. Tezime proje kapsamında destekte bulunan FÜBAP birimine teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında bana yardımcı olan Mahmut Nedim TANSU ve Hakan GÜL' e teşekkür ederim.

Yaşamım boyunca bana destek olan sevgili aileme ve eşime teşekkür ederim.

Serhat ŞAP
ELAZIĞ-2016



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VI
SUMMARY	VII
TABLolar LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XII
1.GİRİŞ	1
2- TERMAL BARIYER KAPLAMA	3
2.1. Termal Bariyer Kaplamanın Tarihçesi.....	3
2.2. Termal Bariyer Kaplama Yöntemleri.....	4
2.2.1. Alev Sprey Yöntemi	4
2.2.1.1. Toz Kullanılarak Alevle Spreyleme	4
2.2.1.2. Tel Kullanılarak Alev Spreyleme	5
2.2.1.3. HVOF (Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt).....	6
2.2.1.4. D-Gun (Detonasyon Tabancası)	7
2.2.2. Elektrik Ark Spreyleme Yöntemi	7
2.2.3. Plazma Ark Sprey Yöntemi	8
2.2.3.1. Plazma Ark Sprey Sistemi	8
2.2.3.2. Plazma Sprey Kaplamanın Aşamaları	9
2.2.3.3. Plazma Sprey Kaplama Yapılabilen Malzemeler	11
2.2.3.4. Plazma Sprey Kaplamaların Başlıca Özellikleri.....	13
2.2.3.4.1. Mikroyapı Özellikleri.....	13
2.2.3.4.2. Porozite ve Yoğunluk Özelliği.....	14
2.2.3.4.3. Yapışma ve İç Gerilme Özelliği.....	14
2.2.3.4.4. Sertlik Özelliği	15
2.2.3.4.5. Süneklik Özelliği.....	15
2.2.3.4.6. Elastik Modül	15
2.2.3.5. Plazma Sprey Kaplamaları Etkileyen Parametreler	15
2.2.3.5.1. Yüzey Pürüzlülüğü	16
2.2.3.5.2. Toz Boyutu.....	16
2.2.3.5.3. Taban Malzeme Sıcaklığı.....	17

2.2.3.5.4. Sprey Mesafesi	19
2.2.3.5.5. Toz Besleme Değeri	20
2.2.3.6. Plazma Sprey Kaplamaların Kullanıldığı Endüstri Alanları.....	20
2.2.3.7. Plazma Sprey Kaplama Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları.....	22
2.2.3.8. Kaplama Malzemesi Olarak Kullanılan Krom Karbürler	23
3. EGZOZ EMİSYONLARI	25
3.1. Egzoz Emisyonu Sonucu Oluşan Gazlar.....	26
3.1.1 Azot Oksitlerin (NO _x) Oluşumu	26
3.1.1.1. Zeldovich veya Isıl NO _x Oluşum Mekanizması.....	27
3.1.1.2. Fenimore veya Ani NO Oluşum Mekanizması.....	27
3.1.1.3. Yakıttan Kaynaklanan NO	28
3.1.2. Hidrokarbon Emisyonları (HC) Oluşumu	28
3.1.3. İs ve Partikül Maddeleri (PM) Oluşumu	30
3.1.4. Kükürtdioksit (SO ₂) Oluşumu	30
3.1.5. Karbon monoksit (CO) Oluşumu	30
3.1.6. Karbondioksit (CO ₂) Oluşumu	31
3.1.7. Aldehitlerin (C-H-O bileşikleri) Oluşumu	31
3.2. Egzoz Gazı Emisyon Standartları	32
4. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	34
5. MATERYAL ve METOT	38
5.1. Deney Motoru ve Teknik Özellikleri	39
5.2. Test Düzeneği.....	40
5.3. Egzoz Emisyon Testleri	42
5.4. Metalografik İncelemeler	44
5.4.1. Mikrosertlik Ölçümleri	44
5.4.2 Egzoz Borularına Ait Numunelerin SEM Ve EDS Analizi.....	44
5.4.3 Egzoz Borularına Ait Numunelerin X-RD Analizi	45
5.4.4. Egzoz Borularına Ait Numunelerin Korozyon Testi	45
5.5. Kaplama İşlemi	46
6. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA	47
6.1. Egzoz Emisyon Değerlerinin Mukayesesi	47
6.1.1. NO _x Emisyonu	47
6.1.2. CO Emisyonu	49

6.1.3. CO ₂ Emisyonu	51
6.1.4. HC Emisyonu	53
6.1.5. Duman (İs) Yoğunluğu	55
6.2. EGS Değerlerinin Mukayesesi	57
6.3. Metalografik Mukayeseler	63
6.3.1. Mikrosertlik Ölçümleri	63
6.3.2. Egzoz Borularına Ait Numunelerin SEM Analizi	66
6.3.2. Egzoz Borularına Ait Numunelerin EDAX Analizi	72
6.3.3. Egzoz Borularına Ait Numunelerin X-RD Analizi	76
6.3.4. Egzoz Borularına Ait Numunelerin Korozyon Deneyi	78
7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	80
8. ÖNERİLER	82
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	89

ÖZET

PLAZMA SPREY YÖNTEMİYLE SERAMİK KAPLAMANIN EGZOZ BORUSU ÜZERİNE ETKİSİ

İçten yanmalı motorlar birçok sistemlerden oluşmaktadır. Bu sistemler büyük oranda birbirileri ile ilişkili ve bağlantılıdır. Bu sistemlerden bir tanesi de egzoz sistemidir. Egzoz sistemini oluşturan parçalar motor stop ettirilinceye kadar sürekli egzoz gazlarına maruz kalmaktadır. Egzoz sisteminin sürekli bir şekilde egzoz gazlarına maruz kalması, egzoz sisteminin ömrünü azaltmaktadır. Egzoz sistemi ayrıca; yağmurlu havalarda oluşan su, çamur, kış aylarında buzlanmayı önlemek için yollara dökülen tuz vb. gibi olumsuz etkenler dolayı deformasyona uğrar. İçten yanmalı motorlarda egzoz sistemi kullanıldıkları bölge ve şartlara göre belirli bir süre sonra değiştirilmeleri gerekir. Bu parçaların ömürlerinin arttırılması, hem bireysel hem de ülke ekonomisine ciddi kazanımlar sağlayacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, egzoz borusu plazma spre yöntemiyle krom karbür (Cr_3C_2) malzeme ile yaklaşık 100 mikron kalınlığında kaplanmıştır. Kaplama işlemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, egzoz borusunun sadece dış kısmı 100 mikron kalınlığında kaplanmıştır. İkinci aşamada, egzoz borusunun iç ve dış kısmı aynı kalınlıkta kaplanmıştır. Birinci ve ikinci aşamada yapılan çalışma, standart egzoz sistemi ile karşılaştırılmıştır. Egzoz borularının krom karbür (Cr_3C_2) malzeme ile kaplanmasıyla hem iç hem de dıştan etki eden, kimyasal ve fiziksel çözücü ve deformasyona uğraticı faktörlerin etkisi azaltılmış olunacaktır. Böylece egzoz borusunun ömrünü azaltıcı faktörler kaplama malzemesi tarafından karşılanmış olacaktır.

Egzoz gazlarının kimyasal tepkime işlemi gaz sıcaklığı manifold çıkışından itibaren azalarak da olsa devam etmektedir. Yanma odasında meydana gelen yanma sonu sıcaklığı yaklaşık 2700 °C dir. Susturucuya gelince gaz yaklaşık 300 °C civarındadır. Dolayısıyla egzoz borularının kaplanması gazın soğumasını geciktirerek zararlı emisyonların CO_2 ve H_2O gibi zararsız emisyonlara dönüşmesine yardımcı olacaktır. Bilindiği gibi katalitik konvertör, EGR ve çeşitli katalizörler yüksek sıcaklık altında verimli çalışmaktadır. Böylece emisyon kontrollerinin daha verimli çalışmasına da katkılar sağlanacaktır.

Elde edilen sonuçlar, plazma spre yöntemi ile egzoz borusunun kaplanması sonucunda egzoz emisyon ve egzoz gaz sıcaklığı değerlerinde dikkate değer bir iyileşme olduğunu göstermiştir. Ayrıca yapılan deneyler kaplanmış egzoz borusunun malzeme ömrünün standart egzoz borusuna göre arttığını göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Plazma Sprey Kaplama, Krom Karbür (Cr_3C_2), Dizel motor, Egzoz Emisyon

SUMMARY
THE IMPACT OF THE CERAMIC COATING BY PLASMA SPRAY
COATING METHOD ON THE EXHAUST PIPE

The internal combustion engine is composed of many systems. These systems are largely associated and connected with each other. One of these systems is the exhaust system, too. Exhaust system components are exposed to the exhaust gas continuously until the engine stops. Because of a continuous manner to be exposed to the exhaust gas of the exhaust system, it reduces the life of the exhaust system. The exhaust system also exposed to deformation because of the negative factors such as water and mud in rainy weather and the spilled salt on the roads to prevent icing during the winter, and so on. In the internal combustion engine, the exhaust system must be replaced after a certain time according to the district and the conditions of their use. It is expected to provide significant benefits to both individual and the national economy when these components life improved.

In this study, exhaust pipe was coated by a plasma spray method with chromium carbide (Cr_3C_2) material approximately 100 microns thickness. Coating was done in two stages. In the first stage, only the outer portion of the exhaust pipe was coated 100 microns thickness. In the second step, the interior and exterior portion of the exhaust pipe were coated with the same thickness. The study in first and second steps were compared with the standard exhaust system. By the coating of exhaust pipe with chrome carbide (Cr_3C_2), both the internal and external effects of the factors that cause deformation and the effect of physical and chemical solvents influencing will be reduced. Thus, factors reducing the life of the exhaust pipe will be covered by the coating material.

The gas temperature of the chemical reaction process of the exhaust gas, decrease albeit, continues from the manifold outlet. End of the combustion temperature occurring in the combustion chamber is about 2700°C . Temperature of gas coming to muffler is about 300°C . Thus, coating the exhaust pipe will help to transform harmful emissions into harmless emissions such as CO_2 and H_2O by delaying the cooling of gases. As known catalytic converters, EGR and various catalysts work efficiently under high temperature. In this way, it will also help the emission controls to work more efficiently.

The obtained results showed that as a result of the coating of the exhaust pipe by the plasma spray exhaust emissions and exhaust gas temperature values has been significantly improved. Moreover experiments showed that the life of the materials coated exhaust pipe increased more than to the standard exhaust pipe.

Keywords: Plasma Spray Coating, chromium carbide (Cr_3C_2), diesel engines, Exhaust Emissions

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Plazma sprej tekniğı ile üretilen kaplamaların kullanım alanları	21
Tablo 2.2. Krom karbürün fiziksel ve mekanik özellikleri	24
Tablo 3.1. Binek taşıtlar için Euro emisyon standartları.	32
Tablo 3.2. Benzin yakıtlı binek araçlar için Euro emisyon standartları.	33
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri	40
Tablo 5.2. Bosch marka emisyon cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyeti.....	43
Tablo 5.3. Plazma sprej kaplamanın üretim parametreleri	46



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Toz kullanılarak alev spreyleme	5
Şekil 2.2. Tel kullanılarak alev spreyleme	5
Şekil 2.3. HVOF spreyleme proses şeması	6
Şekil 2.4. D-Gun kaplama prosesinin şeması.	7
Şekil 2.5. Elektrik ark spreyleme prosesi	8
Şekil 2.6. Plazma spreyleme sistemi düzeneği	9
Şekil 2.7. Plazma spreyleme işleminin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.8. Tipik plazma gazlarının sıcaklığın fonksiyonu olarak entalpi değerleri	11
Şekil 2.9. Plazma spreyleme kaplama prosesi ile kaplanabilen malzemeler.....	12
Şekil 2.10. Plazma spreyleme kaplama ile üretilen bazalt esaslı kaplama SEM mikroyapısı	14
Şekil 2.11. Yapışma direnci yüzey pürüzlülüğü grafiği	16
Şekil 2.12. Toz boyutu ve yüzey pürüzlülüğü optimizasyonu.....	17
Şekil 2.13. Paslanmaz çelik üzerine çarpan nikel eriyiklerinin taban malzeme üzerindeki formu a)2900 °C b) 4000 °C	18
Şekil 2.14. Paslanmaz çelik üzerine uygulanan nikel kaplamanın taban malzeme sıcaklığına göre yapışma direnç değerleri	19
Şekil 2.15. Cr-C fazlarının üç farklı kristal yapısının atom dizilimleri ve tekrarlayan en küçük kafes birimleri	23
Şekil 3.1. Dizel motor emisyonlarının grafiksel gösterimi	25
Şekil 3.2. Dizel motorlarda ani yanma sırasında kirleticilerin oluşumu.....	26
Şekil 3.3. Dizel motorlarda kontrollü yanma sırasında kirleticilerin oluşumu	26
Şekil 3.4. Tutuşma gecikmesi periyodunda püskürtülen yakıtın HC mekanizmasının şematik gösterimi	29
Şekil 5.1. Lombardini marka 6LD 400 model dizel motor.....	40
Şekil 5.2. Motor test düzeneği şematik görünümü	41
Şekil 5.3. Bosch marka BEA-350 model emisyon cihazı.....	42
Şekil 5.4. Operating Instructions Model (W) 502 K/J termometre	43
Şekil 5.5. Mikrosertlik cihazı.....	44
Şekil 5.6. SEM Cihazı.....	44
Şekil 5.7. X-RD Cihazı	45
Şekil 5.8. Korozyon Test Cihazı.....	45
Şekil 6.1. NOx emisyonunun SB, DKB ve İDKB'daki değişimi	48

Şekil 6.2. CO emisyonunun SB, DKB ve İDKB'daki değişimi	50
Şekil 6.3. CO ₂ emisyonunun SB, DKB ve İDKB'daki değişimi	52
Şekil 6.4. HC emisyonunun SB, DKB ve İDKB'daki değişimi	54
Şekil 6.5. İS emisyonunun SB, DKB ve İDKB'daki değişimi	56
Şekil 6.6. MÇ EGS değişimi.....	58
Şekil 6.7. 1. Bölge EGS değişimi	59
Şekil 6.8. 2. Bölge EGS değişimi	60
Şekil 6.9. 3. Bölge EGS değişimi	61
Şekil 6.10. 4. Bölge EGS değişimi	62
Şekil 6.11. EÇ EGS değişimi.....	63
Şekil 6.12. SB ve DKB numunesinin sertlik-mesafe değişimi	64
Şekil 6.13. SB ve İDKB numunesinin sertlik-mesafe değişimi.....	65
Şekil 6.14. İDKB Numunesinin SEM görüntüsü.....	66
Şekil 6.15. İDKB Numunesinin SEM görüntüsü.....	67
Şekil 6.16. İDKB Numunesinin SEM görüntüsü.....	68
Şekil 6.17. DKB Numunesinin SEM görüntüsü	69
Şekil 6.18. DKB Numunesinin SEM görüntüsü	70
Şekil 6.19. SB Numunesinin SEM görüntüsü.....	71
Şekil 6.20. SB Numunesinin SEM görüntüsü.....	72
Şekil 6.21. İDKB numunesinin EDAX Analizi alınan nokta	73
Şekil 6.22. İDKB 4 nolu spektrumun EDAX Analizi grafiği	73
Şekil 6.23. DKB numunesinin EDAX Analizi alınan nokta.....	74
Şekil 6.24. DKB 2 nolu spektrumun EDAX Analizi grafiği	74
Şekil 6.25. SB numunesinin EDAX Analizi alınan nokta	75
Şekil 6.26. SB 1 nolu spektrumun EDAX Analizi grafiği.....	75
Şekil 6.27. SB numunesinin X-RD Grafiği	76
Şekil 6.28. DKB numunesinin X-RD Grafiği	77
Şekil 6.29. İDKB numunesinin X-RD Grafiği	77
Şekil 6.30. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin nyquist diyagramları	78
Şekil 6.31. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin yarı logaritmik akım potansiyel grafikleri.....	79

KISALTMALAR LİSTESİ

EGR	: Egzoz Gazı Resirkülasyonu
TBK	: Termal Bariyer Kaplama
HVOF	: Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt
D-Gun	: Detonasyon Tabancası
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
HFK	: Hava Fazlalık Katsayısı
H/Y	: Hava/Yakıt
⁰KMA	: Krank Mili Açısı
TG	: Tutuşma Gecikmesi
PM	: Partikül Maddeler
EDAX	: Enerji Dağıtıcı Spektroskopi
X-RD	: X Işınları Difraktometresi
ÖYT	: Özgül Yakıt Tüketimi
EGS	: Egzoz Gaz Sıcaklığı
SB	: Standart Boru
DKB	: Dışı Kaplanmış Boru
İDKB	: İçi Dışı Kaplanmış Boru
MÇ	: Manifold Çıkışı
EÇ	: Egzoz Çıkışı
KW	: Kilowatt
HP	: Beygir Gücü

SEMBOLLER LİSTESİ

Cr₃C₂	: Krom Karbür
Cr₂O₃	: Krom Oksit
CO₂	: Karbondioksit
H₂O	: Su
NO_x	: Azot Oksit
HC	: Hidrokarbon
CO	: Karbonmonoksit
NO₂	: Azotdioksit
SO₂	: Kükürtdioksit
H₂SO₄	: Sülfirikasit
NiCr	: Nikelkrom
HNO₃	: Nitrik Asit
HCl	: Hidroklorik Asit
NaCl	: Sodyum Klorür
Fe	: Demir
C	: Karbon
Ni	: Nikel
Cr	: Krom
Mg	: Magnezyum
m/s	: Metre/Saniye
K	: Kelvin
K/J	: Kelvin/Joule
GPa	: Gigapascal
W/Mk	: Watt/Metre Kelvin
µm	: Mikrometre

1. GİRİŞ

Modern teknolojinin ihtiyaç duyduğu temel maddelerin önemli bir kısmını oluşturan metal ve alaşımlar, çeşitli faktörlerin etkin olduğu dış ortamlarda kullanılmaktadırlar. Metal yüzeylerinin dış ortamdan korunması veya kullanım alanına göre maruz kaldığı pas ve korozyonu ortadan kaldırmak veya minimuma indirmek amacıyla çeşitli yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. [1]

Son yıllarda, içten yanmalı motorlarda, motor performansını artırma ve emisyon değerlerini düşürme amaçlı çalışmalar hız kazanmıştır. İçten yanmalı motorlarda sırasıyla yüzey kalitesi, performans ve emisyon gibi parametreler birbirleriyle direkt olarak bağlantılı unsurlardır. Yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi motor performansını, dolayısıyla emisyon değerlerini pozitif yönde etkilemektedir.

Motorun çalışması esnasında sürekli devinim halinde bulunan motor parçaları elemanları, gerek çalışma ortamı (yüksek sıcaklık, basınç, koroziif gazlar vb.) ve gerekse alçaktan yükseğe devir aralıklarında tekrarlı zorlamalar altında tribolojik deformasyonlara maruz kalmaktadır. Bu deformasyonlar malzemenin yüzeyinden başlayarak, iç yapısına kadar ilerlemekte ve hasarlara sebep olmaktadır.

Motor parçalarında meydana gelen bu deformasyonlar motorun bir süre sonra verimli çalışmasını engellemekte, yakıt tüketiminde artışa ve zararlı gaz emisyonlarına neden olabilmektedir. İçten yanmalı motorları oluşturan sistemlerden bir tanesi de egzoz sistemidir. Egzoz sisteminin kaplanmasıyla; hem açık alanda çeşitli çözücülere maruz kalmasından dolayı oluşan dış deformasyonların önüne geçilecek hem de egzoz gazı içerisindeki kimyasal çözücülerin olumsuz etkisi karşılanacaktır.

Malzemelerin yüzeylerine başka bir malzemenin biriktirilmesi işlemine kaplama denir. Kaplama işlemi ile motor parçalarının zor çalışma ortamlarında mukavemetlerinin artırılması, yapısal olarak bozulmalarının önlenmesi ya da en aza indirgenebilmesi, koroziif koşullarda dayanımlarının sağlanması, mekanik sürtünme sonucu çizilme ve aşınmalarının bertaraf edilebilmesi sağlanmaktadır.

Kaplama yöntemi olarak çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Kaplama yapılacak parçaya uygulanan yöntemler arasında biride plazma kaplama yöntemidir. Plazma kaplama yöntemi bir tabakanın kuvvetlendirilmiş yüzey özellikleri ile bir ana metalin farklı nitelikli bir tabaka ile kombinasyonuna imkân sağlar. Plazma sprey yardımıyla aşınma, ısınma veya korozyon ile bozulmuş bölgelerin kaplanmasıyla bu parçaların tamirati da mümkündür. Plazma kaplama aynı zamanda işlem esnasında ana metal

sıcaklıklarını düşük tutarak hassas parçaların ısıl deformasyonlara uğrama riskini ortadan kaldırır [2].



2- TERMAL BARIYER KAPLAMA

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçalarda oluşan oksidasyon, aşınma, korozyon ve erozyonu önlemek amacıyla oluşturulan tabakalara termal bariyer kaplama (TBK) denir. TBK'nın görevi; gaz türbini, içten yanmalı motor gibi yüksek sıcaklık altında çalışan sistemlerin ısıya maruz kalan parçalarını korumaktır. TBK'lar ile metalik parçaların yüzey sıcaklığını, kaplamanın kalınlığına ve termal özelliklerine bağlı olarak 100-3000 °C civarında düşürmek mümkündür. Metalik parçaların yüksek sıcaklıklardaki oksitlenme hızı ve mekanik mukavemeti göz önüne alındığında sıcaklıktaki bu düşüş kayda değerdir [3].

TBK'da üç temel tabaka bulunur. Bunlardan birincisi kaplanacak olan malzeme, ikincisi seramik kaplama malzemesi ve üçüncüsü de bu iki malzemenin birbirine güçlü bir şekilde tutunmasını sağlayacak bağlayıcı tabakadır. TBK'da öncelikle kaplanacak bir altlık malzeme seçilir. Seçilen bu altlık malzemeye seramik malzemenin tutunabilmesi için altlık önce kimyasal olarak temizlenir. Daha sonra abrasif parçacıklar püskürtülerek pürüzlendirilir. Partiküller pürüzlü yüzeyin hem oyuklarına girerek hem de yüzey pikleri üzerinde büzüşerek katılaşırlar ve kaplamanın daha kuvvetli olarak bağlanmasını sağlarlar [4].

2.1. Termal Bariyer Kaplamanın Tarihçesi

TBK yöntemi, çeşitli malzemeleri korozyondan korumak için çinko kullanımı amacıyla 1900'lerin başlarından beri kullanılan bir yöntemdir. İlk kez termal sprej prosesinin alev sprej olarak 1911 yılında İsviçre'de kullanılmıştır. Daha sonra 1950'li yıllarda patlamalı tabanca sprej tekniği geliştirilmiştir. 1950'lerin sonları ile 1960'ların başlarında plazma sprej tabancasının geliştirilmesiyle, kaplama malzemesi olarak seramikler ve refrakter metaller gibi yüksek sıcaklık malzemelerinin kullanılması ticari olarak uygulanabilir hale gelmiştir. Alev ve plazma spreje ek olarak HVOF ve patlamalı tabanca sprej teknikleri ile günümüzde termal sprej işlemleri zor ve yüksek beklenti gerektiren şartlara rağmen yaygın olarak kullanılmaktadır.

TBK'lar 1970'li yıllarda gaz türbin motorlarının yanma odasına başarılı bir şekilde uygulanmıştır. 1980'lerde ise uçakların türbin motorlarının kanatlarına kaplama işlemi uygulanmıştır [5].

Günümüzde ise TBK yüksek sıcaklık uygulama alanlarında (uçak motor parçaları, uydu, roket sistemleri, fırınlar, kazanlar, petrokimya tankları, nükleer

santraller, motor parçaları, gaz türbinleri) parçaların zor çalışma şartlarında dayanımlarının arttırılması, yapısal olarak deformasyonlarının önlenmesi ya da en aza indirgenebilmesi, korozyif koşullarda dayanımlarının sağlanması, mekanik sürtünme sonucu çizilme ve aşınmalarının önüne geçilebilmesi amacıyla daha fazla kullanılmaktadır.

2.2. Termal Bariyer Kaplama Yöntemleri

Termal spreyci yöntemleri, metalik ve metalik olmayan kaplamaların gerçekleştirilmesi için yararlanılan kaplama işlemleri grubunu ifade etmek için kullanılır. Bu yöntemler 3 büyük kategoride ele alınmaktadır.

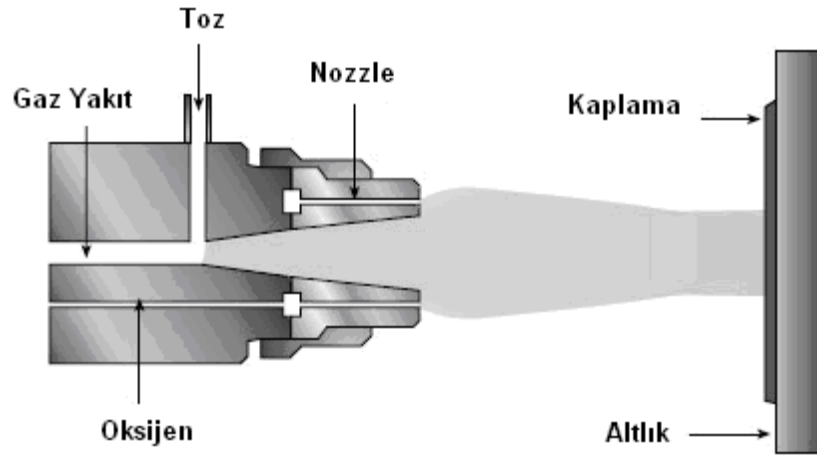
- Alev spreyci yöntemi
- Elektrik ark spreyci yöntemi
- Plazma ark spreyci yöntemi

2.2.1. Alev Spreyci Yöntemi

Alev spreyleme yöntemlerinde, düşük hızda toz ve tel kullanılarak yapılmakta olup, yüksek hızlı işlemlerde ise HVOF ve D-Gun yöntemleri uygulanmaktadır.

2.2.1.1. Toz Kullanılarak Alevle Spreyleme

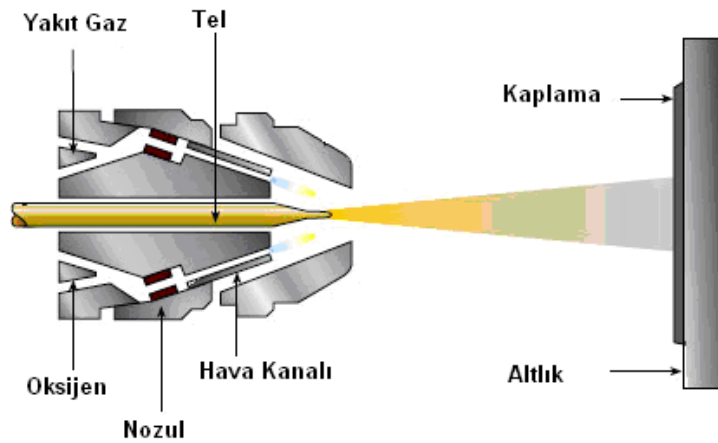
Bu işlemden toz besleme stoku oksijen-yakıt alevine gönderilerek ertirilip iş parçasına püskürtülmektedir. Partikül hızı nispeten yavaş olup (<100 m/s), biriktirilen kaplamanın bağ mukavemeti yüksek hızlı işlemlerden (D-Gun ve HVOF) genelde daha düşüktür. Bu yöntemle kaplamada fazla miktarda porozite olup, bağ mukavemeti de oldukça düşüktür. Spreyci hızı genelde 0,5 – 9 kg/saat değeri arasında değişmektedir. Bu yöntem düşük ertirme sıcaklığına sahip tozlarda tercih edilebilecek olup, nispeten iyi sonuçlar alınabilmektedir [6].



Şekil 2.1. Toz kullanılarak alev spreyleme [6]

2.2.1.2. Tel Kullanılarak Alev Spreyleme

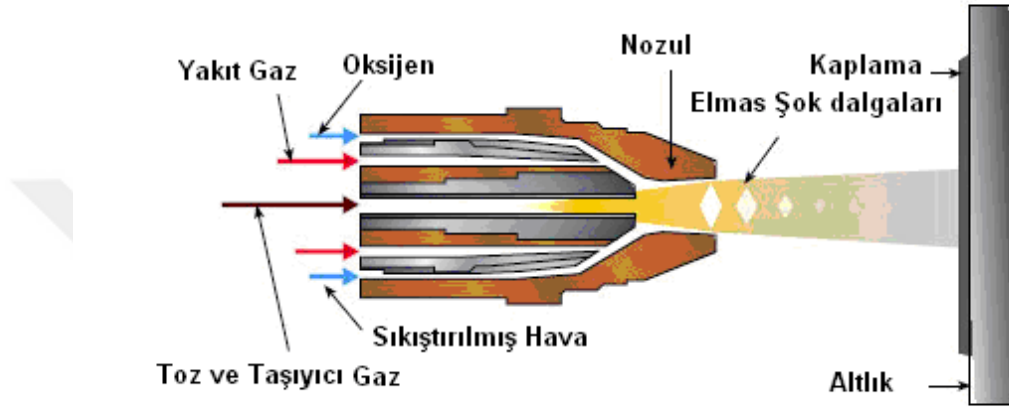
Tel alev spreylemede alevin birincil fonksiyonu beslenen malzemeyi eritmek içindir. Havanın akışı sonra ergimiş malzemeyi parça üzerine atomize ederek kaplama işlemi gerçekleştirilmiş olur. Sprey hızı paslanmaz çelikte 0,5–9 kg/saat değerleri arasında değişmektedir. Yine düşük ergime noktasına sahip malzemeler, örneğin çinko ve kalay alaşımları oldukça yüksek hızlarda kaplanabilmektedir. Altlık malzemenin sıcaklığı 95–205 °C sıcaklıkları arasında değişebilmektedir. Bunun nedeni ise uygulanan enerjinin büyük bir kısmının daha çok eritmede kullanılmasıdır [7].



Şekil 2.2. Tel kullanılarak alev spreyleme [7].

2.2.1.3. HVOF (Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt)

HVOF' ta bir gaz yakıt (Hidrojen, propan veya propilen) ve oksijen 2500–3100 °C sıcaklık aralığındaki yakma jetini oluşturmada kullanılır. Yanıcı gazın yardımıyla 650 m/s gibi çok yüksek hızlara ulaşabilen kısmen ergimiş tozlar, altlık malzeme yüzeyine çok yüksek hızla çarparak katılaşır ve kaplamayı oluşturur

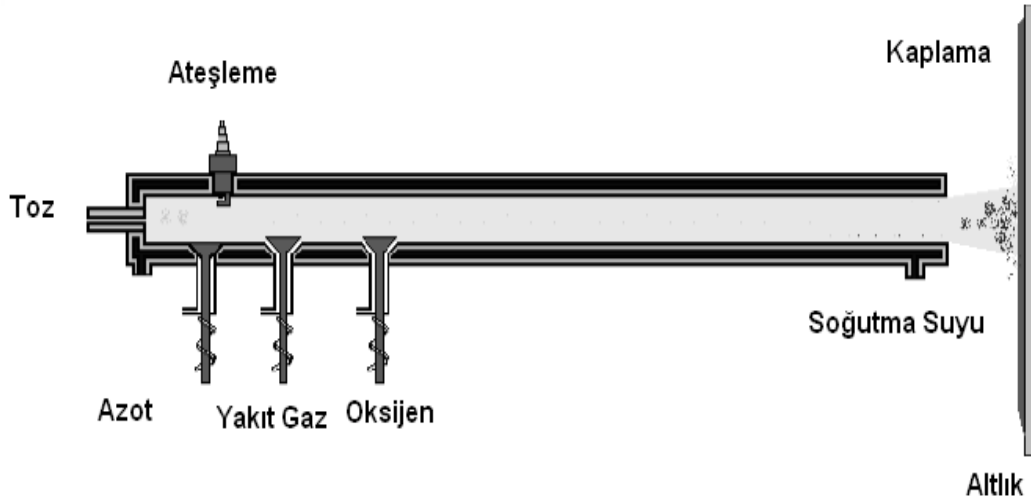


Şekil 2.3. HVOF spreyleme proses şeması [7].

Bu işlemle elde edilen kaplamalar çok yoğun olup, gözenek sayısı düşüktür. Kaplama yüzeyi daha az pürüzlü olan bu kaplama prosesinde ayrıca bağ mukavemeti de çok yüksek olup işlem esnasında oksitlenme riski daha azdır. HVOF işleminin kaplama hızı 2,3–14 kg/saat arasında değişmektedir. HVOF kaplama prosesinde altlık malzemeye ısı geçişi diğer püskürtme yöntemlerine göre daha fazla olduğundan soğutma sistemi daha önemlidir [8].

2.2.1.4. D-Gun (Detonasyon Tabancası)

Bu sistemde bir püskürtme namlusu içerisinde reaksiyon oluşturulup bir gaz yakıtın oksijenle birlikte yakılması ile ortaya çıkan ısı kullanılmaktadır. Bu ısı ve detonasyon dalgalarıyla, kaplanacak olan toz ergitilerek süpersonik bir hızla altlık malzeme yüzeyine çarptırılması sonucu kaplama elde edilmektedir. Kaplama tozunu ergitmek için gerekli olan ısı enerjisi gaz yakıtın yakılması sonucu sağlanır. Bağ mukavemeti oldukça yüksek olan bu işlemde, kaplamalar yoğun olup, gözenek miktarı da çok azdır. Bu sistem özellikle karbür esaslı kaplamalar için geliştirilmiş olup, plazma ve HVOF sistemlerine göre enerji ve gaz sarfıyatı daha azdır. Ancak 150 desibel seviyelerinde yüksek gürültü seviyesinden dolayı kaplama ortamında çok iyi ses izolasyonuna ihtiyaç vardır [9].

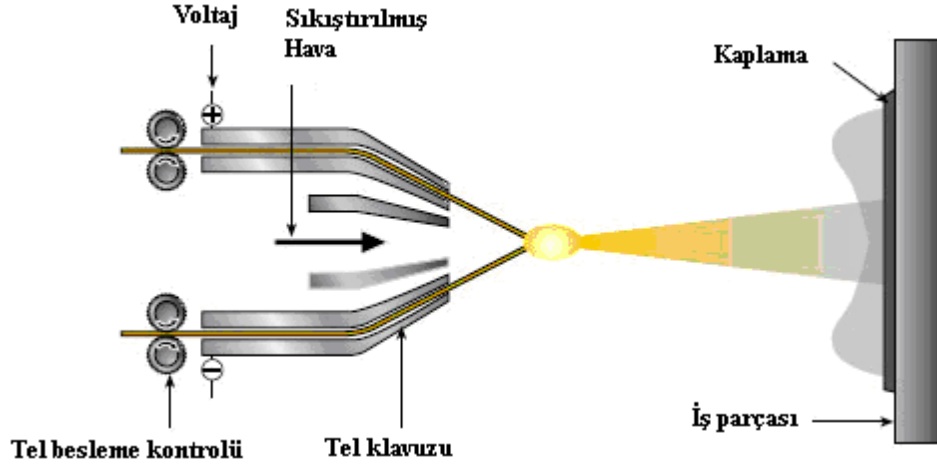


Şekil 2.4. D-Gun kaplama prosesinin şeması [9].

2.2.2. Elektrik Ark Spreyleme Yöntemi

Elektrik ark spreyleme işleminde bir tabanca içinde iki adet tel elektrot bulunur. Bu iki tükenen elektrodun güç kaynağı ile çok yüksek doğru akım uygulanarak ark oluşturulur. Oluşan arkın etkisiyle eriyen metal tabanca içine uygulanan yüksek basınçtaki hava ile malzeme yüzeyine püskürtülerek kaplama işlemi gerçekleştirilir. Bu süreçte enerji oldukça efektif kullanılır. Çünkü giren enerjinin tamamı metali eritmek için harcanır. Spreyleme hızı birincil olarak uygulanan akıma, elektrotların iletkenliği ve erime noktasının bir fonksiyonu olarak değişmektedir. Genellikle malzemeler bakır veya demir esaslı alaşımlar, 100 A/saat doğru akımda 4,5 kg spreyleme yapılabilir.

Çinko ise 100 A/saat’de 11 kg spreylenebilir. Altlık malzemenin sıcaklığı oldukça düşüktür. Çünkü sıcak gaz jeti altlık üzerine direkt etki etmemektedir. Elektrik ark spray işleminde inert gazlar kullanılarak kontrollü atmosfer sağlanabilir [10].



Şekil 2.5. Elektrik ark spreyleme prosesi [10].

2.2.3. Plazma Ark Sprey Yöntemi

2.2.3.1. Plazma Ark Sprey Sistemi

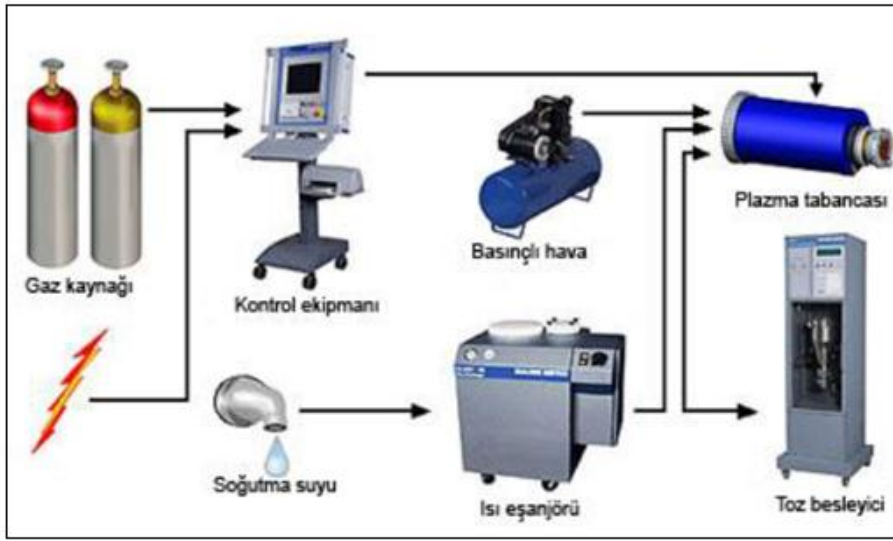
Plazma spreylendirme yönteminde temel fikir; maliyeti düşük olan ana malzeme üzerinde ince ve koruyucu olan bir tabaka oluşturmaktır. Süreç; bilinen herhangi bir malzeme tozunun ergime sıcaklığı üzerindeki gaz plazması içerisinde eritilmesi ve kaplanacak olan zemine çok süratli bir şekilde püskürtülmesiyle oluşur. Bu sayede tok ve plastik olarak şekillendirilebilen metalik malzemelerle; yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı direnci yüksek olan seramik malzemelerin bileşimi mümkün olmaktadır. Bu yöntem, aşınmanın ve ısının etkisiyle kısmi olarak deforme olan bölgelerin tamiratını da mümkün kılmaktadır [11,12].

Plazma spreylendirme teknolojisi Alman bilim adamı Reinecke tarafından, endüstriyel olarak ilk kez 1939’da uygulanmış ve Amerikan firmaları tarafından günümüze kadar geliştirilmiştir. Plazma spreylendirme yönteminin ilk endüstriyel uygulamaları 1960’larda havacılık sektöründe ortaya çıkmıştır [13,14].

Plazma spreylendirme yönteminin başlıca iki önemli avantajı vardır. Bunlardan birincisi, bilinen bütün malzemeleri eritebilecek kapasitede yüksek sıcaklık elde

edilebilmesi, ikincisi ise farklı malzemelere daha iyi ısı transferi sağlamasıdır. Plazma sprej kaplama yönteminde argon, hidrojen ve azot gibi soy gazlar kullanıldığı için kaplanacak malzemenin oksitlenmesinin önüne geçilmektedir [15].

Plazma, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran, genellikle maddenin dördüncü hali olarak adlandırılan yoğunlaştırılmış bir gazdır. Plazma püskürtme kaplama ise; metallerin çeşitli tozlarla kaplanarak aşınmaya, oksitlenmeye, korozyona ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı malzeme üretiminde yaygın olarak kullanılan bir ısı püskürtme yöntemidir [16]. Başka bir deyişle plazma sprej kaplama yöntemi bir malzemenin eritilerek bir başka yüzey üzerine püskürtülmesidir.

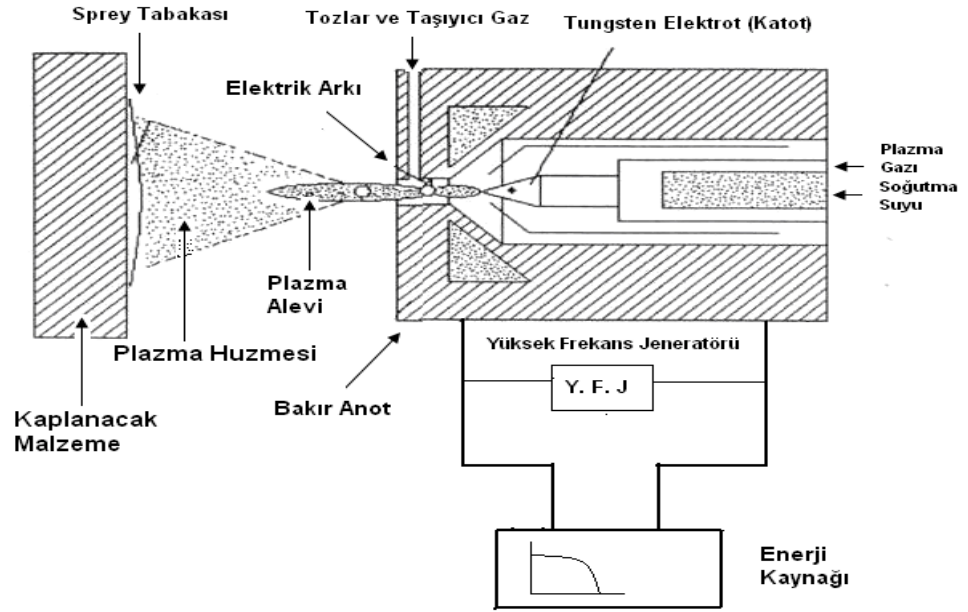


Şekil 2.6. Plazma sprej kaplama sistemi düzeneği [16].

2.2.3.2. Plazma Sprej Kaplamanın Aşamaları

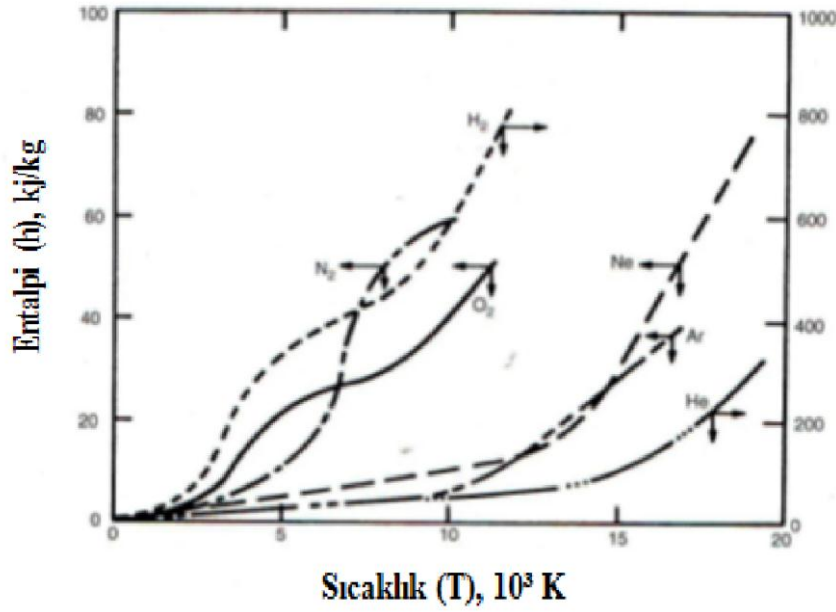
Plazma sprej kaplama işleminin yapıldığı sistem ve toz püskürtmede kullanılan tabanca ve işlem şematik olarak Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Plazma sprej kaplama sistemi temel olarak 6 ünitelerden oluşmaktadır. Bunlar;

- a** – Güç ünitesi
- b** – Gaz ünitesi
- c** – Toz besleme ünitesi
- d** – Soğutma sistemi
- e** – Sprej tabancası
- f** – Kontrol ünitesi



Şekil 2.7. Plazma spreyleme işleminin şematik gösterimi [17, 18]

Plazma spreyl yönteminde gereken enerji için güç ünitesinin ürettiği doğru akım, elektrik arkı nozul ile elektrot arasında oluşur. Wolfram katot, Bakır ise anottur. Elektrik arkı anot ve katot arasında meydana gelir. Sisteme girecek olan plazma gazları 6000 – 16000 °C sıcaklık aralığına kadar ısıtılarak iyonize hale (plazma) getirilir. Böylece yüksek sıcaklıktaki plazma huzmesi tabancanın nozulundan çıkar. Plazma gazları olarak Hidrojen, Azot, Argon veya Helyum kullanılabilir. Şekil 2.8’de plazma gazlarının sıcaklığa bağlı olarak entalpi değişimi verilmiştir [19].



Şekil 2.8. Tipik plazma gazlarının sıcaklığın fonksiyonu olarak entalpi değerleri [19]

Plazma sprej yöntemiyle uygulanan seramik kaplamalar metallerin büyük bir kısmından daha iyi aşınma ve erozyon direnci gösterirler ve dizel motorları da dahil erozyon ve aşınma dirençli uygulamalarda çok sık kullanılırlar. Plazma sprej kaplama vakum veya düşük basınç altında da uygulanabilir. Bu sayede kaplama düşük basınçta plazma sprej veya vakum plazma sprej olarak adlandırılır. Bu kaplama yöntemi iki avantaja sahiptir. Bu avantajların ilki atmosferdeki ortamdan dolayı oksitlenmenin önlenmesidir. İkinci avantaj ise ortaya çıkabilecek olan zararlı gaz ve maddelerin kapalı bir yerde tutulabilmesidir [20].

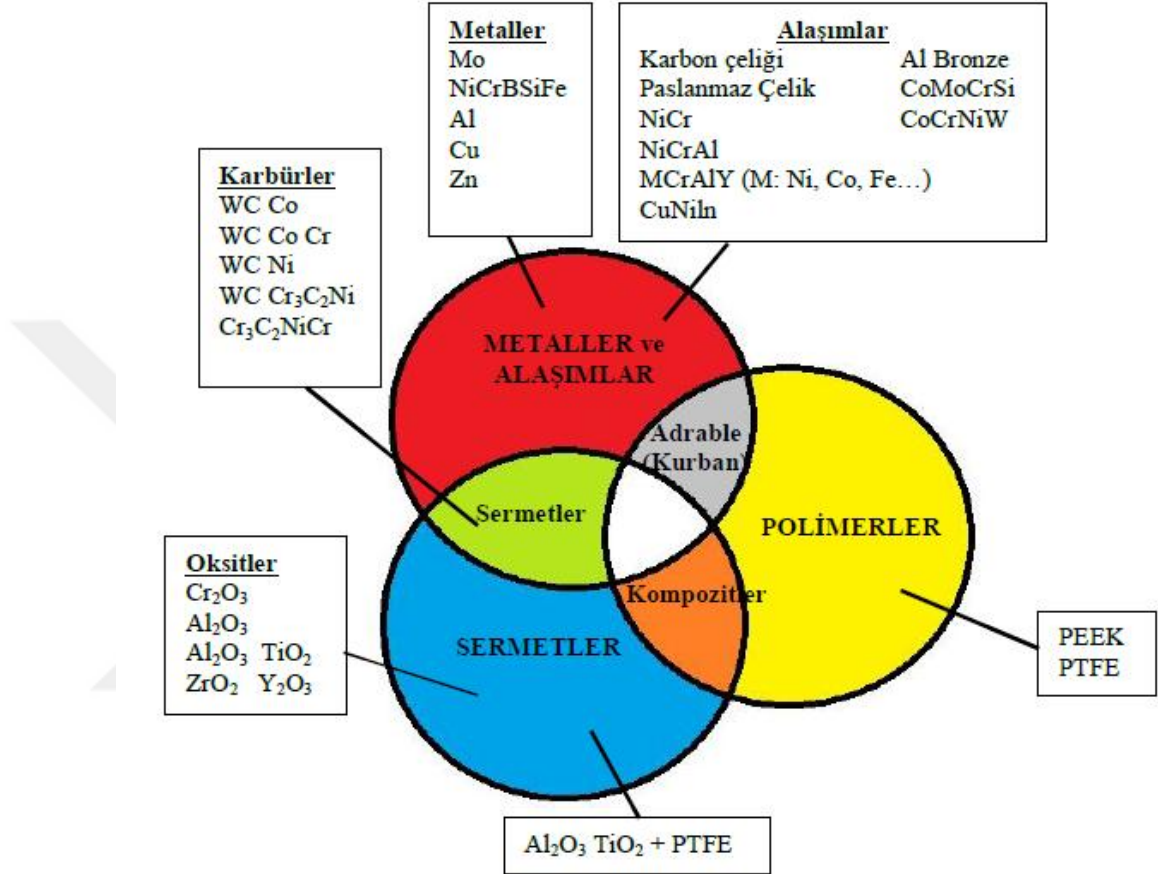
2.2.3.3. Plazma Sprej Kaplama Yapılabilen Malzemeler

Plazma sprej kaplamada meydana gelen plazmanın çok yüksek sıcaklıklara çıkmasından dolayı çok yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemeler kaplama tozu olarak kullanılabilir. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi plazma sprej kaplama çok geniş bir malzeme yelpazesine sahiptir.

Plazma sprej yöntemi ile kaplamanın kaplanacak olan malzeme üzerine daha iyi yapışabilmesi için yüzeyin pürüzlendirilmesi gerekir. Kaplanacak malzeme üzerinde yağ ve kir bulunmamalıdır. Plazma sprej yönteminin genel avantajları şunlardır;

- Sabit bir ergime noktası olan bütün malzemelerin bu yöntemde kullanılabilmesi,
- Kaplamada her türlü malzemenin kullanılabilir olması,

- Kaplanacak olan parçaların büyüklüğünün bir öneminin olmayışı,
- Esnek, tekrarlanabilir, hassas bir şekilde ve belirli standartlarda kaplama yapılmasını mümkün kılması şeklinde vurgulanabilir [21].



Şekil 2.9. Plazma sprej kaplama prosesi ile kaplanabilen malzemeler [21].

Plazma, kaplama tabancası içinde bulunan su soğutmalı bakır anot ile toryumlu tungsten katot arasında meydana gelen yüksek voltaj arkı sayesinde oluşturulur. Çoğunlukla, argon ve az miktarda hidrojen tabanca içerisinden geçirilir. Bu gaz içerisindeki plazma arkını anot ve katot arasındaki elektrik arkı meydana getirir [22]. Plazma gazlarının elektrik arkı içerisinde nötr durumları kötüleşerek iyonik rekombinasyon meydana gelir böylece 20 000 K kadar çıkan aşırı yüksek sıcaklıklar oluşur. Gazlar ısındığı için radyal ve aksel olarak genişleyerek, partiküllerin hızını arttıran süpersonik genişlemeye, gazların dar boğazlı bir nozul içerisinden geçirilmesi sonucunda varılır. Kaplama tozlarını plazma hüzmelerinin içine beslemek için argon, taşıyıcı gaz olarak kullanılır. İyonize gaz içerisinde eriyen tozlar, çok hızlı bir şekilde

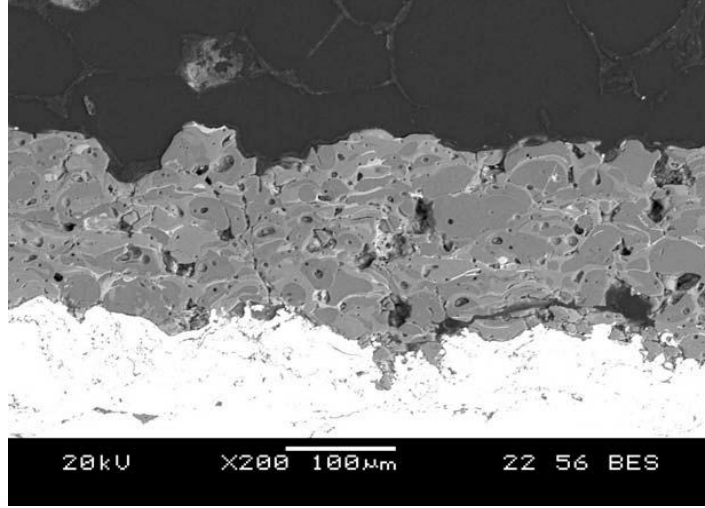
önceden hazırlanmış taban malzeme üzerine püskürtülür. Malzeme üzerine çarpan ergimiş veya yarı ergimiş partiküller yassı bir vaziyette lamelli bir şekle girer ve hızlı bir şekilde soğutulur (10-6 °C/sn) katılaştır. Plazma alevi içerisindeki erimiş halde olan partiküller ana malzeme üzerine püskürtüldüğü zaman kinetik enerjileri ısı ve deformasyon enerjisi haline gelir. Partiküller ana malzemeyle birleştiği zaman mevcut ısılarını ana malzeme üzerine aktararak çok hızlı bir şekilde soğuyarak katı hale geçerler [23].

2.2.3.4. Plazma Sprey Kaplamaların Başlıca Özellikleri

Plazma sprej kaplamalarda kullanılacak olan kaplamaların mekanik özelliklerinin ve uygulama sırasında yük altında gösterdiği durumların bilinmesi malzeme seçimi ve kullanımı için büyük önem arz etmektedir. Kaplamaların temel özelliklerine aşağıda yer verilmiştir.

2.2.3.4.1. Mikroyapı Özellikleri

Plazma hüzmeleri içerisinde ergitilen partiküller, yüzey gerilimlerinin sonucu olarak küresel şekillerde bulunur. Eriyen partiküller; sıvı damlacıklar halinde altlık yüzeyine çarptığı anda yüzeye yayılarak ince tabaka yapısı meydana getirir. Katılma hızı oldukça yüksek olup soğuma hızına bağlı olarak kristalin veya amorf yapılarda katılma olur. Plazma sprej kaplama tabakaları homojen değildir ve farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahiptir. Kaplama tozları, kaplama işlemi esnasında faz dönüşümüne uğrayabilmektedir. Ergitilen partiküllerden elde edilen kaplama yapısı yarı kararlıdır. Bir kaplama tabakasında proses şartlarına bağlı olarak; ergimemiş partiküller, inklüzyonlar, oksitler, mikroboşluklar ve gözenekler bulunabilir [18].



Şekil 2.10. Plazma spreyl kaplama ile üretilen bazalt esaslı kaplama SEM mikroyapısı [24]

2.2.3.4.2. Porozite ve Yoğunluk Özelliği

Porozite, spreyl yoluyla imal edilen kaplamaların genel bir özelliğidir. Yüksek güce sahip cihazlarda üretilen kaplama tabakaları daha yoğun olmakla birlikte daha büyük bir hızla altlığa tutunur. Porozite, kaplamalarda altlık-kaplama tabakası arasında yapışma mukavemetini azaltırken, kaplamanın kırılabilirliğini artırmaktadır. Termal bariyer kaplamalarda ise, ısı yalıtımı için porozitenin fazla olması istenen bir durumdur. Genellikle plazma kaplamaların yoğunluğu teorik yoğunluktan daha düşüktür. Yoğunluk seçilen kaplama yöntemine göre % 85–93 arasında değişmektedir [25].

2.2.3.4.3. Yapışma ve İç Gerilme Özelliği

Plazma spreyl kaplamaların altlık üzerine yapışması, pürüzlendirilmiş yüzeylerde mekaniksel etkiyle, Van der Waals bağları ve difüzyon ile meydana gelir. Malzemesi metal tozlardan oluşan kaplama tabakaları, seramik bazlı kaplamalara nazaran daha fazla yapışma mukavemeti gösterirler.

Kaplama tabakalarının heterojen yapısı, kontrol edilemeyen parametreler (nem, sıcaklık vb.) kaplama tabakası ile altlık termal genleşmelerinin farklı olması ve tozların farklı ergime sıcaklıkları sebebiyle kaplama tabakasında iç gerilmeler oluşur. Ayrıca kaplamaların çok hızlı soğumasıyla oluşan iç gerilmeler de kaplamada çatlak oluşumuna neden olabilir. Kaplama yapılmadan önce ön ısıtma yapılarak oluşabilecek iç gerilmeler azaltılabilir [26].

2.2.3.4.4. Sertlik Özelliği

Kaplamanın sertliği plastik deformasyona olan direncinin bir ölçüsüdür. Kaplamalar içerisinde boşluk oluşumlar ve oksit fazlar görülebilir. Genellikle kaplamaların sertliği oluşturuldukları malzemenin döküm haline nazaran daha düşüktür. Oksitler genel anlamda kaplama sertliğini artırsa da varlıkları kaplamanın mukavemeti ve işlevi açısından ciddi bir tehlike meydana getirir. Çalışma koşulları göz önüne alındığında bu oksit yapıların faz dönüşümü göstermeleri kaplama içi gerilmeleri arttıracığından, sistemde kırılmalar ya da ayrılmalar görülebilir. Seramik katmanlar için sertlik, kullanım geçmişiyle ilgili bilgi verebilir. Plazma sprej sistemiyle oluşturulan kaplamalar içinde boşluklar ve mikro çatlaklar görülür. Kaplamanın termal çevrime maruz kalmasıyla bu boşluklarda azalma görülür ve kaplama sertliğinin arttığı gözlenir [27].

2.2.3.4.5. Süneklik Özelliği

Plazma sprej kaplamaların sünekliği, sprejlenen partiküllerin taban malzemeye olan mekanik bağlanması ve partiküller arasındaki kohezyon kuvvetinden dolayı oldukça düşüktür. Tungsten karbür kobalt kaplamaların sünekliği nadir de olsa 2% seviyelerine ulaşabilir [27].

2.2.3.4.6 Elastik Modül

Plazma sprej kaplamaların elastik modülü, kaplama içerisindeki porozite miktarının azalmasıyla birlikte artar. Kaplama parametrelerine ve kaplama sistemine bağlı olarak yüksek değerlere çıkabilmektedir [27].

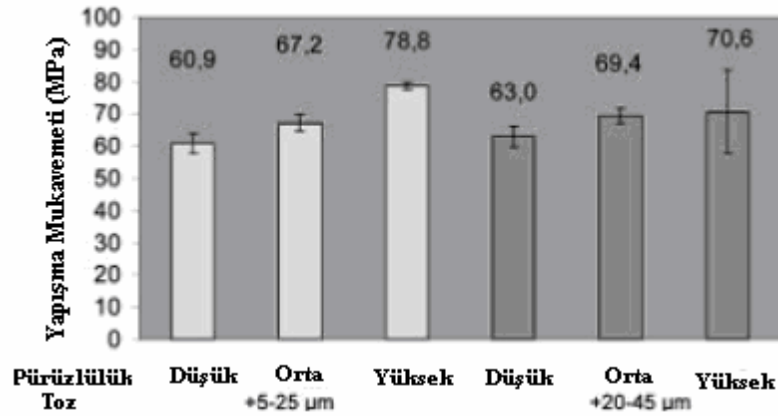
2.2.3.5. Plazma Sprej Kaplamaları Etkileyen Parametreler

Plazma Sprej kaplamaların temel amacı çalışma ortam sıcaklığının taban malzeme üzerine etkisini en aza indirerek taban malzemenin daha yüksek sıcaklıklarda çalışmasını sağlamak ve verimini yükseltmektir. Kaplama içerisinde yatay yönde boşluk ve mikro çatlak varlığı ısı iletkenliği düşürür. Düşey mikro çatlak sayısının fazlalığı ve yapı içerisindeki boşluk sayısının çok azlığı termal bariyer kaplamalarda istenen özelliklerden değildir. Her ne kadar az boşluk miktarı yapışma direnci açısından ve dolaylı yoldan termal çevrim sayısı üzerine artı nitelikte bir etki yaratsa da termal iletkenliğin artması kaplama sisteminin birincil amacına aykırıdır. Ancak termal iletkenliğinin düşük olmasının yanı sıra bir kaplamanın yapışma direncinin de yüksek olması istenir. Yüzey pürüzlülüğü, toz boyutu, toz besleme değeri, taban malzeme

sıcaklığı ve sprej mesafesi kaplamanın yapışma mukavemetini doğrudan etkileyen parametrelerdir [28].

2.2.3.5.1. Yüzey Pürüzlülüğü

Yapışma mukavemetini etkileyen en önemli etkenlerden biri de yüzey pürüzlülüğüdür. Yüzeye çarpan eriyikler bu boşluklar arasını doldurarak taban malzemeye mükemmel bir şekilde yapışma özelliği gösterir. Şekil 2.11. 'de yüzey pürüzlendirildikçe yapışma mukavemetinin de belirli bir oranda arttığı tespit edilmiştir [29]. Fakat yüzey pürüzlülüğünü aşırı şekilde arttırmak yapışma mukavemeti için üstün özellikler gösteren bir kaplama olacağı anlamına gelmez. Yapışma mukavemeti belli bir pürüzlülük değerine kadar artar ve sonra yeniden düşmeye başlar [30]. Artan yüzey pürüzlülüğüne bağlı olarak artan basma kuvvetleri etkisiyle kaplamanın tokluğu da artmış olur. Fakat sprej işlemi sırasında sıcaklık ve basınç gibi fiziksel büyüklükler kaplamada kalıntı gerilimini artırır ve kaplamanın tokluğunun azaldığı görülür [20]

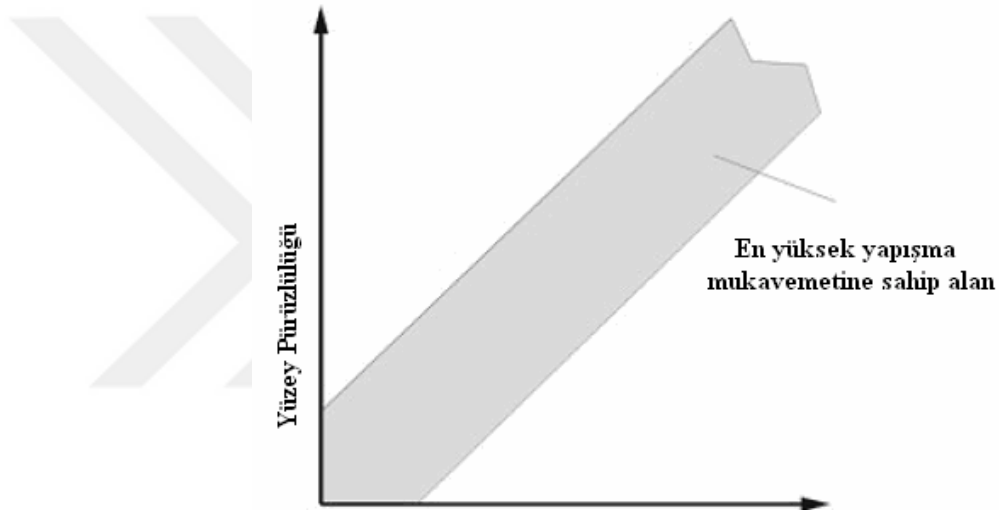


Şekil 2.11. Yapışma direnci yüzey pürüzlülüğü grafiği [29].

2.2.3.5.2. Toz Boyutu

Plazma Sprej kaplamaların yapışma direnci üzerine etkisi olan bir diğer parametre toz boyutudur. Sprej işlemi esnasında, kaplama içerisinde meydana gelebilecek oksit yapılar kaplamanın faz kompozisyonunu, mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve performansını etkiler. Kaplama içerisinde ve ara yüzeylerde oluşan bu oksitler gevrek yapıda oldukları ve farklı termal genleşme katsayılarına sahip oldukları için kaplama içerisinde, kalıntı gerilmelere bağlı olarak oluşabilecek kırılma, çatlama veya ayrılma sorunları gözlemlenebilir. Kaplama malzemesi olarak kullanılacak toz boyutu

malzemenin oksitlenme oranı üzerinde etkilidir. Küçük toz boyutuna sahip malzemeler sprey işlemi sırasında büyük boyutlu malzemelere oranla daha fazla oksitlenirler. Küçük boyutlarda tozlarla oluşturulmuş kaplamalarda partiküllerin havada kaldığı sürece maruz kaldığı oksidasyon daha baskındır ve toz boyutu küçüldükçe oksidasyon artar. Büyük toz boyutuna sahip kaplamalar için yüzeye çarptıktan sonraki oksidasyon ön plana çıkar. Toz boyutu arttıkça kaplamanın yapışma mukavemetinin arttığı gözlenmiştir [31]. Şekil 2.12’de, toz boyutu yüzey pürüzlülüğü ile birlikte değerlendirildiğinde, her toz boyutu için belli bir optimum yüzey pürüzlülüğü değeri olduğu saptanmıştır.

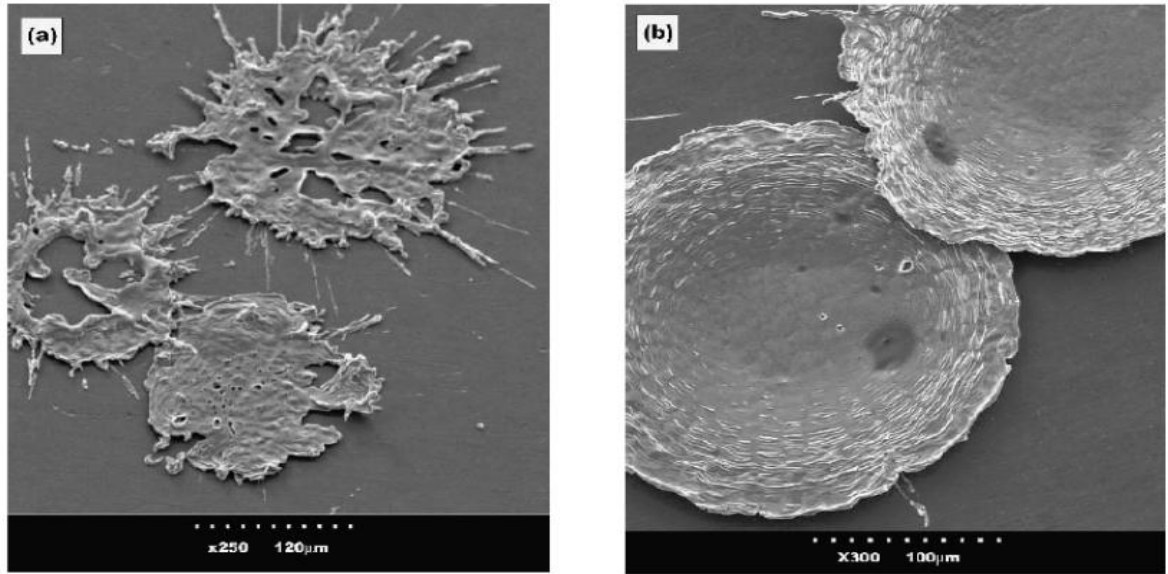


Şekil 2.12. Toz boyutu ve yüzey pürüzlülüğü optimizasyonu [29].

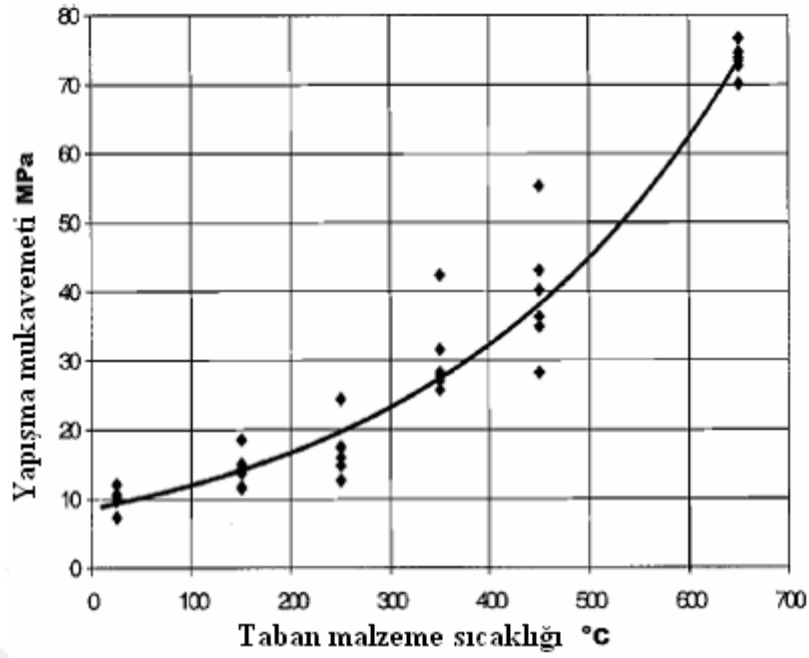
2.2.3.5.3. Taban Malzeme Sıcaklığı

Taban malzeme sıcaklığı yapışma direncini etkileyen önemli bir faktördür. Termal sprey işlemi esnasında taban malzeme sıcaklığını değiştirmek, yüzeye çarpan eriyik damlalarının aldığı görünümü de değiştirir. Pershin tarafından yapılan bir araştırmaya göre, 100°C altında sıcaklığa sahip bir yüzeye çarpan eriyik damlacıkların genellikle düzensiz ve yuvarlak bir şekilden uzak olarak katılaştıkları ancak 150 °C üzerinde sıcaklığa sahip bir taban üzerine düşen damlaların ise oldukça düzenli daireler şeklinde katılaştığı gözlenmiştir [32]. Şekil 2.13. 290°C ve 400°C’ de eriyik katılaşmalarını göstermektedir. Eriyik damlacıklarının morfolojisi kaplama yapışma direnci üzerinde oldukça etkilidir. Düzgün dairesel kaplamaların yapışma oranlarının

daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Taban malzeme sıcaklığının artması yüzeyin ıslanabilirliğini arttırdığı gibi, katılaşmayı geciktirir ve böylece yüzey üzerindeki pürüzlerin arasına eriyik damlalarının nüfuz etmesini kolaylaştırır [33]. Toz eriyiklerinin düzgün daireler oluşturabilmesi için gerekli taban malzeme sıcaklığının ortalama 150-200 °C civarında olduğu gözlenmiştir. Bu sıcaklık değeri üzerinde taban malzeme üzerine uygulanan kaplamaların yapışma direncinin arttığı gözlenmiştir [34]. Eriyik damlalarının düzgün daireler şeklinde katılaşması kaplama içerisinde oluşan boşluk miktarını azaltır. Boşluk miktarının azalmasıyla daha sıkı kaplamalar elde edilir. Dairesel şekiller taban malzeme ile daha geniş bir alanda kontak kurarak yüzey üzerine yayılır. Yine taban malzeme sıcaklığının artmasıyla adhezyon kuvveti kohezyon kuvvetinde daha büyük bir hale gelir. Eriyiklerin katılaşma süreleri uzar ve böylece yüzey pürüzlerini doldurma olasılıkları da artmış olur [27]. Şekil 2.14. artan taban malzeme sıcaklığının yapışma mukavemeti üzerine etkisini göstermektedir.



Şekil 2.13. Paslanmaz çelik üzerine çarpan nikel eriyiklerinin taban malzeme üzerindeki formu a) 2900 °C b) 4000 °C [32].



Şekil 2.14. Paslanmaz çelik üzerine uygulanan nikel kaplamanın taban malzeme sıcaklığına göre yapışma direnç değerleri [32]

Plazma sprej kaplamalarının mikro yapısında genellikle üç çeşit çatlak görülür. Kaplama yüzeyine dik yönde uzanan ve kaplamanın yarısına yayılan çatlaklar, bu dik yönlü çatlaklardan dallanarak büyüyen kaplamaya paralel olarak uzanan çatlaklar ve katmanlar arası kaplamaya paralel yönde uzanan çatlaklar. Taban malzeme sıcaklığının yüksek olduğu durumlarda kaplama içerisinde dikey yönlü çatlak yoğunluğunun oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Ancak düşük sıcaklıklarda, eriyik damlaları ile taban malzeme arasında tam bir kontak kurulamadığından kaplama içerisinde boşlukların ve düşey yönlü çatlak oranlarının daha fazla olduğu görülür. Yatay yönlü çatlaklar, eriyik damlaları arasındaki iletişimi keserek ve kaplama içerisindeki gerilme değerlerini azaltarak dik yönlü çatlakların oluşmasını ve ilerlemesini engeller. Yatay yönlü çatlakların oluşmasıyla kaplamanın termal yalıtkanlığı yükselir ancak oluşan boşlukların etkisiyle yapışma mukavemetinin azaldığı söylenebilir [28].

2.2.3.5.4. Sprey Mesafesi

Sprey mesafesi ile kaplama içerisindeki boşluk doğru orantılıdır. Yani mesafe arttıkça boşluk miktarı da artar. Boşluk miktarının artması da kaplamanın yapışma değerlerini düşüren bir özelliktir. Sprey mesafesi arttıkça kaplama içerisindeki yatay

yönlü çatlakların oranının arttığı gözlenir. Bir çalışmada; 90 mm sprej mesafesine sahip bir kaplama içerisindeki düşey yönlü çatlakların yoğunluğu $1,98 \text{ mm}^{-1}$ olarak bulunurken, 70 mm sprej mesafesinde aynı parametrelerle yapılan bir kaplamada düşey çatlak yoğunluğu 3.65 mm^{-1} bulunmuştur [35].

2.2.3.5.5. Toz Besleme Değeri

Toz besleme değerinin değişmesi de kaplama içerisindeki mikro çatlak yoğunluğunu değiştiren bir faktördür. Yüksek toz besleme değerlerindeki kaplamaların içerisindeki boşluk ve mikro çatlak yoğunluğu düşük toz besleme değerlerindeki yoğunluğa göre daha azdır. Ancak çok yüksek toz besleme değerlerinde tüm toz partiküllerinin eriyememesinden dolayı kaplama içerisindeki boşluk ve mikro çatlak yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Mikro çatlak yoğunluğunun değişmesi kaplamanın yapışma direncini etkiler [35].

2.2.3.6. Plazma Sprej Kaplamaların Kullanıldığı Endüstri Alanları

Plazma sprej yöntemiyle üretilen kaplamalar, sanayide geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarla çalışma imkânı veren plazma sprej yöntemi aynı zamanda farklı ana malzemeler üzerinde sayısız kaplama tozları ve kombinasyonlarının uygulanmasına imkân vermektedir. Bu özelliklerinden dolayı bu yöntemle oluşturulan kaplamaların kullanım alanlarını artırmaktadır. Plazma sprej yöntemi, uçak ve uzay endüstrisinde kullanılan yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı korunması gereken parçaların seramik kaplamasında ilk çözüm olmuştur. Özellikle uçak ve gaz türbin motorlarında, türbin kanat ve yanma odalarında verimliliği arttırmakla beraber türbin ömründe uzamasını sağlamıştır. Havacılık sektöründe elde edilen başarılar, yöntemin diğer alanlarda da kullanılmasının önünün açılmasını sağlamıştır [36].

Başlıca kullanım alanları;

Kimya endüstrisinde, petrol arama ve sondaj çalışmalarında kullanılan takımların Cr_2O_3 kaplamalarında, Otomotiv endüstrisinde, dizel motorların piston başlıkları, supap yüzeyleri ve silindir kapaklarının seramik kaplamalarında,

Uzay ve havacılık endüstrisinde, gaz türbin motorları, türbin kanat ve yanma odaları kaplamalarında, Demir-çelik endüstrisinde, sürekli tavlama proses hattında kullanılan soğutma silindirlerinde,

Tıp ve biyomedikal uygulamalarında, diş sabitleştirici vidalar, diz eklemleri, kalça protezleri gibi biyomalzemeler ve ortopedik amaçlı kullanılan implant malzemelerin hidroksiapatit ile kaplamalarında,

Baskı endüstrisinde ambalaj baskı işlemlerinde kullanılan Anilox merdanelerinin ve korona silindirlerin kaplanması ve kağıt endüstrisinde kullanılan Yankee kurutucularının kaplamalarında, Tekstil endüstrisinde çekme ve sarma makinalarında kullanılan iplik yönlendirme kılavuzları, galetler, domuz kuyrukları gibi aksamaların kaplanması,

Nükleer endüstrisinde tokamak füzyon cihazı parçalarında ve günlük yaşamımızda yapışmayan tavalar, kaygan ütüler ve elektrik ocak üstleri olarak sıralanabilir [36].

Tablo 2.1. Plazma sprey tekniği ile üretilen kaplamaların kullanım alanları [25, 37, 38].

Kullanım Sektörü	Kullanım Amacı	Uygulanan Malzemeler	Kaplama Türü
Otomotiv Endüstrisi	Aşınma, Termal Bariyer, Korozyon Direnci	Dizel Motorların Valflerinde	$Al_2O_3+TiO_2+Y_2O_3$
Kimya Endüstrisi	Aşınma ve Korozyon Direnci	Bıçaklar, Tüpler, Brülör, Şaftlar ve Soğutma Sistemleri	MoCrBSi, $Al_2O_3+TiO_2$, $ZrSiO_4$
Hidrolik Makinalar	Aşınma, Erozyon, Kativasyon ve Korozyon Direnci	Pompa ve Şaftlar, Şaftların sızdırmazlık contaları	$Al_2O_3+TiO_2$, $ZrSiO_4$, Cr_2O_3
Cam Endüstrisi	Termal Bariyer, Abrasif ve Korozyon Direnci	Cam Presleme, Mandreller ve Cam yapıcı çubuklar	$Al_2O_3+TiO_2$, $ZrSiO_4$, ZrO_2
Uçak Endüstrisi	Yüksek sıcaklıktaki gaz korozyon direnci	Uçak Gaz Türbinlerinin yanma odaları, Türbin Panelleri	Termal Bariyer esaslı kaplamalar, TiBC
Nükleer Enerji	Termal Bariyer ve Aşınma Direnci	Termokupl, Güç Jeneratörleri, Yakıt Elemanları	Al_2O_3+MgO , Al_2O_3 , Cr_2C_3+NiCr
Kağıt Endüstrisi	Aşınma	Kurutma Silindirleri	Mo-NiCr
Termik Elektrik Santralleri	Sıcaklık Gaz Korozyon Direnci	Gaz Türbin Kanatları	MoCrAlY

2.2.3.7. Plazma Sprey Kaplama Yönteminin Avantajları ve Dezavantajları

Kaplama tabakalarının plazma sprey kaplama yöntemi ile oluşturulması, çok önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunlar;

a) Ulaşılan yüksek sıcaklıklar sayesinde yüksek erime sıcaklığına sahip seramik tozlarının eritilmesini mümkün kılmıştır.

b) Kaplama malzemesi ve ana malzeme birbirinden bağımsız olarak seçilerek kombine edilebilmektedir. Plazma sprey kaplama tabakalarının bileşimi ve özellikleri çok geniş bir aralıkta değiştirilmekte ve özel uygulamalar için optimize edilebilmektedir.

c) Püskürtme parametreleri değiştirilerek istenen oranda gözenek oluşturmak mümkün olabilmektedir.

ç) Çok küçük ve büyük boyutlu parçalar kaplanabilmektedir.

d) Son derece ileri teknoloji kullanılarak plazma spreyleme ile oluşturulan kaplamaların ekonomik performansı ve kalitesi yükseltilebilmektedir.

e) Plazma sprey kaplama prosesi kolaylıkla bütün sistemlere entegre edilebilmektedir.

f) Çevre dostu bir sistemdir çünkü kaplamanın yapılacağı ortam çevreden izole edilmektedir.

Plazma sprey kaplama yönteminin avantajlarının yanı sıra dezavantajları da vardır. Bunlar;

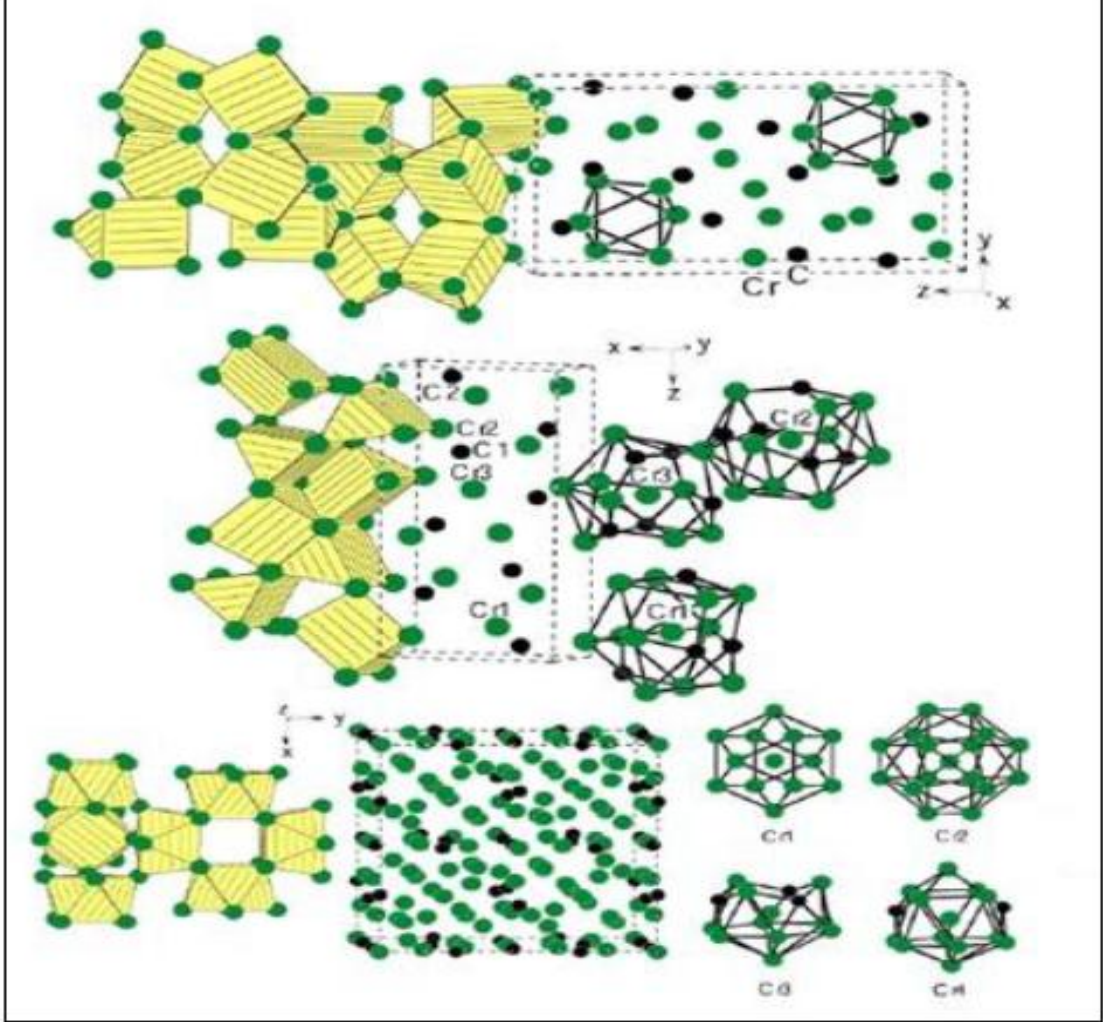
a) Seramik esaslı kaplamalarda verim % 40 – 60 arasında değişmektedir. Bunun nedeni kaplama tozlarının, sprej tabancasından kaplanacak olan malzemeye ulaşmaya kadar buharlaşması veya yörünge değiştirmesidir. Bu durum maliyeti arttırmaktadır.

b) Kaplanacak olan alüminyum, çinko alaşımlı malzemeler ve ince et kalınlığına sahip malzemeler için yüksek ısıdan etkilenmelerinden dolayı ısı girdisi ayarlanmalı veya uygun bir soğutma işlemi uygulanmalıdır.

c) Karbür esaslı tozların çok yüksek sıcaklıkta eriyip hızla soğuması kaplama tabakasında istenmeyen kararsız karbür fazların oluşumuna neden olur. Bu nedenle karbür esaslı kaplamanın mukavemet ve korozyon özelliklerini kötü etkilemektedir.

2.2.3.8. Kaplama Malzemesi Olarak Kullanılan Krom Karbürler

Şekil 2.15’de Cr-C fazlarının üç farklı kristal yapısının atom dizilimleri ve tekrarlayan en küçük kafes birimleri görülmektedir.



Şekil 2.15. Cr-C fazlarının üç farklı kristal yapısının atom dizilimleri ve tekrarlayan en küçük kafes birimleri [40].

Krom karbür üç kimyasal kompozisyonda bulunabilen bir seramik bileşiktir. Bu kompozisyonlar; Cr_3C_2 , Cr_7C_3 ve Cr_{23}C_6 ’dir. Standart koşullarda, koyu gri renkte bir katıdır. Cr_{23}C_6 kübik kristal kafeste ve 10.5 GPa Vickers sertliğine sahiptir [39]. Cr_7C_3 ise ortorombik kristal kafes yapısındadır ve Vickers sertliği 14.5 GPa’dır [40]. Son olarak, Cr_3C_2 bu üç kompozisyonun en kararlısı olup, ortorombik kristal yapıda ve 23.5 GPa Vickers sertliğine sahiptir [41,42,43]. Bu özellikleri ile metal alaşımlarına katkı olarak ilave edilebilir. Krom karbür, bir metalin yüzeyine kaplandığında, yüzeye hem aşınma hem de korozyon direnci verir ve bu özelliğini yüksek sıcaklıklarda da sürdürür.

Bu tip kaplama uygulamaları için en sert ve genelde en çok kullanılan kompozisyonu Cr_3C_2 'dir [39].

Krom karbür, metal malzemelerin yüzeylerinin sert olmasının, korozyona ve aşınmaya karşı dayanıklı olmasının istendiği yerlerde ısıl püskürtme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Mil yatakları, contalar ve vanalar gibi yerlerde vanadyum karbür gibi diğer sinterlenmiş karbürlerle birlikte kaplama işlemi yapılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda (1000-1100 °C) oksidasyonun olmayışı, krom karbürün korozyon direncini arttırmaktadır.

Krom karbürün ısıl genleşme katsayısı hemen hemen çeliğin ısıl genleşme katsayısına eşittir. Mekanik streslerin kaplama tabakasında azalması tabakayı kuvvetlendirmektedir. Krom karbürün mekanik ve fiziksel özellikleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Krom karbürün fiziksel ve mekanik özellikleri [44].

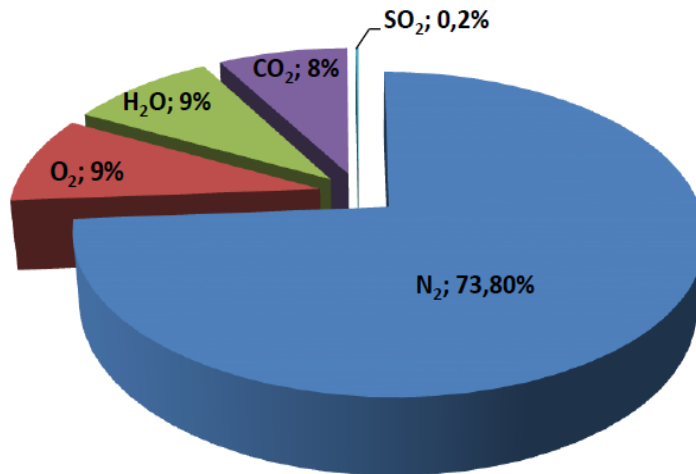
Yoğunluk (gr/cm^3)	6,65-6,68
Young's Modülü (GPa)	373
Basma Dayanımı (GPa)	4,138
Mol Kütlesi (g/mol)	180,01
Kaynama Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	3800
Ergime Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	1890 (Cr_3C_2) 1665 (Cr_3C_3) 1250 (Cr_{21}C_6)
Isıl Genleşme Katsayısı $\alpha(10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1})$	11,2
Isıl iletkenliği (W/Mk)	189,77
Sertlik-VH (kg/mm^2)	1834

3. EGZOZ EMİSYONLARI

İçten yanmalı motorlar hava kirliliğinin ana sebeplerinden biridir. Bu motorlardan meydana gelen emisyonlar küresel ısınmaya, asit yağmurlarına, çeşitli kokulara, solunum ve diğer sağlık problemlerine neden olmaktadır. Bu emisyonların temel sebebi eksik yanma ve azotun parçalanması gibi faktörlerdir [45].

Dizel motorlarda silindir içerisine püskürtülen yakıtın homojen bir şekilde dağılmadığı için karışımın farklı bölgelerinde farklı sıcaklık ve basınç bölgeleri oluşur. Yakıt silindir içerisine püskürtüldüğünde yanma sırasında, NO_x emisyonları alevin dış kısmı ile iç kısmında oluşmakta ve sıcaklığın yüksek olduğu bölgelerde daha fazla görülmektedir. Dolayısıyla alevin iç kesimlerinde NO_x emisyonu, sıcaklığın etkisiyle daha fazla olmaktadır. Partikül emisyonu alevin çekirdek bölgelerinde, daha çok yanmamış yakıtın olduğu zengin karışım bölgelerinde görülmektedir. HC emisyonları da yakıtın tam yanmamasından kaynaklanmakta ayrıca, silindir duvarlarında alevin soğuması ile oluşmakta ve alevin dış kısımlarında görülmektedir [46].

Dizel motorlarda, NO_x emisyonunun benzinli motorlara göre daha yüksek, CO ve HC emisyonlarının ise daha düşük olduğu bilinmektedir. Bunun nedeni dizel motorlarda hava fazlalık katsayısı (HFK) ve sıcaklıkların benzinli motorlara göre daha yüksek olmasıdır [47]. Şekil 3.1. 'de dizel motor emisyonları gösterilmiştir.



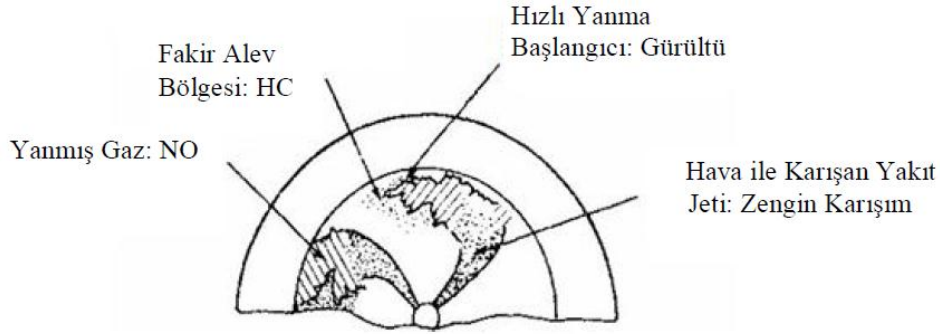
Şekil 3.1. Dizel motor emisyonlarının grafiksel gösterimi [47].

3.1. Egzoz Emisyonu Sonucu Oluşan Gazlar

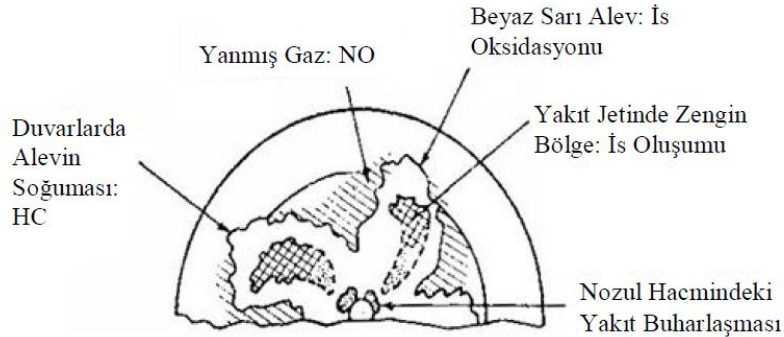
3.1.1 Azot Oksitlerin (NO_x) Oluşumu

Havada % 79 oranında bulunan azot, azot oksitlerin esas kaynağıdır. Yanma için gerekli olan hava silindir içerisine alındığında havanın bünyesindeki azot molekülleri yanma esnasında parçalanarak oksitlenmekte ve NO_x'ler oluşmaktadır. Azot oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂) emisyonları genel olarak azot oksitler "NO_x" olarak adlandırılmaktadır. NO_x emisyonlarının yaklaşık % 95'ini NO, kalan kısmını ise diğer azot oksit bileşenleri meydana getirmektedir. Bulduğumuz ortamdaki NO_x konsantrasyonunun yüksek olması gözlere ve solunum organlarına zarar verir. NO_x'ler çok zehirli emisyonlar olup akciğerleri tahrip ederek insan sağlığı açısından çok tehlikelidirler [46]. NO oluşumu Zeldovich veya ısı mekanizma, Fenimore veya ani mekanizma ve yakıt NO_x mekanizması olmak üzere üç mekanizma oluşur.

Şekil 3.2'de ani yanma sırasında, 3.3'te ise kontrollü yanma sırasında kirleticilerin oluşum mekanizmaları verilmiştir.



Şekil 3.2. Dizel motorlarda ani yanma sırasında kirleticilerin oluşumu [46].

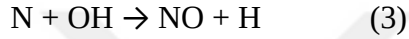
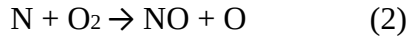
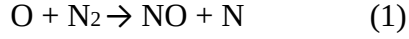


Şekil 3.3. Dizel motorlarda kontrollü yanma sırasında kirleticilerin oluşumu [46].

3.1.1.1. Zeldovich veya Isıl NO_x Oluşum Mekanizması

NO ve NO₂, NO_x emisyonları olarak bilinseler de, NO motor silindiri içerisinde üretilen baskın azot oksittir. Isıl NO_x'in ana kaynağı atmosferik hava içerisindeki moleküler azotun yüksek sıcaklıklarda oksidasyonudur [48].

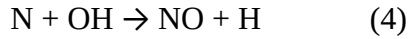
Moleküler azottan NO oluşumu aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.



Zeldovich mekanizmaları için birinci reaksiyonun yüksek aktivasyon enerjisi gereksiniminden ve O₂'nin ayrılma ihtiyacından dolayı sıcaklık çok önemlidir. NO emisyonu alev önünde ve alev sonrası gazlarda meydana gelebilmektedir. Motorlarda, yanma yüksek sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Bu nedenle alev reaksiyon bölgesi oldukça incedir (yaklaşık 0.1 mm) ve bu bölgede kalma zamanı kısadır. Ayrıca, silindir basıncı yanma prosesinin büyük bir kısmı boyunca yükselir, bu nedenle yanma prosesinde erken oluşan yanmış gazlar yanmadan sonraki birden ulaşabilecekleri sıcaklıktan daha yüksek sıcaklığa sıkıştırılırlar. Bu sebepten dolayı, alev sonrası gazlar genelde her zaman alev öncesi oluşan NO'lara göre daha üstündür [45].

3.1.1.2. Fenimore veya Ani NO Oluşum Mekanizması

Yakıtın zengin karışım olduğu bölgenin önündeki yanmada NO'nun çabuk oluşmasından dolayı ani NO oluşum mekanizması denilmektedir. Aşağıdaki denklemlerde Fenimore oluşum mekanizması görülmektedir.



Ani NO'nun sadece hidrokarbon yanmalarında görüldüğü, çok zayıf şekilde sıcaklığa bağlı olduğu ve eşdeğerlilik oranı arttıkça arttığı tespit edilmiştir.

Dizel motorlarda NO₂, toplam azot oksit miktarının %10-30'u arasında bir değer ifade etmektedir. Alev bölgesinde meydana gelen NO hızlı bir şekilde NO₂'ye dönüştürülebilir, 7 no'lu denklemde NO₂ dönüşüm mekanizması görülmektedir [46].



Daha sonra bu NO₂'nin NO'ya dönüşmesi 8 no'lu denklemde gösterilmiştir.



3.1.1.3. Yakıttan Kaynaklanan NO

Ağır yakıtların birçoğu organik azot bileşikleri içermektedir. Buradaki azot bileşikleri, NO oluşturmak için reaksiyon gösterirler. Yakıttan kaynaklanan NO, bölgesel sıcaklığa, stokiometrik H/Y oranına ve hava-yakıt karışımındaki azot bileşiklerinin seviyesine bağlıdır. Yakıtın bünyesinde bulunan HCN, NH₃, NH veya CN gibi bileşiklerin bulunması sonucu bunlar NO_x formunda oksitlenebilmektedirler [49].

Kritik zaman periyodu, silindir basıncının maksimum değere ulaşması ile yanmış gaz sıcaklığının maksimum değere ulaştığı zaman aralığıdır. Yanma ilerlerken ve silindir basıncı yükselirken, yüksek sıcaklığa ulaşılması NO oluşum oranını artırdığından özellikle önemlidir. Yanmış gaz sıcaklığı silindir gazları genişlerken düşmektedir. Genişlemeye ve yüksek sıcaklık gazlarıyla hava veya soğutucu gaz arasındaki karışıma bağlı olarak düşen sıcaklık NO_x kimyasını dondurmaktadır [50].

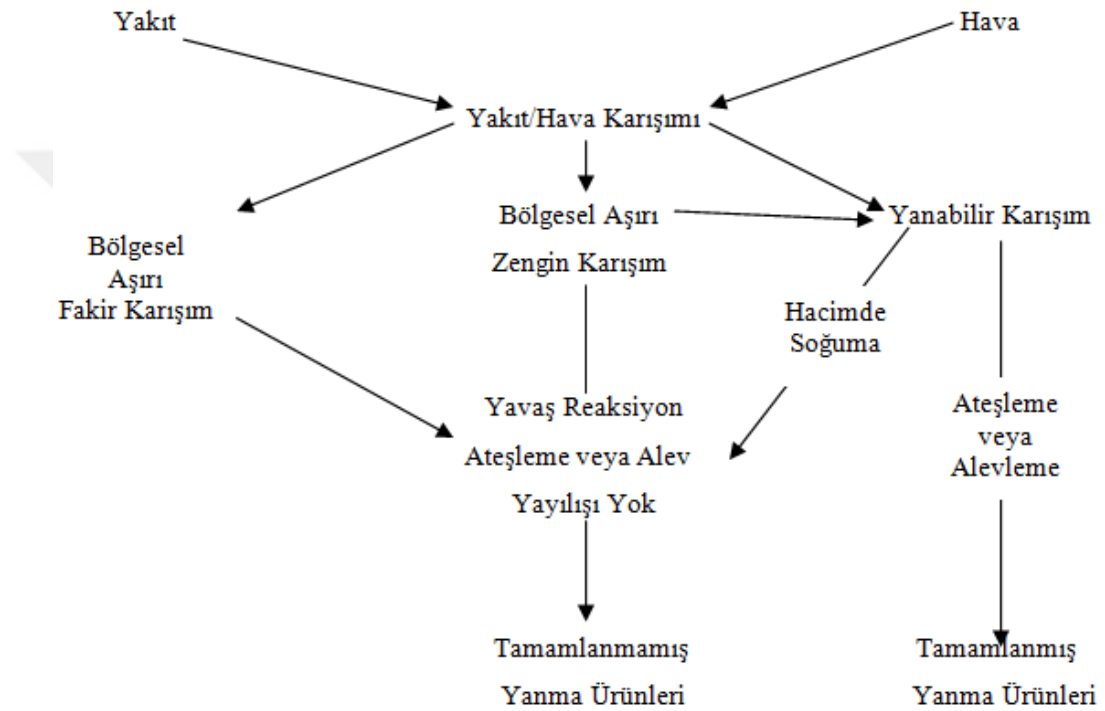
Püskürtme zamanı ve yük değiştirildiği zaman NO oluşumunun büyük bir kısmının, yanma başlangıcını izleyen 20°KMA içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Püskürtme zamanı geciktirilirse buna bağlı olarak yanma da gecikmektedir. Ulaşılan maksimum sıcaklık değeri düştükçe NO konsantrasyonu da azalmaktadır. Motor yükü arttıkça, daha yüksek maksimum basınçlar, buna bağlı olarak yüksek sıcaklıklar, yanmış gaz stokiometriğine yakın daha geniş bölgeler NO seviyelerini yükseltmektedirler. Azot oksit seviyeleri düşen eşdeğerlik oranıyla düşmektedir [45].

3.1.2. Hidrokarbon Emisyonları (HC) Oluşumu

Dizel motorlarda HC emisyonları, genellikle yanma tamamlanamadığı için oluşmaktadır. Yapıları büyük olan HC molekülleri sıcaklığın etkisi ile daha küçük HC moleküllerine dönüşmektedirler. HC moleküllerinin oksijen ile tepkimeye girmesi

sonucunda yanma gerçekleşmektedir. Yanma reaksiyonunun çok hızlı bir şekilde gerçekleşmesi ve yetersiz oksijen, bazı küçük yapıları HC bileşiklerinin yanma reaksiyonunu tamamlayamamalarına neden olmaktadır. Bu hidrokarbonlar yanma odasını terk ederek çığ gaz halinde atmosfere karışmaktadırlar. TG süresinde yakıt ile hava karıştıktan sonra bazı bölgelerde fakir karışım görülmektedir [46].

Şekil 3.4’de tutuşma gecikmesi periyodunda püskürtülen yakıtın HC mekanizması aşağıda gösterildiği gibidir.



Şekil 3.4. Tutuşma gecikmesi periyodunda püskürtülen yakıtın HC mekanizmasının şematik gösterimi [51].

Genişleme zamanının sonunda fakir karışimli bölgelerdeki reaksiyonların yavaş olmasından, alev yayılımının olmayışı gibi nedenlerden dolayı tamamlanmamış yanma ürünleri olarak dışarı atılmaktadırlar. Yanabilir karışımlarda hacimde soğuma olan bölgeler tamamlanmamış, diğer bölgeler ise tamamlanmış yanma ürünleri olarak dışarı atılmaktadırlar. Zengin karışımlarda yavaş reaksiyon ve silindir cidarında meydana gelen soğumalardan dolayı tam yanma olmamakta ve HC emisyonları olarak atmosfere atılmaktadırlar [50].

3.1.3. İs ve Partikül Maddeleri (PM) Oluşumu

Dizel motorlarda oluşan difüzyon alevinde, genel olarak hidrojenin oksijenle tepkimeye girmesi, karbonla tepkimeye girmesinden daha karardır. Bu durumda silindir içerisinde sıvı halde bulunan yakıt damlasının içerisindeki hidrojen molekülleri hızlı bir şekilde oksijenle tepkimeye girmekte ve geriye kalan karbonlar yeterli oksijen bulamadıklarından yanamayıp is partikülleri şeklinde atmosfere atılmaktadır. İs bu tepkimelerin sonucunda meydana gelen katı karbon tanecikleridir.

İs oluşumunun temel nedeni, yakıtın silindir içerisinde yeterli hava bulamaması veya zamanında hızla hava ile karışmaması ve buharlaşmamasındandır. Motorun yük durumuna göre değişen HFK'nın bir fonksiyonu olarak is miktarı değiştiğinden motorun gücünü de sınırlayan bir etkidir. İs oluşumu genelde dizel yanmasının bir safhasıdır. Bu nedenle başlangıçta oluşan karbonun büyük bir kısmı tekrar yanmaktadır. Fakat gücü artırmak amacıyla yanma odasına fazla miktarda yakıt püskürtüldüğünde, yeterli oksijen bulunmadığı için egzoz gazları içerisinde bir miktar is bulunmaktadır [52].

3.1.4. Kükürtdioksit (SO₂) Oluşumu

SO₂ emisyonları, yakıtta bulunan kükürttan meydana gelmektedir. Yanma sonunda kükürt, havadaki oksijenle tepkimeye girerek SO₂ oluşmaktadır. Yanma sonucunda oluşan egzoz gazları içerisindeki su buharı ile SO₂'nin birleşmesi sonucunda da silindir içerisinde ve atmosfere atıldıktan sonra sülfürik asit (H₂SO₄) meydana gelmektedir. Oluşan sülfürik asit motor elemanlarında aşınmaya ve korozyona sebep olmaktadır. SO₂ emisyonlarının başka bir zararı da asit yağmurlarına sebep olmasıdır [52].

3.1.5. Karbon monoksit (CO) Oluşumu

Karbon monoksit, yakıt içindeki karbon tamamen yanmadığında oluşan renksiz, kokusuz ve zehirli bir gaz olup ülke çapındaki bütün CO emisyonlarının büyük bir kısmını karayolu taşıtları sebebiyet vermektedir. Bu emisyonlar, özellikle trafik sıkışıklığının yoğun olduğu bölgelerde yüksek CO konsantrasyonları ile sonuçlanabilmektedir. CO emisyonlarının diğer kaynakları ise endüstri prosesleri ile kazan ve çöp yakma fırınlarında yakılan yakıtlar teşkil etmektedir. CO emisyonları yük ve hız değişimlerine büyük oranda duyarsız olup hava/yakıt oranına karşı daha duyarlı davranmaktadır. CO oluşumunu etkileyen en önemli faktör hava fazlalık katsayısıdır. Karışım zenginleştikçe, yanma odasına alınan yakıtın içindeki karbonun tamamını CO₂

şeklinde yakacak oksijen bulunmadığından, CO oranı hızlı bir şekilde artmaktadır. Buji ile ateşlemeli motorlar, kısmi yüklerde yakıt ekonomisi açısından stokiometrik orandan biraz fakir karışımlarla çalışmakla birlikte, tam yükte belirli bir kurs hacmi için emilen havadan tam olarak yararlanmak amacıyla zengin karışımla çalışırlar. Dolayısıyla buji ile ateşlemeli motorların CO emisyonunun kontrolü önemlidir.

CO, kana geçerek vücudun organ ve dokularına O₂ dağıtımını azaltır. CO'e maruz kalmak hasta bireylerin yanı sıra sağlıklı bireyleri de olumsuz yönde etkilemektedir. Yükseltilmiş CO seviyelerindeki is, görüş bozukluğu, is yapma kapasitesinde, el becerisi gerektiren işlerde ve öğrenme kabiliyetinde azalma gibi olumsuzlukları meydana getirmektedir. EPA'nın halk sağlığı standardına göre hava kalitesi, günün ikinci 8 saatlik zaman dilimi boyunca yapılan ölçümler için max ortalama CO konsantrasyonu milyonda 9'un üstüne çıkmamalıdır [53].

3.1.6. Karbondioksit (CO₂) Oluşumu

19. yy' dan itibaren sanayileşme sürecinin başlamasıyla beraber fosil yakıt kullanımı da artmıştır. Bu sebeplerden dolayı atmosferdeki CO₂ miktarı artmaya başlamıştır. Fosil yakıtların etkisi, kutuplardaki buzulların erimesinden kuraklık tehdidine ve hava kirliliğine kadar birçok alanda ve tüm dünyada kendini hissettirmeye başlamıştır. Bu çerçevede, 2005 yılında yürürlüğe giren Kyoto Protokolü, güçlü, yenilikçi düzenlemeleri ve bağlayıcı yaptırımlarıyla çevre kaygılarının insan hayatının her alanına yön vermesini sağlamayı amaçlamaktadır. Dolayısıyla çevreyi daha az kirlüten ekonomik ve güvenilir enerji kaynaklarına tüm ülkelerce ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır. Ülkeler artık yeni enerji kaynakları oluşturmaya yönelik politikalar üretmeye yönelmektedirler [54].

CO₂ gözle görülmez ve yanma özelliği yoktur. Karbon ihtiva eden yakıtların yanması sonucu oluşur. Sera gazı etkisi sebebiyle CO₂ emisyonları insanlar tarafından bilinmektedir. İçten yanmalı motorlarda yanma sonucunda çıkan emisyonlar içerisinde en az zararı olan gaz CO₂ 'dir. CO₂ bitkiler tarafından fotosentez yapılarak oksijene dönüştürülür.

3.1.7. Aldehitlerin (C-H-O bileşikleri) Oluşumu

Aldehitler hidrokarbonların kısmi oksidasyonu sonucu oluşan ürünlerdir. Özellikle düşük sıcaklıklardaki reaksiyonlarda meydana gelirler. Keskin kokulu ve

uyuşturucu etkili bileşiklerdir. Bazı türleri kansere neden olabilmektedir. Aldehitler genellikle form aldehit (HCHO) ve akrolein (C₂H₃CHO)'den oluşmaktadırlar. Dizel egzozundaki kötü kokulu, gözleri ve solunum sistemini tahriş edici etkinin önemli kaynağı form aldehittir. Form aldehitin maksimum değeri 0.6 mg/m³t r [55].

3.2. Egzoz Gazı Emisyon Standartları

İnsan kaynaklı hava kirliliğinin ateşin icadı ile başladığı bilinmektedir. Daha sonra İngiltere'de kömür kullanımına bağlı olarak kirlenmeler görülmüştür. Endüstrinin artması ile fotokimyasal duman oluşumu başlamıştır. 1940 yılında ABD'de fotokimyasal duman yoğun bir şekilde görülmüştür. 1960 yılında ABD'de ilk egzoz emisyonlarını sınırlayan yasalar yürürlüğe girmiştir. Ardından Japonya ve Avrupa'da egzoz emisyon standartları uygulanmaya başlamıştır. [56].

Bugün ABD, Japonya ve Avrupa'da egzoz emisyonlarını düzenleyen standartlar sürekli güncellenerek uygulanmaktadır. Avrupa'da 1992 yılında yeniden bir düzenlemeye gidilerek Euro standartları yürürlüğe girmiştir. Günümüzde Euro 5 standartları geçerlidir. 2014 yılından itibaren Euro 6 standartları uygulanmaya başlanmıştır. Binek taşıtlar için Euro standartları Tablo 3.1. ve 3.2.'de verilmiştir [57].

Tablo 3.1. Binek taşıtlar için Euro emisyon standartları.

Seviye	Tarih	CO	HC	NO _x	HC + NO _x	PM
Dizel Motorlu Taşıtlar (g/km)						
Euro 1	1992	2,72(3,16)	–	–	0,97 (1,13)	0,14(0,18)
Euro 2	1996	1,0	–	–	0,7	0,08
Euro 3	2000	0,64	–	0,50	0,56	0,05
Euro 4	2005	0,5	–	0,25	0,3	0,025
Euro 5	2009	0,5	–	0,18	0,23	0,005
Euro 6	2014	0,5	–	0,08	0,17	0,005

Parantez içerisinde bulunan değerler kabul edilen üst değeri göstermektedir.

Tablo 3.2. Benzin yakıtlı binek araçlar için Euro emisyon standartları.

Seviye	Tarih	CO	HC	NO _x	HC + NO _x	PM
Benzin Motorlu Taşıtlar (g/km)						
Euro 1	1992	2,72(3,16)	–	–	0,97 (1,13)	–
Euro 2	1996	2,2	–	–	0,5	–
Euro 3	2000	2,3	0,2	0,2	–	–
Euro 4	2005	1	0,1	0,1	–	–
Euro 5	2009	1	0,1	0,1	–	0,005
Euro 6	2014	1	0,1	0,1	–	0,005

Emisyon standartlarında giderek daha katı kurallar getirilmektedir. Dizel araçlarda Euro 5'den Euro 6 standartlarına geçişte azot oksit emisyonlarında % 55' lik bir düşüş olmuştur [57].

4. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

Kamal ve arkadaşları, nikel esaslı süper alaşımlar ve demir esaslı süper alaşım (superfer 800H) alt malzeme yüzeyine Cr_3C_2 -NiCr tozunu patlamalı püskürtme tekniği kullanarak kaplamışlardır. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin X-ray, FE-SEM/EDAX ve X-ray harita tekniği ile ergimiş tuz ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + 25 \% \text{ Ağ. K}_2\text{SO}_4$) ortamında 900 °C’de sıcak korozyon kinetiğini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda $\text{Cr}_3\text{C}_2 - \text{NiCr}$ ile kaplanmış numunelerin, kaplanmamış süper alaşımlardan daha iyi sıcak korozyon direncine sahip olduğunu tespit etmişlerdir [58].

Habib ve arkadaşları, alevle püskürtme yöntemi kullanarak paslanmaz çelik alt malzeme yüzeyine $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$ tozlarını kaplamamışlar ve kaplama tabakasının sertlik, kırılma tokluğu ve aşınma direnci gibi özelliklerini araştırmışlardır. % 3, 13, 40 TiO_2 ilave edilen numunelerin incelemesi sonucunda; γ - Al_2O_3 , α - Al_2O_3 , TiO_2 ve Al_2TiO_5 bileşiklerinin oluştuğunu tespit etmişlerdir. TiO_2 miktarının artmasıyla sertliğin düştüğünü ve aşınma direncinin arttığını gözlemlemişlerdir [59].

Özgören ve arkadaşları, stirling motorunda TBK’nın motor performansına etkilerini inceledikleri deneylerinin sonucunda, kaplamalı pistonlu güç değerlerinin kaplamasız pistonlu güç değerlerine göre daha yüksek çıktığını söylemişlerdir. Kaplama kalınlığı 0,30 mm den daha fazla kalınlığa ulaştırılır ve kaplama yüzeyi daha gözenekli bir yapıya sahip olursa, rejeneratör etkinliği daha da artacağı, aynı zamanda yer değiştirme pistonu üzerinde radyasyonla ve mekik ısı transferi ile oluşan ısı kayıplar daha da azaltılabileceği değerlendirmesini yapmışlardır [60].

Venkatesh ve arkadaşları, yaptıkları bir çalışmada, bir dizel motorun alüminyum alaşım pistonlarına seramik kaplama uygulamış ve yapılan testler sonucunda pistonun aynı tip normal pistona göre yüzey davranışının iyileştiğini görmüşlerdir [61].

Ciniviz ve arkadaşları., farklı izolasyon seviyeleri için bir dizel motorun tam yük performans ve emisyon karakteristiklerini inceledikleri çalışmalarında, yalıtım düzeyleri ile performans ve emisyon değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptıkları kaplama deneyler sonucunda yalıtım seviyesi arttıkça ölçülen parametrelerdeki değişim miktarının da arttığını görmüşlerdir. Kaplama ile motor gücünün % 6.6-9.6 arttığını, motor torkunun % 6.9-10 arttığını, ÖYT değerinin % 4-7.8 azaldığını, EGS değerinin % 13-22 arttığını, hava fazlalık katsayısının % 3-4 azaldığını,

duman emisyonunun % 10-18 azaldığını ve CO₂ emisyonunun % 3-6.5 oranında düştüğünü tespit etmişlerdir [62].

Gürbüz ve arkadaşları, TBK'nın motor yakıt sarfiyatı, EGS ve emisyonlara olan etkilerini incelediği deneylerinde EGS değerinin arttığını, çevreye ve canlılara zararlı olan HC ve CO emisyonlarının azaldığını ve yakıt sarfiyatında iyileşme olduğunu görmüşlerdir [63].

Kvernes ve arkadaşları, piston ve supapları 0.5 mm kısmi stabilize zirkonya ile kaplanmış bir orta devirli dizel motorun 14000 saatlik dayanım testinde başarı sağlanmış, bu deneme neticesinde yakıt sarfiyatında % 5'e yakın düşüş elde etmişlerdir [64].

Uozato ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, AA383 alüminyum alaşımı yüzeyine atmosferik plazma püskürtme yöntemi ile Fe-C-Ni-Cr-Cu-V-B elementleri ile oluşturulan beş farklı tip toz karışımı kaplamışlardır. Kaplamanın mikroyapısı ile birlikte aşınma ve korozyon testleri uygulamışlardır. Korozyon testi sonucunda Ni miktarının artmasıyla, korozyon direncinin arttığını tespit etmişlerdir. Ni miktarındaki artış ile aşınma direnci azalmıştır. Bu araştırmacılar, molibden içerikli Fe-% 3 C tozu ile kaplanan numunenin en iyi aşınma direnci gösterdiğini tespit etmişlerdir [65].

Saral ve arkadaşları, Y₂O₃ stabilizeli ZrO₂ (YSZ) tozuna farklı oranlarda Al₂O₃ ilave ederek paslanmaz çelik alt malzeme yüzeyine plazma püskürtme yöntemi kullanarak kaplamışlardır. METCO 3MB plazma püskürtme tabancası ile gerçekleştirilen kaplama tabakalarını 1000 ve 1200 °C'lik sıcaklıklarda, 5 dakika fırında ısıtma ve 2 dakika fırın dışında hava ile soğutma şeklinde bir çevrim, toplam 7 dakika olarak ısıl şok deneyine tabi tutmuşlardır. Yapılan termal şok testleri sonucunda Al₂O₃ ilavesi arttıkça; kaplamaların yüzey pürüzlülüğü değerleri ve termal şok dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir [66].

Riccardi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, düşük basınçlı plazma sprej tekniği ile Cu-Cr-Zr alaşımı alt malzeme yüzeyine kalın W kaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Ara yüzey tabakası kullanılarak gerçekleştirilen kaplamalarda araştırmacılar; Al-Si, Ni-Al ve W karışım tozlarını kullanmışlardır. Kaplama için alt malzemenin optimum sıcaklığını tespit ederek, farklı püskürtme basınçları ile farklı kalınlıklardaki tabakaların ısıl iletkenlik, ısıl genleşme ve sertlik değerlerini incelemişlerdir. Yüksek kalınlık ve yoğunluğa sahip W kaplamalarda istenilen ısıl

özellikler elde edilirken, numunelerde mekanik özelliklerin zayıf olduğunu tespit etmişlerdir [67].

Hazar ve Öztürk., bir dizel motorun piston-silindir kafası, egzoz ve emme supaplarının yüzeylerini plazma sprej yöntemiyle $Al_2O_3-TiO_2$ ile kaplayarak dizel yakıtı ile beraber farklı yakıtlarda kullandıkları çalışmalarında, yanma odası elamanları seramik kaplanan dizel motorda ısı transfer olayının azaldığını, böylece yanmayı iyileştirerek motorun performans ve emisyon değerlerini olumlu yönde etkilediğini görmüşlerdir. Ayrıca egzoz sıcaklığında kaplama sonucunda % 11'lik bir artış, ÖYT değerinde yaklaşık % 4 ve CO emisyonunda ise % 19 'luk bir düşüş tespit etmişlerdir [68].

Wallace ve arkadaşları, yanma odası elamanlarına TBK uygulamış tek silindirli bir dizel motorda yaptıkları teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda termal bariyerli pistonlara sahip motorun, kaplamasız motora göre egzoz gazlarının entalpisinde ve EGS değerinde önemli miktarlarda artış olmasına rağmen, volümetrik verimde bir miktar düşüş olduğunu belirtmişlerdir [69].

Kamo ve arkadaşları, altı silindirli, direkt püskürtmeli, aşırı doldurmalı bir dizel motor üzerinde yaptıkları çalışmada, silindir kapağı, supaplar ve pistonları termal bariyer amaçlı olarak kaplamışlardır. Çalışmanın sonucunda NO_x emisyonlarında % 40 artış olduğunu tespit etmişlerdir [70].

Ramaswamy ve arkadaşları, doğrudan enjeksiyonlu dizel motorunda, silindir kapağı, supap ve pistonu sırasıyla 0.1 mm, 0.26 mm ve 0.45 mm termal bariyer amaçlı kaplamışlardır. Kaplama sonucunda ÖYT değerinde % 1-2 azalma, EGS değerinde ise % 5-6 oranlarında artma meydana geldiğini belirtmişlerdir [71].

Yaşar ve arkadaşları, endüstride yaygın olarak kullanılan TBK yöntemleri olarak; alevle toz sprej, tel sprej, elektrik ark sprej, detonasyon tabancası tekniği, HVOF ve plazma sprej olduğunu belirtmektedir. 6 silindirli, aşırı doldurmalı, ara soğutmalı bir dizel motorun silindir kapağı ve supaplarını 0.35 mm kısmi stabilize zirkonya ile kapladıkları çalışmada hacimsel verimde %1-3 artış, ÖYT değerinde % 6'lık azalma tespit etmişlerdir. Ayrıca 250 saatlik test sonucunda seramik kaplamanın herhangi bir hasara uğramadıklarını tespit etmişlerdir [72].

Hazar ve Öner., dizel motorlarında TBK'nın egzoz emisyonlarına etkisini inceledikleri çalışmalarında, yanma odası elemanlarının izolasyonunun, yanma sıcaklığını arttırdığı için yanma tepkimesini de iyileştirdiğini ve bu şekilde yanmamış

hidrokarbonların tepkimeye katılması sağlanarak egzoz emisyonlarının da iyileştiğini belirtmişlerdir [73].

Sivakumar ve ark., pistonlarını stabilize zirkonyum ile kapladıkları bir dizel motorun performans ve emisyonlarındaki etkiyi araştırdıkları çalışmalarında, CO emisyonunda % 2.7 oranında azalma, CO₂ emisyonunda % 5.27 artış, HC emisyonlarında % 35.27'lik bir azalma saptamışlardır [74].



5. MATERYAL ve METOT

Deney motoru olarak 4 zamanlı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, hava soğutmalı 6LD 400 model Lombardini marka dizel motor kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında üç tip egzoz borusu kullanılmıştır. Bu egzoz borularından birincisi standart egzoz borusu (SB), ikincisi dışı kaplanmış egzoz borusu (DKB) ve üçüncüsü ise içi dışı kaplanmış egzoz borusudur (İDKB).

Egzoz boruları plazma sprej yöntemi kullanılarak krom karbür ile kaplanmıştır. Kaplama işlemi İstanbul'da özel bir firmaya yaptırılmıştır. Plazma sprej kaplama yönteminin seçilmesinin başlıca nedenlerinden bir tanesi de ana malzemenin özelliklerinde herhangi bir değişiklik yapmamasıdır. Kaplama malzemesi olarak krom esaslı sert kaplama malzemesi krom karbür kullanılmıştır. Kaplama, yaklaşık 100 mikron kalınlıkta yapılmış olup, kaplanacak olan malzemenin dış etkenlerden (korozyon vb gibi) korunması amaçlanmıştır. Kaplama yöntemi olan plazma sprej kaplama yöntemi, metallerin çeşitli tozlarla kaplanarak aşınmaya, oksitlenmeye, korozyona ve ısıya dayanıklı hale getirilmesinde yaygın olarak kullanılan bir termal sprej kaplama yöntemidir. Bu yöntemle gerçekleştirilen kaplama sayesinde belirtilen özellikler elde edildiği gibi, ana malzemenin üstün özelliklerinden tokluk ve kolay şekillendirilebilme özellikleri de korunmaktadır. Böylece plazma sprej kaplama, metal ve seramiklerin üstün özelliklerinin yeni bir malzemede toplanmasına imkan sağlamaktadır.

Bu çalışma üç aşamadan meydana gelmiştir.

Birinci aşamada standart egzoz borusu (SB), dizel motora bağlanarak farklı devirlerdeki emisyon değerleri ve farklı bölgelerden alınan egzoz gaz sıcaklıkları (EGS) kayıt altına alınmıştır.

İkinci aşamada egzoz borusunun dış kısmı plazma sprej yöntemi kullanılarak krom karbür ile yaklaşık 100 mikron kalınlığında kaplanmıştır. Dışı kaplanmış egzoz borusu (DKB) dizel motora bağlanarak farklı devirlerdeki emisyon değerleri ve 200 cm boyunda olan egzoz borularından 40 'ar cm aralıklarla 6 farklı bölgeden alınan egzoz gaz sıcaklıkları (EGS) kayıt altına alınmıştır.

Üçüncü aşamada egzoz borusunun hem iç hem de dış kısımları plazma sprej yöntemi kullanılarak krom karbür ile 100 mikron kalınlığında kaplanmıştır. İçi dışı kaplanmış egzoz borusu (İDKB) dizel motora bağlanarak farklı devirlerdeki emisyon değerleri ve farklı bölgelerden alınan egzoz gaz sıcaklıkları (EGS) kayıt altına

alınmıştır. DKB ve İDKB' nun kayıt altına alınan egzoz emisyon ve EGS değerleri, SB' nun kayıt altına alınan egzoz emisyon ve EGS değerleri ile karşılaştırmalı olarak kıyaslanmıştır. Karşılaştırmalar, kaplanmamış standart egzoz borusu (SB), dışı kaplanmış egzoz borusu (DKB) ve içi dışı kaplanmış (İDKB) egzoz borusu olarak değerlendirilmiştir. Dış etkenlerin etkisini ölçmek için kaplanmamış standart egzoz borusu (SB), dışı kaplanmış egzoz borusu (DKB) ve içi dışı kaplanmış (İDKB) egzoz borusu 120 gün boyunca su ve çamur altında tutularak etkisi incelenmiştir. Ayrıca deneyde kullandığımız dizel motor, egzoz emisyon deneyleri için, gerçek çalışma şartlarında yaklaşık 150 saat çalıştırılmıştır. Dizel motor dinamometreye (bremze) bağlanmıştır. Daha sonra kaplanmamış standart egzoz borusu(SB), dışı kaplanmış egzoz borusu (DKB) ve içi dışı kaplanmış (İDKB) egzoz borusu sırasıyla dizel motora montaj yapılmıştır. Dinamometre tarafından, bağlanan motora yük (1/2 oranında) verilmiştir. Egzoz ölçüm cihazıyla; Egzoz emisyon değerleri (CO, HC, İs, CO₂, Lambda, NO_x, O₂) ve Termokupl cihazı ile egzoz gaz sıcaklıkları ölçülmüş olup tüm sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Egzoz emisyon deneyleri tamamlandıktan sonra egzoz boruları çamur testi için motordan ayrılmıştır. Çamur testi için hazırladığımız bölümde egzoz boruları 120 gün boyunca çamur içerisinde bekletilmiştir. Egzoz borularının içerisinden de su akıtılarak boruların her yerinde dış etkenler oluşturulmaya çalışılmıştır. Çamur testi bittikten sonra aynı bölgelerden alınan numunelerin metalografik incelemeler için gerekli hazırlıklar yapılmıştır.

Çalışma öncesi ve çalışma sonrası kaplanmayan ve kaplanan parçalar sökülerek metalografik incelemeye tabi tutulmuştur. Kaplama yapılmış ve kaplama yapılmamış egzoz borusu mukayese yapılacak parçaların aynı bölgelerinden numuneler alınmıştır. Yapılan incelemelerde; SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu), Mikro sertlik, EDS (Energy dispersive spektography) ve X-ışını analizleri (X-RD), yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan bu metalografik analizlerle; hem malzemelerin yüzeyleri üzerindeki yapısal değişiklikler hem de iç yapılarındaki oluşturdukları atomsal bileşikler tespit edilmiştir. Ayrıca korozyon deneyi yapılmıştır.

5.1. Deney Motoru ve Teknik Özellikleri

Deney motoru olarak 4 zamanlı, tek silindirli, direkt enjeksiyonlu, hava soğutmalı 6LD 400 model Lombardini marka dizel motor kullanılmıştır.

Şekil 5.1'de kullanılan dizel motor görülmektedir.



Şekil 5.1. Lombardini marka 6LD 400 model dizel motor

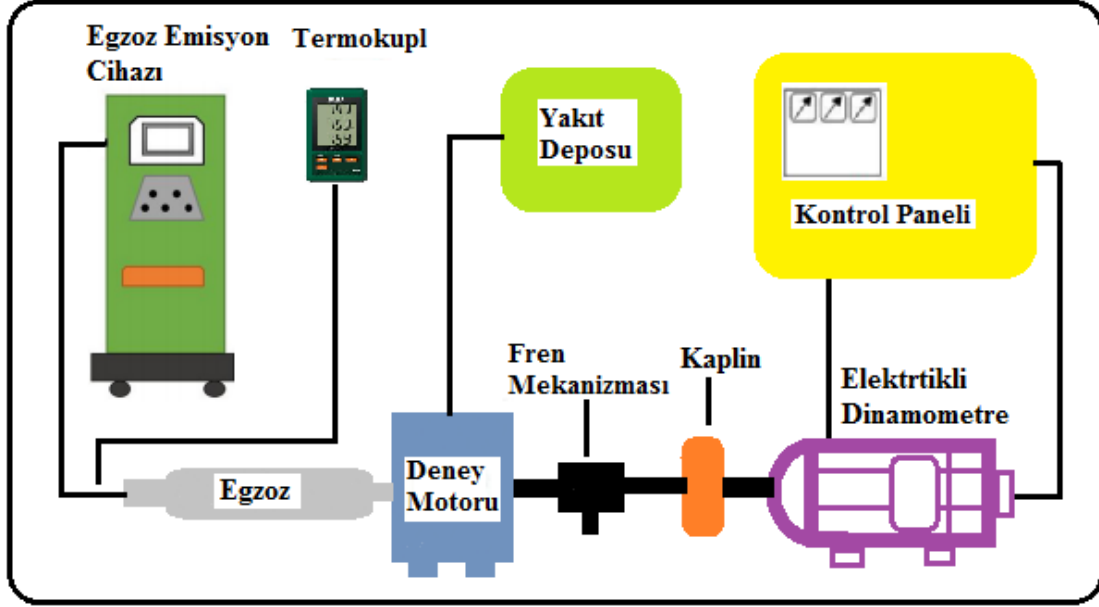
Tablo 5.1. Deneylerde kullanılan dizel motorun teknik özellikleri

Motorun markası ve tipi	6LD 400 Lombardini Dizel motor
Strok Sayısı	4
Silindir Sayısı	1
Silindir Çapı	86 mm
Silindir Hacmi	395 cm ³
Strok	68 mm
Motor Gücü	6.25 / 8.5 (kW / HP)
Maksimum Tork	19.6 – 2000
Ağırlık	45 Kg
Yağlama	Tam basınçlı
Püskürtme Şekli	Direkt enjeksiyonlu tam dizel
Püskürtme Basıncı	200 kg/cm ²
Soğutma Şekli	Hava soğutmalı
Devir	3600 dev/dk
Sıkıştırma Oranı	18:01
Boyutları	382 x 427 x 491 mm

5.2. Test Düzeneği

Motor deneyleri Cussons P8160 Model elektrikli dinamometre düzeneğinde yapılmıştır. Deney düzeneği; test motoru, egzoz emisyon cihazı, termometre,

dinamometre, fren mekanizması, yakıt deposu ve kontrol ünitesinden oluşmaktadır. Şekil 5.2.'de deney düzeneği görülmektedir.



Şekil 5.2. Motor test düzeneği şematik görünümü

Deneylerde kullanılan dizel motor farklı devirlerde 1/2 yükte çalışırken emisyon değerleri Bosch marka emisyon cihazı kullanılarak kayıt altına alınmıştır.

Deney motoru olarak sadece dizel motor kullanılmıştır. İlk önce standart egzoz borusu (SB) deney motorumuza bağlanmıştır. Deney motorumuz 1800, 2100, 2400, 2700 ve 3000 devirlerde 1/2 yükte çalıştırılmış olup her bir devir için 10 farklı emisyon değeri kayıt altına alınmıştır. 1800, 2100, 2400, 2700 ve 3000 devir için 200 cm boyundaki egzoz borusu üzerinde 40'ar cm aralıklarla 6 farklı bölgeden egzoz gaz sıcaklıkları (EGS) kayıt altına alınmıştır. Aynı işlemler hem dışı kaplanmış egzoz borusu (DKB) hem de içi dışı kaplanmış egzoz borusu (İDKB) için tekrarlanmıştır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak birbiri ile mukayese edilmiştir.

Emisyon ve EGS deneyleri tamamlandıktan sonra egzoz boruları çamur testine tabi tutulmuştur. Çamur testinde egzoz borularının gerçek çalışma koşulları oluşturulmaya çalışılmıştır. SB, DKB ve İDKB çamurlu bir ortamda ve boruların içerisinden su akacak şekilde 120 gün boyunca takip edilmiştir. Daha sonra egzoz borularının aynı bölgelerinden olmak üzere numuneler alınmıştır. Bu numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulduktan sonra metalografik

incelemeler (SEM, EDAX, X-RAY) yapılmıştır. Sonuçlar karşılaştırmalı olarak mukayese edilmiştir. Bu işlemlerin ardından kaplanmış ve kaplanmamış numuneler üzerinde korozyon deneyleri yapılmıştır.

5.3. Egzoz Emisyon Testleri

Cussons P8160 Model elektrikli dinamometre düzeneğinde yapılan egzoz emisyon deneyleri Bosch marka BEA-350 model egzoz emisyon cihazında yapılmıştır. Egzoz gaz sıcaklık değerleri ise Operating Instructions Model (W) 502 K/J termometre ile yapılmış olup sonuçlar kayıt altına alınmıştır.

Şekil 5.3.'te Bosch marka BEA-350 model emisyon cihazı fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.3. Bosch marka BEA-350 model emisyon cihazı

Bosch marka BEA-350 model emisyon cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyeti Tablo 5.2.'de görülmektedir.

Tablo 5.2. Bosch marka emisyon cihazının ölçüm aralığı ve hassasiyeti

Bileşenler	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
CO	0.00 – 10.00 % Hac.	0.001 % Hac.
CO2	0.00 – 18.00 % Hac.	0.01 % Hac.
HC	0 – 9.999 ppm Hac.	1 ppm Hac.
O2	0.00 – 22.00 % Hac.	0.01 % Hac.
Lambda	0.500 – 9.999	0.001
NO	0 – 5000 ppm Hac.	≤ 1 ppm Hac.

Deneylerde kullanılan Operating Instructions Model (W) 502 K/J termometrenin görüntüsü Şekil 5.4.'te görülmektedir.



Şekil 5.4. Operating Instructions Model (W) 502 K/J termometre

5.4. Metalografik İncelemeler

5.4.1. Mikrosertlik Ölçümleri

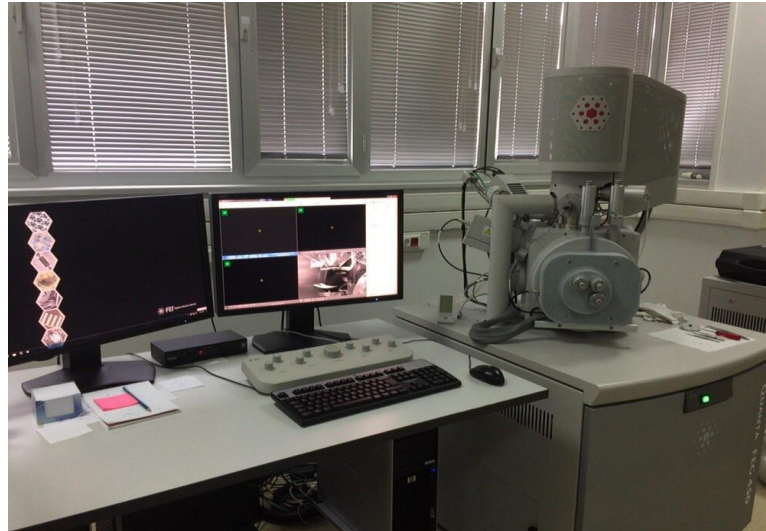
Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler Fırat Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarında bulunan Future-Tech marka mikro sertlik ölçüm cihazında sertlik deneylerine tabi tutulmuştur. Şekil 5.5. te Mikrosertlik cihazı fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.5. Mikrosertlik cihazı

5.4.2 Egzoz Borularına Ait Numunelerin SEM Ve EDS Analizi

Şekil 5.6. da SEM Cihazı fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.6. SEM Cihazı

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait yüzeylerin analize hazırlanması Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. Metalografik deneyler öncesi numunelerdeki mikro yapıları ve meydana gelen fazları tespit etmek amacıyla; SEM (Scanning Elektron Microscopy), EDS (Energy Dispersive Spectrograf) noktasal analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

5.4.3 Egzoz Borularına Ait Numunelerin X-RD Analizi

Kaplanmış ve kaplanmamış numuneler Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvarında bulunan Rigaku marka Ultima IV X-RAY Difraktometre ile analiz yapılmış olup sonuçlar kayıt altına alınmıştır. Şekil 5.7. de X-RD cihazı fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.7. X-RD Cihazı

5.4.4. Egzoz Borularına Ait Numunelerin Korozyon Testi

Şekil 5.8. de korozyon test cihazı fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 5.8. Korozyon Test Cihazı

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelere ait korozyon testleri, Bingöl Üniversitesi Kimya Bölümü Laboratuvarında bulunan korozyon test cihazında yapılmıştır. Numuneler 1'er saat % 3.5'lik NaCl çözeltisinde bekletildikten sonra elde edilen nyquist diyagramları aracılığı ile numunelerin korozyona karşı koydukları direnç belirlenmiştir.

5.5. Kaplama İşlemi

Plazma sprey işlemiyle malzeme yüzeyinde bir veya iki katmanlı kaplama tabakası oluşturulmaktadır. Birinci tabaka bond (bağ) tabaka olarak adlandırılıp görevi hem altlık yüzeye hem de kendinden sonra gelecek olan asıl kaplama tabakasına yapışma mukavemetini ve oksidasyon direncini artırmaktır. İkinci tabaka ise istenilen amaç doğrultusunda seçilen toz içeriğiyle bond (bağ) tabaka üzerine uygulanmaktadır veya bond malzeme kullanılmaksızın malzeme yüzeye direkt uygulanmaktadır.

Bu çalışmada her biri 2 metre uzunluğunda 3 adet egzoz borusu kullanılmıştır. İlk olarak birinci egzoz borusuna (SB) herhangi bir kaplama işlemi uygulanmamıştır. İkinci egzoz borusunun (DKB) sadece dış kısmı yaklaşık 100 mikron kalınlığında krom karbür malzemesi ile kaplanmıştır. Daha sonra üçüncü egzoz borusunun (İDKB) hem iç hem de dış kısımları yaklaşık 100 mikron kalınlığında krom karbür malzeme ile kaplanmıştır. Bu işlemler İstanbul ilinde bulunan özel bir firmaya yaptırılmıştır.

Plazma sprey yönteminin üretim parametreleri Tablo 5.3.' te görülmektedir.

Tablo 5.3. Plazma sprey kaplamanın üretim parametreleri [75].

Parametreler	
Plazma Tabancasının Adı	Sulzer Metco 9 MB 80 KW
Kaplama Kalınlığı (Mikron)	100 Mikron
Bağlayıcı Toz Adı	80/20, Ni/Cr
Bağlayıcı Toz Katman Kalınlığı (Mikron)	20-30 Mikron
Argon Basıncı (Psig),	75 psig,l/dk
Hidrojen Basıncı (Psig), Akışı (l/dk.)	50 psig,l/dk
Toz Besleme Miktarı (gr/dk.)	45-60-g/dk
Püskürtme Mesafesi (mm)	8.5-9.0 cm
Taşıyıcı Gaz (N2) Basıncı (bar), Akışı (l/dk.)	26 (SCFH),l/dk

6. DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

SB, DKB, ve İDKB' ların dizel motorun 1/2 yük ve 1800, 2100, 2400, 2700 ve 3000 devirdeki emisyon değerleri tespit edilmiştir. EGS ölçümü, egzoz manifolduna bağlanan kaplanmış ve kaplanmamış 200 cm uzunluğundaki egzoz borularından alınmıştır. Egzoz borularının EGS'ları, egzoz manifoldundan itibaren aralarında 40 cm mesafe bulunan 6 farklı bölgeden ölçülmüştür. 1800, 2100, 2400, 2700 ve 3000 devirdeki EGS değerleri kayıt altına alınmıştır. Ayrıca kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin korozyon deneyleri yapılmış olup sonuçlar mukayese edilmiştir.

6.1. Egzoz Emisyon Değerlerinin Mukayesesi

6.1.1. NO_x Emisyonu

Dizel motorlarda NO_x iki ana nedenle oluşmaktadır. Yanma sırasında silindir içerisinde yüksek sıcaklıklarda (yaklaşık 2500°C'nin üstünde), havanın içerisindeki azotun oksijenle reaksiyona girmesi sonucunda NO_x'ler oluşmaktadır.

NO_x oluşumunu etkileyen diğer parametre de stokiyometrik H/Y oranına yakın değerlerdeki hafif hava fazlalığıdır. Böylece yanma için gerekli hava fazlasıyla sağlanmakta ve yanma iyileşmektedir. Yanmanın iyileşmesiyle birlikte silindir içerisinde sıcaklıklar yükselmekte ve fazla hava içerisindeki oksijenin de etkisiyle NO_x oluşumu hızla artmaktadır. HFK bu değerlerin dışına çıktığında NO_x oluşumu da azalma eğilimi göstermektedir. HFK'nın 1.1'den büyük değerlerinde, yani fakir karışımlarda silindir içi sıcaklıklar düşmekte ve NO_x emisyonlarında hızlı bir şekilde düşme meydana gelmektedir.

Dizel motorlarda basınç, reaksiyon sıcaklığı, bir önceki yanmadan kalan karışım, fazla oksijen, ateşleme gecikme süresi ve tutuşma hızı da NO_x oluşumunu etkileyen faktörlerdir [67]. Dizel motorun NO_x emisyonu oluşumunda; adyabatik alev sıcaklığı, ısı salınım oranı ve stokiyometrik yanma da önemli etkiler görülmektedir.

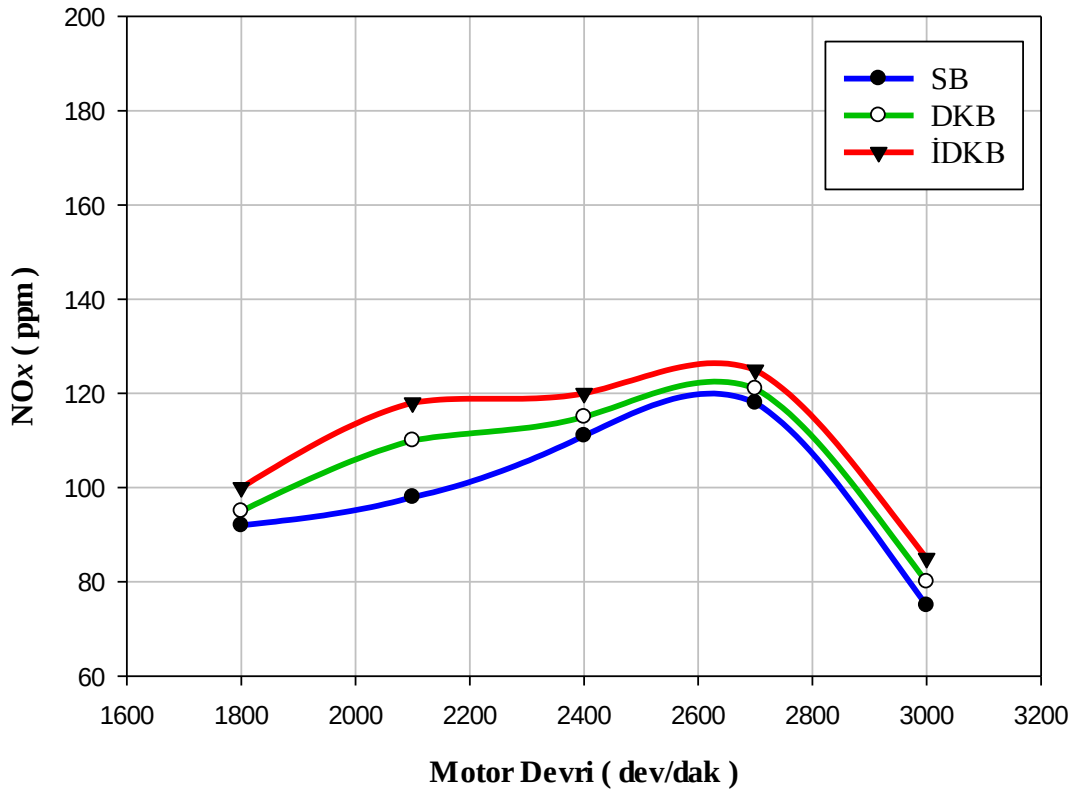
NO_x miktarı yanma odası sıcaklığı ile doğru orantılı olarak değişir. Kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının 1/2 yük ve farklı devirlerdeki NO_x emisyonu grafikleri Şekil 6.1'de görülmektedir.

Motor devri yükseldikçe yanma şartları iyileşmekte ve yanma sonu sıcaklığı artmaktadır. Dolayısıyla NO_x emisyonları 2500-3000 d/dak motor devri aralığında yüksek çıkmaktadır. Motor devri daha da artırılırsa maksimum motor devrine yakın

olan bölgede yanma şartlarının kötüleşmesi ortalama efektif basıncın azalmasına, yanmaya ayrılan zamanın kılmasına ve NO_x emisyonlarının düşük çıkmasına neden olmaktadır.

Yüksek devirlerde NO_x'in düşmesi ortamda bulunan gazların yüksek sıcaklıkta kalma sürelerinin azalması, böylece NO_x oluşumu için yeterli zamanın kalmadığı şeklinde açıklanabilir [76].

Dizel motorlarda ulaşılan maksimum sıcaklıklar NO oluşumunu kontrol eder. Yanma prosesinin başlarında yanan karışımın miktarı önemli bir etkiye sahiptir. Çünkü yanma sonucu oluşan basınç, yanmamış karışımı sıkıştırarak sıcaklıkların daha da artmasına neden olur ve böylece NO oluşumu da artar. Bu gazlar daha sonra güç stroğunda genişletilir ve havayla ya da daha soğuk yanmış gazlarla karıştırılarak oluşan NO miktarının korunumu neden olur.



Şekil 6.1. NO_x emisyonunun SB, DKB ve İDKB'daki değişimi

Şekil 6.1. de görüldüğü gibi 1800 devirde dizel motor 1/2 oranında yükte iken NO_x emisyonunun standart egzoz borusundaki (SB) değeri kaplanmış egzoz borularındaki (DKB, İDKB) değerlerden daha düşük çıkmıştır. 1800 ve 2700 devirler

arasında lineer bir artış olduğu görülmektedir. 2700 devirde kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularındaki NO_x miktarı en üst seviyeye çıkmıştır. 2700-3000 devir arasında ise kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularındaki NO_x miktarında en düşük seviyeler tespit edilmiştir.

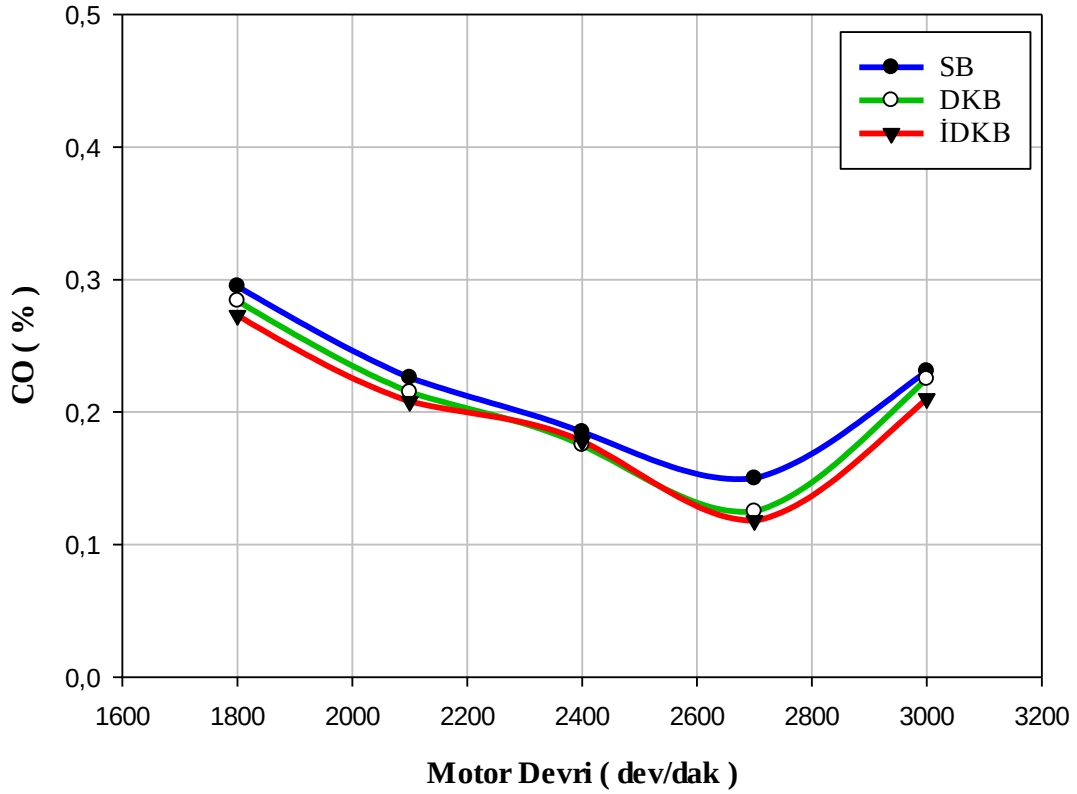
Yapılan deneyler sonucunda DKB' daki NO_x emisyon değeri SB' daki NO_x emisyon değerine göre ortalama % 6 daha yüksek olduğu görülmektedir. İDKB' nun SB' daki NO_x emisyon değerinde ise ortalama % 10 'luk bir artış tespit edilmiştir. Egzoz borusundaki ısının artmasıyla beraber NO_x' lerde de doğru orantılı olarak bir sıcaklık artışı meydana gelmiştir. SB'ya göre DKB ve İDKB'nun NO_x emisyonunun yüksek çıkmasının uygulanan termal bariyerden olduğu düşünülmektedir. Egzoz hattının kaplanması bu hat boyunca soğumayı geciktirerek dolayısıyla ortamdaki Azot ve Oksijen moleküllerinin birleşerek NO_x emisyonu oluşumunu devam ettirmektedir.

6.1.2. CO Emisyonu

Yaklaşık olarak havanın kütlece %21'i O₂ ve %79'u ise N₂ den oluşmaktadır. Yanma olayı ise yakıt içerisinde C ve H'nin içeri alınan havadaki O₂ ile girmiş olduğu reaksiyon sonucu H₂O ve CO ve NO_x gibi ürünleri verdiği bir egzotermik reaksiyondur. Bu olay yakıtın oksidasyonu diye de ifade edilmektedir. Yanma olayının gerçekleşebilmesi için yanma odasına alınan hava ve yakıt belli bir oranda karışması gerekmekte olup bu oran kütleli bir orandır. Bu ifade Stokiyometrik oran olarak kullanılmakta olup yakıtın tam olarak yanması için gerekli minimum hava miktarı olarak kullanılmaktadır.

Yanma reaksiyonunda yeterli O₂ olmadığı takdirde ise CO₂'nin yerine CO meydana gelir. Dizel motorlarda oluşan egzoz gaz emisyonlarından karbon monoksit (CO) emisyonu, hava yakıt karışım oranı, oksijen miktarı ve motor sıcaklığı gibi parametrelere bağlı bir emisyon çeşididir. CO, moleküler yapısında oksijen içermeyen petrol kökenli yakıtların eksik yanması sonucunda meydana gelir [77].

Dizel motorda kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularındaki CO emisyon değerleri Şekil 6.2.'de grafik olarak görülmektedir.



Şekil 6.2. CO emisyonunun SB, DKB ve İDKB'deki değişimi

Şekil 6.2.'deki grafikten de anlaşılabileceği gibi dizel motorun düşük devirlerdeki CO değeri daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni düşük motor hızlarında silindirlerdeki düşük gaz sıcaklığı nedeniyle CO'nun, CO₂'ye tam olarak dönüşmemesidir [78].

Kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularındaki en düşük CO değerleri 2400 dev/dak ile 3000 dev/dak arasında ölçülmüştür. 2700 dev/dak'dan sonraki devirlerde yanma için yeterli tutuşma zamanının bulunmaması, CO ve O₂'nin tepkimeye girmesine engel olmaktadır. Buna bağlı olarak CO miktarı artabilmektedir. CO emisyonunun ortalama 2700 devirde yanma veriminin artmasından dolayı düştüğü, yüksek hızlarda ise yeterli yanma zamanı bulunmadığı için arttığı söylenebilir.

Yapılan deneyler sonucunda DKB'ın SB'ye göre CO emisyon değeri ortalama % 5 daha düşük çıkmıştır. İDKB'nun SB'ye göre ise CO değeri ortalama % 9 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Fakir ve stokiometrik karışımlarda egzoz gazları içerisindeki CO miktarı daha az olurken, zengin karışımlarda soğuk egzoz gazları içerisinde bile oksijen yetersizliği nedeniyle yüksek miktarda CO bulunmaktadır. Egzoz borularının krom karbür (Cr₃C₂) kaplanmasıyla bir termal bariyer sağlanıp egzoz

boruları içerisindeki sıcaklığın artmasına paralel olarak CO miktarının azaldığı düşünülmektedir.

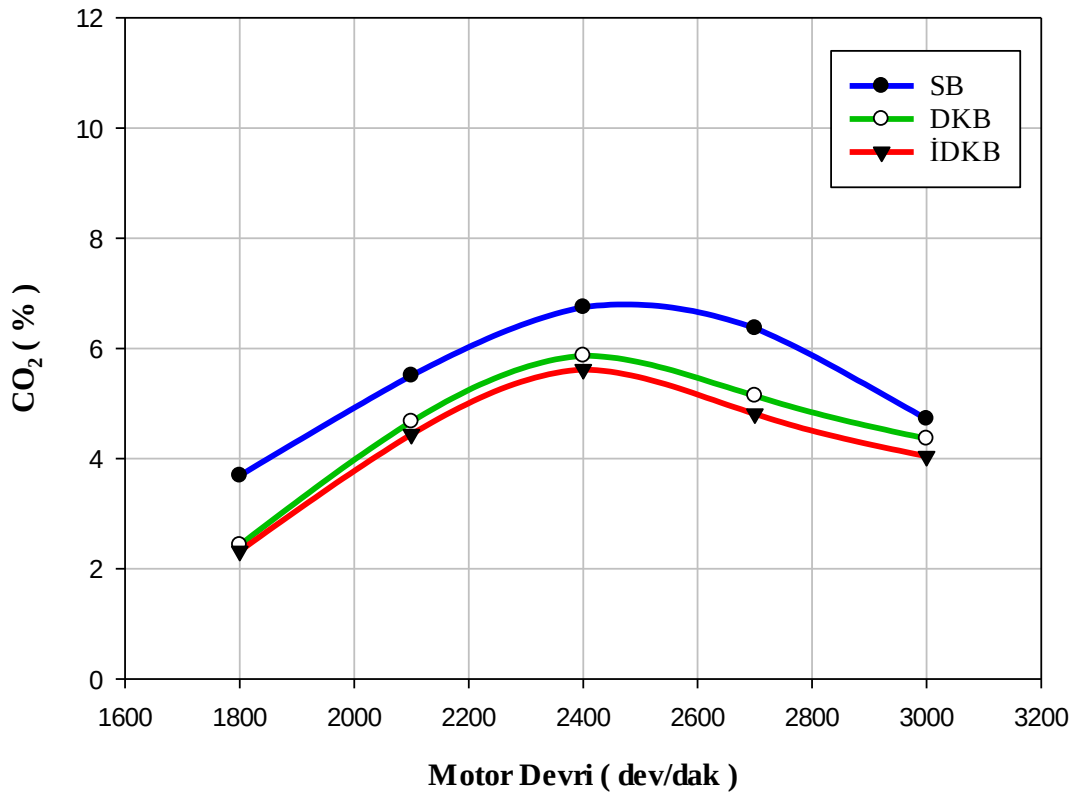
Yanma işlemi sonucunda oksijenin tamamı CO₂ çevrilemez ve egzozda CO görülür. CO eksik yanma sonucu ortaya çıkan bir reaksiyon ürünü olup zararlı bir emisyonudur. Hidrojen atomlarının oksijen atomlarını çekim kuvveti, karbon atomlarına oranla daha büyüktür. Bu nedenle yakıt içerisindeki hidrojen, ortamda tam yanma için gerekli oksijenden daha az miktarda oksijen bulursa bile, tümüyle H₂O'ya dönüşür. Buna karşılık karbonun bir bölümü yanma sonu ürünleri arasında karbon veya CO parçacıkları olarak görülebilir. Düşük yanma sonu sıcaklığı, eksik yanma ve fakir hava/yakıt karışımı karbon monoksit oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerdendir. Dizel motorlar yüksek hava fazlalık katsayısı (HFK) ile çalıştıklarından karbon monoksit emisyonları azdır. Silindir içerisinde genellikle yakabileceklerinden daha çok hava mevcuttur. Bu da CO emisyonlarını sınırlandıran bir faktördür [69]. CO emisyonu eksik yanma ürünü olduğu için eksik yanma şartlarının iyileştirilmesi CO emisyonunun azalmasına katkıda bulunacaktır. Bu açıdan değerlendirildiğinde seramik kaplanmış DKB ve İDKB'lardaki eksik yanma şartları iyileşecektir. Yanma için ayrılan sürenin gerek DKB gerekse İDKB'nun kaplanmış bölümü 200 cm olduğu düşünüldüğünde bu hat boyunca SB'ya göre daha fazla sıcaklık muhafaza edilmektedir. SB'ya göre DKB ve İDKB'da egzoz hattı boyunca sıcaklığın yüksek olması daha fazla CO emisyonunun CO₂ ve H₂O'ya dönüştüğü düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlar bu görüşü desteklemektedir. Ayrıca CO emisyonu oluşumunda en önemli faktör olan yanma tepkimesi için ayrılan sürenin kısa olması DKB ve İDKB'da tersi bir yönde etki yaptığı düşünülmektedir. Egzoz hattı boyunca SB'ya göre DKB ve İDKB'da oluşturulan termal bariyer etkinin ve hat boyunca sürenin yeterli olması daha fazla CO emisyonunun içerisindeki C ve O atomlarının ayrılarak CO₂ ve H₂O moleküllerinin oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir.

6.1.3. CO₂ Emisyonu

CO₂ emisyonu, normal yanma süreçlerinin tamamında ortaya çıkan renksiz, kokusuz zararsız bir gazdır. Ancak sınır değerleri aşması halinde Ozon oluşumuna ve sera etkisine neden olabilmektedir. Petrol esaslı bir yakıt yanma reaksiyonuna uğradığında yani yapısındaki C elementi oksidasyona uğradığında yanma ürünü olarak CO₂ oluşmaktadır. Aynı zamanda dizel bir motorun CO₂ emisyonu yakıtın yanma odası

içerisinde ne kadar verimli yandığının da bir göstergesidir. CO₂ emisyonu doğrudan yanma ile ilgilidir. Dizel bir motor düşük devirde çalışıyorsa, yanma performansı da düşüktür. Çünkü düşük devirlerde silindir içi sıcaklık değeri optimum şartlarda olmadığı için kötü bir yanma gerçekleşmektedir [79].

Şekil 6.3.'te dizel motora bağlı olan kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının CO₂ emisyon değerleri görülmektedir.



Şekil 6.3. CO₂ emisyonunun SB, DKB ve İDKB'daki değişimi

Şekil 6.3'te görüldüğü gibi CO₂ emisyonu, 2400 dev/dak'da en yüksek değerdedir. Bunun nedeni motorlarda maksimum moment devrinde silindir içine alınan oksijen miktarının en yüksek seviyeye çıkması olarak söylenebilir. Maksimum moment devrinden sonra yakıt karışımı zenginleşmekte ve CO₂ oranı düşmektedir. Ortaya çıkan emisyon değerleri de bunu desteklemektedir.

CO₂'nin SB'da, DKB ve İDKB'ya göre yüksek çıkması normal olarak değerlendirilmektedir. EGS grafikleri olan Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da görüldüğü gibi SB'nun yüzey sıcaklıkları DKB ve İDKB'ya göre daha yüksek çıkmaktadır. Dolayısıyla CO₂'nin DKB ve İDKB'ya göre yüksek çıkması CO₂'nin

emisyona değeriyle ilişkilendirilmektedir ve ayrıca 200 cm'lik egzoz hattı boyunca kimyasal reaksiyonların bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

Yapılan deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre CO₂ emisyon değeri ortalama % 11'lik bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun CO₂ emisyon değeri ise SB' ya göre ortalama % 13'lük bir azalma tespit edilmiştir. Burada termal yalıtımın CO₂ emisyonunu azalttığı düşünülmektedir. Egzoz borularının seramik kaplanması ortam sıcaklığını artırarak egzoz emisyonu içerisindeki serbest O₂ moleküllerinin C atomuyla birleşimini sağladığı düşünülmektedir. Dolayısıyla SB'ya göre DKB ve İDKB'nun CO₂ emisyon değeri daha düşük çıkmıştır.

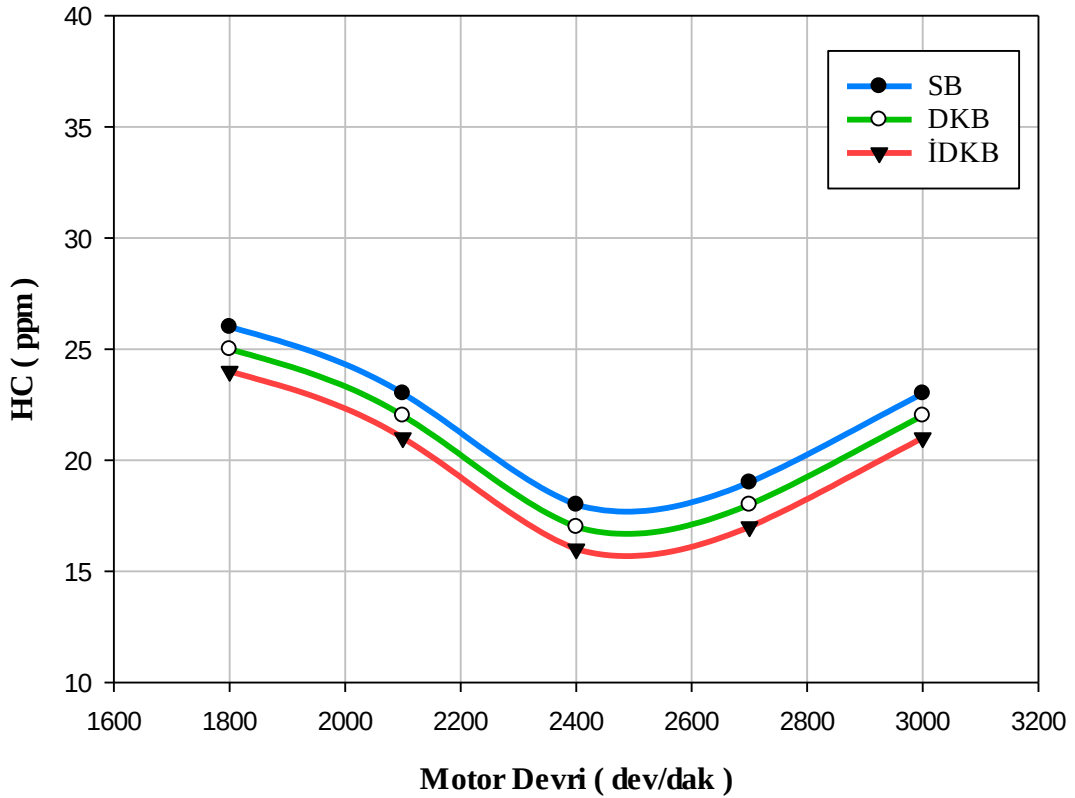
6.1.4. HC Emisyonu

HC emisyonu eksik yanma sonucu oluşan bir emisyondur. Yanma ürünleri arasında yanmamış HC' ların bulunmasının nedeni, yakıtın tutuşma sıcaklığına gelmemesi, ortamda oksijenin yetersiz olması nedeniyle yakıtın okside olamaması veya yarı oksitlenmesidir [80].

Egzoz gazları içerisinde HC 'nin bulunması yakıtın kısmen veya tamamının yanmamasıdır. HC emisyonları, silindir içerisindeki bazı bölgelerde, hava/yakıt karışım oranının çok fakir veya çok zengin olması sonucu eksik yanmanın ortaya çıkmasıyla meydana gelen yakıt moleküllerinden oluşur ve sıcaklık ile oksijen (O₂) yetersizliğinin bir fonksiyonudur. Dizel motorlarda HC emisyonlarının artmasının nedeni fakir karışımda hava oranının çok artması ile yakıtın kısmi bölgelerde sönmesidir. Hava oranının azalması ile yeterli O₂ olmamasıyla yakıt tam olarak yanamamakta ve HC oranı da artmaktadır. Ayrıca yakıtın püskürtülmesi sırasında enjektörün uç kısmında kalan yakıtın damlama yapması ile yakıtın molekül çekirdeklerinde HC yanmaması da, HC oranını arttırmaktadır.

Dizel motorlarda HC emisyonları, genellikle yanma tamamlanamadığı için oluşmaktadır. Yapıları büyük olan HC molekülleri sıcaklığın etkisi ile daha küçük HC moleküllerine dönüşmektedirler. HC moleküllerinin oksijen ile tepkimeye girmesi sonucunda yanma gerçekleşmektedir. Yanma reaksiyonunun çok hızlı bir şekilde gerçekleşmesi ve yetersiz oksijen, bazı küçük yapıları HC bileşiklerinin yanma reaksiyonunu tamamlayamamalarına neden olmaktadır. Bu hidrokarbonlar yanma odasını terk ederek çığ gaz halinde atmosfere karışmaktadırlar. TG süresinde yakıt ile hava karıştıktan sonra bazı bölgelerde fakir veya karışım görülmektedir

Genişleme zamanının sonunda fakir karışimli bölgelerdeki reaksiyonların yavaş olmasından, alev yayılışının olmayışı gibi nedenlerden dolayı tamamlanmamış yanma ürünleri olarak dışarı atılmaktadırlar. Yanabilir karışımlarda hacimde soğuma olan bölgeler tamamlanmamış, diğer bölgeler ise tamamlanmış yanma ürünleri olarak dışarı atılmaktadırlar. Zengin karışımlarda yavaş reaksiyon ve silindir cidarında meydana gelen soğumalardan dolayı tam yanma olmamakta ve HC emisyonları olarak atmosfere atılmaktadırlar. Şekil 6.4.'te kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının HC emisyon değerleri görülmektedir.



Şekil 6.4. HC emisyonunun SB, DKB ve İDKB'daki değişimi

Şekil 6.4.'e bakıldığında kaplama yapılmış egzoz borularının bütün devirler için HC emisyonunun kaplanmamış egzoz borusuna göre daha düşük çıktığı anlaşılmaktadır. HC emisyonu üzerinde etkili olan faktörlerden bir tanesi de yanma reaksiyon sıcaklığıdır. Düşük devirlerde kaplanmış ve kaplanmamış egzoz boruları için HC emisyonunun yüksek çıkması üzerinde yanma reaksiyon sıcaklığının düşük olmasının etkili olduğu söylenebilir. Artan devirle birlikte sıcaklığın artması, HC emisyonunun kaplamalı ve kaplamasız egzoz boruları için azalmasına neden olmuştur. Ayrıca motor

devrinin artmasıyla beraber, düşük alev yayılma hızından dolayı yakıtın tamamı yanmadan dışarı atılmakta ve böylelikle HC emisyonları artmaktadır [81].

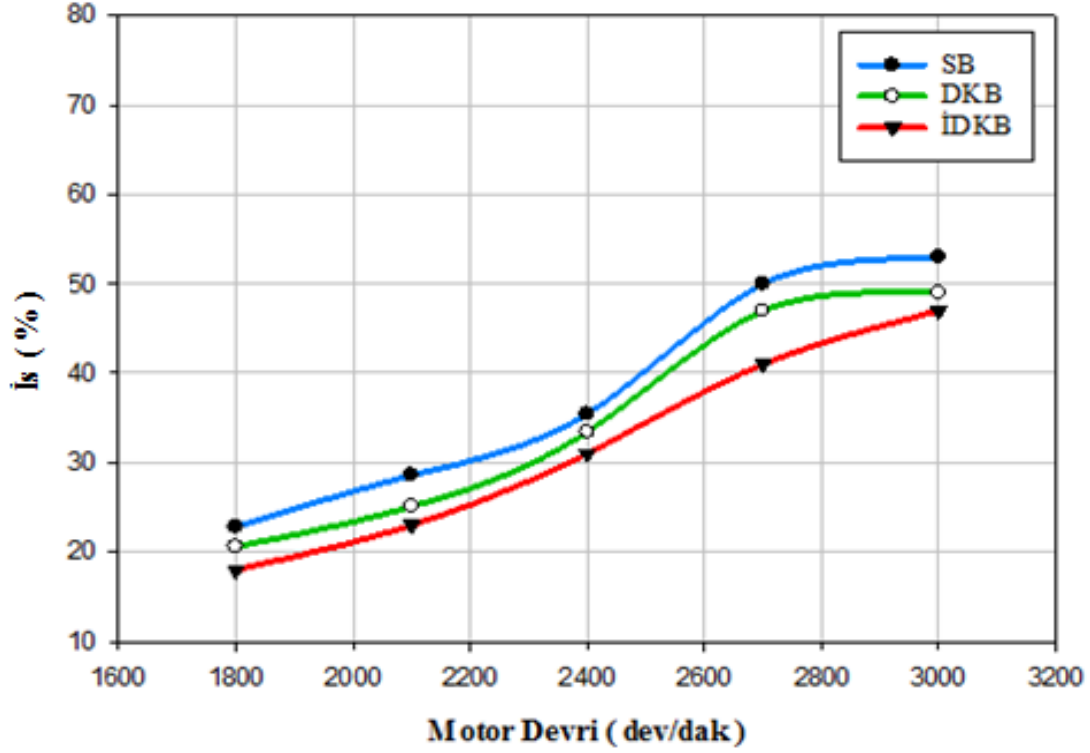
Yapılan deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre HC emisyon değerinde ortalama % 5'lik bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun HC emisyon değerinde ise SB' ya göre ortalama % 9'luk bir azalma tespit edilmiştir. Yanma fazı süresince ana yanma prosesine katılmayan hidrokarbonlar egzozda olduğu gibi aynen gözükmezler. Alev sönmesi sonrası yüksek sıcaklıktaki yanmış gazlarla karışarak yeterli oksijenin bulunduğu durumlarda hızla oksitlenirler. Böylece HC' lar yanmamış yakıt karışımı ve kısmen yanmış ürünler oluştururlar. Uygulanan seramik kaplamanın DKB ve İDKB'da bu etkiyi azalttığı düşünülmektedir. HC' lar egzoz sisteminde de oksitlenirler. Isı iletim katsayısı düşük bir seramik kaplama yüksek egzoz sıcaklığı oluşturabilir. HC' ların yeterli süre bu ortamda kalması HC emisyonunun önemli ölçüde azalmasını sağlar. Egzoz sistemini mümkün mertebe sıcak tutabilmek için ısı kayıplarını engelleyecek şekilde sistemi düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip bir madde ile kaplamak HC emisyonlarını azalttığı düşünülmektedir.

6.1.5. Duman (İs) Yoğunluğu

Dizel motorda silindir içerisinde sıvı halde bulunan yakıt damlasının içindeki H_2 molekülleri, hızlı bir şekilde reaksiyona girmekte (oksijenle birleşmekte) ve geriye kalan C yeterli O_2 bulamadığından yanamayarak is partikülleri halinde dışarı atılmaktadır. İs oluşumunun nedenleri yakıtının cinsine göre değişmekle birlikte genellikle silindir içinde yeterli hava bulamaması veya zamanında hızla hava ile karışmaması ve buharlaşamamasıdır [82]. Dizel motorlarda oluşan difüzyon alevinde, genel olarak hidrojenin oksijenle tepkimeye girmesi, karbonla tepkimeye girmesinden daha karardır. Bu durumda silindir içerisinde sıvı halde bulunan yakıt damlasının içerisindeki hidrojen molekülleri hızlı bir şekilde oksijenle tepkimeye girmekte ve geriye kalan karbonlar yeterli oksijen bulamadıklarından yanamayarak is partikülleri şeklinde atmosfere atılmaktadır. İs bu tepkimelerin sonucunda meydana gelen katı karbon tanecikleridir. Motorun yük durumuna göre değişen HFK'nın bir fonksiyonu olarak is miktarı değiştiğinden motorun gücünü de sınırlayan bir etkidir. İs oluşumu genelde dizel yanmasının bir safhasıdır. Bu nedenle başlangıçta oluşan karbonun büyük bir kısmı tekrar yanmaktadır. Fakat gücü artırmak amacıyla yanma odasına fazla

miktarda yakıt püskürtüldüğünde, yeterli oksijen bulunmadığı için egzoz gazları içerisinde bir miktar is bulunmaktadır.

Şekil 6.5.'te dizel motora bağlı olan kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının is emisyon değerleri görülmektedir.



Şekil 6.5. İs emisyonunun SB, DKB ve İDKB'daki değişimi

Şekil 6.5. incelendiğinde kaplanmış ve kaplanmamış egzoz boruları için düşük devirlerde duman yoğunluğunun düşük çıktığı görülmektedir. Düşük devirlerde yanma odasındaki hava hareketliliğinin ve yanma odası sıcaklığının düşük olmasından dolayı bu durum meydana gelmektedir [68]. Motor devrinin yükselmesiyle beraber duman yoğunluğu da artmaktadır. Yüksek devirlerde; yetersiz süre, düşük yanma verimi ve artan motor devriyle birlikte zengin karışımın duman yoğunluğunu arttırdığı bilinmektedir. Yüksek devirlerde yakıt miktarının püskürtülmesi her çevrimde arttığı için gerekli hava sağlanamamaktadır. Bu sebeplerden dolayı duman miktarı yüksek devirlerde artmıştır. [63].

Yapılan deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre duman yoğunluğu değerlerinde ortalama % 7'lik bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun duman yoğunluğu değerlerinde ise SB' ya göre ortalama % 12'lik bir azalma tespit edilmiştir.

İs partiküllerinin içeriği motor çalışma koşullarına ve özellikle egzoz sıcaklığına bağlıdır. İs partiküllerinin yüksek sıcaklıklardaki çapları yaklaşık 0.05 µm olan karbon küreleri oluşturacak şekilde bir araya gelirler. Plazma sprej kaplamanın temel işlevi ısı kayıplarını azaltarak termal verimliliği arttırmaktır. Plazma sprej kaplamanın ısı yalıtımı özelliği sayesinde kaplanmış egzoz borularında daha yüksek sıcaklıklara ulaşılmıştır. Kaplanmış egzoz boruları içerisinde meydana gelen bu yüksek sıcaklığın duman yoğunluğu üzerinde olumlu etki yaptığı düşünülmektedir. Uygulanan kaplamanın is oluşumu üzerinde önemli etkiye sahip olan sıcaklık, tepkime zamanı ve oksijen molekülleri ile buluşma sıklığı faktörlerini iyileştirdiği söylenebilir.

6.2. EGS Değerlerinin Mukayesesi

Egzoz gaz sıcaklık ölçümleri, yanma sonucu oluşan ısı ve bu ısıya bağlı olarak ortaya çıkacak sıcaklık değerleri hakkında yorum yapmamıza olanak sağlayan önemli birer parametredir. Deneyler boyunca kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularına ait egzoz gaz sıcaklığı ölçümleri yapılmıştır. EGS, içten yanmalı motorlarda yük ve devir sayısına bağlı olarak değişebilmektedir. Devir sayısı arttıkça yanma odasındaki yakıt miktarının artmasından dolayı yanma boyunca ortaya çıkan ısı artmaktadır. Bu olay EGS'nin yükselmesine neden olmaktadır. EGS ölçümü, egzoz manifolduna bağlanan kaplanmış ve kaplanmamış 200 cm uzunluğundaki egzoz borularından alınmıştır. Egzoz borularının EGS'leri, aralarında 40 cm mesafe bulunan 6 farklı bölgeden ölçülmüştür. 1800, 2100, 2400, 2700 ve 3000 devirdeki EGS değerleri kayıt altına alınmıştır.

EGS değerlerini kaplanmış egzoz boruları için değerlendirirsek; 1/2 yük altında ve kaplanmış egzoz borularındaki tüm mesafelerden alınan EGS değerleri, kaplanmamış egzoz borusundaki değerlerden daha düşük sonuçlar vermiştir. Artan devir miktarına paralel olarak EGS değerleri artmıştır. EGS alınan bölgeler;

Manifold çıkışı (MÇ) İç EGS

1. Bölge Dış EGS

2. Bölge Dış EGS

3. Bölge Dış EGS

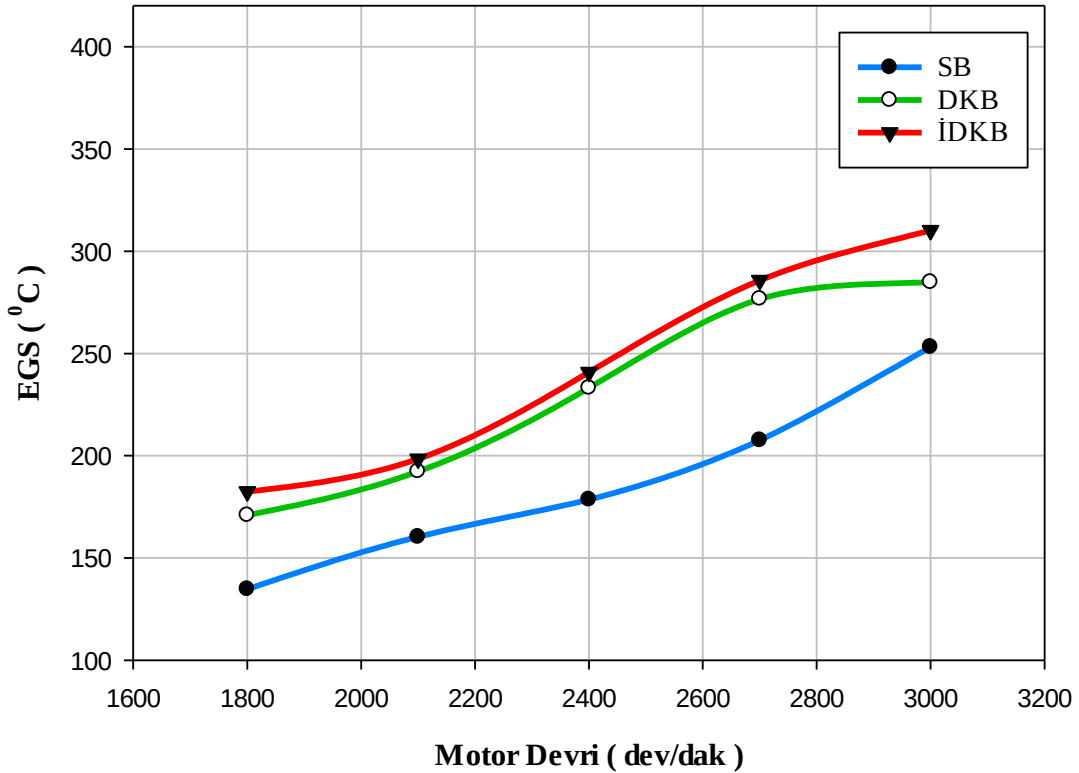
4. Bölge Dış EGS

Egzoz çıkışı (EÇ) İç EGS, olarak adlandırılmıştır

Manifold Çıkışı (MÇ) İç EGS

Şekil 6.6.'da dizel motora bağlı olan kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının MÇ EGS değerleri görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi, egzoz gaz sıcaklık (EGS) değerleri, kaplanmış ve kaplanmamış egzoz boruları için lineer bir artış sergilemiştir.

SB, DKB ve İDKB' ların egzoz manifoldu ile birleştiği yerde; 1800, 2100, 2400, 2700 ve 3000 devirde EGS değerleri ölçülmüş ve kayıt altına alınmıştır. Kaplanmamış egzoz borusunun MÇ EGS değerleri, kaplanmış egzoz borularının MÇ EGS değerlerine göre daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebinin kaplanmış egzoz borularının termal bir bariyer oluşturarak ısı transferini azaltmanın sonucu olduğu düşünülmektedir. Şekil 6.6.'da görüldüğü gibi devir arttıkça EGS değerlerinin de buna paralel olarak arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 6.6. MÇ EGS değişimi

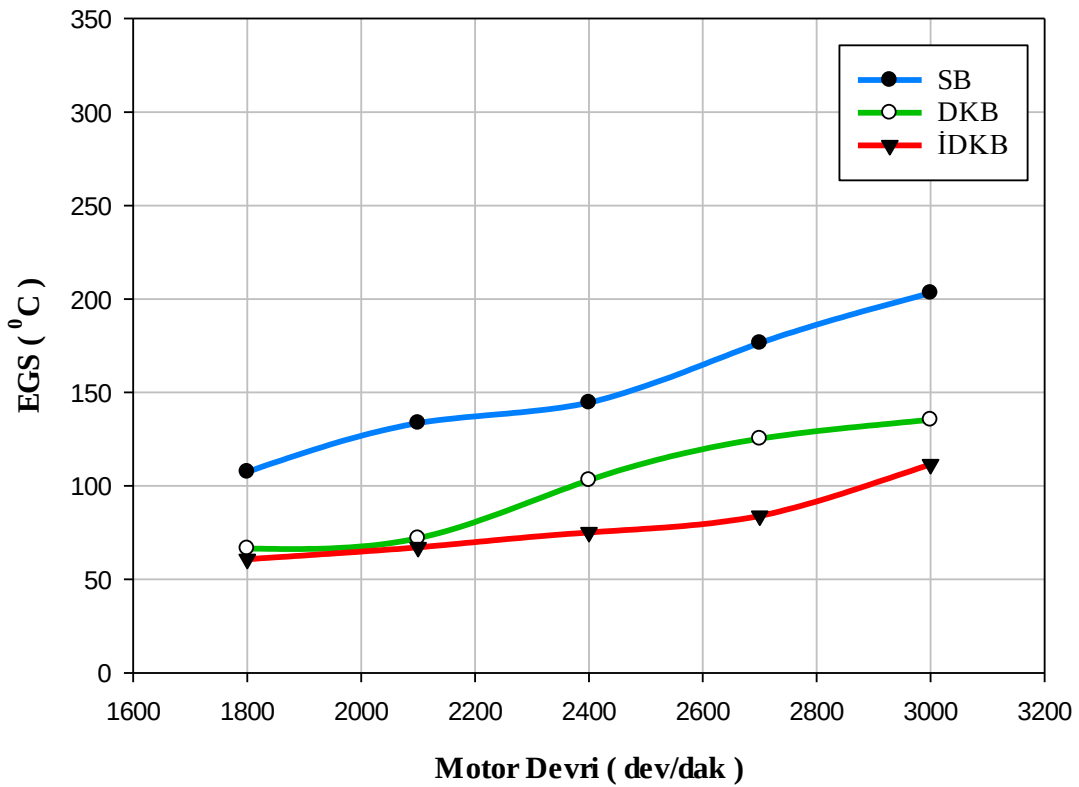
Yapılan deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre MÇ EGS değerlerinde ortalama % 24'lük bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun MÇ EGS değerlerinde ise

SB' ya göre ortalama % 30'luk bir azalma tespit edilmiştir. Termal yalıtımın egzoz sıcaklığını artırdığı düşünülmektedir.

1. Bölge Dış EGS

Şekil 6.7.'de dizel motora bağlı olan kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının 1. Bölge EGS değerleri görülmektedir.

1.Bölge EGS, kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının dış yüzeylerinden alınmıştır. Kaplanmamış egzoz borusundaki sıcaklık değerlerinin, kaplanmış egzoz borularındaki sıcaklık değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Burada kaplanmamış egzoz borusunda termal bir bariyer olmadığından sıcaklık boru üzerinden dış ortama aktarılmaktadır. Bundan dolayı kaplanmamış egzoz borusundaki sıcaklık daha yüksek çıkmıştır. Motor devri arttıkça beklenildiği gibi EGS değerleri de artmaktadır.



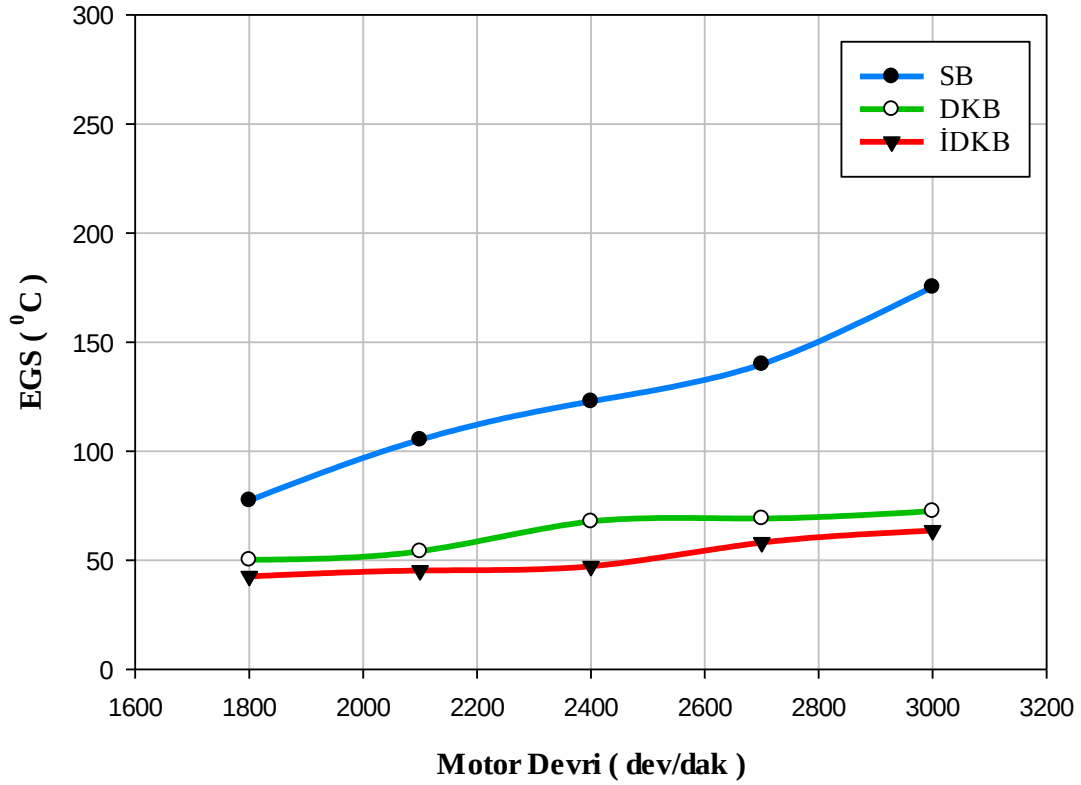
Şekil 6.7. 1. Bölge EGS değişimi

Yapılan deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre 1. Bölge EGS değerlerinde ortalama % 32'lik bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun 1. Bölge EGS değerlerinde ise SB' ya göre ortalama % 38'lik bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalmanın; oluşturulan termal bariyerin ısı transferini azaltmasıyla meydana geldiği düşünülmektedir.

2. Bölge Dış EGS

2.Bölge SB, DKB ve İDKB' ların çeşitli devirlerde EGS değerleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır. SB ısı değerlerinin, DKB ve İDKB sıcaklık değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Burada SB' da termal bir bariyer olmadığından ısı, boru üzerinden dış ortama aktarılmaktadır. Bu yüzden SB' daki sıcaklık diğerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Motor devri arttıkça bütün değerler için EGS değerlerinin arttığı görülmektedir.

Şekil 6.8.'de kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının 2. Bölge EGS değerleri görülmektedir.



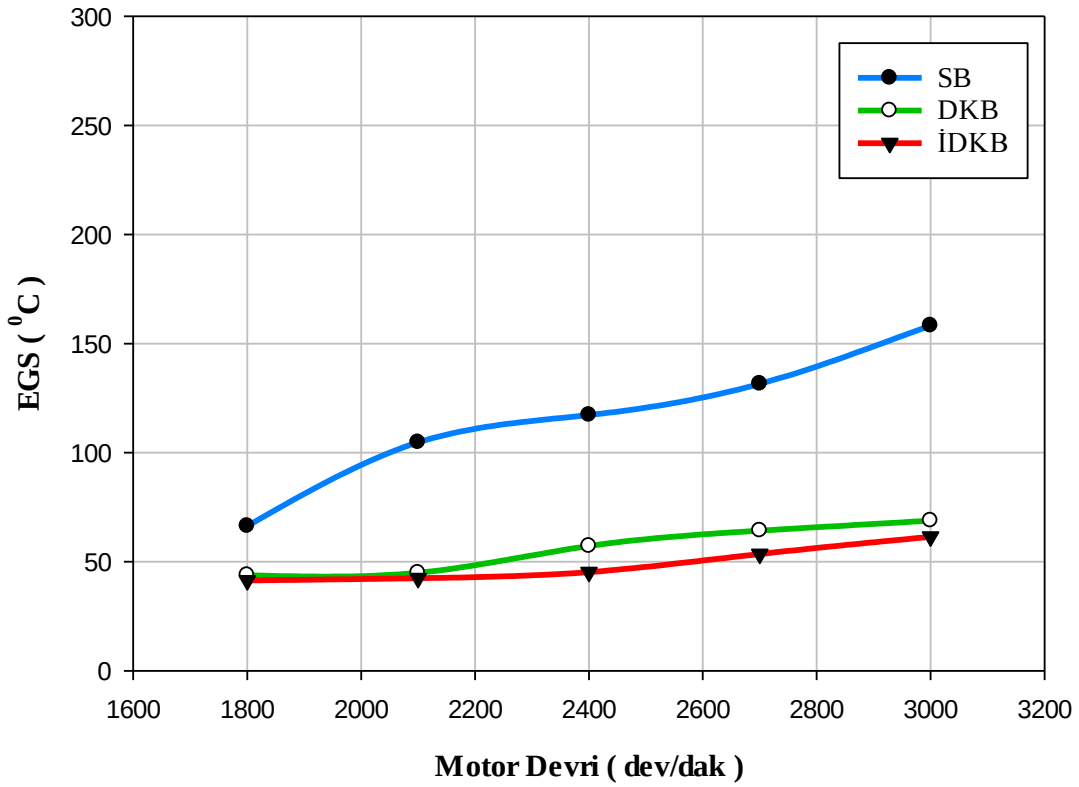
Şekil 6.8. 2. Bölge EGS değişimi

Yapılan deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre 2. Bölge EGS değerlerinde ortalama % 42'lik bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun 2. Bölge EGS değerlerinde ise SB' ya göre ortalama % 54'lük bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalmanın; oluşturulan termal bariyerin ısı transferini azaltmasıyla meydana geldiği düşünülmektedir.

3. Bölge Dış EGS

Kaplanmamış egzoz borusundaki sıcaklık değerlerinin, kaplanmış egzoz borularındaki sıcaklık değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Burada kaplanmamış egzoz borusunda termal bir bariyer olmadığından sıcaklık, boru üzerinden dış ortama aktarılmaktadır. Bu yüzden kaplanmamış egzoz borusundaki sıcaklık diğerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Egzoz manifoldundan uzaklaştıkça EGS değerlerinin de düştüğü görülmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü dış ortama açık olan egzoz borusu motordan uzaklaştıkça egzoz gazları soğumaktadır.

Şekil 6.9.'da kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının 3. Bölge EGS değerleri görülmektedir.



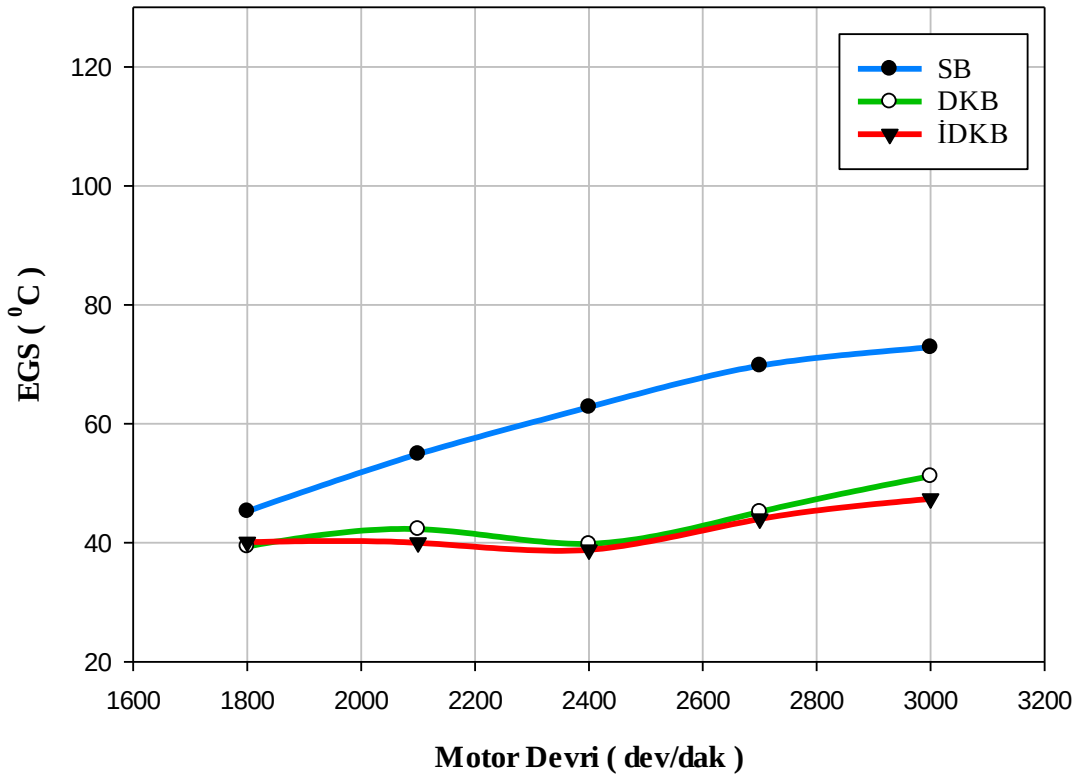
Şekil 6.9. 3. Bölge EGS değişimi

Yapılan deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre 3. Bölge EGS değerlerinde ortalama % 49'luk bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun 3. Bölge EGS değerlerinde ise SB' ya göre ortalama % 56'luk bir azalma tespit edilmiştir. Oluşturulan termal bariyerin transfer edilen ısıyı azaltarak yüzey sıcaklığını azalttığı düşünülmektedir.

4. Bölge Dış EGS

Kaplanmamış egzoz borusundaki sıcaklık değerlerinin, kaplanmış egzoz borularındaki sıcaklık değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Burada kaplanmamış egzoz borusunda termal bir bariyer olmadığından sıcaklık, boru üzerinden dış ortama aktarılmaktadır. Bu yüzden kaplanmamış egzoz borusundaki sıcaklık, diğerlerine göre daha yüksek çıkmıştır. Egzoz manifoldundan uzaklaştıkça EGS değerlerinin de düştüğü görülmektedir. 3. Bölge EGS değerlerine göre egzoz gazları bir miktar daha soğumuştur. Bu da beklenen bir durumdur.

Şekil 6.10.'da kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının 4. Bölge EGS değerleri görülmektedir.



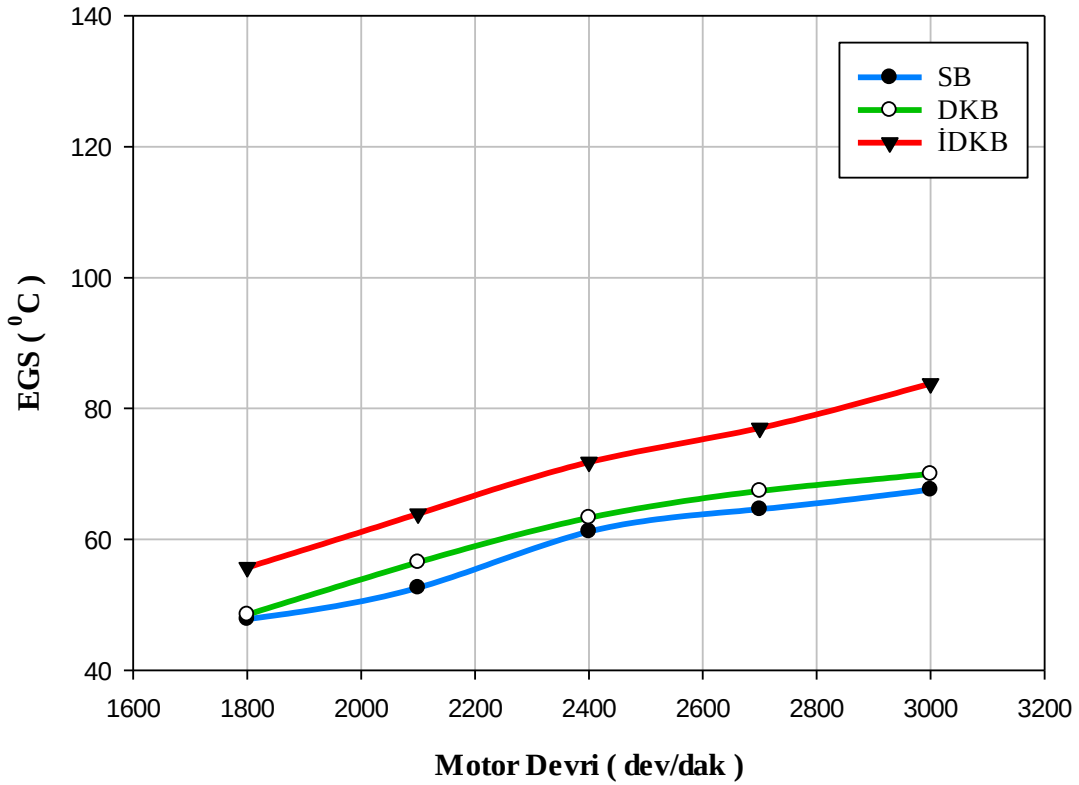
Şekil 6.10. 4. Bölge EGS değişimi

Yapılan deneyler sonucunda DKB' nin SB' ya göre 4. Bölge EGS değerlerinde ortalama % 28'lik bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nin 4. Bölge EGS değerlerinde ise SB' ya göre ortalama % 30'luk bir azalma tespit edilmiştir. Termal yalıtım sayesinde ısının hapsedildiği düşünülmektedir.

Egzoz çıkışı (EÇ) İç EGS

Egzoz çıkış sıcaklığı ölçümü egzoz borusu içinden yapıldığı için kaplanmış egzoz borularındaki EGS daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeninde kaplanmış egzoz borularındaki termal bariyerin etkisidir.

Şekil 6.11.'de kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının EÇ EGS değerleri görülmektedir.



Şekil 6.11. EÇ EGS değişimi

Yapılan deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre EÇ EGS değerlerinde ortalama % 5'lik bir artış tespit edilmiştir. İDKB' nun EÇ EGS değerlerinde ise SB' ya göre ortalama % 9'luk bir artış tespit edilmiştir.

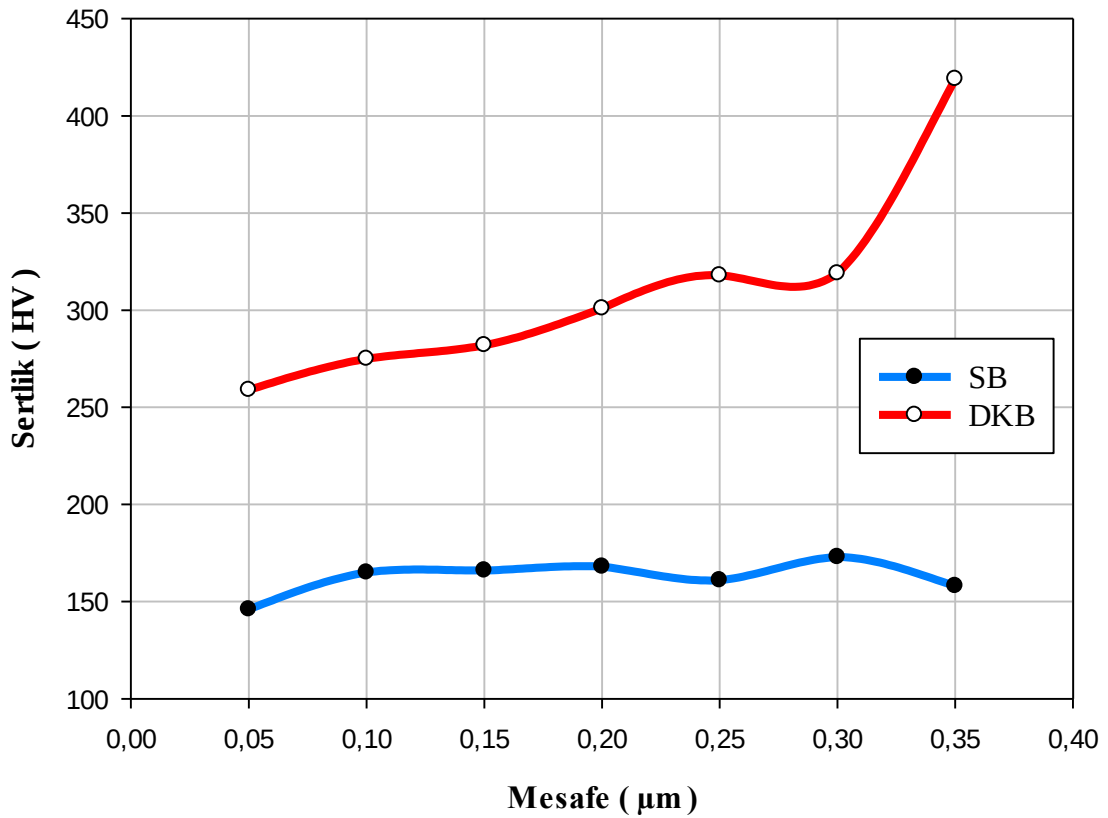
6.3. Metalografik Mukayeseler

6.3.1. Mikrosertlik Ölçümleri

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin mikro-sertlik ölçümleri 10 gr/f yük altında yapılmıştır. Numunelerin değişen şartlar karşısında sertlik değerleri gözlemlenmiştir. Kaplama yapılan numunelerde oluşan Cr_3C_2 -WC gibi stabil karbürler sertlikteki heterojen bir dağılıma neden olabilmektedir. Sertlik analizinde tarama

yaparken Vickers ucu çoğu zaman kaplama malzemelerine denk gelmesine rağmen, bu karbürlere ucun bastırılması sonucu sertlikte ani artışlar görülebilmektedir. Aşağıdaki sertlik-mesafe grafiklerinde görülen malzeme yüzeyinde ani artışların ve düşüşlerin görülmesinin sebebi de o anda Vickers ucunun karbürlü bölgeye denk gelmesi olarak yorumlanabilir. Kaplama kalınlığı arttıkça malzeme gevrek bir hal alır ve darbelere karşı malzemenin direnci azalır. Başka bir deyişle malzeme gevrekleşerek kırılğan bir hale gelir.

Şekil 6.12.' de SB ve DKB numunelerinin yüzeylerinden altlık malzemesine doğru alınan sertlik değerleri ve yükün vurulduğu noktanın merkezinden bakalite kadar olan mesafelerin grafiği görülmektedir.

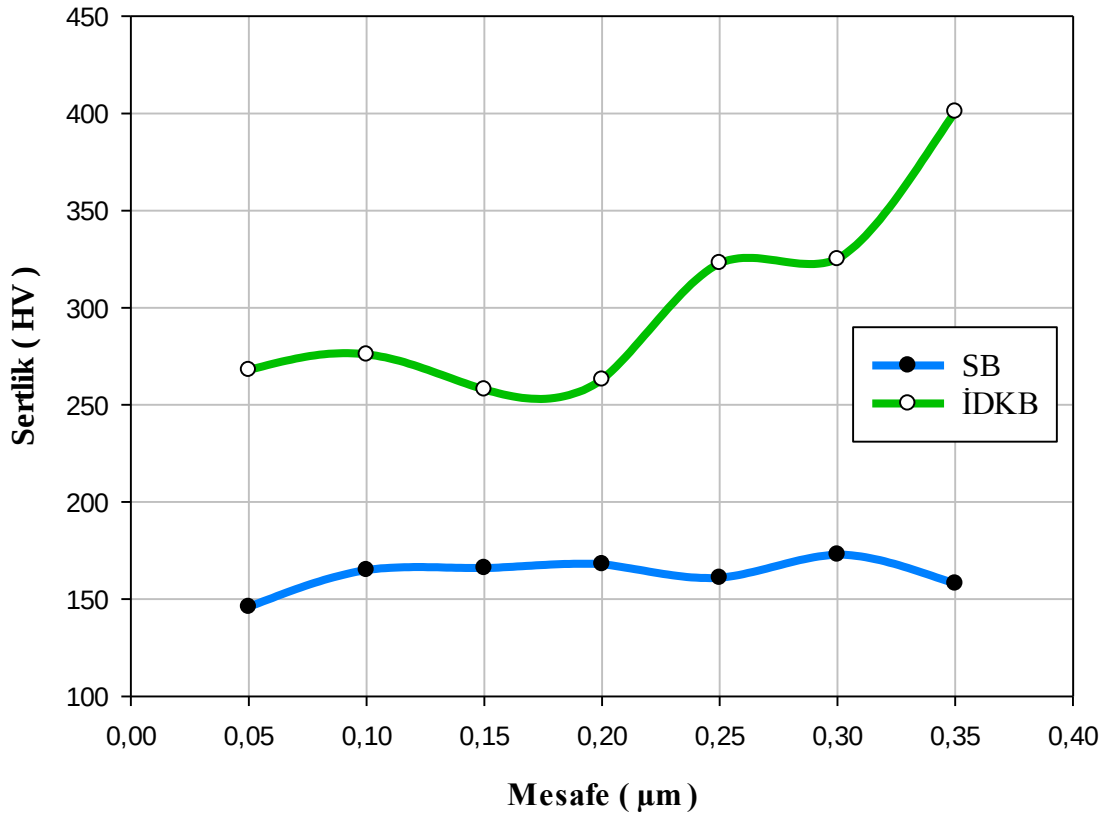


Şekil 6.12. SB ve DKB numunesinin sertlik-mesafe değişimi

Şekil 6.12.' de görüldüğü gibi SB ve DKB numunelerinin sertlik değerleri mukayese edilmiştir. Burada SB numunesinin 7 bölgeden alınan sertlik değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir. Literatüre bakıldığında SB numunesinin sertlik değerlerinin dökme demir sertlik değerlerine yakın değerler olduğu tespit edilmiştir. DKB numunesinde ise kaplama malzemesinden altlığa doğru sertlik

değerlerinin 260 HV ile 420 HV arasında lineer bir şekilde arttığı görülmektedir. Ani artış ve düşüşlerin Vickers ucunun karbürlü bölgelere denk gelmesi olarak yorumlanabilir. DKB numunesinin SB numunesine göre sertlik değerlerinde artış görülmektedir. Bunun sebebi DKB numunesinin Cr_3C_2 malzemesi ile kaplanmış olmasıdır. Sertlik Cr_3C_2 malzemesinin tipik bir özelliğidir.

Şekil 6.13.' te SB ve İDKB numunelerinin yüzeylerinden altlık malzemesine doğru alınan sertlik değerleri ve yükün vurulduğu noktanın merkezinden bakalite kadar olan mesafelerin grafiği görülmektedir.



Şekil 6.13. SB ve İDKB numunesinin sertlik-mesafe değişimi

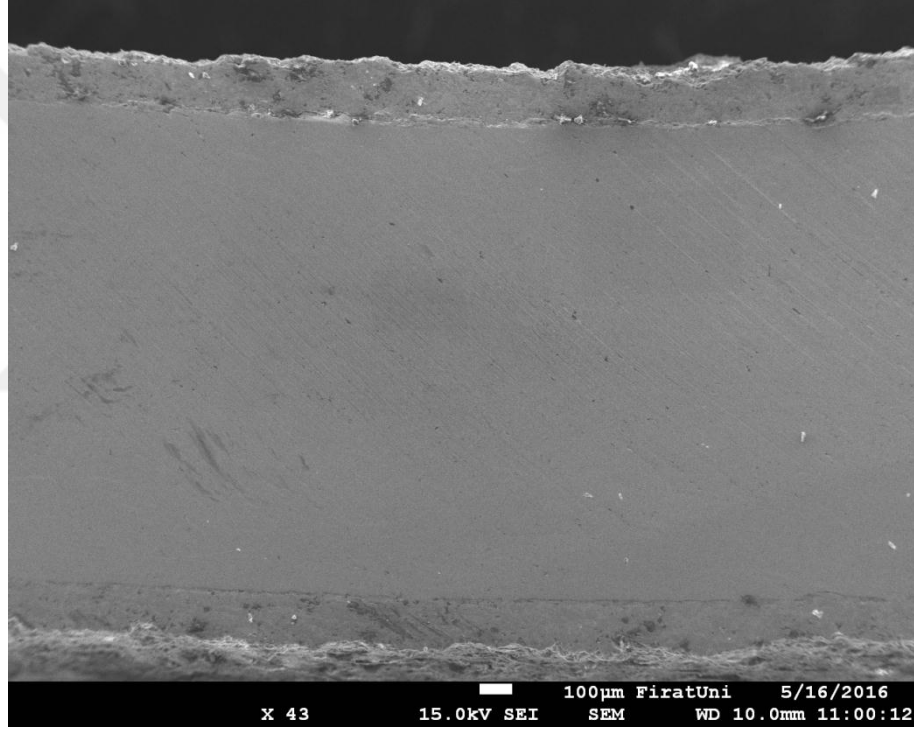
Şekil 6.13.' te görüldüğü gibi SB ve İDKB numunelerinin sertlik değerleri mukayese edilmiştir. Burada SB numunesinin 7 bölgeden alınan sertlik değerlerinin birbirine yakın değerler olduğu görülmektedir. Literatüre bakıldığında SB numunesinin sertlik değerlerinin dökme demir sertlik değerlerine yakın değerler olduğu tespit edilmiştir. İDKB numunesinde ise kaplama malzemesinden altlığa doğru sertlik değerlerinin 250 HV ile 400 HV arasında olduğu görülmektedir. Ani artış ve düşüşlerin sebebinin Vickers ucunun karbürlü bölgelere denk gelmesi olarak düşünülmektedir.

İDKB numunesinin SB numunesine göre sertlik değerlerinde artış görülmektedir. Bunun sebebi İDKB numunesinin Cr_3C_2 malzemesi ile kaplanmış olmasıdır. Sertlik Cr_3C_2 malzemesinin tipik bir özelliğidir.

6.3.2. Egzoz Borularına Ait Numunelerin SEM Analizi

Kaplamaların detaylı mikro yapı analizlerinde, kaplama morfolojisi, dikey ve yatay çatlak oluşumlarını incelemeye kullanılmak üzere 43x, 150x, 350x ve 2000x büyütmelerde SEM fotoğrafları alınmıştır.

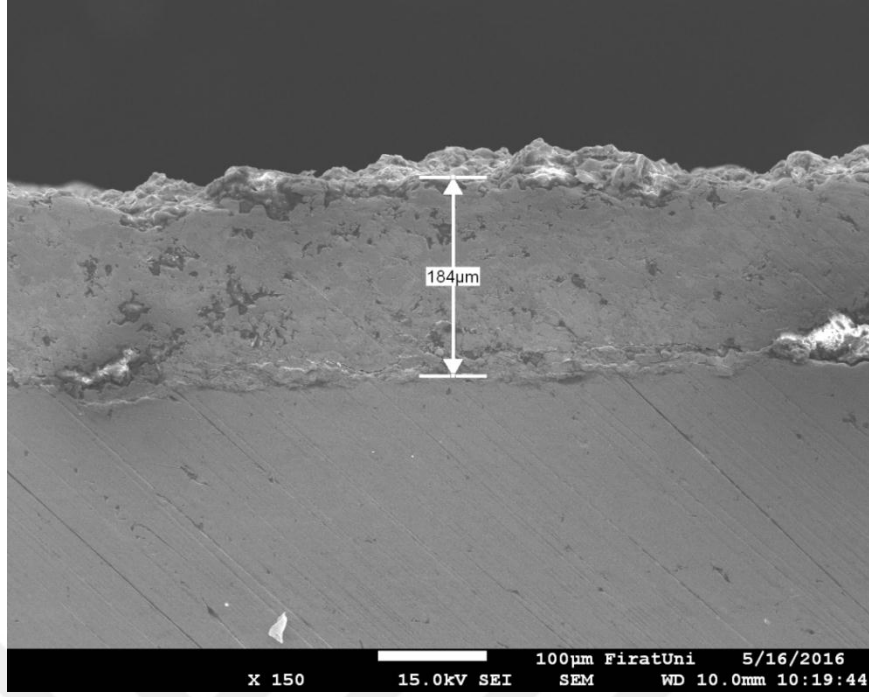
Şekil 6.14.' te İDKB numunesinin x43 büyütmedeki SEM fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 6.14. İDKB Numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 6.14.' İDKB numunesinin x43 büyütmedeki görüntüsünde kaplama tabakası, altlık malzeme ve ana malzeme net bir şekilde görülmektedir. Ana malzeme yüzeyi ile kaplama tabakasının iyi bir yapışma özelliği gösterdiği görülmektedir.

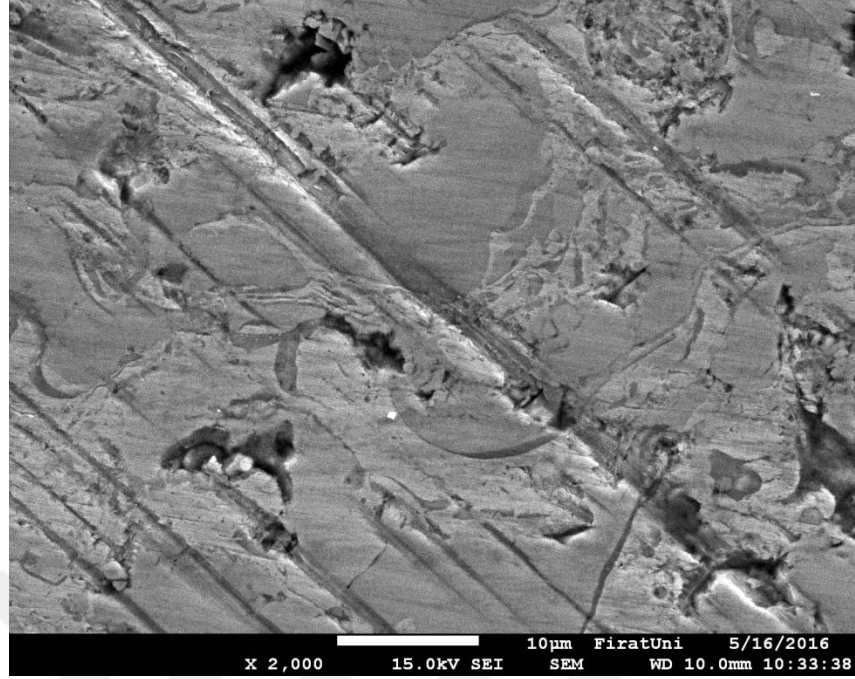
Şekil 6.15.'te İDKB Numunesinin x150 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.15. İDKB Numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 6.15.'te İDKB numunesinin x150 büyütmedeki SEM görüntüsünde kaplama kalınlığının ortalama 184 mikron olduğu görülmektedir. Burada kaplama kalınlığı, altlık malzeme ve ana malzeme net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca kaplama tabakası içerisinde gözenek ve boşluklarda görülmektedir. Bunların kaplama işlemi esnasında oluştuğu düşünülmektedir.

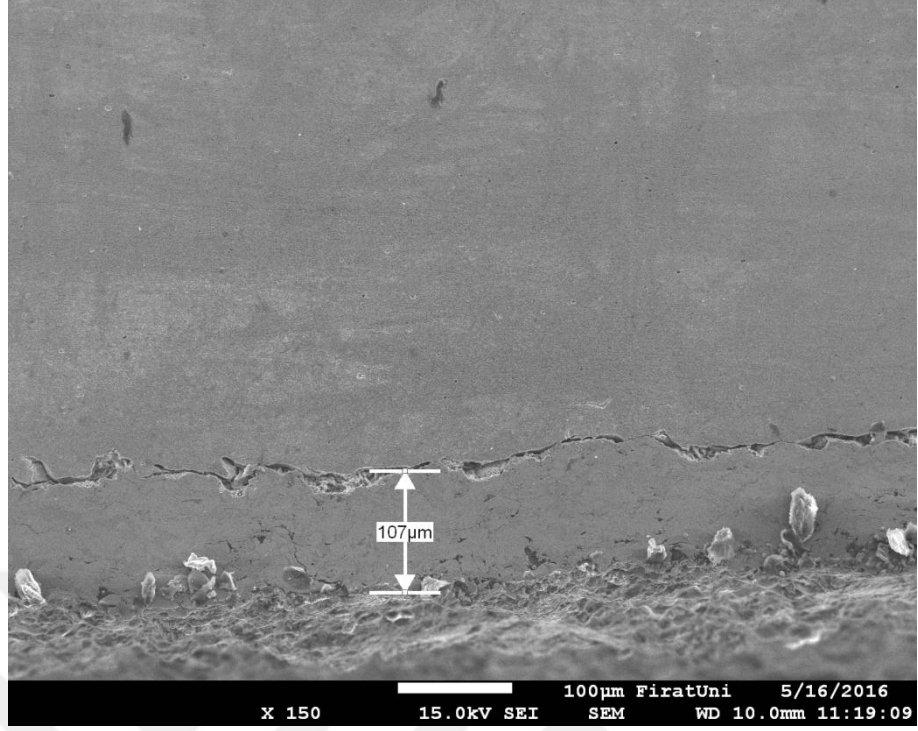
Şekil 6.16.'da İDKB Numunesinin x2000 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.16. İDKB Numunesinin SEM görüntüsü

SEM görüntülerinde sertlik kıyaslamasını, sertliği ifade eden karbürlerin fazla olduğu bölgelerin yoğunluğuna bakarak tespit edebiliriz. Şekil 6.16.'da İDKB numunesinin x2000 büyütmesinde kaplama tabakasının açık renkli bölgelerin yoğun olduğu bölgelerde karbür fazlalığından ötürü sertliğin arttığı söylenebilir. SEM görüntüsünde koyu renklerin hakim olduğu bölgelerde matris fazlalığından ötürü sertliğin açık renkli bölgelere oranla düştüğü görülmektedir. Bu bölgelerde ana malzemenin yapısına benzer karbürlerden yoksun olduğu görülmektedir. İDKB numunesinin SEM görüntüsünde gözenek ve boşluklar görülmektedir. Bunlar Plazma sprej kaplamanın tipik bir özelliğidir.

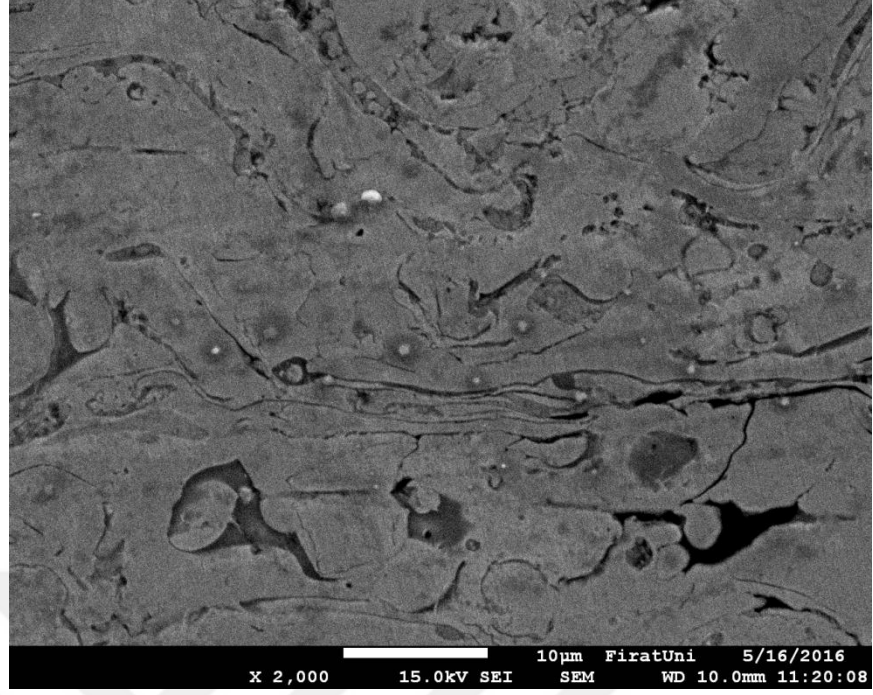
Şekil 6.17.'de DKB Numunesinin x150 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.17. DKB Numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 6.17.'de DKB Numunesinin x150 büyütmedeki SEM görüntüsünde kaplama kalınlığının ortalama 107 mikron olduğu görülmektedir. Kaplama tabakası, altlık malzeme ve ana malzeme net bir şekilde görülmektedir. Kaplama tabakasının ana malzemeye iyi bir şekilde yapışma özelliği gösterdiği görülmektedir.

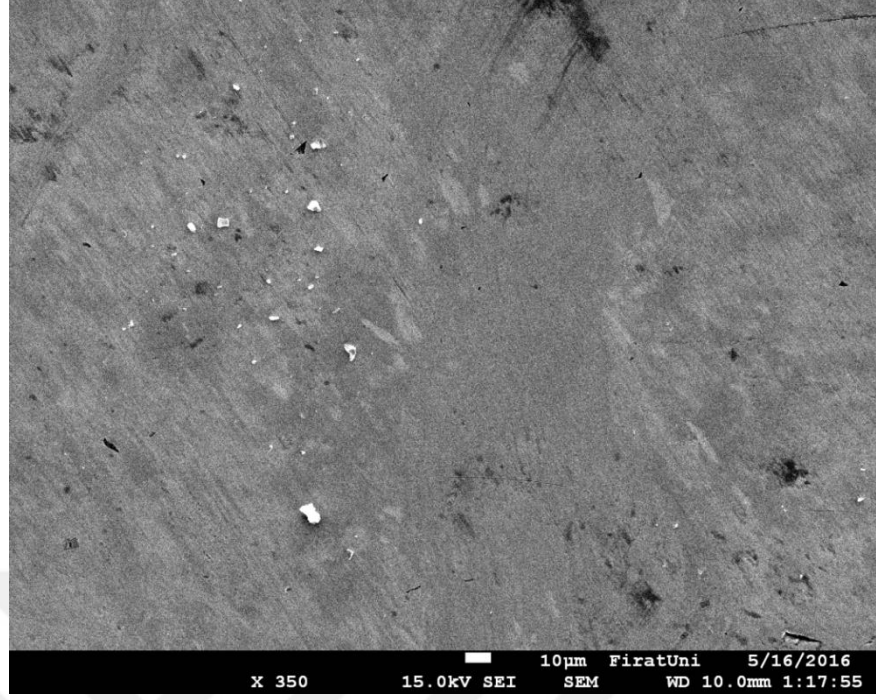
Şekil 6.18.'de DKB Numunesinin x2000 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir



Şekil 6.18. DKB Numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 6.18.'de DKB Numunesinin x2000 büyütmedeki SEM görüntüsünde kaplama tabakası içerisinde oluşan çatlaklar net bir şekilde görülmektedir. Plazma spreycaplamalarda termal şoklar nedeniyle çatlaklar oluşabilmektedir. Ayrıca SEM görüntüsünde kaplama sırasında oluşan gözenek ve boşluklar görülmektedir. Kaplama tabakasında açık renkli bölgelerin yoğun olduğu bölgelerde karbür fazlalığından ötürü sertliğin arttığı söylenebilir.

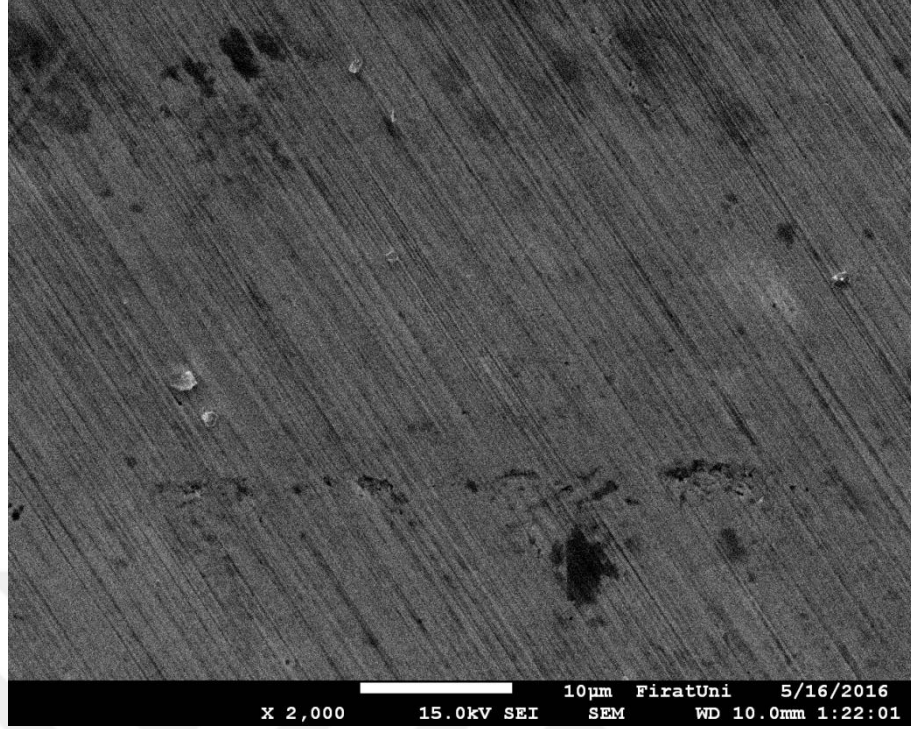
Şekil 6.19.'da SB Numunesinin x350 büyütmedeki SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.19. SB Numunesinin SEM görüntüsü

Şekil 6.19.'da SB Numunesinin x350 büyütmedeki SEM görüntüsünde küresel grafitler görülmektedir. SB numunesinde herhangi bir kaplama işlemi yapılmamıştır. SB numunesinin EDAX analizinde içerisinde bulunan elementlerin Fe, C ve Mg olduğu tespit edilmiştir. Bu elementlerin yüzdece ve atomsal olarak ağırlıkları EDAX analizinde verilmiştir.

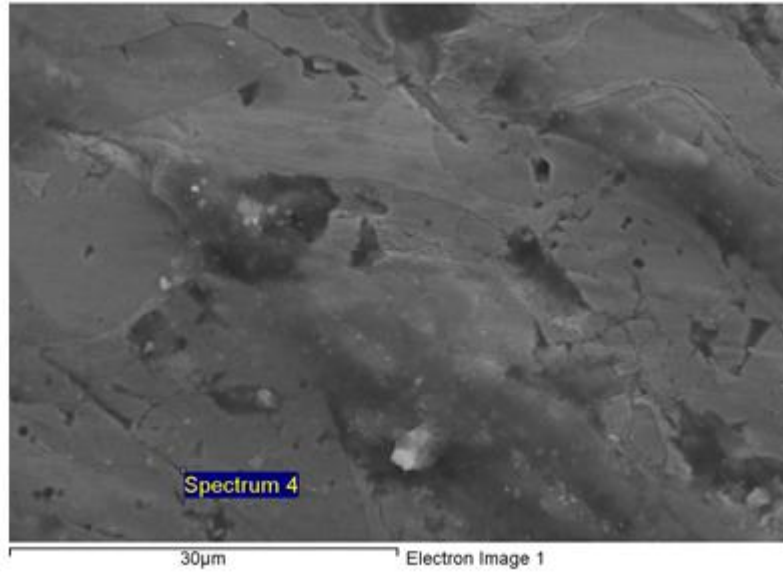
Şekil 6.20.'de SB Numunesinin x2000 büyütmede SEM görüntüsü görülmektedir.



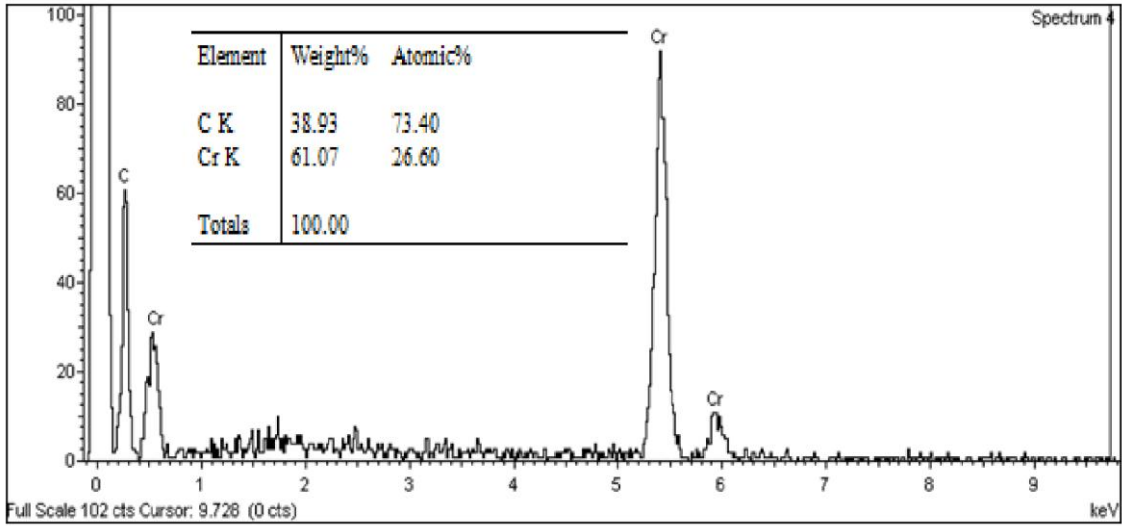
Şekil 6.20. SB Numunesinin SEM görüntüsü

6.3.2. Egzoz Borularına Ait Numunelerin EDAX Analizi

Şekil 6.21’ de İDKB numunesinin SEM elektron mikroskobunda fotoğrafı çekilmiştir ve bir nokta tespit edilerek spectrum 4 olarak işaretlenmiştir. Bu bölgede yapılan EDAX analizi bizlere numune hakkında detaylı bilgi vermektedir. İDKB numunesinin EDAX görüntüsünde spectrum 4 numaralı bölgedeki elementler Şekil 6.22’ de görülmektedir. Hakim element (Cr) kromdur. Açık renkli bölge fazla olduğundan karbür fazladır ve sertlik yüksektir. İDKB numunesinin spectrum 4 bölgesindeki analiz sonuçlarına göre tespit edilen elementlerin yüzdece ağırlıkları; % 38.93 C ve % 61.07 Cr’ dur. Atomal ağırlıkları ise % 73.40 C ve % 26.60 Cr’ dur.

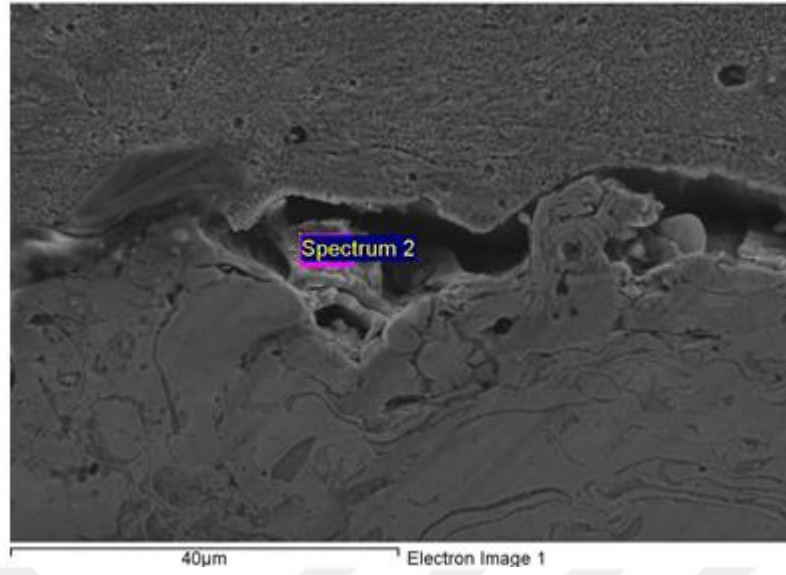


Şekil 6.21. İDKB numunesinin EDAX Analizi alınan nokta

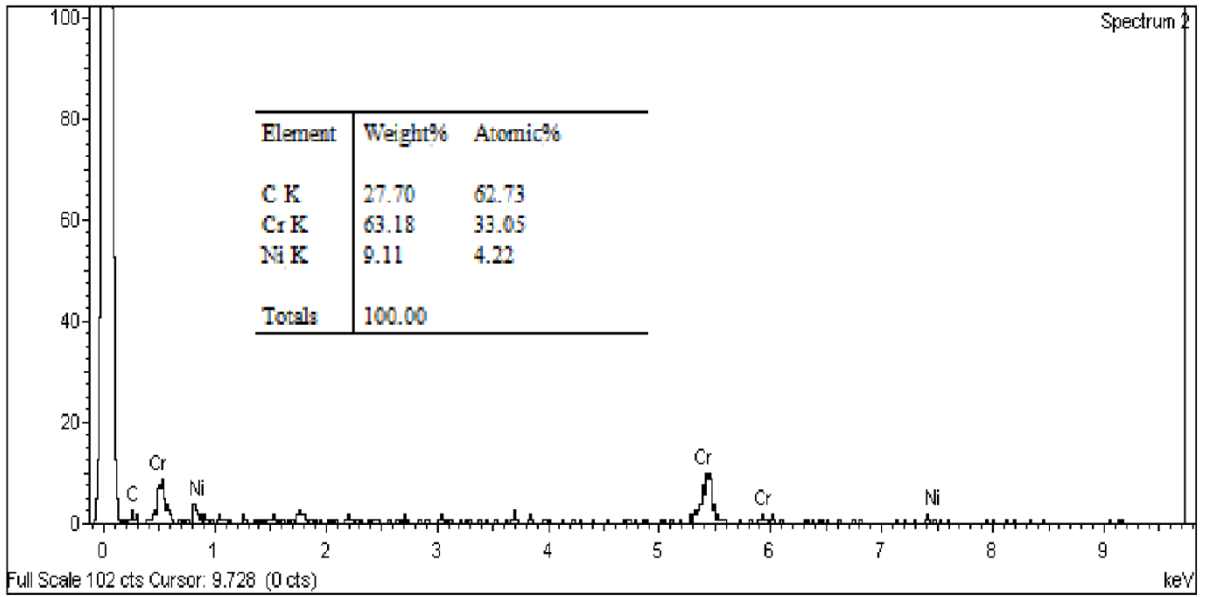


Şekil 6.22. İDKB 4 nolu spektrumun EDAX Analizi grafiği

Şekil 6.23’ de DKB numunesinin SEM elektron mikroskobunda fotoğrafı çekilmiştir ve bir nokta tespit edilerek spectrum 2 olarak işaretlenmiştir. Bu bölgede yapılan EDAX analizi bizlere numune hakkında detaylı bilgi vermektedir. DKB numunesinin EDAX görüntüsünde spectrum 2 numaralı bölgedeki elementler Şekil 6.24’ de görülmektedir. Hakim element (Cr) kromdur. DKB numunesinin spectrum 2 bölgesindeki analiz sonuçlarına göre tespit edilen elementlerin yüzdece ağırlıkları; % 27.70 C , % 63.18 Cr ve % 9.11 Ni’ dir. Atomsal ağırlıkları ise % 62.73 C , % 33.05 Cr ve % 4.22 Ni’dir.



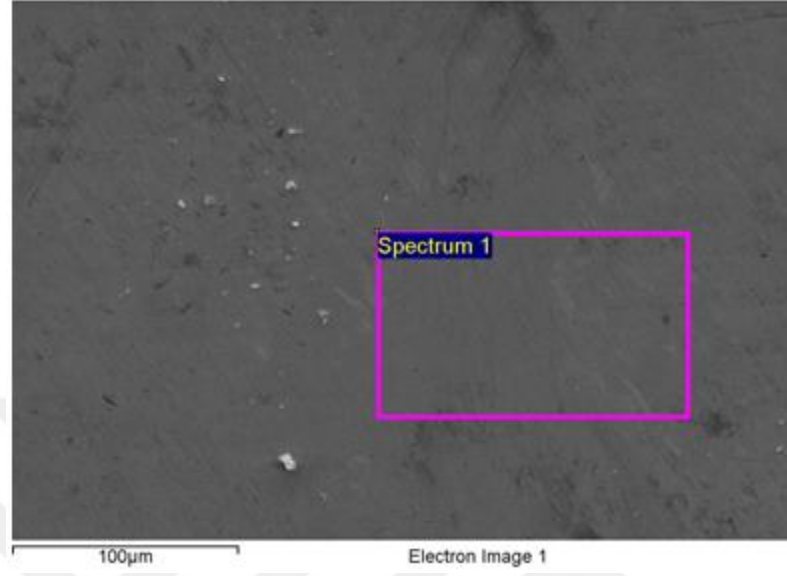
Şekil 6.23. DKB numunesinin EDAX Analizi alınan nokta



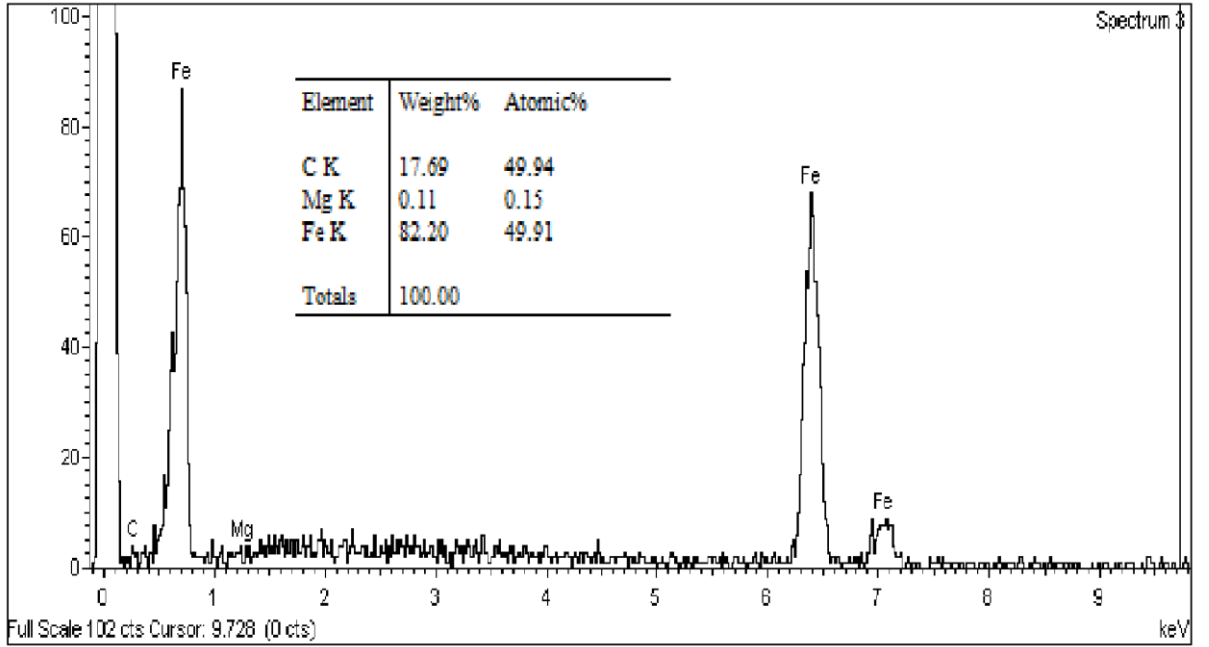
Şekil 6.24. DKB 2 nolu spektrumun EDAX Analizi grafiği

Şekil 6.25' de SB numunesinin SEM elektron mikroskopunda fotoğrafı çekilmiştir ve bir nokta tespit edilerek spectrum 1 olarak işaretlenmiştir. Bu bölgede yapılan EDAX analizi bizlere numune hakkında detaylı bilgi vermektedir. SB numunesinin EDAX görüntüsünde spectrum 1 numaralı bölgedeki elementler Şekil 6.26' de görülmektedir. Hakim element (Fe) demirdir. SB numunesinin spectrum 1 bölgesindeki analiz sonuçlarına göre tespit edilen elementlerin yüzdece ağırlıkları; %

17.69 C , % 0.11 Mg ve % 82.20 Fe' dir. Atomal ağırlıkları ise % 49.94 C , % 26.60 Mg ve % 49.91 Fe' dir.



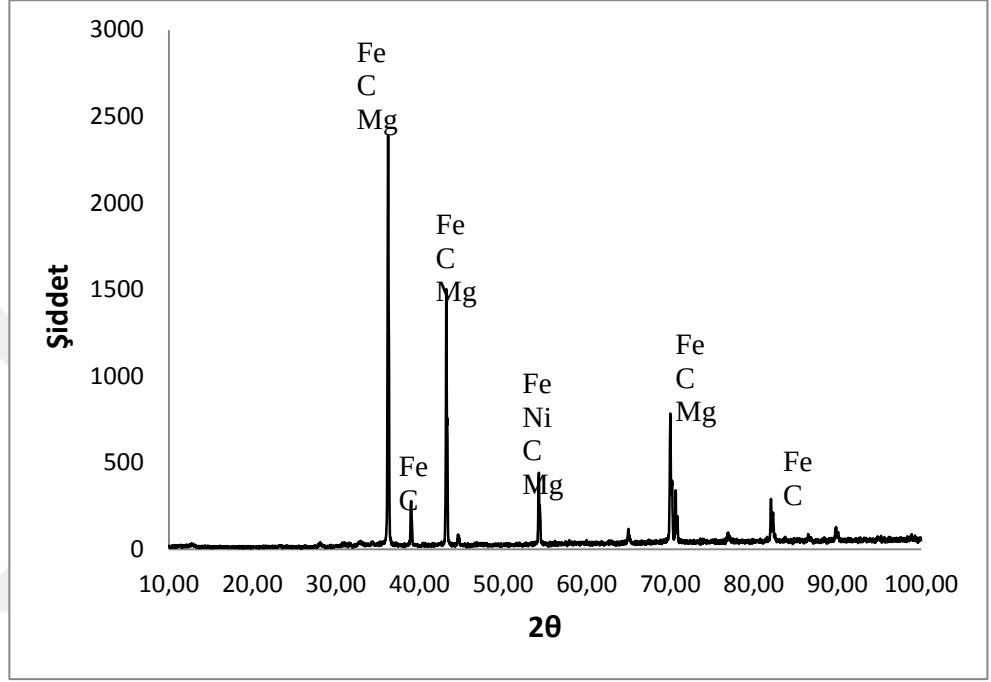
Şekil 6.25. SB numunesinin EDAX Analizi alınan nokta



Şekil 6.26. SB 1 nolu spektrumun EDAX Analizi grafiği

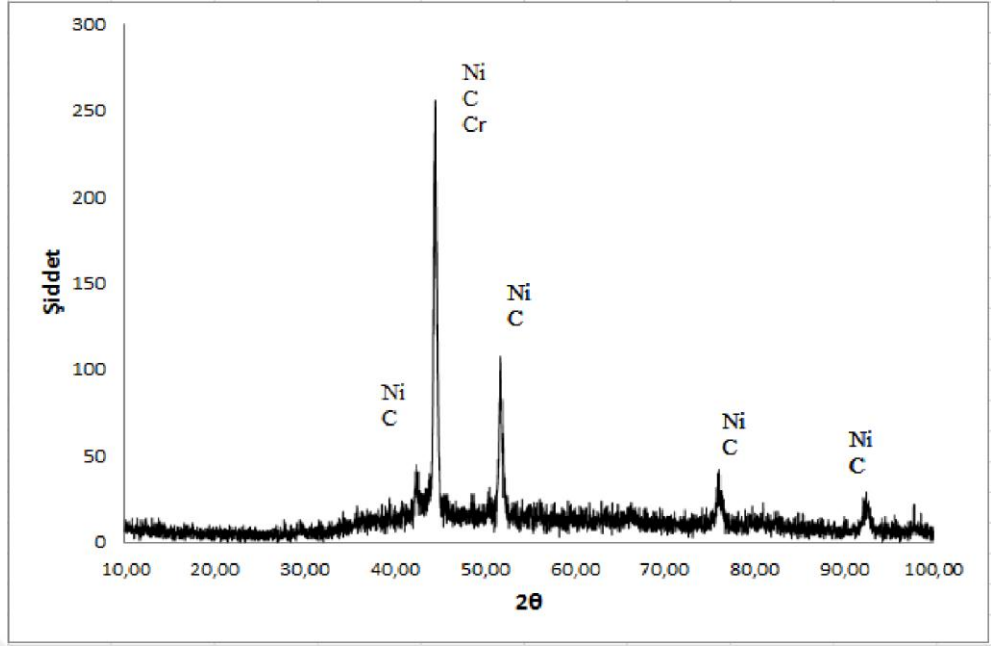
6.3.3. Egzoz Borularına Ait Numunelerin X-RD Analizi

Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin mevcut fazlarını belirlemek amacı ile X-ışınları difraksiyon analizi yapılmıştır. Şekil 6.27.'de SB numunesinin X-ışınları analizinde bulunan fazlar görülmektedir. Bunlar; Fe, C ve Mg fazlarıdır. Hakim faz ise yüksek pikten ötürü Fe, C ve Mg' dur.



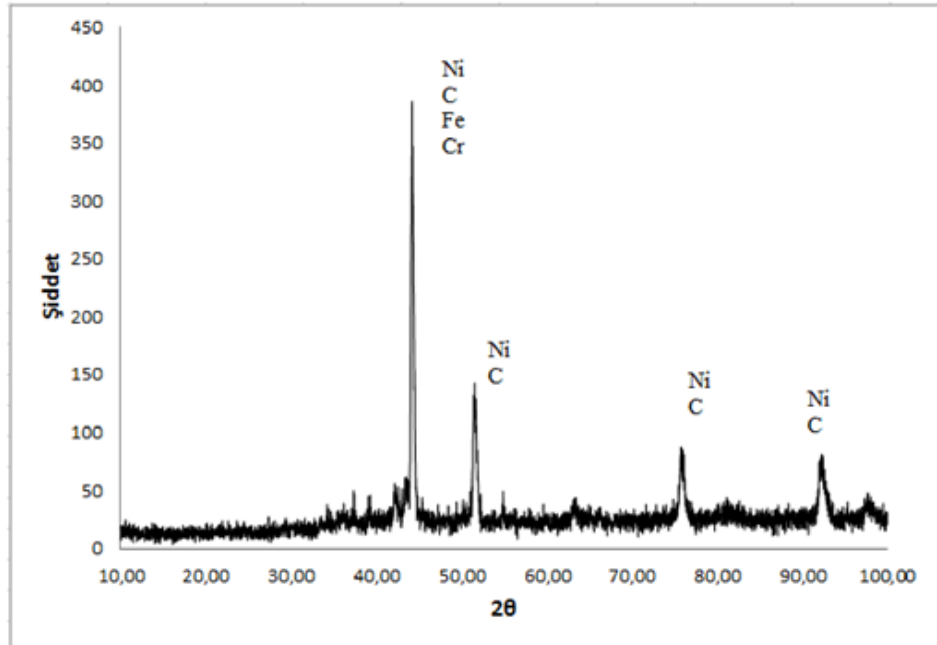
Şekil 6.27. SB numunesinin X-RD Grafiği

Şekil 6.28.'de DKB numunesinin X-ışınları analizinde bulunan fazlar görülmektedir. Bunlar; Ni, C ve Cr fazlarıdır. Burada yüksek pikten ötürü hakim faz Ni, C ve Cr'dur.



Şekil 6.28. DKB numunesinin X-RD Grafiği

Şekil 6.29.'de ise İDKB numunesinin X-ışınları analizinde bulunan fazlar görülmektedir. Bu fazlar; Ni, C, Fe ve Cr'dur. Buradaki hakim faz ise yüksek pikten ötürü Ni, C, Fe ve Cr'dur.



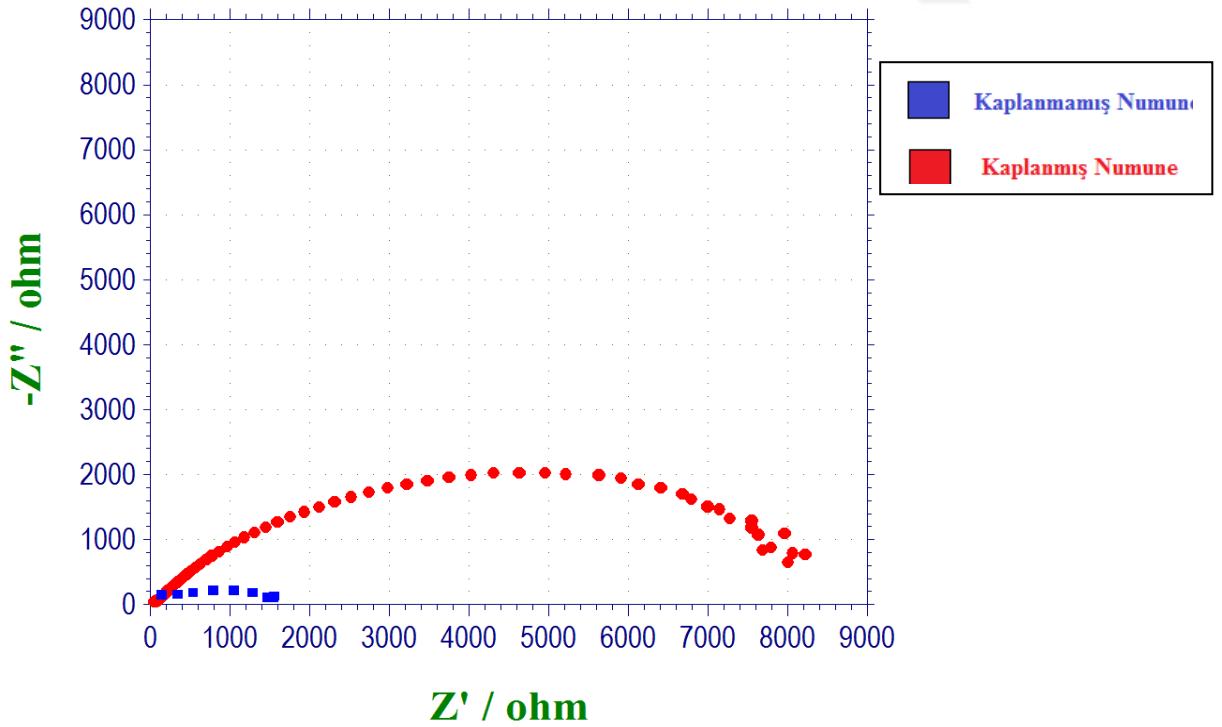
Şekil 6.29. İDKB numunesinin X-RD Grafiği

6.3.4. Egzoz Borularına Ait Numunelerin Korozyon Deneyi

Bu çalışmada iki tip korozyon testi uygulanmıştır. Bunlardan birincisi Elektrokimyasal İmpedans spektroskopisi yöntemi ile korozyon direncin belirlenmesi, ikincisi ise Tafel ekstrapolasyonu yöntemi ile korozyon akımın belirlenmesidir. Her iki yöntemle korozyon testi yapılmıştır.

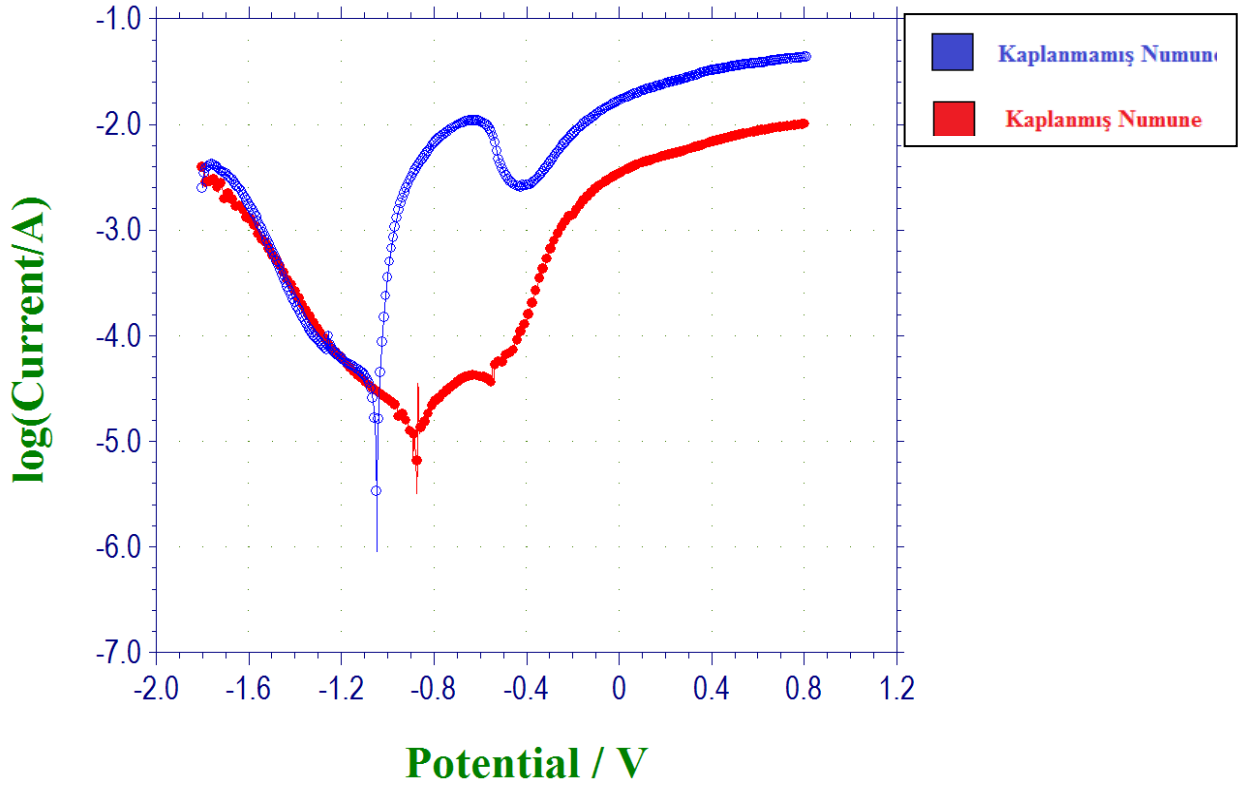
Elektrokimyasal İmpedans Spektroskopisi Yöntemi ile Korozyon Direncinin Belirlenmesi

Aşağıdaki grafikte krom karbür kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borusunun elektrokimyasal ölçümler sonucunda alınmış nyquist diyagramları gösterilmektedir. Numuneler 1'er saat % 3.5'lik NaCl çözeltisinde bekletildikten sonra elde edilen nyquist diyagramları aracılığı ile numunelerin korozyona karşı koydukları direnç belirlenmiştir. Krom karbür kaplanmayan egzoz borusunun korozyon direnci 1130 ohm olarak tespit edilmiştir. Krom karbür kaplanan egzoz borusunun korozyon direnci ise 8000 ohm olarak tespit edilmiştir. Bunun sonucunda egzoz borusunun krom karbür kaplanmasıyla birlikte korozyon direnci % 85 artmıştır. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin korozyon direnci lineer polarizasyon yöntemi ile de tespit edilmiştir. Bu yöntem sonucunda da korozyon direncinin % 84 olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.30. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin nyquist diyagramları

Tafel Ekstrapolasyonu Yöntemi İle Korozyon Akımının Belirlenmesi



Şekil 6.31. Kaplanmış ve kaplanmamış numunelerin yarı logaritmik akım potansiyel grafikleri

Yukarıdaki şekilde krom karbür kaplanmış ve kaplanmamış egzoz borularının yarı logaritmik akım potansiyel grafikleri gösterilmiştir. Grafikteki eğriler yardımı ile malzemelerin korozyon akımı hakkında bilgi edinebiliriz. Mavi renkte gösterilen eğri krom karbür kaplanmamış numuneye aittir ve kırmızı renkte gösterilen eğri ise krom karbür kaplanmış numunenin yarı logaritmik akım potansiyel eğrileridir. Kaplanmamış numunenin korozyon akımı çok yüksek olmasına rağmen kaplanmış numunenin korozyon akımı daha düşük olduğu görülmektedir. Bunun sonucunda kaplanan malzemenin korozyona karşı direncinin arttığını ve akımın azaldığını söyleyebiliriz.

7. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Yapılan bu tez çalışmasında egzoz emisyon değerlerinin azaltılması ve egzoz sisteminin daha dayanıklı bir hale getirilmesi amacıyla egzoz boruları plazma sprej kaplama yöntemi ile krom karbür ile kaplanmıştır. Egzoz deneyleri dizel bir motor üzerinde gerçekleştirilmiştir. Egzoz borularının kaplanmadan önce ve kaplandıktan sonraki emisyon ve EGS değerleri ölçülmüştür. Daha sonra egzoz borularının aynı bölgelerinden olmak üzere numuneler alınmıştır. Bu numunelerin metalografik incelemeleri (SEM, EDAX, X-RD) yapılmıştır. Bu işlemlerin ardından kaplanmış ve kaplanmamış numuneler üzerinde Mikro-sertlik ve korozyon deneyleri yapılmıştır. Bu sonuçlara göre;

✓ Yapılan deneyler sonucunda DKB' daki NO_x emisyon değeri SB' daki NO_x emisyon değerine göre ortalama % 6 daha yüksek olduğu görülmektedir. İDKB' nun SB' daki NO_x emisyon değerinde ise ortalama % 10 luk bir artış tespit edilmiştir. Bu artışın nedeninin kaplanmış egzoz borularında termal bir yalıtım yapılmasıyla sıcaklığın artması olduğu düşünülmektedir.

✓ Deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre CO emisyon değeri ortalama % 5 daha düşük çıkmıştır. İDKB' nun SB' ya göre ise CO değeri ortalama % 9 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Egzoz borularının krom karbür (Cr₃C₂) kaplanmasıyla bir termal bariyer sağlanıp egzoz boruları içerisindeki sıcaklığın artmasına paralel olarak CO miktarının azaldığı düşünülmektedir.

✓ Emisyon deneyleri sonucunda DKB' nun SB' ya göre CO₂ emisyon değerinde ortalama % 11'lik bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun CO₂ emisyon değerinde ise SB' ya göre ortalama % 13'lük bir azalma tespit edilmiştir. Burada termal yalıtımın CO₂ emisyonunu azalttığı düşünülmektedir.

✓ Kaplama sonrasında yapılan deneyler sonucunda DKB' nun SB' ya göre HC emisyon değerinde ortalama % 5'lik bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun HC emisyon değerinde ise SB' ya göre ortalama % 9'luk bir azalma tespit edilmiştir. Bu azalmanın termal yalıtımla ilgili olduğu düşünülmektedir.

✓ DKB' nun SB' ya göre duman yoğunluğu değerlerinde ortalama % 7'lik bir azalma tespit edilmiştir. İDKB' nun duman yoğunluğu değerlerinde ise SB' ya göre ortalama % 12'lik bir azalma tespit edilmiştir.

✓ EGS deneyleri sonucunda SB' nun sıcaklık değerleri, DKB ve İDKB' ya göre yaklaşık % 37 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu da gösteriyor ki kaplanmış egzoz boruları, ısı iletim katsayısı düşük olan krom karbür ile kaplanarak egzoz borularında termal bir bariyer sağlanmıştır.

✓ Korozyon deneyi sonucunda kaplanmış egzoz borusunun korozyon direnci kaplanmamış egzoz borusuna göre % 85 daha yüksek çıkmıştır. Korozyon deneyi sonucunda egzoz borusu malzemesinin ömrünün arttığı görülmüştür.

8. ÖNERİLER

Yapılan bu deneysel çalışma ile egzoz borusunun mevcut durumu muhafaza edilerek yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ve termal bir bariyer oluşturarak egzoz emisyon değerlerinin azaltılması hedeflenmiştir. Uygulanan bu kaplama yöntemi ile egzoz emisyon değerlerinde iyileşmeler sağlanmıştır.

Bu çalışmaya ek olarak aşağıdaki öneriler dikkate alınabilir;

- ✓ Kaplanmış ve kaplanmamış egzoz boruları benzinli ve LPG'li motorlar üzerinde uygulanabilir.
- ✓ Farklı kaplama yöntemleri ve farklı kaplama malzemeleri uygulanabilir.
- ✓ Uygulanan kaplama kalınlığı değiştirilebilir.
- ✓ Kaplama işlemi bütün egzoz sistemi üzerine yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Ezirmik, K.V, İ.,** Nitrür seramik kaplamaların yüksek sıcaklıklarda oksidasyon davranışlarının incelenmesi, <http://tez2.yok.gov.tr/>, 2000, Syf. 1-77.
- [2] **Aw, P.K., Tan, A.L.K., Tan, T.P. Ve Qiu, J.,** Corrosion resistance of tungsten carbide based cermet coatings deposited by High velocity oxy-fuel spray process, **Science Direct**, 2008, Syf. 5710–5715.
- [3] **Ahmaniemi, S., Vuoristo, P., and Mantyla, T.,** 2004. Mechanical And Elastic Properties Of Modified Thick Thermal Barrier Coatings, *Materials Science and Engineering*, A366, 175–182, Finland.
- [4] **Kwin, B. F.,** 1989. How to apply thermal spray coatings, *Welding Design & Fabrication*, 43-46.
- [5] **Miller, R. A.,** 1997. Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions. *Journal of Thermal Spray Technology*, Volume 6(1), JTTEE5 6:35-42.
- [6] **Lough S.H., Berndt C.C.,** Evaluation of off-angle thermal spray, *Surface and Coatings Technology*, 89, pp. 213-224, 1997.
- [7] **Das S., Mukhopadhyay A.K., Datta S , Das G.C., Basu D.,** Hard glass-ceramic coating by microwave processing, *Journal of the European Ceramic Society*, 28, pp. 729–738, 2007.
- [8] **Wielage B., Wank A., Pokhmurska H., Grund T., Rupprecht C., Reisel G., Friesen E.,** Development and trends in HVOF spraying technology, *Surface and Coatings Technology*, 201, pp. 2032–2037, 2006.
- [9] **Erkmen, Z., E. , Kahraman, C.,** Patlamalı sprej yöntemiyle kaplanmış HA kristallenme kinetiği, 10. Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiri Kitabı cilt 3, İstanbul, sf. 1561 – 1569 , , 2000.
- [10] **Editor Davis J. R ,** Handbook of Thermal Spray Technology , ASM International, New York, USA, 2004
- [11] **Üstel, F.,** Plazma sprej kaplama teknolojisi, Yüksek lisans tezi. İTÜ Fen Bil. İstanbul 1995.
- [12] **Lugscheider, E., Jokiel, P.,** Plasmaspritzen-verfahren, anwendungen, entwicklungen, *Metall*, 3/1993.
- [13] **Smolka, K.,** Thermisches spritzen, DVS-Verlag, 50- 57, 1985.
- [14] **Lugscheider, E.,** Handbuch der thermisches spritztechnik, Technologien-werkstoffefertigung, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [15] **Akalin, Ö.,** 2000. Motorlarda plazma sprej kaplı silindirlerin tribolojik özellikleri. *Makine Mühendisliği Odası Dergisi*, 486: 30–33.
- [16] **Herman, H., and Shankar, N. R.,** 1987. Survivability of thermal barrier coatings. *Materials Science & Engineering*, Vol 88, pp 69-74, USA.

- [17] **Geçkinli, E.** , İleri Teknoloji Malzemeleri, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1992.
- [18] **Demirkıran A. Ş.**, MgZrO₃ Esaslı Fonksiyonel Değişken Kaplamaların İncelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 1997.
- [19] **Editor Davis J. R.**, Handbook of Thermal Spray Technology , ASM International, New York, USA, 2004.
- [20] **Stokes, J.**, 2003. The the oryand application of the HVOF thermal spray process. *Doktora Tezi*, Dublin City University Press, 27-28, Ireland.
- [21] **Yüksek, E.**, Altuncu, E., Eker, G., ÜSTEL, F. 2005. Plazma Sprey Kaplama Yöntemi ve Teknolojik Uygulamaları. *4th Powder Metallurgy Conference*, 18-22, Sakarya, Türkiye.
- [22] **Lugscheider, E., Knepper, M., B. Heimberg**, (1994), Cytotoxicity investigation of plasma sprayed calcium phosphate coatings, *J. Mater. Sci. Mater. Med.* 5 371-375.
- [23] **Smolka K.** (2002). Thermisches Spritzen, DVS-Verlag, 50-57.
- [24] **Bayrak, G.**, 2009. Yerli Bazaltlardan Üretilen Cam-Seramik Esaslı Tozların Plazma Sprey Kaplamalarda Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.
- [25] **Kulkarni A. , Vaidya A., Goland A., Sampath S., Herman H. ,** Processing effects on porosity-property correlations in plasma sprayed yttria-stabilized zirconia coatings, *Materials and Engineering*, A359, pp. 100-111, 2003.
- [26] **Salman S., Köse R., Urtekin L., Fındık F.**, An investigation of different ceramic coating thermal properties, *Materials and Design*, 27, pp. 585–590, 2006.
- [27] **Joseph Stokes**, Production of coated and free-standing engineering componenets using the HVOF process, *Doktora Tezi*, Dublin City University, 2003.
- [28] **Minisker M. A.**, Termal Sprey Yöntemiyle oluşturulan kaplamaların mekanik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, İTÜ Fen Bil. İstanbul 2009
- [29] **Bach W., Möhwald K., Bause T.**, Untersuchung der Einflüsse von Substratrauheit und Spripartikelgrösse auf die Haftung thermisch gespritzter Schichten, *Mat.-wiss. Und Werkstofftech.* 2008
- [30] **Khan N. A., Lu J.**, Thermal cyclic behavior of air plasma sprayed thermal barrier coatings sprayed on stainless steel substrates, *Surface and Caotings Technol.*, 201, 2007, 4653-4658
- [31] **Chang-Jiu, Wen-Ya L.**, Effect of sprayed particle size on oxidation behaviour of MCrAlY materials during high velocity oxygen-fuel deposition, *Surf. And Coat. Technology*, 162, 2002
- [32] **Pershin V., Lufitha M., Chandra S., Mostaghimi J.**, Effect opf substrat temperature on adhesion strength of plasma sprayed nickel coatings, *Journal of Thermal Spray Technology* 376, 2003.

- [33] **Bianchi L. et al**, Effect of particle velocity and substrate temperature on alumina and zirconia splat formation, *Thermal Spray Industrial Applications*, 1994, 569-574
- [34] **Sakakibara N., Tsukuda H., Notomi A.**, The splat morphology of plasma sprayed particle and the relation to coating property, *Thermal Spray Engineering*, 2000, 753- 758.
- [35] **Guo H. B., Vassen R., Stöver D.**, Atmospheric plasma sprayed thick thermal barrier coating with high segmentation crack density, *Surf. and Coat. Technology* 186,2004, 353-363.
- [36] <http://www.corrosion-doctors.org>. 06.04.2016
- [37] **Çelik E.**, Plazma sprej tekniğiyle üretilen seramik kaplamaların korozyon davranışlarının incelenmesi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 1995.
- [38] **Sarıkaya Ö.**, Al- %12 Si malzemesi üzerine Plazma Püskürtme Kaplama Tekniği ile Al-Si+B4C kaplama, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Sakarya, 2003.
- [39] **Lide, D.R.**, 1998. Handbook of Chemistry and Physics (87 ed.), Boca Raton, FL: CRC Press. 4-52.
- [40] http://www.hardmaterials.de/html/_crystal_structures.html, Crystal Structures of Hard Materials, 10.04.2016.
- [41] **Tracey, V.A.**, 1992. Nickel in Hardmetals. Refractory Metals& Hard Materials,11 p. 137-149.
- [42] **Chattopadhyay, R.**, 2001. Surface Wear: Analysis, Treatment, and Prevention. 2001: p. 228-229.
- [43] **Dorado, M.P., Ballesteros, E., Arnal, J.M., Gomez, J., and Lopez, F.J.**, 2003. Exhaust Emissions from a Diesel Engine Fueled with Transesterified Waste Olive Oil, *Fuel*, 82:1311-1315.
- [44] **Özel, S.**, Alüminyum alaşımı ve bronzu yüzeyine oksit ve karbür bileşiklerinin plazma sprej yöntemiyle kaplanmasının araştırılması. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, 25, Elazığ. (2009)
- [45] **Aydoğan, B.**, “Biyodizel kullanılan dizel motorlarda NOx emisyonlarının ve NOx emisyonları azaltma yöntemlerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 19-21 (2008).
- [46] **Örnek, S.S.**, “Dizel motorlarda biyodizel kullanımının egzoz emisyonlarına etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, 25-27, 31-33 (2007).

- [47] **Gül, H.**, Termal Bariyer Kaplanmış Motorun Yapay Sinir Ağları İle Matematiksel Modellenmesi Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, *Yüksek Lisans Tezi*, Elazığ, 26-27 (2015).
- [48] **Jayashankara, B. and Ganesan, V.**, “Effect of fuel injection timing and intake pressure on the performance of a DI diesel engine-A parametric study using CFD”, *Energy Conversion and Management*, 51: 1835-1848 (2010).
- [49] **Fernando, S., Kara, P., Hernandez, R. and Jha, S.K.** “Effect of incompletely converted soybean oil on biodiesel quality” *Energy*, 32: 844-851 (2006).
- [50] **Demirtaş, G.**, 2012. “Dizel Yakıtı-Balık Yağı Metil Esteri Karışımı İle Çalışan Bir Motorda Püskürtme Basınç Ve Avansının Performans Ve Egzoz Emisyonlarına Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 43-44.
- [51] **Heywood, J.B.**, 1988. Internal combustion engine fundamentals. Vol. 930. New York: Mcgraw-hill.
- [52] **Ergeneman, M., Arslan, H., Kutlar, O.A. ve Mutlu, M.**, “Taşıt egzozundan kaynaklanan kirleticiler”, *Birsan Yayınevi*, İstanbul, 13-14, 33-48, (1998).
- [53] **Şenveli, E.** (2008). Etanol Katkılı Yakıt Kullanımının Motor Performansına ve Emisyonlara Etkilerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 15-25.
- [54] **Coşkun, A.**, 2007. Enerji güvenliği, enerji tarımı, biyoyakıtlar, *Ekonomik Forum Dergisi*, 60-61.
- [55] **Taşçı, M.** (2013). Motor Emisyonlarının Yapay Sinir Ağı Kullanılarak Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 7-18.
- [56] **Atılğan, İ.**, (2000). Türkiye’nin Enerji Potansiyeline Bakış. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 15(1), 31-47.
- [57] **Doğan, H.E.**, (2013). Lpg Dönüşümü Yapılmış Bir Dizel Motorunda Azotoksit oluşumunun Teorik ve Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 19-22.
- [58] **Kamal, S., Jayaganthan, R., Prakash, S.**, 2009, Evaluation of cyclic hot corrosion behaviour of detonation gun sprayed Cr₃C₂-25%NiCr coatings on nickel- and iron-based superalloys, *Surface and Coatings Technology*, 203, 8, 1004-1013.
- [59] **Habib, K.A., Saura, J.J., Ferrer, C., Damra, M.S., Giménez, E., Cabedo, L.**, 2006, Comparison of flame sprayed Al₂O₃/TiO₂ coatings: Their microstructure, mechanical properties and tribology behavior, *Surface & Coatings Technology*, 201, 1436-1443.
- [60] **Özgören, Y.**, 2005. Stirling motorunda termal bariyer kaplamanın motor performansına etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, *Teknik-Online Dergisi*, (4,3).

- [61] **Venkatesh, S.**, 1973. Surface treatments for pistons and their effect on engine performance. *Wear*, 25(1), 65-71.
- [62] **Ciniviz, M.**, 2005. Türboşarjlı bir dizel motorunun yanma odası yüzeylerinin Y_2O_3 - ZrO_2 ile kaplanması performans ve emisyon etkileri, *Doktora Tezi*, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [63] **Gürbüz, H., ve Gökkaya, H.**, 2013. Termal bariyer kaplamanın motor yakıt sarfıyatı egzoz sıcaklığı ve emisyonlara etkilerinin deneysel olarak incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, (20,1), 15-19.
- [64] **Kvernes, I., Norholm, O., and Svartdal, J.**, 1990. Ceramic coatings influences on medium speed diesel engine performance and reliability, *Marine Management*, p.10.
- [65] **Uozato, S., Nakata, K., Ushio, M.**, 2005, Evaluation of ferrous powder thermal spray coatings on diesel engine cylinder bores, *Surface & Coatings Technology*, 200, 2580 – 2586.
- [66] **Saral, U., Üstel, F., Toplan, N.**, 2008, Alümina ilavesinin YSZ termal bariyer kaplamaların termal şok davranışına etkisi, 14. Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul.
- [67] **Riccardi, B., Montanari, R., Casadei, M., Costanza, G., Filacchioni, G., Moriani, A.**, 2006, Optimisation and characterisation of tungsten thick coatings on copper based alloy substrates, *Journal of Nuclear Materials*, 352, 29–35.
- [68] **Hazar, H., ve Öztürk, U.**, 2009. Fındık yağı ve d2 yakıtı karışımının performans ve emisyonuna seramik kaplamanın etkileri, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.
- [69] **Wallace, F., J., Kao, T., K., Tarabad, M., Alexander, W., D. and Cole, A.**, 1984. Thermally insulated diesel engines, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers*, 198A(5), 21.
- [70] **Kamo, R., Assanis, D., and Bryzik, W.**, 1989. Thin thermal barrier coatings for engines. No. 890143. SAE Technical Paper.
- [71] **Ramaswamy, P., Seetharamu, S., Varma, K. B. R. and Rao, K. J.**, 2000. Thermomechanical fatigue characterization of zirconium ($8\% Y_2O_3 - ZrO_2$) and mullite thermal barrier coatings on diesel engine components: effect of coatings on diesel engine performance, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Proquest Science Journals*, 729, 214.
- [72] **Yaşar, H.**, 1997. Termal bariyer kaplamanın türbo doldurmalı bir dizel motorunun performansına etkileri, *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 13-76.

- [73] **Hazar, H., ve Öner, C.,** 2007. CrN Kaplamanın Dizel Motor Silindir Gömleği Aşınmasına Etkisi. *Mühendis ve Makine*, 48,575: 14-18
- [74] **Sivakumar G., and Senthil K.S.,** 2014. Investigation on effect of yttria stabilized zirconia coated piston crown on performance and emission characteristics of a diesel engine, School of Mechanical Engineering, Vel Tech University, Chennai 600062, India.
- [75] **Varatharajan, K., and Cheralathan, M.,** 2012. Influence of fuel properties and composition on NOx emissions from biodiesel powered diesel engines:A review, *Renewable and sustainable energy reviews*,16,6,3702-3710, Elsevier.
- [76] **Hazar, H.** 2004. Bir dizel motoru silindir yüzeyinin seramik malzeme ile kaplanarak aşınma davranışının deneysel incelenmesi, *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makine Anabilim Dalı, 127, Elazığ.
- [77] **İlhan, M.,** 2007. Çift yakıtlı (Dizel Metanol) bir dizel motorda püskürtme avansının motor performansına ve egzoz emisyonlarına etkisinin deneysel olarak araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 59-110.
- [78] **Cherng-Yuan, L., and Hsui-An, L.,** 2006. Diesel Engine Performance and Emission Characteristics of Biodiesel Produced by the Peroxidation Process. *Fuel*, 85: 298–305.
- [79] **Puhana, S., Vedaramana, N., Rama, B.V.B., Sankarnarayananb, G. and Jeychandran, K.,** 2005. Mahua oil (madhuca indica seed oil) methyl ester as biodiesel-preparation and emission characteristics, *Biomass and Bioenergy*, 28,87–93.
- [80] **Challen, B., and Baranescu, R.,** 1999. Diesel Engine Reference Book, Second Edition, Butterworth Heinemann.
- [81] **Stone, R.,** 1989. Motor Vehicle Fuel Economy, Macmillan Educational Ltd, Houndsmills.
- [82] **Kutlar, O.A., Ergeneman, M., Arslan H. ve Mutlu, M.,** 1998. Taşıt Egzozundan Çıkan Kirlenmeler, Birsan Yayınevi, İstanbul, s. 13-14

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Elazığ'da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimimi Elazığ'da tamamladım. 1996 yılında kazanmış olduğum Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Makina eğitimi bölümünden 2000 yılında mezun oldum. 2002 yılında askerliğimi kısa dönem olarak tamamladım. 2004-2011 yılları arasında Elazığ sanayi sitesinde imalat sektöründe atölye işletmecisi olarak çalıştım. 2012 yılında Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesinde yüksek lisans öğrenimime başladım. 2015 yılından beri Bingöl Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Enerji Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktayım. Evli ve üç çocuk babasıyım.

