

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

**BORLAMA YÜZEY KAPLAMA TEKNOLOJİSİNİN BİR
DİZEL MOTORUN YANMA ODASI ELEMANLARINA
UYGULANMASI**

**Uğur ÖZTÜRK
DOKTORA TEZİ**

**Anabilim Dalı : Makine Eğitimi
Programı : Otomotiv**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hanbey HAZAR

ELAZIĞ – 2015

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BORLAMA YÜZEY KAPLAMA TEKNOLOJİSİNİN BİR DİZEL MOTORU
YANMA ODASI ELEMANLARINA UYGULANMASI

DOKTORA TEZİ

Uğur ÖZTÜRK

101119205

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Ekim 2015
Tezin Savunulduğu Tarih : 06 Kasım 2015

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hanbey HAZAR

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. H. Serdar YÜCESU

Prof. Dr. Adnan ÇALIK

Yrd. Doç.Dr. Celal SARSILMAZ

Yrd. Doç.Dr. Soner BUYTOZ

KASIM 2015

ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca, sahip olduğu engin tecrübelerini, bilgi birikimini benimle paylaşan ve yol gösteren değerli hocam Prof. Dr. Hanbey HAZAR'a yaptığı tüm katkılarından dolayı teşekkür ederim. Değerli arkadaşlarım Yard. Doç. Dr. Korhan KAYIŞLI, Dr. Fikret YILMAZ ve Teknik öğretmen Hakan GÜL'e deneysel çalışmalarımın her aşamasında tecrübelerini, yardımları ve emeklerini esirgemedikleri için şükranlarımı sunarım. Değerli eşim Yasemin ÖZTÜRK'e ve aileme her konuda yanımda oldukları için ve beni her konuda destekledikleri için teşekkür etmeyi bir borç bilirim Ayrıca tezime proje kapsamında destekte bulunan FÜBAP birimine teşekkür ederim..

Hazırlamış olduğum tezimi, yazım esnasında yanımdan hiç ayrılmayan afacan oğlum Dorukhan ÖZTÜRK'e ithaf ederim.

Uğur ÖZTÜRK

ELAZIĞ-2015

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
TABLolar LİSTESİ.....	XIV
KISALTMALAR LİSTESİ.....	XVI
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XVII
1.GİRİŞ.....	1
1.1.Bor Elementi.....	5
1.2.Bor Elementinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	5
1.3.Bor Ürünleri.....	6
1.3.1.Boridler.....	6
1.3.2.Bor Karbür.....	7
1.3.3.Bor Nitür.....	7
1.4.Borlama.....	7
1.5.Borlama Yöntemleri.....	9
1.5.1.Katı Ortam (Toz Ortam) Borlama Yöntemi.....	9
1.6.Borlama İşleminin Uygulanabildiği Malzemeler ve Uygulama Alanları.....	13
1.6.1.Demir Esaslı Malzemelerde Borlama Yönteminin Uygulanması.....	14
1.6.2.Demir-Bor Denge Diyagramı.....	14
1.6.3.Dökme Demir ve Borlama Uygulamaları.....	16
1.7.Borür Tabakası Oluşumu, Tabakanın Yapısal, Mekanik ve Fiziksel Özellikleri	18
1.7.1.Borür Tabakası.....	18
1.7.2.Fe ₂ B ve FeB Fazlarının Oluşum Mekanizması ve Fiziksel Özellikleri.....	20
1.7.3.Borür Tabaka Kalınlığı.....	22
1.7.4.Borür Tabaka Çeşitleri.....	24
1.7.5.Borür Tabakada Geçiş Bölgesi.....	26
1.8.Borlanmış Yüzeyin Sertlik Dayanımı.....	27

1.9. Borlamanın Sürtünme Davranışı Üzerindeki Etkisi	29
1.10. Aşınma ve Borlanmış Yüzeylerin Temel Aşınma Davranışları.....	31
1.10.1. Abrasiv Aşınma ve Borlamanın Abrasiv Aşınma Üzerine Etkisi.....	32
1.10.2. Adhezif Aşınma ve Borlamanın Adheziv Aşınma Üzerine Etkisi.....	33
1.10.3. Korozyon Aşınma ve Borlamanın Korozyon Aşınma Üzerine Etkisi.....	35
1.11. Borlama İşleminin Diğer Yöntemlere Göre Üstün Tarafları.....	37
1.12. Plazma Arkla Spreyleme Yöntemi.....	38
1.13. Bitkisel Yağlar.....	40
1.13.1. Bitkisel Yağlar Genel.....	40
1.13.1.1. Doymuş Yağ Asitleri.....	40
1.13.1.2. Doymamış Yağ Asitleri.....	41
1.14. Kabak Çekirdeği ve Yağı.....	41
1.15. Yer Fıstığı ve Yağı (<i>Arachis hypogaea</i>).....	42
1.16. Biyodizel.....	44
1.16.1. Biyodizel Üretimi.....	45
1.16.2. Transesterifikasyon.....	47
1.16.3. Alkali Katalizli Transesterifikasyon.....	48
1.16.4. Asit Katalizli Transesterifikasyon.....	49
1.16.5. Alkol.....	50
1.16.6. Katalizör.....	50
1.17. Biyodizel Üretimi İşlem Basamakları.....	51
1.17.1. Alkol ve Katalizörün Karıştırılması.....	51
1.17.2. Reaksiyon.....	51
1.17.3. Ayırma.....	52
1.17.4. Alkolün Uzaklaştırılması.....	52
1.17.5. Gliserin.....	52
1.17.6. Gliserin Nötralizasyonu.....	52
1.17.7. Metil Ester Yıkama İşlemi.....	53
1.18. Biyodizel ve Petrodizelin (Mineral dizel) Karşılaştırılması.....	53
1.19. Biyodizel Teknik Özellikler.....	55
1.19.1. Yoğunluk.....	55
1.19.2. Özgül Ağırlık.....	56
1.19.3. Parlama Noktası ve alevlenme noktası.....	56

1.19.4.Kalori Değeri (Isıl Değeri).....	57
1.19.5.Kinematik Viskozite.....	58
1.19.6.Akma Noktası veya Bulutlanma (Dumanlanma) Noktası.....	60
1.19.7. Soğukta Filtre Tıkanması	61
1.19.8. Setan Sayısı.....	62
1.19.9. Setan İndeksi.....	63
1.19.10. Karbon Artığı.....	63
1.19.11. İyot Sayısı.....	63
1.19.12. Kükürt İçeriği.....	64
1.19.13.Kül.....	65
1.19.14.Su İçeriği.....	66
1.19.15.Depolama ve Taşıma.....	67
1.19.16.Biyodizel Uluslararası Standartları.....	68
2.MATERYAL VE METOD.....	69
2.1.Biyodizel Üretimi.....	70
2.1.1. Yağ Kimyası.....	71
2.1.2.Toplam Yağ Asitliği.....	71
2.2.Serbest Yağ Asitliği (SYA) Tayini.....	72
2.2.1.Örnek Hazırlama ve Gerekenler.....	73
2.2.2.Deneysel Prosedür.....	73
2.2.2.1. 0,2 Molar NaOH Çözeltisi Hazırlama.....	73
2.2.2.2. Fenolftalein İndikator Çozeltisi Hazırlama.....	74
2.2.2.3.Titrasyon İşlemi.....	74
2.2.2.4.Hesaplama.....	75
2.3.Alkali Katalizli Transesterifikasyon Yöntemi ve Biyodizel Üretimi.....	76
2.3.1.Kullanılan Malzemeler.....	78
2.4.Fıstık Yağı Metil Esteri (FYME) ve Üretimi İçin Uygulanan Deneysel Prosedür	79
2.5.Kabak çekirdeği yağı metil esterini (KYME) üretimi için uygulanan deneysel prosedür.....	82
2.6.Kaplama Prosedürleri.....	86
2.6.1.Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Kaplama Prosedürleri.....	87
2.6.1.1.Silindir Gömleği.....	87
2.6.1.2.Piston.....	89
2.6.1.3.Supap.....	90

2.6.2.Borlama Elemanları	91
2.6.3.Fırın	91
2.6.4.Borlama Deneysel Prosedürler	91
2.6.4.1.Silindir Gömleği Kaplama İşlemi	91
2.6.4.2.Supap Kaplama	94
2.6.4.3.Piston Kaplama	95
2.6.5.Kaplanan Parçaların Motora Entegrasyonu	97
2.7.Güç, Performans, Özgül Yakıt Tüketimi ve Egzoz Emisyon Ölçümleri	99
2.7.1.Deney Motoru.....	99
2.7.2.Ölçümlerde Kullanılan Formüller.....	100
2.7.3.Emisyon Ölçümleri.....	101
2.7.4.Fren Yükleri.....	102
2.7.5.Egzoz Gaz Termometresi.....	103
2.8.Yüzey Performans Analizleri.....	103
2.8.1.Aşınma Deneyi.....	103
2.8.2.Yüzey Sertlik Ölçümleri.....	106
2.8.4.Yüzey Analizi.....	106
2.8.4.1.Numune Hazırlama.....	106
3.BULGULAR.....	111
3.1.Yakıt Özellikleri.....	111
4.SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	118
4.1.Motor Performans Değerlendirmeleri.....	118
4.1.1.Yakıt Tüketimi (YT) ve Fren Özgül Yakıt Tüketimi (FÖYT).....	118
4.1.2.Fren Özgül Yakıt Tüketimi (FÖYT).....	122
4.1.2.1.Normal Motor FÖYT Sonuçları ve Değerlendirme.....	124
4.1.2.2.Kaplanmış Motor FÖYT Sonuçları ve Değerlendirme.....	126
4.1.3.Fren Özgül Enerji Tüketimi (FÖET) (K _j /K _w .Sa).....	130
4.1.3.1. Normal Motor FÖET Sonuç ve Değerlendirmeleri.....	131
4.1.3.2. Kaplanmış Motor FÖET Sonuç ve Değerlendirmeleri.....	133
4.1.4.Fren Termal Verim (F _{tv}) (%).....	137
4.1.4.1. Normal Motor FTV Sonuçlar ve Değerlendirme.....	139
4.1.4.2. Kaplanmış Motor FTV Sonuçlar ve Değerlendirme.....	142

4.1.5. Egzoz Gaz Sıcaklığı (EGS).....	149
4.1.5.1. Normal Motor EGS Sonuçları ve Değerlendirme.....	150
4.1.5.2. Kaplanmış Motor EGS Sonuçları ve Değerlendirme.....	152
4.2. Emisyon Ölçüm ve Sonuçları.....	153
4.2.1. Normal Motor CO Emisyon Ölçümleri.....	153
4.2.2. Kaplanmış Motor CO Emisyon Ölçümleri.....	157
4.2.3. Normal Motor CO ₂ Ölçümleri.....	159
4.2.4. Kaplanmış Motor CO ₂ Ölçümleri.....	161
4.2.5. Normal Motor O ₂ Ölçümleri.....	163
4.2.6. Kaplanmış Motor O ₂ Ölçümleri.....	165
4.2.7. Normal Motor HC Ölçümleri.....	167
4.2.8. Kaplanmış Motor HC Ölçümleri.....	170
4.2.9. Normal Motor NO _x Ölçümleri.....	172
4.2.10. Kaplanmış Motor NO _x Ölçümleri.....	176
4.2.11. Normal Motor İş Ölçümleri.....	178
4.2.12. Kaplanmış Motor İş Ölçümleri.....	182
4.3. Yüzey Analizi ve Değerlendirmeler.....	183
4.3.1. Optik Mikroskop Analizi.....	183
4.3.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizi.....	185
4.3.3. EDAX Analizi.....	188
4.3.4. XRD Analizi.....	190
4.4. Nanoindentasyon Yöntemi ile Yüzey Sertlik Ölçümü ve Sonuçlar.....	192
4.5. Adhesiv Aşınma ve Yüzey Pürüzlülük Deneyi ve Sonuçlar.....	197
5.ÖNERİLER.....	210
KAYNAKLAR.....	212
ÖZGEÇMİŞ.....	226

ÖZET

Yapılan bu deneysel çalışmada 4 silindirli doğal emişli, 4 zamanlı, su soğutmalı, direkt enjeksiyonlu dizel bir motorun yanma odası elemanları olan silindir gömleği, piston üst yüzeyi ve supaplar bor içerikli tozlarla kaplanarak motora adyabatik özellik kazandırılmıştır. Kaplama yöntemi olarak katı ortam borlama yöntemi ve plazma sprej yöntemi kullanılmıştır. Silindir gömleği ve supaplar katı ortam borlama yöntemi ile 150 mikro kalınlığında Fe₂B, piston üst yüzeyinde ise 300 mikron kalınlığında (CoNiCrAlYttra + NiCrBSi) tabakası ile kaplanmıştır.

Ham fıstık yağı ve ham kabak çekirdeği yağlarından, transesterifikasyon yöntemi uygulanarak biyodizel yakıtlar üretilmiştir. Adyabatik özellik kazandırılmış motorda; D-2 yakıt ve biyodizel yakıtların D-2 yakıt ile karışımları, alternatif yakıt olarak kullanılmıştır. Standart ve kaplanmış motorda farklı yükler altında performans deneyleri ve emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Son olarak kaplanan motor parçaları optik mikroskop, SEM, EDAX, XRD, nano sertlik, adhesiv aşınma, yüzey pürüzlülüğü gibi malzeme muayene ve metalografik inceleme yöntemlerine tabi tutulmuştur. Yüzey sertlik değeri 6 kat artarken, aşınma direnci 3 kat artmıştır. Isı iletim katsayısı silindir gömleğinde 2,5 kat düşerken, piston üst yüzeyinde ortalama 10 kat düşmüştür. Testler neticesinde kaplanmış motorda D-2 yakıt için FÖYT değeri % 7,5 ve FÖET değeri % 7 azalırken, FTV değeri % 1,5 ve EGS değerinde ise % 15 artış meydana gelmiştir. CO değerinde % 10, HC değerinde % 47, İS değerinde ise % 14 azalma meydana gelirken NO_x değerinde ise % 35 artış ölçülmüştür.

Anahtar kelimeler: Borlama, plazma sprej, kaplama, motor, biyodizel, performans, egzoz emisyon

SUMMARY

APPLICATION OF BORONIZING TECHNIQUE TO A DIESEL ENGINES' COMBUSTION CHAMBER PARTS

In this study, adiabatic property was brought to a 4-cylinder natural aspirated, direct injection diesel engine. For this purpose, cylinder liner, piston upper surface and valves were coated with powder with boron. Solid-boronizing method and plasma spray method were used as coating method. While cylinder liner and valves were coated with the layer of Fe_2B in the thickness of 150 micron by using solid boronizing method, piston upper surface was coated with the layer of $CoNiCrAlYttra + NiCrBSi$ in the thickness of 300 micron by using plasma spray method. After the coating process, the engine was subject to performance and emission tests. As test fuel, peanut oil methyl ester (POME) and pumpkin seed oil methyl ester were produced from peanut oil and pumpkin seed oil by applying alkali catalyzed transesterification method.

In uncoated engine, performance, exhaust emission and exhaust gas temperature values were recorded by operating with D-2 (normal diesel fuel) and B-20-50-100 fuels. Then, test fuels were tested again in coated engine. Performance and exhaust emission values were recorded for the second time. Lastly, required evaluations were made by comparing all data obtained from coated and uncoated engines with each other. As a result of tests for the D-2 fuel, while BSFC value of coated engine decreased at the rate of 7.5% and BSEC value decreased at the rate of 7%, an increase occurred at the rate of 1.5% in BTE value and at the rate of 15% in EGT value. While a decrease was observed at the rate of 10% in CO value, 47% in HC value, and 14% in Smoke value, an increase was observed at the rate of 35% in NO_x value. Finally, coated engine parts were subjected to surface analysis methods. For this purpose, optical microscopy, SEM, XRD, surface roughness, wear test were used for analysis methods.

Key words : ,Boronizing, Coating, Engine, Biodiesel, Performance, Emission, Surface

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Kutu borlama yönteminde numunenin yerleşim şekli..... 11
Şekil 1.2.	Fe-B İkili Denge Diyagramı..... 15
Şekil 1.3.	Fe-B İkili Denge Diyagramı..... 15
Şekil 1.4.	Borlanmış dökme demire ait optik kesit görüntüleri..... 18
Şekil 1.5.	Dökme demire ait borlama sonrası mikroyapı..... 19
Şekil 1.6.	Borür tabakası kalınlığının tanımlanması..... 23
Şekil 1.7.	Bazı termokimyasal ve ileri teknoloji yüzey sertleştirme işlemlerinin karşılaştırılması..... 23
Şekil 1.8.	Düşük karbonlu (C45) çeliğinde zaman ve sıcaklığa bağlı tabaka kalınlığı değişimi..... 24
Şekil 1.9.	Borür tabakası çeşitleri..... 25
Şekil 1.10.	Fe ₂ B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi..... 27
Şekil 1.11.	Borlamanın aşınma direnci üzerindeki etkisi (faville testi)..... 33
Şekil 1.12.	Borür tabakalı paslanmaz çeliklerin düşük asitliğe sahip su içerisindeki korozyon davranışları..... 35
Şekil 1.13.	Mineral asitlerin borlanmış ve borlanmamış malzemeler üzerindeki aşındırma etkisi..... 36
Şekil 1.14.	Plazma sprey tabancasının kesiti ve plazma oluşumu..... 38
Şekil 1.15.	Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi..... 40
Şekil 1.16.	Transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel oluşum reaksiyonu..... 48
Şekil 1.17.	Biyodizel üretim işlem basamakları..... 51
Şekil 1.18.	Petrodizele biyodizel eklenmesiyle yoğunluk değişimi..... 55
Şekil 1.19.	Petrodizele biyodizel eklenmesiyle parlama noktası değişimi..... 57
Şekil 1.20.	Petrodizele biyodizel eklenmesiyle viskozite değişimi..... 59
Şekil 1.21.	Soğukta filtre tıkanma noktası..... 61
Şekil 1.22.	Biyodizel iyot sayısı..... 64
Şekil 1.23.	Biyodizel kükürt içeriği..... 65
Şekil 1.24.	Biyodizel su içeriği..... 66
Şekil 2.1.	Titrasyon işlemi..... 74
Şekil 2.2.	Transesterifikasyon reaksiyonu 78
Şekil 2.3.	Metoksit çözeltisi hazırlama 79
Şekil 2.4.	Metoksit aktarımı 80
Şekil 2.5.	Reaksiyon sonu faz ayrımı ve biyodizel oluşumu ve gliserin 80

Şekil 2.6.	Yıkama işlemi	81
Şekil 2.7.	Biyodizel filtrasyon işlemi ve depolama	82
Şekil 2.8.	Metoksit çözeltisi hazırlama	83
Şekil 2.9.	Metoksit aktarımı	83
Şekil 2.10.	Biyodizel faz ayrımı, biyodizel ve gliserin oluşumu.....	84
Şekil 2.11.	Yıkama işlemi ve elde edilen net biyodizel	85
Şekil 2.12.	Filtrasyon işlemi.....	85
Şekil 2.13.	Elde edilen biyodizel karışımları	86
Şekil 2.14.	Orjinal silindir gömleği ve ham silindir gömleği	88
Şekil 2.15.	Orjinal silindir gömleğine ait ölçüler ham silindir gömleğe ait ölçüler	88
Şekil 2.16.	Egzoz ve emme supapı.....	90
Şekil 2.17.	Borlama öncesi ham gömlek ve ısıtma işlemi görmüş gömlek	92
Şekil 2.18.	Yüzeyde oluşan borür tabaka.....	93
Şekil 2.19.	Silindir gömleklerinin deneye hazır hali	94
Şekil 2.20.	Supaplar, kalıplar ve borlama elemanları.....	94
Şekil 2.21.	Borlanan supaplar	95
Şekil 2.22.	Plazma spreyleme işlemi	96
Şekil 2.23.	Kaplama öncesi ve kaplama sonrası piston görüntüsü.....	97
Şekil 2.24.	Kaplanan tüm motor parçaları	97
Şekil 2.25.	Kaplanmış supapların (a), pistonların ve gömleklerin (b) motora entegrasyonu.....	98
Şekil 2.26.	Motor üst kapağının yerleştirilmesi (a) ve deney motorunun son hali (b).....	98
Şekil 2.27.	Deneyin şematik görüntüsü	102
Şekil 2.28.	Adhesiv aşınma cihazı	104
Şekil 2.29.	Borlanmış numune, dökme demir numune ve aşındırıcı mil	104
Şekil 2.30.	Adhesiv aşınma deney düzeneği	105
Şekil 2.31.	BRUKER marka nanosertlik ölçüm cihazı	106
Şekil 2.32.	Numune hazırlama	107
Şekil 2.33.	Hassas kesme cihazı	107
Şekil 2.34.	Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı.....	108
Şekil 2.35.	Optik mikroskop	109
Şekil 2.36.	SEM cihazı	110
Şekil 2.37.	XRD cihazı	110
Şekil 3.1.	FYME ve karışım yakıtların kalori değeri açısından değerlendirilmesi.	114
Şekil 3.2.	FYME ve karışım yakıtlarının viskozite değerlerinin karşılaştırılması..	115
Şekil 3.3.	KYME ve karışımlarının kalori değerlerinin karşılaştırılması.....	116

Şekil 3.4.	KYME ve karışımlarının viskozite değerlerinin karşılaştırılması	117
Şekil 4.1.	NM/KM için FYME/D-2 YT değerleri (gr/sn).....	119
Şekil 4.2.	NM/KM için KYME/D-2 YT değerleri (gr/sn).....	120
Şekil 4.3.	NM/KM için FYME/D-2 FÖYT değerleri.....	123
Şekil 4.4.	NM/KM için KYME/D-2 FÖYT değerleri.....	124
Şekil 4.5.	FYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) FÖET değerleri.....	130
Şekil 4.6.	KYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) FÖET değerleri.....	131
Şekil 4.7.	FYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) FTV değerleri.....	138
Şekil 4.8.	KYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) FTV değerleri.....	138
Şekil 4.9.	FYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) EGS değerleri.....	149
Şekil 4.10.	KYME ve karışımlarının NM(a) ve KM (b) EGS değerleri.....	150
Şekil 4.11.	KM ve NM D-2, FYME yakıt ve karışımlarına ait CO emisyon ölçüm değerleri.....	154
Şekil 4.12.	KM ve NM D-2, KYME yakıt ve karışımlarına ait CO emisyon ölçüm değerleri.....	155
Şekil 4.13.	KM ve NM D-2, FYME yakıt ve karışımlarına ait CO ₂ emisyon ölçüm değerleri.....	159
Şekil 4.14.	KM ve NM D-2, KYME yakıt ve karışımlarına ait CO ₂ emisyon ölçüm değerleri.....	160
Şekil 4.15.	KM ve NM FYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait O ₂ emisyon ölçüm değerleri.....	163
Şekil 4.16.	KM ve NM KYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait O ₂ emisyon ölçüm değerleri.....	164
Şekil.4.17.	KM ve NM FYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait HC emisyon ölçüm değerleri.....	167
Şekil.4.18.	KM ve NM KYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait HC emisyon ölçüm değerleri.....	168
Şekil 4.19.	KM ve NM FYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait NO _x emisyon ölçüm değerleri.....	173
Şekil 4.20.	KM ve NM KYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait NO _x emisyon ölçüm değerleri.....	174
Şekil 4.21.	KM ve NM FYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait İS emisyon ölçüm değerleri.....	179
Şekil 4.22.	KM ve NM KYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait İS emisyon ölçüm değerleri.....	180
Şekil 4.23.	Borlanmış dökme demire ait optik mikroskop görüntüsü-1.....	184
Şekil 4.24.	Borlanmış dökme demire ait optik mikroskop görüntüsü-2.....	184
Şekil 4.25.	Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü.....	185
Şekil 4.26.	Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü (x150).....	186
Şekil 4.27.	Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü (x250).....	187
Şekil 4.28.	Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü (x500).....	187
Şekil 4.29.	Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü (x1000).....	188
Şekil 4.30.	Analize tabi tutulan bölge.....	189

Şekil 4.31.	EDAX analiz sonuçları.....	189
Şekil 4.32.	Gri dökme demire ait XRD analizi.....	190
Şekil 4.33.	Borlanmış gri dökme demire ait XRD analizi.....	190
Şekil 4.34	Nanoindentasyon analiz bölgeleri.....	193
Şekil 4.35	Analiz bölgelerindeki izlere ait kuvvet-derinlik grafikleri.....	194
Şekil 4.36	Nanoindentasyon analizlerinden hesaplanan farklı bölgelere ait sertlik ölçümleri.....	195
Şekil 4.37	Nanoindentasyon analizlerinden hesaplanan farklı bölgelere ait elastik modülü değerleri.....	196
Şekil 4.38	20 N yük altında meydana gelen aşınma miktarları.....	198
Şekil 4.39.	35 N yük altında meydana gelen aşınma miktarları.....	199
Şekil 4.40.	50 N yük altında meydana gelen aşınma miktarları.....	200
Şekil 4.41.	a) Bor ile kaplanmış b) Kaplanmamış normal numunelere ait aşınma deneyi sonu resimleri.....	201
Şekil 4.42.	Aşınmış dökme demir 50x SEM görüntüsü.....	202
Şekil 4.43.	Aşınmış dökme demir 100x SEM görüntüsü.....	202
Şekil 4.44.	Aşınmış dökme demir 200x SEM görüntüsü.....	203
Şekil 4.45.	Aşınmış dökme demir 1000x SEM görüntüsü.....	203
Şekil 4.46.	Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x50)..	205
Şekil 4.47.	Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x100)	206
Şekil 4.48.	Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x200)	206
Şekil 4.49.	Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x500)	207
Şekil 4.50.	Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x1000).....	207
Şekil 4.51.	Yüzey pürüzlülük ölçümü.....	209

TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri.....	6
Tablo 1.2. Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri.....	6
Tablo 1.3. Borlama elemanları.....	10
Tablo 1.4. Değişik tipteki dökme demirlere ait kimyasal kompozisyon.....	16
Tablo 1.5. 800-1000 C0 sıcaklıklarda ve 2-6 saatte borlanan gri dökme demir ve normal gri dökme demire ait sürtünme katsayıları.....	17
Tablo 1.6. Demir borürlerin bazı özellikleri.....	21
Tablo 1.7. Malzeme, faz, sertlik ve erime noktaları.....	28
Tablo 1.8. Borlanmış çeliklerin yüzey sertliğinin sert malzeme ve diğer sertleştirme yöntemleriyle karşılaştırılması.....	29
Tablo 1.9. Borlanmış ve kromlanmış malzemelerin sürtünme katsayıları.....	30
Tablo 1.10. Farklı malzemelerin borlama sonrası sürtünme katsayısı değerleri.....	30
Tablo 1.11. Kabak çekirdeği yağına ait fizikokimyasal özellikler.....	42
Tablo 1.12. Yer fıstığına ait fizikokimyasal özellikler.....	43
Tablo 1.13. Biyodizel-dizel karışım oranları.....	44
Tablo 1.14. Bitkisel yağlarda viskoziteyi azaltma yöntemleri.....	46
Tablo 1.15. Petrodizel ve biyodizelin yakıt özellikleri.....	54
Tablo 1.16. Biyodizel EN 14214 standartları.....	68
Tablo 2.1. Fıstık yağı özellikleri.....	71
Tablo 2.2. Fıstık ve kabak çekirdeğine ait yağ asitleri kompozisyonu.....	72
Tablo 2.3. GG-25 dökme demire ait kimyasal bileşim.....	89
Tablo 2.4. GG-25'e ait fiziksel özellikler.....	89
Tablo 2.5. Emme ve egzoz supapları kimyasal bileşim.....	90
Tablo 2.6. Kaplama işleminde kullanılan plazma ark sprey parametreleri.....	96
Tablo 2.7. Deney Motoruna ait teknik özellikler.....	99
Tablo 2.8. Alternatör teknik özellikleri.....	99
Tablo 2.9. Formüllere ait kısaltma ve birimler.....	100
Tablo 2.10. Bosch Marka BEA-350 Emisyon Cihazının Ölçüm Aralığı ve Hassasiyeti.....	101
Tablo 3.1. YFY esterleşme maks. ve min. verim parametreleri.....	111
Tablo 3.2. KÇY esterleşme maks. ve min. verim parametreleri.....	112
Tablo 3.3. FYME ve karışımlarının fizikokimyasal özellikleri.....	113

Tablo 3.4.	KYME ve karışımları fizikokimyasal özellikler.....	115
Tablo 4.1.	3.Yük değeri altında biyodizel FÖYT değerlerinin D-2 yakıtı göre değişim yüzdeleri.....	125
Tablo 4.2.	Biyodizel yakıtların D-2 yakıtı göre fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişim oranları.....	125
Tablo 4.3.	Yüke göre kaplanmış motorda meydana gelen FÖYT değişim yüzdeleri.....	126
Tablo 4.4.	Yüke göre kaplanmış motorda meydana gelen FÖET değişim yüzdeleri.....	133
Tablo 4.5.	Normal ve kaplanmış motora ait 3. yük altında % verim değişim miktarları.....	142
Tablo 4.6.	Demir borürlerin fiziksel özellikleri.....	192
Tablo 4.7.	Altlık ve kaplama tabakalarına ait ısı iletim katsayı değerleri	208

KISALTMALAR LİSTESİ

ASM	: American Society for Materials
ASTM	: American Society for Testing and Materials
API	: Amerikan Petrol Enstitüsü
EGS	: Egzoz Gaz Sıcaklığı
FÖET	: Fren Özgül Enerji Tüketimi
FÖYT	: Fren Özgül Yakıt Tüketimi
YT	: Yakıt Tüketimi
FTV	: Fren Termal Verimi
FYME	: Fıstık Yağı Metil Esteri
KM	: Kaplanmış Motor
NM	: Normal Motor
KÇY	: Kabak Çekirdeği Yağı
KYME	: Kabak Çekirdeği Yağı Metil Esteri
ÖYT	: Özgül Yakıt Tüketimi
PPM	: Milyondaki Partikül Miktarı
SYA	: Serbest Yağ Asitliği
TYM	: Termal Yalıtımlı Motor

SEMBOLLER LİSTESİ

B₂O₃	: Bor Oksit
BN	: Bor Nitrit
Mg₃B₂	: Magnezyum Borit
TiB₂	: Titanyum Diborit
B₄C	: Bor karbür
SiC	: Silisyum karbür
Cr	: Krom
W	: Tungsten (Wolfram)
Mo	: Molibden
H₂SO₄	: Sülfürik asit
HCl	: Hidro klorik asit
CH₃-(CH₂)₁₆-COOH	: Stearik Asit
CH₃-(CH₂)₁₄-COH	: Palmitik Asit
C₁₇H₃₃COOH	: Oleik asit
C₁₇H₃₁COOH	: Linoleik asit
C₁₇H₂₉COOH	: Linolenik asit
C₁₉H₃₁COOH	: Arachidonik asit
NaOH	: Sodyum hidroksit
KOH	: Potasyum hidroksit
CO₂	: Karbondioksit
CO	: Karbon monoksit
HC	: Hidro karbon
NO_x	: Azot oksit
cSt	: Kinematik viskozite birimi
ρ	: Yoğunluk
η	: Dinamik viskozite
μm	: Mikrometre

1.GİRİŞ

Malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek için birçok yöntem uygulanmaktadır. Bu yöntemler genel olarak yüzey modifikasyon (geliştirme) yöntemleri olarak adlandırılmakta olup, malzemeye fiziksel, kimyasal, termal veya termokimyasal olarak uygulanabilmektedir. Bu işlemler neticesinde malzemenin özgün karakteristikleri değiştirilebilmekte ve geliştirilebilmektedir. İhtiyaca göre aşınmaya, korozyona ve her türlü deformasyona karşı dayanıklı hale getirilebilmekte ve servis ömürleri artırılabilir. Bahsedilen uygulamalar esnasında malzeme mühendisliğinin önemli bir dalı olan yüzey mühendisliği devreye girmekte ve talep edilen özelliklere sahip malzemelerin üretimi kolaylaşmaktadır.

Malzemenin yüzey özelliklerini değiştirmeye yönelik her türlü işleme “yüzey işlemleri” ve bu amaçla kullanılan teknolojilere de “yüzey teknolojileri” denmektedir. Uygulanan yüzey ve yapısal modifikasyon işlemleriyle, malzemelerin servis ömürleri ve yüzey kalitesi artırılmakta olup ağır çalışma şartlarına dayanıklı ileri teknoloji mühendislik malzemeleri ortaya çıkmaktadır (Özel vd., 2006).

İçten yanmalı motorların çalışma şartları göz önüne alındığında; özellikle yanma odası elemanlarının yüzeyinde yüksek sıcaklık, yüksek basınç, düzensiz termal gerilmeler ve şoklar, sürtünme, aşınma, asidik ortam, koroziv ortam gibi yanmanın doğasından kaynaklanan, malzeme için arzu edilmeyen şartlar meydana gelmektedir. Bu şartlar ilerleyen tekrarlı süreçlerde, malzeme yüzeyinde deformasyon ve hasarlara sebep olarak yüzey kalitesini bozmakta ve devamında ise motorun çalışma veriminin düşmesine sebep olabilmektedir. Buna bağlı olarak meydana gelen kalitesiz bir yanma ise zararlı emisyon üreterek çevreye zarar verebilmektedir.

Bu noktada yüzey modifikasyonları, ortaya çıkan bu negatif etkileri engellemede yada tamamen gidermede en etkin çözüm yolu olarak görülmektedir. Motor parçalarının yüzeyini ısı iletimi düşük malzeme ile kaplamak, yanma odasında termal izolasyon sağlayacağı için yanmanın verimini etkileyecek, yakıt tüketim değerlerini düşürerek yakıt ekonomisine pozitif katkı sağlayacaktır. Diğer taraftan yanma odasında oluşacak adyabatik ortam ile enerji verimliliği artacaktır.

Enerji tüketimi ve eldesi gelişen ve gelişmekte olan ülkeler için önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Öyle ki; enerji gereksinimi küresel ölçekte büyük krizlere hatta savaşlara sebep olabilmektedir. Yakın tarihe bakıldığında bunun somut örneklerini görmek mümkündür. Enerjiyi elinde tutan veya kontrol eden ülkeler dünya konjonktüründe söz sahibi hatta belirleyici olabilmektedir. Günümüzde enerji kaynaklarının başında fosil esaslı yakıtlar gelmekte olup dünya coğrafyasında tüm toplumlar ve ülkeler bu kaynağa sahip olma bakımından maalesef eşit şansa sahip değildirler. Bu durum ise enerji kaynağı zayıf olan ülkeleri alternatif enerji kaynakları aramaya yöneltmiştir.

Gelişme hızı, uyguladıkları ekonomik politika, siyasal gelişme, nüfus artışı, sahip oldukları enerji kaynakları ve iklim koşulları ülkelerin enerji tüketimini etkilemektedir. Bu nedenle alternatif enerji kaynaklarına ilgi artmıştır. Bu kaynaklar arasında yenilenebilir biyokütle enerjisinin önemi büyüktür. Bitkisel ve hayvansal kökenli tüm maddeler “Biyokütle Enerji Kaynağı”, bu kaynaklardan üretilen enerji ise “Biyokütle Enerjisi” olarak tanımlanmaktadır (Özçimen vd, 2000).

Günümüzde motorlu taşıtların temel yakıt kaynağı petrol kökenlidir. Petrolün tükenebilir bir kaynak olması petrole alternatif olacak yeni yakıtların araştırılarak ortaya konmasını kaçınılmaz hale getirmiştir. Bu konuda bitkisel yağlar ön plana çıkmaktadır (Ulusoy, 2000). Saf bitkisel yağların yakıt olarak dizel motorlarda direkt kullanımı bazı sakıncaları da beraberinde getirmektedir. Bunlar; yağın yüksek viskozitesi, asit bileşimi, bağımsız yağ asidi içeriği, oksidasyon nedeniyle yapışma, depolama yanma esnasında polimerizasyon ve yanmayla alakalı problemlerdir. Bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için ham bitkisel yağa birçok farklı metot uygulanmaktadır (Öztürk, 2010).

Özellikle bitkisel yağların doğasından kaynaklanan yüksek viskozite değerleri, motorlarda yakıt püskürtme esnasında zayıf atomizasyon ve enjektörlerde tıkanma gibi motora zarar verebilecek ve motorun verimli ve düzenli çalışmasını engelleyecek hatalara sebep olmaktadır. Bitkisel yağların doğasından kaynaklanabilecek bu sorunları ortadan kaldırmak, olumsuz yönlerini iyileştirmek ve verimli bir yakıt olarak kullanılabilmesi için bazı fiziksel ve kimyasal özelliklerinin rehabilite edilmesi gerekmektedir. Motorlarda yakıt olarak kullanılacak yağların özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla uygulanan başlıca yöntemler; seyreltme, mikro emülsiyon oluşturma, piroliz ve transesterifikasyon yöntemleridir.

Bitkisel yağların bu negatif özelliklerini ortadan kaldırmak için dünyada en yaygın olarak uygulanan yöntem transesterifikasyon yöntemidir. Bu yönteme göre bitkisel yağlar veya hayvansal yağlar bir katalizör (sodyum veya potasyum hidroksit) eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile (metanol veya etanol) reaksiyona sokulur. Bu reaksiyona transesterifikasyon (esterleştirme) reaksiyonu, açığa çıkan ürüne ise biyodizel denmektedir. Biyodizel saf olarak veya her oranda dizel yakıt ile karıştırılarak, motor üzerinde herhangi bir modifikasyona gerek kalmadan veya küçük değişiklikler yapılarak yakıt olarak kullanılabilir (Emiroğlu, 2007).

Son yıllarda, içten yanmalı motor teknolojisinde performans artırma ve emisyon değerlerini düşürmeye yönelik çalışmalar büyük bir ivme ile devam etmektedir. İçten yanmalı bir motorda yanma odası elemanlarının yüzey kalitesi, motor performansı ve egzoz emisyonu gibi parametreler birbirleriyle direkt olarak bağlantılı unsurlardır. Bu elemanların yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi, yanma verimini etkileyeceği için motor performansını dolayısıyla egzoz emisyon değerlerini de pozitif yönde değiştirecektir.

Motorun çalışması esnasında, yanma odası elemanları, gerek çalışma ortamı (yüksek sıcaklık, basınç, korozyon gazları vb.) ve gerekse alçaktan yükseğe, devir aralıklarında tekrarlı zorlamalar altında, tribolojik deformasyonlara maruz kalmaktadır. Bu deformasyonlar malzeme yüzeyinden başlayarak, iç yapısına kadar ilerlemekte ve malzemede hasara sebep olabilmektedir. Motor parçalarında meydana gelen bu deformasyonlar motorun bir süre sonra verimli çalışmasını engellemekte, yakıt tüketiminde artışa ve zararlı gaz emisyonlarına neden olabilmektedir.

İçten yanmalı motorlarda yakıtın yanmasıyla büyük miktarda ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır fakat açığa çıkan bu enerjinin yaklaşık üçte ikisi etkin şekilde kullanılmayıp kaybolmaktadır. Kayıp ısı enerjisinin yaklaşık üçte biri soğutucuya diğer üçte biri ise egzoz gazları vasıtasıyla dış atmosfere atılmaktadır. Kalan enerjinin sadece üçte birlik kısmı kinetik enerjiye çevrilebilmekte ve verimli bir şekilde kullanılabilir. Teorik olarak termodinamiğin ikinci kanununa göre eğer ısı kaybı düşürülebilirse termal verimin artacağı bilindiğinden bu durum göz önüne alınarak yanma odası elemanları yüzey modifikasyon yöntemleri kullanılarak; termal yalıtım, düşük sürtünme ve yüksek aşınma direncine sahip ince bir tabaka şeklinde kaplandığında, enerji kayıpları azaltılıp yüzey deformasyonları minimize edilebilir.

Yapılan çalışma boyunca temel kaplama yöntemi olarak borlama yöntemi ve plazma sprey yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışma ile içten yanmalı dizel bir motorun silindir gömleği, piston üst yüzeyi ve supapları bor içerikli malzeme ile borlama yöntemi ile kaplanarak yüzeylerinde inter metalik, ısı iletimi düşük bir yalıtım tabakası elde edilmiştir. Elde edilen motor ise Termal Yalıtımlı Motor (TYM) olarak adlandırılmıştır. Kaplama tabakasının fiziksel özellikleri sayesinde malzemenin yüzeyi her türlü deformasyon, aşınma ve korozyona karşı korunmuş, yüzey mukavemeti artırılmış, yüzey sürtünme katsayısı düşürülmüştür.

Kaplama işlemleri neticesinde yanma odası yüzeylerinde termal yalıtım sağlanmıştır. Bu sayede yanma sonu sıcaklığı arttığından, yanmamış HC'ların yanmaya iştiraki sağlanarak yanma verimi artırılmıştır. Artan yanma verimi ve yanmamış HC'larında yanmaya iştiraki ile egzoz emisyon değerleri düşmüş, termal izolasyon vasıtasıyla da soğutma sistemi için harcanacak enerjinin verimli bir şekilde kullanılmıştır. Kaplama işlemi neticesinde yüzeyde termal şoklara dayanıklı, sürtünme, aşınma ve korozyon direnci yüksek bir tabaka elde edildiğinden yanmanın olumsuz etkileri bertaraf edilmiş, malzeme yüzeyleri korunarak servis ömürleri uzatılmıştır.

1.1.Bor Elementi

Bor, kökeni Buraq/Baurach (Arapça) ve Burah (Farsça) kelimelerinden gelen ağırlıklı olarak metalimsi davranış gösteren periyodik cetveldeki IIIA grubunda yer alan, karbon ve silisyum elementlerine benzerliği en fazla ve oksijene karşı ilgisi çok yüksek olan bir elementtir. Bor elementi; doğada sırasıyla %19.10-20.31 ve %79.69-80.90 oranında, B10 ve B11 ile gösterilen 2 adet dengeli izotopa sahiptir (Kistler ve Helvacı, 1994). İlk defa 1808 yılında Gay-Lussac ve Jacques Thenard ile Sir Humphry Davy Bor Oksit'in Potasyum ile ısıtarak saflığı % 50'den fazla olmayan koyu renkli ve yanıcı özellik gösteren bor elementini elde etmişlerdir. 1895 yılında Henry Moissan borik asit ve magnezyum'u indirgeme işlemine tabi tutarak yaklaşık %86 saflıkta ve yüksek miktarda elementel bor elde edebilmiştir. Moissan Prosesi günümüzde de ticari olarak düşük saflıkta amorf bor elementi eldesinin temelini oluşturmaktadır. 1909 yılında ise Weintraub elektrik ark ocağında BCl_3 dekompoze ederek % 99 saflıkta bor elementi elde edilmiştir. İlerleyen zamanlarda yüksek saflıkta bor elementi elde etmek için farklı yeni yöntemler geliştirilmiştir (Baudis ve Fichte, 1995).

Kimyasal olarak ametal bir element olan kristal bor, normal sıcaklıklarda su, hava ve hidroklorik/hidroflorik asitler ile soy davranış göstermekte olup sadece yüksek konsantrasyonlu Nitrik Asit ile sıcak ortamda Borik Asit'e dönüşebilmektedir. Öte yandan yüksek sıcaklıklarda saf oksijen ile reaksiyona girerek Bor Oksit (B_2O_3), aynı koşullarda nitrojen ile Bor Nitrit (BN), ayrıca bazı metaller ile Magnezyum Borit (Mg_3B_2) ve Titanyum Diborit (TiB_2) gibi endüstride kullanılan bileşikler oluşabilmektedir (Komisyon(a), 2002; Komisyon(b), 2003; Altun,2005; Çalık, 2002).

1.2.Bor Elementinin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bor; ergime ve kaynama sıcaklığı ve termal dayanımı çok yüksek olan bir element olup karbon esaslı elmas madeninden sonra dünyanın en sert ikinci madenidir. $20^\circ C$ 'deki elektrik geçirgenliği düşük olsa da, ısınmasıyla birlikte elektrik geçirgenliği ciddi anlamda artış göstermektedir. Öyle ki $600^\circ C$ civarında, oda sıcaklığına oranla bu katsayı 100 misli artmaktadır. Bor elementinin saydam olmayan siyah amorf yapısının yanında 4 değişik kristal yapısı daha vardır (URL-2-2011).

Borun atom numarası 5, atom ağırlığı 10.81, atom çapı 1.78 Å(7) ve ergime noktası 2400°C olup periyodik sistemin III. grubunda yer alır. Bor $2.33 \pm 0.002 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluklu kristal ve 2.3 gr/cm^3 yoğunluklu amorf olmak üzere iki şekilde bulunur. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri Tablo 1.1.'de, bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri ise tablo 1.2.'de verilmiştir (Taşcı,1993).

Tablo1.1. Kristalin borun yapısı ve kafes parametreleri(Taşcı,1993).

Kristal Şekli	Kafes Parametreleri(A ⁰)	
	B	C
Tetragonal	8,13	8,57
Hegzagonal	9,54	11,98

Tablo 1.2. Bor ve bazı bileşiklerin sertlikleri (Taşcı,1993).

Malzeme	Mohs Sertlik
Bor (Element)	9,3
Bor Karbür(B ₄ C)	9,32
Bor Nitrür(BN)	1,2
Elmas(standart)	10

1.3.Bor Ürünleri

Yaygın olarak kullanılan bor bileşikleri aşağıda özet olarak verilmiştir.

1.3.1.Boridler

Metalik karaktere sahip bor bileşikleridir. Metallerle veya metal oksitler ile borun reaksiyonu sonucu elde edilirler. Ticari olarak metal karışımların ve borun; alüminyum, magnezyum veya karbon ile indirgenmesi ile elde edilirler. Boridler yüksek ergime noktasına, yüksek sertliğe ve iyi bir kimyasal stabiliteye sahiptirler. Oksidasyona karşı dirençlidirler. Bu nedenle, metal yüzeylerinin kaplanmasında, ısıya dayanıklı kazan ve buhar kazanları yapımında, korozyona dayanıklı malzeme üretiminde ve elektronik sanayinde kullanılırlar (Ediz vd., 1997). Metal borürler yüksek mukavemete, yüksek sertliğe, yüksek aşınma dayanımına, yüksek ergime noktasına ve kimyasallara karşı yüksek

dirence sahiptirler. Özellikle, ısınmaksızın yüksek akım geçirebilen iletkenler, elektrik arkı oluşturmada elektron emitterleri, sensörler, güneş pilleri, nükleer reaksiyonlarda radyasyon zırhlayıcılar, uçak sanayi ve otomotiv için hafif zırhlar, süper iletkenler, yarı iletkenler, titreşim söndürücü malzemelerde kullanılırlar (TMMOB Bor Raporu, 2003).

1.3.2.Bor Karbür

Bor-karbon sistemindeki tek bileşik olan bor karbür, genellikle granür katı olarak elde edilir. Masif ürün olarak elde edilmek istendiğinde, 1800 -2000 °C’de grafit kalıplarda preslenir. Saf bor karbür kristalleri hafif parlak görünümündedir. Yoğunluğu 2,52 gr/cm³, ergime sıcaklığı 2450 °C’dir. Sıcak preslenmiş bor karbür, aşındırıcı parçalarda, contalarda, seramik zırlı yüzeylerin yapılmasında kullanılır. 2000 °C’nin üzerindeki sıcaklıkların ölçülmesinde termo çift olarak kullanılır. Sertliği nedeniyle abrasiv malzeme yapımında kullanılır (Ediz vd., 1997).

1.3.3.Bor Nitrür

Bor nitrür genellikle hegzagonal yapıda oluşur. Hegzagonal sistemde iken beyaz, talk’a benzeyen, 2,27 gr/cm³ yoğunluğunda bir tozudur. Kübik sistemde ise oldukça serttir. Teorik yoğunluğu 3,45 gr/cm³ tür ve iyi bir elektrik izolatörüdür. Ergitilerek masifleştirilmiş bor nitrit büyük bir kimyasal dirence sahiptir. Kübik yapıdaki bor nitrit çok iyi bir abrasiv malzemedir. Bu özelliğinden dolayı, kesici aletlerin yapımında ve sert alaşımların işlenmesinde kullanılır (Ediz vd., 1997).

1.4.Borlama

Bor, genellikle demir esaslı malzemelerde alaşım elementi veya yüzey sertleştirme amacı ile kullanılmaktadır. Borlama ise difüzyon mekanizmasıyla gerçekleştirilen termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olup metalik yüzeye, yüksek sıcaklıklarda borun yayılımı işlemidir.

Malzeme yüzeyinde bor yayılımı başlangıç safhasında tane sınırları, dislokasyonlar ve atom boşlukları gibi mikro hataların bulunduğu bölgelerde başlar, yüzeylerdeki pürüzler ve çizikler gibi makro hataların olduğu metal yüzeyindeki daha reaktif noktalarda da Fe₂B çekirdeği oluşur ve büyür. Bu oluşumu borca daha zengin bileşiklerin çekirdeklenmesi takip eder (Badini ve Mazza, 1988)

Borlama işleminin uygulanması sırasında, bor atomları ısı etkisiyle metal yüzeyine difüze olurlar ve ana metal atomları ile uygun borürler meydana getirirler. Bor kaynağının fiziksel durumu katı, sıvı ya da gaz olabilir. Borlanacak malzemeler, özelliklerine göre 700– 1000 °C sıcaklık aralığında, yaklaşık 1-12 saat süre ile katı, macun (pasta), sıvı veya gaz fazındaki bor verici ortamlarda bekletmek suretiyle borlama işlemine tabi tutulurlar (ASM Handbook Vol.4 (a) 1991).

Borlama işlemi demir ve demir dışı birçok alaşım ile sinter karbür ve seramik malzemelere uygulanabilir. Borlama ortamı ise, bor kaynağı (bor veya bileşikleri) (B_4C , $Na_2B_4O_7$, H_2B_6), aktivatör, (KBF_4), dolgu veya deoksidanlardan oluşur. Dolgu malzemesi ve deoksidediciler, borlama işlemi sırasında oksijeni tutarak redükleyici bir ortam meydana getirirler ve borlama işlem malzemesinin borlanan malzemeye yapışmasını önlerler. Borlama ısıl işlemi sırasında kullanılan yöntem, borlama karışımının bileşimi, borlama yapılacak malzeme cinsi, işlem süresi ve sıcaklığı elde edilen katmana etki eden faktörlerdir (Turhan, 2008).

Difüzyon yoluyla çeliğin yüzeyine sert tabakanın oluşturulması işleminde, difüzyon hacimsel yayınma ile kontrol edilmektedir. Çeliğin iki klasik yüzey sertleştirme işlemi olan sementasyon ve nitrasyon, matris malzeme içerisinde C ve N'un yayınma esasına dayanmaktadır (Bozkurt,1984; Matuschka,1980). Benzer şekilde bor difüzyonu da kütle taşınilma ile gerçekleşmektedir. Bunun yanında matris metalin içerdiği alaşım elementlerinin bor difüzyonuna tek tek ya da birlikte etkileri de mevcuttur. Borlama prosesi iki temel adımda gerçekleşmektedir. İlk adımda, tepkime bileşenleri arasındaki reaksiyonlar orta seviyede ve cismin yüzeyinde meydana gelir. Parçalanmış partiküller, yüzeyde çok hızlı bir şekilde, sıkı ve ince bir borür tabakası oluştururlar. Bu oluşumun süresi sıcaklığa bağlıdır ve 900 °C'de 10 dakika civarındadır. Bu aşama, toplam borlama süresine oranla çok kısa bir zaman aldığından ihmal edilebilir. İnce ve sağlam olan birinci tabakanın oluşumundan hemen sonra ikinci adım başlar. Bu adım yayınma kontrollüdür. Oluşacak borlu tabakaların kalınlığı, yayınma kanunlarına uygun olarak borlama süresi ve sıcaklığına bağlı olarak parabolik bir artış göstermektedir. Her malzemenin içeriğine bağlı kendine özel bir yayınma katsayısı vardır (Lu, 1983).

1.5.Borlama Yöntemleri

Borlama yöntemleri, kullanılan bor kaynağının fiziki durumuna göre belirlenmekte olup, endüstride ve pratikte kullanılan borlama yöntemlerini genel olarak aşağıdaki başlıklarda sıralamak mümkündür.

- Katı ortamda (toz ortamda) borlama-(kutu borlama)
- Macunlama ile borlama
- Sıvı ortamda borlama
- Daldırma yöntemiyle borlama
- Elektroliz yöntemiyle borlama
- Derişik çözeltide borlama
- Gaz ortamda borlama
- Plazma borlama

Katı ortamda (toz ortamda) borlama yöntemi endüstriyel ve pratik uygulamalarda diğer kullanılan borlama yöntemlerine nazaran birçok üstünlüğe sahiptir ve basit kolayca uygulanabilir bir yöntemdir. Bu avantajlarından dolayı pratikte çoğunlukla katı ortam borlama yöntemi (kutu borlama) tercih edilmektedir. Yaptığımız deneysel çalışmada da bu yöntem tercih edildiğinden dolayı aşağıda bu yöntem hakkında detaylı bilgi verilecektir.

1.5.1.Katı Ortam (Toz Ortam) Borlama Yöntemi-Kutu Borlama

Yüzeyi borlanacak malzeme, toz halindeki bor verici ortam içinde 800 - 1000 °C sıcaklıklarda 4 - 10 saat bekletilerek borlama işlemi yapılır. Borlama tozu ısıya dayanıklı paslanmaz çelik saç kutu içine konur ve borlanacak parça bu tozun içine gömülür. Bu toz, parçanın tüm yüzeylerinde en az 10 mm kalınlığında olmalıdır. Kutuların ağzı bir kapak ile kapatılarak önceden belirli bir sıcaklığa ısıtılmış fırına konur ve fırın kapağı kapatılarak fırın içi sıcaklığı borlama sıcaklığına yükseltilir. Bir süre bekletildikten sonra kutu fırından alınarak soğutulur ve parça içinden çıkarılır. Bu sırada çelik kutunun kapağı kutunun üzerinde kendi ağırlığı ile durmalıdır. Sementasyonda olduğu gibi sıkıca kapatılmasına gerek yoktur. Eğer işlem normal atmosfer de yapılacaksa kapak sıkıca kapatılır. Bu yöntem

koruyucu gaz atmosferi içinde de yapılabilir. Yöntem ucuzdur ve özel bir teknik gerektirmez (Uzun, 2002).

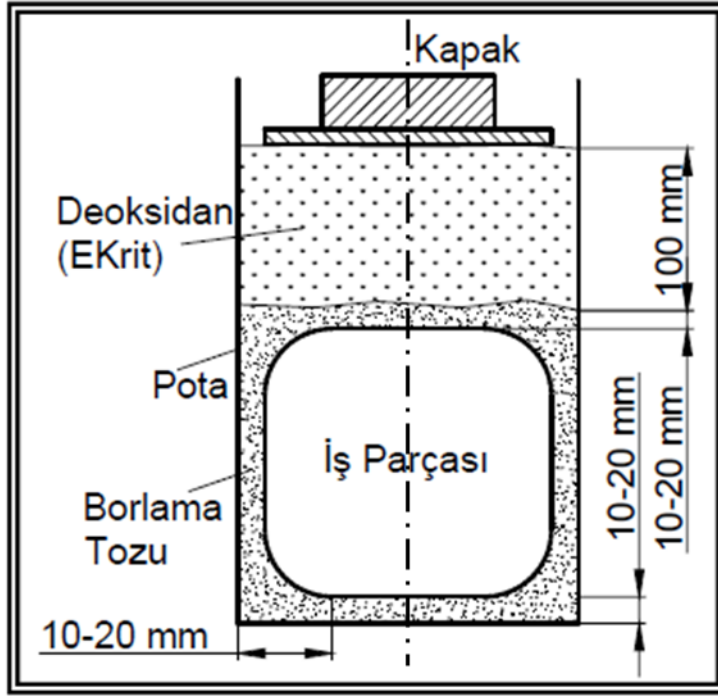
Kutu sementasyona benzeyen bu yöntem soy gaz atmosferinde yapılabildiği gibi sıkı kapatılmış kutularda olmak şartı ile normal atmosferde de yapılabilir. Sistem ucuzdur, özel teçhizat ve teknik gerektirmez (Bozkurt,1984). Ticari alanda katı ortam borlama maddeleri kullanım alanlarına göre sınıflanılarak satılmaktadır(URL-3-2014). Aşağıdaki Tablo 1.3.'te borlama elemanlarına ait teknik bilgiler yer almaktadır.

Tablo 1.3. Borlama elemanları (URL-3-2014).

EKABOR® Borlayıcılar		
Tip	Toz tane boyutu (μm)	Açıklama
Ekabor®1	<150	Yüzeyde maksimum kalite
Ekabor®2	<1000	Mükemmel yüzey tabakası, işlem sonrası kolaylık
Ekabor®3	<2000, >1000	Çok iyi yüzey tabakası, işlem sonrası kolay toz akışkanlığı
Ekabor®HM	<150	Sert metaller için ve küçük çap borular için ideal kalın borür tabaka
Ekabor®-Paste	<100	İnert gaz ortamında kullanılır
Ekabor®Ni	<100	Ni esaslı alaşımlar için
Ekrit®		Oksijeni engelleyici örtü malzemesi,

Katı ortam borlama yöntemi kolay kullanımı, güvenliği, toz karışım kompozisyonunu değiştirebilme imkanı, ekonomik ve az donanım gereksinimi gibi sebeplerden ötürü en çok kullanılan borlama yöntemlerinden birisidir. Yöntemde Şekil 1.1'de görüldüğü gibi numune kutu kenarlarında 10-20 mm borlama tozu yer alacak şekilde yerleştirilerek uygulanmaktadır. Bu şekilde hazırlanan kutular önceden belirlenen süre ve sıcaklıkta fırında işlem yapılmaktadır (Matuschka,1980).

İşlem pürüzsüz, temiz yüzeyli parçaların kutu içerisinde tavllanması esasına dayanmaktadır. Numuneler ısıl dayanımı yüksek 3-5 mm et kalınlığına sahip çelik kutular içerisine ve numune üzerine 10-20 mm kalınlığında bor toz karışımı konarak yapılır. Birçok farklı borlama bileşiği katı ortam borlayıcı elemanı olarak kullanılmaktadır (Volkov ve Aliev, 1975; Kiolin vd., 1970; Komutsu vd., 1974).



Şekil 1.1. Kutu borlama yönteminde numunenin yerleşim şekli (Matuschka,1980).

Yaygın olarak kullanılan bu yöntem, alt tabaka malzemesine bor veya bor karbür bileşiminde aktivatörlerle paketlenerek yapılmaktadır. Bu yöntemin işlem parametrelerinin kontrol yeteneği çok kötü olması ve atık ürünlerin çevreye verdiği zarar gibi dezavantajları mevcuttur. Borlama sıcaklığı, borlanacak malzemenin bileşimine bağlı olarak belirlenmektedir. Borlama işleminin en önemli avantajı ise, borlamadan sonra matris malzemesine istenilen ısıl işlemin yapılabilmesidir (Buytoz ve Somunkıran., 2005).

Borlama işlemi katı, sıvı, gaz, plazma ve iyon implantasyonu gibi yöntemlerle yapılmaktadır. Katı borlama işlemi genel olarak patent altında bulunan yaklaşık %5 B₄C, %5 KBF₄ ve % 90 SiC bileşimine sahip karışım malzemeler kullanılarak yapılmaktadır. Katı borlama işleminde sızdırmaz bir kutu içerisinde bulunan toz karışım içerisine numune yerleştirilir. Belirlenen sıcaklığa kadar ısıtılan kutu belirli bir süre bu sıcaklıkta tutulduktan sonra, soğumaya bırakılır (Güneş ve Taktak, 2012).

Demir esaslı malzemelerde yüksek sıcaklıkta (850-1050 °C) yapılan borlama işlemi ile demir yüzeyine bor yayılması gerçekleşir. Bu yayılma işlemi ile tek fazlı Fe₂B veya iki fazlı Fe₂B + FeB'den oluşan ferrobör tabakası elde edilir. FeB fazı borca zengin olduğundan dolayı kırılabilirliği yüksektir. Bu nedenle iki fazlı Fe₂B + FeB fazı yerine tek fazlı Fe₂B oluşması tercih edilir. FeB'nin ısı genleşme katsayısı (23.10⁻⁶/°C), Fe₂B'nin genleşme katsayısından (7,85.10⁻⁶ /°C) büyüktür. İki fazlı sistemde oluşan Fe₂B ve FeB fazları arasındaki ısı genleşme farklılıkları nedeni ile yüzeyde çatlama oluşur. Bu çatlama önlemek için FeB fazını azaltmak veya FeB fazının oluşmasını önlemek ile mümkündür.

Borlama ortamının temel bileşikleri bor karbür (B₄C), ferrobör ve amorfbor'dur. Ferrobör ve amorfbor'un bor içeriği borkarbüre göre daha fazla olup tabaka kalınlığı artırır fakat borkarbüre göre daha pahalıdır (Komutsu vd., 1974). Silisyum karbür (SiC) ve alümina (Al₂O₃) çözücü olarak görev yapıp reaksiyonda yer almazlar. Bununla birlikte SiC bor miktarını kontrol eder ve borlayıcıların katılmasını engeller. NaBF₄, KBF₄, (NH₄)₃BF₄, NH₄Cl, Na₂CO₃, BaF₂ ve Na₂B₄O₇ aktivatörlerdir. Bunların haricinde Ekabor® gibi tescilli ve patentli özel karışım borlayıcılarda ticari olarak bulunmaktadır (ASM Handbook Vol.4 (b) 1991).

Ticari katı borlama toz karışımlarının bileşimleri aşağıdaki gibidir.

- %5 B₄C, %90 SiC, %5 KBF₄
- %50 B₄C, %45 SiC, %5 KBF₄
- %85 B₄C, %15 Na₂CO₃
- %95 B₄C, %5 Na₂B₄O₇
- %84 B₄C, %16 Na₂B₄O₇
- Amorf bor (%95-97 B)
- %95 amorfbor, %5 KBF₄

1.6.Borlama İşleminin Uygulanabildiği Malzemeler ve Uygulama Alanları

Borlama işlemi yüksek sıcaklık altında (700-1000 °C) malzeme yüzeyine bor ve bor karışımlarının difüzyonu olup, işlemin en önemli parametrelerinden biriside yüksek sıcaklık altında uygulanmasıdır. Borlama işlemi yapılırken borlama yapılacak malzemenin ergime ısısının borlama işlem sıcaklığından düşük olması ve seçilecek malzemenin buna göre seçilmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı bir kısım malzemeler (Zn ve Al) borlama işlemine uygun olmamaktadır.

Borlama işlemi tüm ferro alaşımlara, refrakter metallere (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb), karbürlere (özellikle Co ile bağlı WC) ve Ni esaslı alaşımlara ve Ti ve Ti esaslı alaşımlara başarı ile uygulanabilmekte olup borür tabakalar elde edilebilmektedir (Bozkurt,1984).Yeni geliştirilen metotlar ile Cu ve alaşımlarına da tatbik edilebilmektedir. Fakat düşük ergime sıcaklığına sahip Zn ve Al'a uygulanamamaktadır (Yünker, 2000).

Sıcak ve soğuk şekillendirme de kullanılan makine ve takım parçaları, dövme kalıpları parçalarının yapıldığı çelikler, dökümler ve demir dışı malzemeler servis ömürlerini artırmak için borlanırlar. Ayrıca cam endüstrisi, otomobil, uçak, gemi ve silah sanayinde kullanılan aynı cins malzemeler (çelik, döküm, demir dışı metaller ve sert metaller) borlanmaktadır (Çetin, 2003).

Borlama işlemi, başlıca demir esaslı malzemeler olan yapı çelikleri, sementasyon çelikleri, takım çelikleri, ıslah çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir ve çeliklere uygulanmaktadır. Demir esaslı malzemelere ek olarak başka element ve bileşikleri de borlamak mümkündür. Çelik ve dökme demir alaşımları yanında, demir dışı metal ve alaşımlarına (Ni, Co, Mo, Ti) başarıyla uygulanarak bor tabakaları elde edilmektedir. Titanyum ve titanyum alaşımlarında borlama sonucu aşınmaya dirençli TiB₂ katmanı elde edilmektedir. Bu alaşımların borlama işlemi için tercihen 1000-1200 °C arasında sıcaklıklar seçilmelidir. Refrakter malzemeler üzerinde meydana gelen borür katmanlarının sertlik değeri nikel ve kobalt üzerinde meydana gelen katmana göre çok yüksektir. Borlama işlemi bakır ve alaşımlarında da tatbik edilebilmektedir, fakat çinko ve alüminyum gibi düşük ergime sıcaklığına sahip malzemelere uygulanamamaktadır. Borlanabilen malzemelerin borlama ısıl işlemleri demir esaslı malzemelere uygulanan borlama işleminden farklı değildir (Baştürk, ve Erten, M., 2006).

1.6.1.Demir Esaslı Malzemelerde Borlama Yönteminin Uygulanması

Borlama işlemi uygulanacak malzemelerin, ısıl işlemlere uygunluk, gerekli mekanik dayanım, çok sert ve aşınmaya dirençli borür tabakası oluşturabilme yeteneği gibi özellikleri taşımaları gerekmektedir. Hemen hemen tüm demir esaslı malzemeler; dövme ve dökme çelikler, gri dökme demirler, küresel grafitli dökme demirler, sinterlenmiş demir ve çelikler, takım çelikleri ve diğer çelikler, belirtilen özellikleri sağlarlar ve bor yayınımları ile yüzeyleri sertleştirilebilirler (Matuschka, 1980).

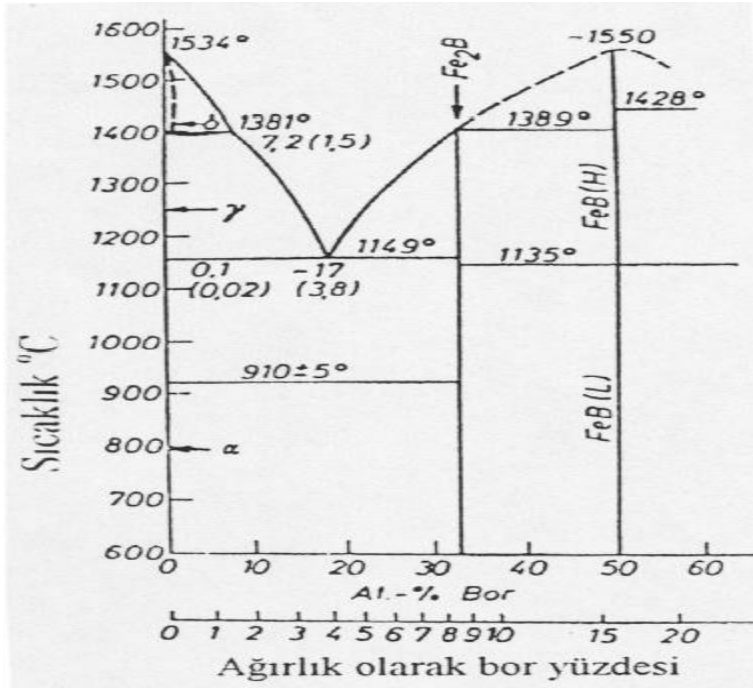
Demir esaslı malzemelerin borlama işleminde, karbürizasyon işleminden farklı olarak malzeme üst yüzeyinde karbonca zengin bölge kademeli olarak azalma eğilimindedir. Malzeme içerisinde tek fazlı veya hem tek hem çift fazın beraber görüldüğü borür tabaka veya tabakalar oluşur. Tek fazlı borür tabaka sadece Fe_2B fazından meydana gelirken, çift fazlı tabaka üst tarafta FeB ve onun altında Fe_2B fazlarından oluşur. Tek veya çift fazlı tabakanın oluşumu bor miktarına bağlıdır (Chatterjee ve Fischer 1977).

Alüminyum ve Silisyum içerikli çelikler hariç, yapı çelikleri, sertleştirilmiş, temperlenmiş, takım ve paslanmaz çelikler çelik dökümler, ticari saf demirler, gri ve dövme dökümler ve sinterlenmiş demir ve çelikler gibi malzemelerin tümüne endüstriyel borlama işlemi uygulanabilmektedir (Fichtl vd., 1972). Kurşunlanmış ve resülfürize edilmiş çelikler sahip oldukları kırılma eğilimleri ve pul pul dökülme özelliklerinden dolayı borlama işlemi önerilmez. Nitrürlenmiş çelikler kırılma hassasiyetlerinden dolayı borlama işlemine uygun değildirler (PDS-4-1990).

Demir esaslı malzemeler 850–1150 °C sıcaklıkta, 2–8 saat sürelerde borlandığında, malzeme yüzeyinde demir–borür (Fe_2B , FeB) fazından oluşan yaklaşık 250µm tabaka derinliğine, yaklaşık 2500 HV0,06 tabaka sertliğine ulaşabilen bir difüzyon tabakası meydana gelir. Bu tabaka dişli forma sahip olup ana malzemeye tutunma mukavemeti çok iyidir ve tabaka özellikleri, işlem parametrelerine bağlı olarak değişir (Çelikyürek vd., 2004).

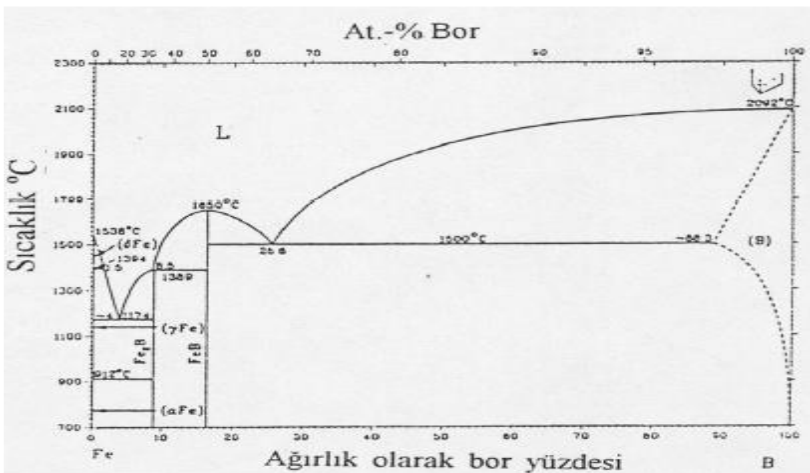
1.6.2.Demir-Bor Denge Diyagramı

Fe-B ikili denge diyagramı (Şekil 1.2), ilk olarak Hansen (1958) tarafından düzenlenmiştir. Bu denge diyagramına göre Fe-B ikili sisteminde ağırlık olarak; % 8.83 bor oranında Fe_2B ve % 16.23 bor oranında FeB , olmak üzere iki tür borür ve ergime noktası 1149 °C olan % 3.8 bor oranında bir ötektik oluşmaktadır (Matuschka, 1980).



Şekil 1.2. Fe-B İkili Denge Diyagramı (Matuschka, 1980).

1986 yılında demir-bor denge diyagramını Şekil 1.3.'de görüldüğü gibi yeniden düzenlemiştir (Massaiski,1986). İlerleyen yıllarda ise deneysel termodinamik ve faz diyagramı verilerini esas alıp, en küçük kareler metodunu uygulayarak, Fe-B faz diyagramını optimize etmek için termodinamik bir model kurulmuştur, kurulan model sonucunda hesaplanan faz diyagramı ve termodinamik özelliklerin, deneysel sonuçlarla oldukça iyi uyum gösterdiğini anlaşılmıştır (Halleman, 1994).



Şekil 1.3. Fe-B İkili Denge Diyagramı (Massaiski, 1986).

1.6.3.Dökme Demir ve Borlama Uygulamaları

Dökme demir malzemeler düşük maliyetli ve kolay üretilebilir malzemeler olup savunma, havacılık, otomotiv sanayi, boru hatları gibi ülkeler için stratejik olan pek çok sanayi kolunun temel ham maddesidir. Dökme demir ismi genel bir tanım olup geniş kapsamlı ve özellikleri çok farklı demir alaşımlarının tamamını kapsar. Dökme demir, sıcakta ve soğukta biçimlendirilmeye elverişli olmayıp döküldüğü şekilde kullanılan bir demir-karbon-silisyum alaşımıdır. Bileşiminde % 4'e kadar karbon ve 3,5'e kadar silisyum bulunur. Demir alaşımları, dökme demirler ve çelik dökümler olmak üzere iki ana bölüme ayrılır. Bileşiminde % 2'ye kadar karbon bulunan demir alaşımları çelik, % 2'den çok karbon bulunan demir alaşımları dökme demir sınıfına girer. Beyaz dökme demir, gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, temper dökme demir, esmer dökme demir gibi çeşitleri mevcut olup aşağıdaki Tablo 1.4.' de kimyasal içerikleri gösterilmiştir.

Tablo 1.4. Değişik tipteki dökme demirlere ait kimyasal kompozisyon

Elementler	Gri Dökme Demir (%)	[*] Beyaz Dökme Demir (%)	Yüksek Dayanımlı Esmer Dökme Demir (%)	[**] Küresel Grafitli Dökme Demir (%)	[***] Temper Dökme Demir (%)
Karbon	2,50-4,00	1,80-3,60	2,80-3,30	3,00-4,00	2,00-3,00
Silisyum	1,00-3,00	0,50-1,90	1,40-2,00	1,80-2,80	1,00-1,80
Manganez	0,40-1,00	0,25-0,80	0,50-0,80	0,15-0,90	0,20-0,50
Fosfor	0,05-1,00	0,06-0,18	0,15 Maks.	0,10 Maks.	0,01-0,10
Kükürt	0,05-0,25	0,06-0,20	0,12 Maks.	0,03 Maks.	0,02-0,17

[*] Isıl işlemle temper dökme demire dönüştürülür.

[**] Bileşiminde 0,01-0,10 magnezyum bulunmaktadır.

[***] Bileşiminde % 0,0005-0,0050 bor ve %0,0005- 0,0150 alüminyum bulunmaktadır.

Borlama, demir esaslı bir malzeme çeşidi olan dökme demir malzemelerde başarı ile uygulanabilmektedir. Yapılan bir çalışmada gri dökme demirin yüzeyini borlamış ve aşınma dayanımını incelenmiştir. Borlu tabakanın aşınma dayanımını yüksek olduğunu tespit etmiştir. Kayma yolunun artmasıyla sürtünme katsayısı numunelerdeki bor tabakası kalınlığına ters orantılı olarak arttığını, artan yük ve hız değerlerinde borsuz numunelerin aşınma miktarlarının borlu numunelere göre daha fazla olduğunu ifade edilmiştir. Borlanmış ve normal dökme demire ait sürtünme katsayılarındaki değişimi gösteren Tablo 1.5. aşağıda görülmektedir (Selam, 1996).

Tablo 1.5. 800-1000 C° sıcaklıklarda ve 2-6 saatte borlanan gri dökme demir ve normal gri dökme demire ait sürtünme katsayıları (Selam, 1996).

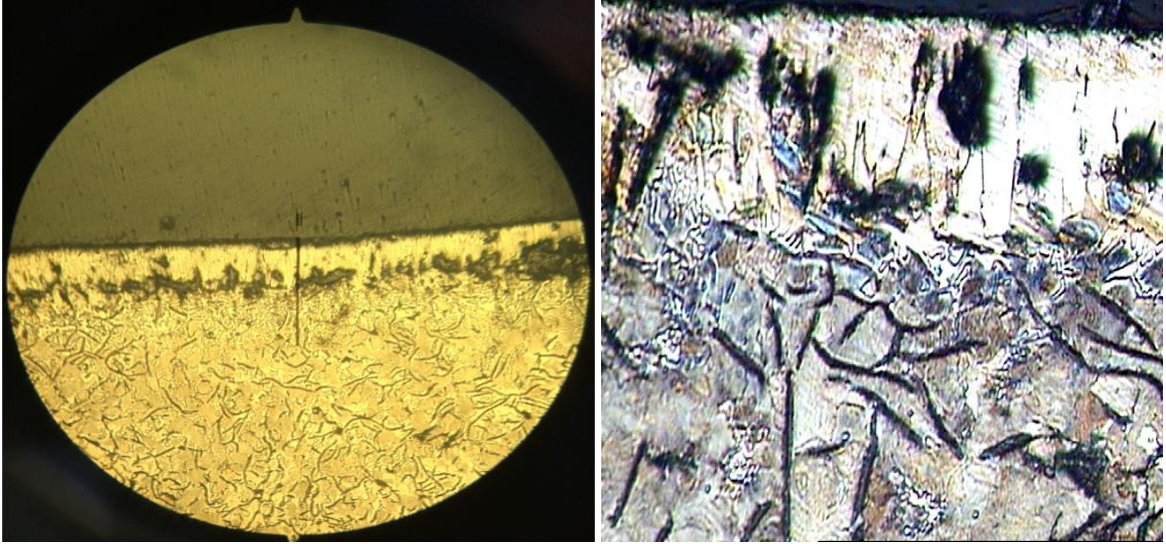
Normal Yük (N)	Kayma Hızı (m/sn)	Kayma Süresi (sn)	Kayma Yolu (m)	SÜRTÜNME KATSAYISI				
				Borlama Sıcaklığı: 900 C°				Borsuz
				2 saat	3 saat	4 saat	5 saat	
50	1	10	10	0,45	0,46	0,40	0,36	0,70
		30	30	0,55	0,60	0,55	0,44	0,76
		80	80	0,70	0,80	0,86	0,70	1,00
		180	180	0,85	0,85	0,73	0,72	1,30
		350	350	0,90	0,87	0,80	0,81	1,25
		650	650	1,10	1,00	1,30	0,95	1,25
		1000	1000	1,10	1,20	1,20	1,05	1,25

GGG 50 malzemede uygulanan borlama işlemi neticesinde borid katmanlarının testere dişi formunda oluştuğu ve katman kalınlığının artan borlama sıcaklığı ve süresi ile arttığı bildirilmiştir (Güneş vd., 2011). Ağırlıkça sırasıyla 0.01, 0.3 ve 0.98 bakır içeren GGG-50, GGG-60 ve GGG-80 küresel grafitli dökme demir malzemenin borlanması neticesinde, artan bakır oranı ile tek fazlı Fe₂B borid katmanının meydana geldiği, Si-ferrit bölgesinin azaldığı ve borid katmanı ile matriks arasında süreksiz grafit büyümesinin önlenildiği tespit edilmiştir. Ayrıca daha yüksek borlama sıcaklık ve süresinin daha kalın borid katmanı oluşturduğu ve yüksek bakır içerikli küresel grafitli dökme demir kullanıldığı zaman borid katman kalınlığının azaldığı tespit edilmiştir (Şen vd., 2004).

Küresel grafitli dökme demir (KGDD) malzemeler termo-kimyasal olarak başarıyla borlanabilmekte ancak KGDD malzemelerin kimyasal kompozisyonu, kaplama kalitesi üzerinde oldukça etkili olmaktadır. Örneğin silisyum içeren çeliklerin borlanması sakıncalı olduğunu belirtilmektedir. KGDD malzemelerin bor kaplanması için önerilenlerden daha çok parametre olduğu alaşimsız veya düşük seviyede alaşım elementi içeren KGDD malzemelerin yüzeyinde oluşturulan borür tabakasının, kaplama - matris ara

yüzeyinde karbon esaslı bir ara bölge oluştuğu ve bu tabakanın zayıf olması sebebiyle, kaplama tabakasında kısmi ayrılmalar olduğunu belirtilmiştir. Alaşım elementi olarak % 1 bakır ilavesinin karbon birikimini engellediği ve tek fazlı Fe₂B fazının oluşmasını sağladığı belirtilmiştir. Bor kaplanmış KGDD malzemenin kaplama tabakasında, grafit kürelerinin dağılımıyla kompozit karakterli bir yapı sergilendiğini belirtilmiştir. Bu sayede, sürtünme katsayısı çeliklere göre oldukça düşük seviyelere çekilebildiğini ve KGDD'lere önerilen bileşim ve işlem parametrelerine bağlı olarak, borlama endüstriyel boyutlarda uygulanabilirliği belirtilmiştir (Şen, 1997).

Aşağıda Şekil 1.4.'de bor ile kaplanmış dökme demire ait kesit görüntüleri görülmektedir. Resimlerden de görüldüğü gibi borlanmış yüzey ve borlama işleminin karakteristik özelliği olan testere dişli yapı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 1.4. Borlanmış dökme demire ait optik kesit görüntüleri

1.7. Borür Tabakası Oluşumu, Tabakanın Yapısal, Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

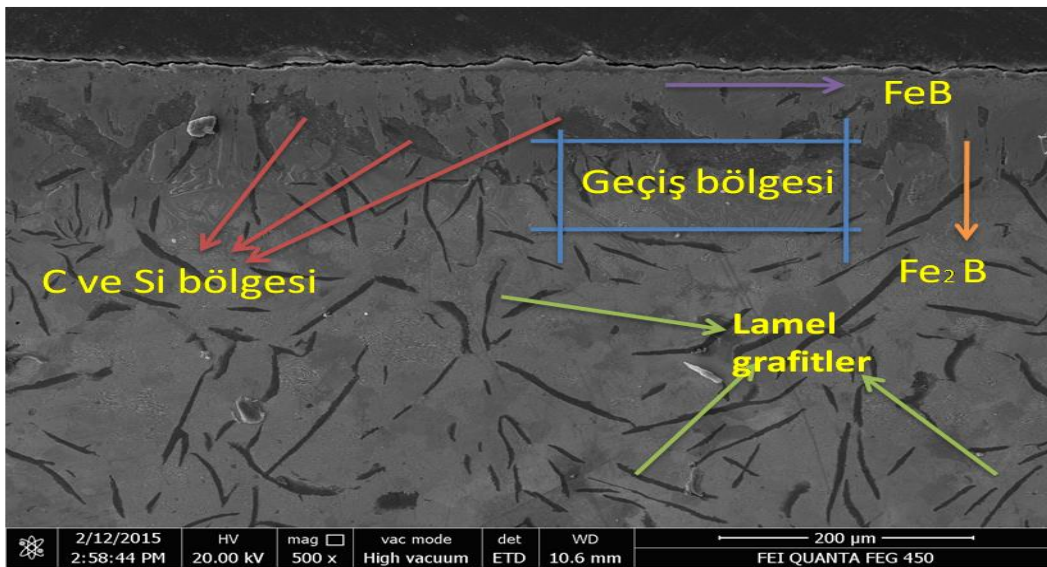
1.7.1. Borür Tabakası

Borlama esnasında difüzyonla beraber bor atomları malzeme yüzeyinden içeri doğru ilerleyerek yapı içerisinde bor bileşikleri oluşturur. Meydana gelen bor bileşikleri tek fazlı veya çok fazlı bir yapı meydana getirebilir. Bor tabakasının morfolojisi, kalınlığı ve faz kompozisyonu esas malzemedeki alaşım elementlerinden etkilenir. Borlanmış tabakanın mikro sertliği önemli oranda borlanmış tabakanın kompozisyonuna ve yapısına bağlı olup esas metalin kompozisyonuna da bağlıdır. (Matuschka,1980; Fichtl, 1983; Chatterjee ve Fischer 1981; Dearnley ve Bell, 1985; Galibois vd., 1980).

Borlama işleminde, borun yüzeye yayınması sonucu parçanın en üst bölümünde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, onun altında yayınma bölgesi ve en iç kısımda ise matrisi oluşturan çekirdek bölgesi yer alır. Yüzeyde borca zengin FeB en üstte oluşurken, onun hemen altında daha homojen ve sünek olan Fe₂B olmak üzere iki demirborür fazı meydana gelir. Termal uzama katsayıları farklı olan bu iki fazın, yapıda aynı anda birlikte bulunmaları istenmez. Yapıda bulunan krom (Cr), tungsten (W), molibden (Mo) vs. alaşım elementleri, bor elementine karşı gösterdikleri yüksek afiniteden dolayı, tabaka kalınlığının düşmesine neden olurlar (Bhushan ve Gupta, 1991).

Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzeme bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olmak üzere ya düz bir şekilde (yüksek alaşımli çeliklerde) ya da parmaksı (zig zag) şekilli olabilir. İşlem süresi arttıkça parmaksı şekilli borür tabakalarında maksimum ve minimum kalınlıklar arasındaki farklar artar (Özsoy, 1988).

Aşağıdaki Şekil 1.5.'de borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü görülmektedir. Şekilde görüldüğü gibi borlama sonrası oluşan ve literatürde adı geçen tüm terimlerin karşılığı yer almaktadır. En üstten başlanırsa; FeB tabakası, hemen altında Fe₂B tabakası borlama ile bor difüzyonu ile yüzey altına itilen ve dökme demir kimyasal bileşiminde yoğun şekilde görülen C ve Si yoğunluklu bölgeler ve bu yapının hemen altında ise geçiş bölgesi diye adlandırılan bölge ve en altta ise tipik dökme demire ait lamel grafitler görülmektedir. Fe₂B'nin testere dişini andıran ve dökme demirin içine işleyen morfolojisi dikkat çekmektedir.



Şekil 1.5. Dökme demire ait borlama sonrası SEM mikro yapı fotoğrafı

Borür tabakasının özellikleri başta kullanılan malzemenin cinsine, borlama ortamına, sıcaklığa, zaman ve ısıl işlemlere bağlı olarak değişmektedir. Bu unsurlara bağlı olarak çeliklerde borür tabakası ve geçiş bölgesi oluşmaktadır (Delikanlı vd, 2003).

Borlama sonucu oluşan borür tabakasının özelliklerini şöyle sıralayabiliriz (Türktekin, 1998).

- 1- Çok yüksek sertlik
- 2- Yüksek ısınma direnci
- 3- Alt yüzeye iyi tutunma özelliği
- 4- Yüksek sıcaklık dayanımı
- 5- Yüksek ısılarda sertliğini koruma özelliği
- 6- Demir malzemelerinkine uygun genleşme kat sayısı

Borür tabakasının karakteristik özelliği dış şeklinde bir yapıya sahip olmasıdır. Çeliklerdeki alaşım elementi ve karbon oranının artmasıyla bor difüzyonu yavaşlamaktadır. Bunun sonucu olarak borür tabakasında hem kalınlık azalmakta, hem de borür tabakası ile ana malzeme ara yüzeyindeki dış şeklindeki yapı düzleşmektedir. Alaşımız çeliklerde borlama şartlarına bağlı olarak tek fazlı (FeB) yada çok fazlı (FeB +Fe₂B) borür tabakası oluşur. Borlama ortamındaki bor miktarı FeB fazı oluşumu için gerekli olan miktardan fazla ise uygun sıcaklık ve zaman şartlarında borür tabakasında FeB fazına ilaveten Fe₂B fazı da oluşur. Alaşımli çeliklerde ise bunlara ilaveten alaşım elementine bağlı olarak Cr₂ B, TiB₂, NiB₂, CoB gibi bileşiklerden biri yada birkaçı oluşabilir (Yünker, 2000).

FeB ve Fe₂B optik mikroskop altında kontrast farkıyla birbirlerinden ayırt edilmesi mümkün olmuştur. FeB fazı Fe₂B fazından daha koyu renkte olduğu görülmüştür. Ayrıca FeB ile Fe₂B matris ara yüzeyindeki yapı kolonsaldır. FeB fazı, Fe₂B üzerinde oluşmakta ve Fe₂B fazından daha fazla bor içermektedir. Bor tabakasının kalınlığı borlama sıcaklık ve süresine bağlı olarak artış göstermektedir (Çeğil ve Şen, 2002).

1.7.2.Fe₂B ve FeB Fazlarının Oluşum Mekanizması ve Fiziksel Özellikleri

Borlama üzerine yapılan ilk çalışmalarda borür tabakanın sadece Fe₂B fazından meydana geldiği düşünülmekteydi, fakat Mösbauer elektron spektroskopu ile yapılan ölçümlerde ilk oluşan borür fazının (Fe₂B) üzerinde FeB fazının bulunduğu ve en dış yüzeyde ise FeB_{1+x} fazının yer aldığı tespit edilmiştir (Carbucicchio vd., 1980).

Fe₂B tek fazlı çift fazlı (FeB-Fe₂B) fazına göre daha çok tercih edilen bir faz yapısıdır. Şöyleki; Fe₂B fazı yapısal olarak testere dişi görünümlü difüzyon yapısına sahip olduğundan altlığa yapışma mukavemeti yüksek, FeB fazı ise borca zengin bir faz olduğundan daha kırılğan bir yapıya sahiptir. Ayrıca çift fazlı yapılar birbirlerinden farklı genleşme katsayılarına sahip olduğundan gerilme ve artık gerilimlerinden dolayı çatlak eğilimindedirler. Bu çatlaklar termal veya mekanik zorlamalar altında pul pul dökülmelere ve kavlamalara sebep olabilmektedir. Bu sebeplerden ötürü borca zengin FeB fazının oluşmaması veya minimum seviyede tutulması gerekmektedir (Galibois vd., 1980). Demir ile bor arasında meydana gelen demir borürlerin sahip olduğu özellikler Tablo 1.6.'da görülmektedir.

Tablo 1.6. Demir borürlerin bazı özellikleri (Chatterjee ve Fischer 1989; Kunst ve Schaaber, 1967).

ÖZELLİK	Fe₂B	FeB
Bileşim (%B ağı.)	8,83	16,23
Kafes yapısı ve Parametreleri (Å⁰)	Tetragonal h.m a=5,078 c=4,249	Ortorombik a=4,053 b=5,495 c=2,946
Teorik yoğunluk (g/cm³)	7,43	6,75
Ergime Noktası (°C)	1390	1550
Isıl iletkenlik katsayısı (W/cm. °C)	0,2-0,3	0,1-0,2
Isıl genleşme katsayısı (Ppm/°C)		
200-600 °C	7,65	23
100-800 °C	9,2	
Young Modülü(kg/mm²)	30000	60000
Özdirenç (20°C) (μohmcm)	38	80
Curie sıcaklığı (°C)	742	325
Mikro sertlik (GPa)	18-20	19-21
Elastisite Modülü (GPa)	285-295	590

Borlanmış malzemenin tribolojik özellikleri borür tabakanın mikro yapısına bağlıdır. Fe₂B fazının üzerindeki FeB tabakaları Fe₂B yüzeyinden uzaklaştırıldığında pürüzsüz temiz bir yüzey elde edilebildiğinden malzeme için faydalıdır (Liliental vd., 1983). Tek Fe₂B fazı çift fazlı yapıdan daha yüksek aşınma direnci ve mekanik özellikler gösterir. En az aşınma Fe₂B fazında, en fazla aşınma ise daha sert

(1800–2000 VSD) FeB fazının olduğu tabakada meydana gelmektedir. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen tabakalarda, yani sadece Fe₂B fazından meydana gelen tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur (Karakan vd., 2002).

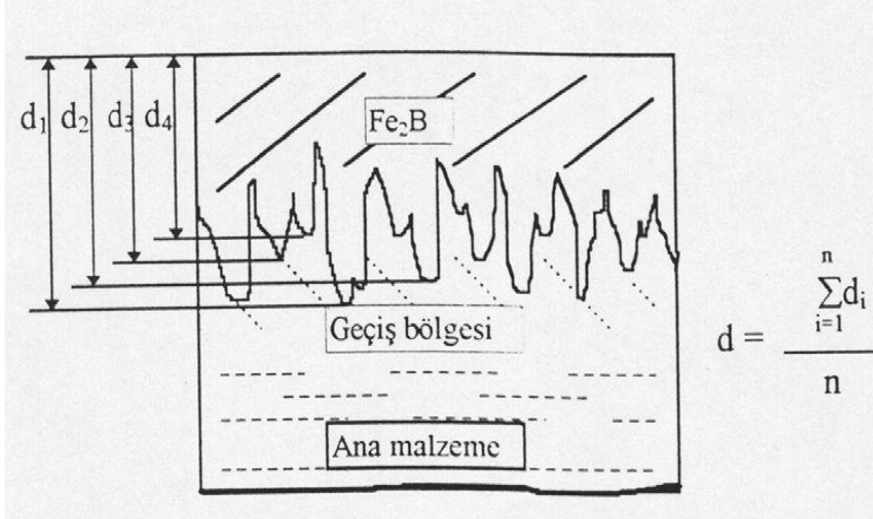
Genellikle sade karbonlu ve düşük alaşımlı çeliklerin termokimyasal yöntemlerle borlanması sırasında oluşan borürlerin, kolonsal kümecikler halinde büyüdüğü görülmektedir. Oluşan borür tabakasında en dış yüzeyde FeB fazı, matrise doğru Fe₂B fazı ve iç kısımda geçiş bölgesi yer almaktadır. FeB fazı ile Fe₂B ve Fe₂B ile matris ara yüzeyindeki yapının kolonsal olduğu bilinmektedir. Ancak, yüksek alaşımlı çeliklerde ara yüzey yapısının kolonsal yerine düz bir çizgi halinde olduğu belirtilmektedir (Palombarini ve Carbucicchio (a), 1984).

Çok fazlı borür tabakaları oluşumunda, FeB'nin büyüme mekanizması, ana malzeme üzerindeki Fe₂B'nin büyüme mekanizmasına (uçtan büyüme) benzeyebilir. Aynı tabaka için FeB/ Fe₂B ara yüzeyindeki kolonsallığın Fe₂B /matris ara yüzeyindekinden daha az olması oldukça dikkat çekicidir. Bu durum, mevcut fazların mekanik özelliklerindeki farklılıklarla ilişkili olabilir. Fe₂B, nispeten sünek olan ana malzemede büyüyen bir faz iken FeB, Fe₂B üzerinde yani daha sert bir yapıda büyüyen bir fazdır. Buradan FeB'nin, Fe₂B'den daha sert olabileceği sonucu çıkarılabilir. Bu farklılıklar, bölgesel gerilim oluşumlarına ve/veya ara yüzeylerde kafes distorsiyonlarına sebep olabilir (Yapar, 2003; Bozkurt,1984).

Borür büyümesinin bir dahili sonuç olduğu göz önüne alındığında, yani tepkimelerin tek fazlı tabakalarda Fe₂B/matris ve çok fazlı tabakalarda FeB/Fe₂B ara yüzeylerinde gerçekleştiği düşünüldüğünde, oluşan bileşiklerin dış yüzeylerinin kristal yapılarının düzensiz ve mekanik açıdan zayıf olması muhtemeldir (Yapar, 2003; Soydan, 1996).

1.7.3.Borür Tabaka Kalınlığı

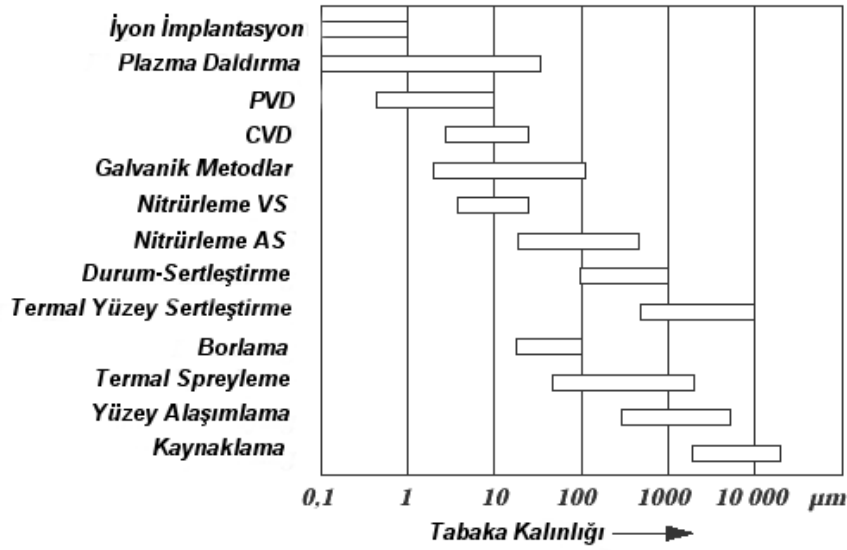
Borür tabakaları iğnesel ve değişken bir formda olduklarından, tabaka kalınlığının tanımlanmasında güçlükler çıkmakta ve farklı tanımlamalar yapılmaktadır. Literatürde tabaka kalınlığı, genellikle tabakanın dış yapısı, düz bir düzlemlerle karşılaştırılarak ve bor dişlerinin bu düzleme göre ortalama değeri alınarak belirtilmektedir. Şekil 1.6. (Matuschka,1980).



Şekil 1.6. Borür tabakası kalınlığının tanımlanması (Matuschka, 1980).

d: tabaka kalınlığı, n: bor dişi sayısı.

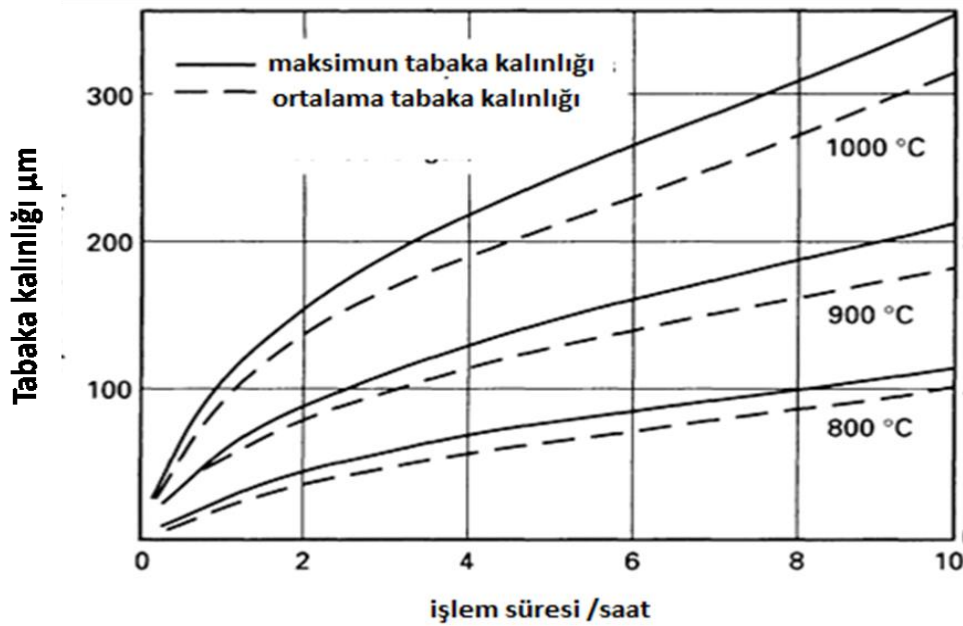
Şekil 1.7.'de ise borlama sonrası oluşacak tabaka kalınlık miktarları diğer yüzey yöntemleri ile kıyaslanmıştır (Yan vd.,2001).



Şekil 1.7. Bazı termokimyasal ve ileri teknoloji yüzey sertleştirme işlemlerinin karşılaştırılması (Yan vd.,2001).

Borür tabakasının kalınlığı altlık malzemeye, borlama bileşiğinin bor potansiyeline, borlama sıcaklığı ve zamana bağlıdır. Demir esaslı malzemelerde ısı dağılım oranı 700-1000 °C arasında seçilirse FeB formasyonu minimize edilir (Chatterjee ve Fischer 1989).

Aşağıda düşük karbonlu (C45) çeliğinde zaman-sıcaklık-tabaka kalınlığı ilişkisini gösteren grafik Şekil 1.8.'de yer almaktadır (Fichtl vd., 1972).15-20 mikron kalınlığındaki tabakalar adhesiv aşınma uygulamaları için kullanılırken, daha kalın tabakalar erozif aşınmalar için daha uygundur. Düşük alaşım oranlarında ve düşük karbonlu çeliklerde tabaka kalınlığı 0,05-0,25 mm arasında oluşurken, yüksek alaşımlı çeliklerde bu değerler 0,025-0,076 mm arasındadır. Paslanmaz çelik ve takım çelikleri gibi yüksek alaşımlı malzemelerde 0,089 mm den büyük tabaka kalınlıkları ekonomik olmadığı için önerilmez (PDS-4-1990).



Şekil 1.8. Düşük karbonlu (C45) çeliğinde zaman ve sıcaklığa bağlı tabaka kalınlığı değişimi (Fichtl vd., 1972).

1.7.4. Borür Tabaka Çeşitleri

Çeşitli borlama yöntemleri ile 14 farklı yapıda borür tabakası elde edilebilmektedir. Kunst ve Schaaber tarafından geliştirilerek düzenlenen sistematik sınıflandırma Şekil 1.9.'da gösterilmiştir (Matuschka,1980). Borür tabakalarının yapısı; borlama yöntemine, borlanan malzemenin bileşimine, borlama ortamına ve işlem şartlarına bağlı olarak; ya düz bir formda veya parmaklı formda olabilir. Tabaka tiplerinden hareketle bazı tabaka özelliklerinin belirlenebileceğini söylemek mümkündür. Bu özel tabaka tipleri aşağıdaki gibi karakterize edilebilir:

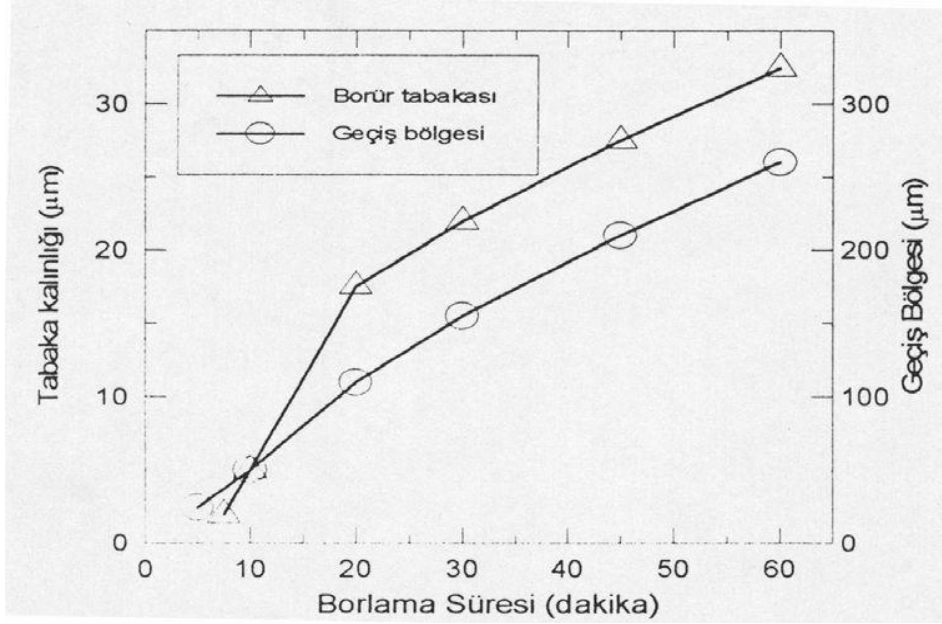
Borlama işlem parametreleri ve borlayıcı ortam düşünüldüğünde teorik olarak tabaka kalınlığı sınırsızdır. Bu da işlem süresinin ve sıcaklığın artması sayesinde olur. İşlem sıcaklığının Fe-B denge diyagramındaki ötektik sıcaklığının (1149 °C) altında olması gerekir. Bu sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklar lokal erimeler yaparak malzeme yüzeyinin bozulmasına neden olur. Zaman faktörünün de ekonomik yönden mantıksal bir değeri geçmemesi gerekmektedir. Kalınlığının artmasını sınırlayan diğer bir faktörde kırılgenliktir. Borlanmış tabakanın kırılgenliği, kalınlık arttıkça artar. Arzu edilen kalınlık borlanan malzeme cinsine göre ayarlanır. Çelik esaslı malzemeler için kalınlık kullanma şartlarına, su verilip verilmeme vb. durumlara göre 20-200 µm arasındadır. Kalınlık kırılgenlik yönünden alaşımlı çeliklerde maksimum 100 µm, alaşımsız çeliklerde 150 - 200 µm, hatta darbesiz aşınmaya maruz kalacak parçalarda su verme koşulu ile 400 µm ' lik kalınlığa kadar çıkılabilmektedir (Yünker, 2000).

Tabaka kalınlığı arttıkça tabakanın gevrekliği de artacağı için, özellikle çift fazlı (Fe₂B+FeB) tabakalarda, tabakanın çok kalın olmamasına dikkat edilmelidir. Alaşım elementlerinin oranı arttıkça çelik içerisine bor yayılımı güçleşmektedir (Fichtl vd., 1972). Ayrıca, yüksek alaşımlı çeliklerde oluşan borür dişleri daha yoğun, daha uniform ve kapalıdır. Bunun yanında karbon miktarındaki artışın, Fe₂B fazının kararlılığını FeB fazına göre arttırdığı da belirtilmektedir. Karbon miktarının artışına bağlı olarak, tabaka kalınlığında bir azalmanın olduğu ve bu azalmaya FeB fazının kararlılığının azalmasının neden olduğu belirtilmektedir (Goeuriot vd., 1981; Blazon vd., 1975).

1.7.5.Borür Tabakada Geçiş Bölgesi

Geçiş bölgesi, borlanmış metalde borür tabakası ile ana metal arasındaki ara bölgeyi tanımlar. Geçiş bölgesi ile alakalı farklı görüşler olmakla birlikte yaygın olan görüş; borlama sonucu oluşan borür tabakasında karbon çözünemediği için metalin yapısında bulunan karbon, bor difüzyonu sırasında yüzeyden iç kısımlara itilmiştir. Bunun sonucu olarak karbonca zengin geçiş bölgesi oluşur (Matuschka, 1980). Geçiş bölgesi, mikroyapı itibarı ile esas malzeme yapısından farklı bir görünüme sahiptir ve borür tabakasına göre daha kalındır (Bozkurt, 1984). Borür tabakası tarafından karbonun içeriye doğru itilmesi sonucunda geçiş bölgesinde, esas malzemeye göre daha fazla perlit bulunacağı, çeşitli araştırmacılar tarafından ileri sürülmektedir. Bu bölgedeki bor dağılımını otoradyografi yöntemi ile inceleyen (Berzina vd., 1984), geçiş bölgesi kalınlığının, normal metalografik

yöntemle belirlenene göre daha büyük olduğunu belirlemişlerdir. Genel olarak, geçiş bölgesindeki tane boyutu, ana malzeme boyutuna göre daha büyük olduğu halde, sinterlenmiş Fe-C alaşımlarında bu bölgede tane büyümesine rastlanmadığı ileri sürülmektedir. Şekil 1.10.'da görüldüğü gibi Ck 15 çeliğinde borlama süresine bağlı olarak borür tabakası ve geçiş bölgesi kalınlıklarının farklı tarzlarda arttığını belirtmektedir (Lu 1983).



Şekil 1.10. Fe₂B ve geçiş bölgesi kalınlığının borlama süresi ile değişimi (Lu, 1983).

1.8. Borlanmış Yüzeyin Sertlik Dayanımı

Borlanmış yüzeylerin en önemli avantajı yüksek yüzey sertlik değeri (1450-5000 HV) ve yüksek erime noktalarıdır. Tablo 1.7.'de de görüldüğü gibi borlanmış tabakanın mikro sertliği önemli oranda borlanmış tabakanın kompozisyonuna ve yapısına bağlı olup esas metalin kompozisyonuna da bağlıdır (ASM Handbook Vol.4 (a) 1991).

Tablo 1.7. Malzeme, faz, sertlik ve erime noktaları (ASM Handbook Vol.4 (a) 1991).

Altık	Borür tabakada oluşan fazlar	Tabakanın mikrosertlik değerleri (HV veya kg/mm²)	Erime noktası C⁰
Fe	FeB	1900-2100	1390
	Fe₂B	1800-2000	---
Co	CoB	1850	---
	Co₂B	1500-1600	---
	Co₃B	700-800	-----
Co 27,5 Cr	CoB	2200	---
	Co₂B	1550	---
	Co₃B(?)	700-800	---
Ni	Ni₄B₃	1600	---
	Ni₂B	1500	---
	Ni₃B	900	---
Mo	Mo₂B	1660	2000
	MoB₂	2330	2100
	Mo₂B₅	2400-2700	2100
W	W₂B₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	1900
	TiB₂	3370	2980
Ti-6Al-4V	TiB		---
	TiB₂	3000	---
Nb	NbB₂	2200	3050
	NbB₄		---
Ta	Ta₂B		3200-3500
	TaB₂	2500	3200
Hf	HfB₂	2900	3250
Zr	ZrB₂	2250	3040

Borlanmış çeliklerin diğer sertlik uygulaması ile sert metallerin yüzey sertlik değerlerinin kıyaslandığı tablo 1.8.'de listelenmiştir. Buradan da açık bir şekilde görüldüğü gibi borlama işlemine tabi tutulmuş karbon çeliklerinin sertliği diğer geleneksel yüzey sertleştirme yöntemlerine göre oldukça yüksektir (Dearnley ve Bell, 1985).

Tablo 1.8. Borlanmış çeliklerin yüzey sertliğinin sert malzeme ve diğer sertleştirme yöntemleriyle karşılaştırılması (Dearnley ve Bell, 1985).

Malzeme	Mikrosertlik, HV
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp çeliği	630-700
Yüksek hız takım çeliği BM42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Karbürlenmiş düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler WC+CO	1160-1820 (30kg)
Al ₂ O ₃ + ZrO ₂ seramikler	1483 (30kg)
Al ₂ O ₃ +TiC+ ZrO ₂	1730 (30kg)
Sialon seramikler	1768 (30kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	≈10000

1.9. Borlamanın Sürtünme Davranışı Üzerindeki Etkisi

Borun oksijene karşı ilgisi fazla olduğundan yüzeyde koruyucu ince bir oksit filmi oluşturmakta ve bu oksit filmi, yüzeyde yağlayıcı vazifesi görerek sürtünmeli aşınma esnasında sürtünme katsayısını düşürürken yüzeylerin birbirine kaynamasını önlemektedir. Kaymalı sürtünmelerde açığa çıkan ısı sement edilmiş tabakanın yumuşamasına neden olurken borlu tabakaya etki etmemektedir. Borlamanın diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre en önemli üstünlüğü yüzey tabakasının çok sert olması sürtünme katsayısının düşük olması ve borlamadan sonra ek bir ısıl işleme gerek duyulmamasıdır. Borlanmış çelikler yüksek yüzey sertlikleri ve yüksek aşınma dirençleriyle karakterize edilirler. Bundan dolayı özellikle yüksek mertebede abrasiv ve adhesiv aşınmaya ve erozyona maruz makine parçalarının ve sistem elemanlarının borlanması teknik ömrün uzatılmasında önemli katkılar sağlar (Başman,2010).Tablo 1.9-10.'da borlanmış ve kromlanmış malzemelerin sürtünme katsayıları verilmiştir. Borlamanın sürtünme katsayısına etkilerini araştıran araştırmacılar borlamanın sürtünme katsayısını düşürdüğü sonucuna varmışlardır (Goeriot vd., 1983; Soydan, 1996).

Tablo1.9. Borlanmış ve kromlanmış malzemelerin sürtünme katsayıları (Goeriot vd., 1983)

Çelik	İşlemi uyguladıktan sonraki sürtünme katsayıları	
	Borlanmış	Kromlanmış
XC10	0,57	0,64
XC38	0,55	0,74
Z200C12	0,54	0,75
Z6CN18-10	0,50	0,63

Tablo1.10. Farklı malzemelerin borlama sonrası sürtünme katsayısı değerleri (Soydan, 1996)

MALZEME	İŞLEM	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ (μm),Ra	SÜRTÜNME KATSAYISI
01 Takım Çeliği	Borlanmış	0,076	0,07-0,09
	Borlanmamış	0,076	0,22-0,24
1018 Karbon Çeliği	Borlanmış	0,076	0,14-0,15
	Borlanmamış	0,076	0,19-0,24
302 Paslanmaz Çelik	Borlanmış	4,572	0,16-0,18
	Borlanmamış	0,076	0,19-0,22
Tungsten	Borlanmış	0,076	0,12-0,14
	Borlanmamış	0,076	0,45
Molibden	Borlanmış	6,858	0,16-0,17
	Borlanmamış	0,076	0,38
Nikel	Borlanmış	0,076	0,13-0,14
	Borlanmamış	0,076	0,42

1.10. Aşınma ve Borlanmış Yüzeylerin Temel Aşınma Davranışları

Aşınma; çevresel, mekanik, kimyasal, fiziksel vb. etkenler altında malzeme yüzeyinde meydana gelen kütsel/hacimsel madde kayıplarıdır. DIN 50320’de aşınma; “Kullanılan malzeme yüzeylerinden mekanik sebeplerle ufak parçaların ayrılması suretiyle meydana gelen değişiklik” olarak tanımlanmaktadır (DIN Standard, 1979). ASTM G40-02 standardına göre aşınma; katı bir yüzeyde, yüzey ile temas eden parça veya parçacıklar arasındaki bağıl harekete bağlı olarak oluşan, genellikle sürekli malzeme kaybını içeren hasardır (ASTM İnternational,US). Aşınmada kullanılan bilimsel ölçü hacim kaybıdır (ASM Handbook Vol.20 1992).

Bir aşınma sisteminde temel unsurlar olarak,

- 1- Ana malzeme (aşınan)
- 2- Karşı malzeme (aşındıran),
- 3- Ara malzeme,
- 4- Yük
- 5- Hareket

saymak mümkündür. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem, teknikte tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır (Şen, 1997).

Aşınma sürtünerek çalışan bütün sistemlerde görülür ve bir malzeme problemi olmayıp pek çok değişkene bağlı bir sistem problemidir. Sistemin özelliğine göre çeşitli mekanizmalarda ortaya çıkar. Genellikle bu mekanizmalar sistemin aşınma davranışını belirlemede temel çıkış noktası olmasına rağmen, aynı anda oluşan aşınma mekanizmaların birbirini etkilemesi sonucu konu oldukça karışık bir durum gösterir (Karamış, 1991).

Aşınma çoğu zaman makine veya sistemin teknik ömrünü tayin eder. Aşınmanın meydana geldiği bütün sistemlerde aşınmaya karşı tasarım açısından bütün önlemler alındıktan sonra kullanılan konstrüksiyon elemanlarının ve takım malzemelerinin aşınmaya karşı korunması hem işletme ekonomisi hem de sistemin sağlıklı çalışabilmesi için son derece önemlidir. Aşınmaya karşı alınan tedbirler aşınmayı tamamen ortadan kaldırmayıp, aşınmanın türüne ve tribolojik faktörlere bağlı olarak aşınma hızını yavaşlatmak suretiyle malzemelerin çalışma ömrünü artırır (Nair vd., 2000).

Aşınma temel olarak dört ana kategoriye ayrılabilir. Bunlar abrazif aşınma, erozif aşınma, adhezif aşınma ve yüzey yorulması ile meydana gelen aşınmadır. Bu kategoriler de kendi içlerinde farklı türlere ayrılırlar. Aşağıda temel aşınma türleri ve Borlamanın aşınma üzerine davranışları ele alınacaktır.

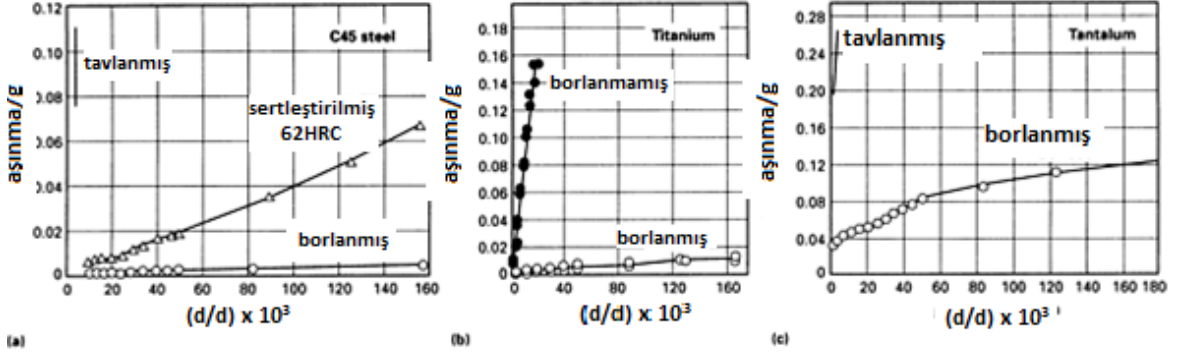
1.10.1. Abrasiv Aşınma ve Borlamanın Abrasiv Aşınma Üzerine Etkisi

Abrasiv aşınma, çok hızlı bir şekilde gelişerek çok yüksek aşınma hızına sahip olan ve sistemin hasarına sebep olacak şekilde etkisini anında gösteren bir aşınma türüdür. Abrasiv aşınma plastik deformasyonla gerçekleşen birbirlerine göre sertlik değerleri farklı olan malzemeler arasında yumuşak bir yüzeye çok sert partiküllerin teması ile oluşur. Sert yüzey yatay olarak hareket ettiği zaman yumuşak malzemenin yüzeyinin kazınması sonucu derin çizikler oluşturur. Abrasiv aşınmanın etkisi ile sert partikül, yumuşak malzemenin yüzeyinden parça kopartarak uzaklaştırır ve bu kopma sırasında yapışma olmaz (Şen, 1997). Abrasiv aşınma genel olarak sürtünen yüzey sertliği ile orantılıdır. Borlama sonucu malzeme yüzeyinde oldukça yüksek sertlikte kaplama tabakası elde edilir. Her ne kadar sertlik ve aşınma dayanımı arasında doğrudan doğruya bir bağıntı yoksa da; borlama sonucu yüzey sertliğinin ve akma direncinin artması sürtünen yüzeyler arasındaki temas yüzeyini azaltarak aşınma hızını düşürür (Özmen ve Çetincan, 1992).

Borlanmış çelikler yüksek sertliklerinden dolayı abrasiv aşınmaya karşı son derece dirençlidirler. Borür tabakasının kalınlığı işlem şartlarına bağlı olarak 20 µm –300 µm arasında değişir ve teknik ömürdeki artış birkaç kattır. Abrasiv aşınmanın azaltılması için borlanmış malzemelerin kullanıldığı uygulama örnekleri arasında: Pnomatik taşıma sistemleri, plastik enjeksiyon makine parçaları, değirmen pompa ve valf parçaları vb. bulunmaktadır. Sert SiC zımpara kağıdının abrasiv olarak kullanıldığı zımpara aparatında yapılan iki cisimle abrasiv aşınma deneylerinde borlanmış 42CrMo4 numunelerin; nitrürlenmiş ve sertleştirilmiş numunelere kıyasla çok üstün bir abrasiv aşınma direnci sergilediği görülmüştür (Hunger ve True, 1994).

Aynı konuda yapılan başka bir çalışmada X210Cr12 soğuk iş takımı çeliği 900°C / 5 saat şartlarında borlanılarak 1650 HV tabaka sertliği elde edilmiştir. Bu numuneler sulu abrozyon şartlarında SiC zımpara ile abrasiv aşınmaya tabi tutulmuş ve borlanmış numunelerin borlanmamışlarına kıyasla aşınma direncinde 8-10 katlık bir artış sağlanmıştır (Özmen ve Çetincan, 1992).

Şekil 1.11.'de borlanmış C45 çeliği, titanyum ve tantalumun Faville testindeki aşınma davranışlarını görülmektedir (Chatterjee vd., 1976).



Şekil 1.11. Borlamanın aşınma direnci üzerindeki etkisi (faville testi) (Chatterjee vd., 1976).

- (a) 0.45% C (C45) çelik borlanmış 900 °C- 3 saat
- (b) Titanyum borlanmış 1000 °C -24 s
- (c) Tantalum borlanmış 1000 °C -8 s

1.10.2. Adhezif Aşınma ve Borlamanın Adhezif Aşınma Üzerine Etkisi

Özellikle kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhezif çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, temasta olan çok küçük pürüz tepelerine, metal ağırlığı veya bir kuvvetten dolayı çok yüksek değerde bir basınç etkir. Bu basıncın değeri temas noktalarındaki pürüzlerin akma sınırının aşınca plastik deformasyon meydana gelerek, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaşmasına neden olur (Sevimligül, 2003). Adhezif aşınma, temas eden iki katı gövdenin yerel yapışmalarından dolayı ortaya çıkan, iki yüzey arasında malzeme transferi veya malzeme kaybına neden olan bir aşınma türüdür (ASTM). Eğer hiçbir abrazif parça mevcut değilse, kaymanın büyüklüğü sürtmeden daha büyükse ve de malzeme kaybı hızı oksidasyon prensipleri tarafından kontrol edilmiyorsa, adhezif aşınmanın oluştuğu söylenir (ASM Handbook Vol.18 1992).

Adheziv aşınma ile ilgili deneylerden elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir (Akkurt, 1987).

- Adhesiv aşınma, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir.
- Olay, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik bakımdan nispeten yüksek hız ve yüklemelerde görülen bir aşınma şeklidir.
- Adhesiv aşınma, sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmemektedir.
- Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür. Temiz yüzeylerde olay daha küçük hız ve yüklemelerde cereyan eder.
- Yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adhezyon aşınmasını önlemektedir.
- Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük ise, kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemelerde olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine transfer edilir.
- Yüzeyler arasında sert malzeme parçacıkları, yani abraziv aşınmayı meydana getirecek koşullar bulunduğu takdirde, adhesiv aşınma oluşmaz. Bu nedenle adhesiv aşınma, yüzeyler arasında abraziv bir etkenin bulunmaması halinde oluşan aşınma türü olarak ifade edilir.

Aşınma deneyleri atmosferik şartlarda yağlamasız yapıldığında; sürtünen yüzeyler arasında tribooksidasyon ürünlerinin oluşturduğu bir reaksiyon tabakası gözlenmiştir. Bu tabaka borlanmış tabakaları korurken, nitrülenmiş tabakaları tahrip etmektedir. Borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşur. Bu tabaka metal-metal temasını geciktirir, katı yağlayıcı görevi yaparak sürtünme katsayısını düşürür. Yüzeyin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlığı eleman çifti arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltır ve dolayısıyla aşınma dayanımını artırır. Borlu tabakaların soğuk kaynak eğilimi düşüktür, ayrıca aşınmayı önlemek için yağlanmasına gerek yoktur. Bu durum özellikle adhesiv aşınmayı önlemede büyük yarar sağlar. Sürtünme sırasında açığa çıkan ısı yüzeyin yumuşamasına ve termal kararlılığa etki eder. Borlanmış yüzeylerde ise demir-borür fazının ötektik noktası 1149 °C olduğunda sertliklerini 1000°C'ye kadar koruyabilmektedirler. Borlanmış yüzeyde 1000 °C'de 1560 HV sertlik değeri elde edilmiştir. Bu nedenlerle borlanmış yüzeylerde; yüksek

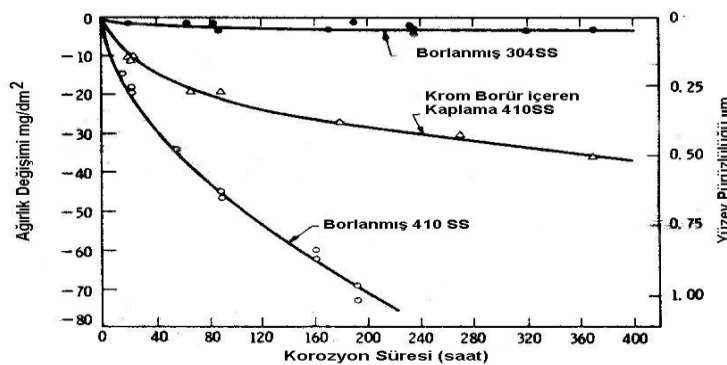
parlama sıcaklığına sebep olan yüksek kayma hızlarında dahi adhezyonun artmadığı gözlenmiştir (Lang, 1986). Borlanmış yüzeylerin iyi aşınma özellikleri; borlanmış yüzeylerde daha az yağ kullanılmasını ya da hiç kullanılmamasını sağlar. Daha az ya da hiç yağ kullanılmaması ekonomik açıdan ve çevrenin korunması açısından önemlidir (Nair vd., 2000).

1.10.3. Koroziyon Aşınma ve Borlamanın Koroziyon Aşınma Üzerine Etkisi

Temas yüzeylerinde oluşan mekanik yıpranmaların yanı sıra kimyasal ve elektrokimyasal tahribatların oluşmasına korozyon denir. Metal veya metal alaşımlarının, çevreleri ile (katı, sıvı ve gaz ortamlar) kimyasal, elektrokimyasal veya metalürjik ilişkilerden dolayı, yüzeylerinde yapısı farklı tabakalar oluşur. Bu tabakanın sürtünme hareketi ile parçalanarak taşınması sonucu meydana gelen hasara koroziyon aşınma denir (Sevimligül, 2003).

Koroziyon aşınma, malzemelerin hem korozyon hem de aşınma mekanizmalarını içeren bir sistemle tahribata uğramasıdır. Aşınma ve korozyonun birleşik etkileri, iki prosesin etkilerinin tek başlarına toplanmasından çok daha yüksektir. Bu da iki süreç arasında bir sinerjiyi belirtir. Korozyon ve aşınma, madencilik, mineral işleme, kimyasal işleme ve enerji üretimi gibi sanayilerde birleşerek yüksek hasara sebep olurlar (ASM Handbook Vol.18 1992).

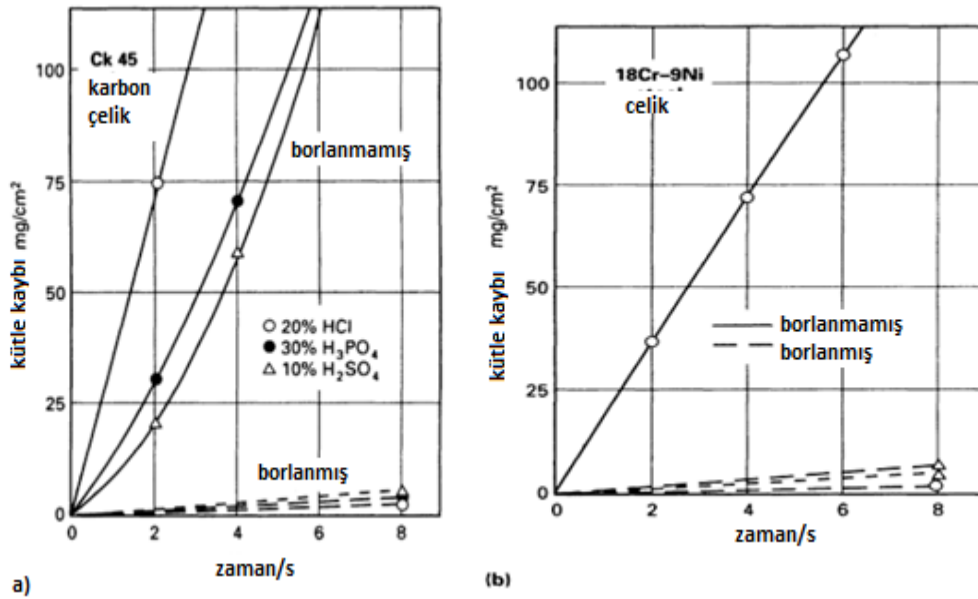
Borlanmış malzemelerde oluşturulan borlu tabakanın esas fonksiyonu oldukça sert yüzeyler ile malzemeyi korozyondan korumaktır. Borür tabakalı paslanmaz çeliklerin düşük asitliğe sahip su içerisindeki korozyon davranışları Şekil 1.12’de verilmiştir (Signal, 1977).



Şekil 1.12. Borür tabakalı paslanmaz çeliklerin düşük asitliğe sahip su içerisindeki korozyon davranışları (Signal, 1977).

Demir esaslı malzemelerin borlanması ile bu tip malzemeler yüksek korozyon dayanımlarına ulaşırlar. Borlama işlemi ile metallere özellikle asidik sıvılara, deniz suyu ve yüksek sıcaklık ortamlarına karşı büyük dayanıklılık sağlanır. Özellikle düşük alaşımli çeliklerin borlanması HCl, H₃PO₄, H₂SO₄ gibi asitlere karşı oldukça yüksek korozyon direnci sağladığı belirtilmektedir (Atik, 2001).

Borlama, düşük alaşımli çeliklerin, asitlere ve sıvı çinkonun korozyonuna karşı direnci artırır. Borlamaya, özellikle ostenitik çeliklerin, hidroklorik asitlere karşı korozyon direncinde büyük bir artış sağlanır. Tuz ve sodanın sudaki çözeltilerinde takım çeliklerinin korozyon direnci borlama sonrasında artar, alkali çözeltilerinde ise azalır (Özsoy, 2001). Şekil 1.13.'de mineral asitlerin borlanmış ve borlanmamış malzemeler üzerindeki aşındırma etkisi görülmektedir (Fichtl, 1983; Fichtl, 1974).



Şekil 1.13. Mineral asitlerin borlanmış ve borlanmamış malzemeler üzerindeki aşındırma etkisi (56 C⁰) (Fichtl, 1983; Fichtl, 1974).

(a) (0,45%C (Ck45)çeliği (b) 18Cr9Ni (X10CrNiTi18 9) çeliği

1.11.Borlama İşleminin Diğer Yöntemlere Göre Üstün Tarafları

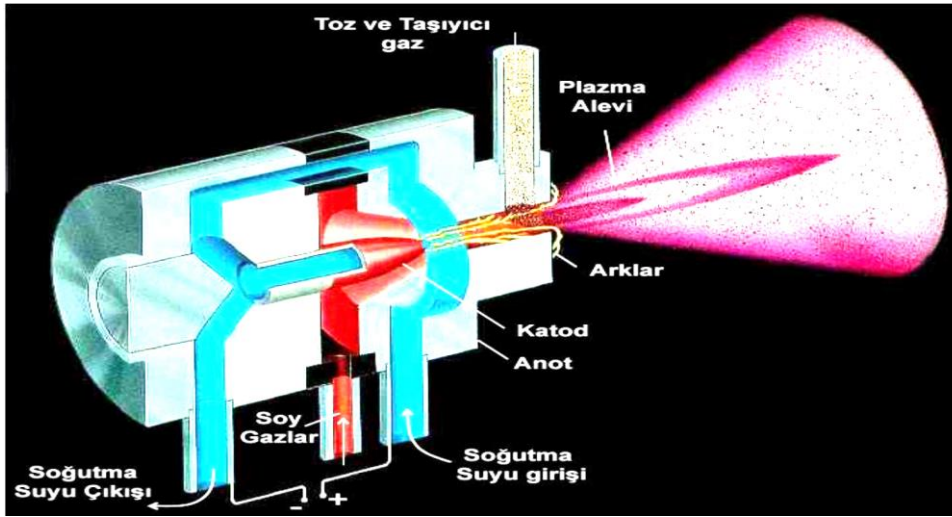
Borlanmış yüzeylerin geleneksel yüzey sertleştirme yöntemlerine göre sahip oldukları pek çok avantajları mevcuttur. En önemli avantajı aşırı yüksek yüzey sertlik değeri (1450-5000 HV) ve yüksek ergime noktalarıdır. Borlama işlemine tabi tutulmuş karbon çeliklerinin sertliği diğer geleneksel yüzey sertleştirme yöntemlerine göre oldukça yüksektir. Borlanmış tabakaların yüksek yüzey sertliği ve düşük yüzey sürtünme katsayısı; temel aşınma mekanizmaları olan adhezyon, tribooksidasyon, abrazyon ve yüzey yorulmasına olumlu şekilde etkilemektedir. Bunların yanında diğer avantajları da aşağıdaki gibi sıralamak mümkündür (ASM Handbook Vol.4 (b),1991; Matuschka, 1980; Fichtl, 1983).

Borlamanın diğer önemli avantajları:

- Borlanmış tabakalar yüksek sıcaklıklarda bile(550-650°C) sertlik değerlerini korur.
- Çeliklerin büyük bir kısmı sert çelikler bu işleme uygundur.
- Borlama ile demir esaslı malzemelerde elde edilen korozyon-erozyon direnci sayesinde endüstriyel uygulamalarda her geçen gün önemini artırmaktadır.
- Borlanmış yüzeyler 850 °C'ye varan sıcaklıklarda bile oksidasyon direncine sahiptirler aynı zamanda erimiş metallere karşıda oldukça iyi direnç gösterirler.
- Borlanmış parçalar korozif çevre ve oksidasyon altında yorulma ömründe ve servis performansında artış sergiler. Borlanmış parçaların yorulma ömürleri özellikle korozif ortamlarda % 25 oranında arttırılabilir.
- Borlama işlemi, yağlayıcı kullanımını azaltmakta, soğuk kaynaklanma eğilimini ve sürtünme katsayısını düşürmektedir.
- Borlama işlemi sonrası pürüzsüz bir yüzey elde edilmektedir.
- Düzensiz ve karmaşık sekili parçalar borlanabilmektedir.
- Borlama işlemi düşük maliyetlidir.
- Borlama sonrası ısıl işlem uygulanabilir.
- Düşük sürtünme katsayısına sahip yüzeyler elde edilir.

1.12.Plazma Arkla Spreyleme Yöntemi

Plazma arkla spreyleme yöntemi, termal spreyleme yöntemleri içerisinde en sofistike ve çok yönlü kullanıma sahip olan yöntemlerden birisidir. Sıcaklık, ticari gaz ekipmanları kullanılarak 11000 °C üstüne çıkabilir ve bu sıcaklık bilinen her türlü malzemenin erime sıcaklığının üzerindedir. Plazma tarafından meydana getirilen yüksek gaz hızı sayesinde spreyleme esnasında malzeme de herhangi bir ayrışma veya çözülme meydana gelmez. Plazma işlemi ayrıca kaplama malzemesinin iletimi ve erimesi için kontrollü bir atmosfer sağlar ve yüksek gaz hızı sayesinde yüksek yoğunluklu kaplama tabakası meydana gelir (Burton vd., 1992). Plazma spreyleme yönteminde, suni bir plazma oluşturularak yüksek sıcaklığa ulaşılır. Plazma, kaplama tabancası içerisinde su soğutmalı bakır anot ile toryumlu katot arasında oluşturulan yüksek voltaj arkı (doğru akım) içerisinde plazma gazları olarak nitelendirilen Ar, H₂, N₂ ve He gazının geçirilmesiyle elde edilir. Plazma gazlarının elektrik arkı içerisinde nötr durumları bozulur, çözünme, iyonizasyon ve rekombinasyon olayları sonucu 20.000°K'e kadar çıkan yüksek sıcaklık meydana gelir. Isınan gazlar, radyal ve aksel olarak genişir ve partikül hızını arttıran süpersonik genişlemeye, gazların dar boğazlı bir nozul içerisinde geçirilmesiyle ulaşılır.



Şekil 1.14. Plazma spreyleme tabancasının kesiti ve plazma oluşumu (Üstel, 1995).

Şekil 1.14.'te spreyleme tabancasının kesiti ve plazma oluşumu görülmektedir. Kapsama tozları, plazma hüzmesinin içerisine taşıyıcı Ar gazı yardımıyla beslenir. İyonize gaz içerisinde eriyen tozlar, çok hızlı bir şekilde önceden hazırlanmış altlığın/iş parçasının yüzeyine püskürtülür. Yüzeğe çarpan erimiş veya yarı erimiş tozlar/partiküller yassılaştır,

lamelli bir hal alır ve çok ani soğuma sonucu (10^{-6} °K/sn) katılaştır (Üstel, 1995; Smolka,1985). Altlık yüzeyine bu şekilde biriken milyonlarca toz partikülü ince tabakalı/lamelli kaplama tabakasını meydana getirir. Proses çok kısa bir sürede gerçekleşir (Lugscheider ve Jokiel, 1993;Esschnauer ve Lugscheider, 1985)

Kaplama teknolojisinde iş parçası yüzeyine biriktirilmek istenen metalik, seramik, karbür, oksit, plastik veya kompozit karakterli tozların bir plazma enerjisinde ergitilmesi esastır. Plazma, prosesin temel enerji kaynağıdır. Egzotik bir ifade olan plazma kavramı birçok değişik tanımlara sahiptir. En yalın haliyle plazma, bünyesinde eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran, genellikle maddenin 4.hali olarak nitelenen yüksek enerji seviyesine yükseltilmiş bir gaz buharı olarak tarif edilebilir. Plazma oluşturmak için bir gaz kütlesine mekanik, ısı, ışın, manyetik ve elektrik enerjisi yardımıyla bir enerji vermek gereklidir. En basit ve yaygın yöntem, gaz kütlesine elektrik boşalması şeklinde enerji vermektir. Bu durum kararlı gaz yapıların bozularak denge dışı yoğun enerji bulutunun ortaya çıkmasına neden olur. Plazmanın en önemli avantajı, çok yüksek sıcaklığa çıkabilmesi ve maddelere iyi ısı transferi sağlamasıdır (Pawlowski, 1995;Heinman, 1996).

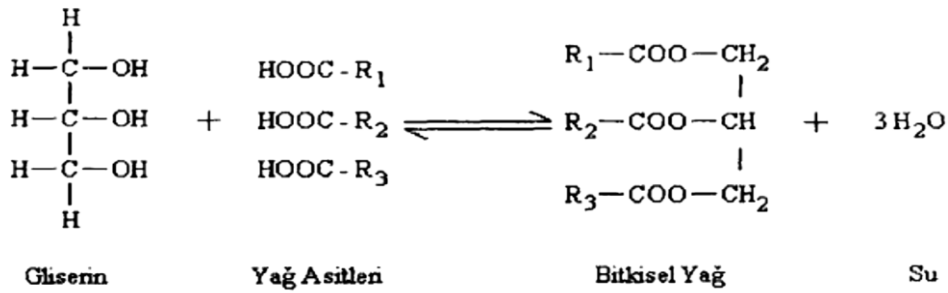
Plazma işlemi sonucunda üretilen yüksek sıcaklık ve yüksek gaz hızı ile kaplamaların mekanik ve metalürjik özellikleri geliştirilir. Plazma işlemi seramik malzemelerle yüksek kaliteli kaplama işlemlerinde (türbin motorlarının zirkonyumla kaplanması, matbaa merdanelerinin kromoksitle kaplanması) çok verimli ve etkindir. Günümüz plazma sprey teknolojisi, tam otomatik dur-kalk, güç seviyelerinin bilgisayarla kontrolü, plazma gaz akışı ve toz besleme oranının tayinini mümkün kılmaktadır. Metalik kaplamaların kalitesi, kaplama içerisindeki oksitlerin azaltılmasıyla, kaplama adhezyonunun yükselmesiyle, porozitenin engellenmesiyle artmıştır. Kaplama malzemesinin türü, ölçüsü ve partiküllerin şekli termal sprey yönteminde kullanılan alevin verimli ve etkin bir şekilde malzemeyi eritmesine önemli ölçüde etki etmektedir. Her bir özel kaplama malzemesi ve tabanca kombinasyonu, optimum partikül ölçüsüne sahiptir. Partiküller ideal ölçüden küçük olduğu takdirde, aşırı erime ve buharlaşma meydana gelir. Bu ölçüden daha büyük olması durumunda ise erime gerçekleşmeyecektir(Burton vd., 1988).

1.13. Bitkisel Yağlar

Bu başlık boyunca bitkisel yağlar, deneysel çalışmada kullanılan yer fıstığı ve kabak çekirdeği yağı, biyodizel, biyodizel üretim yöntemleri ve transesterifikasyon yöntemi hakkında detaylı bilgi verilecektir.

1.13.1. Bitkisel Yağlar Genel

Bitkisel yağlar, yağ asitlerinin (R-COOH), üç değerli bir alkol olan gliserinle yapmış oldukları esterlerdir. (şekil 1.15.) Gliserid olarak adlandırılırlar. Gliserin molekülündeki üç alkol grubunun yağ asitleri ile esterleşmesi durumunda ise trigliserid meydana gelir. Trigliseridler normal yağların %95'lik kısmını oluştururlar. %5'lik kısmı ise mono ve digliseridlerden oluşmaktadır (Yamık,2002).



Şekil1.15. Yağ asitlerinin gliserinle esterleşmesi

Bir yağın fiziksel ve kimyasal özellikleri yağı oluşturan yağ asitlerinin cinsine bağlıdır. Yağ asitleri $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_n\text{COOH}$ genel formülü ile gösterilir. Yağ asitleri kendi aralarında doymuş ve doymamış olarak ikiye ayrılırlar (Uyar, 1992).

1.13.1.1.Doymuş Yağ Asitleri

Karbon-Karbon (C-C) bağları tek bağdan oluşmaktadır. Genel formülleri R-COOH'dır. Burada R hidrokarbon zincirini gösterir. Bitkisel yağlarda doymuş yağ asitlerinden stearik ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{16}-\text{COOH}$) ve palmitik ($\text{CH}_3-(\text{CH}_2)_{14}-\text{COH}$) yağ asitleri bulunur. Erime ve kaynama noktaları zincir uzunluğu arttıkça artar (Yamık,2002; Nas vd., 1992)

1.13.1.2.Doymamış Yağ Asitleri

Moleküllerinde bir veya daha çok sayıda çift bağ bulunur. Zincir formunda dallanmamış mono karboksili asitleri grubuna dahildirler. Yağ asitleri bir çift bağ içerdikleri zaman tekli doymamış (monoenoik), iki yada daha fazla çift bağ içerdikleri zaman çoklu doymamış (polyenoik) olarak isimlendirilirler (Yamık,2002). Bazı bitkisel yağlarda bulunan önemli doymamış yağ asitleri şunlardır: Oleik asit ($C_{17}H_{33}COOH$), Linoleik asit ($C_{17}H_{31}COOH$), Linolenik asit ($C_{17}H_{29}COOH$), Arachidonik asit ($C_{19}H_{31}COOH$).

1.14.Kabak Çekirdeği ve Yağı

Kabak; salatalık, karpuz, acur ve kavunla birlikte, geniş yapraklı, sürüngen ve sarılgan bir bitki familyası olan 118 cins ve 825 tür içeren kabakgiller (Cucurbitaceae) familyasında yer alır. Milattan 10 bin yıl öncesinden beri bilinen hatta mısır ve fasulyeden daha önce tanımlanmış bir bitki olan kabak; kullanım alanına göre hem meyve hem de sebze grubunda yer alan bir yıllık bir bitkidir. Çünkü sahip olduğu çeşitlilik nedeniyle yemeği yapıldığı zaman sebze olarak, tatlısı yapıldığı zaman da meyve olarak tanımlanmaktadır(URL-4-2010).

2005 yılı verilerine göre, dünya ekim alanı yaklaşık 1.5 milyon ha, üretim ise yaklaşık 20 milyon tondur. Bu değerlere göre ülkemiz; dünya sıralamasında 12. ülke olarak yer almaktadır. Ekim alanı 22.000 ha, üretimi ise, taze kabak olarak 376 bin tondur. Dünyadaki kabak üretiminin %29.1'ini Çin, %17.7'sini Hindistan, %5.4'ünü Ukrayna, %2.8'ini Meksika karşılamaktadır. Bu sıralamada; Türkiye, Arjantin ve Japonya ile birlikte yaklaşık %4'lük üretimi gerçekleştirmektedir. Bununla birlikte, dünyada çerezlik kabak üretimi ile ilgili bir istatistik söz konusu değildir. Oysa ülkemizde ekilen toplam alanın yarısına yakını (10.000 ha) çerezlik kabak üretimi için ayrılmıştır. Üretimin ise, ortalama 6-8 bin ton civarında olduğu tahmin edilmektedir. Üretimin en yoğun olduğu il Nevşehir olup, yaklaşık ekim alanı 2400 ha, üretim ise bin ton civarındadır (Hacıseferoğulları ve Sonmete, 2010).

Çerezlik olarak tüketiminin yanında birçok faydaları ve kullanım alanı bulunan kabak çekirdeğinin iç kısmı; %45-50 civarında doymamışlık bakımından zengin (oleik, linoleik asit) koyu yeşil renkli bir sabit yağ içermektedir. Aşağıda tablo 1.11.'de kabak çekirdeği yağına ait fizikokimyasal özellikler yer almaktadır (Schinas vd., 2009).

Tablo.1.11. Kabak çekirdeği yağına ait fizikokimyasal özellikler(Schinas vd., 2009).

KABAK ÇEKİRDEĞİ YAĞI			METOT
Kinematik viskozite(40C ⁰) mm ² /s		35,6	EN ISO 3104
Yoğunluk (15C ⁰)	kg/m ³	921,6	EN ISO 3675
Parlama noktası	⁰ C	>230	EN 22719
Kükürtlü kül içeriği	%ağ.	<0,01	EN ISO 6245
Kükürt içeriği	µg/g	2	EN ISO 20846
Su içeriği	µg/g	584	EN ISO 12937
İyot sayısı		115	EN 14111
Asit değeri, (KOH)	mg/g	0,55	EN 14104
Karbon artışı	(% ağ.)	0,1754	EN ISO 10370
Akma noktası	(⁰ C)	-12	ASTM D 97
Üst ısı değer	(MJ/kg)	39,0	IP 12

1.15.Yer Fıstığı ve Yağı (*Arachis hypogaea*)

Baklagiller (Fabaceae) familyasından tohumlarında %45-60 oranında yağ, %20-30 oranında protein, %18 oranında karbonhidrat, vitaminler ve madensel maddeler içeren, özellikle yağ sanayi ve çerez yapımı başta olmak üzere, sapı kuru ot ve kabuğu da çeşitli şekillerde değerlendirilen değerli bir bitkidir. Yer fıstığının 32 türü tespit edilmiştir; bunların bir kısmı tek yıllık, bir kısmı ise çok yıllıktır.

Yer fıstığı daha çok çerez olarak tüketilmektedir. Bu amaçla yerfıstığı tohumları ya dış kabuk kırılmadan ya da kabuk kırılıp tohumlar ayrıldıktan sonra kavrulup çiğ fıstık tadı giderilmiş ve aynı zamanda dayanıklılığı artırılmış olarak tüketime sunulur. Yer fıstığı tohumunda yağ oranının çok yüksek olması yer fıstığının birçok yağlı tohumlar arasında bitkisel yağ üretimi bakımından önemli bir yer almasını sağlar. Yer fıstığı yağının tadı güzel olup, rengi açık, görünüşü berrak ve yüksek sıcaklık derecelerine karşı oldukça dayanıklıdır. İçinde doğal halde bulunan antioksidan maddelerden dolayı kızartıldıktan sonra bir süre saklanacak olan gıda maddeleri için özellikle tercih edilir. Yer fıstığı yağı yüksek oranda oleik asit içermesi nedeniyle gerek fiziksel özellikleri ve gerekse besin değeri bakımından çeşitli bitkisel yağlar içinde zeytinyağına en yakın bitkisel yağ olarak tanımlanır. Yer fıstığı tohumundan yağ elde edildikten sonra arta kalan küspe üstün bir protein kaynağıdır. Yer fıstığı küspesinden sağlanan proteinin besin değeri yüksek olduğundan çeşitli çocuk mamalarının hazırlanmasında ve proteince yeterli olmayan gıda

maddelerinin protein değerinin yükseltmesinde yararlanılır. Yer fıstığı az miktarlarda da olsa çeşitli tatlı ve şekerlemelerin içinde veya üzerinde de kullanılmaktadır(URL-5-2014).

Yer fıstığı (*arachis hypogaea*) Leguminosae familyasından olup, daha çok 40° güney ve 40° kuzey enlemleri arasında tropik ve subtropik bölgelerde tarımı yapılan bir bitkidir. Yerfıstığının yaygın olarak tarımı yapılan Spanish, Runner, Virginia, ve Valencia olmak üzere popüler dört tipi olmakla beraber Tennessee Red ve Tennessee White gibi tipleri de vardır. Bu fıstıklar özelliklerine (yağ içeriği, aroma, şekil ve boyut) göre farklı amaçlarla kullanılmaktadır. Anayurdu Güney Amerika olan yerfıstığının 2000 yılında dünya üretim miktarı 34.522.077 ton olup, Çin, Hindistan ve Nijerya üretimin en fazla yapıldığı ülkelerdir. Türkiye’de ise 2000 yılında üretim miktarı 90.000 ton olan yerfıstığının ağırlıklı olarak Akdeniz bölgesinde yer alan illerde tarımı yapılmaktadır.

Yerfıstığı içerdiği yağ, protein, karbonhidrat, mineral madde ve vitaminler bakımından zengin oluşu, çerez ve diğer şekillerde tüketilebilmesi dolayısıyla insanlar için değerli bir besin kaynağıdır. Yer fıstığı özellikle E,K, tiamin ve niasin vitaminleri açısından zengin bir kaynaktır. Üretimin fazla yapıldığı ülkelerde özellikle yağ üretiminde kullanılan yer fıstığı, fıstık ezmesi, fıstık şekeri, kavru olarak kuruyemiş olarak tüketilmektedir. Ayrıca yağı alınmış küspe hayvan yemi olarak kullanılmakla beraber çeşitli gıdalara eklenerek insan gıdası olarak da değerlendirilebilmektedir.Yer fıstığının bazı kimyasal özellikleri aşağıda Tablo 1.12.’ de yer almaktadır (Özdemir vd., 2003).

Tablo 1.12. Yer fıstığına ait fizikokimyasal özellikler (Özdemir vd., 2003).

YER FISTIĞI			
İçerik	(%)	Yağ Asitleri Bileşimi	(%)
Yağ	49,83	Palmitik	11,28
Protein	27,25	Stearik	3,18
Kül	2,14	Oleik	52,46
Su	3,71	Linoleik	31,29
		Behenik	0,95
		Lignoserik	0,84

1.16.Biyodizel

Biyodizel, kolza (kanola), ayçiçek, soya, aspir gibi bitkisel yağlı tohumlardan, kullanılmış atık kızartma yağlarından, hayvansal yağlardan ve her türlü biyolojik kökenli yağlardan bir katalizör eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile (metanol veya etanol) reaksiyon sonucunda oluşan ve yakıt olarak kullanılan yağ asidi metil esterleri olarak ifade edilir (URL-6-2014). Dizelle belli oranlarda karıştırılarak kullanılabilir. Bu oran; ekonomi, gaz emisyonu, yanma özelliği gibi birçok faktöre bağlıdır ve genelde %20 biyodizel + %80 dizel karışım kullanılır. Biyodizel bakterilerle ayrışabilen, zehirsiz, sülfürsüz ve hoş kokuludur. Bitkisel yağların metil veya etil esteridir. Bu konuda araştırma ve üretim yapan ülkelerin favori ürünü soya fasulyesidir. Elde edilen bitkisel veya biyolojik yağlar alkolle (genelde metanol) karıştırılır ve sodyum hidroksitle tepkime hızlandırılır. Kimyasal reaksiyon sonunda bir ester ve gliserin oluşur. Ester yakıt olurken gliserinde değerli bir ürün olarak birçok sektörde kullanılır

Biyodizel mevcut dizel motorlarda büyük çaplı bir modifikasyona ihtiyaç duyulmaksızın kullanılabilir alternatif bir dizel motor yakıtıdır. Ham petrolden üretilen motorine eşdeğer özelliklere sahip olduğundan, herhangi bir oranda ham petrol kökenli motorin (dizel yakıtı) ile karıştırılıp veya doğrudan yakıt olarak kullanılabilir. Biyodizel doğrudan (%100) veya motorin ile karışımları halinde kullanılabilir. En yaygın kullanılan karışım oranı %20 biyodizel ve %80 motorin şeklindedir. Aynı zamanda biyodizel geleneksel ve motoru üzerinde herhangi bir değişime gidilmemiş dizel motorlarda kullanılabilir bilinen tek alternatif yakıt çeşididir (Erol, 2006). Biyodizel-dizel karışım oranları genel olarak aşağıda tablo 1.13.'deki gibi adlandırılmaktadır.

Tablo 1.13. Biyodizel-dizel karışım oranları

B(X)	Biyodizel (%) Vol.	Dizel (%)Vol.
B5	5	95
B20	20	80
B100	100	0

Literatür bilgilerine göre motorlarda bitkisel kökenli yağın yakıt olarak kullanımı Rudolf Diesel'in 10 Ağustos 1900 yılında Paris Fuarında sergilediği ve yerfistığı yağı ile çalışmak üzere tasarladığı motora kadar uzanmaktadır. Rudolf Diesel o tarihte bitkisel

yağlar için “Bitkisel yağlar önemli bir motor yakıtıdır bugün için önemsiz görünse de ileride önemi anlaşılacaktır” demiştir. Bu fuarda, dizel motor hiçbir zorlukla karşılaşmadan belirtilen yağla çalıştırılmış ve yapılan testlerde özgül yakıt tüketimi 240 gr/BGh ve yağın ısıl değeri 8600 kalori/kg olarak ölçülmüştür. Dizel motordaki benzer çalışmalar St.Petersburg’da bitkisel ve hayvansal yağlarla devam etmiştir. Motor için gerekli olan yüksek miktardaki yağlar özellikle Afrika’daki kolonilerden sağlanmıştır. Bitkisel yağlar I.Dünya Savaşı sırasında bazı ülkelere acil durum yakıtı olarak kullanılmıştır. Yine bu yıllarda ikiz yakıt projeleri Ohio State Üniversitesinde pamuk ve mısır yağının petro dizel ile karışımı alanında yoğunlaşmıştır. Bugün biyodizel olarak bilinen yakıt ile ilgili ilk resmi doküman, 31 Ağustos 1937 de Brüksel Üniversitesinden G.Chavanne tarafından 422.87 patent numarası ile yapılan çalışmadır. Bu çalışmada biyodizel; Palm Yağı Etil Esteri olarak tanımlanmıştır. Burada asit katalizörlü transesterifikasyon yöntemi kullanılmıştır. Üretilen yakıt 1938 yazında Brüksel ile Leuven arasında çalışan ticari araçlarda kullanılmıştır. Bu kullanımda petrodizelden yegane farklılık viskozite olarak değerlendirilmiştir. Viskoziteyi azaltmak adına ayçiçeği metil esteri alanında çalışmalar yürütülmüştür. Etil ya da metil esteri ismi 1988 yılında basılan bir makalede “biyodizel” olarak isimlendirilmiş ve bu terim dünya da yaygınlık kazanmıştır (Emiroğlu, 2007).

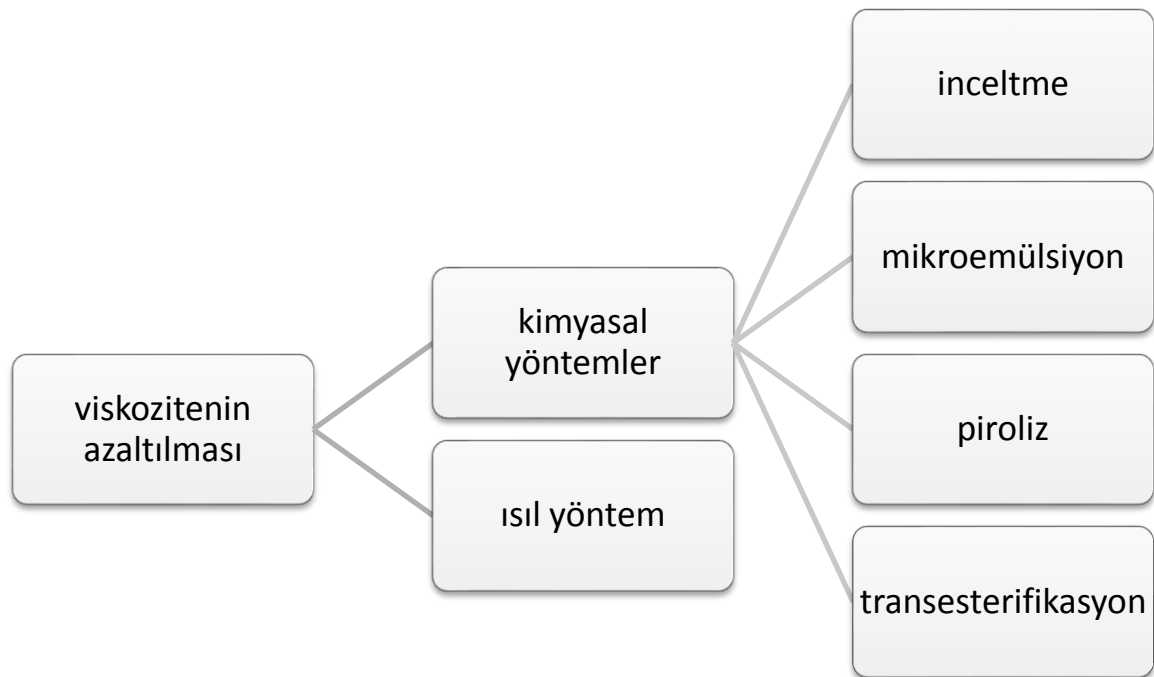
1.16.1.Biyodizel Üretimi

Biyolojik kaynaklardan elde edilen yağların yakıt olarak kullanılabilmesi için öncelikle yüksek viskozite sorununun çözülmesi gerekmektedir. Bu durumda yüksek viskozite sorunu, ya motor üzerinde bir takım değişiklikler yapılarak yada ham yağlara çeşitli ısıl veya kimyasal işlemler uygulanarak aşılmaya çalışılmaktadır. Yakıt olarak kullanılacak yağlardaki ilk işlem yoğunluğunu azaltmaktır. Yağları alkolle esterleme işlemi alkolün katalizör etkisinden de faydalanmak amacıyla tercih edilmektedir. Bu işlemlerin sonucunda her 100 birim biyodizel yakıt elde edilirken 11 birim gliserin ortaya çıkmaktadır. Atık gibi görünen gliserin birçok sanayi alanında kullanılmaktadır. Diğer bir yakıt üretim yöntemi ise Kolza (Brassica Napus: Avrupa kökenli sarı çiçekli yağlı bir yem bitkisi) tohumlarının soğuk preslenmesidir. Bu yöntemde gliserin yan ürünü ortaya çıkmaz. Kanada’nın Su ile Kimyasal İşlem ismini verdiği farklı bir yöntemi de vardır

Dünyada en yaygın olarak uygulanan yöntem transesterifikasyon yöntemidir. Bu yönteme göre biyodizel; kolza (kanola), ayçiçeği, soya, aspir, fındık gibi yağlık ürünlerden elde edilen yağların veya hayvansal yağların bir katalizör (sodyum veya potasyum hidroksit) eşliğinde kısa zincirli bir alkol ile (metanol veya etanol) transesterifikasyon (esterleştirme) reaksiyonuna girmesiyle açığa çıkan ve yakıt olarak kullanılan bir üründür. Atık kızartma yağları da biyodizel hammadde olarak kullanılabilir. Biyodizel saf olarak veya her oranda motorin ile karıştırılarak, motor üzerinde herhangi modifikasyona gerek kalmadan veya küçük değişiklikler yapılarak yakıt olarak kullanılabilir (Emiroğlu, 2007).

Bitkisel veya hayvansal yağlardan üretilen uzun zincirli yağ asitlerinin mono alkil esterleri biyodizel olarak adlandırılmaktadır. Biyodizel üretiminde karşılaşılan en büyük sıkıntı sahip oldukları yüksek viskoziteden kaynaklanmaktadır. Viskozitenin azaltılması için ısı ve kimyasal olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Isıl yöntemde bitkisel yağın sıcaklığı ön ısıtma ile artırılarak viskozite düşürülmektedir. Kimyasal yöntemlerde ise seyreltme, piroliz, mikroemülsiyon oluşturma ve transesterifikasyon metotları kullanılmaktadır (Alibaş ve Ulusoy, 1995; Krawczyk,1996). Tablo 1.14.'de genel olarak kullanılan yöntemler ifade edilmiştir.

Tablo 1.14. Bitkisel yağlarda viskoziteyi azaltma yöntemleri



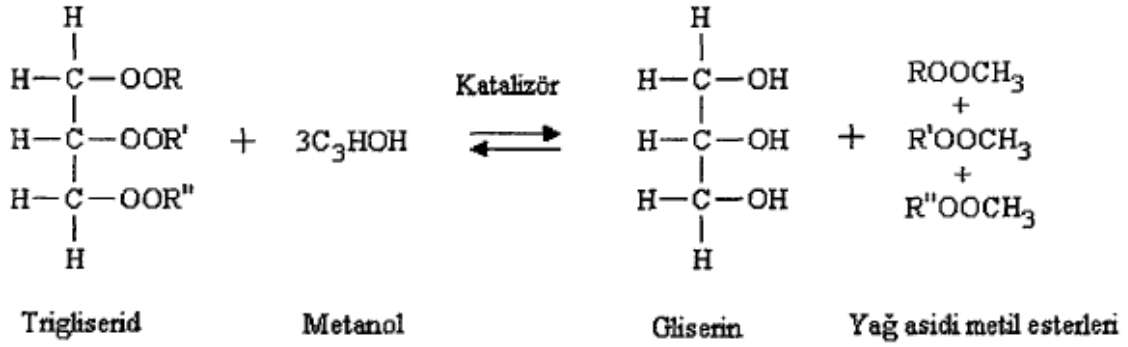
1.16.2. Transesterifikasyon

Transesterifikasyon yöntemi, bitkisel yağların monohidrik bir alkolle (metanol, etanol), katalizör (asidik, bazik katalizörler ve enzimler) varlığında esas ürün olarak yağ asidi esterleri ve gliserin vererek yeniden esterleştirilmesi işlemidir. Reaksiyon ürünü olarak biyodizel elde edilir. Bir tür esterin başka tür bir estere dönüştürülmesi işlemi olarak da ifade edilebilir. Burada ifade edilen ester ise başka bir molekülle bağ yapabilen bir hidrokarbon zinciridir.

Tek bir bitkisel yağ molekülü, bir gliserin molekülüne tutunmuş üç esterden oluşmaktadır. Bir bitkisel yağ molekülünü benzetmek üzere üç ayaklı bir ahtapotu beynimizde canlandırabiliriz. Ahtapotun başı gliserin ve üç ayağı da esteri simgeler. Bitkisel yağlar aynı zamanda trigliserid (triglyceride) olarak da adlandırılırlar. Buradaki tri üç esteri ve gliserid de gliserini işaret eder. Bitkisel yağ molekülünün yaklaşık %20'si gliserindir. Gliserin, gliserol ve gliserid olarak da adlandırılırlar. Bitkisel yağ bünyesindeki gliserin yağın kalın (yüksek viskozite) ve yapışkan olmasına neden olur. Transesterifikasyon esnasında, bitkisel yağ bünyesindeki gliserin uzaklaştırılarak yağın incilmesi yani viskozitenin düşmesi sağlanır. Bu yöntem viskoziteyi azaltmada en etkili yöntemdir. Reaksiyonda yan ürün olarak di- ve mono gliseridler, reaktan fazlası ve serbest yağ asitleri oluşur. Transesterifikasyon reaksiyonunun genel denklemi şu şekildedir (Srivastava ve Prasad, 2000).



Alkol olarak genellikle metanol ve etanol kullanılmaktadır. Eğer yukarıdaki reaksiyonda metanol kullanılırsa bu işleme metoliz denir. Polar olması, en kısa zincirli alkol olması, trigliseritlerle kolay reaksiyon vermesi sebebiyle metanol kullanımı daha yaygındır (Shailendra vd., 2008) Trigliseridlerin metanol ile reaksiyonu aşağıda Şekil 1.16.'de görülmektedir. Biyodizelin oluşum reaksiyonu Yağ Asidi Metil Esterleri(YAME) biyodizel olarak bilinirler ve iyi bir alternatif dizel yakıtıdırlar (Srivastava ve Prasad, 2000).



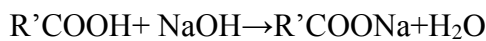
Şekil 1.16. Transesterifikasyon yöntemi ile biyodizel oluşum reaksiyonu

Transesterifikasyon reaksiyonlarında alkolün yağa molar stokiometrik oranı 3:1'dir. Ancak reaksiyon sıcaklığı alkolün kaynama noktasından yüksek olduğu durumlarda, alkol buharlaşmasıyla madde kaybı olacağından, alkolün fazlası ortama eklenir. Katılacak al kol miktarı katalizör türüne göre de değişiklik göstermektedir (Zabeti vd., 2009).

Transesterifikasyonda katalizörlü ve katalizörsüz olmak üzere iki metot vardır. Katalizörlü transesterifikasyon reaksiyonları daha çok alkali, asidik ve enzimatik katalizör kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda mikroporöz zirkonyum, sülfatlı zirkonyum ve titanyum temelli zeolit gibi heterojen katalizörlerde kullanılmaya başlanmıştır (Prakash vd., 2006). Katalizörsüz reaksiyonlarda süper kritik proses veya ko-solvent sistemleri kullanılmaktadır (Karmakar vd.,2010).

1.16.3. Alkali Katalizli Transesterifikasyon

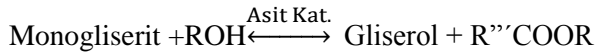
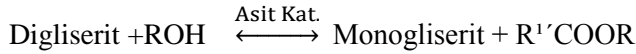
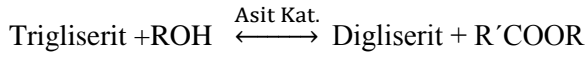
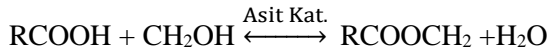
Alkali katalizör olarak NaOH, KOH, karbonatlar ve alkoksitler (sodyum metoksit, sodyum etoksit, sodyum bütoksit v.b.) biyodizel üretiminde kullanılmaktadır. Alkali katalizörlü reaksiyon, asit katalizörlü reaksiyona göre yaklaşık 4000 kez daha hızlı gerçekleştiğinden ticari olarak en çok kullanılan yöntemdir (Körbitz, 1999). Bitkisel ve hayvansal yağlar yapılarında az miktarda su ve serbest yağ asidi içerebilirler. Alkali katalizör serbest yağ asitleri ile reaksiyona girerek sabun oluşturur. Serbest yağ asitleri ile alkali katalizörle (NaOH) oluşturduğu sabunlaşma reaksiyonu aşağıda gösterilmiştir.



Reaksiyon sonucu oluşan sabun reaksiyon verimini düşürür aynı zamanda ürünün gliserinden ayrılmasını güçleştirir. Gerek sabunlaşmadan oluşan, gerekse yağın içerisinde bulunan su hidroliz reaksiyonu yönüne kaydırmaktadır (Leung vd., 2010).

1.16.4. Asit Katalizli Transesterifikasyon

Bitkisel veya hayvansal yağın yapısındaki serbest yağ asidi oranı 1% den fazla olduğu durumlarda biyodizel üretmek için asit katalizör tercih edilir (Nakpong ve Wootthikanokkhan, 2010). Transesterifikasyon reaksiyonlarında asidik katalizör olarak hidrojen klorür, sülfürik asit, sülfonik asit gibi bronsted asitleri kullanılır. Asit katalizörler, serbest yağ asitleri ve trigliseritleri yağ asidi metil esterine dönüştürebilmektedir, çünkü aynı anda hem esterleştirme, hem de transesterifikasyon reaksiyonu vermektedirler. Aşağıda esterleştirme ve transesterifikasyon reaksiyonları görülmektedir. Bu yüzden yüksek asit değerine sahip serbest yağ asitlerinden yağ asidi metil esterleri oluşturmak için asit katalizör seçimi uygun olmaktadır (Haas vd., 2003).



Asit katalizli reaksiyonlar, karboksilik asitteki hidroksil grubu (-OH) ile alkoksil grubunun (-OR) yer değiştirdiği kondenzasyon reaksiyonlarıdır. Biyodizel üretimi, tersinir, ikinci dereceden reaksiyondur. Esterifikasyonda suyun oluşumu reaksiyonun ters hidroliz yönüne kaymasına sebep olur. Suyun oluşumu ayrıca, reaksiyon sisteminde çözünme ile oluşan H_3O^+ yüzünden, asit katalizörün deaktive olmasına yardım eder. H_3O^+ nın kimyasal kararlılığı yağ asitindeki karbonil grubunun protonlanmasını zorlaştırır, bu yüzden de reaksiyon yavaşlar (Oliveira vd., 2010).

1.16.5. Alkol

Biyodizel elde etmek için, bitkisel yağ içerisindeki esterler gliserinden ayrıştırılırlar. Esterler biyodizel yakıtının temelini oluştururlar. Transesterifikasyon işlemi esnasında bitkisel yağın gliserin bileşeni alkol ile yer değiştirir. İşlem esnasında hem etil alkol (etanol) hem de metil alkol (metanol) kullanılabilir. Etanol tahılgillerden elde edilir. Metanol, kömür, doğal gaz veya odundan elde edilen bir alkoldür. Biyodizel üretiminde, daha kararlı biyodizel elde etme açısından metanol tercih edilmektedir. Öte yandan metanol lastik aksamı çözmekte ve insanlar tarafından bulunduğu ölümcül vakalara neden olmaktadır, bundan ötürü metanol kullanımı esnasında gerekli önlemler alınmalıdır. Metil Esterler ifadesi; metanol ve bitkisel yağdan elde edilen biyodizel anlamına gelir. Etil Esterler ifadesi, etanol ve bitkisel yağdan elde edilen biyodizel anlamına gelir. Alkali Esterler ifadesi, bitkisel yağ esterlerinin ve alkolün herhangi bir çeşidinin birleşimi anlamına gelmektedir. Hangi tür alkol ve bitkisel yağ kullanıldığına bakılmaksızın, biyodizel reaksiyonu trigliserid molekülünün üç ester ve bir gliserin molekülüne ayrılması temeline dayanır. Üç ester molekülünün her biri bir miktar alkol ile bağ yapar (Erol, 2006).

1.16.6. Katalizör

Trigliseridleri ayrıştırmak veya bitkisel yağı parçalamak için reaksiyonda bir katalizör yer alır. Katalizör diğer maddeler arasındaki reaksiyonu hızlandırmak için kullanılan bir maddedir. Biyodizel reaksiyonu için sodyum hidroksit (NaOH) veya potasyum hidroksit (KOH) katalizör olarak kullanılabilir. Sodyum hidroksit beyaz renkli bir kimyasal madde olup aynı zamanda kostik soda olarak da adlandırılır. Sodyum hidroksitin bulunmadığı durumlarda yerine potasyum hidroksit katalizör olarak kullanılabilir. Her iki katalizör de tehlikeli kimyasallar olup dikkatli bir şekilde kullanılmalıdır. Her iki katalizör, toz, taneli veya tablet şeklinde olabilir. Sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit deriye ve gözlere hasar verebilir ve ağız veya solunum yoluyla alındığında akciğerlere zarar verebilir. Biyodizel reaksiyonu için kullanılan katalizör, trigliseridleri kırarak esterlerin açığa çıkmasına yardımcı olur. Esterler açığa çıktıklarında alkol ile birleşirler. Katalizör, gliserin ile birleşerek dibe çöker (Erol, 2006).

1.17. Biyodizel Üretimi İşlem Basamakları

Biyodizel üretimine ait işlem basamakları aşağıdaki şekil 1.17.'de sıralı şekilde gösterilmiştir (URL-6-2014).



Şekil 1.17. Biyodizel üretim işlem basamakları (URL-6-2014).

1.17.1. Alkol ve Katalizörün Karıştırılması

Katalizör tipik olarak sodyum hidroksit (kostik soda) veya potasyum hidroksittir. Katalizör standart bir karıştırıcı ve mikser kullanılarak alkol içerisinde çözülür.

1.17.2. Reaksiyon

Alkol/katalizör karışımı kapalı reaksiyon kabı içerisine doldurulur ve bitkisel veya hayvansal yağ ilave edilir. Daha sonra alkol kaybını önlemek amacıyla sistem tamamen atmosfere kapatılır. Reaksiyon karışımı, reaksiyonu hızlandırmak amacıyla belli bir sıcaklıkta tutulur ve reaksiyon gerçekleşir. Önerilen reaksiyon süresi 1 ile 8 saat arasında değişmektedir ve bazı sistemler reaksiyonun oda sıcaklığında olmasını gerektirir. Hayvansal veya bitkisel yağların kendi esterlerine tamamen dönüştürülmesinden emin olunmasını sağlamak için normal olarak fazla alkol kullanılır. Beslemedeki hayvansal veya bitkisel yağların içerisindeki su ve serbest yağ asitlerinin miktarının izlenmesi konusunda

dikkatli olunmalıdır. Serbest yağ asiti veya su seviyesinin yüksek olması sabun oluşumu ve gliserin yan ürününün alt akım olarak ayrılması problemlerine neden olabilir

1.17.3. Ayırma

Reaksiyon tamamlandıktan sonra iki ana ürün gliserin ve biyodizeldir. Her biri reaksiyonda kullanılan miktardan arta kalan önemli miktarda metanol içerir. Gerek görülürse bazen reaksiyon karışımı bu basamakta nötralize edilir. Gliserin fazının yoğunluğu, biyodizel fazınınkinden çok daha fazla olduğundan bu iki faz gravite ile ayrılabilir ve gliserin fazı çöktürme kabının dibinden kolayca çekilebilir. Bazı durumlarda bu iki malzemeyi daha hızlı ayırmak amacıyla santrifüj kullanılır.

1.17.4. Alkolün Uzaklaştırılması

Gliserin ve biyodizel fazları ayrıldıktan sonra her bir fazdaki fazla alkol bir flaş buharlaştırma veya distilasyon prosesi ile uzaklaştırılır. Diğer sistemlerde, önce alkol uzaklaştırılır ve sonra reaksiyon karışımı nötralize edilir ve gliserin ve ester fazları ayrılır. Her iki durumda da alkol distilasyon donanımı kullanılarak geri kazanılır ve tekrar kullanılır. Geri kazanılan alkol akımı içerisinde hiç su birikimi olmadığından emin olunmalıdır.

1.17.5. Gliserin

Gliserin üç hidroksil grubu taşıyan bir alkoldür. Yağ ve yüksek yağ asitlerinin aksine klorofon, benzen, petrol eteri ve eter gibi yağ çözücülerde çözünmeyip, su ve alkolde çözünmektedir. Kokusuz, hafif, tatlı, ergime noktası 20 °C, kaynama noktası 290 °C olan bileşiklerden oluşmaktadır (Altın,1998).

1.17.6. Gliserin Nötralizasyonu

Gliserin yan ürünü, kullanılmamış katalizör ve bir asit ile nötralize edilmiş sabunlar içerir ve ham gliserin olarak depolanmak üzere depolamaya gönderilir. Bazı durumlarda bu fazın geri kazanılması sırasında oluşan tuz, gübre olarak kullanılmak üzere geri kazanılır. Pek çok durumda tuz gliserin içerisinde bırakılır. Su ve alkol, ham gliserin olarak satışa hazır olan % 80-88 saflıkta gliserin elde etmek amacıyla uzaklaştırılır. Daha sofistike işlemlerde gliserin %99 veya daha yüksek saflığa kadar distillenir ve kozmetik ve ilaç sektörüne satılır.

1.17.7. Metil Ester Yıkama İşlemi

Gliserinden ayrıldıktan sonra biyodizel bazen kalıntı katalizör ve sabunları uzaklaştırmak amacıyla ılık suyla yavaşça yıkanır, suyu uzaklaştırılır ve depolamaya gönderilir. Bazı proseslerde bu basamak gereksizdir. Bu normal olarak, açık amber-sarı renkte, petrodizele yakın viskoziteli bir sıvı veren üretim prosesinin sonudur. Bazı sistemlerde de biyodizel distillenir ve renksiz bir biyodizel üretmek amacıyla küçük miktarlardaki renkli cisimleri uzaklaştırmak için ilave bir basamak daha yer alır.

1.18. Biyodizel ve Petrodizelin (Mineral dizel) Karşılaştırılması

Biyodizelin yanması sonucunda çevreye atılan zararlı gazların dizel yakıtı göre egzoz duman gazlarını azaltır. CO₂ miktarında %78 azalma %15 daha az CO, %27 daha az HC %22 daha az partikül %50 daha az is sağlar. Tablo 1.15’de biyodizel ve petrodizelin yakıt özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir

Biyodizel iyi bir yağlama yeteneğine sahiptir ve böylece motor aşınması oluşturmamaktadır. AB tarafından yayınlanan araştırma raporu sonuçlarına göre; aynı miktarda motorin ve biyodizel ile yapılan çalışmada motorin tüketimi ile 3,2 kg CO₂ emisyonu oluşurken, biyodizel tüketiminde bu miktar 2-2.5 kg azalarak 0.7 kg seviyesine kadar düşmektedir. Gelişmiş ülkelerde bu konuda yapılan pazar Araştırması, ürün geliştirme, bilinçlendirme ve fiyat iyileştirme gibi araştırma faaliyetleri sonucunda üretimde büyük aşamalar kaydedilmiştir. Tüketimi ise sürekli verim ve etkileri konusunda izlenmektedir. İlk yaygın kullanım alanı eski model belediye otobüsleri olmuş (1993); fiyat konusunda dizelden pahalı olması sebebiyle %20 karışımı kullanılmıştır. Su araçlarında kullanımının çok daha fazla çevresel fayda oluşturduğu 180 Beygir Gücündeki bir test teknesinde kullanımıyla gösterilmiştir. Kaptan Bryan Peteson saf biyodizel yakıtla 40.000 Mil ve 40 ülkeyi kapsayan iki buçuk yıllık test gezisi yapmıştır. Diğer bir faydası çift zamanlı, dört zamanlı, mekanik kontrollü, elektronik kontrollü, direk enjeksiyonlu ve indirekt enjeksiyonlu motorlarda yapılan deneylerde saf biyodizelin kullanılmasıyla motorun daha yeni ve temiz kaldığı gözlenmiştir. Karbon atımı azalmış ve çözülmüş organik saçılma artmıştır. Bu araştırmalar bir ürün standardı oluşturma çabasıdır, bu konuda Amerika ve Avrupa’da çalışmalar vardır ve ulaşılmak istenen nokta bir dünya standardı oluşturmaktır (URL-7-2014).

Tablo 1.15. Petrodizel ve biyodizelin yakıt özellikleri

Yakıt Özelliği	Petrodizel	Biyodizel
Yakıt standardı	ASTM D 948	ASTM PS 121
Yakıt bileşimi	C10 – C21 EC	C12 – C22 FAME
Alt ısııl değeri(MJ/l)	36,6	32,6
Kinematik viskozite (40 °C)	2 – 4,5	1.9 – 6.0
Özgül ağırlık (15 °C)	0.85	0.88
Su (ppm)	161	Maks. %0.05
Karbon (ağırlığın %'si)	87	77
Hidrojen (ağırlığın %'si)	13	12
Oksijen (ağırlığın %'si)	0	11
Kükürt (ağırlığın %'si) Maks	%0.05	0.0 – 0.0024
Kaynama noktası (°C)	118 – 343	182 – 338
Parlama noktası (°C)	60 – 80	100 – 143
Bulutlanma noktası (°C)	-15 ... +5	-3... +12
Akma noktası (°C)	-35... -15	-15... +10
Setan sayısı	40 – 55	48 – 65
Hava/Yakıt oranı	15	13

İçten yanmalı motorlarda enerji dönüşümü silindir içerisinde hava-yakıt arasında oluşan yanma reaksiyonu ile gerçekleşmektedir. Kaliteli bir yanma için bu hava-yakıt karışımı reaksiyon süresi boyunca silindir içerisinde kalması gerekmektedir. Dolayısıyla yakıt seçimi yapılırken bu özellik göz önüne alınarak seçim yapılması gerekmektedir. Biyodizel yakıtlar yanma karakteristikleri bakımından normal dizel yakıtına benzerliği sebebiyle alternatif yakıt olarak tercih edilmektedir. Aşağıda biyodizel yakıtların teknik özellikleri açıklanmıştır.

1.19. Biyodizel Teknik Özellikler

1.19.1. Yoğunluk

Yoğunluk, biyodizel için önemli parametrelerden birisidir. Yoğunluğun yüksek çıkması, prosten gliserinin yeterince uzaklaştırılmadığının göstergesidir. Standartlarda yoğunluğun 15 °C'deki sınır değeri gösterilmektedir. Bununla birlikte, EN ISO 3675 standardında; piknometre ile 20–60 °C arası, 6 farklı sıcaklıkta elde edilen düzeltme katsayısı 0,723 olarak belirlenmiştir. Ortalama metil ester örneğinin 15 °C'deki yoğunluğu 886,5 kg/m³ dür. 20–60 °C arası sıcaklıklara ölçülecek metil ester yoğunluğu; Yoğunluk (15°C'de)=Yoğunluk (T°C'de) + 0,723 Yoğunluk (T-15) formülü ile hesaplanabilir(Akyarlı vd., 2004).

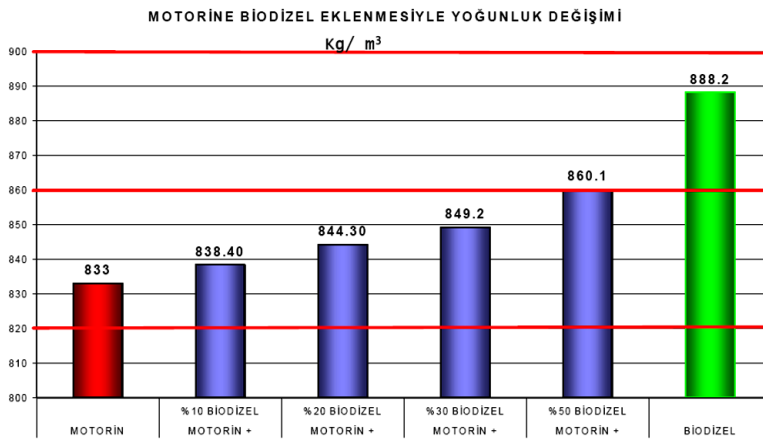
Uluslararası Standartlarda yoğunluk için verilen sınır değerler aşağıda verilmiştir.

ASTM D 6751: 860 – 900 kg/m³

DIN E 51606 : 875 – 900 kg/m³

EN 14214 : 860 – 900 kg/m³

Şekil 1.18.'de dizelere biyodizel yakıt eklenmesiyle ortaya çıkan yoğunluk değişimi görülmektedir.



Şekil 1.18. Petrodizel biyodizel eklenmesiyle yoğunluk değişimi (ODTÜ-PAM, 2006).

1.19.2.Özgül Ağırlık

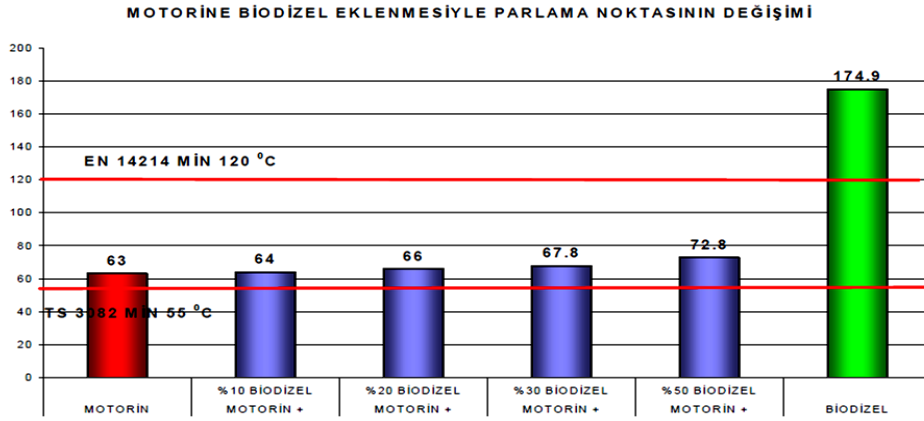
Özgül ağırlık (Ö.A.) 15,6 °C sıcaklıktaki yakıtın yoğunluğunun, aynı sıcaklıktaki suyun yoğunluğuna oranına karşılık gelmektedir. Suyun yoğunluğu 1 (kg/l)'dir. Böylece yakıtın özgül ağırlığı da (kg/l) cinsinden kendi yoğunluk değerine eşittir. Özgül ağırlık ne kadar küçük ise yakıt o kadar kolay tutuşur. Sıvıların yoğunluğu sıcaklığın artması ile hafif bir şekilde düşer. API, özgül ağırlıklar için özel bir ölçek düzenlemiştir. API derecesi olarak isimlendirilir ve aşağıdaki gibi hesaplanır (Goering, 1992).

$$\text{API derecesi}=(141/\text{Ö.A.})-131,5$$

1.19.3.Parlama Noktası ve Alevlenme Noktası

Yakıtlar yapılarında yanabilecekleri sıcaklıktan daha düşük sıcaklıkta buhar durumuna geçebilecek maddeler barındırdığından dolayı aleve yaklaştırıldıklarında parlayabilmektedirler. Bu da yakıtların, parladıkları sıcaklık değerine geldiğinde o yakıtın alev almasını sağlayarak tehlike arz edebilmektedir. Yakıtların alevlenmeden önceki bu fiziksel haline parlama noktası diye adlandırılmaktadır. Parlama noktası, yakıtların risk sınıflamasında çok önemlidir. Taşıma ve depolanma için parlama noktasının yüksek olması istenir. Dizel yakıtının parlama noktası 47 °C olmasına rağmen; bitkisel yağların parlama noktası 300 °C den yukarıda, biyodizelin parlama noktası ise 120-220 °C civarındadır. Şekil 1.19.'da dizele biyodizel eklenmesiyle değişen biyodizel parlama noktaları görülmektedir.

Alevlenme noktası ise tutuşma buharının sönmeden devam ettiği sıcaklık olup, parlama sıcaklığından yüksektir. Genellikle bir yakıtın kaynama noktası ne kadar düşükse alevlenme noktası da o kadar düşük olur. Bu bakımdan dizel yakıtları gibi buharlaşma sıcaklıkları yüksek olan yakıtlar emniyetli yakıtlar olarak nitelendirilmekte olup biyodizel yakıtlar bu emniyet kriterini sağlamaktadırlar (Altın,1998; Kadayıfçılar ve Acar, 1992). Biyodizelin alevlenme noktası, dizelden daha yüksektir (>110 °C).Bu özellik biyodizelin kullanım, taşınım ve depolanmasında daha güvenli bir yakıt olmasını sağlamaktadır (URL-6-2014).



Şekil 1.19. Petrodizele biyodizel eklenmesiyle parlama noktası değişimi (ODTÜ-PAM, 2006).

1.19.4.Kalori Değeri (Isıl Değeri)

Yakıtın sahip olduğu enerjinin bir ölçüsüdür. Genellikle yakıtın birim kütlesinin enerjisi (kj/kg veya kcal/kg) ile verilmektedir. Yanma sonucu oluşan ürünlerin yanma öncesi referans bir sıcaklığa göre toplam entalpilerinin yakıt kütlesine bölünmesiyle elde edilir(Borat vd., 1992). Dizel motorlarında ısıl değerleri çok farklı yakıtlar kullanılabilirse de yakıtın ısıl değerinin fazla olması hem enjeksiyon sisteminin aldığı miktarı azaltmak hem de enjeksiyon sistemindeki parçaların kullanım ömrünü artırması bakımından önemlidir (Altın,1998). Motorlardaki yanma sonu sıcaklıklarında su her zaman buhar olarak bulunduğundan ısıl değer, alt ısıl değer (Hu) olarak verilmelidir. Petrol yakıtlarının API (Amerikan Petrol Enstitüsü) özgül ağırlıklarına göre ısıl değerlerinin belirlenmesi için aşağıdaki eşitlikler kullanılır;

$$H_a = 42,860 + 93(\text{API}-10)$$

$$H_u = 0,7190(\text{ÜİD}) + 10.000$$

H_a : Üst Isıl Değer (kj/kg)

H_u : Alt Isıl Değer (kj/kg)

API: Derece cinsinden API özgül ağırlığı

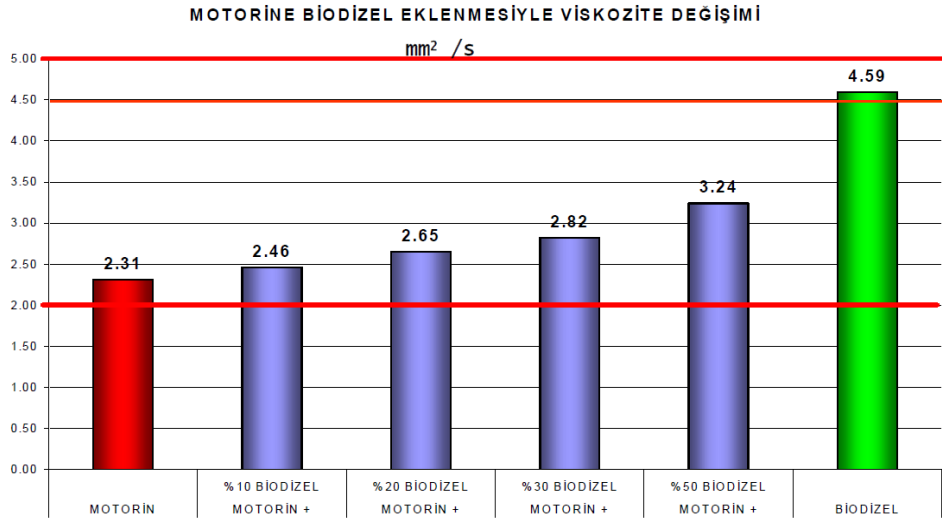
Isıl değer motorun optimum çalışması için önemlidir ve yakıt kalitesi kriteridir. Genellikle biyodizelin ısıl değeri 35 Mj/kg'dan daha büyüktür.

1.19.5.Kinematik Viskozite

Viskozite, sıvıların akmaya karşı dirençlerinin ve iç sürtünmelerinin bir ölçüsüdür. Kinematik ve dinamik viskozite olarak ikiye ayrılır. Birbirinden 1 m uzaklıktaki iki düzlem arasında 1 m² alandaki sıvı tabakasının 1 m/s² hızla kayması için gerekli olan Newton kuvvetine “dinamik viskozite”, dinamik viskozitenin yoğunluğa oranına ise “kinematik viskozite” denir. Kinematik viskozite birimi (cSt) olup, 1 cSt= 1 mm²/saniyedir. Sıvı yakıtların en önemli özelliklerinden biriside kinematik viskozite kabiliyetidir. Dizel motorlarında kullanılan yakıtların viskoziteleri, aynı zamanda yakıt sistemini de yağladıklarından yüksek, fakat küçük enjektör deliklerinden püskürtülerek kolay parçalanmaları temin için de düşük olmalıdır(Altın,1998; Bilginpek, 1991).Yakıtın viskozitesi, yakıt bir enjektörden veya dar bir kanaldan hava içerisine püskürtüldüğünde oluşacak hava demetini çok etkiler. Viskozite büyüdükçe yakıtın zerrelere ayrılması azalır, dolayısıyla iri yakıt zerreciklerinin nüfuz derinliği fazlalaşır. Viskozitesi çok yüksek olan yakıtlar nispeten soğuk olan silindir cidarlarına çarpmadan zerrelere halinde ayrılmayacaklarından dolayı yanma tam gerçekleşmez ve bu yüzden egzozdaki duman konsantrasyonu artar (Borat vd., 1992).

Viskozite küçüldükçe borulardaki akış direnci azalır. Püskürtme ile oluşan yakıt demeti içindeki yakıt damlacık çapları küçülür, yanma iyileşir ve duman miktarı da azalır. Viskozitenin çok düşük olması durumunda ise püskürtme sistemindeki kaçaklar artacaktır. Sıcaklık viskoziteye önemli derecede etki ettiğinden, viskozite her zaman sıcaklıkla birlikte verilmelidir. Motor yakıtlarının viskoziteleri 50 °C’ de 1,5-5 Engler derecesi olmalıdır. Viskozitesi 5 Engler derecesinin üzerinde olan yakıtlar 40-100 °C’ye kadar ısıtılarak kullanılırlar (Safgönül vd., 1995).

Kinematik viskozite yoğunluğa benzer şekilde doğal bir özelliktir ve biyodizelin karakteristik özelliğidir. Yüksek viskozite yakıtın fakir atomizasyonuna, kötü yanmaya, enjektörlerin tıkanmasına, segmanlarda karbon birikmesine ve yağlama yağının bozulmasına sebep olmaktadır. Yüksek viskozite pompalanabilmeyi ve enjektörlerin püskürtmesini azaltır. Viskozite sıcaklığa bağlıdır. Biyodizelin viskozite değeri 40 °C’de 3,5-6 mm²/s arasında değişmektedir (Safgönül vd., 1995). Şekil 1.20.’de petrodizele biyodizel eklenmesiyle viskozite değerlerindeki artış gösterilmektedir.



Şekil 1.20. Petrodizel biyodizel eklenmesiyle viskozite değişimi(ODTÜ-PAM, 2006).

Bitkisel yağların yüksek viskoziteye sahip olmaları, enjektörlerde tıkanmalardan başlayıp yetersiz püskürtme ve silindir içinde kurumlaşmayla sonuçlanan bir dizi probleme neden olabilmektedir. Viskozitenin yüksek çıkması; Transesterifikasyon işleminin başarıyla tamamlanamadığının bir göstergesidir. Kinematik viskozite; bir akışkanın yer çekimi etkisi altında, akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Belirli bir hidrostatik kolon basıncı altında yerçekimiyle akış, Sıvının kolon basınç yoğunluğu (ρ) ile orantılıdır. Herhangi bir viskozite için, belirli bir hacimdeki sıvının akış süresi, sıvının kinematik viskozitesi (ν) ile doğrudan orantılıdır (Akyarlı vd., 2004).

Dinamik viskoziteye (η), bağlı olarak Kinematik viskozite eşitliği:

$$\nu = \rho / \eta \text{ 'dür.}$$

Kinematik viskozite sınır değerleri Uluslararası Standartlarda;

ASTM D 6751: 1,9 – 6,0 mm²/s

DIN E 51606 :3,5 – 5,0 mm²/s

EN 14214: 3,5 – 5,0 mm²/s olarak belirlenmiştir.

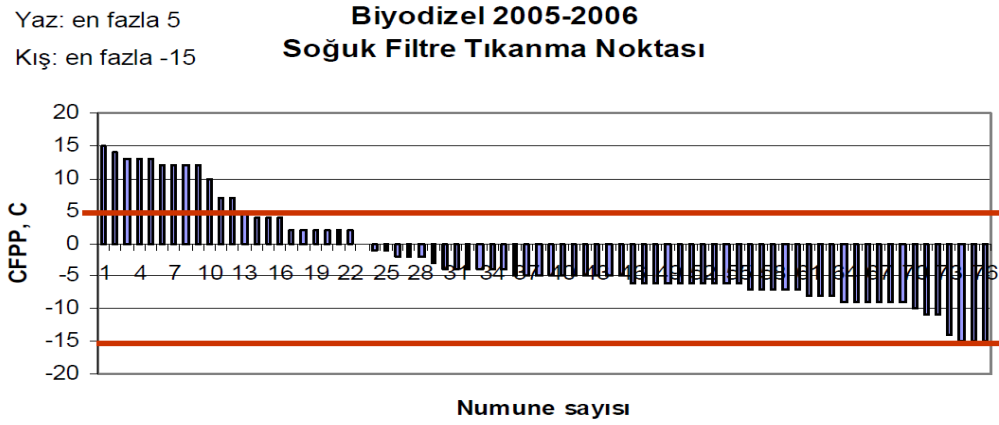
1.19.6.Akma Noktası veya Bulutlanma (Dumanlanma) Noktası

Akma noktası; numunenin, belirlenmiş standart şartlar altında soğutuluyor iken akıcılığını devam ettirdiği en düşük sıcaklığı ifade eder. Bulutlanma noktası ise deney numunesi, belirlenmiş standart şartlar altında soğutulduğunda parafin (wax) kristallerinden oluşan bir sis (veya bulut) `in gözlemlendiği ilk sıcaklıktır. Analiz metodunda numune belirli bir hızda soğutulur ve belirli aralıklarla gözlenir. Deney tüpünde ilk sis (veya bulut) `in ilk gözlemlendiği sıcaklık bulutlanma noktası olarak kaydedilir Sıvı yakıt soğutulduğunda belli bir sıcaklıkta yakıt molekülleri daha büyük sıvı kristalleri oluşturur, soğutmaya devam edildiğinde daha fazla sıvı kristali oluşur ve tüm yakıt katılaşana kadar kristaller yığılır. Kristallerin görülmeye başladığı sıcaklığa “dumanlanma noktası” denir.

Yakıtın akmasının durduğu en yüksek sıcaklığa ise “Akma noktası” denir. Dumanlanma noktası, akma noktasının 4,5-5,5 °C üzerindedir. Özellikle soğuk havalarda dizel yakıtının motor üzerindeki akışını yakıtın akma noktası belirler. Dizel yakıtının akma noktası yüksek olursa yakıt motor üzerinde akamayacak ve bu nedenle motor çalışamayacaktır. Bu sebepten dolayı yakıtın akma noktası ortam sıcaklığından 5-10 °C düşük olmalıdır (Goering, 1992).Biyodizel yakıtı için soğukta filtre tıkanması veya akma noktası dizel yakıtına benzer şekilde tayin edilebilmektedir. Biyodizel ve biyodizel-motorin karışımları, motorinden daha yüksek akma ve bulanma noktasına sahiptir. Bu durum yakıtların soğukta kullanımında sorun çıkarabilmektedir. Akma ve bulanma noktaları uygun katkı maddelerinin (anti-jel) kullanımı ile düzenlenebilmektedir. Biyodizel-motorin karışımları 4°C üzerinde harmanlama ile hazırlanmalıdır. Soğukta harmanlamada biyodizelin motorin üzerine eklenmesi, sıcakta harmanlamada ise karışımda daha fazla olan kısmın az kısım üzerine eklenmesi önerilmektedir. Eğer harmanlamada soğumaya bağlı olarak kristal yapılar oluşursa, harmanın tekrar normal görünümünü kazanması için bulutlanma noktası üzerine ısıtılması ve karıştırılması gerekmektedir (Karaosmanoglu,2002).

1.19.7. Soğukta Filtre Tıkanması

Dizel motor yakıtları için yapılan önemli testlerden birisi, soğukta filtre tıkanma noktasıdır. Bu özellik bilhassa soğuk şartlarda dizel motorlar için hayati önem taşımaktadır. Bu özellik standart yöntemlerle belirlenmektedir. Şekil 1.21’de soğukta filtre tıkanma noktası maksimum olarak 15 Nisan-30 Eylül arasında 0 °C, 1 Ekim-15 Kasım arasında -10 °C, 16 Kasım-28 Şubat arasında -20 °C, 1 Mart-14 Nisan arası -10 °C olarak verildiği görülmektedir.



Şekil 1.21. Soğukta filtre tıkanma noktası (ODTÜ-PAM, 2006).

Soğuk Filtre Tıkanma Noktası değerleri uluslararası standartlarda aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır.

ASTM

D 6751

15 Nisan – 30 Eylül - 0°C

01 Ekim – 15 Kasım - 10°C

16 Kasım – 28 Şubat - 20°C

01 Mart -14 Nisan – 10°C

1.19.8. Setan Sayısı

Setan sayısı, yakıtın dizel motorunda sıkıştırma sonucu ısınan havanın içinde kendi kendine tutuşma özelliğini belirleyen bir sayıdır. Setan sayısı arttıkça yakıtın kendi kendine tutuşma eğilimi artmaktadır. Bu ise benzin yakıtının tersine dizel yakıtında istenen bir özelliktir. Günümüz dizel yakıtlarında setan sayısı en az 40 olmaktadır. Böylece ilk hareket kolaylaşmakta, tutuşma gecikmesi azalmakta ve yanma odasında biriken yakıtın ani yanması ile oluşan hızlı basınç artışı önlenmektedir. Setan sayısı fazla yüksek olursa, tutuşma gecikmesi çok kısılacığından, yakıt yanma odası içerisinde iyi dağılamaz ve tamamen buharlaşmadan tutuşur. Bu durumda dumanlı bir yanma olur, tutuşma enjektör memesinin daha yakınında başlayacağından enjektör deliği üzerinde karbonlaşma tehlikesi doğabilir (Kutlar vd.,1998).

Biyodizelin setan sayısı elde edildiği ham maddeye bağlı olarak 40 ile 49 arasında değişmektedir. Motor performansı ve egzoz gazı emisyonları için önemli bir karakteristik özelliktir. Setan sayısının ölçülmesi özel motorlar (sıkıştırılma oranı değiştirilebilir motor) yardımı ile olmaktadır. Biyodizelin setan sayısı dizelin setan sayısından daha yüksek olduğu için motor daha az vuruntulu çalışır.

Kolayca yanmayan düz hidrokarbon zincirleri içeren bir yakıt türü olan dizel, kullanıma sunulmadan önce stabilitiyeti ve tutuşma kalitesini arttırmak, anti-statik özellik kazandırmak amacıyla özel işlemde geçirilir. Dizelin performansı, öncelikle, tutuşma kalitesine bağlıdır. Dizelin ateşleme kolaylığını ve düzenli yanmasını, "setan numarası" belirler. Dizel motorun, yanma hücreindeki gecikme süresi, dizelin tutuşma kalitesinin bir ölçütüdür. Düşük setan numaralı bir dizel, yanma hücreinde doğru noktada tutuşmaz. Bunun sonucunda, kontrolsüz biçimde yanan karışım, gürültüye ve motor içinde hasara neden olur. Biyodizel, dizel yakıttan daha yüksek setan sayısı sahip olduğu için, bu tür sorunlar ile karşılaşmaz. Biyodizeli, işlemde geçirmenin bir diğer nedeni de, düşük ısıda kullanım özelliği sağlamaktadır. Çünkü dizeli oluşturan parafin, soğukta kristal olarak çökeler, yakıt hatlarını ve filtreleri tıkayarak, çalışma sorunları yaratabilir. Dizel yakıttan en düşük ısıda bile en yüksek performansı sağlamak için, soğukta akışkanlık artırıcı katımlarla zenginleştirilmelidir.

1.19.9. Setan İndeksi

Setan sayısını doğrudan, uygun olarak tayin etmek için deney motorunun bulunmadığı durumlarda, bir yakıtın setan sayısının tahmin edilmesinde veya setan sayısı için yeterli yakıtın olmadığı durumlarda, setan indeksi kullanılır. Bir yakıtın setan sayısının önceden tahmin edildiği durumlarda; setan indeksi, yakıt kaynağı ve üretim şekli değişmemek şartıyla, söz konusu yakıtın bir dizi numunesinin setan sayısının doğruluğunu kontrol etmek için kullanılabilir. Setan indeksi, setan sayısını ifade etmenin alternatif bir yolu değil, sınırlamalar sebebiyle kullanılması gereken yardımcı bir araçtır.

Uluslararası biyodizel standartlarında setan sayısına ilişkin, aşağıdaki alt sınırlar verilmiştir.

ASTM D 6751: 47,0 min

DIN E 51606: 49,0 min

EN 14214: 51,0 min'dir.

1.19.10. Karbon Artığı

Karbon kalıntısı terimi standartlarda, numunenin buharlaşması ve termal bozulması sırasında oluşan karbonlu kalıntıları tarif etmekte kullanılır. Kalıntı tümüyle karbondan oluşmayıp daha sonraki bozunmalarla bileşimi değişebilen kok'tur. Konradson karbon kalıntısı miktarı, ester yakıtının kalitesinin bir göstergesidir. Gliseritlerden, sabunlardan ve diğer organik kalıntılardan arındıklarını gösterir. Damıtık ve atık fuel-oil'lerin karbon kalıntısı, bu yakıtların özel uygulamalarında birikinti oluşturma eğilimleri bakımından yaklaşık olarak değerlendirilebilmesine imkan verir. Genel olarak atmosfer basıncında damıtma işleminde kısmen bozunmaya uğrayan ve uçucu bileşikleri fazla olmayan sıvı yakıtlarda Uluslararası Standartlarda karbon kalıntısı sınır değerleri(Akyarlı vd., 2004).

DIN E 51606: max. 0,30% wt.

EN 14214 : %max. 0,30 (m/m) dir.

1.19.11. İyot Sayısı

İyot sayısı, yakıtın doymamışlık derecesini vermektedir. Doymamışlık, tortu ve depolama stabilitesi problemlerini ortaya çıkarmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucunda, 115'ten yüksek iyot sayısı, aşırı karbon kalıntısı oluşumu nedeniyle önerilmemektedir. Metil esterlerin dizel motorlarda kullanımı yakıtın motor yağını inceltmesine sebep

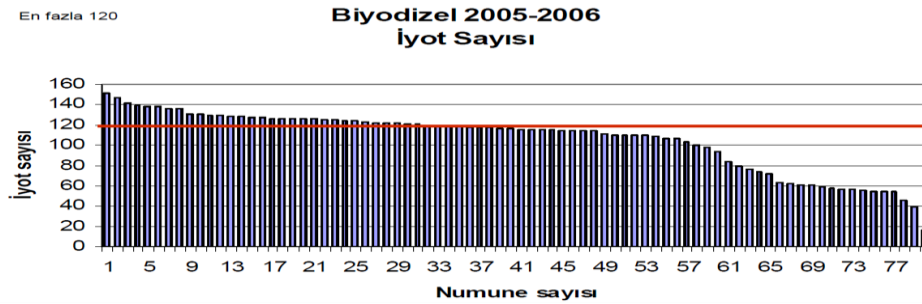
olabilir. Esterdeki yüksek doymamış asit miktarı, yüksek iyot numarası ile açıklanır ve motor yağının polimerleşme tehlikesini yükseltir. Motor yağının incilmesi viskozitenin düşmesine öncülük eder. Yakıtın doymamışlığının (kısmının) oksidasyonu ve polimerizasyonunu, takip ettiği yakıtın incilmesi ve yağın bozulmasını destekler (Akyarlı vd., 2004).

Konu ile ilgili uluslar arası standartlar:

DIN E 51606: max. 115 g.Iodine/100g

EN 14214: max. 120'dir.

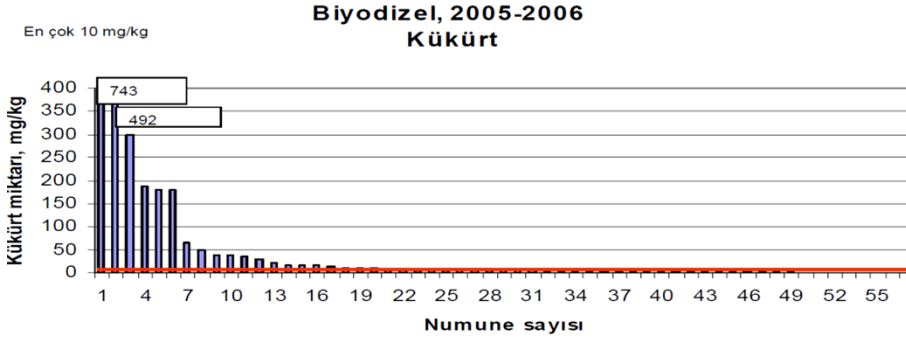
Yağın toplam doymamışlığın bir ölçüsü olan, İyot sayısı bitkisel yağların özelliği ve çift bağ sayısına göre değişmektedir. Yüksek iyot sayılı yakıtlar enjektör deliklerinde tıkanmalara veya yanma odasında polimerleşmeye ve hasara sebep olabilmektedir. Şekil 1.22.'de biyodizel iyot sayısı görülmektedir.



Şekil 1.22.Biyodizel iyot sayısı (en fazla 120) (ODTÜ-PAM, 2006).

1.19.12. Kükürt İçeriği

Kükürt dizel yakıtlarda istenmeyen bir elementtir. Yanma reaksiyonu esnasında meydana gelen kükürt oksitler asit haline dönüşerek motor parçalarında korozyon oluşumuna sebep olmakta ve silindir cidarı ile segmanların aşınmasını hızlandırıcı etki göstermektedir. Bitkisel yağların kullanılması durumunda dizel yakıtıyla karıştırıldığı zaman kükürt miktarlarında azalma olduğu şekil 1.23.'de görülmektedir. yakıtta yağlayıcılık özelliği kazandıran kükürt oranının uygulamaya konulan yeni emisyon standartlarında 10 ppm'den de aşağıya çekilmesinin hedeflenmesi, motorine biyodizelin katılmasını zorunlu hale getirmektedir. Biyodizel kükürt içermediğinden kükürtdioksit emisyonu oluşturmaz. Bu çok önemli bir avantajdır. Bu emisyon özellikleri kanser yapıcı etkenleri azalmakta ve kanser riski % 90'a varan oranlara düşmektedir (Öztürk,2010).



Şekil 1.23. Biyodizel kükürt içeriği (en çok 10 mg/kg) (ODTÜ-PAM, 2006).

Merkaptan kükürt tayin yöntemi yakıtlardaki kükürdün tespiti için kullanılan bir yöntemdir.

Merkaptan kükürt (%) kütle oranı:

Numunenin yoğunluğu (d),

Titrasyonda kullanılan numunenin hacmi (V),

Gümüş Nitrat çözeltisinin molaritesi (AM),

Numune ile birlikte ve numunesiz titrasyon yapılırken kullanılan gümüş nitrat miktarları farkı (A1 – A0),

Merkaptan'daki kükürt ağırlık oranı katsayısı (3.206) kullanılarak aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\text{Merkaptan kükürt kütle oranı (\%)} = \frac{AM (A1 - A0) * 3.206}{(d * V)}$$

Uluslararası standartlarda Merkaptan kükürt kütle oranı üst sınırları aşağıda verilmiştir.

ASTM D 6751: 0,05% mass max.

DIN E 51606 : 0,01% wt. max.

EN 14214: 10,0 mg / kg max. dir.

1.19.13.Kül

Kül, özellikle dizel yakıt için önemli bir parametre olup, enjeksiyon sistemindeki kapalı rekor parçalarının aşınmasına ve yakıt filtresi ile enjektör deliklerinin tıkanmasına sebep olan bir maddedir. Kül, küçük katı parçacıklardan ve yağ ya da yakıtın içerisinde bulunan suda çözünebilir metalik bileşiklerden oluşur, kül miktarı ise az miktar yakıt içerisindeki tüm yanıcı maddelerin yanması ile ölçülmektedir. Yanmayan artıklar kül olarak adlandırılır ve yanmış yakıt örneğinin ağırlığının yüzdesi olarak belirtilir (Goering, 1992).

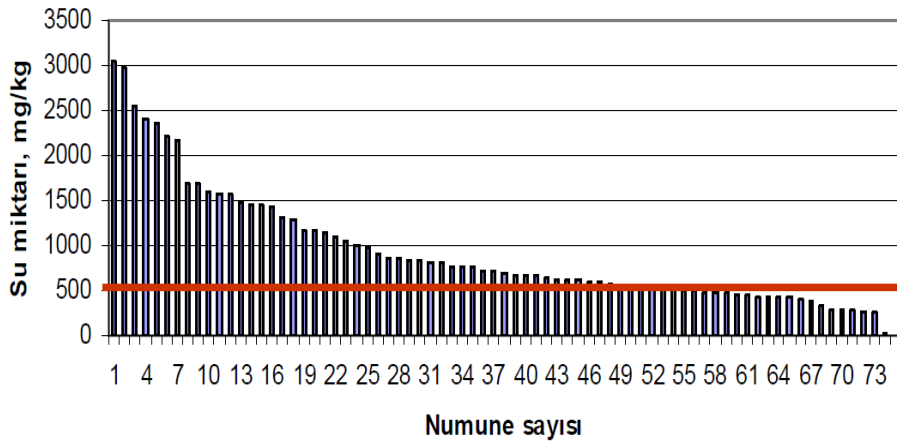
1.19.14. Su İçeriği

Yakıtlarda bulunan su ve sedimentler kullanıldıkları motorun bazı parçalarının işlevini olumsuz yönde etkileyebilirler. Motorun performansını düşürebilirler. Su tayini Karl-Fischer kulometrik Titrasyon metodu ile yapılır. Bu metotla kaynama sıcaklığı 390 °C'den düşük olan petrol ürünlerindeki, kütlece yüzde 0,003 – 0,100 aralığındaki su miktarı tayini yapılır. Sediment tayini ise ekstraksiyon yöntemi ile yapılır. Refrakter malzemeden yapılmış bir kartuş içindeki sıvı yakıt numunesi, kalıntı sabit kütleye erişinceye kadar sıcak toluen ile karıştırılır.

Bitkisel yağlar temelde su içermezler. Ancak bitkisel yağların üretimi ve depolanması esnasında su karışabilmektedir. Yakıtların belli oranda su içermeleri motor için bir dezavantaj değildir. Su/yakıt emülsiyon oranının uygun olması durumunda yanma sıcaklığını ve NOx emisyonlarını azaltabilir. Ancak yüksek basınçlı enjeksiyon sistemlerinde su yakıttan ayrılarak enjektör sisteminde bölgesel çürümelere sebep olabilir. Bitkisel yağlar için belirlenen maksimum değer kütlenin % 0,048'i geçmemelidir (Erol, 2006). Şekil 1.24.'de biyodizel de bulunan su içeriği görülmektedir.

En çok 200 mg/ kg

Biyodizel 2005-2006 Su Miktarı



Şekil 1.24. Biyodizel su içeriği (ODTÜ-PAM, 2006).

Konu ile ilgili uluslararası standartlar:

ASTM D 6751: 0,05% vol max.

DIN E 51606: 300 mg / kg max.

EN 14214: 500 mg / kg max.'dir.

1.19.15. Depolama ve Taşıma

Motorin için gerekli depolama yöntem ve kuralları biyodizel için de geçerlidir. Biyodizel temiz, kuru, karanlık bir ortamda depolanmalı, aşırı sıcaktan kaçınılmalıdır. Depo tankı malzemesi olarak yumuşak çelik, paslanmaz çelik, florlanmış polietilen veya florlanmış polipropilen kullanılabilir (Karaosmanoglu,2002).Biyodizel taşıma ve depolama açısından güvenlidir. Ancak biyodizelin kara yolundaki asfaltı yumuşatma ve eritme etkisi vardır. Bu nedenle depolara ve tanklara biyodizel doldurulurken dikkatli olunmalıdır. Petrodizelin taşınması sırasında güvenliğini arttırmak amacıyla içerisine belli oranlarda biyodizel karıştırılması uygulamaları yapılmaktadır.

Biyodizelin depolanmasında herhangi bir sorunla karşılaşmaz. Biyodizelin soğuk iklim şartlarında depolama kurallarına uymak şartıyla en az altı ay süreyle depolanabilir. Depolama için petrodizelin depolandığı tanklar ve ortamlar kullanılabilir. Depolama yapmadan önce, depolama tankında eğer su varsa bu uzaklaştırılmalıdır. Ayrıca depolama tankındaki bakır, pirinç ve bronz malzemeler çelik yada alüminyum olanlarla değiştirilmelidir. Uzun süreli depolanmış biyodizelin, kullanımından önce pH'si test edilmeli ve 7 ile 10 sınırları arasında olmasına dikkat edilmelidir. Yine aynı şekilde uzun süre beklemiş biyodizelin kullanımından önce özgül ağırlığının 0,9'u aşp aşmadığı belirlenmelidir. Biyodizel tankları mümkünse tamamen dolu tutulmalıdır. Bunu yapmaktaki amaç, biyodizel ile havanın temasını en aza indirmektir. Eğer biyodizel nemli ve ılık iklimde depolanacak ise biyodizel depo tanklarına katkı maddesi ilave etmek gereklidir. Biyosit olarak adlandırılan ve sıvı formda bir zehir olan bu madde, depo içerisindeki mikro organizmaları yok etmede kullanılır. Yakıt tankının içerisine ilave edilecek biyosit miktarı 50-60 gr dır. Dökülen bu miktar depo 3 defa boşalana kadar etkisini sürdürür. Eğer dizel motor iki haftadan daha uzun bir süre kullanılmayacak ise depo yakıtla doldurulur ve depo içerisine yine 50-60 gr biyosit veya biyostat konulur. Bakteri gelişimini engelleyen biyostat özellikle, ılık ve nemli bölgelerde bakteri gelişimini mümkün mertebe engellemek için yakıt içerisine periyodik olarak ilave edilmelidir

1.19.16. Biyodizel Uluslararası Standartları

1991 yılı içinde Almanya DIN E 51606 standardının düzenlenmesi için bir çalışma yapılmış ve Fransa, İtalya, İsveç ulusal standart normları belirlenmiştir. Avrupa standardına paralel olarak ABD biyodizel standardını “American Society for Testing and Materials” kuruluşu ASTM D 6481-02 kodu altında tamamlamıştır. En son biyodizel için tasarımı standardı CEN için tamamlanmıştır ve Avrupa’da geçerlidir (EN 14214 -2002) (Ültanır, 1997). Tablo1.16’da biyodizel EN 14214 standartları görülmektedir.

Tablo1.16. Biyodizel EN 14214 standartları

Özellik	Birim	Sınırlar		Deney Yöntemi ^a
		En az	En çok	
Ester muhtevası ^a	% (m/m)	96,5 ^b	-	EN 14103
Yoğunluk ^c , 15°C’ta	kg/m ³	860	900	EN ISO 3675 EN ISO 12185
Viskozite ^d , 40°C’ta	mm ² /s	3,50	5,00	EN ISO 3104
Parlama noktası	°C	120	-	EN ISO 3679 ^e
Kükürt muhtevası	mg/kg	-	10,0	EN ISO 20846 EN ISO 20884
Karbon kalıntısı ^f (%10 damıtma kalıntısında)	% (m/m)	-	0,30	EN ISO 10370
Setan sayısı ^g		51,0	-	EN ISO 5165
Sülfatlanmış kül muhtevası	% (m/m)	-	0,02	ISO 3987
Su muhtevası	mg/kg	-	500	EN ISO 12937
Toplam kirlilik ^h	mg/kg	-	24	EN 12662
Bakır şerit korozyonu (50°C’ta 3 saat)	derece	Sınıf 1		EN ISO 2160
Oksidasyon kararlılığı, 110°C’ta	h	6,0	-	EN 14112
Asit sayısı	mg KOH/g	-	0,50	EN 14104
İyot sayısı	g iyot/100 g	-	120	EN 14111
Linolenik asit metil esteri	% (m/m)	-	12,0	EN 14103
Poli doymamış (>=4 çift bağ) metil esterleri ⁱ	% (m/m)	-	1,0	
Metanol muhtevası	% (m/m)	-	0,20	EN 14110
Monogliserit muhtevası	% (m/m)	-	0,80	EN 14105
Diğliserit muhtevası	% (m/m)	-	0,20	EN 14105
Trigliserit muhtevası ^j	% (m/m)	-	0,20	EN 14105
Serbest gliserol ^j	% (m/m)	-	0,02	EN 14105 EN 14106
Toplam gliserol	% (m/m)	-	0,25	EN 14105
Grup I metaller (Na+K) ^k	mg/kg	-	5,0	EN 14108 EN 14109
Grup II metaller (Ca+Mg) ^l	mg/kg	-	5,0	prEN 14538
Fosfor muhtevası	mg/kg	-	10,0	EN 14107

2.MATERYAL VE METOD

Yapılan bu deneysel çalışmada 4 silindirli doğal emişli, direkt enjeksiyonlu dizel bir motorun silindir gömleği, piston üst yüzeyi ve egzoz ve emme supapları bor içerikli tozla kaplanarak motora adyabatik özellik kazandırılmıştır. Kaplama yöntemi olarak katı ortam borlama yöntemi ve plazma sprej yöntemi kullanılmıştır. Silindir gömleği ve supaplar katı ortam borlama yöntemi ile 150 mikron kalınlığında Fe₂B, piston üst yüzeyi ise 300 mikron kalınlığında (CoNiCrAl Yttra + NiCrBSi) tabakası ile kaplanmıştır. Bu kaplama işlemleri neticesinde aşınma ve ısı iletim direnci yüksek, sürtünme katsayısı düşük, bir yüzey elde edilmiştir. Motora adyabatik özellik kazandırılmış olup motor termal yalıtımlı bir motor (TYM) haline getirilmiştir. Kaplama işleminden sonra motor performans ve emisyon testlerine tabi tutulmuştur.

Deney yakıtı olarak kullanmak için ham fıstık yağı ve ham kabak çekirdeği yağından alkali katalizli transesterifikasyon yöntemi uygulanarak fıstık yağı metil esteri (FYME), kabak çekirdeği yağı metil esteri (KYME) üretilmiştir. Elde edilen biyodizel yakıtlar normal dizel yakıt ile B-20, B-50 oranında karıştırılmış, ayrıca B-100 saf biyodizel, deney yakıtı olarak kullanılmıştır. Elde edilen biyodizel yakıt karışımlarının analiz laboratuvarında fizikokimyasal özellikleri belirlenmiştir.

Deney motoru, kaplama öncesi normal dizel yakıt D-2 ve elde edilen biyodizel yakıt ve karışımları ile çalıştırılarak güç, performans, egzoz emisyon, egzoz gaz sıcaklık ve özgül yakıt tüketim değerleri kayıt altına alınmıştır. Daha sonra borla kaplanmış olduğumuz yanma odası elemanları (silindir gömleği, egzoz ve emme supapları, piston üst tepesi) motora entegre edilerek motor çalıştırılmış olup ilk etapta kullandığımız deney yakıtları tekrar test edilmiştir. Performans, egzoz emisyonu ve egzoz gaz sıcaklık değerleri ikinci kez kayıt altına alınmıştır. Son olarak kaplanmış ve kaplanmamış motordan elde edilen tüm veriler birbirleriyle kıyaslanarak gerekli değerlendirmeler yapılmıştır.

Kaplanmış parçaların yüzey performanslarını değerlendirmek amacıyla numuneler; metalografik inceleme metodları kullanılarak yüzey ve yapısal olarak analiz edilmiştir. Bu amaçla numuneler; Optik mikroskop, SEM (Scanning Electron Microscopy),

EDAX (Energy Dispersive Spectrography), X-ray ve yüzey pürüzlülük analizlerine tabi tutulmuştur. Yüzeylerin mikrosertlik değerleri ölçülmüştür. Numuneler aşınma ve korozyon deneylerine tabi tutularak aşınma ve korozyon davranışları belirlenmiştir.

Kaplama işlemleri neticesinde amaçlananlar aşağıda sıralanmıştır:

- İçten yanmalı motorun yanma odası elemanlarının yüzeyine termal bariyer oluşturarak termal gerilimlere ve şoklara dayanıklı bir tabaka oluşturmak,
- Yanma odası çeperlerinde ısı yalıtımını oluşturarak ısı transferini düşürmek,
- Yanma verimini artırmak, yakıt tüketimini azaltmak.
- Motor performansını artırmak
- Zararlı egzoz emisyonlarını (CO, HC, İs vb.) azaltmak.
- Kullanılmadan dış ortama atılan ısı enerjisini verimli hale getirmek,
- Aynı zamanda yanmanın olumsuz etkilerini (korozyon, aşınma, termal gerilim, termal şok vb.) bertaraf ederek motor parçalarının servis ömrünü artırmaktır.

Yukarıda kısaca bahsedilen çalışmaların detayları aşağıda anlatılmıştır.

2.1.Biyodizel Üretimi

Saf bitkisel yağların yakıt olarak dizel motorlarda direkt kullanımı bazı sakıncaları da beraberinde getirmektedir. Bunlar; yağın yüksek viskozitesi, asit bileşimi, bağımsız yağ asidi içeriği, oksidasyon nedeniyle yapışma, depolama yanma esnasında polimerizasyon ve yanmayla alakalı problemlerdir. Bu olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için ham bitkisel yağa birçok farklı metot uygulanmaktadır. Bu çalışmada, bu metodlar içerisinde en çok tercih edilen metot olan transesterifikasyon yöntemi kullanılmıştır.

Bu bölümde ham yer fıstığı yağı ve kabak çekirdeği yağından biyodizel üretim aşamaları detaylarıyla anlatılmıştır. Biyodizel kaynağı olarak kullandığımız yağlar Türkiye’de Antalya DİKMAKSAN firmasından temin edilmiş Akdeniz bölgesinden hasatı yapılmış yağlardır. Biyodizel üretimi Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Üretime geçmeden önce serbest yağ asiti tayini yapılarak, kullanacağımız yağların biyodizel üretimine uygun olduğu belirlenmiş, alkali katalizli transesterifikasyon yöntemi uygulanarak biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir.

2.1.1. Yağ Kimyası

Yağlar; çift karbon sayılı (4-24 C) doymuş ve doymamış yağ asitlerinin gliserin ile oluşturduğu triesterlerdir. Yağların yapı taşı olan gliserin, bir trialkol'dur ve yağın % 10'unu oluşturmaktadır ($\text{CH}_2\text{OH}-\text{CHOH}-\text{CH}_2\text{OH}$). Yağ asitleri ise bir dizi üzerine dizilmiş tek veya çift bağlı C atomlarının bir araya gelmesi ile oluşur. Yağların sınıflandırılmasındaki en yaygın yöntem; yağ asidi yapısındaki C atomları arasındaki çift bağ sayısıdır. C atomları arasında çift bağ içermeyen yağ asitleri doymuş yağ asitleri ($\text{C}_n \text{H}_{2n} + 1\text{COOH}$) bir ve daha fazla sayıda çift bağ içeren yağ asitleri doymamış yağ asidi ($\text{C}_n \text{H}_{2n-1}\text{COOH}$) olarak tanımlanmaktadır. Doymuş yağ asitlerinden 8 karbonluya kadar olanlar oda sıcaklığında sıvı halde bulunurlar. Karbon sayısı arttıkça yağ asitleri daha az akıcı olurlar ve katı hale gelirler. Yağlı tohumlar, soya, kanola, pamuk tohumu, mısır gibi bitkisel ürünler ise çoğu doymamış yağ asitlerinin kaynağıdır.

2.1.2. Toplam Yağ Asitliği

Gliserolle bağlı veya serbest halde bulunan yağ asitleri yağdaki toplam yağ asitlerini oluşturur. Hayvansal ve bitkisel yağlar ve bu yağların karışımı en az % 90 toplam yağ asidi içermelidirler. Çünkü doğal halde bulunan yağda % 90 yağ asidi ve % 10 gliserin bulunur. % 90'dan daha düşük seviyede yağ asidi içeren bir bileşimde nem, eterde çözünmeyen safsızlıklar ve sabunlaşmayan madde miktarı yüksektir. Yağ asitliği kompozisyonu sonuçları ile yağın moleküler ağırlığı tespit edilir.

Aşağıdaki Tablo 2.1. ve Tablo 2.2. ham fıstık yağı (Özdemir vd., 2003) ve kabak çekirdeğine ait yağ asit kompozisyonları yer almaktadır

Tablo 2.1. Fıstık yağı özellikleri (Özdemir vd., 2003).

Kimyasal içerik	(%)	Yağ asitleri bileşimi	(%)
Yağ	49,83	Palmitik	11,28
Protein	27,25	Stearik	3,18
Kül	2,14	Oleik	52,46
Su	3,71	Linoleik	31,29
		Behenik	0,95
		Lignoserik	0,84

Tablo 2.2. Fıstık ve kabak çekirdeğine ait yağ asitleri kompozisyonu (Özdemir vd., 2003).

Yağ asidinin genel ismi	Karbon sayısı	Molekül ağırlığı	Fıstık yağı (%)	Kabak çekirdeği yağı (%)
Laurik asit	C12:00	200,32	-	-
Miristik asit	C14:00	228,37	-	-
Palmitik asit	C16:00	256,42	11,28	13,8
Palmitoleik asit	C16:01	254,41	-	-
Stearik asit	C18:00	284,48	3,18	11,2
Oleik asit	C18:01	282,46	52,46	29,5
Linoleik asit	C18:02	280,45	31,29	45,5
Linolenik asit	C18:03	278,43	-	-
Araşidik asit	C20:00	312,53	1,2	-
Gadoleik asit	C20:01	310,50	1,9	-
Behenik asit	C22:00	340,58	0,95	-
Toplam(%)=			100	100

2.2.Serbest Yağ Asitliği (SYA) Tayini

Bitkisel yağların fizikokimyasal özellikleri, üretilecek biyodizelin verim ve kalitesi üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bitkisel bir yağın serbest yağ asitlik derecesi bu parametrelerin başında gelmektedir. Serbest yağ asitliği gliserine bağlı olmadan yağ içerisinde serbest halde bulunan yağ asitleridir. Doğal yağlar trigliserit halinde bulunurlar. Bu yapıda 3 adet yağ asidi 1 adet gliserin molekulüne bağlanmıştır. Serbest yağ asitleri, yağ moleküllerinin gliserin kısmından yağ asitlerinin ayrılması yolu ile oluşurlar. Bitkisel yağlar yüksek serbest yağ içeriğine sahip olmaları, viskozitelerinin fazla olması ve yüksek molekül ağırlığından dolayı doğrudan yakıt olarak kullanılamazlar. Biyodizel üretilirken %5 üzerinde serbest yağ asit derecesine sahip yağlarda reaksiyon verimi oldukça düşük olup reaksiyon sırasında sabun oluşumuna neden olmakla beraber biyodizel fazı ile gliserin fazının ayrıştırılmasını olanaksız hale getirerek reaksiyonların olumsuz neticelenmesine sebebiyet vermektedirler. Bu seviyede asit derecesine sahip yağların ekstra ön kimyasal işlemlere tutulmaları gerekmektedir. Bu sebeple biyodizel üretimine geçilmeden önce mutlaka serbet yağ asidi (SYA) tayini yapılması gerekmektedir.

SYA değeri; 1 g yağda serbest halde bulunan yağ asitlerini notrallestirmek için harcanması gereken NaOH miktarının mg cinsinden değeri o yağın asit değeridir. Serbest yağ asitleri %' si yağda NAOH çözeltisi ile nötralize edilen serbest yağ asitlerinin moleküler ağırlığına bağlı olarak hesaplanan kütesidir.

Bu çalışmada ki SYA değeri ölçümleri TSE 1605 ve Referans Metod: A.O.C.S. Official Metod Ca 5a-40 standartlarına göre yapılmıştır.

2.2.1.Örnek Hazırlama ve Gerekenler

- 0.2 mol standart NaOH çözeltisi
- Methanol($\geq\%95$ 'lik)
- Fenolftalein indikator çözeltisi (% 1'lik, $\geq\%95$ 'lik alkolde çözülerek hazırlanmış)
- 1 ml ölçekli 100 ml büret
- 0.1 mg hassasiyetli analitik terazi
- Erlenmayer (100 ml)
- Yer fıstığı yağı (10 ml)
- Kabak çekirdeği yağı (10 ml)

2.2.2.Deneysel Prosedür

2.2.2.1. 0,2 Molar NaOH Çözeltisi Hazırlama

İlk olarak 0,2 mol NaOH çözeltisi hazırlanır. Bu işlem aşağıda verilen denkleme göre yapılmaktadır:

$$n=\text{mol}$$

$$M=\text{kütle (gr)}$$

$$M_a=\text{molekül ağırlığı}$$

$$\text{NaOH}= 40 \text{ g/mol (mol ağırlığı)}$$

$$n=M/M_a \rightarrow 0,2 \text{ mol} =M/40 \rightarrow M= 8 \text{ gr NaOH}$$

Yani 0,2 mol NaOH çözeltisinde 8 gr NaOH çözülmüştür.

$$M=n/V$$

$$M=\text{molarite}$$

$$n= \text{mol}$$

$$V=\text{hacim}$$

$$V= 1 \text{ lt}$$

$$n=0,2 \text{ mol}$$

yani 0,2 mol NaOH çözeltisi için 8 gr NaOH 1 lt saf su ile doyacak şekilde karıştırılır. Ve böylece 0,2 molarlık NaOH çözeltisi hazır hale gelmiş olur.

2.2.2.2. Fenolftalein İndikator Çözeltisi Hazırlama

Ölçümünü yapacağımız yer fıstığı yağı ve kabak çekirdeği yağından 10'ar ml alınarak hassas terazide ölçülerek 100 ml'lik erlenmayere aktarılır. Fenol ftaleinin alkoldeki çözeltisi hazırlanır. Bu işlem için aldığımız yağların hacimsel olarak 1/3 oranında (3 ml) metanol bir behere alınır ve üzerine 3-4 damla fenol ftalein damlatılarak karıştırılır. Böylece fenol ftaleinin alkoldeki çözeltisi hazır hale gelmiş olur. Elde ettiğimiz bu Fenolftalein indikator çözeltisi hazırlamış olduğumuz 10 ml'lik yağların üzerine boşaltılarak karıştırılır.

2.2.2.3. Titrasyon İşlemi

Titrasyon işlemi; hazırlanan yağ- fenol ftalein indikatör çözeltisi karışımı üzerine bir büret vasıtasıyla NaOH çözeltisinin kontrollü musluk vasıtasıyla damlatılması ve bu esnada renk değişiminin kesinleştiği anda tüketilen NaOH miktarının ml cinsinden belirlendiği kimyasal bir nötralizasyon işlemidir. Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi işlem yapılırken yağ çözeltisinin bulunduğu erlenmayer çalkalanmalı ve renk değişimi yani pembeleşme kalıcı olana kadar devam edilmelidir.



Şekil 2.1. Titrasyon işlemi

Yapılan titrasyon işlemleri sonucunda fıstık yağı için tüketilen NaOH miktarı 8 ml, Kabak çekirdeği yağı için ise 4 ml olduğu tespit edilmiştir. Titrasyon işlemi herbir numune için 3' er kez tekrarlanmıştır.

2.2.2.4.Hesaplama

Serbest yağ asitleri (S.Y.A) % = $\frac{V \times N \times M}{m \times 10}$ denklemi ile hesaplanmıştır

V = Sarf edilen NaOH' in hacmi (ml)

N = NaOH' in normalitesi

m = Tartılan numune miktarı (gram)

M = Asitliği hesaplanacak yağ asidinin molekül ağırlığı.

NaOH , HCl gibi molekül ağırlığı, eşdeğer gramına eşit olan maddelerin çözeltilerinde ; Normalite = Molarite olduğundan NAOH' in Normalitesi 0,2 alınmıştır.

Yer fıstığı yağı için:

V= 8 ml

N=0,2 normal

m= 8,81 gr

M (stearik asit)- (C₁₇ H₃₅ COOH) = 284,4 gram

Verilenler yerine konulduğunda;

$$\%SYA(\text{Fıstık yağı}) = \frac{8 \times 0,2 \times 284,4}{8,81 \times 10} = \% 5,1$$

Kabak çekirdeği yağı için:

V= 4 ml

N=0,2 normal

m= 8,4 gr

M (stearik asit)- (C₁₇H₃₅COOH) = 284,4 gram

Verilenler yerine konduğunda;

$$\%SYA (\text{kabak çekirdeği yağı}) = \frac{4 \times 0,2 \times 284,4}{8,4 \times 10} = \% 2,7$$

Böylece sırasıyla ham fıstık yağının SYA değeri %5,1 ve kabak çekirdeği yağının SYA değeri ise % 2,7 olarak tespit edilmiştir.

2.3.Alkali Katalizli Transesterifikasyon Yöntemi ve Biyodizel Üretimi

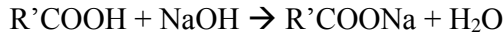
Yukarıda yaptığımız SYA tayini sonucunda fıstık yağının SYA değerinin \approx % 5 ve kabak çekirdeği yağının SYA değeri ise % 2,7 olarak ölçülmüştür. Bu değerler biyodizel üretimi ve verimi açısından gayet ideal değerlerdir. Dolayısıyla biyodizel üretimine geçilmesinde herhangi bir sakınca olmadığı anlaşılmıştır. Üretim Alkali katalizli transesterifikasyon yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Bitkisel ve hayvani yağların, katalizör eşliğinde (NaOH, KOH) monohidrik bir alkolle (metanol, etanol vb), tepkimeye sokulması sonucu elde edilen yağ asidi esterlerine biyodizel denilmektedir. Üretilen biyodizelin kimyasal ismi kullanılan alkolün cinsine göre belirlenmektedir. Örneğin üretim esnasında alkol olarak metanol kullanılmışsa ürün ismi X yağı metil esteri, etanol kullanılmışsa X yağı etil esteri olarak adlandırılmaktadır. Bizde bu çalışmada alkol olarak metanol kullanacağımız için ürünler Fıstık yağı metil esteri (FYME) ve Kabak çekirdeği yağı metil esteri (KYME) olarak adlandırılacaktır.

Ticari olarak en çok kabul gören biyodizel üretim yöntemlerinden biride transesterifikasyon olmasından dolayı bu çalışmada da transesterifikasyon yöntemi tercih edilmiştir. Transesterifikasyon işlemi; bir esterin bir başka estere dönüştürülmesidir. Yani gliserol tabanlı tri-ester, metil veya etil estere dönüşmektedir ve ürünlerden biri de serbest gliseroldur Ester; bir başka moleküle bağlanabilen hidrokarbon zinciridir. Bir bitkisel yağ molekülü, gliserin molekülüne bağlanmış üç esterden oluşmaktadır. Bitkisel yağ moleküllerine trigliserit ya da gliserol esterleri de denmektedir. Burada “tri” ifadesi üç esteri, “gliserit” ifadesi ise gliserini tanımlamaktadır.

Bitkisel yağların, yaklaşık %20’si gliserinden, oluşmaktadır. Bitkisel yağlardaki kalınlık ve yapışkanlık özelliği gliserinden kaynaklanmaktadır. Transesterifikasyon işlemi ile birlikte gliserin yağdan uzaklaştırıldığından dolayı, yağ incelmekte ve viskozitesi azalmaktadır. Bu işlemle bitkisel yağın gliserini bir alkol (etanol alkolü veya metanol

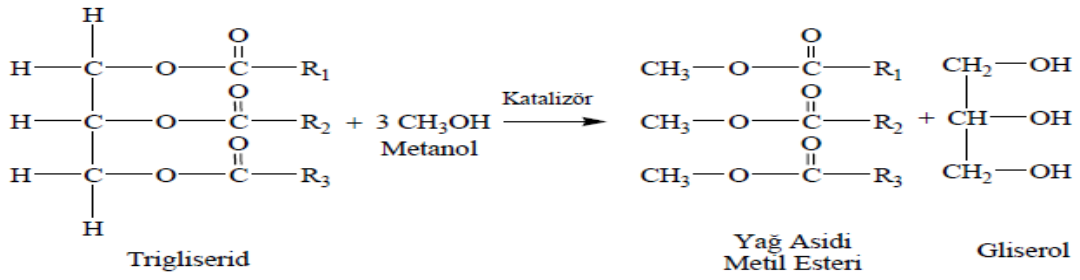
alkolü) ile yer değiştirmektedir. Gliserin böylece yapıdan uzaklaşmaktadır. Reaksiyon esnasında kullanılan alkoller genellikle ya etanol, yada metanol olmaktadır. Etanol tahıllardan elde edilen bir alkoldür. Metanol ise, kömür, doğal gaz veya odundan elde edilmektedir. Genellikle daha stabil bir biyodizel reaksiyonu sağladığından dolayı metanol tercih edilmektedir. Bu çalışmada da alkol olarak polar olması, en kısa zincirli alkol olması, trigliseritlerle kolay reaksiyon vermesi sebebiyle metanol tercih edilmiştir.

Katalizörler kimyasal reaksiyonları başlatan ve hızlandıran maddelerdir. Biyodizel reaksiyonlarında da trigliseritlerin kırılabilmesi için bitkisel yağ içerisinde “katalizatör” eklenmektedir. Katalizör sayesinde trigliseritler kırılarak esterler serbest hale gelmektedir. Serbest hale geçen esterler daha sonra alkol ile birleşebilmektedirler. Katalizatör ise gliserit ile birleşerek reaksiyon kabının dibine çökelmektedir. Biyodizel reaksiyonu sonuç olarak; alkil esterler ve gliserin sabunu üretmektedir. Alkalikatalizör serbest yağ asitleri ile reaksiyona girerek sabun oluşturur. Serbest yağ asitleri ile alkali katalizörle (NaOH) oluşturduğu sabunlaşma reaksiyonu aşağıda gösterilmiştir.



Biyodizel reaksiyonunda katalizatör olarak kullanılacak maddeler; sodyumhidroksit (NaOH) veya potasyumhidroksit (KOH)'tir. Sodyumhidroksit, çoğunlukla kostik soda olarakda adlandırılan beyaz bir maddedir ve bulunamadığı durumlarda potasyum hidroksitde kullanılabilir. Yaptığımız deneyler esnasında alkali katalizör olarak granüler NaOH kullanılmıştır.

Transesterifikasyon reaksiyonu genel denklemi aşağıda gösterildiği gibidir. Şekil 2.2.'de görüldüğü gibi transesterifikasyon reaksiyonlarında alkolün yağa molar stokiyometrik oranı 3:1 dir. Ancak reaksiyon sıcaklığı alkolün kaynama noktasından yüksek olduğu durumlarda, alkol buharlaşmasıyla madde kaybı olacağından, alkolün fazlası ortama eklenir. Yaptığımız deneylerde de hacimsel olarak 6:1 oranında alkol/yağ oranı seçilmiştir.



Şekil 2.2. Transesterifikasyon reaksiyonu

2.3.1. Kullanılan Malzemeler

Deneyde kullanılan malzeme listesi aşağıda belirtilmiştir.

- 1- Yer fıstığı yağı 12 lt
- 2- Kabak çekirdeği yağı 12 lt
- 3- Sodyum hidroksit (NaOH) granüler. 1 kg
- 4- Metanol \geq %96 20 lt
- 5- Fenolftalein indikatör
- 6- Distile su 10 lt.

Deneyde kullanılan cihazların listesi aşağıda belirtilmiştir.

- 1-) Sıcaklık kontrollü manyetik karıştırıcı
- 2-) Çift boyunlu balon (1000 ml)
- 3-) Geri soğutucu (reflüks)
- 4-) Beher 250 ml-500 ml-1000ml
- 5-) Büret 100 ml
- 6-) Cam termometre
- 7-) Ayırma hunisi 1000 ml
- 8-) Hassas terazi (0,001 gr)
- 9-) Süzgeç kağıt

2.4.Fıstık Yağı Metil Esteri (FYME) Üretimi İçin Uygulanan Deneysel Prosedür

Deneysel prosedürler esnasında uygulanan ve yukarıda da anlatılanları özetlemek gerekirse deneyimiz için yağ/alkol stokimetric olarak 6:1 (v/v) belirlenmiştir. Yani 1000 ml fıstık yağı için 200 ml metanol kullanılmıştır. Katalizör olarak kullanacağımız 200 ml'lik baz katalizör metoksit çözeltisi (metilalkol + NaOH) için kütleli olarak reaksiyona sokulan yağın (1000 ml için) % 1,25'i ağırlığında NaOH kullanılmıştır. Yani 200 ml metilalkol içerisinde 11,5 gr NaOH çözdürülmüştür. Şekil 2.3.'de çözelti düzeneği görülmektedir.



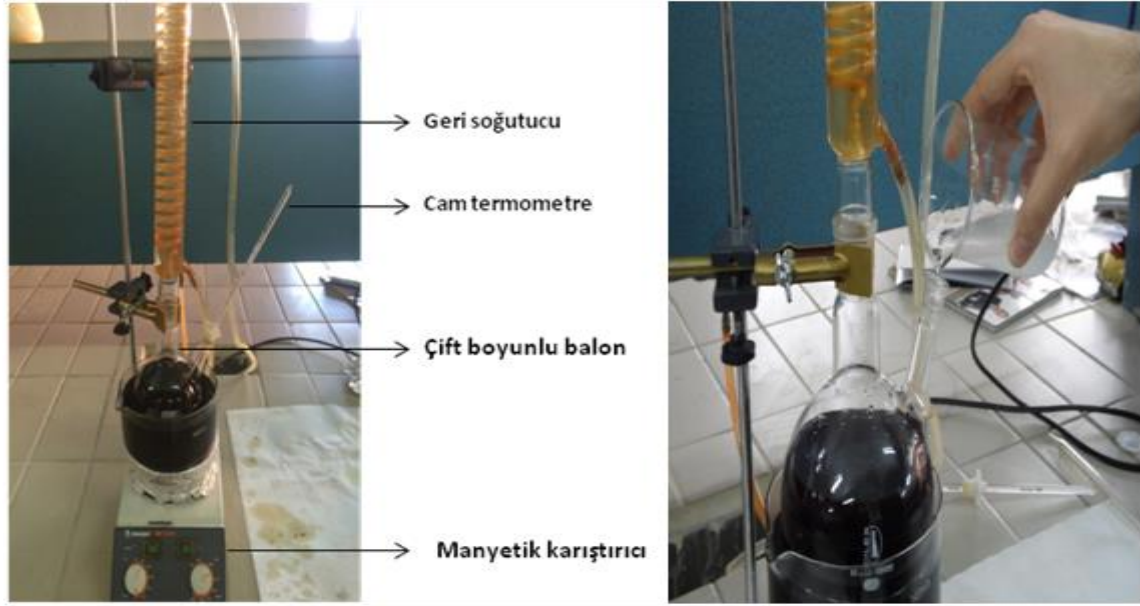
a) Yağ

b) NaOH

c) Metoksit çözeltisi

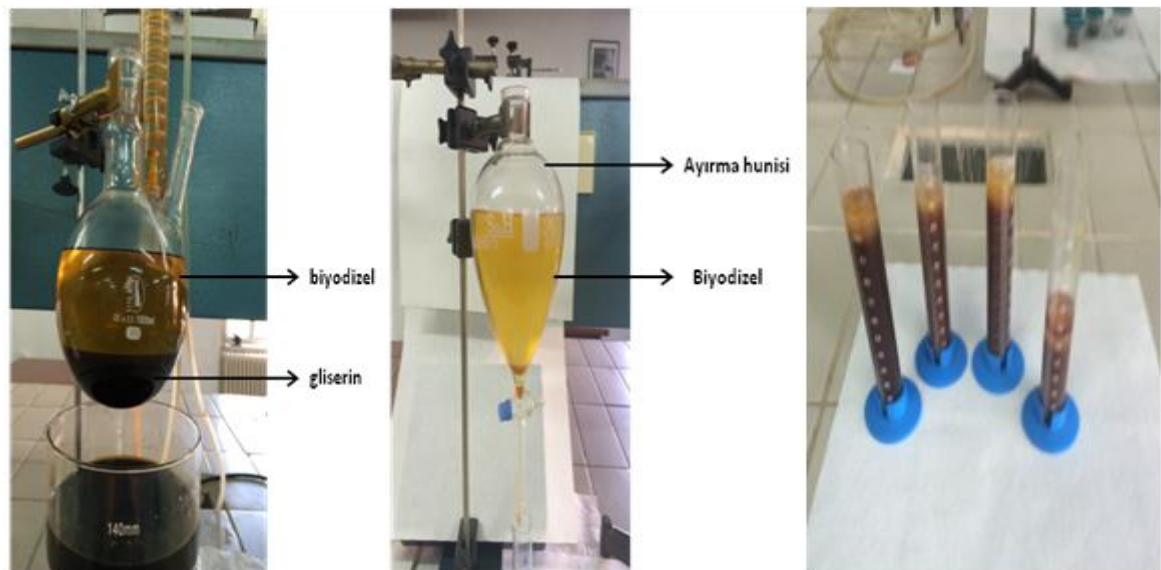
Şekil 2.3. Metoksit çözeltisi hazırlama

1000 ml yer fıstığı yağı iki boyunlu balon içerisine aktarılarak manyetik karıştırıcıda 400 d/d'da 55 °C de karıştırılmıştır. Şekil 2.4.'de görüldüğü gibi hazırladığımız 200 ml' lik metoksit çözeltisi (metilalkol + NaOH) çift boyunlu balon içerisindeki yağımızın üzerine yavaş yavaş aktarılmıştır.



Şekil 2.4. Metoksit aktarımı

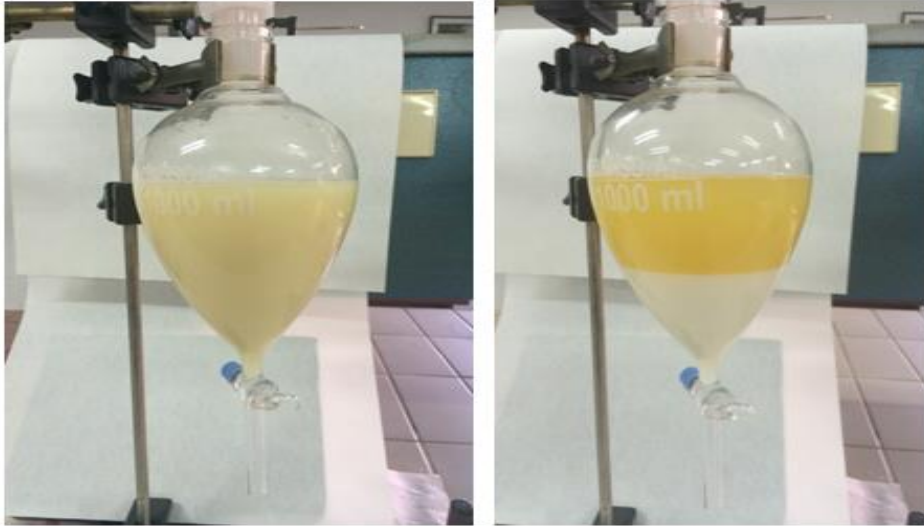
Sıcaklık cam termometre vasıtasıyla kontrol altında tutularak 55°C 'de sabitlenmiştir. Reaksiyon 400 dv/dk 'da 75 dk . sürmüştür. Şekil 2.5.'de görüldüğü gibi süre sonunda gliserin/biyodizel faz ayrışması net bir şekilde görülmüştür. Reaksiyon sonunda karışım ayırma hunisine alınarak faz ayrışması bitmesi için 5 saat beklenmiştir. Süre sonunda altta gliserin, üstte ise berrak biyodizel fazı görülmüştür. Gliserin fazı ayırma hunisinden kontrollü musluk vasıtasıyla alınarak biyodizel elde edilmiştir. Ayrılan gliserin miktarı biyodizel verimini ölçmek için biriktirilmiştir.



Şekil 2.5. Reaksiyon sonu faz ayrımı ve biyodizel oluşumu ve gliserin

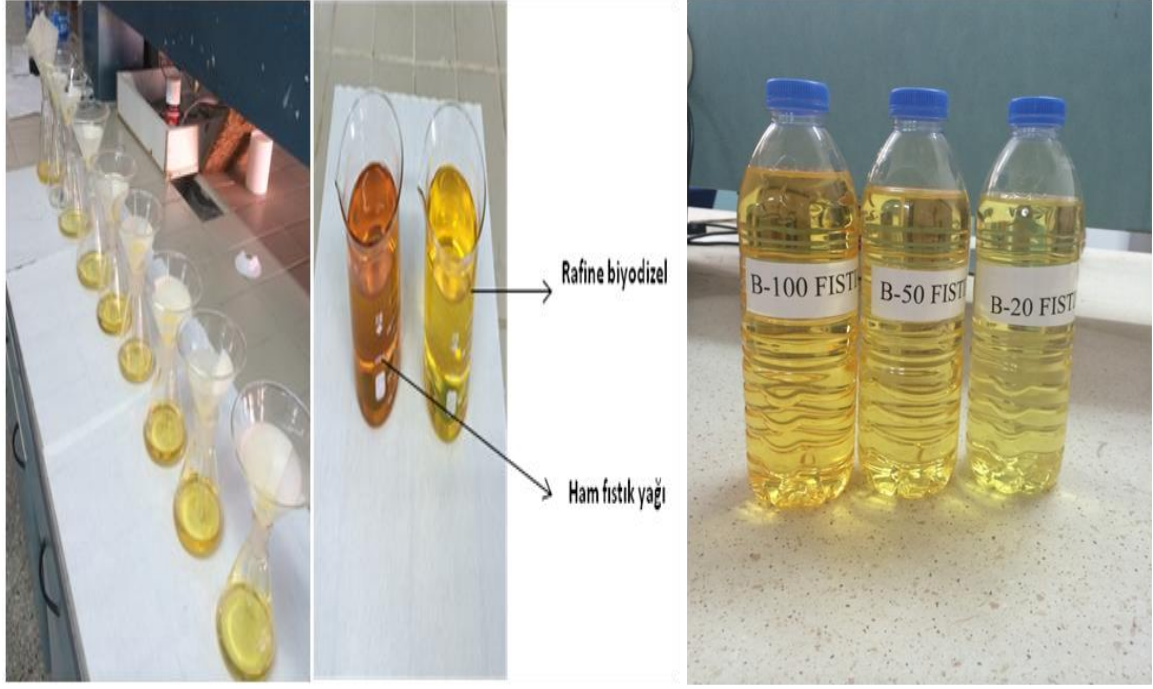
Gliserin fazı büyük oranda ayrılmış olsada az miktarda olsa gliserin tuz ve artık metanol biyodizel fazı içerisinde yer almaktadır. Bu maddeleri biyodizel fazından ayırtmak için yıkama işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Gliserin, tuz ve metanol suda çözünen maddelerdir. Yıkama işlemiyle bu maddeler suda çözünerek alttaki faza geçmektedir. Böylece bu maddeler biyodizelden ayrıştırılabilmektedir.

Yıkama işlemiyle elde edilen biyodizel, kendi hacminin 1/3 oranında ılık distile su ile ayırma hunisi içerisinde karıştırılarak çalkalanmıştır. Bu işlem 3 defa tekrarlanmıştır. Her seferinde altta kalan su fazı ayırma hunisinden ayrılarak atılmıştır. Şekil 2.6.'da yıkama işlemi görülmektedir.



Şekil 2.6. Yıkama işlemi

Saflaştırılan biyodizel buharlaştırma işlemine tabi tutularak içinde eser miktarda kalan su ve metanolden tamamen arındırılmıştır. Son olarak süzgeç kağıt kullanılarak filtreleme işlemi yapılmış, normal dizel ve biyodizel %20, %50 oranlarında karıştırılarak B-20 ve B-50 diye adlandırılan biyodizel karışımları elde edilerek depolanmıştır. Şekil 2.7.'de filtrasyon ve depolama görülmektedir.



a)

b)

Şekil 2.7. Biyodizel filtrasyon işlemi (a) ve depolama (b)

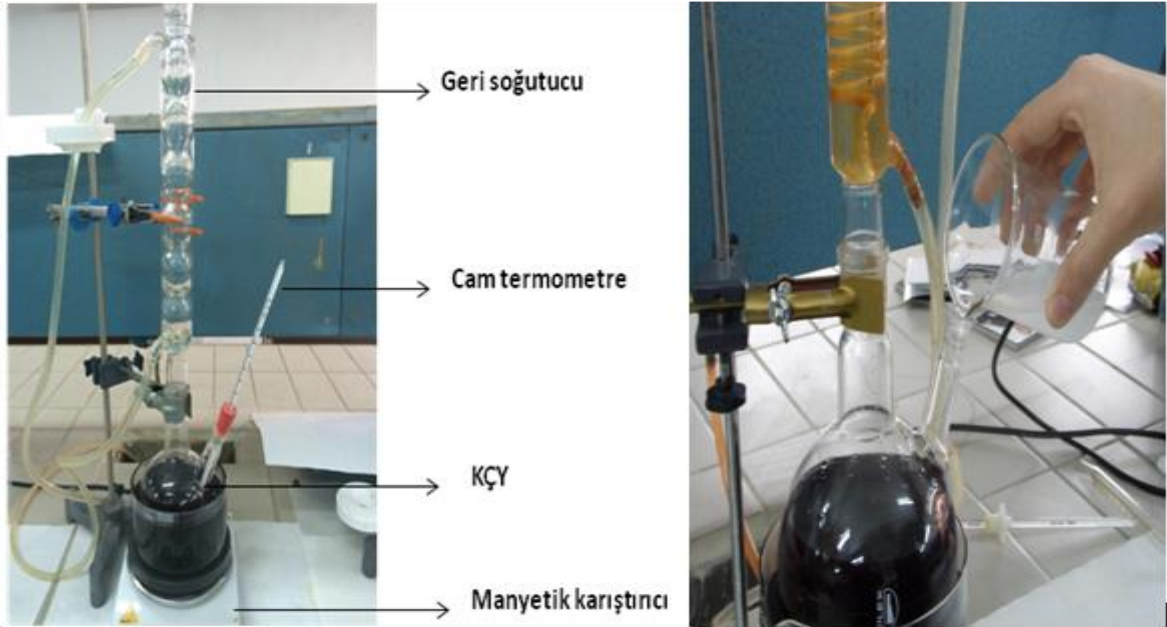
2.5.Kabak Çekirdeği Yağı Metil Esteri (KYME) Üretimi İçin Uygulanan Deneysel Prosedür

Kabak çekirdeği yağından (KÇY) elde edeceğimiz biyodizel yakıt için reaksiyonda uygulanacak yağ/alkol stokimetric oranı olarak 6:1 (v/v) belirlenmiştir. Yani 1000 ml KÇY için 200 ml metanol kullanılmıştır. Katalizör olarak kullanacağımız 200 ml'lik baz katalizör metoksit çözeltisi (metilalkol + NaOH) için kütleli olarak reaksiyona sokulan yağın (1000 ml için) \approx % 1'i ağırlığında NaOH kullanılmıştır. Yani 200 ml metilalkol içerisinde 7,5 gr NaOH çözdürülmüştür. Şekil 2.8.'de metoksit hazırlama prosedürü görülmektedir.



Şekil 2.8. Metoksit çözeltisi hazırlama

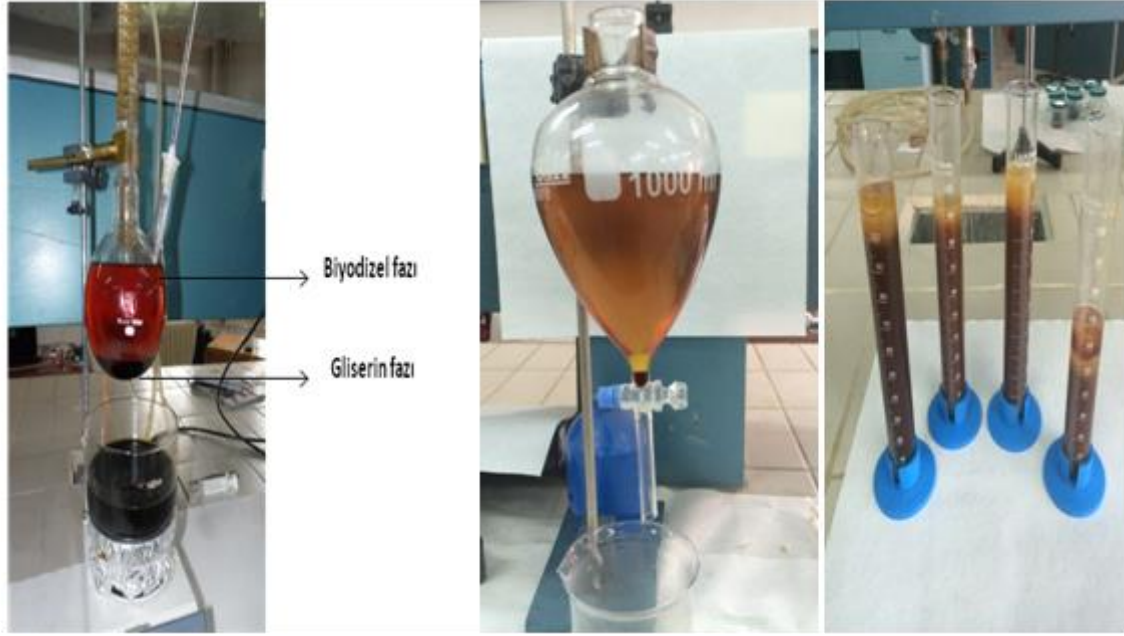
1000 ml KÇY çift boyunlu balon içerisine aktarılarak manyetik karıştırıcıda 400 d/d'da 60 C° de karıştırılmıştır. Hazırladığımız 200 ml' lik metoksit çözeltisi (metilalkol + NaOH) çift boyunlu balon içerisindeki yağımızın üzerine yavaş yavaş aktarılmıştır. Şekil 2.9.'da metoksit aktarımı görülmektedir.



Şekil 2.9. Metoksit aktarımı

Sıcaklık cam termometre vasıtasıyla kontrol altında tutularak 60 C° de sabitlenmiştir. Reaksiyon 400 d/d'da 90 dk. sürmüştür. Süre sonunda gliserin/biyodizel faz ayrışması net bir şekilde görülmüştür. Reaksiyon sonunda karışım ayırma hunisine

alınarak faz ayrışması bitmesi için 5 saat beklenmiştir. Sure sonunda altta gliserin, üstte ise berrak biyodizel fazı Şekil 2.10.'da olduğu gibi görülmüştür. Gliserin fazı ayırma hunisinden kontrollü musluk vasıtasıyla alınarak biyodizel elde edilmiştir. Ayrılan gliserin miktarı biyodizel verimini ölçmek için biriktirilmiştir.



Şekil 2.10. Biyodizel faz ayrımı, biyodizel ve gliserin oluşumu

Gliserin fazı büyük oranda ayrılmış olsada az miktarda olsa gliserin tuz ve artık metanol biyodizel fazı içerisinde yer almaktadır. Bu maddeleri biyodizel fazından ayırtmak için yıkama işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Gliserin, tuz ve metanol suda çözünen maddelerdir. Yıkama işlemiyle bu maddeler suda çözünerek alttaki faza geçmektedir. Böylece bu maddeler biyodizelden ayırtılabilmektedir.

Yıkama işlemiyle elde edilen biyodizel, kendi hacminin 1/3 oranında ılık distile su ile ayırma hunisi içerisinde karıştırılarak çalkalanmıştır. Bu işlem 3 defa tekrarlanmıştır. Her seferinde altta kalan su fazı ayırma hunisinden ayrılarak atılmıştır. Her 3 yıkama ve yıkama sonrası net biyodizele ait resimler Şekil 2.11.'de gösterilmiştir. Resimlerden de görüldüğü gibi her yıkama işlemi sonrası biyodizelde berraklaşma görülmektedir.

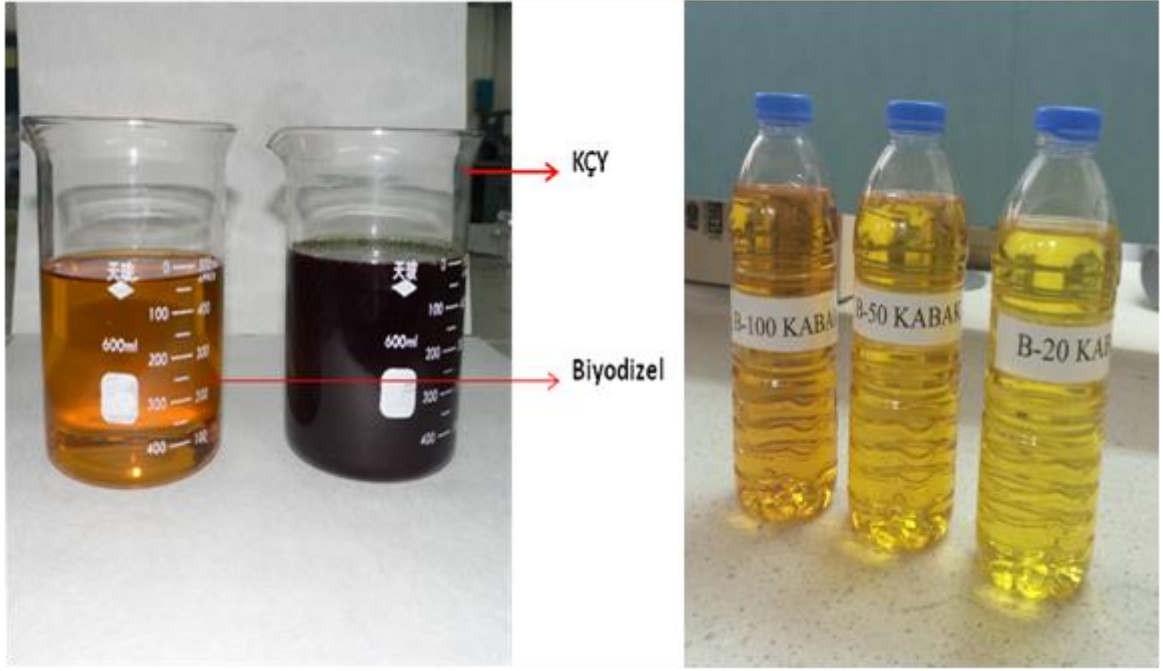


Şekil 2.11. Yıkama işlemi ve elde edilen net biyodizel

Saflaştırılan biyodizel buharlaştırma işlemine tabi tutularak içinde eser miktarda kalan su ve metanolden tamamen arındırılmıştır. Son olarak şekil 2.12.'de görüldüğü gibi süzgeç kağıt kullanılarak filtrasyon işlemi yapılmış, normal dizel ve biyodizel %20, %50 oranlarında karıştırılarak B-20 ve B-50 diye adlandırılan biyodizel karışımları elde edilmiştir.(Şekil 2.13.) Elde edilen bu karışımlardan numuneler alınarak İNÖNÜ üniversitesi Petrol Araştırma Laboratuvarında (PAL) analizleri yapılmış ve sonuçları bulgular kısmında detaylıca değerlendirilmiştir.



Şekil 2.12. Filtrasyon işlemi



Şekil 2.13. Elde edilen biyodizel ve % karışımları

2.6.Kaplama Prosedürleri

Bu bölümde deney motoruna ait yanma odası elemanlarının (silindir gömleği, egzoz ve emme supapları, piston üst yüzeyinin) kaplama prosedürleri detaylıca anlatılmıştır. Deneysel esnasında kaplama yöntemi olarak katı ortam borlama ve plazma spray yöntemleri uygulanmıştır. Silindir gömlekleri ve supaplar katı ortam borlama yöntemiyle Ekabor-2 tozu kullanılarak, piston üst yüzeyi ise bor içerikli (NiCrBSi) tozuyla plazma spray yöntemi kullanılarak kaplanmıştır. Borlama işlemleri Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fizik Bölümü laboratuvarında, plazma spreyle kaplama işlemi ise İstanbul Plazma Teknik firmasında gerçekleştirilmiştir. Borlama ile kaplama işlemine geçilmeden önce ön çalışma yapılarak borlama parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler sıcaklık, zaman ve kaplama kalınlığı olup bunlar deneysel çalışmanın temellerini oluşturmaktadır. Bu amaçla kaplanacak malzeme yapısına eş malzemeler alınıp, bu malzemeler üzerinde farklı sıcaklık zaman ve kaplama kalınlığı çalışmaları yapılmış olup ideal parametreler belirlenmiş ve işlemler bu parametrelere göre gerçekleştirilmiştir.

Kaplama işlemleri neticesinde amaçlananlar aşağıda sıralanmıştır

- 1- Yüksek sertlik
 - 2- Alt yüzeye iyi tutunma özelliği
 - 3- Yüksek sıcaklık dayanımı
 - 4- Yüksek ısılarda sertliğini koruma özelliği
 - 5- Dökme demir malzemeye yakın genleşme katsayısı
 - 6- Düşük ısı iletim katsayısı
 - 7- Yüksek korozyon, oksidasyon direnci
 - 8- Yüksek mukavemet ve ömür artışı
 - 9- Yüksek aşınma direnci
 - 10- Yüksek sıcaklıklarda malzemenin fiziksel ve kimyasal özelliklerini muhafaza edebilme
 - 11- Hidromekanik yağlama özelliğini muhafaza edebilme
- Aşağıda kaplama prosedürleri detaylıca anlatılmıştır

2.6.1. Deneyde Kullanılan Malzemeler ve Kaplama Prosedürleri

2.6.1.1. Silindir Gömleği

Deneyler esnasında GG-25 lamel grafitli dökme demirden imal edilmiş ham silindir gömleği kullanılmıştır. Ham silindir gömleğinden kasıt otomotiv yan sanayinde özellikle motor rektafiyesinde kullanılan, orjinal gömleklere nazaran et kalınlığı ve boyutları talaşlı imalat yöntemleriyle orjinal boyutlarına getirilebilen malzemelerdir. Deneylerde kullanılmak üzere sanayiden ham gömlek olarak tabir edilen bu silindirler tedarik edilmiştir. Aşağıda ham gömlek ve orjinal gömleğe ait resimler Şekil 2.14.'de yer almakta olup, boyutsal ölçüleri gösteren şekiller de şekil 2.15.'de yer almaktadır.

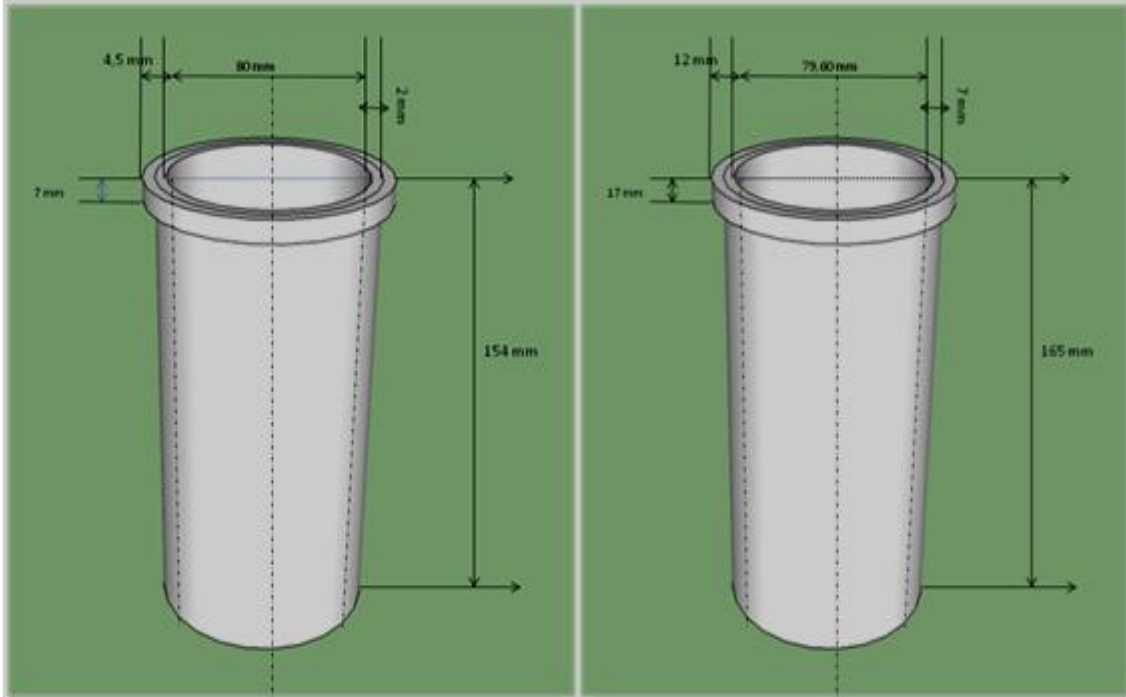


a)



b)

Şekil 2.14. Orjinal silindir gömleği (a) ve ham silindir gömleği (b)



a)

b)

Şekil 2.15. Orjinal silindir gömleğine ait ölçüler (a), ham silindir gömleğe ait ölçüler (b)

Silindir gömlekleri GG-25 lamel grafitli dökme demirlerden imal edilen malzemeler olup aşağıda Tablo 2.3.'de kimyasal bileşimi ve Tablo 2.4.'de fiziksel özellikleri yer almaktadır.

Tablo 2.3. GG-25 dökme demire ait kimyasal bileşim

GG-25	C	Si	Mn	S	P	Fe
(%)	3,00-3,25	1,85-2,10	0,40-0,70	0,12 max	0,25	balans

Tablo 2.4.GG-25'e ait fiziksel özellikler (URL-8-2014).

ÖZELLİK (GG-25)		
Yoğunluk	kg/dm³	7,20
Çekme mukavemeti	N/mm²	250
Basma mukavemeti	N/mm²	700-1000
Bükme mukavemeti	N/mm²	350-490
% 0,2 akma sınırı	N/mm²	0,01-163
Kopma uzaması	%	0,3
Sertlik	HB	100-300
E-Modül	GPa	103
Özgül ısı değeri	J/kg.K	460
Özgül ağırlık 20 C°	kg/dm³	7,2
Çekme- basma değişim mukavemeti	N/mm²	60
Isı iletkenliği 300 C° de	W/m.K	45-59
Isı genleşme katsayısı 20-400 C° de	µm/m.K	11,7
Ses sönüm kabiliyeti relatif büyüklük		285

Silindir gömleklerinin borlama işlemleri katı ortam borlama yöntemi ile gerçekleştirildiği için kutu sementasyon yöntemine benzer olarak numuneler için kalıplar ve kutular hazırlanmıştır.

2.6.1.2.Piston

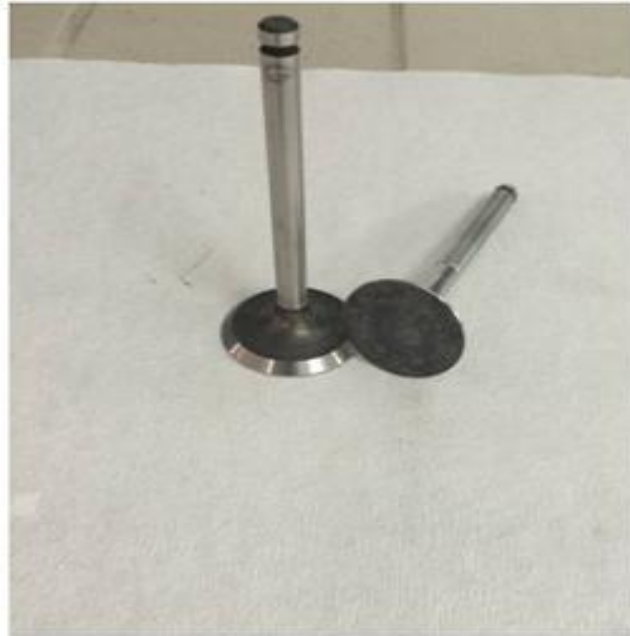
İçten yanmalı motorlarda, motorun en önemli parçalarından biride pistonlardır. Pistonlar yanmış gaz basıncını biyel kolu yardımı ile krank miline ileten parçalar olup silindir kapağı ile birlikte yanma odasını oluştururlar. Al-Si içerikli malzemeden imal edilmişlerdir. Bilindiği gibi pistonlar yanma esnasında meydana gelen yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalan malzemelerdir. Bu çalışmada da yanma odasında oluşan bu olumsuz etkileri gidermek amacıyla pistonlarımızın üst kısmı plazma sprey yöntemi ile NiCrBSi tozu kaplanmıştır. Deneysel detaylar aşağıda ki kısımlarda açıklanacaktır.

2.6.1.3.Supap

Deneyleerde kullandığımız egzoz ve emme supapı ait fotoğraf, Şekil 2.16.'da ve kimyasal bileşimi Tablo 2.5. aşağıda yer almaktadır.

Tablo 2.5. Emme ve egzoz supapları kimyasal bileşim

	Emme Supap	Egzoz supap
DIN	X45CrSi93	X53CrMnNi219
Kimyasal analiz	%	%
C	0,40-0,50	0,48-0,58
Si	2,70-3,30	0,25
Mn	0,80	7,00-10,00
P	0,040	0,050
S	0,030	0,030
Cr	2,00-10,00	20,00-22,00
Ni	---	3,25-4,50
Fe	Balans	Balans
Diğerleri	---	0,38-0,50
Çekme mukavemeti (N/mm²)	900-1100	950-1200
Lineer genleşme katsayısı (20-700 C°)	13,9	18,5



Şekil 2.16. Egzoz ve emme supapı

2.6.2. Borlama Elemanları

Deneyleer esnasında borlama elemanı olarak ticari Ekabor®-2 tozu ve deoksidan malzeme olarakda Ekrit® kullanılmıştır. Ekabor-2 bor bileşiği ve Ekrit tozu Almanya BORTEC firmasının birer ürünü olup Türkiye’de Manisa merkezli VEZNELİ A.Ş. firmasından tedarik edilmiştir.

2.6.3.Fırın

Deneyleer boyunca borlama işlemleri PROTHERM marka PID kontrollü fırında gerçekleştirilmiştir. Fırın içi sıcaklık dijital olarak kontrol edilebilmekte olup 1600 °C ye kadar çıkabilmektedir.

2.6.4.Borlama Deneysel Prosedürler

2.6.4.1.Silindir Gömleği Kaplama İşlemleri

Kaplama işlemlerine geçmeden önce yaptığımız ön deneysel çalışmalarda kaplamak istediğimiz parçalardan 20x20 mm boyutlarında numuneler kesilerek borlama işlemlerine tabi tutulmuştur.Buradaki amaç; esas kaplama işlemine geçmeden önce ideal kaplama kalınlığının hangi sıcaklık ve zaman periyodunda oluşacağını belirlemektir.Ön deneysel çalışmalar sonucunda borlama işlemi için ideal sıcaklık ve zamanın 950 °C ve 4 saat ve kaplama kalınlığının ise ≈140-150 µm olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlara ulaşmak için borlama işlemi birkaç kez tekrarlanmıştır. İdeal değerlere ulaşılnca esas deneyleer başlanmıştır.

Silindir gömleğinin borlanması bir kaç adımdan oluşan bir prosedürden meydana gelmektedir. Bu adımlar sırasıyla ham gömleğin fırın içerisinde yüksek sıcaklık altında tavlama, tavlama sonrası ham gömleğin işlenmesi, işlenen ham gömleğin kalıp içerisine alınarak Ekabor-2 tozuyla ve deoksidan malzeme ile toz örtüsüyle kaplanması, kalıbın paslanmaz çelik kutuya yerleştirilerek belirlediğimiz sıcaklık ve zaman periyodunda fırında tekrar ısıl işleme tabi tutulması, borlama işlemi bittikten sonra ise ölçülerinin orjinal ölçülerine getirilmek üzere yüzeyinden talaş kaldırılması ve son olarakda honlama işlemi uygulanmıştır. Yapmış olduğumuz bu işlemler esnasında ham gömlekten yeni bir silindir gömleğinin imal edilmesi şeklinde de açıklanabilir. Bu adımlar aşağıda detaylarıyla anlatılmıştır.

Deneylere başlamadan önce numunelerimize uygun paslanmaz çelikten kaplama kalıpları imal edilmiştir. Yukarıda ölçülerini de vermiş olduğumuz ham gömleğimiz ilk olarak fırınımızda tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Buradaki amaç yüksek sıcaklıkta gerçekleştireceğimiz borlama işlemi öncesi numunemizin yapısal olarak pekleşmesi ve taneler arası boşlukların sıklaşması ve borlama işleminde karşımıza çıkacak yüksek sıcaklıktan kaynaklı yapısal deformasyonların ve gerilmelerin önüne geçilmesidir. Bu amaçla ham gömlek borlama parametrelerinde belirtmiş olduğumuz sıcaklık ve zaman periyodu olan 950 °C / 4 saat boyunca ısı işlem görmüştür. İşlem sonucunda numunemiz oda sıcaklığında soğutulmuş ve borlama öncesi kaba talaş alma işlemi uygulanmıştır. Aşağıdaki Şekil 2.17.'de ısı işlem görmüş ve görmemiş ham gömleğe ait resim yer almaktadır.

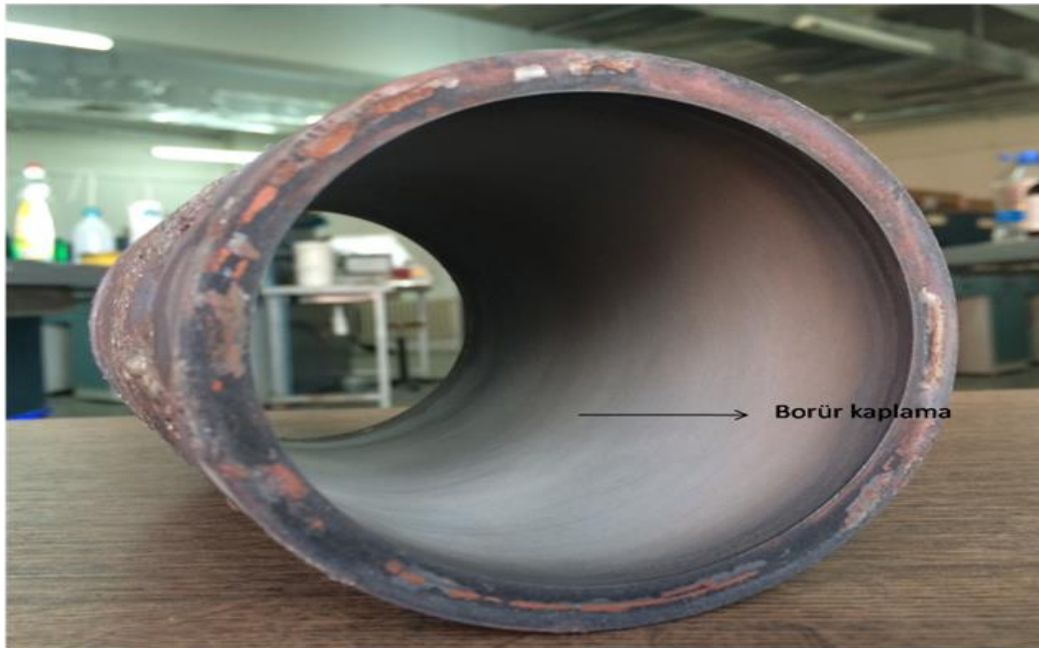


Şekil 2.17. Borlama öncesi ham gömlek ve ısı işlem görmüş gömlek

Bundan sonraki aşamada ısı işlem gören gömlek iç yüzeyi, etil alkolle temizlenmiş ve yüzeyde olası kir ve yağdan arındırılmıştır. Daha sonra ise numuneler için özel olarak hazırlanmış olduğumuz kalıba alınarak gömleklerin içerisi bor bileşiği olan Ekabor-2 tozuyla doldurulmuş ve en üst kısma ise 15 mm'lik Ekrit tabakası eklenerek kalıp üst kapağı kapatılmıştır. Hazırladığımız kalıp paslanmaz çelik kutunun içine yerleştirilmiş ve

fırınının içerisine konarak 950 °C / 4 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama sonrası numuneler fırın içerisinde soğumaya bırakılmıştır.

Soğuma sonrası silindir gömleği kutudan ve kalıptan çıkarılmıştır. Silindir gömleğinin iç yüzeyine bakıldığında (Şekil 2.18.) gayet homojen ve üniform bir borür kaplama tabakasının oluştuğu görülmüştür. Bundan sonraki aşamada ise silindir gömleğinin iç ölçüleri orjinal ölçülerine getirmek amacıyla 0,01 mm' lik hassasiyette honlama işlemine tabi tutulmuştur. Komparatör vasıtasıyla yapılan ölçümlerde silindir gömleğinin ideal ölçüsüne geldiği anlaşılmıştır. Son işlem olarak torna vasıtasıyla gömleğin yüzeyinden talaş kaldırılmış ve gömleğin dış yüzeyide ideal et kalınlığı olan 2 mm ve boy ölçüsü olan 154 mm ölçülerine getirilmiştir. Şekil 2.19.'da silindir gömleklerinin deneye hazır hali görülmektedir.



Şekil 2.18. Yüzeyde oluşan borür tabaka



Şekil 2.19. Silindir gömleklerinin deneye hazır hali

2.6.4.2. Supap Kaplama

Supapların kaplama prosedüründe silindire benzer bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Deney motorumuza ait emme ve egzoz supaplarına ait kalıplar hazırlanmış ve supapların yanma odasına bakan yüzleri borlama işlemine tabi tutulmuştur. Supaplar için hazırlanan kalıplar ve kullanılan malzemeler Şekil 2.20.'de görülmektedir.



Şekil 2.20. Supaplar, kalıplar ve borlama elemanları

Kalıp içerisine alınan supaplar üzerleri 15 mm Ekabor-2 tozu ve toz üzerinde 10 mm Ekrit eklenerek kapağı kapatılmış daha sonra fırının içerisine yerleştirilerek 4 saat boyunca 950 °C de borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama sonrası numuneler fırın içerisinde oda sıcaklığına gelene kadar bekletilmiştir. Böylece supapların borlama işlemi belirlenen sıcaklık ve zamanda bitirildikten sonra kullanıma hazır hale gelmişlerdir. Şekil 2.21.'de borlanan supaplara ait resim görülmektedir.



Şekil 2.21. Borlanan supaplar

2.6.4.3. Piston Kaplama

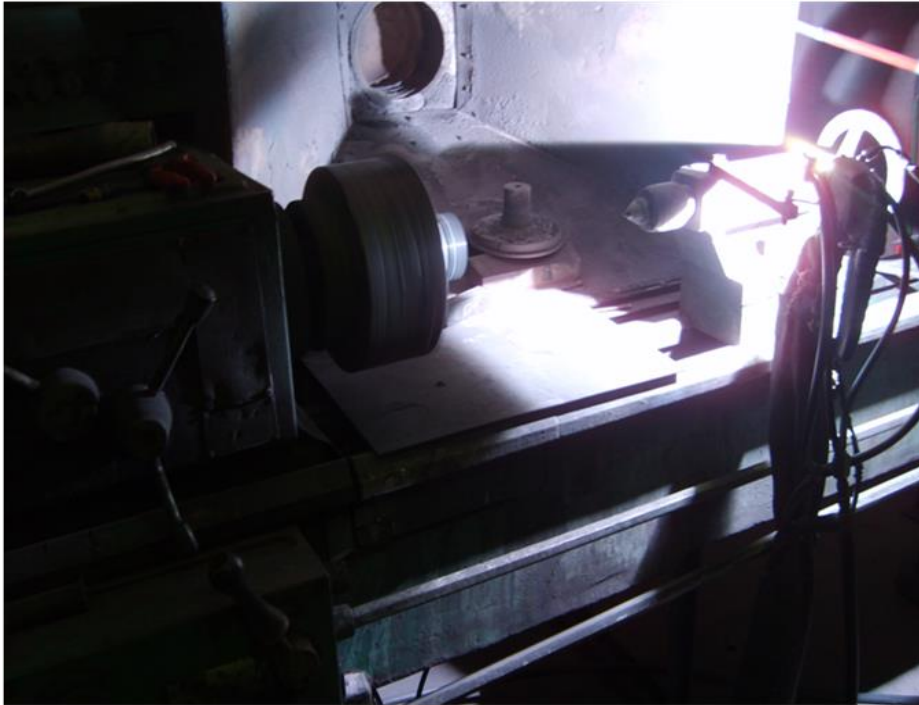
Piston malzemesi Al-Si içerikli bir malzeme olduğundan ergime ısısı yaklaşık olarak 900 °C civarındadır. Bu sebeple borlama gibi 900 °C ve üzerinde uygulanan kaplama yöntemlerine uygun bir malzeme değildir. Dolayısıyla piston kaplaması yapılırken bu özellikler göz önüne alınarak plazma sprej yöntemi tercih edilmiştir.

İlk etapta kaplama sonrası motorun sıkıştırma oranını değiştireceği düşünülerek piston üst yüzeyinden 300 µm talaş kaldırılmıştır. Kaplama işlemi ilk etapta yüzeye 50'şer µm kalınlıkta CoNiCrAl Yttra bağlayıcı (bond) malzeme püskürtülerek başlamış ve daha sonra oluşturulan bu bağlayıcı tabakanın üzerine 250µm kalınlıkta NiCrBSi tozu püskürtülerek sonlandırılmıştır. Böylece piston üst yüzeyinde bor içerikli 300 µm' luk kaplama tabakası elde edilmiştir.

Kaplama işlemleri Sulzer-Metco Type 3 MB atmosferik plazma ark cihazıyla gerçekleştirilmiştir. Kaplama işleminde uygulanan plazma ark sprej parametreleri Tablo 2.6.'da görülmektedir. Şekil 2.22.'de plazma ark sprej işleminin yapılışı, Şekil 2.23.'de pistonun kaplamadan önceki ve sonraki resmi görülmektedir.

Tablo 2.6. Kaplama işleminde kullanılan plazma ark sprej parametreleri

Plazma Tabancası		Sulzer-Metco 3 MB
Akım	(Amper)	500
Voltaj	(Volt)	62
Sprej Mesafesi	(mm)	70
Gaz Basıncı	(psi) (Ar/H ₂)	80/15
Uygulanan Kaplama Kalınlığı	(μ m)	250 μ m (NiCrBSi)+ 50 μ m(CoNiCrAlYttra)=300 μ m
Ara Malzeme	(50 μ m)	CoNiCrAl Yttra
Kaplama Malzemesi		NiCrBSi



Şekil 2.22. Plazma spreyleme işlemi



Şekil 2.23. Kaplama öncesi ve sonrası piston görüntüsü

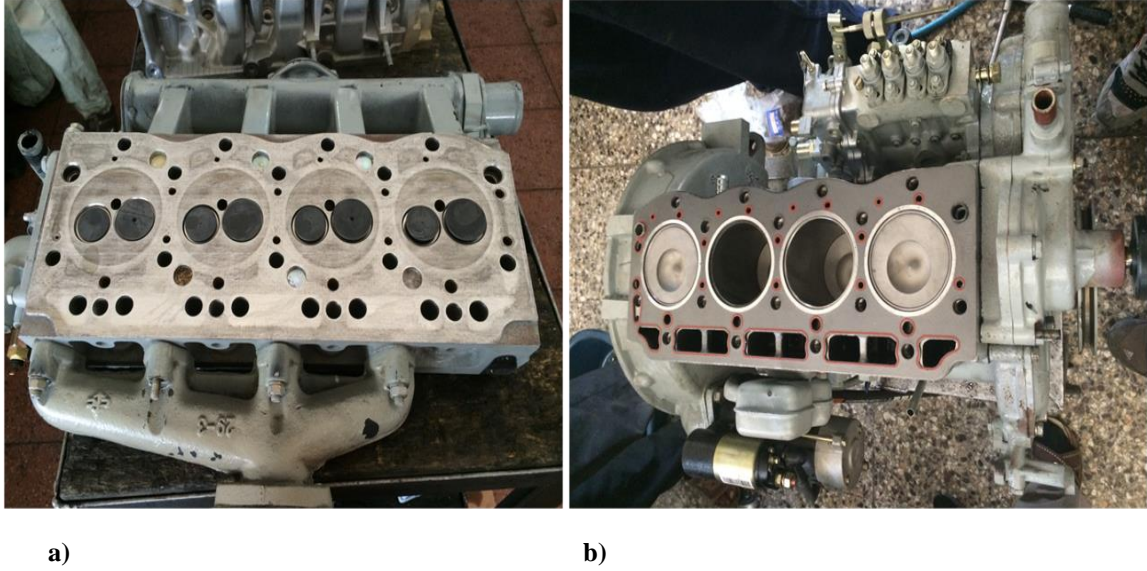
2.6.5. Kaplanan Parçaların Motora Entegrasyonu

Kaplama işlemleri biten motor parçalarımız artık montaja hazır hale gelmiş olup Şekil 2.24.'de tüm kaplanmış parçalar görülmektedir.

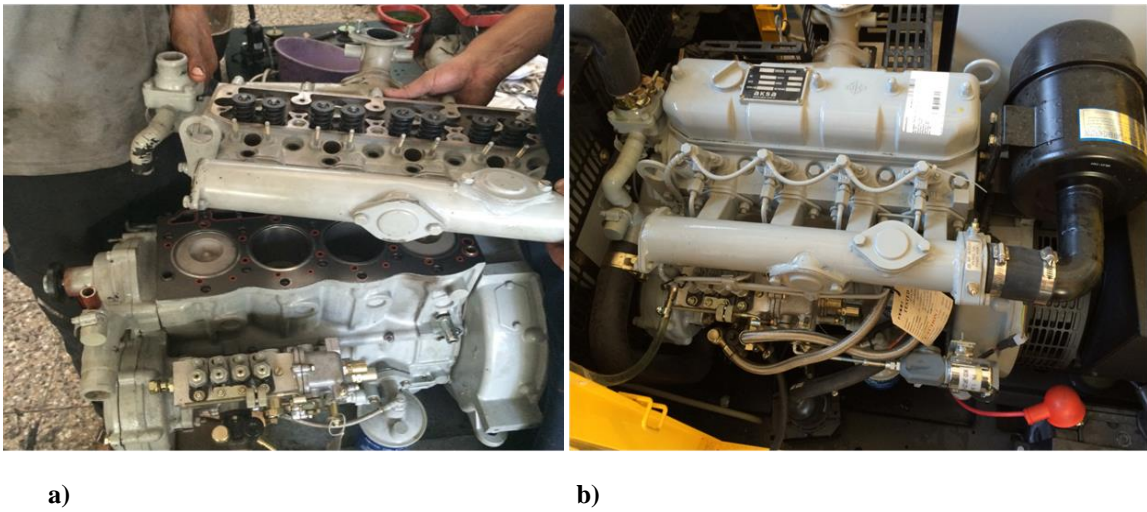


Şekil 2.24. Kaplanan tüm motor parçaları

Kaplanmış olduğumuz silindir gömlekleri, supaplar ve pistonlar motora entegre edilmiştir. Aşağıda bu aşamalara ait resimler sırasıyla görülmektedir. (Şekil 2.25-Şekil 2.26).



Şekil 2.25. Kaplanmış supapların (a), pistonların ve gömleklerin (b) motora entegrasyonu



Şekil 2.26. Motor üst kapağının yerleştirilmesi (a) ve deney motorunun son hali (b)

Motor parçalarının montajı bitirilerek motor çalışır vaziyete getirilmiştir. Motorun çalışmasında herhangi bir sorun ortaya çıkmamış olup gayet sorunsuz bir şekilde çalıştığı görülmüştür. Bundan sonra ki bölümde kaplanmış motor parçalarının entegre edildiği deney motorumuz üzerinde yapılan performans, özgül yakıt tüketimi ve egzoz emisyon ölçümleri detaylarıyla anlatılmıştır.

2.7. Performans, Özgül Yakıt Tüketimi ve Egzoz Emisyon Ölçümleri

2.7.1. Deney Motoru

Kaplama işlemleri 16 kVA dizel bir jeneratöre ait motor parçaları üzerinde yapılmış olup güç, performans, özgül yakıt tüketimi (ÖYT), egzoz gaz sıcaklığı (EGS), is ve egzoz emisyon ölçümleri bu jeneratör grubu üzerinde gerçekleştirilmiştir. Aşağıda deneyde kullandığımız dizel jeneratöre ait teknik özellikler Tablo 2.7- ve Tablo 2.8.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.7. Deney Motoruna ait teknik özellikler

Üretici		AKSA
Model		A4CRX18
Silindir ve Tasarım		4 SİLİNDİRLİ SIRALI TİP
Hava Emme		DOĞAL EMİŞLİ
Maksimum Stand by Güç		16,50 kW / 22 BG (1500 d/dk)
Toplam Silindir Hacmi	L	1,80
Çap ve Stroke	mm	80x 90
Sıkıştırma Oranı		18.0:1
Norminal Devir	d/dk	1500
Governör Tipi		MEKANİK
Yağ Kapasitesi	L	5,00
Su Kapasitesi	L	9,00
Emilen Hava Debisi	m ³ /dk	2,00
Radyatör Hava Debisi	m ³ /dk	120,00
Egzoz Gaz Debisi	m ³ /dk	5,80
Egzoz Gaz Sıcaklığı	C°	425,00
Elektirik Sistemi		12 V d.c.
Yakıt Tüketimi (%100 yükte)	L/sa	4,10

Tablo 2.8. Alternatör teknik özellikleri

Üretici		AKSA
Frekans	Hz	50
Güç	kVA	16,00
Tasarım		Fırçasız, 4 Kutuplu
Cos fi		0,80
Faz sayısı		3
Voltaj	V	400/230
Akım	A	23,00
Yalıtım Sınıfı		H
İkaz Sistemi		Elektronik (Avr)

2.7.2.Ölçümlerde Kullanılan Formüller

Motor performansına ilişkin kullandığımız terimler ve bunlara ait formüller aşağıda Tablo 2.9.'da açıklanmıştır. Kısaca performans değerlendirmelerinde kaplanmış ve kaplanmamış motorun fren termal verimi (FTV), fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT), fren özgül enerji tüketimi (FÖET) değerleri belirlenen yükler için karşılaştırılmıştır.

Tablo 2.9. Formüllere ait kısaltma ve birimler

TERİMLER	KISALTMA	BİRİM
Yakıt Gücü	YG	(g x kj)/sn
Fren Gücü	FG	(kW)
Yakıtın Kalorifik Değeri	YKD	(kj/kg)
Yakıt Tüketimi	YT	(gr/sn) veya (kg/sa)
Fren Termal Verim	FTV	(%)
Fren Özgül Yakıt Tüketimi	FÖYT	(kg/kW.sa)
Fren Özgül Enerji Tüketimi	FÖET	(kJ/kW.sa)

Yakıt Gücü

$$YG = m_f \times YKD$$

$m_f = 1$ saniyede tüketilen yakıt kütlesi(gr/sn)

Yakıt Tüketimi (YT)

$$YT = \frac{\text{Tüketilen yakıt miktarı}}{\text{Zaman}} = \text{gr/sn veya kg/saat}$$

Fren Özgül Yakıt Tüketimi (Kg/Kw.Sa) (FÖYT)

$$FÖYT = \frac{\text{Özgül Yakıt Tüketimi}}{\text{Fren gücü}} = (\text{Kg/kW.sa})$$

Fren Termal Verim (%) (FTV)

$$\text{Fren Termal Verim} = \frac{\text{Fren Gücü}}{\text{Yakıt Gücü}}$$

$$FTV (\%) = \frac{FG}{ÖYT \times YKD}$$

$$kW = \frac{(kJ \times 3600 \text{ sn})}{\text{sn} \times \text{sa}}$$

$$kW = 3600 \text{ kJ/sa}$$

$$= \frac{(a) \times 3600 \text{ (kJ/sa)}}{(b) \text{ kg/sa} \times (c) \text{ kJ/kg}}$$

(a) =Fren gücü

(b) =Saatlik yakıt tüketimi

(c) =Yakıtın kalori miktarı

Fren Özgül Enerji Tüketimi (FÖET) (KJ/Kw.Sa)

$$\text{Fren Özgül Enerji Tüketimi} = \frac{(\text{Yakıtın kalori değeri}) \times (\text{Yakıt tüketimi})}{(\text{Çıkış gücü})}$$

$$\text{FÖET} = \frac{(\text{kJ/kg}) \times (\text{kg/sa})}{\text{kW}} = \text{kJ/kW.sa}$$

2.7.3.Emisyon Ölçümleri

Deney motorumuza ait egzoz emisyon ölçümleri BOSCH marka BEA-350 model emisyon cihazı ile yapılmış olup ölçüm aralığı ve hassasiyetini gösterir Tablo 2.10. aşağıda verilmiştir. Deney yakıtı olarak D-2 yakıt, KYME % (20-50-100) ve FYME % (20-50-100) kullanılmıştır.

Tablo 2.10.Bosch Marka BEA-350 Emisyon Cihazının Ölçüm Aralığı ve Hassasiyeti

Bileşenler	Ölçüm Aralığı	Hassasiyet
CO	0.00 – 10.00 % Hac.	0.001 % Hac.
CO ₂	0.00 – 18.00 % Hac.	0.01 % Hac.
HC	0 – 9.999 ppm Hac.	1 ppm Hac.
O ₂	0.00 – 22.00 % Hac.	0.01 % Hac.
Lambda	0.500 – 9.999	0.001
NO	0 – 5000 ppm Hac.	≤ 1 ppm Hac.

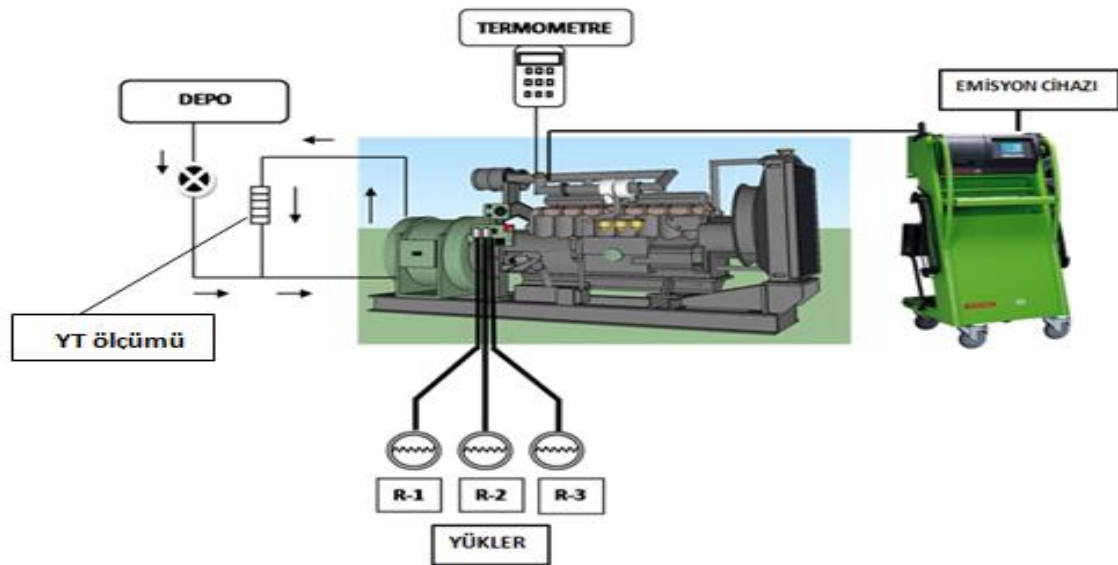
Deneysel ölçümler esnasında standart bir prosedür uygulanmış olup, ilk başta kaplanmamış motor üzerinde daha sonra ise kaplanmış motor üzerinde ölçümler alınmıştır. Prosedür şu şekilde ilerlemiştir;

Motora deney yakıtının aktarılması ve 30 dk süre ile çalıştırılması, daha sonra emisyon ölçümlerine geçilmesi şeklindedir. Emisyon ölçümleri ile kaplanmış ve kaplanmamış motorun D-2 yakıt ve elimizdeki biyodizel yakıt karışımlarının (FYME-KYME) CO, NO_x, HC, is emisyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Alınan sonuçlar bulgular kısmında detaylıca açıklanmıştır.

2.7.4. Fren Yükleri

Deneysel esnasında motora yüklemeler, jeneratörün çıkışına elektriksel direnç yükleri bağlanması vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu yükler fren yüküne denmektedir. Kademe kademe olmak üzere 3 farklı fren yüklemesi yapılmıştır. Motor ilk başta boşta çalıştırılarak ölçümler alınmış, daha sonra ise 2,3 kW, 4,6 kW, 6,9 kW olmak üzere kademeli olarak fren yük değerleri artırılmıştır. Her fren yük değeri altında motorun egzoz emisyon değerleri, is değerleri, egs, öyt değerleri ölçülerek kayıt altına alınmıştır.

YT değerlerini ölçmek için özel bir düzenek hazırlanmış olup 100 ml lik bir yakıt ölçüm tüpü kullanılmıştır. Her 10 ml' lik tüketim esnasında kronometre ile tüketim zamanı ölçülmüştür ve kayıt altına alınmıştır. Aşağıda şekil 2.27.'de yapılan deneyin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.27. Deneyin şematik görüntüsü

2.7.5.Egzoz Gaz Termometresi

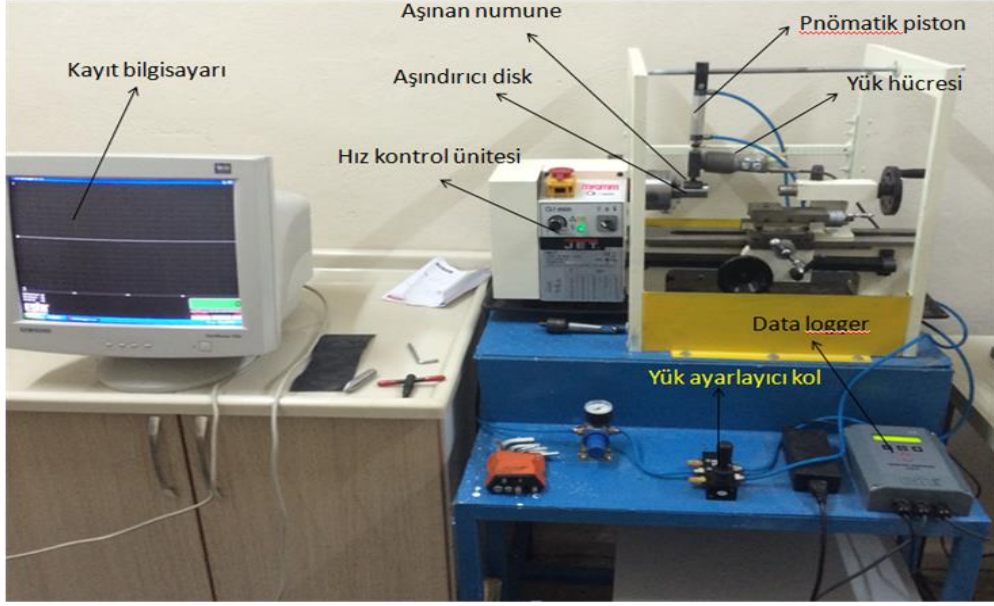
Deneyleyler boyunca egzoz gaz sıcaklığı (EGS) CHY-503 K-J tipi termometre vasıtasıyla ölçölmüştür. Belirlenen her bir yük ve yakıt için egzoz içerisinden ölçümler alınmış olup kayıt altına alınmıştır.

2.8. Yüzey Performans Analizleri

2.8.1. Aşınma Deneyi

Segmanlar pistonların çevresindeki yuvalara takılan, piston ile silindir arasındaki sızdırmazlığı ve yağlamayı sağlayan, pistonun soğutulması ve oluşan ısıyı ileten, pistonu yataklık yapan ve çevresinde ağız açıklığı bulunan halka biçimli bir motor parçasıdır. Malzeme olarak dökme demirin özel bir hali olan “lamel grafitli dökme demir” den üretilmekte olup yüzeyleri kromla kaplanmaktadır. Yanma reaksiyonu neticesinde oluşan yüksek sıcaklık, yanma basıncı, sıkıştırma basıncı ve patlama kuvveti piston üst yüzeyinden segmanlar vasıtasıyla silindir iç yanaklarına iletilmektedir. İletilen kuvvetler iki yüzey arasında adhesiv bir aşınma ortamı meydana getirmektedir. Bu ortam düşünöldüğünde içten yanmalı bir motorun yanma odası elemanları arasında aşınmaya en çok maruz kalan yüzey çiftlerinden biriside silindir gömleği ve segmanlardır. Aşınma metal-metal temasıyla gerçekleştiği için adhesiv bir aşınma şeklinde gerçekleşmektedir.

Adhesiv aşınma miktarını ölçmek için Fırat Üniversitesi Teknoloji Faköltesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarlarında kurulu pnomatik tip aşınma test cihazı kullanılmıştır. Aşınma cihazı üzerinde mevcut ESİT marka yük hücresi ile deney boyunca sürtünme kuvvetleri ölçümü yapılmış ve sistemin parçası olan ESİT marka data logger düzenleyici ile alınan veriler bilgisayara aktarılmıştır. Cihaza ait resim aşağıda Şekil 2.28.'de görölmektedir.



Şekil 2.28. Adhesiv aşınma cihazı

Deney düzeneği hazırlanırken içten yanmalı motorun yanma odası elemanlarının malzeme yapısı göz önüne alınmıştır. Şöyleki silindir gömleği malzememiz GG-25 lamel grafitli dökme demir olduğundan aşınan malzemeler olarak silindir gömleğinden kesilen dökme demir parça, yüzeyi borla kaplanmış silindir gömleğinden kesilmiş parça ve aşındırıcı olarakta segman malzemesi baz alınarak yüzeyi krom kaplı iç yapısı gri dökme demir olan 30 mm çaplı ve 80 mm uzunluğunda silindirik miller hazırlanmıştır. Şekil 2.29.'da numuneler ve aşındırıcı mil görülmektedir.

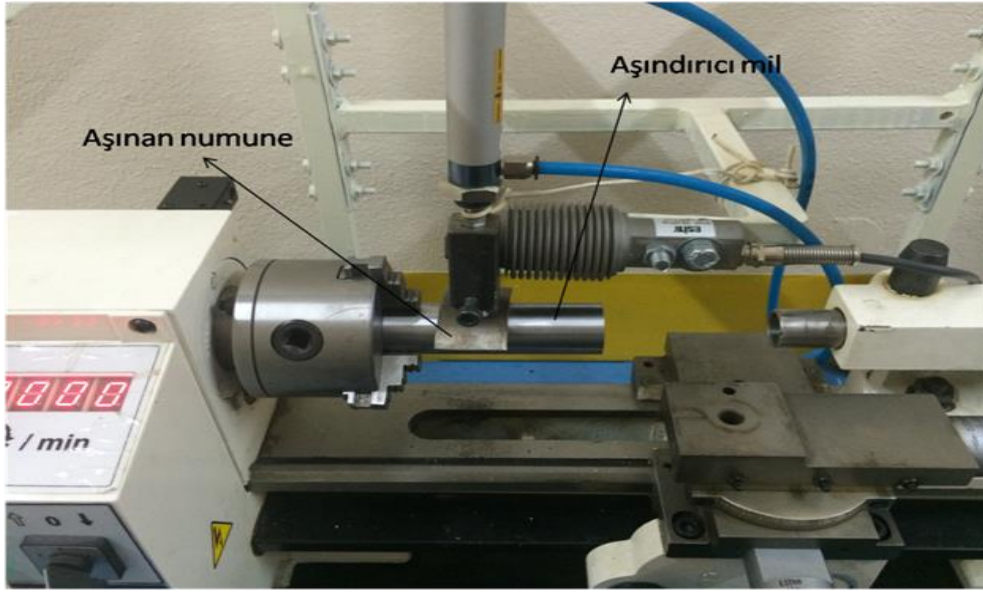


a) Borlanmış numune, aşındırıcı mil

b) Dökme demir numune

Şekil 2.29. Borlanmış numune, dökme demir numune ve aşındırıcı mil

Deneyde kullanılan yükler aşınma cihazında mevcut pnömatik piston vasıtasıyla, yük ayarı ise manuel basınç regülatörü ile ayarlanmıştır. Her bir numune için yük 20 N, 35 N ve 50 N olarak belirlenmiştir. Aşındırıcı mil için dönme hızı 0,84 m/sn (200 d/dk) seçilmiştir. Her bir aşınma deneyi için aşındırıcını farklı bir bölgesi seçilmiştir. Her bir numune için toplam kayma mesafesi 1000 m olup her 100 metre de bir numune alınarak kütle kaybı laboratuarda mevcut 0,0001 g hassasiyette Precisa marka XB220A model hassas terazi ile yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 2.30.'da görülmektedir.



Şekil 2.30. Adhesiv aşınma deney düzeneği

Deneyler birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (mg/m) ile ifade edilerek özgül aşınma miktarı bulunmuştur.

Bu bağıntı:

$$W_s = \frac{\Delta m}{\rho F_n L}$$

W_s = özgül aşınma miktarı (mm^3/Nm)

Δm = Ağırlık kaybı (gr)

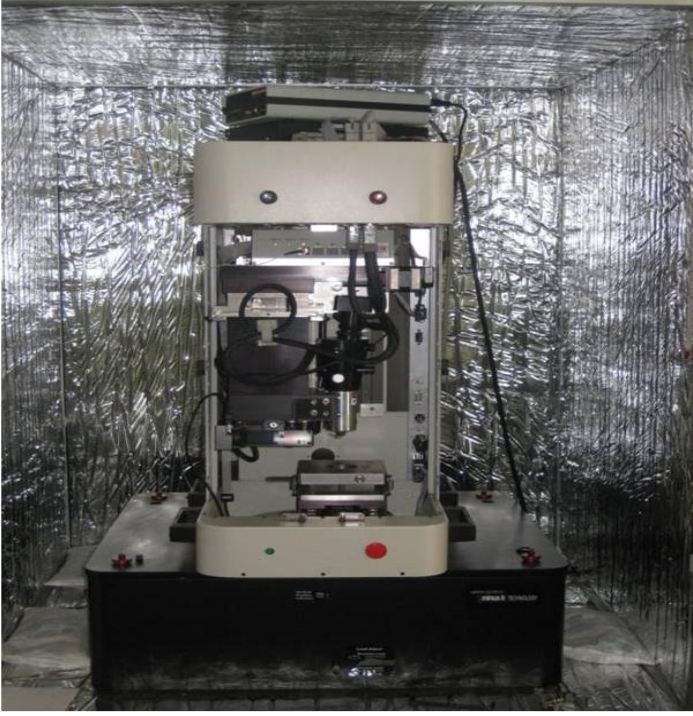
ρ = yoğunluk (gr/cm^3)

F_n = uygulanan normal kuvvet (N)

L = kat edilen toplam yol uzunluğu (m)

2.8.2.Yüzey Sertlik Ölçümleri

Borlanmış numunelerin en karakteristik özellikleri yüzeylerinde meydana gelen borürlerinin yüksek sertlik değerleridir. Malzemelerde meydana gelen bu sertlik değerlerini ölçmek için nanosertlik ölçümleri yapılmıştır. Deney için BRUKER marka UMT-2 NH model nano sertlik cihazı kullanılmış olup cihaza ait resim Şekil 2.31’de görülmektedir.



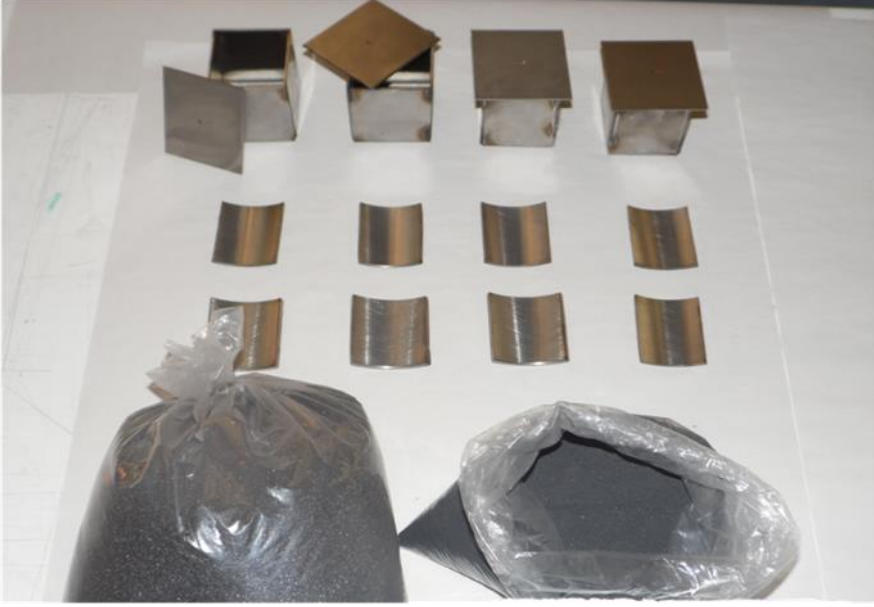
Şekil 2.31. BRUKER marka nanosertlik ölçüm cihazı

2.8.4.Yüzey Analizi

2.8.4.1.Numune Hazırlama

Bu kısımda optik, SEM, X-Ray ve EDAX sonuçları almak için hazırlanacak numunelerin hazırlanma prosedürleri anlatılmıştır.

Yüzey görüntülerini elde etmek için Şekil 2.32.’de görülen silindir gömleğinden 20 x 20 mm boyutlarında numuneler kesilerek özel olarak hazırladığımız 30 x 30 x 50 mm boyutlarında ki paslanmaz çelik kutulara konarak yukarıda anlattığımız ve deney parametremiz olan 950 °C ve 4 saat boyunca borlama işlemine tabi tutulmuştur. Borlama sonrası numuneler fırın içerisinde oda sıcaklığına gelinceye kadar soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra fırın çalışmasını bitirip numunelerin bulunduğu kutucuklar fırından çıkarıldı. Kutucukların kapakları açılarak borlama işlemine tutulan numuneler alınmıştır.



Şekil 2.32. Numune hazırlama

Elde edilen borlanmış numuneler Şekil 2.33.'de görülen Mikrocut-200 hassas kesme cihazıyla daha küçük büyütlar da kesme işlemine tabi tutuldu.



Şekil 2.33. Hassas kesme cihazı

Kesilen numuneler bakalite alınmıştır. Bakaliti hazırlamak için 25 gr Epofix resin +3 gr Epofix sertleştiriciden oluşan karışım hazırlanmış ve hazırlanan karışım numunelerin

bulunduğu kalıpa dökülerek 16 saat bekletilmiştir. İşlem süresi sonunda bakalit kalıplar Formicut Specimen Mover marka otomatik zımparalama ve parlatma cihazına yerleştirilmiştir. (Şekil 2.34.)



Şekil 2.34. Otomatik zımparalama ve parlatma cihazı

Numuneler 5 er dakikalık periyotlar halinde sırasıyla 120-400-600-800-1000-1200-2000 grid ölçülerdeki zımpara kağıtlarıyla zımparalama işlemine tabi tutulmuştur. 2000 grid (mesh) zımparalamadan sonra numuneler su ile yıkanarak oksidasyonu engellemek için etil alkol banyosuna tabi tutulup saç kurutma makinasıyla kurutulmuştur. Kurutulan numuneler ilk olarak 3 numaralı çuha ile 10 dk süre ile 3 µm'lik elmas süspansiyon kullanılarak çuhalanmıştır. Çuhalama işleminden hemen sonra numune su ile yıkandı ve parlatılmış yüzeyi oksidasyondan korumak amacıyla etil alkol banyosuna sokularak sac kurutma makinasıyla kurutulmuştur.

Kurutulan numuneler bu sefer 1 numaralı çuha ile 10 dk süre ile 1 µm'lik elmas süspansiyon kullanılarak çuhalama işlemine tabii tutulmuştur. Çuhalama işleminden hemen sonra numune su ile yıkanmıştır ve parlatılmış yüzeyi oksidasyondan korumak amacıyla etil alkol banyosuna sokularak sac kurutma makinasıyla kurutulmuş ve dağlama işlemine geçilmiştir.

Dağlama işlemi için %2 HNO₃ + %98 etil alkolden oluşan dağlama karışımı hazırlanmıştır. Yüzey parlatma işlemi biten numuneler 10 sn süre ile dağlayıcıya

daldırılmış, suyla yıkanarak etil alkol banyosuna sokulmuştur. Hızlı bir şekilde kurutucuyla kurutulan numuneler görüntü almaya hazır hale getirilmiştir.

Numunelerde makro inceleme yapmak için optik mikroskop altında inceleme yapılmıştır. İnceleme için SHIMADZU marka DUH-W201S model optik mikroskop kullanılmış olup resmi Şekil 2.35.' de görülmektedir.



Şekil 2.35. Optik mikroskop

Hassas yüzey analizi yapmak için numuneler taramalı mikroskop (SEM) altında incelenmiştir. İnceleme esnasında kullanılan FEİ marka QUANTA FEG model SEM'e ait resim şekil 2.36.'da görülmektedir.



Şekil 2.36. SEM cihazı

XRD analizleri Şekil 2.37.'de görülen PANalytical marka empyrean model XRD cihazı ile ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2.37. XRD cihazı

3.BULGULAR

3.1.Yakıt Özellikleri

Biyodizel üretimi alkali katalizli transesterifikasyon yöntemi uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Üretim için yer fıstığı yağı (YFY) ve kabak çekirdeği yağı (KÇY) kullanılmıştır. Deneysel prosedür materyal ve metod kısmında detaylıca anlatılmış olup bu kısımda elde edilen biyodizel ürünlerin fizikokimyasal özellikleri ve yağ/ester dönüşüm verimlerinden bahsedilecektir.

Deneysel esnasında yağ/ester dönüşüm verimini belirlemek için reaksiyona girenler ve çıkanlar, reaksiyon sıcaklıkları ve süreler kayıt altına alındığından net ürün dönüşüm verimi ve ideal sıcaklık zaman parametreleri kolayca hesaplanmıştır. Aşağıda Tablo 3.1. ve Tablo 3.2.'de YFY ve KÇY için maksimum ve minimum ürün veriminin gerçekleştiği parametreler gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Yer fıstığı yağı esterleşme maksimum ve minimum verim parametreleri

YER FISTIĞI YAĞI		Verim (maks.)	Verim (min)
Kullanılan Yağın Hacmi	(mL)	1200	1200
Kullanılan Yağın Sya Değeri	(%)	5,1	5,1
Katalizör Miktarı (NaOH)	(gr)	15	15
Metilalkol Miktarı	(mL)	240	240
Reaksiyon Sıcaklığı	(C°)	55	50
Reaksiyon Süresi	(dk)	75	90
Gliserin Miktarı	(gr)	379	352
Üretilen Net Biyodizel	(MI)	905	850
VERİM (Maks-Min)	(%)	%75 (maks.)	%70 (min.)

Tabloda da görüldüğü gibi; YFY için, yağ/alkol stokiometrik oranı 6:1 (v/v) olarak belirlenmiş, katalizör metoksit çözeltisi (metilalkol + NaOH) için kütleli olarak reaksiyona sokulan yağın (1200 ml için) \approx % 1,25'i ağırlığında NaOH kullanılmıştır. YFY için maksimum verim değeri % 75 olarak tespit edilmiş olup, verimden kasıt hacimsel bazda reaksiyona giren yağ ile reaksiyon ürünü olan metilesterin hacminin yüzdelik oranıdır. İdeal reaksiyon sıcaklığının 55 °C, ideal reaksiyon süresinin ise 75 dk

olduğu görülmüştür. Sıcaklığın düşmesi ve sürenin uzaması hacimsel bazda ürün verimini düşürdüğü anlaşılmıştır. En düşük ürün verimi % 70 olarak gerçekleşmiştir.

Tablo 3.2. Kabak çekirdeği yağı esterleşme maksimum ve minimum verim parametreleri

KABAK ÇEKİRDEĞİ YAĞI		Verim (maks.)	Verim (min.)
Kullanılan Yağın Hacmi	(ml)	1200	1200
Kullanılan Yağın Sya Değeri	(%)	2,7	2,7
Katalizör Miktarı (NaOH)	(gr)	12	12
Metilalkol Miktarı	(ml)	240	240
Reaksiyon Sıcaklığı	(C°)	60	55
Reaksiyon Süresi	(dk)	90	90
Gliserin Miktarı	(gr)	189	192
Üretilen Net Biyodizel	(ml)	1150	1100
VERİM (Maks-Min)	(%)	%96 (maks.)	%91(min.)

KÇY için, yağ/alkol stokiometrik oranı 6:1 (v/v) olarak belirlenmiş, katalizör metoksit çözeltisi (metilalkol + NaOH) için kütleli olarak reaksiyona sokulan yağın (1200 ml için) \approx % 1'i ağırlığında NaOH kullanılmıştır. KÇY için maksimum verim değeri % 96 olarak tespit edilmiş olup, verimden kasıt hacimsel bazda reaksiyona giren yağ ile reaksiyon ürünü olan metilesterin hacminin yüzdelik oranıdır. İdeal reaksiyon sıcaklığı 60 °C, ideal reaksiyon süresi ise 90 dk. olduğu anlaşılmıştır. Sıcaklığın düşmesi hacimsel bazda ürün verimini düşürdüğü görülmüştür. En düşük verim % 91 olarak gerçekleşmiştir.

İki yağ birbiriyle ürün verimi açısından kıyaslandığında KÇY'nın ürün veriminin YFY'dan % 21 daha fazla olduğu anlaşılmıştır. Eşit hacimdeki farklı yağlar için YFY için ortaya çıkan gliserin miktarı maksimum verimde 379 gr iken KÇY için bu değer 189 gr olarak ölçülmüştür. Fıstık yağı ester dönüşüm oranının düşük olması reaksiyon ürünü gliserinin yüksekliği ile bir bağıntı içerisindedir. Eldeki veriler ışığında bu farkın %SYA içeriğindeki farktan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

Üretimi gerçekleştirilen biyodizel yakıtlar olan FYME ve KYME son filtrasyon işlemleri gerçekleştirildikten sonra % 20, %50 ve %100 biyodizel karışım yakıtlar olarak hazırlanmış, analiz işlemleri için akreditasyona sahip İnönü Üniversitesi Petrol Araştırma Laboratuvarına gönderilmiştir. Laboratuvarında karışım yakıtlarımızın analizleri yapılarak uluslar arası standartlara göre sonuçlar elde edilmiştir. Aşağıdaki Tablo 3.3. ve Tablo3.4.'de yakıt analiz sonuçları görülmektedir.

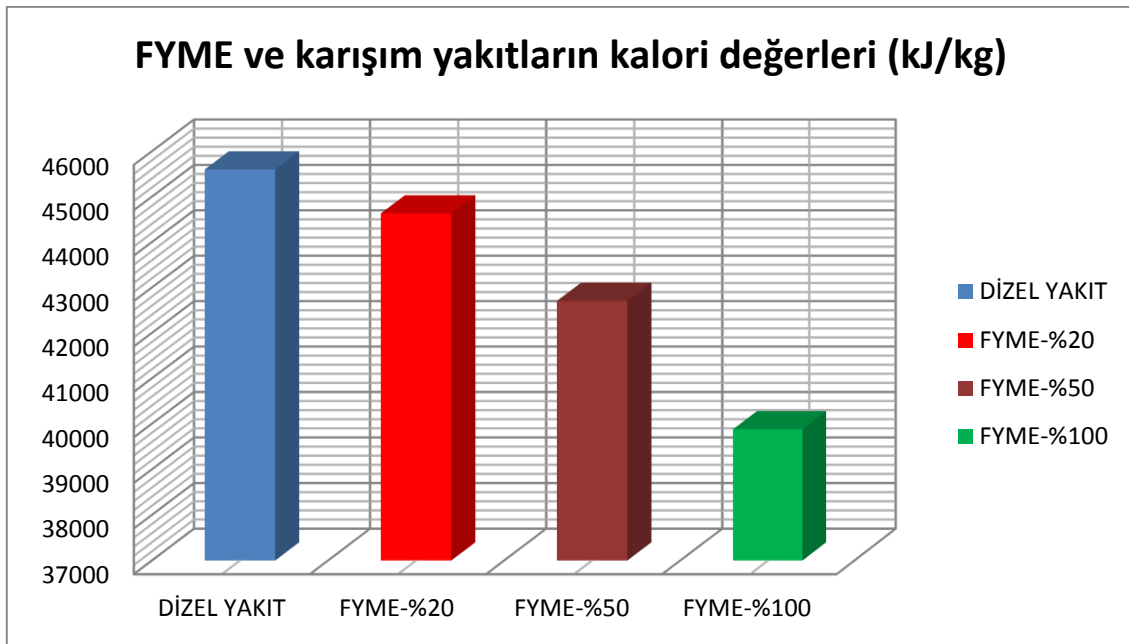
Tablo 3.3. FYME ve karışımlarının fizikokimyasal özellikleri

		B-20 FYME	B-50 FYME	B-100 FYME	DİZEL	STANDART
Katı madde miktarı	(% ağı.)	55,5	72,5	99,3	-	ASTM D 1259-06
Çözücü miktarı	(% ağı.)	44,5	27,5	0,7	-	ASTM D 1259-06
Yoğunluk	(15 °C), kg/m ³)	846,7	861,1	885	830	TS EN ISO 12185
Viskozite	40 °C (mm ² /sn)	3,132	3,758	5,166	2,62	TS 1451 EN ISO 3104
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası	(°C)	-13	-3	3	-15	TS EN 116
Parlama Noktası	(°C)	72,5	109,6	186	>55	TS EN ISO 2719
Asit Sayısı	(mg KOH/g)	0,069	0,104	0,159	-	ASTM D 664
Kükürt Miktarı Tayini	(mg/kg)	9	8,7	6	10 (ençok)	TS EN ISO 20846
Net Yanma Isısı	(cal/g)	10660	10200	9525	10891	TS 1740
Net Yanma Isısı	(kJ/kg)	44631	42705	39879	45600	TS 1740
Setan Sayısı		50,3	49	47,6	51	ASTM D 613-84
Görünüş		Sarı, berrak	Açık sarı, berrak	Açık sarı, berrak		SA-AY-050 ⁽¹⁾

Elde etmiş olduğumuz %100 FYME ve %20-50 karışımlarının fizikokimyasal özelliklerine bakıldığında birçok temel özelliğinin normal dizele yaklaştığı görülmüş olup; kalori değeri, viskozite değeri, soğuk filtre tıkanma noktası ve setan sayısı gibi parametrelerin uluslar arası standartlar içerisinde olduğu anlaşılmıştır. Görünüş açısından değerlendirildiğinde ise yapmış olduğumuz alkali transesterifikasyon işlemi neticesinde fıstık yağının koyu sarı renginin %100 ve %50 FYME karışımlarında açık sarı berrak renge dönüştüğü, %20 FYME karışımında ise sarı-berrak renge dönüştüğü belirlenmiştir.

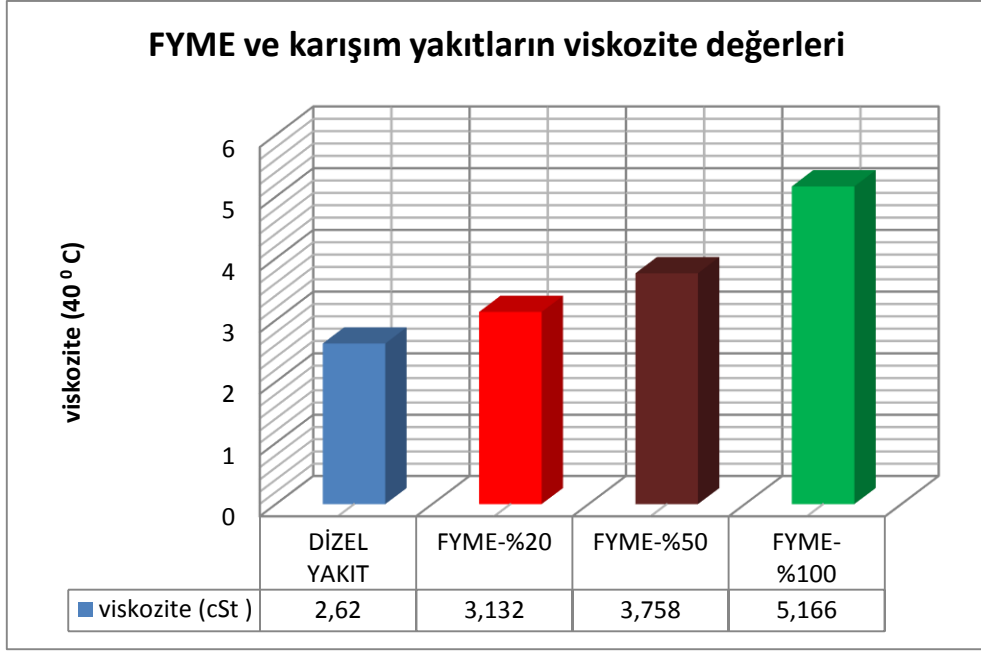
Bu ise yağın esterleşme verimi açısından pozitif yönde anlamlı bir özellik olduğunu göstermektedir.

Şekil 3.1.'deki grafik FYME kalorifik değer açısından incelendiğinde FYME'nin %100, %50 ve % 20 karışım yakıtları için kalorifik değerler sırasıyla; 39879, 42705 ve 44631 (kJ/kg) olduğu analiz edilmiş olup, normal dizel yakıt ile kıyaslandığında %100 FYME için % 12'lik, %50 FYME için %7'lik, %20 FYME içinse % 3'lük oranda kalorifik değerde bir azalma olduğu anlaşılmıştır. %20'lik karışım oranının kalorifik değer açısından normal dizel yakıtla en yakın değer olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.1. FYME ve karışım yakıtların kalori değeri açısından değerlendirilmesi

Şekil 3.2.'de grafik FYME ve karışımları viskozite değeri açısından incelendiğinde normal dizel yakıtın viskozite değeri 40 °C'de 2,62 (cSt) olup, FYME'nin %100, %50 ve % 20 karışım yakıtları için viskozite değerleri sırasıyla 5,166, 3,758 ve 3,132 (cSt) olarak ölçülmüştür. Viskozite değerleri normal dizel yakıtla kıyaslandığında %100 FYME için % 97'lik, %50 FYME için % 43' lük, %20 FYME içinse % 19'lük bir artış söz konusu olup tüm bu değerler uluslar arası standartlar içerisinde kalmaktadır. %20'lik FYME karışımının viskozite değeri bakımından normal dizel yakıtla en yakın sonucu verdiği anlaşılmaktadır. Yoğunluk değerine bakıldığında ise %100 FYME' nin normal dizel yakıtla göre yoğunluğunun %6 daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 3.2. FYME ve karışım yakıtlarının viskozite değerlerinin karşılaştırılması

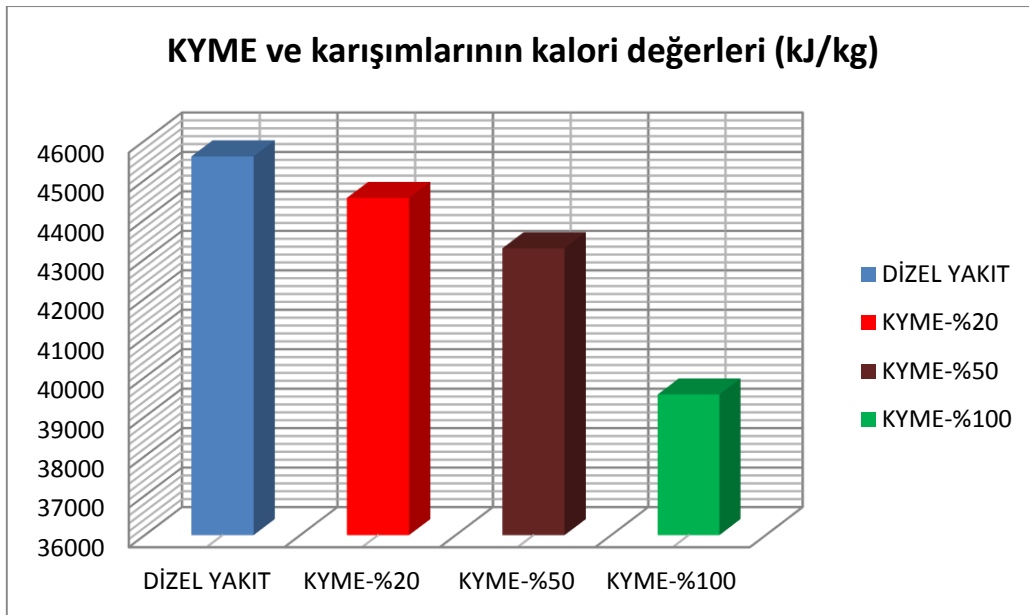
Tablo 3.4. KYME ve karışımları fizikokimyasal özellikler.

		B-20 KYME	B-50 KYME	B-100 KYME	DİZEL	STANDART
Katı madde miktarı	(% ağı.)	55,2	71,5	99,7	-	ASTM D 1259-06
Çözücü miktarı	(% ağı.)	44,8	28,5	0,3	-	ASTM D 1259-06
Yoğunluk	(15 °C, kg/m ³)	846,5	860,8	883,7	830	TS EN ISO 12185
Viskozite	40 °C (mm ² /sn)	3,132	3,49	4,293	2,62	TS 1451 EN ISO 3104
Soğuk Filtre Tıkanma Noktası	(°C)	-15	-8	-2	-15	TS EN 116
Parlama Noktası	(°C)	77	117,2	191,2	>55	TS EN ISO 2719
Asit Sayısı	(mg KOH/g)	0,054	0,063	0,078	-	ASTM D 664
Kükürt Miktarı Tayini	(mg/kg)	10	6,5	2,8	10 (ençok)	TS EN ISO 20846
Net Yanma Isısı	(cal/g)	10640	10335	9450	10891	TS 1740
Net Yanma Isısı	(kJ/kg)	44547	43270	39565	45600	TS 1740
Setan Sayısı		51,1	51,4	51,6	51	ASTM D 613-84
Görünüş		Sarı, berrak	Sarı, berrak	Sarı, berrak		SA-AY-050 ⁽¹⁾

Elde etmiş olduğumuz %100 KYME ve %20-50 karışımlarının fizikokimyasal özelliklerine bakıldığında birçok temel özelliğinin normal dizele yaklaştığı görülmüş olup; kalori değeri, viskozite değeri, soğuk filtre tıkanma noktası ve setan sayısı gibi parametrelerin uluslar arası standartlar içerisinde olduğu anlaşılmaktadır.

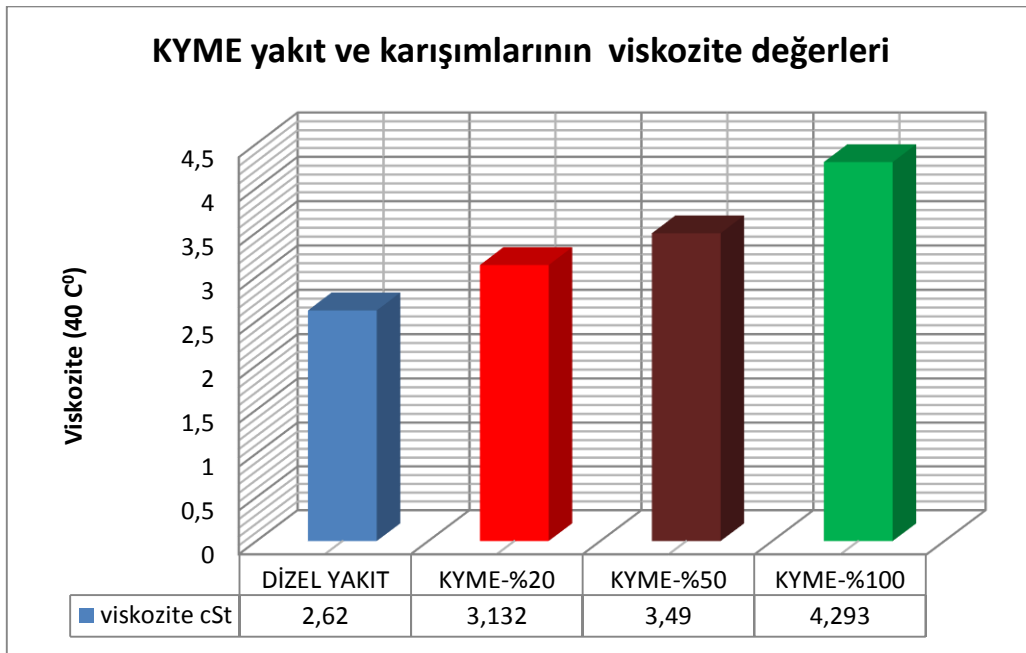
Görünüş açısından değerlendirildiğinde ise yapmış olduğumuz alkali transesterifikasyon işlemi neticesinde kabak çekirdeği yağının yeşilimtrak renginin %100, %50 ve %20 KYME karışımlarında sarı berrak renge dönüştüğü görülmüştür. Bu da yağın esterleşme verimi açısından pozitif yönde anlamlı bir özelliktir.

Şekil 3.3.'te grafik KYME ve karışım yakıtları kalorifik değer açısından incelendiğinde KYME'nin %100, %50 ve % 20 karışım yakıtları için kalorifik değerler sırasıyla; 39565, 43270 ve 44547 (kJ/kg) olduğu analiz edilmiş olup, normal dizel yakıt ile kıyaslandığında %100 KYME için % 13'lük, %50 KYME için %5'lik, %20 KYME içinse % 2'lik kalorifik değerde bir azalma olduğu anlaşılmıştır. %20'lik karışım oranının kalorifik değer açısından normal dizel yakıtı en yakın değer olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.3. KYME ve karışımlarının kalori değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 3.4.'te grafik KYME ve karışımlarının viskozite değeri açısından incelendiğinde normal dizel yakıtın viskozite değeri 40 °C'de 2,62 (cSt) olup, KYME'nin %100, %50 ve % 20 karışım yakıtları için viskozite değerleri sırasıyla 4,293, 3,49 ve 3,132 (cSt) olarak ölçülmüştür. Viskozite değerleri normal dizel yakıtla kıyaslandığında %100 KYME için % 64'lük, %50 KYME için % 33' lük, %20 KYME içinse % 19'luk bir artış söz konusu olup tüm bu değerler uluslar arası standartlar içerisinde kalmaktadır. Grafikte de görüldüğü gibi %20'lik KYME karışımının viskozite değeri bakımından normal dizele en yakın sonucu verdiği anlaşılmaktadır. Yoğunluk değerine bakıldığında ise %100 KYME'nin normal dizel yakıtı göre yoğunluğunun % 6 daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 3.4. KYME ve karışımlarının viskozite değerlerinin karşılaştırılması

4.SONUÇLAR ve TARTIŞMA

4.1.Motor Performans Değerlendirmeleri

Bu bölümde ürettiğimiz KYME ve FYME yakıtları ve bunların dizel karışımları için motorun farklı yükleri altında, performans değerlendirmeleri yapılmıştır. Kaplanmış termal yalıtımlı motor (TYM), kaplanmamış normal motorun (NM) ve yakıtların performansı değerlendirilirken motora ait yakıt tüketimi (YT), fren özgül yakıt tüketimi (FÖYT), fren özgül enerji tüketimi (FÖET), fren termal verim (FTV) ve egzoz gaz sıcaklığı (EGS) değerleri kullanılmıştır.

Deneyler temel olarak normal motor (NM) ve termal yalıtımlı motor (TYM) testleri olarak sınıflandırılmış ve sonuçlar grafiklerde gösterilmiştir. Normal ve kaplanmış motor test edilirken normal dizel yakıt (D-2), biyodizel yakıt ve biyodizel-normal dizel yakıt karışımları kullanılmıştır. Deneyler, motorun boşa çalışması dahil 4 fren güç altında gerçekleştirilmiştir. Fren güç olarak elektriksel direnç yükleri kullanılmıştır. 1. yük, 2,3 kW, 2. yük 4,6 kW ve 3. yük olarak da 6,9 kW elektriksel fren güç değerleri kullanılmıştır. Deney motoru ile yapılan tüm testler 3 kez tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Deney motorumuzda ölçümlere geçmeden önce motor ısınması için 30 dk süre ile çalıştırılmış, motor stabil hale geldikten sonra ölçümlere geçilmiştir. Yakıt değiştirilirken bir önce kullanılan yakıtın tüketilmesi için motor belirli bir süre çalıştırdıktan sonra ölçümlere devam edilmiştir.

4.1.1. Yakıt Tüketimi (YT) ve Fren Özgül Yakıt Tüketimi (FÖYT)

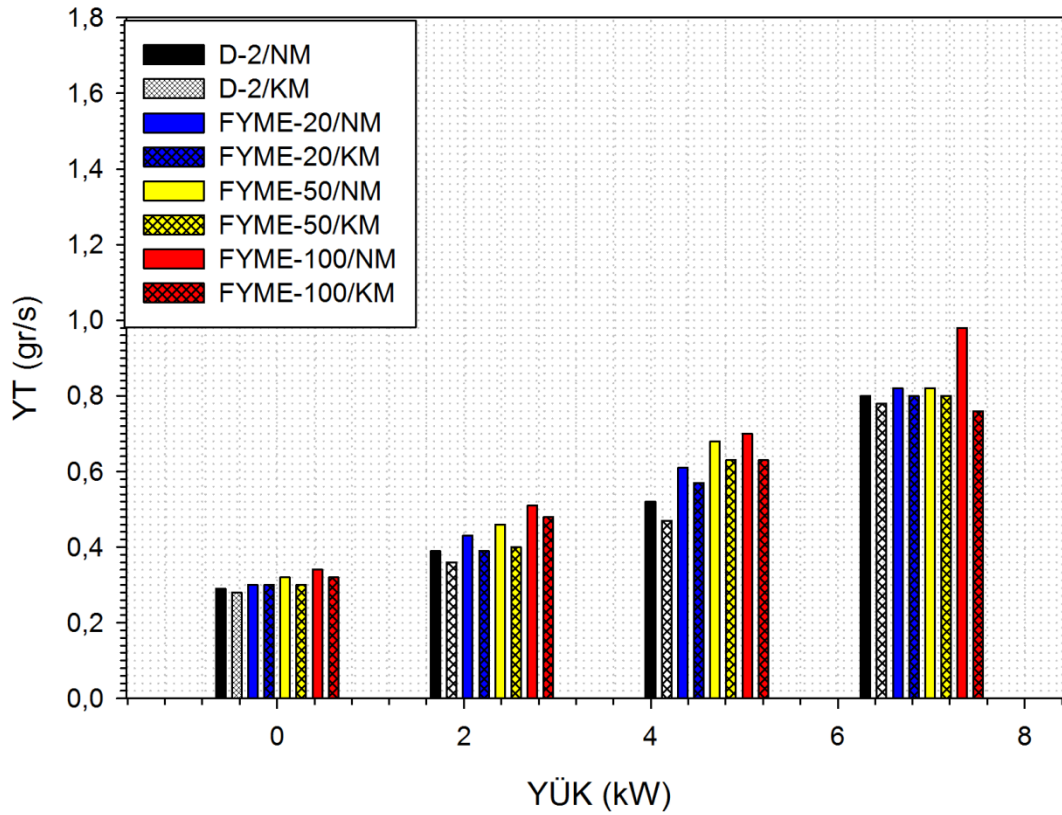
Deney motorumuzun yakıt tüketimi miktarları belirlenirken iki tip tüketim şekline faydalanılmıştır. Bunlardan biri motorun yük miktarından bağımsız sadece birim zamanda tüketilen ağırlık esaslı tüketim değeri olan yakıt tüketimi YT (gr/s), diğeri ise motorun yük miktarına bağlı birim zamanda tüketilen yakıt değeri yani fren özgül yakıt tüketimi FÖYT (Kg/kW.h) şeklindedir.

$$YT = \frac{\text{Tüketilen yakıt miktarı}}{\text{Zaman}} = \text{gr/s veya kg/h}$$

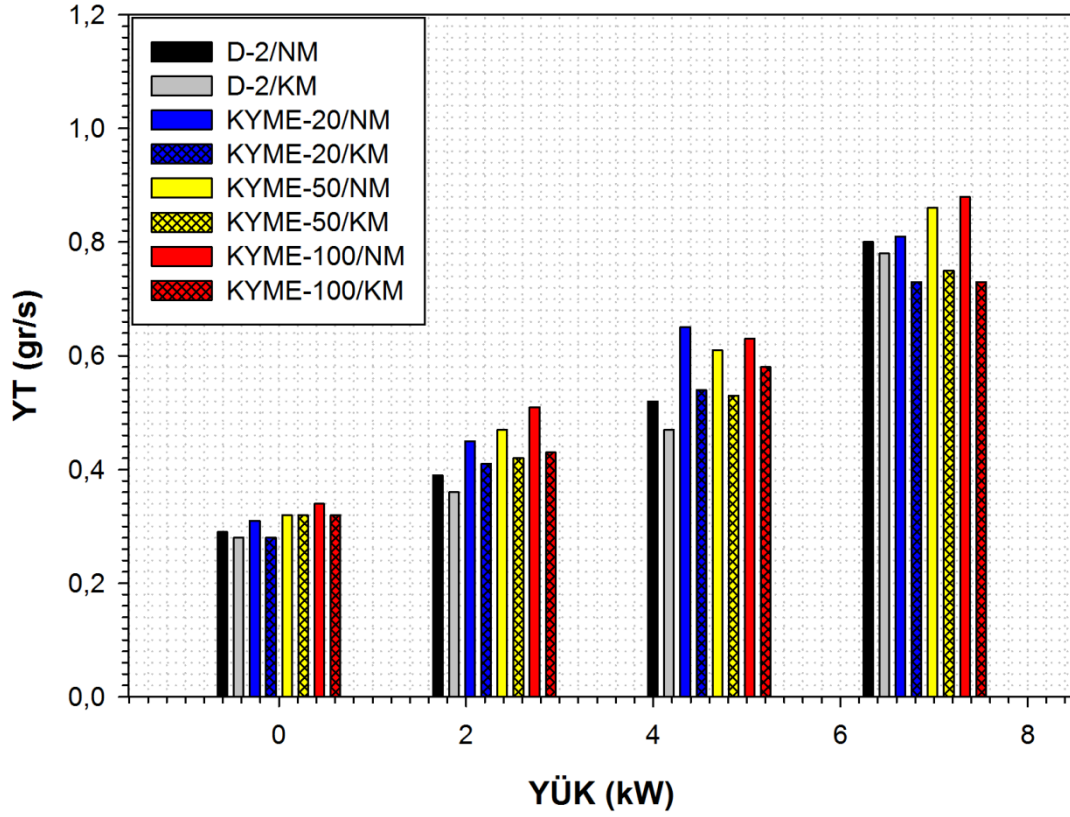
$$FÖYT = \frac{\text{Yakıt Tüketimi}}{\text{Fren gücü}} = (\text{Kg/kW.h})$$

Motor yakıt tüketim değerlerini ölçmek için özel bir düzenek kurulmuş ve 100 ml büret vasıtasıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümler için motorun her 10 ml'lik yakıt tüketim miktarı süreölçer vasıtasıyla saniye bazlı kayıt altına alınmıştır. Her bir deney 3 kez tekrarlanmış ve elde edilen sonuçların aritmetik ortalaması alınmıştır.

Bilindiği gibi YT değerleri hesaplanırken tüketilen yakıtın ağırlığı üzerinden hesaplama yapılmaktadır. Bu nedenle daha yüksek yoğunluk değerlerine sahip yakıtlar daha fazla yakıt tüketim değerlerine sahip olacaklardır. Örnek olarak 0,830 gr/ml yoğunluğa sahip dizel yakıt 1000 ml hacme sahip bir silindir içerisinde ki ağırlığı 830 gr olurken, aynı hacim içerisinde 0,885 gr/ml yoğunluğa sahip %100 FYME 885 gr, 0,883 gr/ml yoğunluktaki %100 KYME ise 883 gr gelecektir. Yani aynı enjeksiyon basıncı altında ve aynı hacme sahip silindir için daha yüksek yoğunluğa sahip biyodizel ve karışımları ağırlık olarak daha fazla yakıt tüketimi sergileyecektir. (URL-9-1999; Alam vd.,2004; Turrio vd., 2004; Hansen ve Jensen, 1997; Last vd., 1995).



Şekil 4.1. Normal/Kaplanmış motor (TYM) için FYME/D-2 YT değerleri (gr/s)



Şekil 4.2. Normal/Kaplanmış motor (TYM) için KYME/D-2 YT değerleri (gr/s)

Şekil 4.1-2.'de D-2 yakıtı, FYME, KYME yakıt ve karışımlarına ait YT değerlerini gösteren grafikler görülmektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere motorun fren yük miktarı arttıkça YT değerleri genel olarak artış eğilimindedir.

Tüm FYME karışımları için 3. yük değeri referans alınarak, YT ortalaması hesaplandığında FYME karışımlarının D-2 yakıttan ortalama olarak %12,5 daha yüksek YT değeri sergilediği görülmektedir. Aynı yük değeri altında sadece %100 FYME yakıt D-2 yakıtla kıyaslandığında ise %100 FYME yakıtın, D-2 yakıtı göre %22,5 daha yüksek YT değeri sergilediği görülmüştür.

Aynı Şekilde tüm KYME karışımları için 3. yük değeri referans alınarak YT ortalaması hesaplanırsa KYME karışımlarının D-2 yakıttan ortalama olarak % 6,5 daha yüksek YT değeri sergilediği ve % 100 KYME yakıtın ise tek başına D-2 yakıtı göre % 10 daha yüksek YT değeri sergilediği görülmektedir.

Grafikler kaplanmış motor açısından değerlendirilirse; genel olarak kaplanmış motora ait YT değerleri tüm yük değerleri altında ve tüm yakıt türleri için normal motora

göre düşüş sergilemiştir. Biyodizel yakıt ve karışımlarının kaplanmış motordaki YT değerleri D-2 yakıttan yüksek çıkmıştır. Kaplanmış motorda da normal motorda olduğu gibi yükün artışıyla birlikte YT değerleri tüm yakıt türleri için artış eğilimindedir. En düşük YT değerleri D-2 yakıt için ortaya çıkarken, en yüksek YT değeri saf biyodizel yakıtlar için ortaya çıkmıştır.

YT değerlerini kaplanmış motor için ve yakıt türleri açısından normal motor ile kıyaslırsak; kaplanmış motorda D-2 yakıt tüketim değerleri motor boşa, 1.yük, 2.yük, 3.yük değerleri için sırasıyla 0,28 - 0,36 - 0,47 - 0,78 gr/s olup yine aynı yük değerleri için normal motora göre YT değerlerindeki düşüş oranları sırasıyla % 3,5 - 8- 10 - 2,5 olarak gerçekleşmiştir.

Kaplanmış motorda FYME-20 yakıt tüketim değerleri motor boşa, 1.yük, 2.yük, 3.yük değerleri için sırasıyla 0,3 - 0,39 - 0,57 - 0,80 gr/s olup yine aynı yük değerleri için normal motora göre YT değerlerindeki düşüş oranları sırasıyla % 0 – 10 - 7 - 2,5 olarak gerçekleşmiştir.

Kaplanmış motorda FYME-50 yakıt tüketim değerleri motor boşa, 1.yük, 2.yük, 3.yük değerleri için sırasıyla 0,3 - 0,40 - 0,63 - 0,80 gr/s olup yine aynı yük değerleri için normal motora göre YT değerlerindeki düşüş oranları sırasıyla % 6,5 – 13 – 7 - 2,5 olarak gerçekleşmiştir.

Kaplanmış motorda FYME-100 yakıt tüketim değerleri motor boşa, 1.yük, 2.yük, 3.yük değerleri için sırasıyla 0,32- 0,48- 0,63- 0,76 gr/s olup yine aynı yük değerleri için normal motora göre YT değerlerindeki düşüş oranları sırasıyla % 6 – 6 – 10 - 22 olarak gerçekleşmiştir.

Kaplanmış motorda KYME-20 yakıt tüketim değerleri motor boşa, 1.yük, 2.yük, 3.yük değerleri için sırasıyla 0,28- 0,41- 0,54- 0,73 gr/s olup yine aynı yük değerleri için normal motora göre YT değerlerindeki düşüş oranları sırasıyla % 10 -9- 17 -10 olarak gerçekleşmiştir.

Kaplanmış motorda KYME-50 yakıt tüketim değerleri motor boşa, 1.yük, 2.yük, 3.yük değerleri için sırasıyla 0,32- 0,42- 0,53- 0,75 gr/s olup yine aynı yük değerleri için normal motora göre YT değerlerindeki düşüş oranları sırasıyla % 0-11-13-13 olarak gerçekleşmiştir.

Kaplanmış motorda KYME-100 yakıt tüketim değerleri motor boşa, 1.yük, 2.yük, 3.yük değerleri için sırasıyla 0,32- 0,43- 0,58- 0,73 gr/s olup yine aynı yük değerleri için normal motora göre YT değerlerindeki düşüş oranları sırasıyla % 6-%16-%8-%17 olarak gerçekleşmiştir.

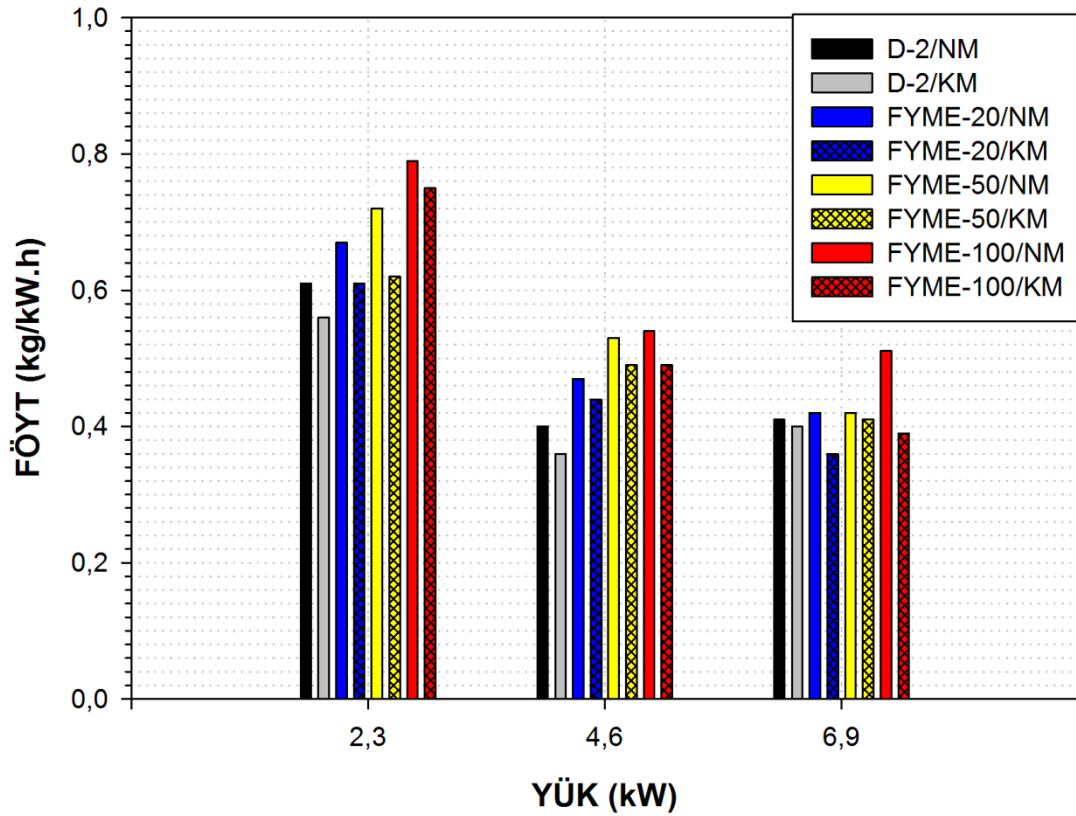
Yukarıda da anlatıldığı gibi biyodizel ve karışımları normal dizel yakıtı nazaran daha yüksek yoğunluk değerlerine sahip olduklarından dolayı daha yüksek özgül yakıt tüketim değerleri sergilemiştir. Bununla birlikte genel olarak biyodizel ve karışım yakıtları normal dizel yakıtı nazaran daha düşük kalori değerine sahiptirler. Sabit herhangi bir yük altında ve şartlarda herhangi bir değişiklik olmaksızın, kütle esaslı kalorifik değer (kJ/kg) baz alındığında biyodizel yakıt tüketiminin normal yakıtı göre %14 artması beklenir.

Diğer bir deyişle biyodizelin düşük kalorifik değerini dengelemek için daha fazla yakıt tüketilmesi gerekir, (Magin Lapuerta vd., 2008) Bu durumda motorun çıkış milinde aynı gücü üretmek için daha fazla yakıt tüketilmesi gerekecektir. Benzer sonuçlar ilgili literatür kaynaklarında da doğrulanmaktadır (Agarwal ve Garg, 2003; Raheman ve Ghade, 2007; Raheman, 2004; Hickman ve Graham, 1993; Çanakçı vd., 2006).

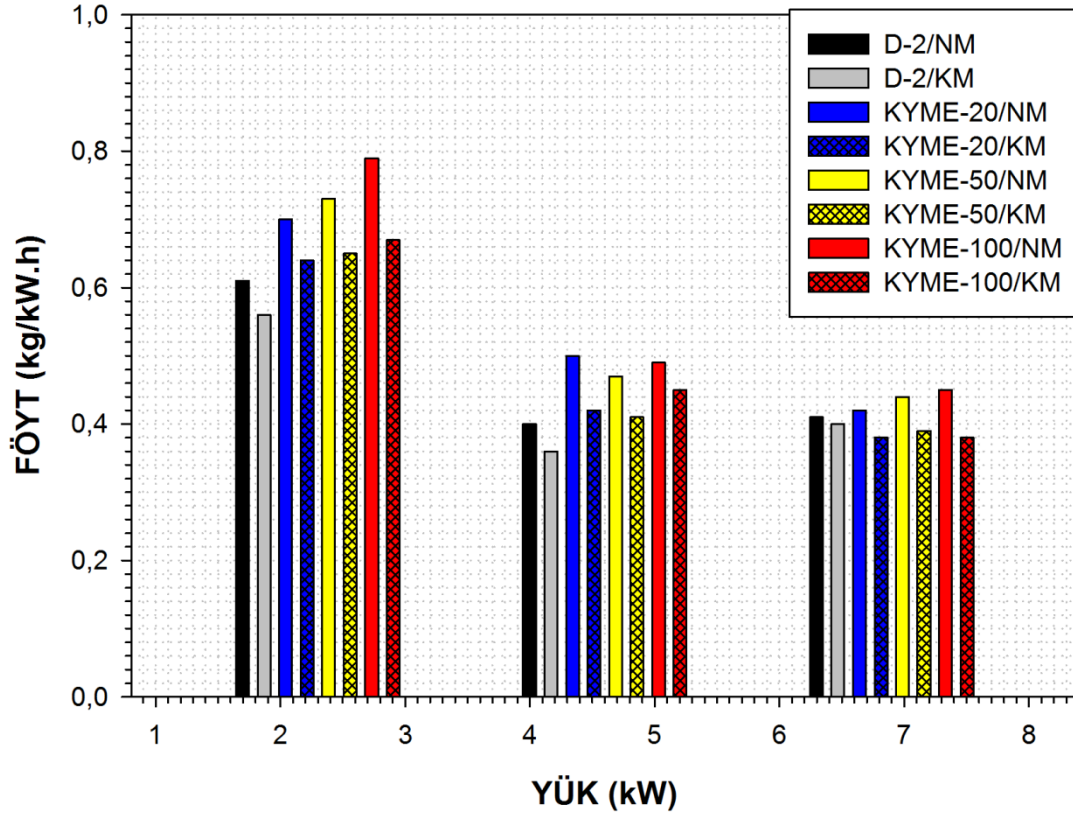
4.1.2.Fren Özgül Yakıt Tüketimi (FÖYT) (Kg/kW.h)

Bir motorun yakıt tüketimi genel olarak, yakıtın kalori değerine, hava/yakıt oranına ve motorun çalışma verimine bağlıdır. Bu kısımda motora yapılan kaplama işleminin FÖYT değerlerine nasıl etki ettiği açıklanmıştır. Fren özgül yakıt tüketimi, bir motorun yakıtı güce çevirmede ne kadar verimli olduğunu gösteren bir parametredir ve YT değerinin motorun çıkış gücüne bölünmesi ile elde edilmektedir. Diğer bir deyişle FÖYT, tüketilen yakıtın kütlesinin fren efektif güce oranı olarak tanımlanmaktadır ve termal verimle ters orantılıdır. YT grafikleri de FÖYT grafikleri ile ters orantılıdır. Bunun sebebi motorda yük miktarı lineer bir şekilde artarken YT değeri tam lineer bir artış sergilemez ve FÖYT düşük yüklerden orta yüklere doğru düşüş ve daha sonra tekrar hafif artış eğilimine girer.

FYME ve KYME yakıtlarına ait kaplanmamış ve kaplanmış motorların 3 farklı yük altında ölçülen FÖYT değerleri aşağıda Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.'de gösterilmiştir. Grafiklere bakıldığında genel olarak; biyodizel yakıtların YT değerleri normal yakıttan yüksektir. Tüm yük değerleri altında yakıt içeriğindeki biyodizel miktarı arttıkça FÖYT değeri artmaktadır. Tüm yük değerleri altında en yüksek FÖYT değerleri %100 biyodizel yakıtlarda görülmektedir. Bu eğilim motorun tüm fren yükleri altında değişmemektedir. FÖYT değerleri genel olarak düşük yüklerde yüksek, orta yüklerde az ve yüksek yüklerde ise tekrar artış eğilimi göstermektedir.



Şekil 4.3. Normal/Kaplanmış motor (TYM) FYME/D-2 FÖYT değerleri (kg/kW.h)



Şekil 4.4. Normal/Kaplanmış motor (TYM) KYME/D-2 FÖYT değerleri (kg/kW.h)

4.1.2.1. Normal Motor FÖYT Sonuçları ve Değerlendirme

Normal motor için tüm test yakıtları arasında en düşük FÖYT miktarı D-2 yakıt için ölçülmüştür. D-2 yakıt için en yüksek FÖYT değeri 1. yükte 0,61 (Kg/kW.h) iken en düşük FÖYT değeri ise 2. yükte 0,4 (Kg/kW.h) çıkmıştır. Motor yüklenmeye başladığı andan itibaren yani 1. yükten 2. yüke geçerken tüm biyodizel yakıt türleri ve normal dizel yakıt için FÖYT değeri keskin bir düşüş sergilemiştir. Bu düşüş miktarı FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıt için sırasıyla %30, %27, %32 olarak gerçekleşmiştir. Aynı Şekilde KYME yakıtlar için bu düşüş yüzdesini sıralarsak; KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıt için sırasıyla %29, %36, %38 olarak gerçekleşmiştir. D-2 yakıt için bu düşüş yüzdesi ise %35 olarak gerçekleşmiştir. Tüm yakıt türleri için bu ani düşüşün sebebi motoru çalıştırmak için gerekli yakıt miktarındaki yüzde artışın fren gücündeki yüzde artıştan daha az olmasıdır. Yani yakıt tüketimindeki artışın yükteki lineer artışın çok gerisinde kalmasıdır. Aynı zamanda motorun yüksek yüklerdeki ısı kayıplarının daha az olması da buna sebep olduğu düşünülmektedir. En yüksek düşüş miktarı dizel yakıt için

meydana gelmiştir, çünkü en düşük yakıt tüketim miktarı dizel yakıtı aittir. Bu da dizel yakıtın en düşük FÖYT değeri vermesine sebep olmuştur.

Tablo 4.1. 3.yük değeri altında biyodizel FÖYT değerlerinin D-2 yakıtı göre değişim yüzdeleri

3. YÜK							
Yakıt Tipi	FYME100	FYME50	FYME20	KYME100	KYME50	KYME20	D-2
FÖYT (Kg/kW.h)	0,511	0,42	0,42	0,45	0,44	0,42	0,41
D-2'ye göre Ortalama Artış	%12			%7			

Yukarıda Tablo 4.1.'de 3. yük değeri altında FYME ve KYME yakıt karışımlarına ait FÖYT değerleri görülmektedir. Görüldüğü gibi 3. yük değeri altında en düşük FÖYT değeri dizel yakıtı aittir. FYME yakıtlar dizel yakıtı göre ortalama %12 daha yüksek FÖYT değeri verirken, KYME yakıtlarda bu artış oranı % 7 olarak gerçekleşmiştir.

Genel bir değerlendirme yapmak gerekirse; motorda yük artarken hızı sabit tutmak için tüketilen yakıt miktarı artmaktadır. Test yakıtları içeriğindeki biyodizel oranı arttıkça tüm yükler altında özgül yakıt tüketim miktarı artış göstermektedir. Bunun sebebi normal dizel ile kıyaslandığında biyodizelin daha düşük kalori değerine sahip olması, daha yüksek viskozitesi ve aynı zamanda daha yüksek yoğunluğa sahip olması şeklinde açıklanabilir. Tablo 4.2.'de deney yakıtlarının normal dizel yakıtı göre yoğunluk, viskozite ve kalori değerleri açısından ortaya çıkan değişim miktarları görülmektedir.

Tablo 4.2. Biyodizel yakıtların D-2 yakıtı göre fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişim oranları

YAKIT TÜRÜ	% Değişim (kalori)	% Değişim (yoğunluk)	% Değişim (viskozite)
%100 FYME	-12	+6	+97
%50 FYME	-7	+4	+43
%20 FYME	-3	+2	+19
%100 KYME	-13	+6	+64
%50 KYME	-5	+4	+33
%20 KYME	-2	+2	+19

Tablo 4.2. dikkatle incelendiğinde her iki saf biyodizel yakıtın yoğunluğunun dizele göre % 6 fazla olduğu görülmektedir. YT, kütle esaslı hesaplanan bir değer olduğu için motorda hacimsel olarak aynı miktarda yakıt tüketildiğinde aslında ağırlık olarak % 6 daha fazla biyodizel tüketilmiş olacaktır. Daha yüksek yoğunluklu biyodizel karışımları aynı hacim için ve aynı enjeksiyon basıncında daha fazla ağırlıkta yakıtın püskürtülmesine sebep olurlar. Aynı şekilde % 100 biyodizel yakıtın ısı içeriği normal dizel yakıttan ortalama % 12,5 daha düşüktür. Kalorifik değer (MJ/kg) kütle esaslı bir birim olmasından dolayı ve biyodizelin düşük olan kalorifik değeri düşünüldüğünde yakıt tüketimi artışıyla bu kalorifik telafi edilir. Bir başka deyişle çıkıştaki gücü sabit tutmak için daha fazla yakıt tüketilmesi gerekmektedir. Ayrıca Tabloda da görüldüğü gibi saf biyodizel yakıtların ortalama viskozite değerleri normal dizel yakıttan % 80 daha yüksektir. Tüm bu veriler göz önüne alındığında biyodizel yakıtların FÖYT değerinin yüksek olması beklenen bir sonuçtur. Elde ettiğimiz sonuçlar literatür kaynaklarıyla da örtüşmektedir (Sukumar Puhana vd., 2005; Selvam ve Vadivel, 2012; Baiju vd., 2009; Sukumar Puhana vd., 2007; Raheman ve Ghadge, 2007; Srivastava ve Verma, 2008; Sukumar Puhana vd., 2009; Ramadhas vd., 2005; Sukumar Puhana vd., 2005).

4.1.2.2. Kaplanmış Motor FÖYT Sonuçları ve Değerlendirme

Elde edilen verilerle kaplanmış motor hakkında yorum yapmak gerekirse; kaplanmış motorda tüm yakıt türleri ve tüm yük değerleri altında FÖYT değerleri normal motora göre düşük çıkmıştır. Tüm yakıtlar içerisinde genel olarak en düşük FÖYT değerleri D-2 yakıt için ölçülmüştür. Artan yükte birlikte FÖYT değerleri önce azalış daha sonra tekrar artış eğilimindedir. Aşağıda Tablo 4.3.'de kaplanmış ve normal motora ait yüke göre FÖYT değerleri ve FÖYT değerlerinde meydana gelen değişim yüzdeleri görülmektedir.

Tablo 4.3. Yüke göre kaplanmış motorda meydana gelen FÖYT değişim yüzdeleri

1. YÜK NORMAL/KAPLANMIŞ MOTOR FÖYT DEĞERLERİ							
Yakıt Tipi	FYME100	FYME50	FYME20	KYME100	KYME50	KYME20	D-2
FÖYT (Kg/kW.h) (normal)	0,79	0,72	0,67	0,79	0,73	0,70	0,61
FÖYT (Kg/kW.h) (kaplanmış)	0,75	0,62	0,61	0,67	0,65	0,64	0,56
Düşüş oranı	%5	%14	%9	%16	%11	%9	%8

2. YÜK NORMAL/KAPLANMIŞ MOTOR FÖYT DEĞERLERİ							
Yakıt Tipi	FYME100	FYME50	FYME20	KYME100	KYME50	KYME20	D-2
FÖYT(Kg/kW.h) (normal)	0,54	0,53	0,47	0,49	0,47	0,50	0,40
FÖYT(Kg/kW.h) (kaplanmış)	0,49	0,49	0,44	0,45	0,41	0,42	0,36
Düşüş oranı	%10	%8	%7	%9	%13	%16	%10

3. YÜK NORMAL/KAPLANMIŞ MOTOR FÖYT DEĞERLERİ							
Yakıt Tipi	FYME100	FYME50	FYME20	KYME100	KYME50	KYM E20	D-2
FÖYT(Kg/kW.h) (normal)	0,511	0,42	0,42	0,45	0,44	0,42	0,41
FÖYT(Kg/kW.h) (kaplanmış)	0,39	0,41	0,36	0,38	0,39	0,38	0,40
Düşüş oranı	%24	%3	%15	%16	%12	%10	%2,5

D-2 yakıt için birinci yük değeri altında normal motora göre FÖYT değerindeki düşüş miktarı % 8, ikinci yük değeri altında %10 ve üçüncü yük değeri için %2,5 olarak gerçekleşmiştir.

FYME yakıt karışımları için değerlendirirsek;

FYME-20 yakıt için birinci yük değeri altında normal motora göre FÖYT değerindeki düşüş miktarı % 9, ikinci yük değeri altında %7 ve üçüncü yük değeri için %15 olarak gerçekleşmiştir.

FYME-50 yakıt için birinci yük değeri altında normal motora göre FÖYT değerindeki düşüş miktarı % 14, ikinci yük değeri altında %8 ve üçüncü yük değeri için %3 olarak gerçekleşmiştir.

FYME-100 yakıt için birinci yük değeri altında normal motora göre FÖYT değerindeki düşüş miktarı % 5, ikinci yük değeri altında %10 ve üçüncü yük değeri için %24 olarak gerçekleşmiştir.

KYME yakıt karışımları için değerlendirirsek;

KYME-20 yakıt için birinci yük değeri altında normal motora göre FÖYT değerindeki düşüş miktarı % 9, ikinci yük değeri altında %16 ve üçüncü yük değeri için %10 olarak gerçekleşmiştir.

KYME-50 yakıt için birinci yük değeri altında normal motora göre FÖYT değerindeki azalma miktarı % 11, ikinci yük değeri altında %13 ve üçüncü yük değeri için %12 olarak gerçekleşmiştir.

KYME-100 yakıt için birinci yük değeri altında normal motora göre FÖYT değerindeki azalma miktarı % 16, ikinci yük değeri altında %9 ve üçüncü yük değeri için %16 olarak gerçekleşmiştir.

Yukarıda da görüldüğü gibi tüm deney yakıtları, tüm yük değerleri altında normal motora göre daha düşük FÖYT değerleri meydana gelmiştir. Ayrıca dikkat çeken bir diğer olay ise kaplanmış motorun D-2 yakıt tüketimindeki % düşüş miktarının tüm biyodizel yakıtlardan daha az olduğudur. Bu da biyodizel yakıtların kaplanmış motor içerisinde daha verimli bir şekilde tüketildiğinin, diğer bir deyişle yakıtı güce çevirmede daha efektif olduğunun bir göstergesidir. Kaplanmış motorda termal yalıtımdan dolayı artan yanma sonu sıcaklığının biyodizel ve karışımı yakıtların FÖYT değerlerini pozitif yönde etkilediği anlaşılmaktadır.

Tüm biyodizel test yakıtları için artan yüklerle birlikte FÖYT değerleri azalma eğilimindedir. D-2 yakıt için ise bu eğilim önce azalma sonra tekrar artış yönündedir. Genel olarak bakıldığında 2,3 kW ve 4,6 kW yük değeri altında D-2 yakıtın FÖYT değerleri biyodizel ve karışım yakıtlarından daha azdır. Ancak 6,9 kW yük değeri altında bunun tam tersi bir eğilim söz konusu olup biyodizel karışım yakıtları genel olarak D-2 yakıttan daha düşük FÖYT değeri sergilemiştir. Bu durum artan yüklerle birlikte biyodizelin içeriğindeki oksijen miktarının ve yağlayıcılık özelliğinin FÖYT değerine pozitif etkisi olarak değerlendirilebilir.

Dizel yakıt için en yüksek FÖYT değeri 1. yükte 0,56 (Kg/kW.h) iken en düşük FÖYT değeri ise 2. yükte 0,36 (Kg/kW.h) çıkmıştır. Motor yüklenmeye başladığı andan itibaren yani 1. yükten 2. yüke geçerken tüm biyodizel yakıt türleri ve normal dizel yakıt için FÖYT değeri keskin bir düşüş sergilemiştir. Bu düşüş miktarı FYME-20,

FYME-50, FYME-100 yakıt için sırasıyla %28, %21, %35 olarak gerçekleşmiştir. Aynı şekilde KYME yakıtlar için bu düşüş yüzdesini sıralarsak; KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıt için sırasıyla %35, %37, %33 olarak gerçekleşmiştir. D-2 yakıt için bu düşüş ise %36 olarak gerçekleşmiştir. Tüm yakıt türleri için bu ani düşüşün sebebi motoru çalıştırmak için gerekli yakıt miktarındaki yüzde artışın fren gücündeki yüzde artıştan daha az olmasıdır. Yani yakıt tüketimindeki artışın yükteki lineer artışın çok gerisinde kalmasıdır. Aynı zamanda motorun yüksek yüklerdeki ısı kayıplarının daha az olması da buna sebep olduğu düşünülmektedir. En yüksek düşüş miktarı dizel yakıt için meydana gelmiştir çünkü en düşük yakıt tüketim miktarı dizel yakıtı aittir. Bu da dizel yakıtın en düşük FÖYT değeri vermesine sebep olmuştur.

Maksimum yük altında en yüksek FÖYT değeri FYME-100, FYME-50 ve FYME-20 için sırasıyla 0,39- 0,41- 0,36 (Kg/kW.h) iken KYME-100, KYME-50, KYME-20 için sırasıyla 0,38-0,39- 0,38 (Kg/kW.h) çıkmıştır. Maksimum yük altında D-2 yakıtı ait FÖYT değeri 0,40 (Kg/kW.h) olup genel olarak biyodizel karışım yakıtlardan daha yüksek bir değere ulaşmıştır.

Kaplanmış ve normal her iki motorda düşük hızlarda FÖYT değeri artarken orta hızlarda ise yanma odası içerisinde yeterli zaman, uygun karışım oluşumu ve daha yüksek yanma veriminden dolayı azalmıştır (Hazar, 2011). Yüksek gaz ve yanma duvarı sıcaklığından dolayı dizel ve biyodizel yakıtların kullanıldığı kaplanmış motorlarda YT değeri normal motora göre düşüktür (Hazar, 2009; Hazar, 2011; Hazar ve Öztürk, 2010; Mohamed Musthafa vd., 2011; Pradeep Kumar vd., 2012). Biyodizel yakıtların düşük kalori değerleri ve yüksek viskozite değerlerinden dolayı yanma karakteristikleri normal dizelden zayıftır. Bu sebeplerden dolayı çıkışta aynı gücü elde etmeleri gerektiği için daha fazla yakıt yakmaları gerekmektedir dolayısıyla da FÖYT değerleri yüksek çıkmaktadır. Tutuşma gecikmesi periyodunda yakıt atomize olmakta ve hava ile karışmaktadır. Bu durum fiziksel bir gecikmedir. Eş zamanlı olarak düşük kimyasal reaksiyon hızı kimyasal gecikmeyi de beraberinde getirmektedir. Bu iki gecikmeye toplam tutuşma gecikmesi denmekte olup toplam tutuşma gecikmesi periyodu uzarsa daha fazla yakıt yanma odasına gönderilir. TYM motorlarda ise daha kısa tutuşma gecikmesi periyodu kimyasal ve fiziksel gecikmeleri pozitif olarak etkiler. Buda tüm yakıt türleri için TYM motorlarda YT değerlerini düşürür (Hazar, 2010; Modi ve Gosai, 2010; MohamedMusthafa vd., 2012; Haşimoğlu vd., 2008).

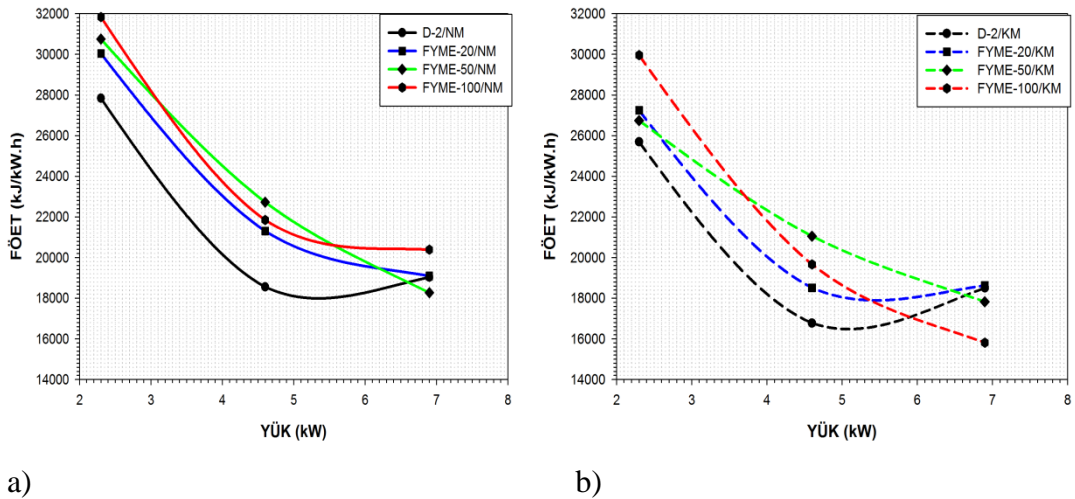
4.1.3.Fren Özgöl Enerji Tüketimi (FÖET) (KJ/kW.h)

Özgöl enerji tüketimi güç ünitesini çalıştırmak için içeri giren gerekli enerji miktarıdır. Farklı kalori ve yoğunluk değerlerine sahip yakıtlar birbirleri ile mukayese edilirken fren özgöl enerji tüketimi (FÖET), fren özgöl yakıt tüketimine (FÖYT)'e nazaran daha güvenilir bir kriter olarak kabul edilmektedir. Motorun fren termal verimini kıyaslamak için özgöl enerji tüketim ölçümü önemli bir parametredir. Çünkü bu ölçümle birlikte yakıtın hem ısıl değeri hem de yakıt kütle akış miktarı kullanılmaktadır ve aşağıda ki gibi formülize edilmektedir.

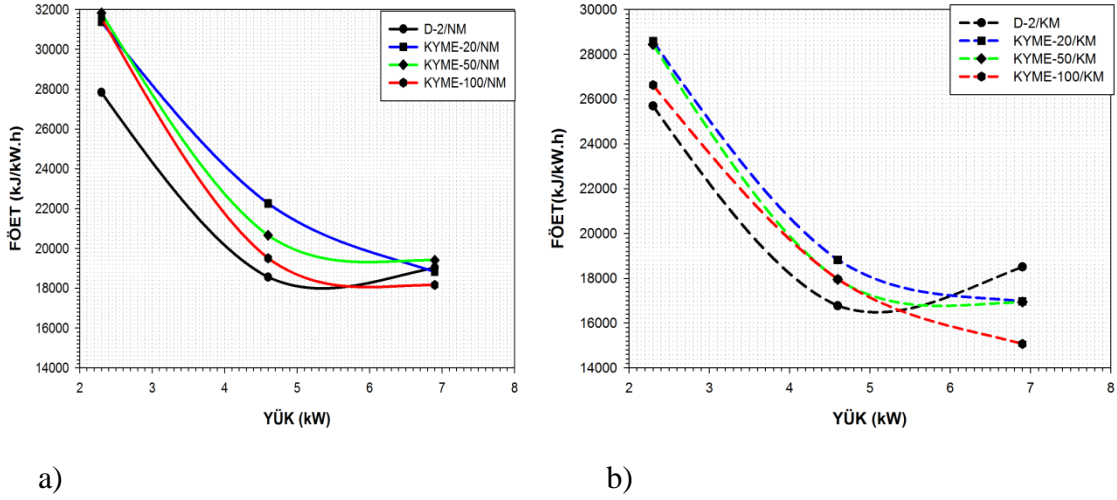
$$\text{Fren Özgöl Enerji Tüketimi} = \frac{(\text{Yakıtın kalori değeri}) \times (\text{yakıt tüketimi})}{(\text{Çıkış gücü})}$$

$$\text{FÖET} = \frac{(\text{kJ/kg}) \times (\text{kg/sa})}{\text{kW}} = \text{kJ/kW.h}$$

Formülden de anlaşıldığı gibi bu ölçümle birlikte yakıtın hem kalori değeri hem de yakıtın ağırlık esaslı tüketim miktarı kullanılmaktadır. FÖET, özgöl yakıt tüketiminden farklı olarak yakıtın enerji içeriğine de bağlıdır. Bu nedenle özgöl yakıt tüketim miktarına göre daha anlamlı sonuçlar vermektedir (Barie ve Humke, 1981; Scholl ve Sorenson,1993; Vellguth,1983; Clark vd., 1984).



Şekil 4.5. FYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) FÖET değerleri (kJ/kW.h)



Şekil 4.6. KYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) FÖET değerleri (kJ/kW.h)

4.1.3.1. Normal Motor FÖET Sonuç ve Değerlendirmeleri

Deney yakıtlarına ait FÖET değerlerindeki değişimleri gösteren grafikler yukarıda Şekil 4.5-6.'da görülmektedir. Tüm yakıt türleri için 1. yük değeri altında ortaya çıkan en düşük FÖET değeri D-2 yakıt için gerçekleşmiş olup 27835 kJ/kW.h'tir. 1. yük değeri altında FYME için en yüksek özgül enerji tüketim değerleri ise sırasıyla FYME-100, FYME-50 ve FYME-20 yakıtlarında görülmekte olup yine sırasıyla 31833, 30747, 30038 kJ/kW.h'tir. Biyodizel karışım oranı arttıkça özgül enerji tüketim değerleri de buna paralel olarak arttığı görülmektedir.

KYME yakıt ve karışımlarında ise bu sıra KYME-50, KYME-100 ve KYME-20 şeklinde olup yine sırasıyla; 31831, 31583 ve 31376 kJ/kW.h'tir. Bu değerlerden de anlaşıldığı gibi biyodizel karışım yakıtları 1. yük değeri altında dizele göre daha yüksek bir enerji tüketim değeri sergilemiştir.

2. yüke geçildiğinde tüm yakıt türleri için enerji tüketim değerleri hızlı ve keskin bir düşüş değeri sergilemiştir. Bu düşüş yüzdesi D-2 yakıt için % 34 tür. FYME yakıt karışımları için ise FYME-20'de %30, FYME-50'de %26 ve FYME-100'de %32 olarak gerçekleşmiştir. KYME yakıt karışımları için bu düşüş değerleri KYME-20'de %29, KYME-50'de %35 ve KYME-100'de %35 olarak gerçekleşmiştir. Tüm yakıt türleri için 2. yük değeri altında da en düşük enerji tüketim değeri D-2 yakıt için gerçekleşmiş olup bu değer 18557 kJ/kW.h'tir. Bu düşüşlerin temel sebebi motoru çalıştırmak için gerekli yakıt miktarındaki yüzde artışın fren gücündeki yüzde artış miktarından daha az olması ve aynı

zamanda yüksek yüklerdeki ısı kayıplarının az olması da buna sebep olabileceği düşünülmektedir. 3. yükte ise yakıt enerji tüketim değerleri daha stabil bir durum sergilemiş olup çok az miktar artma veya azalma eğilimi göstermiştir ve birbirine yakın değerler ortaya çıkarmışlardır. Tüm biyodizel içerikli yakıtlar için enerji tüketim miktarları azalma eğilimine girerken D-2 yakıt için bu durumun tersi gerçekleşmiş olup artış eğilimi görülmüştür. Yük değeri artışıyla birlikte tüm yakıt türleri için enerji tüketiminde bir denge oluştuğu görülmektedir.

Literatürde de belirtildiği gibi ester esaslı yakıtlarda FÖYT değerleri dizele nazaran yüksek olduğu zamanlarda enerji tüketimleri dizele eşit hatta az bile olabilmektedir. Bunun sebebi biyodizel yakıtların düşük enerji içerikleri ve yüksek yoğunluk değerleridir (Sukumar Puhana vd., 2007).

Genel olarak değerlendirildiğinde; biyodizel karışım yakıtların kalorifik değeri normal dizel yakıttan daha düşüktür. Motorun çıkış milinde harcanacak enerji miktarı için biyodizel yakıt ve karışımlarının daha yüksek performans sergilemesi düşük olan enerji içeriklerinden dolayı daha fazla enerji ve yakıt harcamaları gerekmektedir. Biyodizel yakıtların yüksek özgül enerji tüketim miktarları da bu sebepten kaynaklanmaktadır. Aşağıdaki Tablo 4.1.'de tüm yakıtların D-2 yakıtına göre fiziksel özelliklerinde meydana gelen değişim yüzdeleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Tüm metil ester yakıtların fiziksel özelliklerinin D-2 yakıtına göre değişim yüzdeleri

	% Değişim (kalori)	% Değişim (yoğunluk)	% Değişim (viskozite)
%100 FYME	-12	+6	+97
%50 FYME	-7	+4	+43
%20 FYME	-3	+2	+19
%100 KYME	-13	+6	+64
%50 KYME	-5	+4	+33
%20 KYME	-2	+2	+19

Diğer bir yaklaşımda, düşük ısı değeri ve yüksek yoğunluğun yanında yüksek viskoziteden dolayı özgül enerji tüketiminin dizelden yüksek olabileceğidir. Bu sonuçlar hava yakıt karışımında daha yüksek heterojenlik yaratarak özgül enerji tüketiminin artmasını sağlayabilmektedir(Saravanan vd., 2010).

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar ve benzer sonuçlar literatürde yer almakta olup elde ettiğimiz sonuçları doğrulamaktadır (Sharanappa vd., 2009; Sukumar Puhana vd., 2009; Sukumar Puhana vd., 2005; Monyem ve Gerpen, 2001).

4.1.3.2. Kaplanmış Motor FÖET Sonuç ve Değerlendirmeleri

Kaplanmış motora ait FÖET değerlerindeki değişimleri gösteren grafikler yukarıda Şekil 4.5-4.6.'da görülmektedir. Grafiklerden de görüldüğü gibi kaplanmış motora ait FÖET değerleri tüm yakıt türleri için normal motordan daha düşük değerler sergilemiştir. Kaplama işleminin motorun FÖET değerlerine pozitif yönde katkı sağladığı ve önemli oranda düşüşe sebep olduğu anlaşılmaktadır. Aşağıda Tablo 4.4.'de kaplanmış ve normal motora ait yüke göre FÖET değerleri ve FÖET değerlerinde meydana gelen değişim yüzdeleri görülmektedir.

Tablo 4.4. Yüke göre kaplanmış motorda meydana gelen FÖET değişim yüzdeleri

1. YÜK NORMAL/KAPLANMIŞ MOTOR FÖET DEĞERLERİ							
Yakıt Tipi	FYME100	FYME50	FYME20	KYME100	KYME50	KYME20	D-2
FÖET kJ/kW.h (normal)	31833	30747	30038	31583	31831	31376	27835
FÖET kJ/kW.h (kaplanmış)	29961	26737	27244	26628	28445	28587	25694
Düşüş oranı	<i>%16</i>	<i>%13</i>	<i>%10</i>	<i>%16</i>	<i>%11</i>	<i>%9</i>	<i>%8</i>
2. YÜK NORMAL/KAPLANMIŞ MOTOR FÖET DEĞERLERİ							
Yakıt Tipi	FYME100	FYME50	FYME20	KYME100	KYME50	KYME20	D-2
FÖET kJ/kW.h (normal)	21846	22726	21306	19507	20656	22260	18557
FÖET kJ/kW.h (kaplanmış)	19662	21055	18512	17959	17947	18825	16772
Düşüş oranı	<i>%10</i>	<i>%8</i>	<i>%13</i>	<i>%8</i>	<i>%14</i>	<i>%16</i>	<i>%10</i>
3. YÜK NORMAL/KAPLANMIŞ MOTOR FÖYT DEĞERLERİ							
Yakıt Tipi	FYME100	FYME50	FYME20	KYME100	KYME50	KYME20	D-2
FÖET kJ/kW.h (normal)	20390	18270	19094	18165	19415	18825	19033
FÖET kJ/kW.h (kaplanmış)	15812	17824	18628	15069	16931	16966	18504
Düşüş oranı	<i>%23</i>	<i>%3</i>	<i>%3</i>	<i>%17</i>	<i>%13</i>	<i>%10</i>	<i>%3</i>

FYME yakıt ve karışımlarına ait FÖET değerleri incelendiğinde kaplanmış motorda elde edilen tüm FÖET değerlerinin normal motordan daha düşük olduğu görülmektedir. Yakıtlar için ayrı ayrı değerlendirme yapılırsa;

D-2 yakıt için bu düşüş miktarları; birinci yük değeri altında normal motora göre % 8, ikinci yük değeri altında %10 ve üçüncü yük için % 3'lük bir azalma ölçülmüştür.

FYME yakıt ve karışımları için bu düşüş değerlerini sıralarsak; FYME-20 için birinci yük değeri altında normal motora göre % 10, ikinci yük değeri altında %13 ve üçüncü yük için % 3'lük bir azalma ölçülmüştür.

FYME-50 için değerlendirirsek; birinci yük değeri altında normal motora göre % 13, ikinci yük değeri altında %8 ve üçüncü yük için % 3'lük bir azalma ölçülmüştür.

FYME-100 için değerlendirirsek; birinci yük değeri altında normal motora göre % 16, ikinci yük değeri altında %10 ve üçüncü yük için % 23'lük bir azalma ölçülmüştür. Yüzdeler düşüş miktarlarından da görüldüğü gibi FYME yakıtlar içerisinde en yüksek düşüş miktarı FYME-100 yakıtına aittir. Bunda FYME-100 yakıtındaki yüksek oksijen miktarının etkisi olabileceği düşünülmektedir.

Motorun 3. yük değeri altında ölçülen FÖET değerlerini yakıtların karşılaştırılması için referans yük değeri olarak kabul edersek ve FYME-20, FYME-50 ve FYME-100 yakıtları için bu düşüş yüzdeleri sırasıyla % 3-3-23 olarak gerçekleşmiştir.

Kaplanmış motora ait FÖET değerlerini KYME yakıt ve karışımları için değerlendirirsek KYME yakıt ve karışımlarına ait FÖET değerlerinin normal motordan daha düşük olduğu görülmektedir.

KYME yakıt ve karışımları için bu düşüş değerlerini sıralarsak; KYME-20 için birinci yük değeri altında normal motora göre % 9, ikinci yük değeri altında %16 ve üçüncü yük için % 10'luk bir azalma ölçülmüştür.

KYME-50 için değerlendirirsek; birinci yük değeri altında normal motora göre % 11, ikinci yük değeri altında %14 ve üçüncü yük için % 13'lük bir azalma ölçülmüştür.

KYME-100 için değerlendirirsek; birinci yük değeri altında normal motora göre % 16, ikinci yük değeri altında %8 ve üçüncü yük için % 17'lik bir azalma ölçülmüştür. Yüzdeler düşüş miktarlarından da görüldüğü gibi KYME yakıtlar içerisinde en yüksek

düşüş miktarı KYME-100 yakıtına aittir. Bunda KYME-100 yakıtındaki yüksek oksijen miktarının etkisi olabileceği düşünülmektedir.

Motorun 3. yük değeri altında ölçülen FÖET değerlerini yakıtların karşılaştırılması için referans yük değeri olarak kabul edersek ve KYME-20, KYME-50 ve KYME-100 yakıtları için bu düşüş yüzdeleri sırasıyla % 10-13-17 olarak gerçekleşmiştir.

D-2 yakıt ve biyodizel yakıt ve karışımların kaplanmış motordaki FÖET değerlerindeki düşüş miktarı incelendiğinde en az düşüş miktarının D-2 yakıtına ve en fazla düşüş miktarının ise biyodizel yakıtlara ait olduğu ve ayrıca biyodizel yakıtlar içerisinde de en yüksek düşüş miktarlarının %100 biyodizel yakıtlarda görüldüğü belirlenmiştir.

Kaplanmış motora ait FÖET verilerini değerlendirmeye devam edersek; tüm yakıt türleri için 1. yük değeri altında ortaya çıkan en düşük FÖET değeri D-2 yakıt için gerçekleşmiş olup 25694 kJ/kW.h'tir. 1. yük değeri altında FYME için en yüksek özgül enerji tüketim değerleri ise sırasıyla FYME-100, FYME-20 ve FYME-50 yakıtlarında görülmekte olup yine sırasıyla 29961, 27244, 26737 kJ/kW.h'tir. Biyodizel karışım oranı arttıkça özgül enerji tüketim değerleri de buna paralel olarak arttığı görülmektedir ve D-2'ye göre daha yüksek bir enerji tüketim değeri sergilemiştir.

KYME yakıt ve karışımlarında ise bu sıra KYME-20, KYME-50 ve KYME-100 şeklinde olup yine sırasıyla; 28587, 28445 ve 26228 kJ/kW.h'tir. Bu değerlerden de anlaşıldığı gibi biyodizel karışım yakıtları 1. yük değeri altında dizele göre daha yüksek bir enerji tüketim değeri sergilemiştir.

Kaplanmış motorda 2. yüke geçildiğinde tüm yakıt türleri için enerji tüketim değerleri hızlı ve keskin bir düşüş değeri sergilemiştir. Bu düşüş yüzdesi D-2 yakıt için % 35 tür. FYME yakıt karışımları için ise FYME-20'de %32, FYME-50'de %22 ve FYME-100'de %35 olarak gerçekleşmiştir. KYME yakıt karışımları için bu düşüş değerleri KYME-20'de %35, KYME-50'de %37 ve KYME-100'de %33 olarak gerçekleşmiştir. Tüm yakıt türleri için 2. yük değeri altında da en düşük enerji tüketim değeri D-2 yakıt için gerçekleşmiş olup bu değer 16772 kJ/kW.h'tir.

3. yük değeri referans yük değeri olarak incelendiğinde ise kaplanmış motor, normal motorun aksine neredeyse tüm biyodizel karışım yakıtları için D-2 yakıttan daha düşük FÖET değerleri sergilemiştir. Biyodizel karışım oranı arttıkça FÖET değeri genel

olarak azalmıştır. En düşük FÖET değerleri saf biyodizel yakıtlar için ortaya çıkmış olup FYME-100 için 15812 kJ/kW.h iken KYME-100 için 15069 kJ/kW.h olarak ölçülmüştür. D-2 yakıt için bu değer 18504 kJ/kW.h olduğu göz önüne alındığında düşüş miktarları FYME-100 için %15 iken KYME-100 için bu düşüş miktarı % 19 olarak gerçekleşmiştir.

Genel olarak değerlendirildiğinde; biyodizel karışım yakıtların kalorifik değeri normal dizel yakıttan daha düşük değerlerdir. Motorun çıkış milinde harcanacak enerji miktarı için biyodizel yakıt ve karışımlarının daha yüksek performans sergilemesi düşük olan enerji içeriklerinden ötürü daha fazla enerji harcamaları gerekmektedir. Dolayısıyla bunu telafi edebilmesi içinde daha çok yakıt tüketmesi gerekmektedir. Normal motordaki biyodizel yakıtların yüksek özgül enerji tüketim miktarları da bu sebepten kaynaklanmaktadır.

Kaplanmış motorun FÖET değerleri incelendiğinde ise tüm yakıt türleri için normal motora göre enerji tüketim değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra biyodizel yakıt karışımların FÖET değerlerindeki azalma miktarları normal dizel yakıta göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun termal yalıtımla birlikte artan yanma odası sıcaklığı ve biyodizelin yapısında mevcut olan oksijen sayesinde yanmanın veriminin artırması şeklinde açıklanabilir(Hazar, 2009; Hazar ve Öztürk, 2010; MohamedMusthafa vd., 2011; Pradeep Kumar vd., 2012;)

FÖET denklemi incelendiğinde de YT değeri ile FÖET'in doğru orantılı olduğu görülmektedir. Yakıtın kalori değeri ve çıkış gücü gibi parametreler her bir yakıt için sabit veriler olduğundan normal motor ile kıyaslama yaptığımızda FÖET değerinde meydana gelen bu azalma YT değerindeki düşüşten kaynaklanmaktadır. Kaplanmış motorda yapmış olduğumuz YT ölçümlerine bakıldığında D-2, FYME-100 ve KYME-100 yakıtları için sırasıyla normal motora göre düşüş yüzdeleri %2,5- 22- 17 olup FÖET değerlerindeki bu azalmayı açıklar niteliktedir.

Seramik kaplı motorların yanma odası sıcaklıklarının normal motora göre yüksek olması düşük kalitede yakıtları kullanmayı mümkün kılmaktadır (Hejwowski ve Weronki, 2002). Birçok araştırmacı biyodizeli içten yanmalı motorlarda alternatif yakıt olarak kullanmıştır. Transesterifikasyon gibi birçok yöntemle üretilen biyodizel yakıtlar normal dizel yakıta benzer yakıt karakteristikleri gösterse de viskozite değerleri normal dizele göre yüksektir. Dizel motorlarda yanma odasının sıcaklığının artması biyodizel

yakıtların verim ve emisyon değerlerini pozitif yönde etkiler. TYM motorlarda yanma odası elemanlarının yüzeyinin seramik malzemelerle kaplanması sonucu biyodizel yakıtlar daha verimli şekilde kullanılabilir (Hazar, 2011).

4.1.4.Fren Termal Verim (F_{tv}) (%)

Motorun fren gücünün yakıt gücüne oranına fren termal verimi denir. Verimin herhangi bir birimi yoktur. Formülize edilirse;

$$\text{Fren Termal Verim} = \frac{\text{Fren Gücü}}{\text{Yakıt Gücü}}$$

$$\text{kW} = \frac{(\text{kJ} \times 3600 \text{ s})}{\text{s} \times \text{h}}$$

$$\text{kW} = 3600 \text{ kJ/h}$$

$$= \frac{(\mathbf{a}) \times 3600 \text{ (kJ/h)}}{(\mathbf{b}) \text{ kg/h} \times (\mathbf{c}) \text{ kJ/kg}}$$

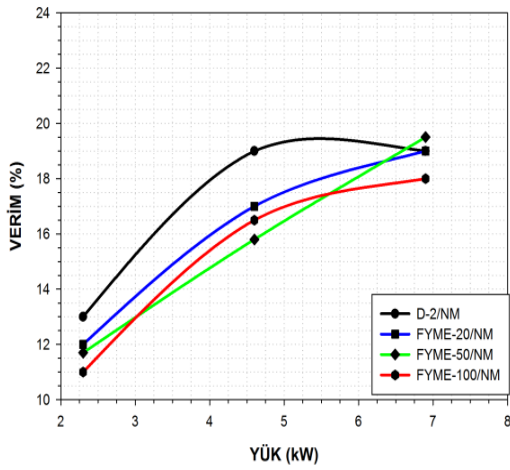
(a) =Fren gücü

(b) =Saatlik yakıt tüketimi

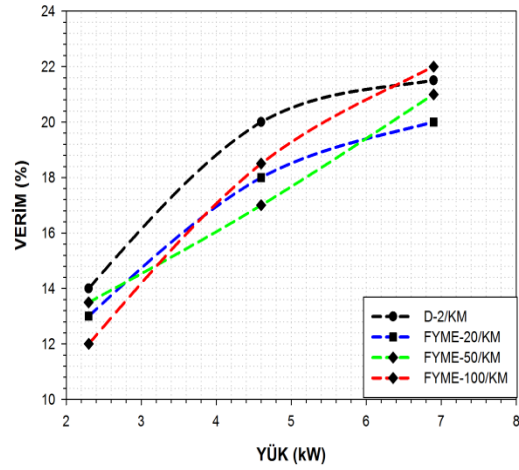
(c) =Yakıtın kalori miktarı

Aşağıda Şekil 4.7-4.8.'de FYME ve KYME yakıtlarının ve bu yakıtların normal D-2 yakıt ile karışımlarının fren termal verim grafikleri görülmektedir. Genel trend olarak 1.yükten, 2.yüke tüm yakıt türleri için termal verimde bir artış görülmektedir. 2.yükten, 3.yüke geçildiğinde ise genel olarak normal motorlar için stabil durum olduğu kısmen azalma veya artışların olduğu gözlemlenirken kaplanmış motorlar açısından ise tüm yakıtlar için verimde bir artış eğilimi olduğu hatta bu artış eğiliminin zaman zaman biyodizel karışım yakıtlarda normal D-2 yakıttan da fazla olduğu görülmektedir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere tüm yük değerleri altında en yüksek fren termal verim D-2 yakıtta ölçülmüştür. İstisnalar sadece kaplanmış motorlarda görülmektedir. Bu durum özgül enerji tüketim grafikleri ile de uyum içerisindedir.

Diğer dikkat çeken önemli bir husus ise; yakıtlara ait verim değerinin maksimum % 22 değerine ulaşmasıdır. Bu verim değeri dizel bir motora göre düşük görülebilir. Bu durum 16,5 Kw'lık deney motoruna en fazla %50'lik fren yükü uygulanmasından kaynaklanmaktadır. Grafiklerde ki eğriler incelendiğinde de verimde bir artış trendinin olduğu ve fren gücün artırılmasıyla verimde de artış olacağı aşikârdır.

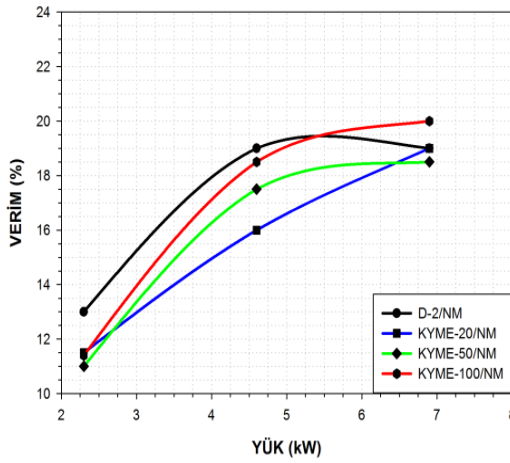


a)

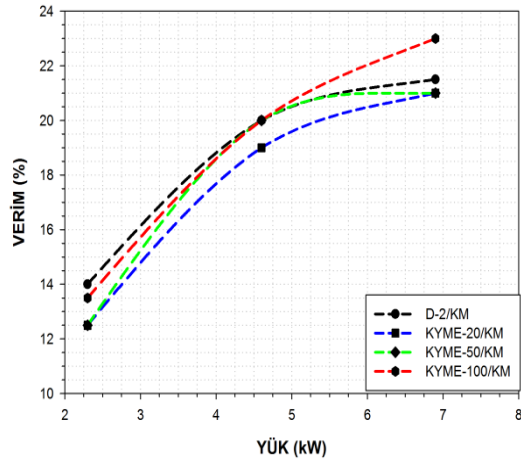


b)

Şekil 4.7. FYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) FTV değerleri



a)



b)

Şekil 4.8. KYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) FTV değerleri

4.1.4.1. Normal Motor FTV Sonuçlar ve Değerlendirme

Normal motor için değerlendirme yapmak gerekirse tüm yakıt türleri için yükün artmasıyla birlikte termal verim hızlı bir Şekilde artış göstermiştir. Bu artış miktarı D-2 yakıt için 1.yükten 2.yüke geçerken %13'ten % 19 miktarına verimsel olarak % 6'lık bir artış sergilerken, FYME yakıtları için bu artış miktarları sırasıyla FYME-20 için %12'den %17 miktarına verimsel olarak % 5, FYME-50 için % 11,7'den % 15,8 miktarına verimsel olarak % 4,1, FYME-100 için % 11'den % 16,5' e verimsel olarak % 5,5'lik bir artış gerçekleşmiştir. Buradan da anlaşılacağı gibi 2. yükte en yüksek verim % 19 ile D-2 yakıtına aittir. D-2 yakıtına en yakın verim miktarı FYME-20 için % 17 olarak gerçekleşmiştir.

Grafikte de görüldüğü gibi 2. yük ile 3. yük arasında kısmi stabil bir dengeden bahsedilebilir. Şöyle ki; D-2 yakıtta 2. yükten 3. yüke geçiŐte %19'luk verimde bir değişim gözlenmezken FYME-20 verim açısından D-2 yakıtı yaklaŐmıŐ hatta FYME-50'de %19,5 değerine ulaŐmıŐtur. 3. yükte en düşük verim FYME-100 için %18 olarak gerçekleşmiştir.

KYME yakıt ve karışımları termal verim açısından değerlendirirsek; tüm yakıt karışımları için yükün artmasıyla verim miktarı 1. yükten 2. yüke geçerken artmış, 2. yk ten 3. yüke geçerken kısmi bir denge yakalanmıŐtur. KYME yakıt karışımları için sırasıyla KYME-20 yakıt için 1. yükten 2. yüke geçerken %11,5'ten %16'ya verimsel olarak % 4,5'luk, KYME-50 için 1. yükten 2. yüke geçerken %11'den %17,5'e verimsel olarak % 6'lık, KYME-100 yakıt için 1. yükten 2. yüke geçerken %11,4'ten % 18,5'e verimsel olarak %7' lik artış meydana gelmiştir. 2. yükte D-2 yakıtı verimsel olarak en yakın %18,5 verimle KYME-100 yakıtı olmuştur.

KYME'de de 2. yk ile 3. yük arasında FYME olduğu gibi kısmi stabil bir dengeden bahsedilebilir. Şöyle ki; D-2 yakıtta 2. yükten 3. yüke geçiŐte verimsel olarak bir değişim gözlenmezken KYME-20 yakıt verim açısından D-2 yakıtı yetiŐmiŐ KYME-100 yakıt ise %20 değerine ulaŐmıŐtur.

İki biyodizel yakıt birbiri ile kıyaslandığında 3. yük altında KYME yakıt ve karışımlarının ortalama termal verimlerinin FYME yakıt ve karışımlarından kısmen yüksek olduğu görülmektedir. Yakıtlara ait tüm parametreler ele alındığında bu farkın KYME'nin FYME'e göre viskozitesinin %30 oranında düşük olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Daha düşük viskozite nedeniyle daha iyi bir atomizasyon meydana geleceği ve bu durumunda yanmanın verimini artıracacağı düşünülmektedir.

Normal motor için genel bir değerlendirme yapmak gerekirse; her bir yakıt için motorun fren termal verimi belirlenirken kullanılan en önemli parametreler formülden de anlaşılacağı üzere yakıtın kalori değeri ve yakıtın ağırlık cinsinden saatlik tüketim miktarıdır. Bu bağıntı da yakıt tüketimi ile yakıtın kalori değeri arasında ters bir orantı vardır. Yakıtın ağırlığı ise yakıtın yoğunluğu ile doğru orantılı olduğu için bu bağıntı içerisine yoğunlukta katılmaktadır. Dolayısıyla kalori değeri ve ağırlık (kütle) akış miktarı kombinasyonu motora giren enerji miktarını belirlemektedir. Bunun yanında yakıtlar arasındaki viskozite farkı da yakıt atomizasyonuna olan etkisiyle verime etki etmektedir.

Yüksek viskozite yakıtın iyi atomizasyonunu azaltmaktadır (Sudhir vd., 2007; Jain vd., 2008) düşük setan indeksi(Sudhir vd., 2007)., yüksek setan sayısı (Jain vd., 2008; Lertsathapornsuk vd., 2008) daha düşük tutuşma gecikmesi (Rao vd., 2008) daha düşük kalorifik değer (Özsezen vd.,2009; Usta vd., 2005) daha yüksek oksijen içeriği (Jain vd., 2008; Dorado vd., 2003; Di Yage ve Huang, 2009) tam yanma, yüksek yağlayıcılıkla birlikte sürtünme kayıplarının azalması (Di Yage ve Huang, 2009) yüksek FÖYT değerleri gibi (Özsezen vd.,2009) biyodizele ait yakıt karakteristikleri ve özellikleri de yakıtın termal verimine etki etmektedir.

Şekil 4.7. ve Şekil 4.8. incelendiğinde tüm yakıtlar için 1. yükten 2. yüke geçerken verimsel olarak hızlı bir artış meydana gelmiştir. Bu durumun yükün artmasıyla birlikte gücün artmasından ve ısı kayıplarındaki azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun yanında motor 2. yük değerine geldiğinde silindir içi sıcaklık artmış ve bu durumda daha fazla yakıtın daha verimli yanması şeklinde de izah edilebilir. Bu sonuç daha önce yapılan çalışmalarla da benzerlik göstermektedir (Senthil vd., 2003; Raheman ve Phadatare, 2004; Ramadhas vd., 2005)

Grafiklerde tüm biyodizel yakıtların termal verimleri 1. ve 2. yük değerleri altında D-2 yakıtın verim değerinden düşüktür. Bu durum termal verim formülünden de anlaşılacağı üzere biyodizel yakıtların sahip oldukları düşük kalorifik değerden ve bu

yakıtların yakıt tüketimindeki artıştan kaynaklanmaktadır. Bunun yanında biyodizelin dizele göre yüksek viskozitesi atomizasyonu kötüleştirerek yakıt karışım formasyonunu etkileyerek yakıtın buharlaşmasını dolayısıyla yanmayı azaltmaktadır (Selvam ve Vadivel, 2012; Baiju vd.,2009; Srivastava ve Verma, 2008; Ramadhas vd., 2005;Raheman ve Phadatare, 2004).

Tüm yakıt türleri 3. yük değeri altında değerlendirildiğinde hepsinin veriminin ortalama olarak birbirine yakın değerler sergilediği biyodizel yakıt karışımlarının verimsel olarak D-2 yakıt değeriyle paralellik gösterdiği ortaya çıkmıştır. Termal verim değeri tüm yakıtlar için %19-20 bandında olduğu görülmüştür. Bu durum benzer çalışmalarla da uyum göstermektedir (Sudhir vd., 2007; Lertsathapornsuk vd., 2008; Rao vd., 2008)

3. yükte FYME-50 ve KYME-100 yakıtlar D-2 yakıtı nazaran kısmen daha yüksek termal verim göstermişlerdir. Bu durumun birkaç sebepten meydana gelebileceği düşünülmektedir. Birincisi bu durumun biyodizel moleküllerinde mevcut olan zengin oksijen içeriğinin, yüksek setan sayısının ve kimyasal yapının kombine etkisinin yanmanın verimini artıracacağı ve böylece tam yanmanın gerçekleşmesinden meydana gelebileceği olup daha önce yapılan çalışmalarda da bu durum izah edilmiştir (Sukumar Puhana vd., 2007; Sukumar Puhana vd., 2009; Sukumar Puhana vd., 2005; Agarwal vd., 2008).

Bununla birlikte biyodizel yakıtların yüksek yağlayıcılık özelliği sürtünmeden kaynaklı enerji kayıplarını engellemiş olabilir (Magin Lapuerta vd., 2008).Yakıtların D-2 yakıtı göre daha yüksek viskoziteye sahip olmaları yakıt enjeksiyon sistemindeki sızıntıyı azaltarak yanma olayının iyileşmesine katkı sağlamış olabileceği de düşünülmektedir. Benzer çalışmalar bu iddiayı doğrulamaktadır (Tsolakis, 2006; Senatore vd., 2000; Shaheed ve Swain, 1999). Bazı araştırmacılar ester esaslı yakıtların kimyasal özelliklerinden kaynaklanabileceği, bunların arasında çift bağ etkisinin termal verimi etkileyebileceğini ifade etmişlerdir (Klopfenstein ve Walker, 1983).

4.1.4.2. Kaplanmış Motor FTV Sonuçlar ve Değerlendirme

Kaplanmış motor termal verim açısından değerlendirilirse yukarıdaki grafiklerden de görüldüğü gibi tüm yük değerleri altında ve tüm yakıt türleri için termal verim normal motora göre bir artış sergilemiştir. Tüm yük değerleri altında meydana gelen bu artış değerleri aşağıdaki Tablo 4.5.'de gösterilmektedir.

Tablo 4.5. Normal ve kaplanmış motora ait 3. yük altında % verim değişim miktarları

1.YÜK DEĞERİ ALTINDA NORMAL VE KAPLANMIŞ MOTOR VERİM (%)							
	D-2	FYME-20	FYME-50	FYME-100	KYME-20	KYME-50	KYME-100
NORMAL MOTOR(%)	13	12	11,7	11	11,5	11	11,4
KAPLANMIŞ MOTOR(%)	14	13	13,5	12	12,5	12,5	13,5
FARK	%1	%1	%1,8	%1	%1	%1,5	%2,1
2.YÜK DEĞERİ ALTINDA NORMAL VE KAPLANMIŞ MOTOR VERİM (%)							
	D-2	FYME-20	FYME-50	FYME-100	KYME-20	KYME-50	KYME-100
NORMAL MOTOR(%)	19	17	15,8	16,5	16	17,5	18,5
KAPLANMIŞ MOTOR(%)	20	18	17	18,5	19	20	20
% FARK	%1	%1	%1,2	%2	%3	%2,5	%1,5
3.YÜK DEĞERİ ALTINDA NORMAL VE KAPLANMIŞ MOTOR VERİM (%)							
	D-2	FYME-20	FYME-50	FYME-100	KYME-20	KYME-50	KYME-100
NORMAL MOTOR(%)	19	19	19,5	18	19	18,5	20
KAPLANMIŞ MOTOR(%)	21,5	20	21	22	21	21	23
% FARK	%2,5	%1	%1,5	%4	%2	%2,5	%3

Kaplanmış motordaki bu artış miktarlarını yakıt tipi ve normal motordaki verim değerleri ile mukayese edersek; D-2 yakıt için normal motorda birinci yük değeri altındaki termal verim değeri %13 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %14'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1'lik artış meydana gelmiştir.

D-2 yakıt için normal motorda ikinci yük değeri altındaki termal verim değeri %19 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %20'ye yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1'lik artış meydana gelmiştir.

D-2 yakıt için normal motorda üçüncü yük değeri altındaki termal verim değeri %19 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %21,5'ye yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %2,5'luk artış meydana gelmiştir.

Aynı değerlendirmeleri FYME yakıt karışımları için yapacak olursak; FYME-20 yakıt için normal motorda birinci yük değeri altındaki termal verim değeri %12 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %13'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1'lik artış meydana gelmiştir.

FYME-20 yakıt için normal motorda ikinci yük değeri altındaki termal verim değeri %17 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %18'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1'lik artış meydana gelmiştir.

FYME-20 yakıt için normal motorda üçüncü yük değeri altındaki termal verim değeri %19 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %20'ye yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1'lik artış meydana gelmiştir.

FYME-50 yakıt için normal motorda birinci yük değeri altındaki termal verim değeri %11,7 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %13,5'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1,8'lik artış meydana gelmiştir.

FYME-50 yakıt için normal motorda ikinci yük değeri altındaki termal verim değeri %15,8 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %17'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1,2'lik artış meydana gelmiştir.

FYME-50 yakıt için normal motorda üçüncü yük değeri altındaki termal verim değeri %19,5 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %21'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1,5'luk artış meydana gelmiştir.

FYME-100 yakıt için normal motorda birinci yük değeri altındaki termal verim değeri %11 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %12'ye yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1'lik artış meydana gelmiştir.

FYME-100 yakıt için normal motorda ikinci yük değeri altındaki termal verim değeri %16,5 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %18,5'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %2'lik artış meydana gelmiştir.

FYME-100 yakıt için normal motorda üçüncü yük değeri altındaki termal verim değeri %18 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %22'ye yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %4'lük artış meydana gelmiştir.

Kaplanmış motorda kullanılan yakıtları termal verim değerleri açısından kendi aralarında değerlendirme yapmak gerekirse tüm yakıt türleri için yükün artmasıyla birlikte termal verim hızlı bir şekilde artış göstermektedir.

Şekil 4.7.'de görüldüğü gibi kaplanmış motorda 2.yük değerinden 3. yük değerine geçerken D-2 yakıtta ve FYME karışım yakıtlarının hepsinde termal verim artış eğilimindedir. D-2, FYME-20, FYME-50 ve FYME-100 yakıt için termal verim değerleri sırasıyla %21,5- %20-%21-%22 olarak hesaplanmıştır. D-2 yakıt için verimde %1,5'lik bir artış meydana gelirken, FYME karışım yakıtları için ise sırasıyla %2-4 ve 3,5'lük bir artış söz konusu olmuştur.

Aynı değerlendirmeleri Şekil 4.8.'de KYME yakıt karışımları için yapacak olursak; KYME-20 yakıt için normal motorda birinci yük değeri altındaki termal verim değeri %11,5 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %12,5'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1'lik bir artış meydana gelmiştir.

KYME-20 yakıt için normal motorda ikinci yük değeri altındaki termal verim değeri %16 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %19'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %3'lük bir artış meydana gelmiştir.

KYME-20 yakıt için normal motorda üçüncü yük değeri altındaki termal verim değeri %19 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %21'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %2'lik bir artış meydana gelmiştir.

KYME-50 yakıt için normal motorda birinci yük değeri altındaki termal verim değeri %11 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %12,5'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1,5'lük bir artış meydana gelmiştir.

KYME-50 yakıt için normal motorda ikinci yük değeri altındaki termal verim değeri %17,5 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %20'ye yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %2,5'lik bir artış meydana gelmiştir.

KYME-50 yakıt için normal motorda üçüncü yük değeri altındaki termal verim değeri %18,5 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %21'ye yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %2,5'luk bir artış meydana gelmiştir.

KYME-100 yakıt için normal motorda birinci yük değeri altındaki termal verim değeri %11,4 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %13,5'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %2,1'lik bir artış meydana gelmiştir.

KYME-100 yakıt için normal motorda ikinci yük değeri altındaki termal verim değeri %18,5 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %20'ye yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %1,5'lik bir artış meydana gelmiştir.

KYME-100 yakıt için normal motorda üçüncü yük değeri altındaki termal verim değeri %20 iken kaplanmış motorda bu verim miktarı %23'e yükselmiş olup normal motora göre verimsel bazda %3'lük bir artış meydana gelmiştir.

Seramikler sıcaklığın ve akışkan yoğunluğunun hızlı değiştiği silindirlere iç yüzeylerinde kullanıldıklarında silindir duvarlarındaki ısı transferini düşürmektedirler (Alkidas,1989). Seramiklerin bu özelliklerinden yola çıkarak ısı kayıplarını azaltmak, soğutma sistemini elemine ederek motorun termal çevrim verimini artırmak mümkündür. Silindir soğutma kayıpları azaldığında ısının çoğu egzoz sistemine aktarılmaktadır. Egzoz enerjisinin verimli geri dönüşümü ise termal verimi artırmaktadır. Isı dönüşüm sistemleri kurmak zordur. Bunun için motor konfigürasyon sistemlerinde bir çok değişim yapılması gerekmektedir. Isı dönüşüm sistemi olmasa bile ısının bir kısmı pistonlar üzerinde işe dönüştürülerek termal verimi artırmaktadır. Bu sebeple egzoz ısı geri dönüşüm sistemi olmayan TYM motorlarda da verim artmaktadır (Miyairi, 1989). Yapmış olduğumuz bu çalışma da bu tezi doğrular niteliktedir. Verilerimiz incelendiğinde kaplanmış motorun termal veriminin tüm yük değerleri altında normal motordan daha yüksek çıktığı görülmüştür.

TYM motorların temel prensibi; soğutucuya giden ısı kayıplarının azaltılarak termal verimin artırılmasına dayanmaktadır. Araştırmacıların çoğunluğu TYM motorlarda termal verimin arttığını bildirmişlerdir. Kaplanmış dizel motorun fren termal verimi dizel biyodizel ve karışım yakıtları için normal motordan daha yüksektir. Termal verimdeki artış soğutmaya gidecek ısının engellenmesine ve daha düşük ısı akışına dayandırılabilir (MohamedMusthafa vd., 2011; Pradeep Kumar vd., 2012; Hazar ve Öztürk, 2010; Rajendra vd.,2010; Janardhan vd., 2013) Daha önce yapılan bir çalışmada TYM motorun yapısal özelliklerinden dolayı YT değerlerinin düştüğü ve dolayısıyla fren termal veriminin arttığı bildirilmiştir (Hazar, 2010). Termal bariyer kaplama uygulaması, silindir gömleği, piston tepesi, segman ve silindir tepesine uygulanarak yüzeylerden geçecek ısı kaybını engeller. Yanma odasının seramik malzeme ile izolasyonu, yanma olayını etkileyerek motor performansı ve egzoz emisyonlarını pozitif yönde etkilediği bildirilmiştir (Miyairi, 1989;Sudhakar, 1984; Assanis vd., 1991; Kimura vd.,1992; Schwarz vd., 1993).

Bir motorun termal verimi birçok faktöre bağlı olup yakıtın kalori değeri ve özgül ağırlığı en önemli etkenlerdir. Yapılarında dizel yakıtı göre bol miktarda oksijen molekülü barındıran biyodizel yakıtlar normal dizel yakıtlardan yaklaşık olarak %10 daha düşük kalori değerine sahiptirler. Bununla birlikte normal dizel yakıttan daha yüksek yoğunluğa sahiptirler. Sonuç olarak hacimsel bazda hesaplandığında % 5 daha az enerji içeriğine sahip oldukları söylenebilir (Janardhan vd., 2013; Rajendra vd.,2010). Biyodizel yakıtlar, normal dizelle kıyaslandığında bir dezavantaj olan düşük kalori değerleri kaplanmış motorun artan termal verimi sayesinde ekonomik ve performanslı bir yakıt haline getirilebilmektedir.

TYM motorlardaki ısı kayıp karakteristikleri ile ilgili olarak pek çok araştırmacı çalışma yapmıştır. Sonuç olarak soğutma ortamına giden ısı kayıplarında azalma ve egzoz kayıplarına giden ısıda artma tespit edilmiştir. Bununla birlikte termal verimdeki artış aynı oranda gerçekleşmemiştir.

Soğutma ortamına giden ısı kayıpları düşük, orta ve yüksek yüklerde sırasıyla %2-3, %2-7,%4-7 olarak gerçekleşmiştir. Egzoz gazıyla giden ısı kayıplarındaki artış miktarı düşük orta ve yüksek yüklerde sırasıyla %3-5, %4-5, %8-9 oranında gerçekleşmiştir (Abedin vd., 2013; Giakoumis, 2007; Ciniviz, 2010; Taymaz vd., 1999; Taymaz, 2006).

Bu değerlerin arkasındaki temel sebep termal bariyer kaplama malzemelerin sahip oldukları düşük termal iletkenliktir. Seramik izolasyon motorun yanma sıcaklığını artırarak motorun fren g¼c¼ miktarını yükselmektedir denilebilir.

(Uzun vd., 1999), termodinamiğin ikinci kanununa dayanarak yanma odasının yalıtılmasının termal verimi artırdığını belirtmişlerdir. Termal kaplama sayesinde motorun ısıl veriminde artış olacağını ve buna bağlı olarak da yakıt t¼kretiminde azalma olacağını bildirmişlerdir. Diğer taraftan da bu iyileşmenin motorun egzoz emisyonlarını da iyileştirdiğini kaydedilmiştir.

Hazar, 2011, yaptığı çalışmada kaplama işlemi sayesinde soğutma için harcanacak enerjinin azaldığını, bunun sebebinin de kaplama işlemi sonrası ısı transferinin engellenmesine, engellenen ısının yanma ortamına geri d¼nerek yanma sıcaklığını kısa s¼rede artırmasına, artan yanma sıcaklığı ile birlikte tutuşma gecikmesinin yanma reaksiyonlarına pozitif etki etmesine dayandırmıştır.

Diğer araştırmacılar ise yanma odası duvarından ısı transferinin azalmasının y¼ksek yanma sıcaklığına sebep olacağını, y¼ksek sıcaklık sayesinde yakıt damlacıklarının buharlaşmasının kolaylaşacağını, aynı zamanda artan y¼ksek sıcaklıkla birlikte silindir içi ortalama efektif basıncın kombine etki yaparak tutuşma gecikmesinde kısıalma ve motorun tork ve g¼c¼nde artışa sebep olduğunu bildirmişlerdir. (Hazar, 2009; Hazar, 2010; Hazar, 2011; Hazar ve Özt¼rk, 2010; İşcan ve Aydın, 2012; Taymaz vd., 2003; Chan, 2001).

(Kamo vd.,1980), içten yanmalı motora ince tabakalı termal bariyer uygulamanın %5-6 termal verimini artırdığını yakıt ekonomisinde de önemli gelişme olduğunu bildirmiştir. Buna sebep olarak da, soğutma sistemine gidecek ısının engellenmesi, toplam yanma s¼resinin artması ve egzoz zamanında yanmanın genişlemesi g¼sterilmiřtir (Parlak vd., 2004; Parlak vd., 2003; Reddy vd., 1990)

Bu alışma sonucunda literat¼rde geçen yorumlar dışında eklenebilecek olan bir diğer konu ise; kaplanmış motorun fren termal verimi hesaplanırken kullanılan parametreler normal motorda olduğu gibi fren g¼c¼, saatlik yakıt t¼kretim miktarı ve yakıtın kalori miktarıdır. Normal motordaki verilerden farklı olan ve kaplanmış motorun termal verimini ortaya koymada belirleyici olan tek veri kaplanmış motorun saatlik yakıt t¼kretim değeridir. Tablo 4.2.'de de g¼r¼ld¼ę¼ gibi t¼m yakıt t¼rleri için kaplanmış motorun % fren termal verim değerleri normal motordan y¼ksek çıkmıştır. Verim ile

motorun YT değerleri birbirleri ile ters orantılı olup daha önceki ölçümlerde kaplanmış motorun YT değerlerinin normal motordan düşük olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla meydana gelen bu artışın en önemli sebebi kaplanmış motorun YT değerinde meydana gelen bu düşüştür.

Yaptığımız deneyler sonucunda;

Grafiklerden de görüleceği üzere motordaki verim artış eğilimdedir. Eğer motorun fren yükü artırılsaydı verim miktarı da artacaktır ve % 100 fren yük altında motorun verimi de maksimum değerine ulaşacaktır.

Yanma odasının yüzeyinin düşük termal iletimli malzeme ile kaplanması sayesinde sıcaklık dağılımı ve ısı akışı kontrol altına alınmış ve sıcaklık ve akışkan yoğunluğunun hızlı değiştii silindir iç yüzeylerinde ısı transferi düşürülmüştür.

Termal bariyer kaplama sayesinde termodinamiğin ikinci kanununa göre motorun ısı veriminde artış olurken yakıt tüketiminde azalma elde edilmiş buda termal verimi artırmıştır.

Termal izolasyon sayesinde motorun yanma sıcaklığını artmış böylece TYM motorlardaki fren güç miktarı yükselmiştir.

Kaplama işleminde sonucunda egzozdan dışarı atılan ve soğutma için harcanacak enerji azaldığı için yanma verimini artırmıştır.

Kaplama işleminde sonrası ısı geçişi azaltıldığı için ısı tekrar yanma ortamına geri dönmüş ve yanma sıcaklığını kısa sürede artırmıştır. Böylece tutuşma gecikmesi azalmıştır. Kaplanmış motordaki tutuşma gecikmesinin kısılması, yanma odasındaki fiziksel ve kimyasal reaksiyonları pozitif yönde etkilemiştir.

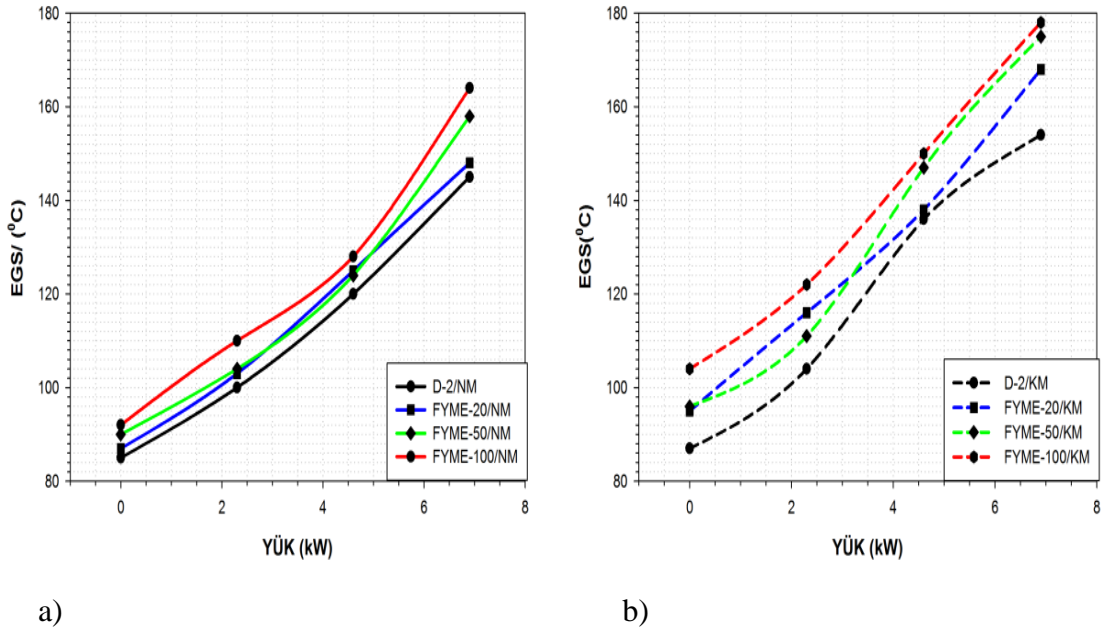
Biyodizel yakıtlar, normal dizelle kıyaslandığında bir dezavantaj olan düşük kalori değerleri kaplanmış motorun artan termal verimi sayesinde biyodizel yakıtları ekonomik ve performanslı bir yakıt haline getirmiştir.

Yanma odası duvarından ısı transferinin azalması silindir içinde yüksek yanma sıcaklığı sağlamış, ortalama efektif basıncı arttırarak yakıt damlacıklarının buharlaşmasını kolaylaştırmış böylece tutuşma gecikmesini kısaltmış toplam yanma süresinin uzamasıyla daha iyi bir yanma gerçekleştirmiştir.

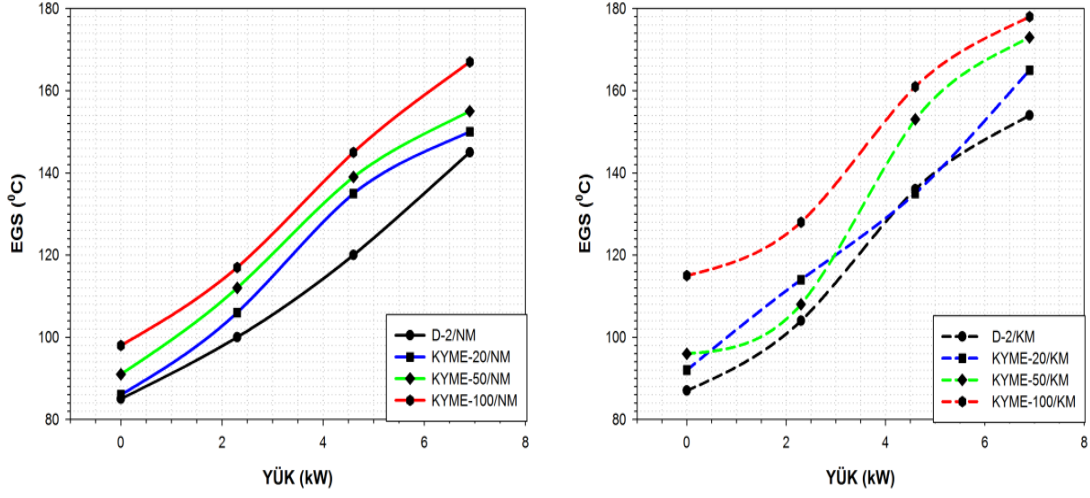
4.1.5. Egzoz Gaz Sıcaklığı (EGS)

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. Bu ölçümler sayesinde yanmış yakıtların ısıl değerleri ve yakıt kompozisyonu hakkında bilgi sahibi olabiliriz. Tersten gidilirse yani kullanılan yakıtın ısıl değeri bilinirse, yanma sonucu oluşacak egzoz gaz sıcaklıklarının da yakıtın ısıl değeriyle doğru orantılı çıkması gerekir. Bu çalışma boyunca farklı ısıl değerlere sahip test yakıtları, normal bir motor ve yanma odası termal olarak yalıtılmış bir motor kullanılmıştır. Her yakıt farklı kalorifik değerlere sahip olduğundan dolayı yanma sonucunda ortaya çıkacak sıcaklık değerleri de farklı olacaktır. Benzer şekilde yanma odası termal olarak yalıtılmış motorda egzoz çıkışında normal motora göre farklı sıcaklık değerleri ortaya çıkaracaktır.

Deneysel boyunda kaplanmış ve kaplanmamış motorlara ve farklı deney yakıtlarına ait egzoz gaz sıcaklığı ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri motorun egzoz manifoldundan itibaren 110 cm uzunluğundaki egzoz sisteminin ucundan K-J tipi kalorimetre vasıtasıyla ölçülmüş olup tüm deneylere ait ölçümler aşağıdaki Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'daki grafiklerde gösterilmiştir.



Şekil 4.9. FYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) EGS değerleri



a) b)
Şekil 4.10. KYME ve karışımlarının NM (a) ve KM (b) EGS değerleri

4.1.5.1. Normal Motor EGS Sonuçları ve Değerlendirme

Yukarıda Şekil 4.9.-4.10.'daki grafiklerde de görüldüğü gibi, egzoz gaz sıcaklık (EGS) değerleri, normal motor için tüm yakıt türlerinde artan yüklerle birlikte lineer bir artış sergilemiştir. Normal motorda D-2 yakıt için bu artış 85 °C'den 145 °C'ye her bir yük artışında ortalama olarak % 20 iken FYME yakıtlarda ise ortalama olarak 90 °C'den 157 °C'ye ve her bir yük artışı için ortalama olarak % 21 civarındadır. KYME yakıtlarda normal motor için ortalama 92 °C'den 157 °C'ye her bir yük artışında ortalama olarak % 19 civarında gerçekleşmiştir. Biyodizel yakıt ve karışımlarının EGS değerleri dizele göre yüksek çıkmıştır. Grafikler incelendiğinde de görüldüğü gibi biyodizel karışım oranı arttıkça EGS değeri de artış sergilemiştir. Tüm yük değerleri ve yakıt tipleri arasında en düşük EGS değerleri D-2 yakıtına aittir. 1. yük değeri altında en düşük EGS sıcaklık değerleri D-2 yakıtta ölçülmüş olup 85 °C'iken en yüksek EGS değerleri ise %100 biyodizel yakıtlarda ölçülmüş olup FYME-100 için 164 °C iken KYME-100 için 167 °C'dir

Normal motor için genel bir değerlendirme yapıldığında tüm test yakıtları için yükün artmasıyla birlikte EGS değerleri de yükselmiştir. Bu durumun biyodizelin yüksek karışım oranları ile birlikte ısı kayıplarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtların dizele kıyasla daha düşük termal verimleri de buna bir kanıttır (Agarwal ve Garg, 2003; Raheman ve Ghade, 2007; Raheman, 2004).

Yakıt sıkıştırılabilir olduğu için, yakıtın pompadan gönderilme başlangıcı ile püskürtme memesinden deşarjı arasında bir gecikme zamanı vardır. Yakıtın pompadan gönderilme oranı ile püskürtme memesinden dağılma oranı özdeş değildir. Basınç dalgaları enjeksiyon ve basınç oranlarını değiştirir. Eğer yakıt daha az sıkıştırılmış ise basınç daha kolay üretilecek, ve yakıt yanma odasına sıkıştırma zamanı içinde daha erken gelecektir. Bunun yanında eğer yakıt daha fazla sıkıştırılabilir ise memenin açılma basıncına ulaşması için daha çok zamana ihtiyaç olacak ve yakıt yanma odasına daha geç püskürtülecektir (Monyem ve Gerpen, 2001).

Biyodizel yakıtların yoğunlukları dizelden fazla olduğu için daha az sıkıştırılabilirler, bu yüzden enjektör memesine daha kısa sürede ulaşırlar. EGS tutuşma gecikmesinden etkilenmektedir. Uzun tutuşma gecikmeleri yanmanın gecikmesine ve daha yüksek gaz sıcaklığına sebep olmaktadır. Kullanmış olduğumuz biyodizel karışım yakıtlar içinde tutuşma gecikmesi kısalmış olabilir. Tutuşma gecikmesinin kısalması ön karışımda yanma miktarını azaltırken ikinci yanma miktarını artırır, böylece EGS değerleri de artar (Almeida vd., 2002).

Ester esaslı yakıtlar, yüksek moleküler ağırlığa, yüksek kaynama noktasına, yüksek viskoziteye, yüksek yoğunluk ve düşük buharlaşabilme özelliklerine sahip olmaları nedeniyle dizelerle nazaran yanması zordur. Ancak yüksek setan sayısı ve zengin oksijen içeriği bu yakıtların ateşlenmesini kolaylaştırır, yakıt verimli bir şekilde yanar. Egzoz gaz sıcaklığının yüksek olması geç yanmadan kaynaklanabilir.

Geç yanmada bir miktar ısı boşa harcanacaktır fakat enerji dağılımı dizelerle göre daha kontrol altında olacaktır. Dolayısıyla ikinci yanmadaki enerji kayıpları çok fazla olmayacaktır. Yanma esnasında oluşan enerji dağılımı ile ilgili bir veri yoktur fakat ön karışimli yanma süresi azalırken kontrollü yanma süresi artar hatta bazen egzoz zamanına kadar uzar, bu bir sebep olarak görülebilir (Sukumar Puhana vd., 2007).

Bir diğer sebep biyodizelin yüksek viskozitesi nedeniyle atomizasyonun zayıflaması böylece buharlaşmanın zayıflamasıyla yanmanın genişleyerek uzaması olabilir (Selvam ve Vadivel, 2012). Bunun sebebi ester moleküllerinde mevcut olan oksijenden kaynaklanmaktadır buda yanmayı geliştirmiş ve egzoz gaz sıcaklığı artmıştır (Srivastava ve Verma, 2008).

4.1.5.2. Kaplanmış Motor EGS Sonuçları ve Değerlendirme

EGS değerlerini kaplanmış motor için değerlendirirsek; tüm yük değerleri altında ve tüm yakıt türleri için EGS değerleri normal motordan daha yüksek sonuçlar vermiştir. Artan yük miktarına paralel olarak EGS değerleri artmıştır. Tüm biyodizel yakıt karışımlarına ait EGS değerleri D-2 yakıttan yüksek çıkmıştır. Biyodizel yakıtlardaki karışım miktarı arttıkça EGS değerleri de artmıştır.

D-2 yakıt için en düşük EGS 87 °C olup en yüksek gaz sıcaklığı 154 °C olarak ölçülmüştür. 3. yük değeri altında ölçülen kaplanmış motorun EGS değeri 154 °C olup normal motorun aynı yük değeri altındaki sıcaklık değerinden % 6 daha fazladır.

FYME-20 yakıt için en düşük EGS 95 °C olup en yüksek gaz sıcaklığı 168 °C olarak ölçülmüştür. 3. yük değeri altında ölçülen kaplanmış motorun EGS değeri 168 °C olup normal motorun aynı yük değeri altındaki sıcaklık değerinden % 13 daha fazladır.

FYME-50 yakıt için en düşük EGS 96 °C olup en yüksek gaz sıcaklığı 175 °C olarak ölçülmüştür. 3. yük değeri altında ölçülen kaplanmış motorun EGS değeri 175 °C olup normal motorun aynı yük değeri altındaki sıcaklık değerinden % 10 daha fazladır.

FYME-100 yakıt için en düşük EGS 104 C° olup en yüksek gaz sıcaklığı 178 °C olarak ölçülmüştür. 3. yük değeri altında ölçülen kaplanmış motorun EGS değeri 178 °C olup normal motorun aynı yük değeri altındaki sıcaklık değerinden % 8 daha fazladır.

KYME-20 yakıt için en düşük EGS 92 °C olup en yüksek gaz sıcaklığı 165 °C olarak ölçülmüştür. 3. yük değeri altında ölçülen kaplanmış motorun EGS değeri 165 °C olup normal motorun aynı yük değeri altındaki sıcaklık değerinden % 10 daha fazladır.

KYME-50 yakıt için en düşük EGS 96 °C olup en yüksek gaz sıcaklığı 173 °C olarak ölçülmüştür. 3. yük değeri altında ölçülen kaplanmış motorun EGS değeri 173 °C olup normal motorun aynı yük değeri altındaki sıcaklık değerinden % 18 daha fazladır.

KYME-100 yakıt için en düşük EGS 99 °C olup en yüksek gaz sıcaklığı 174 °C olarak ölçülmüştür. 3. yük değeri altında ölçülen kaplanmış motorun EGS değeri 174 °C olup normal motorun aynı yük değeri altındaki sıcaklık değerinden % 20 daha fazladır.

Her iki biyodizel yakıt için en yüksek EGS değerleri 3. yük değeri altında %100 biyodizel yakıtlar için ölçülmüş olup FYME-100 için bu değer 178 °C' iken KYME-100

için ise 174 C° ölçülmüştür. En düşük EGS ise aynı şartlar altında D-2 yakıt için 154 °C olarak ölçülmüştür. Biyodizel yakıtlar arasındaki EGS farkı yakıtların kalori değeri ve yakıt içeriğindeki oksijenden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yanma odası elemanları termal olarak yalıtılan motor içerisinde yanma sonucu meydana gelen ısı, termal bariyer tabakasından dolayı soğutma suyuna iletilemediği için yanma odasına geri döner yanma reaksiyonuna katılır. Reaksiyon çevrimi bittikten sonra oluşan ısı egzoz sistemi vasıtasıyla atmosfere salınır. Normal motorla kıyaslandığında kaplanmış motorda ortaya çıkan EGS değerleri yüksektir. Bunun en temel sebebi yukarıda da açıklandığı gibi soğutma sistemine gidecek ısının kısmen engellenmesi ve ısının geri kalanının egzoz vasıtasıyla atılmasıdır. Benzer çalışmalarda da doğrulayıcı sonuçlar ortaya çıkmıştır. (Parlak vd., 2004; Parlak vd., 2003; Reddy vd., 1990).

Her iki motorda tüm yakıt türleri için hızın artmasıyla birlikte EGS artmıştır. Bunun sebebi yüksek hızlarda yakıtın yanma hızı artar sonuç olarak ısı dağılım oranı da artar. TYM motorlarda soğutmaya giden ısı kayıpları termal bariyer etkisinden dolayı azaldığı için daha yüksektir (Hazar, 2009; Hazar, 2010; MohamedMusthafa vd., 2011; MohamedMusthafa vd., 2012)

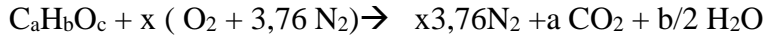
4.2. Emisyon Ölçüm ve Sonuçları

4.2.1. Normal Motor CO Emisyon Ölçümleri

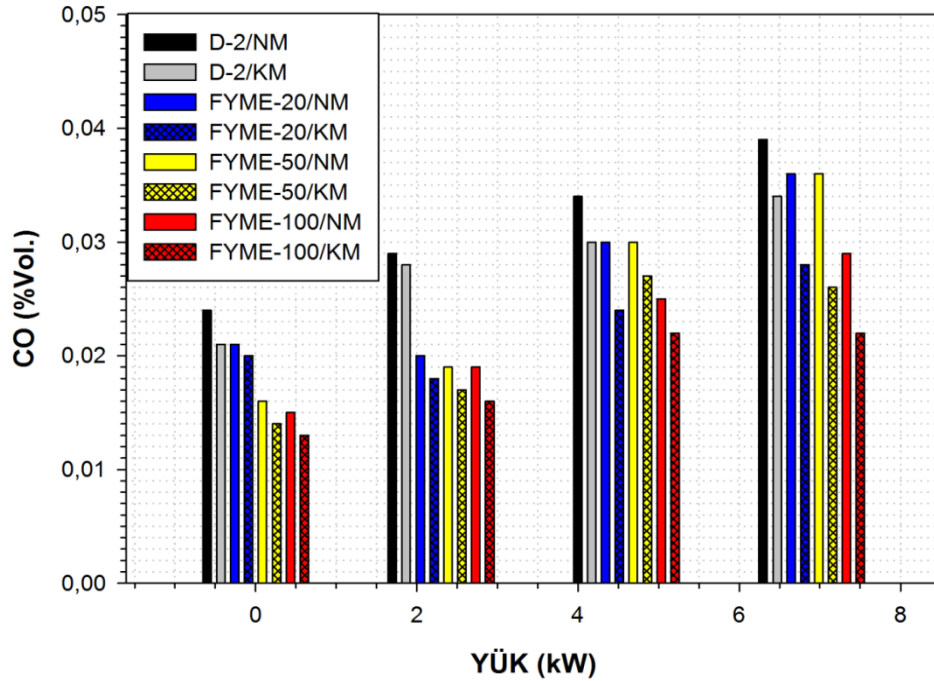
İçten yanmalı motorlarda yanma olayı, yanma odasına alınan havanın sıkıştırılmasıyla yada bir buji ile ateşleme yaparak yakıtın alev alması ile başlar. Bilindiği gibi havanın kütlece %21'ü O₂ ve %79'u ise N₂ den oluşmaktadır. Yanma olayı ise yakıt içerisinde C ve H'nin içeri alınan havadaki O₂ ile girmiş olduğu reaksiyon sonucu H₂O ve CO_x 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. Otomotiv sektöründe bu ifade Stokiometrik 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 (Agarwal, 2007).

Yanma denklemi genel olarak şu şekilde ifade edilmektedir:



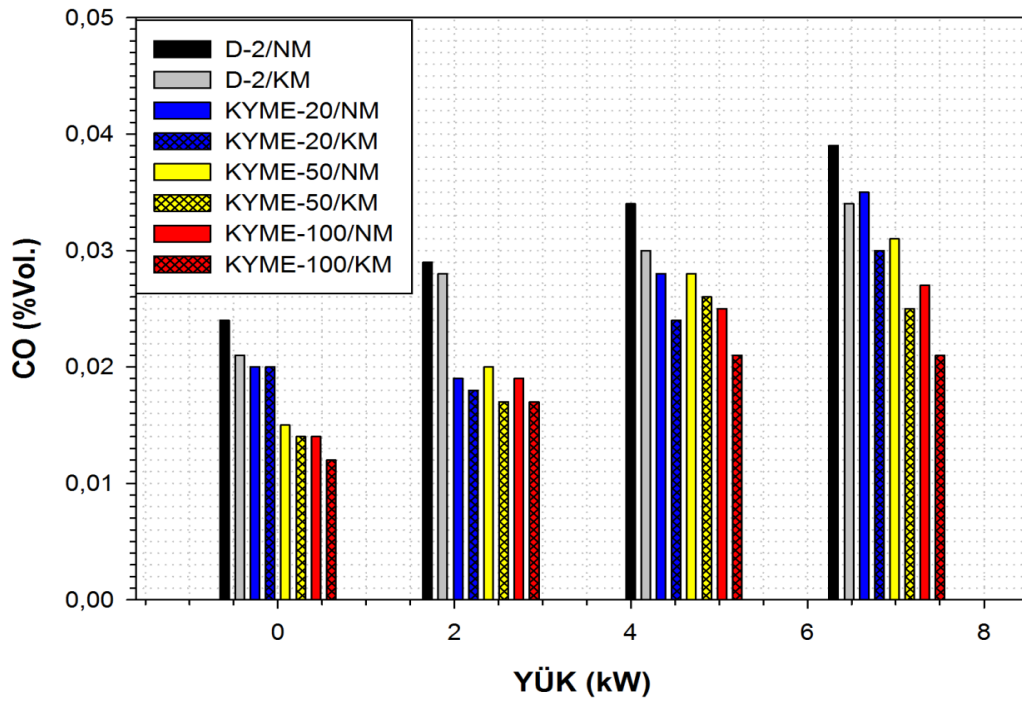
Yanma işlemi sonucunda oksijenin tamamı CO₂ çevrilemez ve egzozda CO görülür. CO eksik yanma sonucu ortaya çıkan bir reaksiyon ürünü olup zararlı bir emisyon çeşididir. Hidrojen atomlarının oksijen atomlarını çekim kuvveti, karbon atomlarına oranla daha büyüktür. Bu nedenle yakıt içerisindeki hidrojen, 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 karbonmonoksit parçacıkları olarak görülebilir (Acaroğlu vd., 2010). Yapmış olduğumuz deneylere ait FYME ve KYME karışım yakıtlarına ait CO emisyon ölçümleri Şekil 4.11. ve Şekil 4.12. deki grafiklerde görülmektedir.



Şekil 4.11. KM ve NM'de D-2, FYME yakıt ve karışımlarına ait CO emisyon ölçüm değerleri

FYME yakıt ve karışımlarına ait CO emisyon değerleri incelendiğinde tüm yük değerleri altında ve tüm yakıt türleri arasında FYME karışım yakıtlar D-2 yakıtı göre daha düşük CO emisyon değeri sergilemiştir. FYME karışım oranı arttıkça CO emisyon değeri azalmıştır. Yük değeri arttıkça CO emisyon değeri tüm yakıtlar için lineer bir artış değeri sergilemiştir. Normal motor için en düşük CO değeri boşa çalışan yük değerinde FYME-100 yakıt için 0,015 (% vol.) olarak ölçülmüştür. Normal motor için en yüksek CO değeri ise D-2 yakıt için 0,039 (%vol.) olarak ölçülmüştür.

Normal motor için farklı yük değerleri altında FYME karışımlarını D-2 yakıtla CO emisyon değerleri açısından kıyaslanırsa; FYME-20, FYME-50 ve FYME-100 yakıtları motor boşa iken D-2 yakıtı göre sırasıyla % 12-35 ve 37'lik düşüş, 1. yük değeri altında yine sırasıyla % 31-35 ve 35'lik düşüş, 2. yük değeri altında bu düşüş değerleri yine sırasıyla %12-12 ve 27 olmuştur. Son yük değeri altında ise bu düşüş değerleri yine sırasıyla %8-8 ve 36 olarak gerçekleşmiştir. Tüm yük değerleri altında ortalama olarak en az düşüş miktarı FYME-20 yakıt için gerçekleşirken en yüksek düşüş miktarı ise FYME-100 için gerçekleşmiştir.



Şekil 4.12. KM ve NM’de D-2, KYME yakıt ve karışımlarına ait CO emisyon ölçüm değerleri

Yukarıda verilen KYME yakıt ve karışımlarına ait CO emisyon değerleri incelendiğinde tüm yük değerleri altında ve tüm yakıt türleri arasında KYME karışım yakıtlar D-2 yakıtı göre daha düşük CO emisyon değeri sergilemiştir. KYME karışım oranı arttıkça CO emisyon değeri genel olarak azalmıştır. Motora uygulanan yük değeri arttıkça CO emisyon değerleri genel olarak tüm yakıtlar için lineer bir artış değeri sergilemiştir. Normal motor için en düşük CO değeri boşta çalışan yük değerinde KYME-100 yakıt için 0,014 (% vol.) olarak ölçülmüştür. Normal motor için en yüksek CO değeri ise D-2 yakıt için 0,039 (%vol.) olarak ölçülmüştür.

Normal motor için farklı yük değerleri altında KYME karışımlarının CO emisyon değerleri açısından değerlendirirsek; KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtları motor boşta çalışırken yani motora herhangi bir yükleme yapmadan çalışırken D-2 yakıtı göre sırasıyla % 17-38 ve 42'lik düşüş, 1. yük değeri altında yine sırasıyla % 35-31 ve 35'lik düşüş, 2. yük değeri altında bu düşüş değerleri yine sırasıyla %18-18 ve 27 olmuştur. Son yük değeri altında ise bu düşüş değerleri yine sırasıyla %10-21 ve 31 olarak gerçekleşmiştir. Tüm yük değerleri altında ortalama olarak en az düşüş miktarı KYME-20 yakıt için gerçekleşirken en yüksek düşüş miktarı ise KYME-100 için gerçekleşmiştir. KYME yakıt ve karışımlarının genel olarak en düşük CO değerlerini sergilediği görülmekte olup bu durumun fizikokimyasal özelliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Genel olarak değerlendirme yapmak gerekirse; dizel bir motorun CO emisyonu yakıtın fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Ester esaslı yakıtların D-2 ile kıyaslandığında ortaya çıkan en temel fark yakıtın kalori değeri, oksijen içeriği ve setan sayısıdır. Ester esaslı yakıtlar dizel yakıtı göre ortalama olarak %12 daha fazla oksijen içerirler. Yanma esnasında bu oksijen molekülleri yanmanın verimini artırarak tam yanma gerçekleştirirler. Böylece yakıtta mevcut olan C molekülleri yanma işlemine katılırlar. Okside olan C elementi CO₂ olarak dışarı salınırlar. Ve böylece CO emisyonunun azalmasına sebep olurlar. Bu durumun ispatını bundan sonraki bölümde CO₂ emisyonunu inceleyerek de görebiliriz. Literatüre göre genel eğilim motorda biyodizel kullanımının CO emisyonunu azalttığı yönündedir (Puhan vd., 2005; Utlu ve Koçak, 2008; Wu vd., 2009). Yakıt karışımındaki biyodizel miktarı arttıkça oksijen içeriği de arttığından dolayı CO emisyonu azalmaktadır (Aydın ve Bayındır, 2010; Murillo vd., 2007; Kim vd., 2010; Meng vd., 2008; Gumus ve Kasifoglu, 2010).

Biyodizelin üretildiği hammaddeye göre özellikleri de değişmektedir. Bununda farklı oksijen içeriklerine ve setan sayısına bağlı olduğundan kaynaklandığı belirtilmiştir (Wu vd., 2009). Ekstra oksijen içeriği yanmayı iyileştirir ve zararlı emisyonu azaltır (Karabektas, 2009; Usta, 2005; Guru vd., 2010; Godiganur vd., 2010; Deshmukh vd.,2009). Ayrıca biyodizelin yüksek olan setan sayısı zengin yakıt bölgesi oluşma ihtimalini azaltır, ve böylece CO emisyonu azalır (Wu vd., 2009; Kim vd., 2010; Karabektas, 2009; Keskin vd., 2008).Biyodizelin enjeksiyonun iyileşmesi, ateşleme zamanını düzelttiği için CO emisyonunu azaltır.

Motor yükü CO emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yük miktarı arttıkça CO emisyon değerleri de artmaktadır. Bunun en temel sebebi hava/yakıt oranının azalması şeklinde açıklanmıştır. (Lertsathapornsuka vd., 2008; Usta vd., 2005; Ramadhas vd., 2005; Agarwala D, vd., 2006).

4.2.2. Kaplanmış Motor CO Emisyon Ölçümleri

Kaplanmış motora ait CO emisyon değerlerini normal motora ait değerlerle kıyaslırsak; grafiklerden de görüldüğü gibi genel olarak tüm yakıt türleri ve tüm yük değerleri altında CO emisyon değerleri normal motordan daha düşük çıkmıştır. Normal motorda olduğu gibi kaplanmış motorda da düşük yükten yüksek yüke çıkıldığında CO emisyonları artış eğilimi göstermiştir. Biyodizel yakıt ve karışımları tüm yük değerleri altında D-2 yakıttan daha düşük emisyon değerleri sergilemiştir. Aynı Şekilde biyodizel karışım oranı arttıkça CO emisyonu düşüş eğilimi göstermiştir. Yani kısaca ifade etmek gerekirse kaplanmış motorda elde edilen tüm değerler sonuçları açısından normal motorla paralellik göstermiştir. Tek ve en önemli fark kaplanmış motorun CO emisyon değerlerinin normal motordan daha düşük çıkması şeklinde özetlenebilir.

Kaplanmış motora ait CO emisyon değerlerini normal motorda elde edilen değerlerle yakıt türleri açısından değerlendirecek;

D-2 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşa çalışırken %12,5, I.yük altında %4, II. yük altında %12, ve III. yük değeri altında ise % 13 daha az CO emisyonu üretmiştir.

FYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %5, I.yük altında %10, II. yük altında %20, ve III. yük değeri altında ise % 23 daha az CO emisyonu üretmiştir.

FYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %13, I.yük altında %11, II. yük altında %10, ve III. yük değeri altında ise % 28 daha az CO emisyonu üretmiştir.

FYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %14, I.yük altında %16, II. yük altında %12, ve III. yük değeri altında ise % 25 daha az CO emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtlarının normal motora göre CO emisyonlarındaki düşüş yüzdeleri sırasıyla % 13- 23-28-25 olarak gerçekleşmiştir.

Aynı değerlendirmeyi KYME yakıt ve karışımları için yapacak olursak;

KYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %0, I.yük altında %6, II. yük altında %15, ve III. yük değeri altında ise % 15 daha az CO emisyonu üretmiştir.

KYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %7, I.yük altında %15, II. yük altında %8, ve III. yük değeri altında ise % 20 daha az CO emisyonu üretmiştir.

KYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %15, I.yük altında %11, II. yük altında %16, ve III. yük değeri altında ise % 23 daha az CO emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtlarının normal motora göre CO emisyonlarındaki düşüş yüzdeleri sırasıyla % 13- 15-20-23 olarak gerçekleşmiştir.

CO yakıtın eksik yanması sonucu meydana gelen silindir içi sıcaklık ve hava yakıt oranı ile alakalı bir parametredir (Hazar, 2011; Hazar, 2010; Karabektaş, 2009).Bu sebeplerden ötürü TYM motorlar sahip oldukları özelliklerden dolayı daha düşük CO emisyonu üretmesi beklenir. TYM motorlarda ön karışımlı yanma seviyesinin azalması başlangıçtaki

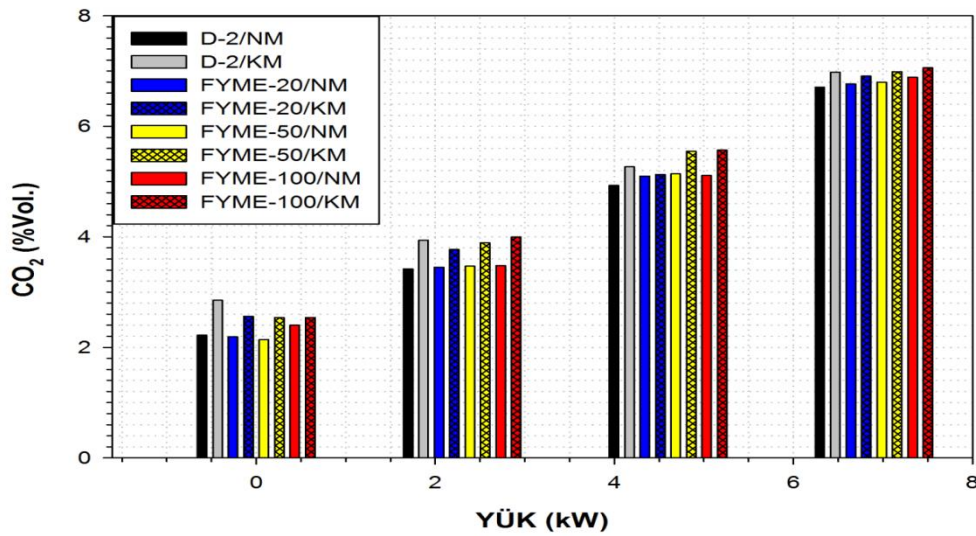
CO emisyon oluşumunu azaltır ve daha sonra ise yani difüzyonlu yanma süreci boyunca yüksek sıcaklık CO oksidasyonunu hızlandırır.

Düşük motor hızlarında zayıf yanmadan dolayı her iki motor ve tüm yakıt türleri için CO emisyonu yüksek çıktığı, orta devirde ve yüklerde ise yanma veriminin artmasından dolayı düştüğü, yüksek hızlarda ise yeterli yanma zamanı bulunmadığı için CO emisyonu arttığı bildirilmiştir. (Modi ve Gosai, 2010).

Termal yalıtımdan dolayı sıkıştırma sonu sıcaklığı artmış ve CO emisyonu azalmıştır. Diğer bir deyişle yanma veriminin artması CO emisyonu azaltmıştır. Biyodizel yakıtlarda ise yüksek oksijen içeriği daha iyi yanma sağladığı için yüksek biyodizel karışımları daha düşük CO emisyonu üretmiştir diyebiliriz. Bununla birlikte TYM motorlardaki yüksek sıcaklık, yakıtın motorun genişleme -egzoz- zamanı boyunca da devam etmektedir ve bu durumda CO emisyonunun tüm yakıtlar için kaplanmış motorda azaltmıştır (Hazar, 2009; Hazar, 2010; Hazar, 2011; Modi ve Gosai, 2010).

4.2.3. Normal Motor CO₂ Ölçümleri

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. Aşağıda Şekil 4.13. ve Şekil 4.14.'de FYME ve KYME'lere ait CO₂ grafikleri görülmektedir.

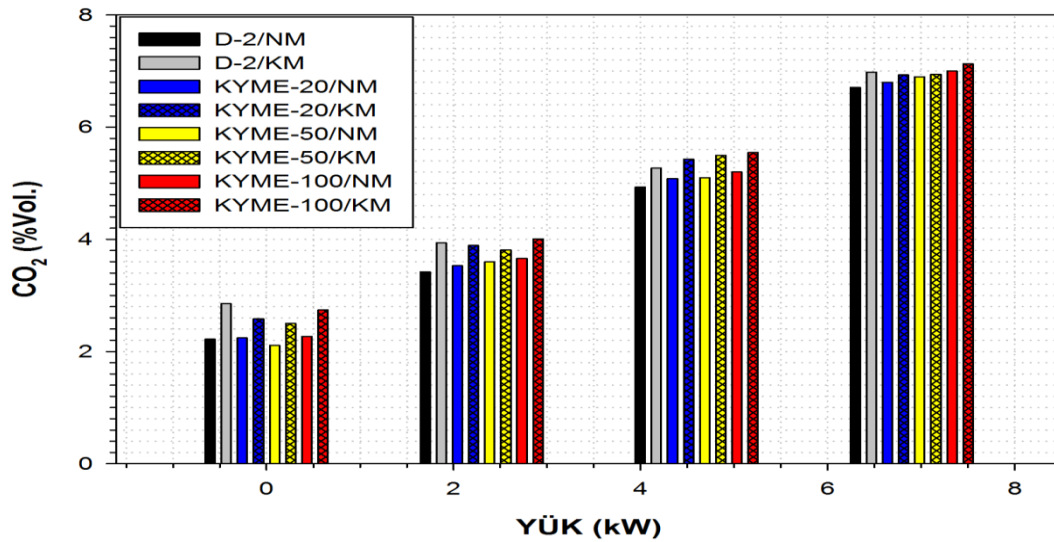


Şekil 4.13. KM ve NM'de D-2, FYME yakıt ve karışımlarına ait CO₂ emisyon ölçüm değerleri

Grafiklerden de görüldüğü gibi tüm yakıt türleri için artan yükte birlikte CO₂ emisyonu lineer bir artış eğilimindedir. Yakıtlar kendi aralarında incelendiğinde ise biyodizel yakıt karışımları D-2 yakıtına nazaran daha düşük CO₂ emisyonu değerleri vermişlerdir. CO₂ emisyon değerleri genel olarak biyodizel yakıt karışım oranı arttıkça artış eğilimi içerisindedir. En düşük ve en yüksek CO₂ emisyon değerleri incelendiğinde D-2 yakıt 2,22 (%vol.) değeri ile en düşük emisyon değerini verirken FYME-100 yakıt 6,89 (%vol.) ve KYME-100 yakıt 7 (%vol.) değerleri ile en yüksek CO₂ emisyon değerlerini sergilemişlerdir.

FYME karışım yakıtları ve D-2 yakıt 3.yük değeri altında kıyaslanırsa bu değerler D-2, FYME-20, FYME-50 ve FYME-100 yakıtları için sırasıyla % (vol.) 6,71 – 6,77 – 6,80 – 6,89 olarak ölçülmüştür. CO₂ artış miktarı D-2 yakıtına göre kıyaslanırsa FYME-20, FYME-50 ve FYME-100 yakıtları için sırasıyla % 1- 1,5 – 2,5 olarak gerçekleşmiştir.

Grafiklerden ve sonuçlardan da anlaşılacağı üzere biyodizel ve karışım yakıtları dizelere göre daha yüksek CO₂ emisyon değerleri sergilemişlerdir. Bu aynı zamanda iyi bir yanmanın belirtisi olup, O₂ içeriğinin fazla olmasından kaynaklanan ve CO emisyonlarındaki azalmanın da sebebini açıklayan önemli bir parametredir (Sukumar Puhana vd., 2007; Jinlin vd., 2011).



Şekil 4.14. KM ve NM’de D-2, KYME yakıt ve karışımlarına ait CO₂ emisyon ölçüm değerleri

KYME yakıtına ait CO₂ emisyon değerlerini gösteren grafik yukarıda görülmektedir. Grafikten de anlaşılacağı üzere genel olarak biyodizel yakıt karışım oranı arttıkça CO₂ artış eğilimi içerisindedir. En düşük ve en yüksek CO₂ emisyon değerleri incelendiğinde D-2

yakıt 2,22 (%vol.) değeri ile en düşük emisyon değerini verirken KYME-100 yakıt 7 (%vol.) değeri ile en yüksek CO₂ emisyon değerlerini sergilemişlerdir.

KYME karışım yakıtlar ve D-2 yakıt 3.yük değeri altında CO₂ emisyon değerleri açısından kıyaslanırsa bu değerler D-2, FYME-20, FYME-50 ve FYME-100 yakıtları için sırasıyla % (vol.) 6,71 – 6,8 – 6,9 – 7 olarak ölçülmüştür. CO₂ artış miktarı D-2 yakıtı göre kıyaslanırsa KYME-20, KYME-50 ve KYME-100 yakıtları için sırasıyla % 1,5- 3 – 4,5 olarak gerçekleşmiştir. Grafiklerden ve sonuçlardan da anlaşılacağı üzere biyodizel ve karışım yakıtları dizele göre daha yüksek CO₂ emisyon değerleri sergilemişlerdir. Bu aynı zamanda iyi bir yanmanın belirtisi olup, CO emisyonlarındaki azalmanın da sebebini açıklayan önemli bir parametredir (Sukumar Puhana vd., 2007; Jinlin vd., 2011).

İki biyodizel yakıt birbirleri ile kıyaslandığında ise KYME yakıtın daha yüksek CO₂ emisyon değerleri sergilemiş olup FYME yakıtı göre daha iyi bir yanma performansı sergilediği anlaşılmaktadır. Bunun da KYME yakıtın viskozite değerinin daha düşük olmasının atomizasyonu iyileştirmesi ve daha iyi bir yanmadan kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ayrıca elimizde yakıtların O₂ içerikleri ile ilgili veri olmamasına karşın KYME yakıtın daha zengin O₂ içeriğinden de kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

4.2.4.Kaplanmış Motor CO₂ Ölçümleri

Kaplanmış motora ait CO₂ emisyon değerlerini normal motora ait değerlerle kıyaslırsak; Şekil 4.13-14.'deki grafiklerden de görüldüğü gibi genel olarak tüm yakıt türleri ve tüm yük değerleri altında CO₂ emisyon değerleri normal motordan daha yüksek çıkmıştır. Normal motorda olduğu gibi kaplanmış motorda da düşük yükten yüksek yüke çıkıldığında CO₂ emisyonları lineer artış eğilimi göstermiştir. Kaplanmış motorun boşta ortaya çıkardığı CO₂ emisyon değerleri yakıt tipine göre düzensiz ve dengesiz bir durum sergilerken I. II. ve III. yük değeri altında biyodizel karışım oranıyla doğru orantılı olarak düzenli bir artış eğilimine girmiştir. Yani genel olarak biyodizel karışım oranı arttıkça CO₂ emisyonu artış eğilimi göstermiştir. Yük miktarının artışı ile birlikte biyodizel yakıt karışımlarının ürettiği CO₂ değeri D-2 yakıtı geçmiştir. Yani kısaca ifade etmek gerekirse kaplanmış motorda elde edilen tüm değerler sonuçları açısından normal motorla paralellik göstermiştir. En önemli fark ise kaplanmış motorun CO₂ emisyon değerlerinin normal motordan daha yüksek çıkması şeklinde özetlenebilir.

Kaplanmış motora ait CO₂ emisyon değerlerini normal motorda elde edilen değerlerle yakıt türleri açısından değerlendirecek;

D-2 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %28, I.yük altında %15, II. yük altında %7, ve III. yük değeri altında ise % 4 daha fazla CO₂ emisyonu üretmiştir.

FYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %17, I.yük altında %9, II. yük altında %1, ve III. yük değeri altında ise % 2 daha fazla CO₂ emisyonu üretmiştir.

FYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %18, I.yük altında %12, II. yük altında %8, ve III. yük değeri altında ise % 2 daha fazla CO₂ emisyonu üretmiştir.

FYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %6, I.yük altında %15, II. yük altında %9, ve III. yük değeri altında ise % 2 daha fazla CO₂ emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtlarının normal motora göre CO₂ emisyonlarındaki artış yüzdeleri sırasıyla % 4- 2-2-2 olarak gerçekleşmiştir.

Aynı değerlendirmeyi KYME yakıt ve karışımları için yapacak olursak;

KYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %15, I.yük altında %10, II. yük altında %7, ve III. yük değeri altında ise % 2 daha fazla CO₂ emisyonu üretmiştir.

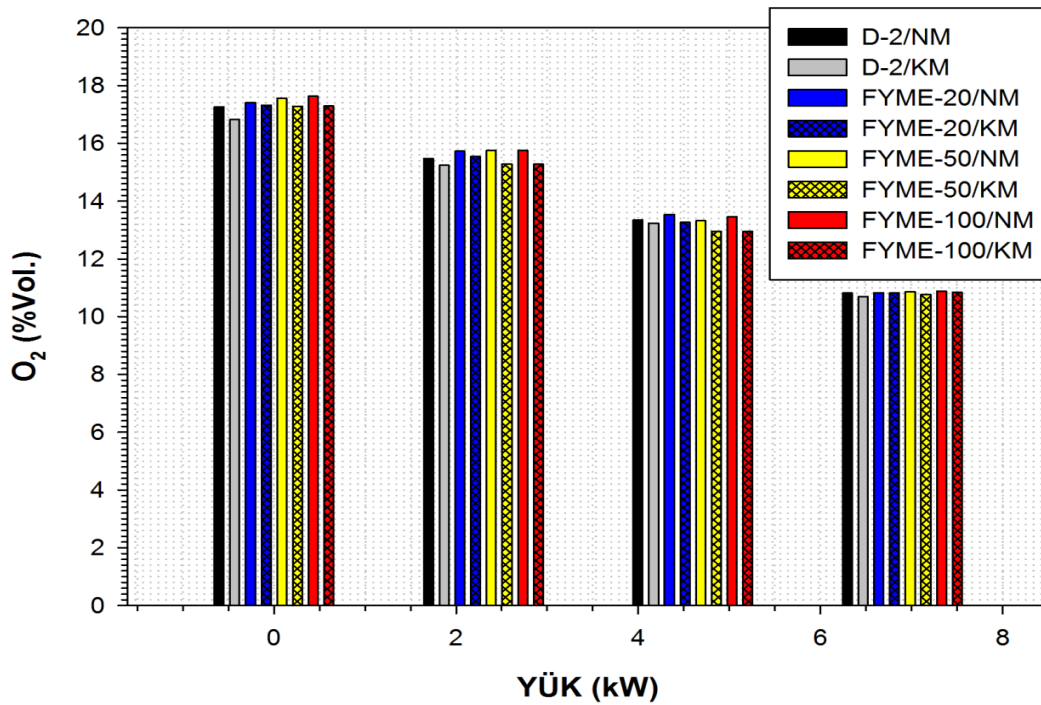
KYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %18, I.yük altında %6, II. yük altında %8, ve III. yük değeri altında ise % 1 daha fazla CO₂ emisyonu üretmiştir.

KYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %20, I.yük altında %9, II. yük altında %7, ve III. yük değeri altında ise % 2 daha fazla CO₂ emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtlarının normal motora göre CO₂ emisyonlarındaki artış yüzdeleri sırasıyla % 4- 2-1-2 olarak gerçekleşmiştir.

4.2.5. Normal Motor O₂ Ölçümleri

Dizel motorlar için stokiometrik hava/yakıt oranı 14,88/1 dir. Fakat dizel motorları yakıtın tam yanabilmesi için daha fakir hava/yakıt oranları ile çalıştırılırlar. Bu oran 18-30 oranına kadar çıkabilmektedir. Bu yüzden dizel motorlarında egzozdan serbest halde oksijen çıkar. Dizel motorda karışım üniform değildir ve yanma heterojen bir tutum sergileyerek başlar. Isı dağılım oranı hava/yakıt karışım oranına bağlıdır ve egzozdaki oksijen yüzdesi yanmanın motorun içerisindeki yakıtın ne kadar verimli yandığının bir göstergesidir. Aynı zamanda egzozdaki yüksek oksijen içeriği yakıtın verimsiz yandığını oksijenin yanmaya iştirak etmeden egzozdan ayrıldığına göstergesidir. Aşağıdaki Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da grafiklerde FYME ve KYME yakıtlarına ait kaplanmış ve normal motorlara ait O₂ miktarları % vol. değerleri gösterilmiştir.



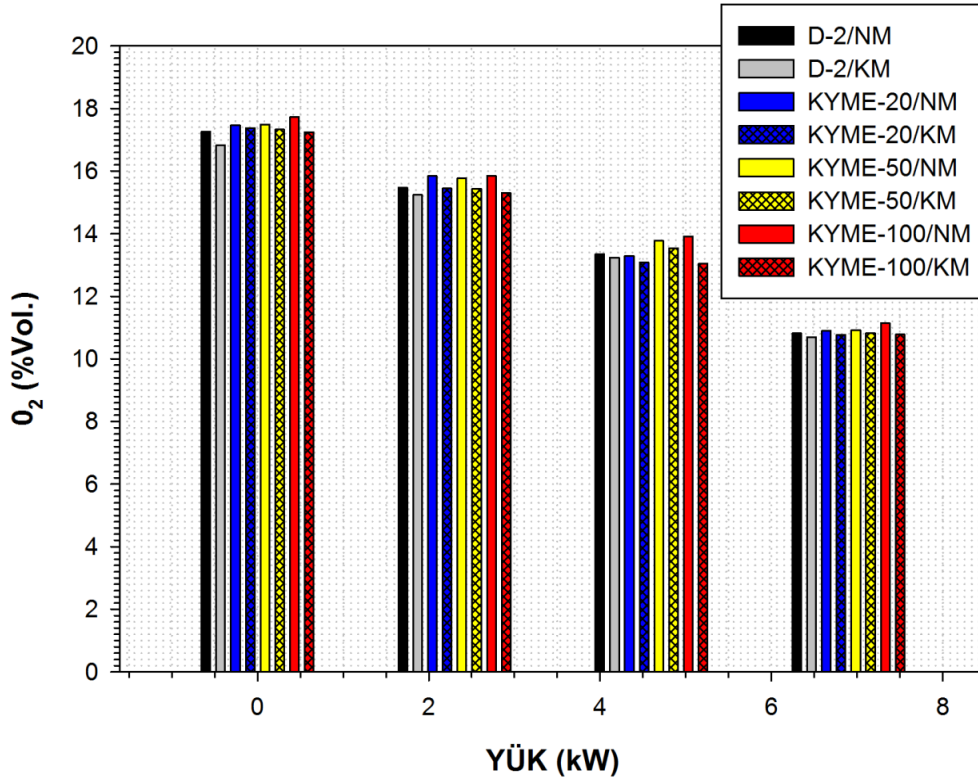
Şekil 4.15. KM ve NM'de FYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait O₂ emisyon ölçüm değerleri

Şekil 4.15.'deki grafikten de anlaşılacağı üzere en yüksek O₂ değerleri FYME karışım yakıtlarına ait olup karışım oranı arttıkça O₂ emisyon değerleri de lineer bir artış sergilemektedir. Yakıt türleri arasında en düşük O₂ emisyon değerlerini D-2 yakıt

sergilemiştir. Yük miktarı arttıkça tüm yakıt türleri için O_2 emisyon değerleri de azalma eğilimine girmiştir. Bu durum yakıt ve hava içerisinde mevcut olan O_2 miktarının yanma olayına daha çok katılması ve silindir içi sıcaklığın artarak yanma veriminin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Yük arttığı zaman hava/yakıt oranı yükselir ve egzozdaki O_2 miktarı azalır. Egzozdaki düşük oksijen miktarının sebebi, yanma için daha fazla oksijenin kullanıldığıdır (Sukumar Puhana vd., 2007; Acaroğlu vd., 2010).

Şekil 4.15.'deki grafikten de görüleceği üzere en yüksek O_2 içeriği FYME-100 yakıtı ait olup saf biyodizel yakıtların karışım yakıtlara ve D-2 yakıtına göre zengin oksijen içeriğine sahip olduklarının bir göstergesidir. En düşük O_2 emisyon değerleri beklediği gibi D-2 yakıt için ortaya çıkmıştır. 3 yük değeri altında D-2 yakıt ve FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtların O_2 emisyon değerleri sırasıyla (%vol.) 10,82, 10,83, 10,85 ve 10,88 olarak ölçülmüştür.

Burada dikkat çeken bir başka husus da biyodizel yakıtların zengin oksijen içeriğinin neredeyse tamamının reaksiyona katıldığı bir göstergesi olarak O_2 emisyonlarının nerdeyse birbirine yakın değerler çıkmasıdır.



Şekil 4.16. KM ve NM'de KYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait O_2 emisyon ölçüm değerleri

Şekil 4.16. incelendiğinde, KYME yakıt içinde aynı eğilim söz konusu olup 3. yük değeri altında D-2 yakıt ve KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtların O₂ emisyon değerleri sırasıyla (%vol.) 10,82, 10,90, 10,92, 11,14 olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi en yüksek O₂ içeriği saf biyodizelde ortaya çıkmıştır. KYME ve FYME yakıtlar birbirleri ile kıyaslandıklarında ise KYME yakıt ve karışımlarının O₂ emisyon değerlerinin FYME yakıtı ve karışımlarından daha yüksek olarak ölçüldüğü görülmekte olup bu durumun KYME yakıtın FYME yakıtına nazaran daha yüksek O₂ içeriğine sahip olmasından kaynaklanacağı düşünülmektedir.

4.2.6. Kaplanmış Motor O₂ Ölçümleri

Kaplanmış motora ait O₂ emisyon değerlerini normal motora ait değerlerle kıyaslırsak; grafiklerden de görüldüğü gibi genel olarak tüm yakıt türleri ve tüm yük değerleri altında O₂ emisyon değerleri normal motordan daha düşük çıkmıştır. Normal motorda olduğu gibi kaplanmış motorda da düşük yükten yüksek yüke çıkıldığında O₂ emisyonları lineer bir azalış eğilimi göstermiştir. Biyodizel yakıt ve karışımları tüm yük değerleri altında D-2 yakıttan daha yüksek O₂ emisyon değerleri sergilemiştir. Aynı şekilde biyodizel karışım oranı arttıkça O₂ emisyonu artış eğilimi göstermiştir. Yani kısaca ifade etmek gerekirse kaplanmış motorda elde edilen tüm değerler sonuçları açısından normal motorla paralellik göstermiştir. En önemli fark ise kaplanmış motorun O₂ emisyon değerlerinin normal motordan daha düşük çıkması şeklinde özetlenebilir.

Kaplanmış motora ait O₂ emisyon değerlerini normal motorda elde edilen değerlerle yakıt türleri açısından değerlendirecek;

D-2 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %2,5, I.yük altında %2, II. yük altında %1, ve III. yük değeri altında ise % 1 daha az O₂ emisyonu üretmiştir.

FYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %1, I.yük altında %2, II. yük altında %2, ve III. yük değeri altında ise % 0 daha az O₂ emisyonu üretmiştir.

FYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %2, I.yük altında %3, II. yük altında %3, ve III. yük değeri altında ise % 1 daha az O₂ emisyonu üretmiştir.

FYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %2, I.yük altında %3, II. yük altında %4, ve III. yük değeri altında ise % 1 daha az O₂ emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtlarının normal motora göre O₂ emisyonlarındaki düşüş yüzdeleri sırasıyla % 1- 0-1-1 olarak gerçekleşmiştir.

Aynı değerlendirmeyi KYME yakıt ve karışımları için yapacak olursak;

KYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %1, I.yük altında %2,5, II. yük altında %2, ve III. yük değeri altında ise % 2 daha az O₂ emisyonu üretmiştir.

KYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %1, I.yük altında %3, II. yük altında %2, ve III. yük değeri altında ise % 1 daha az O₂ emisyonu üretmiştir.

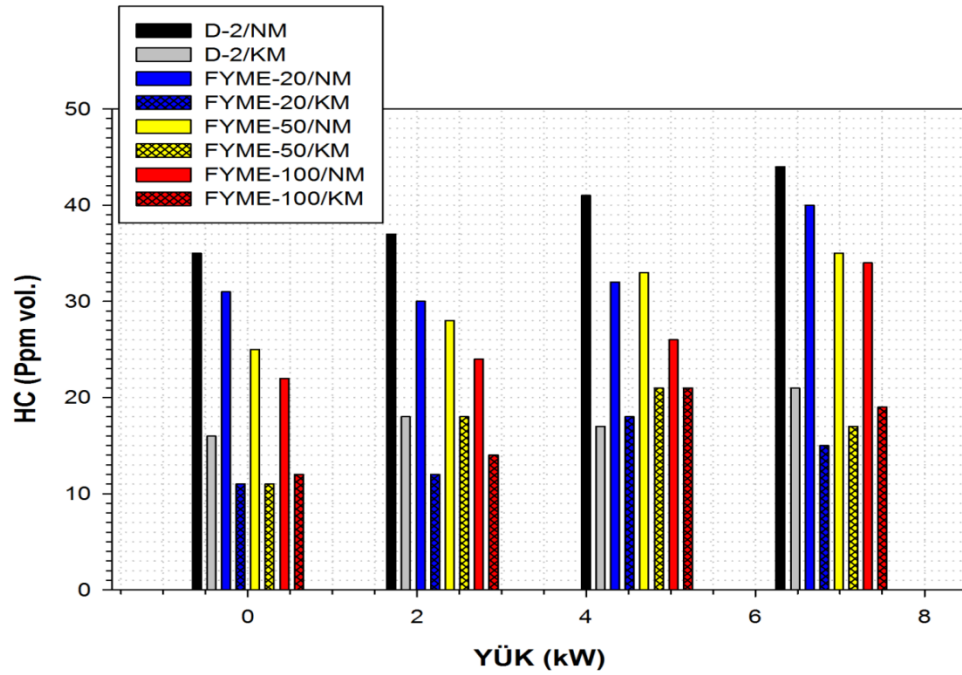
KYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %3, I.yük altında %4, II. yük altında %7, ve III. yük değeri altında ise % 4 daha az O₂ emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtlarının normal motora göre O₂ emisyonlarındaki düşüş yüzdeleri sırasıyla % 1- 2-1-4 olarak gerçekleşmiştir.

4.2.7. Normal Motor HC Ölçümleri

Yakıtın bir kısmı motordan yanmadan çıktığında egzozda yanmamış HC olarak görülür. Yüksek sıcaklıklarda ise azotun bir kısmı oksijen ile reaksiyona girer ve azotoksitler (NOx) oluşturur. Yakıt içerisindeki karbonun bir miktarı ise egzozda is olarak ortaya çıkmaktadır.

Şekil 4.17. ve Şekil 4.18.'deki grafikler incelendiğinde tüm test yakıtlarında yükün artmasıyla birlikte genel olarak HC emisyonu artmıştır. Tüm yakıtlar arasında en düşük HC emisyon değerleri biyodizel ve karışım yakıtlarında ortaya çıkmıştır. Biyodizel yakıtlarda karışım oranı arttıkça HC emisyon değerleri genel olarak azalma eğiliminde olmuştur. Normal motorla kaplanmış motor kıyaslandığında ise kaplanmış motora ait HC değerleri normal motora göre tüm yüklerde ve tüm yakıt türleri için daha düşük çıkmıştır.

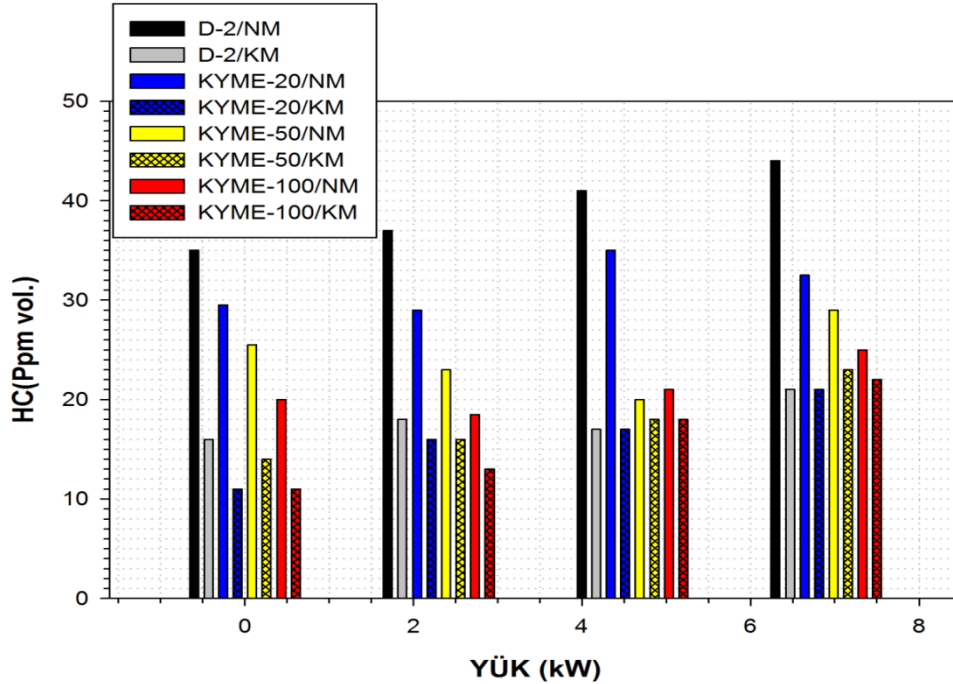


Şekil.4.17. KM ve NM'de FYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait HC emisyon ölçüm değerleri

Yukarıda Şekil 4.17.'deki grafikte FYME yakıt ve karışımlarının D-2 yakıtına göre kaplanmış ve kaplanmamış motorda göstermiş olduğu HC emisyon değerleri görülmektedir.

Normal motor için farklı yük değerleri altında FYME yakıtların HC emisyon değerleri D-2 yakıtına göre mukayese edilirse; motorun boştaki çalıştığı anda D-2, FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtların ürettiği HC değerleri sırasıyla 35, 31, 25 ve

22 ppm(vol) dür. FYME-20, FYME-50, FYME-100 için D-2 yakıtı göre HC düşüş miktarları yüzde olarak sırasıyla % 12-29-38 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler motorun 1. yük değeri için sırasıyla 37, 30, 28 ve 24 ppm (vol.) dür. 1. yük değeri için D-2 ye göre % düşüş miktarları sırasıyla 19-25 ve 35 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 2. yük değeri altında ürettiği HC değerleri sırasıyla 41, 32, 33 ve 26 ppm (vol.) dür. D-2 ye göre yüzde düşüş miktarları sırasıyla %22, %20 ve %37 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 3. Yük değeri altında ise üretilen HC değerleri sırasıyla 44, 40, 35 ve 34 ppm (vol.) olup D-2 ye göre yüzde düşüş miktarları ise sırasıyla % 10, % 21 ve % 23 olarak gerçekleşmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi HC emisyon değerlerindeki en yüksek düşüş miktarları FYME-100 yakıtları için gerçekleşmekte olup ortalama olarak % 33'dür. Karışım oranı ile HC emisyon değerleri arasında doğru bir orantı söz konusudur.



Şekil.4.18. KM ve NM'de KYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait HC emisyon ölçüm değerleri

Yukarıdaki Şekil 4.18.'deki grafikte KYME yakıt ve karışımlarının D-2 yakıtı göre kaplanmış ve kaplanmamış motorda göstermiş olduğu HC emisyon değerleri görülmektedir.

Normal motor için farklı yük değerleri altında KYME yakıtların HC emisyon değerleri D-2 yakıtı göre mukayese edilirse; motorun boştaki çalıştığı anda D-2, KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtların ürettiği HC değerleri sırasıyla 35, 29,5, 29,5 ve 20 ppm(vol) dür. KYME-20, KYME-50, KYME-100 için D-2 yakıtı göre HC düşüş

miktarları yüzde olarak sırasıyla % 16- %16 ve %43 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler motorun 1. yük değeri için sırasıyla 37, 29, 23 ve 18,5 ppm(vol.) dür. 1. yük değeri için D-2 ye göre % düşüş miktarları sırasıyla % 22 - %38 ve %50 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 2. yük değeri altında ürettiği HC değerleri sırasıyla 41, 35, 20 ve 21 ppm(vol) dür. D-2 ye göre % düşüş miktarları sırasıyla %15, %42 ve %49 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 3. Yük değeri altında ise üretilen HC değerleri sırasıyla 44, 32,5, 29 ve 25 ppm(vol) olup D-2 ye göre yüzde düşüş miktarları ise sırasıyla %27, %35 ve %44 olarak gerçekleşmiştir. Sonuçlardan da görüldüğü gibi HC emisyon değerlerindeki en yüksek düşüş miktarları KYME-100 yakıtları için gerçekleşmekte olup ortalama olarak % 45'dir. Karışım oranı ile HC emisyon değerleri arasında doğru bir orantı söz konusudur.

İki yakıt türü kendi aralarında kıyaslandığında KYME yakıtlar FYME yakıt karışımlarına oranla daha düşük HC emisyon değerleri sergilemişlerdir. Bunun KYME yakıtın FYME yakıtına nazaran daha düşük viskozite değerine sahip olması nedeniyle iyi atomizasyon sağlayarak daha iyi bir yanma verimi sağlaması ve KYME yakıtın FYME yakıtına nazaran daha yüksek setan sayısına sahip olması olabileceği düşünülmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde ise grafiklerden de görüldüğü gibi biyodizel karışımlarında HC emisyonları, dizele nazaran belirgin bir düşüş sergilemiştir. Karışımdaki biyodizel miktarının artması, yanmamış hidrokarbon miktarını önemli bir şekilde düşürmüştür. Bu düşüşlerin sebebi; biyodizeldeki zengin oksijen miktarının varlığından, yakıttaki yanma işleminin daha iyi gerçekleşmesinden, oksijenin varlığının yanmanın verimini artırarak yanmanın tamamlanmasından kaynaklanması şeklindedir. Bunun yanında setan sayısı tutuşma işleminde önemli bir rol oynamaktadır. Kısa tutuşma gecikmesi sağlayarak yakıtın daha iyi yanmasına olanak sağlar. Anlatılanlar değerlendirildiğinde; metilester yakıtların yüksek setan sayısı ve zengin oksijen içeriği HC emisyonlarının azalmasına etki etmişlerdir diyebiliriz. Literatür incelendiğinde de biyodizel yakıtlarda HC emisyonlarının düştüğü, biyodizel konsantrasyonu arttıkça HC emisyonu azaldığı ve biyodizel kaynağı değiştikçe HC emisyonunun da değiştiği ve bu azalmanın da yüksek oksijen içeriği ve setan sayısından kaynaklandığı bildirilmiştir. (Sharanappa vd., 2009; Sukumar Puhana vd., 2005;Selvam ve Vadivel, 2012; Sukumar Puhana vd., 2007; Jinlin vd., 2011; Mohamed Musthafa vd., 2011).

4.2.8. Kaplanmış Motor HC Ölçümleri

Kaplanmış motora ait HC emisyon değerlerini normal motora ait değerlerle kıyaslırsak; grafiklerden de görüldüğü gibi genel olarak tüm yakıt türleri ve tüm yük değerleri altında HC emisyon değerleri normal motora göre çok keskin bir düşüş sergilemiştir. Normal motorda olduğu gibi kaplanmış motorda da düşük yükten yüksek yüke çıkıldığında HC emisyonları genel olarak bir artış eğilimi göstermiştir. Biyodizel yakıt ve karışımları tüm yük değerleri altında D-2 yakıttan genel olarak daha düşük HC emisyon değerleri sergilemiştir. Yani kısaca ifade etmek gerekirse kaplanmış motorda elde edilen tüm değerler sonuçları açısından normal motorla paralellik göstermiştir. En önemli fark ise kaplanmış motorun HC emisyon değerlerinin normal motordan belirgin bir şekilde düşük çıkması şeklinde özetlenebilir. Kaplanmış motora ait HC emisyon değerlerini normal motorda elde edilen değerlerle yakıt türleri açısından değerlendirecek;

D-2 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %55, I.yük altında %42, II. yük altında %49, ve III. yük değeri altında ise % 43 daha az HC emisyonu üretmiştir.

FYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %65, I.yük altında %60, II. yük altında %44, ve III. yük değeri altında ise % 63 daha az HC emisyonu üretmiştir.

FYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %56, I.yük altında %36, II. yük altında %37, ve III. yük değeri altında ise % 42 daha az HC emisyonu üretmiştir.

FYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %46, I.yük altında %42, II. yük altında %20, ve III. yük değeri altında ise % 45 daha az HC emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtlarının normal motora göre HC emisyonlarındaki düşüş yüzdeleri sırasıyla % 43- 63-42-45 olarak gerçekleşmiştir.

Aynı değerlendirmeyi KYME yakıt ve karışımları için yapacak olursak;

KYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %63, I.yük altında %45, II. yük altında %42, ve III. yük değeri altında ise % 36 daha az HC emisyonu üretmiştir.

KYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %46, I.yük altında %31, II. yük altında %10, ve III. yük değeri altında ise % 21 daha az HC emisyonu üretmiştir.

KYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %45, I.yük altında %30, II. yük altında %15, ve III. yük değeri altında ise % 12 daha az HC emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtlarının normal motora göre HC emisyonlarındaki düşüş yüzdeleri sırasıyla % 43- 36-21-12 olarak gerçekleşmiştir.

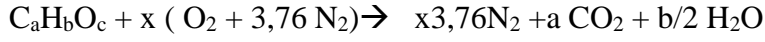
TYM motorlarda HC emisyonu çoğunlukla azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir (MohamedMusthafa vd., 2011; Pradeep Kumar vd., 2012; Modi ve Gosai, 2010). Bu durumun silindir içi yüksek gaz ve duvar sıcaklığının ve zengin oksijen içeriğinin oksidasyon reaksiyonlarının tamamlanmasına yardımcı olmasından kaynaklandığı düşünölmektedir.

HC emisyonları normal dizel ve biyodizel yakıtlar için kaplanmış motorda oldukça düşöktür. Soğutma sistemine gidecek ısının azaltılması sonucu yanma sonu sıcaklığının artmasının reaksiyon verimini artırdığı anlaşılmaktadır. Diğer yandan saf biyodizelin HC emisyonları kaplanmış motorda ve normal motorda daha düşük çıkmıştır. Literatürde sürekli olarak bahsedilen yüksek oksijen içeriğinin emisyon değerlerini pozitif yönde etkileyeceğinin en temel kanıtı olarak düşünölebilir (Öner vd., 2009). Elde ettiğimiz sonuçları destekleyen benzer sonuçlar birçok çalışmada da görölmektedir. (Aydın, 2012; İşcan ve Aydın, 2012; Banapurmath ve Tewari, 2009; Banapurmath ve Tewari, 2008).

Genel olarak yüksek oksijen içeriği biyodizel yakıtların tam ve temiz yanmasını sağlamakta böylece eksik yanma ürünü HC ve CO emisyonları azalmaktadır. Benzer çalışmalarda bu durumu doğrulamaktadır (Hazar ve Öztürk, 2010). (Lapuerta (a) vd., 2008).

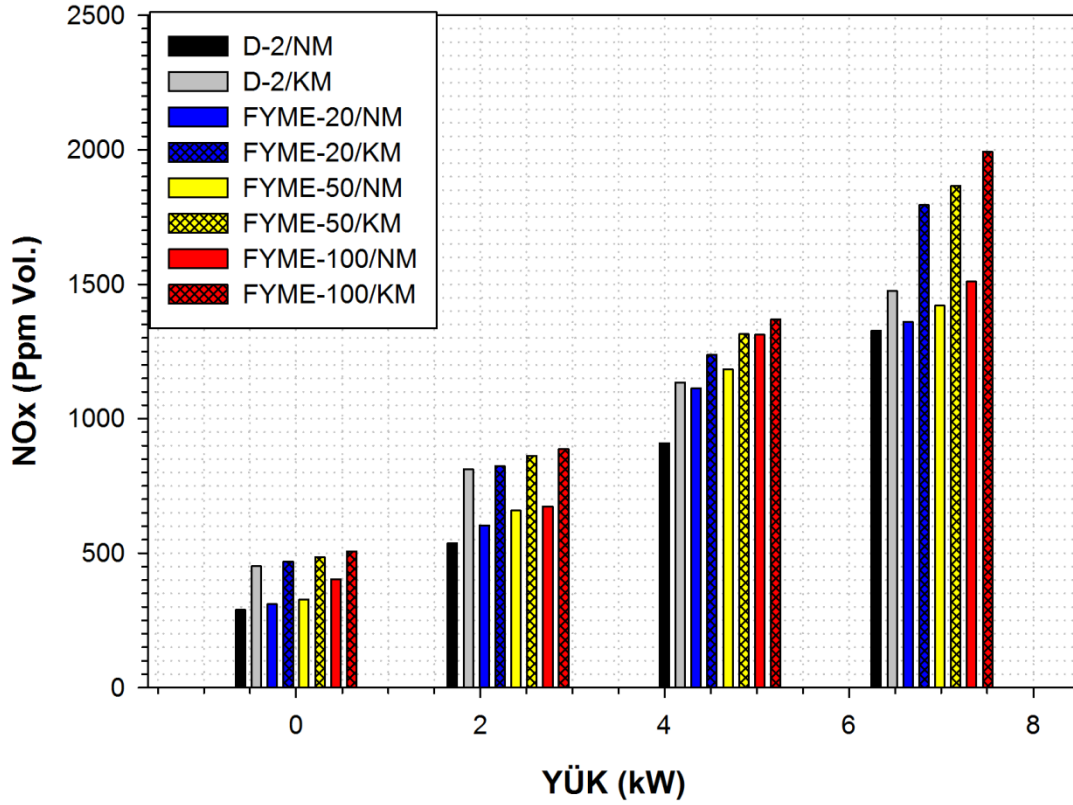
4.2.9. Normal Motor NO_x Ölçümleri

Yanma reaksiyonu neticesinde ortaya çıkan emisyon ürünlerinden birisi de NO_x'dir. Formülden de görüldüğü üzere, içten yanmalı motorlarda yanma reaksiyonu esnasında her 1 kg oksijen, 3,76 kg Nitrojenle reaksiyona girmektedir.



Nitrik oksit (NO) ve azot dioksit (NO₂), NO_x emisyonu olarak birlikte gruplandırılırken, NO, motor silindiri içerisinde üretilen azotun etken oksididir. NO_x emisyonu genellikle 1800 °K'nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşur. O₂'in bulunduğu bölgelerdeki sıcaklığın yüksekliği ve bu sıcaklıkta kalma süresi oldukça etkilidir (Heywood, 1988). Azot ve oksijen gazlarının değişik moleküllerinin birleşmesi ile NO, NO₂, N₂O, N₂O₃ vb. gibi çeşitli gazlar ortaya çıkar ki bunların hepsine birden "Azot oksitler" denir ve NO_x olarak ifade edilir. Egzoz gazları içindeki NO_x gazlarının % 95'i NO (azotoksit)'tir. NO atmosferdeki oksijen ile birleşerek NO₂ meydana getirir (Demir, 2009).

Şekil 4.19. ve Şekil 4.20.'deki grafikler incelendiğinde tüm test yakıtlarında yükün artmasıyla birlikte NO_x emisyonu artmıştır. Tüm yakıtlar arasında en yüksek NO_x emisyon değerleri biyodizel ve karışım yakıtlarına aittir. Tüm yük değerleri altında en düşük NO_x değeri D-2 yakıtta ölçülmüştür. Biyodizel yakıtlarda karışım oranı arttıkça NO_x emisyon değerleri genel olarak artma eğilimindedir. Biyodizel karışım yakıtlar arasında ise en yüksek NO_x değerleri %100 biyodizel yakıtlarda görülmüştür. Normal motorla kaplanmış motor kıyaslandığında ise kaplanmış motora ait NO_x değerleri normal motora göre tüm yüklerde ve tüm yakıt türleri için yüksek çıkmıştır.

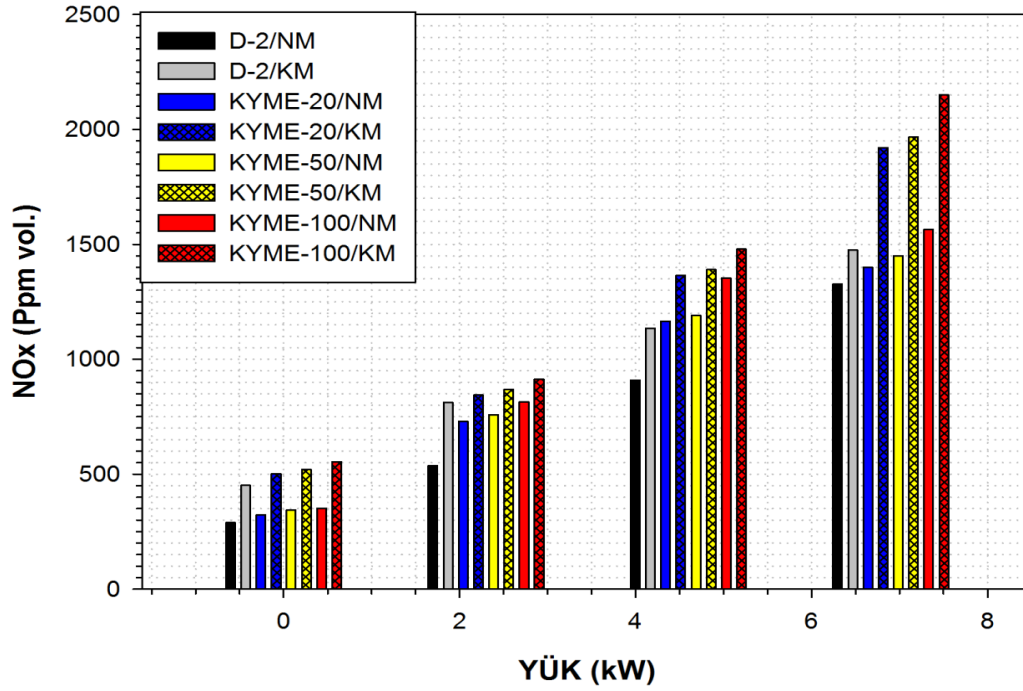


Şekil 4.19.KM ve NM’de FYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait NOx emisyon ölçüm değerleri

Yukarıda Şekil 4.19.’daki grafikte FYME yakıt ve karışımlarının D-2 yakıtına göre kaplanmış ve kaplanmamış motorda göstermiş olduğu NOx emisyon değerleri görülmektedir.

Normal motor için farklı yük değerleri altında FYME yakıtların NOx emisyon değerleri D-2 yakıtına göre mukayese edilirse; motorun boştaki çalıştığı anda D-2, FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtların ürettiği NOx değerleri sırasıyla 290, 310, 327 ve 403 ppm (vol.) dür. FYME-20, FYME-50, FYME-100 için D-2 yakıtına göre NOx artış miktarları yüzde olarak sırasıyla % 7-%13-%39 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler motorun 1. yük değeri için sırasıyla 537, 604, 658 ve 674 ppm (vol.) dür. 1. yük değeri için D-2 ye göre % artış miktarları sırasıyla 12-22 ve 25 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 2. yük değeri altında ürettiği NOx değerleri sırasıyla 909, 1113, 1183 ve 1312 ppm (vol.) dür. D-2 ye göre % artış miktarları sırasıyla %22, 30 ve 44 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 3. yük değeri altında üretilen NOx değerleri ise sırasıyla 1327, 1360, 1420 ve 1510 ppm (vol.) olup D-2 ye göre yüzde artış miktarları ise sırasıyla % 3, 7 ve 13 olarak gerçekleşmiştir.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi NOx emisyon değerlerindeki en yüksek artış miktarları FYME-100 yakıtları için gerçekleşmekte olup ortalama olarak % 30'dur. Karışım oranı ile NOx emisyon değerleri arasında doğru bir orantı söz konusu olup karışım oranı arttıkça NOx emisyon değerleri de artmaktadır.



Şekil 4.20. KM ve NM'de KYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait NOx emisyon ölçüm değerleri

Yukarıda Şekil 4.20.'deki grafikte KYME yakıt ve karışımlarının D-2 yakıtına göre kaplanmış ve kaplanmamış motorda göstermiş olduğu NOx emisyon değerleri görülmektedir.

Normal motor için farklı yük değerleri altında KYME yakıtların NOx emisyon değerleri D-2 yakıtına göre mukayese edilirse; motorun boşta çalıştığı anda D-2, KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtların ürettiği NOx değerleri sırasıyla 290, 323, 345 ve 352 ppm(vol) dür. KYME-20, KYME-50, KYME-100 için D-2 yakıtına göre NOx artış miktarları yüzde olarak sırasıyla % 11-19-20 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler motorun 1. yük değeri için sırasıyla 537, 729, 759 ve 814 ppm(vol.) dür. 1. yük değeri için D-2 ye göre % artış miktarları sırasıyla 36-41 ve 52 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 2. yük değeri altında ürettiği NOx değerleri sırasıyla 909, 1165, 1191 ve 1353 ppm(vol) dür. D-2 ye göre % artış miktarları sırasıyla %28, 31 ve 48 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 3. yük

değeri altında üretilen NOx değerleri ise sırasıyla 1327, 1400, 1450 ve 1564 ppm(vol) olup D-2 ye göre yüzde artış miktarları ise sırasıyla % 5, 9 ve 18 olarak gerçekleşmiştir.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi NOx emisyon değerlerindeki en yüksek artış miktarları KYME-100 yakıtları için gerçekleşmekte olup ortalama olarak % 35'dir. Karışım oranı ile NOx emisyon değerleri arasında doğru bir orantı söz konusu olup karışım oranı arttıkça NOx emisyon değerleri de artmaktadır.

Normal motor NOx emisyon değerleri genel olarak değerlendirilirse; grafiklerden de görüldüğü gibi yakıttaki biyodizel oranının artmasıyla birlikte NOx miktarı da dizel yakıtı göre artmaktadır. Ayrıca NOx konsantrasyonu yükü birlikte lineer bir şekilde artmıştır. NOx oluşumu üzerinde en önemli faktör, yüksek sıcaklık altında O₂'nin N ile kolayca reaksiyona girmesidir. Yükün artışıyla birlikte hava/yakıt karışım oranı artması ve yanma odasının ortalama gaz sıcaklığının artışı, sıcaklığa karşı hassas olan NOx oluşum mekanizmasını tetiklemiş ve NOx miktarını artırmıştır.

NOx seviyesi direkt olarak EGS ile alakalı olup, deney yakıtlarına ait EGS ölçümlerimiz de bu durumu doğrulamaktadır. Ayrıca CO ve is değerleri ise NOx emisyonu ile ters orantılıdır bu durumda elde ettiğimiz sonuçları doğrular niteliktedir.

Literatür kaynakları da elde ettiğimiz sonuçları doğrular veriler ortaya koymuş olup biyodizelin NOx emisyonunun dizele nazaran yüksek olmasının sebebini, D-2' ye nazaran saf biyodizelin % 12 civarında fazla olan oksijen içeriği ve yanma odasındaki yüksek gaz sıcaklığı ile açıklamışlardır (Nabi vd., 2009; Özsezen vd.,2009; Lin vd., 2009; Labeckas ve Slavinskas, 2006) Birçok araştırmacı biyodizel içeriği arttıkça NOx miktarının arttığını bildirmişlerdir (Gumus ve Kasifoglu, 2010; Godiganur vd., 2010; Lertsathapornsuka vd., 2008; Lujan vd., 2009). NOx miktarında motor yükü önemli bir rol oynamakta olup, yükün artmasıyla NOx miktarı artmıştır. Bunun sebebi olarak yüksek yanma sıcaklıklarına daha yüksek yüklerde ulaşılmasına bağlamışlardır (Sharma vd., 2009; Godiganur vd., 2009; Godiganur vd., 2010)

Yük arttığı için hava/yakıt oranları artmış buda yanma odasında ortalama gaz sıcaklığını artırarak, sıcaklık artışına hassas olan NOx oluşumunu kolaylaştırarak artırdığını ifade etmişlerdir (Deshmukh vd.,2009; Zhu vd., 2010; Raheman ve Ghadge, 2007).

4.2.10. Kaplanmış Motor NOx Ölçümleri

Kaplanmış motora ait NOx emisyon değerlerini normal motora ait değerlerle kıyaslırsak; grafiklerden de görüldüğü gibi genel olarak tüm yakıt türleri ve tüm yük değerleri altında NOx emisyon değerleri normal motora göre bir artış sergilemiştir. Normal motorda olduğu gibi kaplanmış motorda da düşük yükten yüksek yüke çıkıldığında NOx emisyonları genel olarak bir artış eğilimi göstermiştir. Biyodizel yakıt ve karışımları tüm yük değerleri altında D-2 yakıttan daha yüksek NOx emisyon değerleri sergilemiştir. Biyodizel karışım oranları arttıkça buna bağlı olarak NOx emisyon değerleri de bununla orantılı olarak artmıştır. Yani kısaca ifade etmek gerekirse kaplanmış motorda elde edilen tüm değerler sonuçları açısından normal motorla paralellik göstermiştir. En önemli fark ise kaplanmış motorun NOx emisyon değerlerinin normal motordan belirgin bir şekilde yüksek çıkması şeklinde özetlenebilir.

Kaplanmış motora ait NOx emisyon değerlerini normal motorda elde edilen değerlerle yakıt türleri açısından değerlendirecek;

D-2 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %55, I.yük altında %51, II. yük altında %25, ve III. yük değeri altında ise % 11 daha fazla NOx emisyonu üretmiştir.

FYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %51, I.yük altında %36, II. yük altında %11, ve III. yük değeri altında ise % 32 daha fazla NOx emisyonu üretmiştir.

FYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %48, I.yük altında %31, II. yük altında %11, ve III. yük değeri altında ise % 31 daha fazla NOx emisyonu üretmiştir.

FYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %26, I.yük altında %31, II. yük altında %48, ve III. yük değeri altında ise % 32 daha fazla NOx emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtlarının normal motora göre NOx emisyonlarındaki artış yüzdeleri sırasıyla % 11- %32-%31-%32 olarak gerçekleşmiştir.

Aynı değerlendirmeyi KYME yakıt ve karışımları için yapacak olursak;

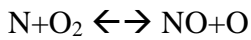
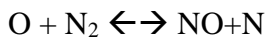
KYME-20 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %55, I.yük altında %15, II. yük altında %17, ve III. yük değeri altında ise % 37 daha fazla NOx emisyonu üretmiştir.

KYME-50 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %50, I.yük altında %14, II. yük altında %16, ve III. yük değeri altında ise % 35 daha fazla NOx emisyonu üretmiştir.

KYME-100 yakıt için: kaplanmış motor, normal motora göre boşta çalışırken %57, I.yük altında %12, II. yük altında %10, ve III. yük değeri altında ise % 37 daha fazla NOx emisyonu üretmiştir.

Kaplanmış motora ait III. yük değerini referans yük değeri olarak kabul edersek D-2 yakıt, KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtlarının normal motora göre NOx emisyonlarındaki artış yüzdeleri sırasıyla % 11- %37-%35-%37 olarak gerçekleşmiştir.

NOx yeterli sıcaklık altında N₂ ve O₂ nin zincirleme reaksiyonu altında oluşur. Oksijen konsantrasyonu ve çevredeki sıcaklık NOx oluşumundaki anahtar faktörlerdir. NOx oluşum kinetikleri oksijenin bulunabilirliğine göre Zeldovich kinetik mekanizması ile ifade edilmiştir. NOx oluşum reaksiyonun önemini ilk kez 1946 yılında Zeldovich tarafından öne sürülmüştür ve Zeldovich kinetiği olarak adlandırılmıştır (Chindaprasert vd., 2004).



TYM motorlara ait NOx emisyonları yüksek yanma sıcaklığı ve uzun yanma sürecinden dolayı normal motorlara göre oldukça yüksektir. Bununla birlikte motor yükü, hızı, yanma odası içeriği, homojenite ve karışım yoğunluğu da NOx oluşumuna etki eden önemli parametrelerdir.

Biyodizel yakıtlar her iki tip motorda da normal motora göre daha yüksek NOx emisyon değerleri göstermiştir. Bunun temel sebebi yapılarında mevcut olan oksijenin varlığıdır (Hazar, 2011;Modi ve Gosai, 2010; MohamedMusthafa vd., 2011; Pradeep Kumar vd., 2012; Rajendra vd.,2010).Yüksek hızlarda NOx yüksek sıcaklığa rağmen düşük olmasının

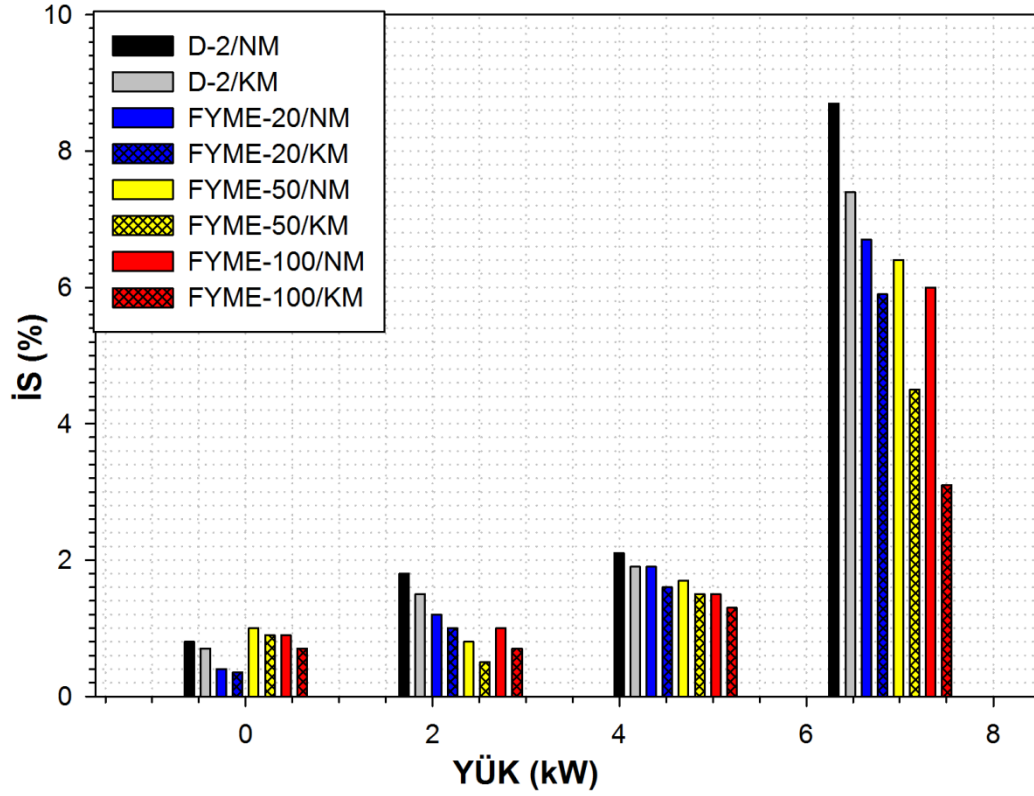
sebebi NO_x oluşumu için yeterli zamanın olmaması şeklinde açıklanmıştır (Hazar, 2010).TYM motorda ki silindir içi yüksek sıcaklık ve biyoyakıtlarda ki yüksek oksijen içeriği NO_x emisyonunu artırmıştır. Motor hızının artmasıyla birlikte motor içinde daha homojen bir hava/yakıt karışım oranı sağlanmıştır ve böylece yüksek hızlarda NO_x emisyonu artmıştır (Aydın, 2012; İşcan ve Aydın, 2012; Prasad vd., 2000). Yalıtımlı motorda NO_x ile ilgili olarak emisyon miktarı artmıştır. Buda artan sıcaklıktan kaynaklandığı bildirilmiştir (Haşimoğlu vd., 2008).

4.2.11. Normal Motor İs Ölçümleri

Çoğunlukla dizel motorlarda oluşan bir emisyon türüdür. Kirlenici bileşenlerin oluşumu yanma olayına bağlıdır. Gerçek hava/yakıt oranı (H/Y), teorik tam yanma değerinden büyük olmasına rağmen silindir içindeki yakıt damlacıkları çevresinde yeterli hava bulamamaktadır. Bu da eksik yanma ürünü olan isin (karbon parçacıklarının) oluşmasına neden olmaktadır. İs'in yapısı, alevdeki yerine göre kimyasal ve fiziksel olarak değişmektedir (Boran, 2001). Turboşarj ile, doğal emişli bir motora göre çok daha fazla hava silindir içerisine alınabildiğinden PM emisyonları azalmaktadır (Russell vd., 2000).

Aşağıda normal ve kaplanmış motora ait is emisyon grafikleri Şekil 4.21 ve Şekil 4.22. incelendiğinde tüm test yakıtlarında yükün artmasıyla birlikte is emisyonu artmıştır. Tüm yakıtlar arasında en düşük is emisyon değerleri biyodizel ve karışım yakıtlarına aittir. Tüm yük değerleri altında en yüksek is emisyon değeri D-2 yakıtta ölçülmüştür. Biyodizel yakıtlarda karışım oranı arttıkça is emisyon değerleri genel olarak azalma eğilimindedir. Biyodizel karışım yakıtlar arasında ise en düşük is değerleri %100 biyodizel yakıtlarda görülmüştür.

Normal motorla kaplanmış motor kıyaslandığında ise kaplanmış motora ait is değerleri normal motora göre tüm yüklerde ve tüm yakıt türleri için düşük çıkmıştır. Kaplanmış motorda ölçülen is emisyon ölçümlerindeki sonuçlar normal motorla paralel seyretmiş fakat orantısız olarak düşük çıkmıştır.

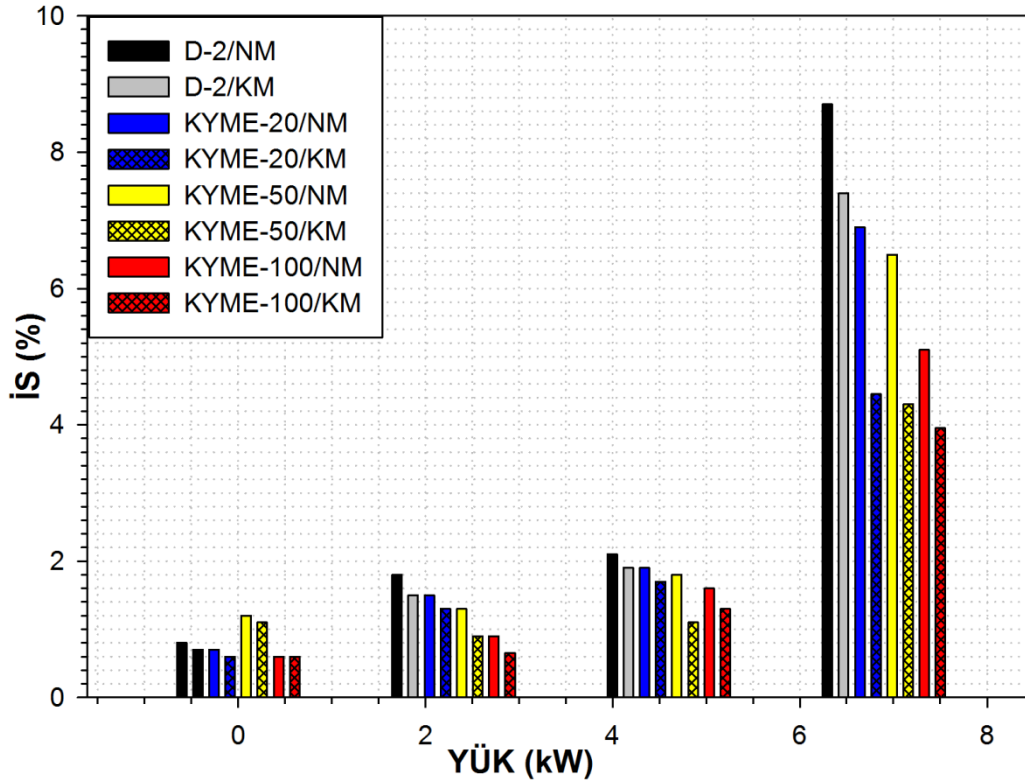


Şekil 4.21. KM ve NM’de FYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait İS emisyon ölçüm değerleri

Yukarıda Şekil 4.21.’deki grafik FYME yakıt ve karışımlarının D-2 yakıtına göre kaplanmış ve normal motorda göstermiş olduğu İS emisyon değerleri görülmektedir.

Normal motor için farklı yük değerleri altında FYME yakıtlarının is emisyon değerleri D-2 yakıtına göre mukayese edilirse; motorun boştaki çalıştığı anda D-2, FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtlarının ürettiği İS değerleri sırasıyla % 0,8- 0,4,-1 ve 0,9 dur. Motorun 1. yük değeri altında D-2, FYME-20, FYME-50, FYME-100 yakıtlarının ürettiği İS değerleri sırasıyla % 1,8- 1,2- 0,8 ve 1 dir. 1. yük değeri için D-2 ye göre düşüş yüzdeleri sırasıyla 34-56 ve 45 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 2. yük değeri altında ürettiği İS değerleri sırasıyla % 2,1- 1,9- 1,7 ve 1,5 dir. D-2’ye göre % düşüş miktarları sırasıyla %7, 15 ve 25 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 3. yük değeri altında üretilen İS değerleri ise sırasıyla % 8,7- 6,7- 6,4 ve 6 olup D-2 ye göre yüzde düşüş miktarları ise sırasıyla % 23, %27 ve %31 olarak gerçekleşmiştir.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi FYME ve karışımları için is emisyon değerlerindeki en fazla düşüş miktarları FYME-100 yakıtları için gerçekleşmekte olup ortalama olarak % 30'dur. Karışım oranı ile is emisyon değerleri arasında ters bir orantı söz konusu olup biyodizel karışım oranı arttıkça is emisyon değerleri azalmaktadır. Motorun 3. yük değeri altındaki is değerleri incelendiğinde bu durum net bir şekilde görülmekte olup; FYME-20-50-100 karışımları için is değerleri (%) sırasıyla 6,7-6,4 ve 6 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.22. KM ve NM'de KYME yakıt karışımları ve D2 yakıtına ait İS emisyon ölçüm değerleri

Şekil 4.22.'de KYME yakıt ve karışımlarının D-2 yakıtına göre kaplanmış ve normal motorda göstermiş olduğu is emisyon değerleri görülmektedir.

Normal motor için farklı yük değerleri altında KYME yakıtların is emisyon değerleri D-2 yakıtına göre mukayese edilirse; motorun boştaki çalıştığı anda D-2, KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtların ürettiği is değerleri sırasıyla % 0,8 - 0,7 -1,2 ve 0,6'dır. Motorun 1. yük değeri altında D-2, KYME-20, KYME-50, KYME-100 yakıtların ürettiği is değerleri sırasıyla % 1,8- 1,5- 1,3 ve 0,9'dur. 1. yük değeri için D-2 ye göre % düşüş miktarları sırasıyla 17-28 ve 50 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 2. yük değeri altında ürettiği is değerleri sırasıyla % 2,1- 1,9- 1,8 ve 1,6 dır. D-2'ye göre % düşüş miktarları sırasıyla % 10, 15 ve 25 olarak gerçekleşmiştir. Motorun 3. yük değeri

altında üretilen is değerleri ise sırasıyla% 8,7- 6,9- 6,5 ve 5,1 olup D-2 ye göre yüzde düşüş miktarları ise sırasıyla % 21, 26 ve 42 olarak gerçekleşmiştir.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi KYME ve karışımları için is emisyon değerlerindeki en fazla düşüş miktarları KYME-100 yakıtları için gerçekleşmekte olup ortalama olarak % 39'dur. Karışım oranı ile is emisyon değerleri arasında ters bir orantı söz konusu olup karışım oranı arttıkça is emisyon değerleri azalmaktadır. Motorun 3. yük değeri altındaki is değerleri incelendiğinde bu durum net bir şekilde görülmekte olup; KYME-20-50-100 karışımları için is değerleri (%) sırasıyla 6,9- 6,5 ve 5,1 olarak ölçülmüştür.

Genel olarak bir değerlendirme yapmak gerekirse; tüm yük değerleri altında en düşük is değerleri biyodizel ve karışımlarına aittir. Yükün artmasıyla birlikte tüm test yakıtları için is değerleri artmıştır. Bu durum biyodizelin kimyasal olarak zengin oksijen moleküllerinin yanmanın verimini artırdığı düşünülmektedir. İS yakıtça zengin bölgelerde, yüksek sıcaklıkta, yüksek basınçta özellikle yakıt spreyinin çekirdek bölgesinde meydana geldiği bildirilmiş olup (Barie ve Humke, 1981;Scholl ve Sorenson,1993; Yoshiyuki vd., 2000). Yakıt oksijen ile yüklenirse aşırı zengin bölgelerde azalma meydana gelerek ilk is oluşumu sınırlanır. Ayrıca silindirlere püskürtülen yakıt demetinin merkezindeki lokal zengin karışım bölgelerindeki oksidasyon, biyodizelin yapısındaki oksijen ile iyileştiğinden duman koyuluğunda azalma olmaktadır. Bunun haricinde biyodizel yakıtların normal dizel yakıtta göre daha düşük olan C içeriği de is oluşumundaki azalmanın sebebi olduğu düşünülmektedir. Yükün artmasıyla birlikte tüm test yakıtları için is değerleri artmıştır. Bunun sebebi yüksek yüklerde yükün artmasıyla hava/yakıt oranının azalmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek yüklerde çok miktarda yakıt yanma odasına püskürtülür ve bunların bir kısmı yanmadan egzozdan atılır (Sukumar Puhana vd., 2005; Selvam ve Vadivel, 2012; Baiju vd.,2009; Sukumar Puhana vd., 2007; Raheman ve Ghadge, 2007). Literatürde genellikle biyodizelin is değerleri normal dizel yakıttan daha düşük çıkmıştır (Puhan vd., 2005; Qi vd., 2009; Özsezen vd.,2009; Lujan vd., 2009; Ulusoy vd., 2004; Sahoo vd., 2009).

Biyodizel karışım oranı arttıkça is oranı düşmüştür. Birçok araştırmacı daha düşük çıkan is miktarını biyodizelde mevcut oksijene, oksijenin tam yanmaya yardımcı olmasına bağlamışlardır. (Frieters ve Baert, 2006), yaptıkları bir çalışmada 14 çeşit biyodizel karışımını oksijen içerikleri bakımından incelemiş ve oksijen miktarı ile is miktarı arasında kuvvetli bir bağ kurmuştur. Bir kısım araştırmacı biyodizel yakıtların yanma veriminin artması yüksek setan sayısının bir sonucu olduğunu bildirmişlerdir. Biyodizel yakıtların

yüksek yoğunluk, viskozite ve düşük sıkıştırılabilirliği ile birlikte enjeksiyon başlangıcının iyileşmesi is partikülünün yüksek sıcaklık ortamında kalma süresini artırdığı için ve ayrıca oksijence zengin ortamın oksidasyonu iyileştirmesi is miktarını azaltmıştır (Kim vd., 2010; Özsezen vd.,2009; Lapuerta (b) vd., 2008).

4.2.12. Kaplanmış Motor İS Ölçümleri

Kaplanmış motor ile normal motoru tüm yakıt türleri açısından is emisyonlarını kıyaslama yapmak gerekirse; motorun 3. yük değerini referans alarak değerlendirirsek Dizel yakıt için kaplanmış motor normal motordan % 15, FYME-20 %12, FYME-50 %30, FYME-100 %49, KYME-20 %35, KYME-50 %34, KYME-100 ise % 23 daha düşük is değeri sergilemiştir. İS içten yanmalı motorlarda eksik yanma sonucu oluşan bir emisyonudur. İS opasitesi motor yükünün artmasıyla birlikte artar çünkü motoru çalıştırmak için gerekli yakıt miktarı da artmıştır. Biyodizel ve karışım yakıtları yapılarında mevcut fazla oksijenden dolayı is emisyonları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

Kaplamadan dolayı silindir duvarı ve gaz sıcaklığı arttığı için is yoğunluğu TYM motorlarda azalmıştır (MohamedMusthafa vd., 2011;Rajendra vd.,2010; Janardhan vd., 2013; MohamedMusthafa vd., 2012).

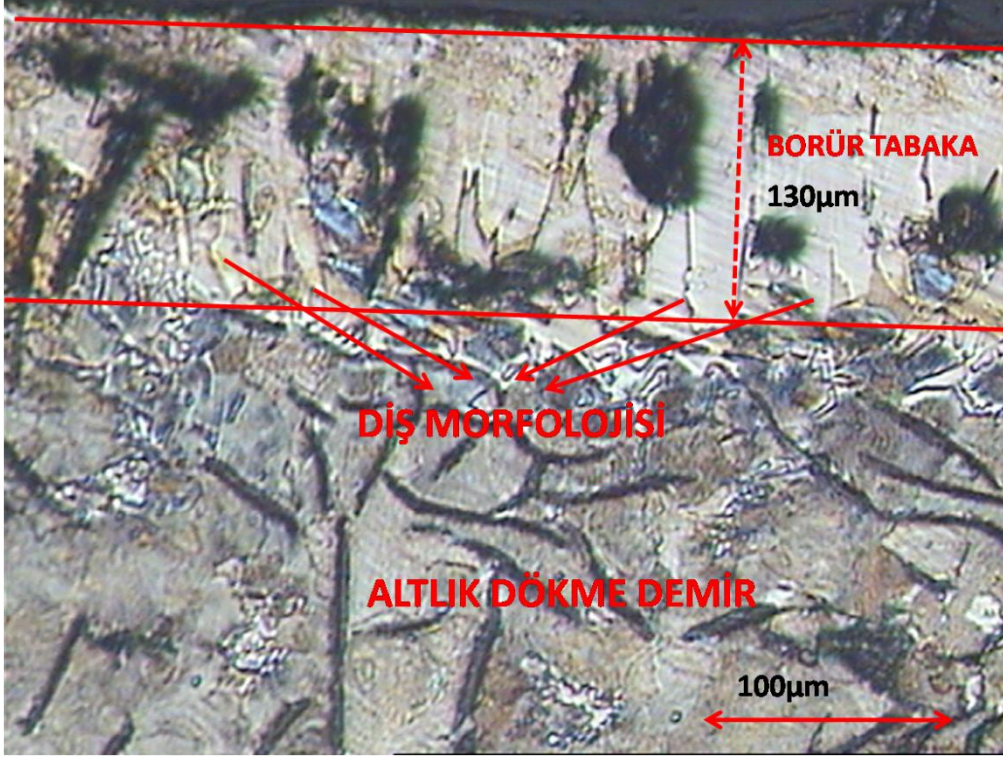
İS emisyonları yük miktarı arttıkça artmaktadır. Yüksek yüklerde is emisyonunun artmasının düşük yanma verimi, zengin karışım ve yanma için yetersiz zamandan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çünkü her bir çevrimde püskürtülen yakıt artarken içeri giren hava yetersiz gelmektedir. TYM motorda ise yüksek sıcaklık ve basınç etkisiyle oluşan yoğun türbülansın daha fazla C'yi reaksiyona soktuğu diğer taraftan TYM'nin yüksek sıcaklığı sayesinde biyodizelin zayıf olan atomizasyonu ve buharlaşabilirliğinin iyileştiği ve böylece is emisyonu azalttığı düşünülmektedir. Benzer sonuçları ve değerlendirmeleri destekleyen çalışmalar literatürde mevcuttur (Rajan ve Kumar, 2011; Janardhan vd., 2013; Rajendra vd.,2010).

4.3. Yüzey Analiz Sonuçları ve Değerlendirmeler

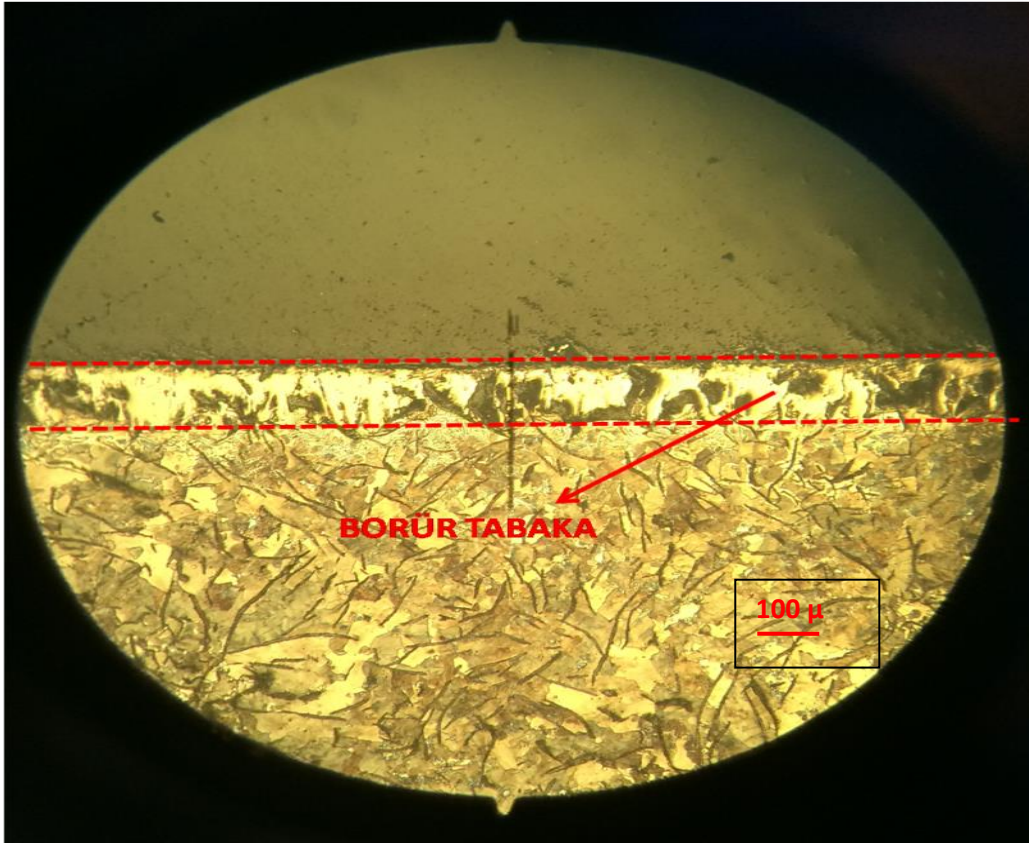
Numunelere, yüzey inceleme öncesi zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri uygulanmıştır. Yüzey; optik mikroskop, taramalı mikroskop (SEM), EDAX ve XRD ve yüzey pürüzlülük analizlerine tabi tutulmuştur. Bu incelemelerle birlikte yüzeyde meydana gelen değişim ve oluşumlar gözlenmiş ve ölçülmüştür. Makro ve mikro değişimler, yüzeyde meydana gelen borür tabaka ve bu tabakanın kalınlık, yüzey pürüzlülük değerleri kayıt altına alınmıştır.

4.3.1. Optik Mikroskop Analizi

Borlama işlemi sonrası numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama işlemleri yapılarak analize hazır hale getirilmiştir. Bununla ilgili detaylı teknik bilgi materyal ve metod kısmında anlatılmıştır. Aşağıda Şekil 4.23. ve Şekil 4.24.'de borlanmış gri dökme demire ait optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır. Her iki Şekilde de görüldüğü gibi yüzeyde oluşan borür tabaka net bir Şekilde görülmektedir. Borür tabakaya ait dış şekline ki karakteristik morfoloji dikkat çekmektedir. Borür tabaka içerisinde koyu tonda dağınık yapıda görülen C ve Si elementleri dikkat çekmektedir. Bu elementler bor difüzyonu ile yüzey altına itilen dökme demir içerisindeki alaşım elementleridir. Tabaka kalınlığı ölçüldüğünde ortalama 130-150 µm olduğu görülmüştür. Altlık olan dökme demir yapı homojenliğini korumuş ve gri dökme demire ait lamel grafitler dikkat çekmektedir. Literatür verileri de elde etmiş olduğumuz görüntü morfolojisini doğrulamaktadır (Bhushan ve Gupta, 1991).



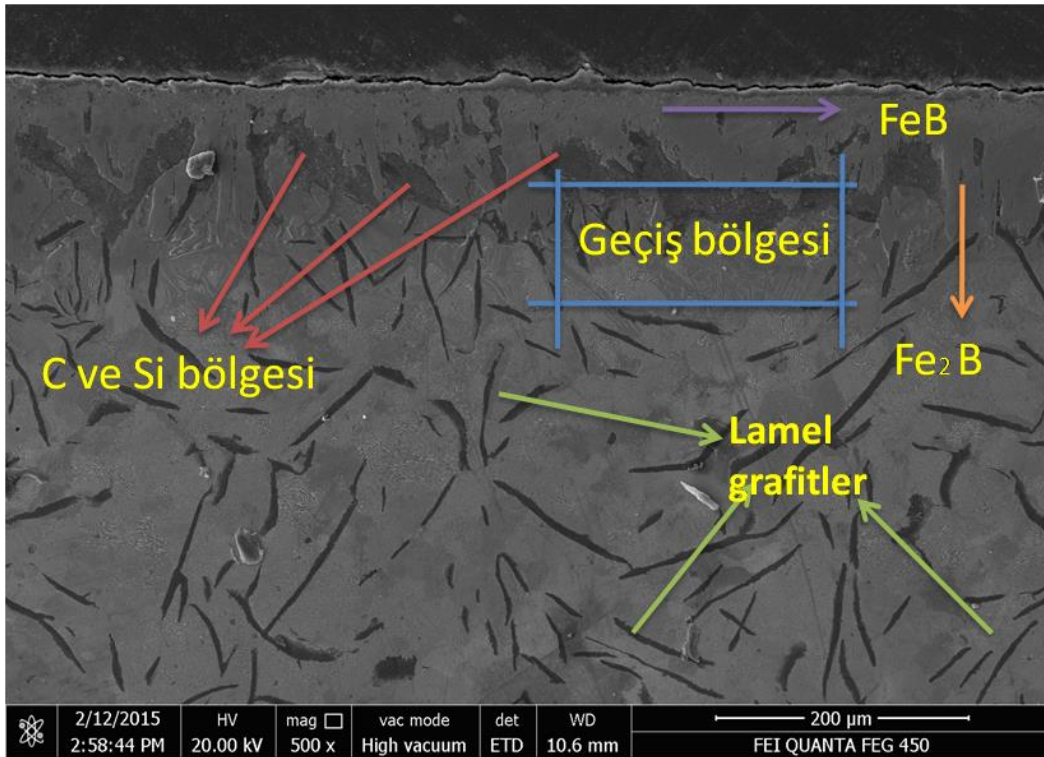
Şekil 4.23. Borlanmış dökme demire ait optik mikroskop görüntüsü-1



Şekil 4.24. Borlanmış dökme demire ait optik mikroskop görüntüsü-2

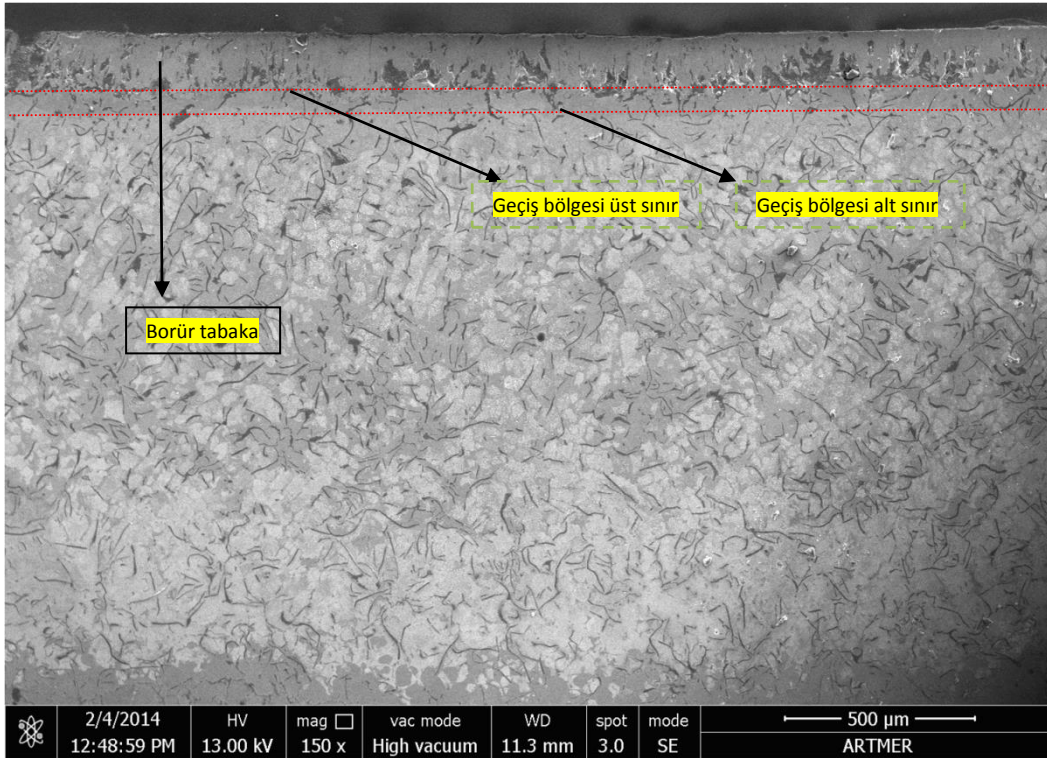
4.3.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) Analizi

Aşağıda Şekil 4.25.'de borlanmış gri dökme demir numuneye ait taramalı mikroskop(SEM) görüntüsü yer almaktadır. Resimde de görüldüğü gibi dökme demirde borlama sonrası oluşan ve literatürde adı geçen tüm fazların, bölgelerin ve elementlerin ve teknik terimlerin karşılığı yer almaktadır. En üstten başlanırsa FeB tabakası, hemen altında Fe₂B tabakası borlama ile bor difüzyonu ile yüzey altına itilen ve dökme demir kimyasal bileşiminde yoğun şekilde görülen C ve Si yoğunluklu bölgeler ve bu yapının hemen altında ise geçiş bölgesi diye adlandırılan bölge ve en altta ise tipik dökme demire ait lamel grafitler görülmektedir. Fe₂B'nin testere dişini andıran ve dökme demirin içine işleyen morfolojisi dikkat çekmektedir. Literatürdeki yüzey morfolojine ait teknik bilgilerde elde ettiğimiz bulguları doğrulamaktadır (Chatterjee ve Fischer 1981; Dearnley ve Bell, 1985; Galibois vd., 1980).



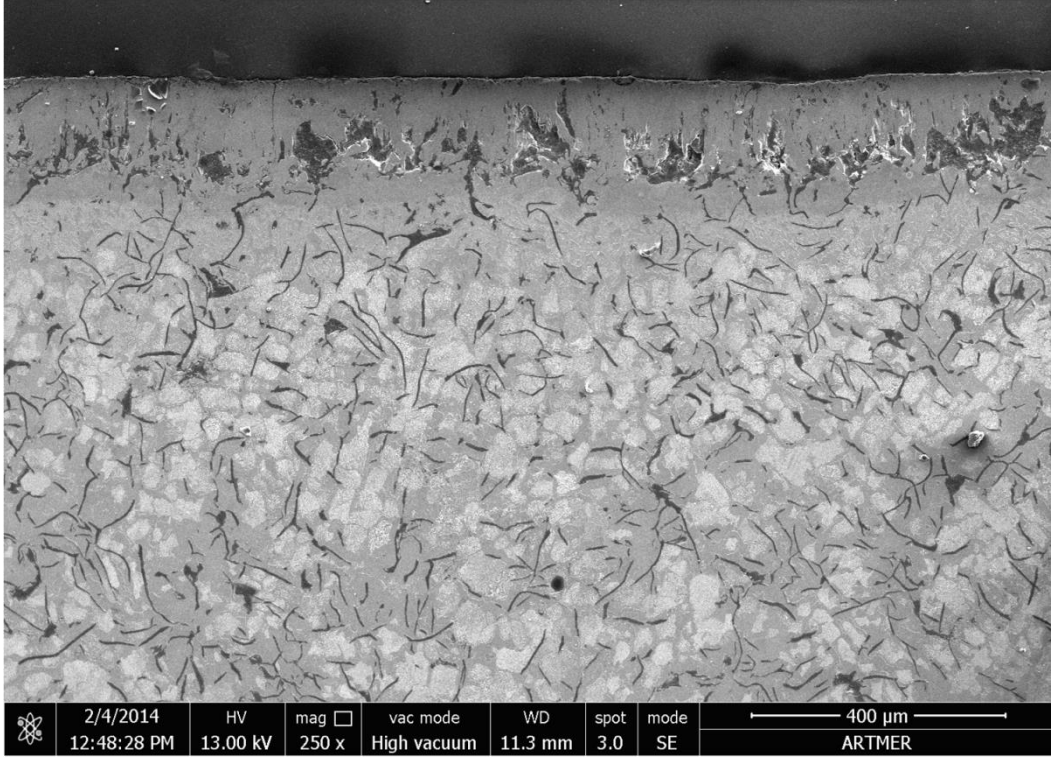
Şekil 4.25. Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü

Aşağıda Şekil 4.26-29’da borlanmış dökme demire ait sırasıyla 150, 250, 500 ve 1000x SEM görüntüleri yer almaktadır. Görüntülerden de anlaşıldığı gibi dökme demir yüzeyinde oluşan borür tabaka net bir şekilde görülmektedir. Ortalama borür tabaka kalınlığı 130-150µm civarındadır. Şekil 4.26. ve Şekil 4.27.’de borür tabaka altında karakteristik lamel grafitli dökme demir morfolojisi kendini göstermektedir. Borür tabaka bitişi ve dökme demir yapısı arasında literatür verileriyle uyumlu (Matuschka,1980; Bozkurt,1984) ton farkıyla kendini gösteren geçiş bölgesi net bir şekilde görülmektedir.

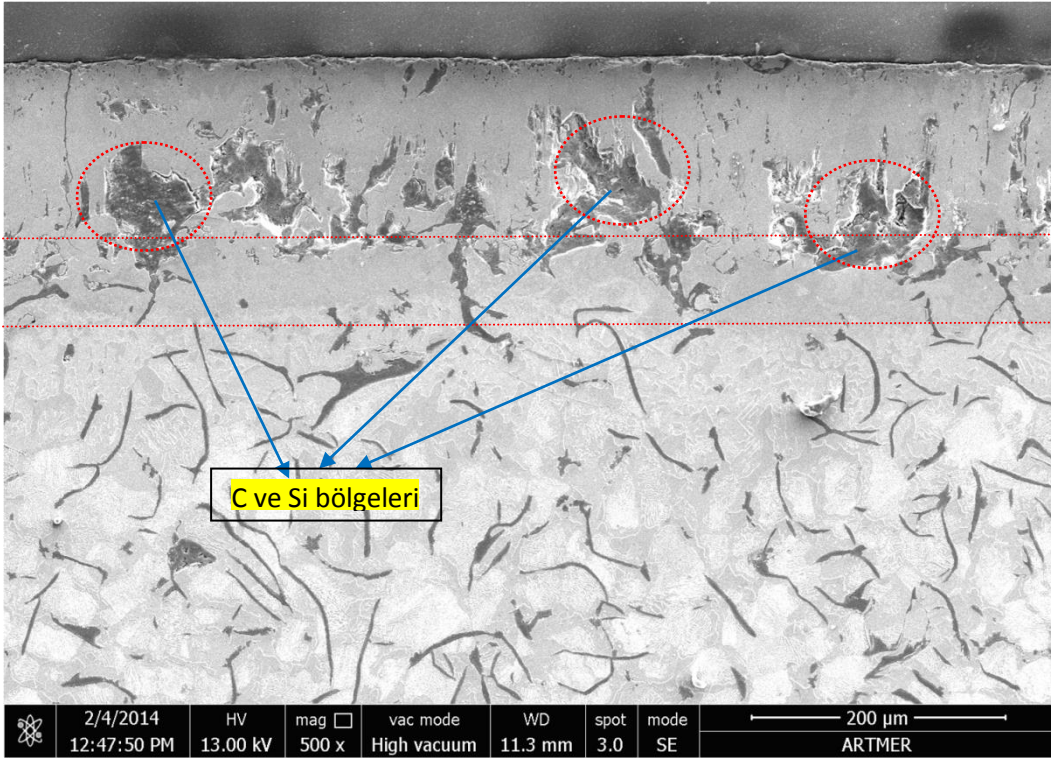


Şekil4.26. Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü (x150)

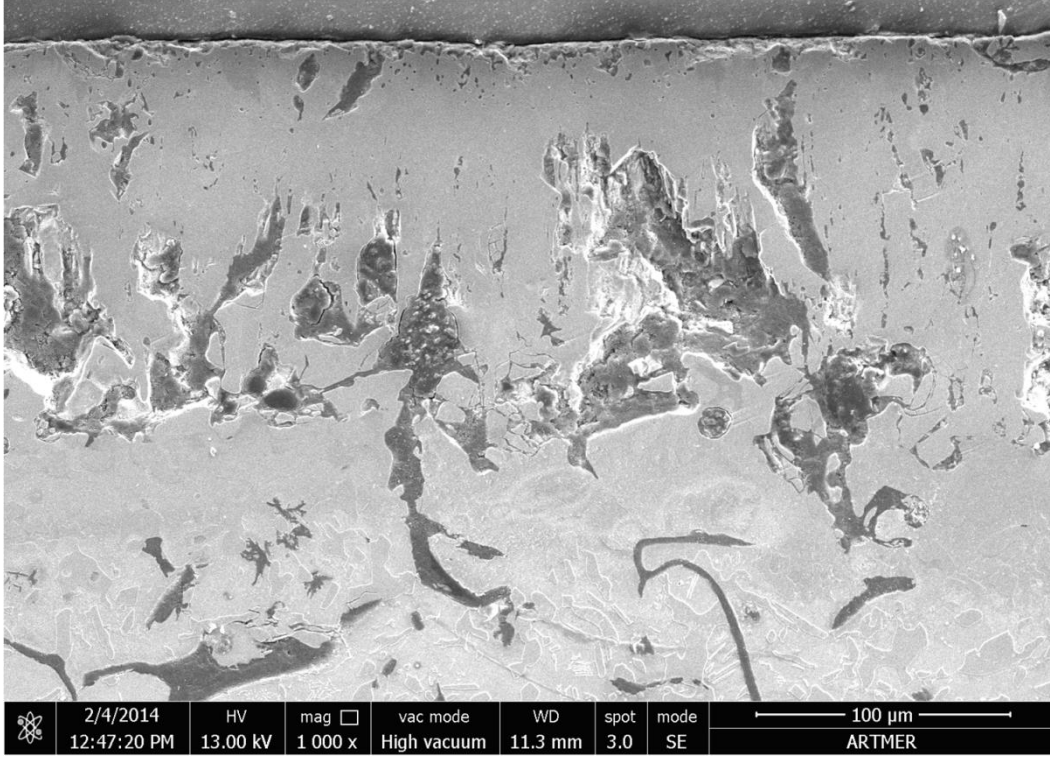
Şekil 4.28. ve Şekil 4.29’da ise borür tabakaya ait mikro yapı net bir şekilde ortaya çıkmıştır. Testere dişini andıran ve geçiş bölgesine kolonsal şekilde uzanan yapı dikkat çekmektedir. Bu mikro yapı (Matuschka, 1980) tarafından sınıflandırılan FeB ve Fe₂B fazlarını barındıran yapıyla örtüşmektedir. Özellikle Şekil 4.28.’de borlama ile yüzey altına itilen ve karbon ve silisyumca zengin koyu renkte bölgeler dikkat çekmektedir. Bu yapılar dökme demirin yapısında mevcut ve elementler olup bor atomlarının yüksek sıcaklık altında yüzeye difüzyonu ile aşağı doğru itilen elementlerdir. C ve Si elementleri Şekil 4.29.’da da gösterilmiştir. Bu elementlerin üzerinde yer alan borür tabakanın homojenliği dikkat çeken diğer bir ayrıntıdır. Böylece başta amaçlanan yüzeyde bor bakımından zengin yapının oluştuğu net bir şekilde söylenebilir.



Şekil 4.27. Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü (x250)



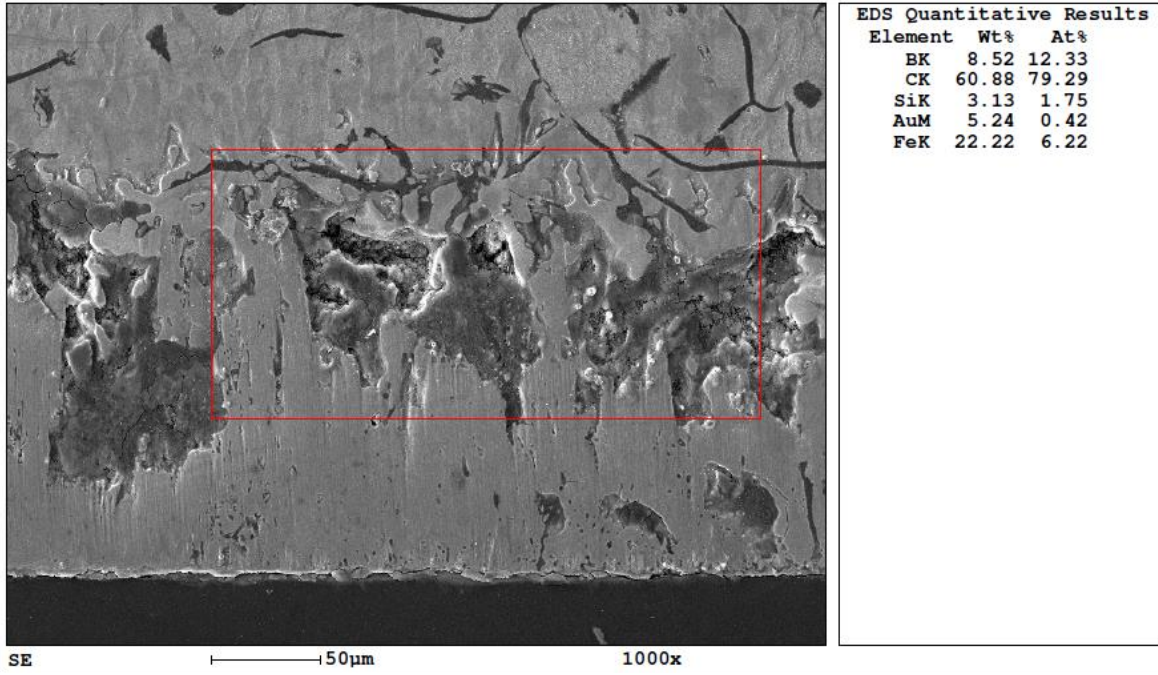
Şekil 4.28. Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü (x500)



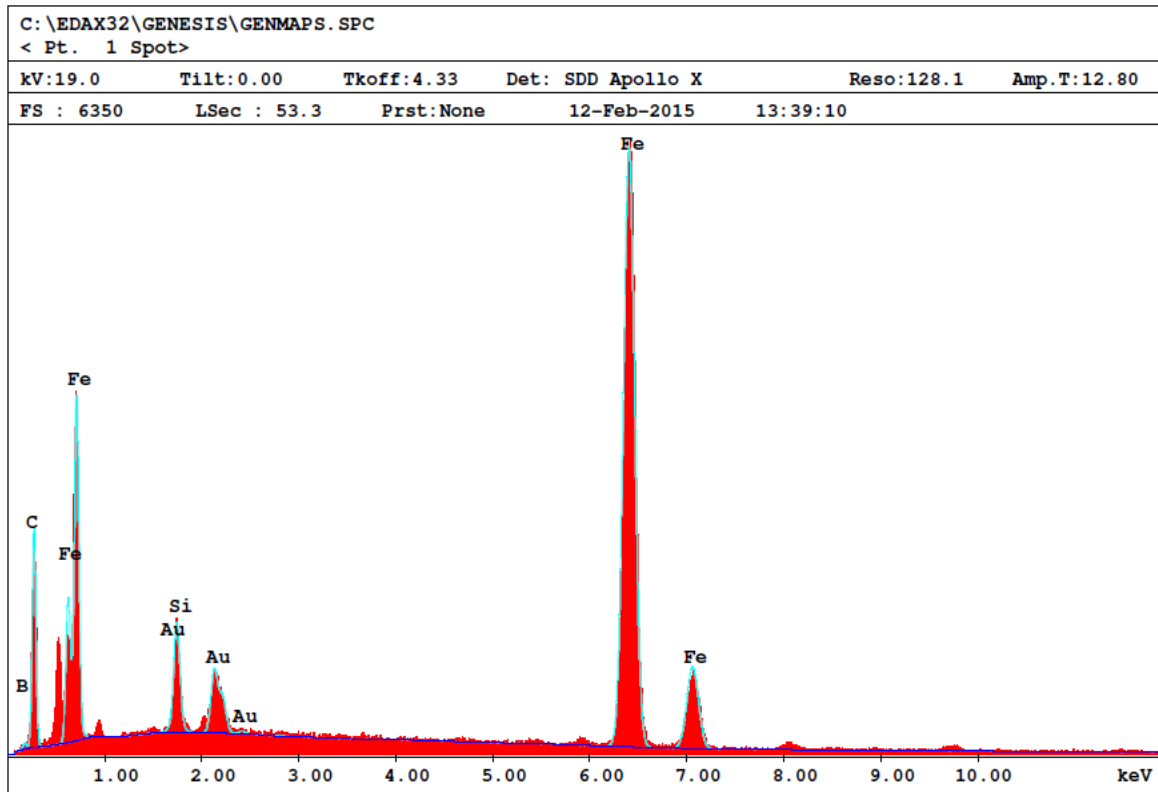
Şekil4.29. Borlanmış dökme demire ait SEM görüntüsü (x1000)

4.3.3. Energy-Dispersive X-ray Spectroscopy (EDAX) Analizi

Borlanmış gri dökme demire ait EDAX analizine ait sonuçlar aşağıda Şekil 4.30. ve Şekil 4.31. de yer almaktadır. Şekil 4.30'da borlanmış dökme demire ait kesitten alınan ve sınırı kırmızı çizgi ile belirlenen mikro yapıdaki elementel analiz sonuçları görülmektedir. Analiz sonucundan da görüldüğü gibi mikro yapıda B, C, Si, Fe ve Au dikkat çekmektedir. Au elementi EDAX analizi yapılırken kullandığımız iletken bir malzeme olup esas yapı ile bir bağlantısı yoktur. Alanı kırmızı ile çizilen bölge; borlama işlemi ile bor atomlarının dökme demire ait alaşım elementlerini yüzey altına ittiği Karbon ve Silisyumca zengin olan bölgedir. Bu durum EDAX sonuçlarına da yansımış olup yüksek C ve Si miktarı ile de kendini göstermiştir. EDAX sonuçlarında dikkat çeken diğer bir hususta B'un ağırlık olarak % 8,52 çıkmış olmasıdır. Bu durum literatürde de ifade edilen (Matuschka,1980) ve sahip olduğu yüksek mekanik özelliklerinden dolayı tercih edilen Fe_2B fazının meydana geldiğini göstermiştir.



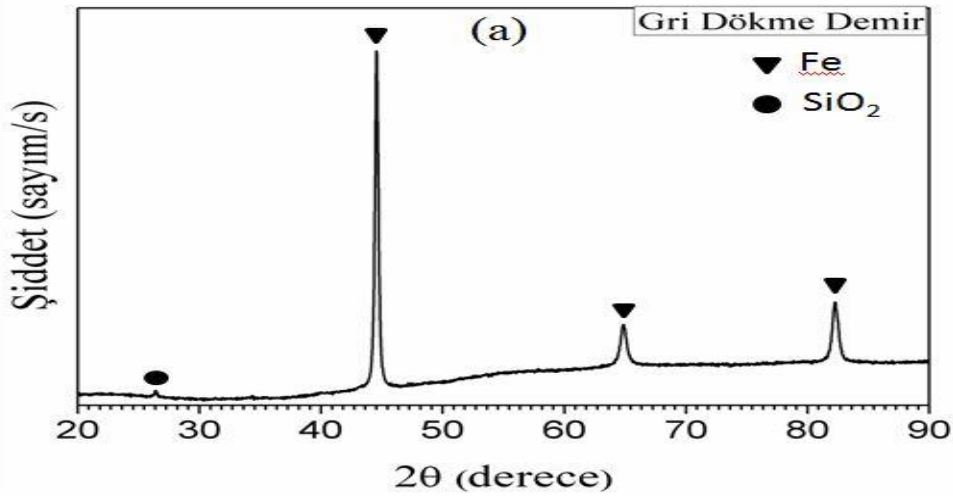
Şekil 4.30. Kesitten analize tabi tutulan bölge (EDS)



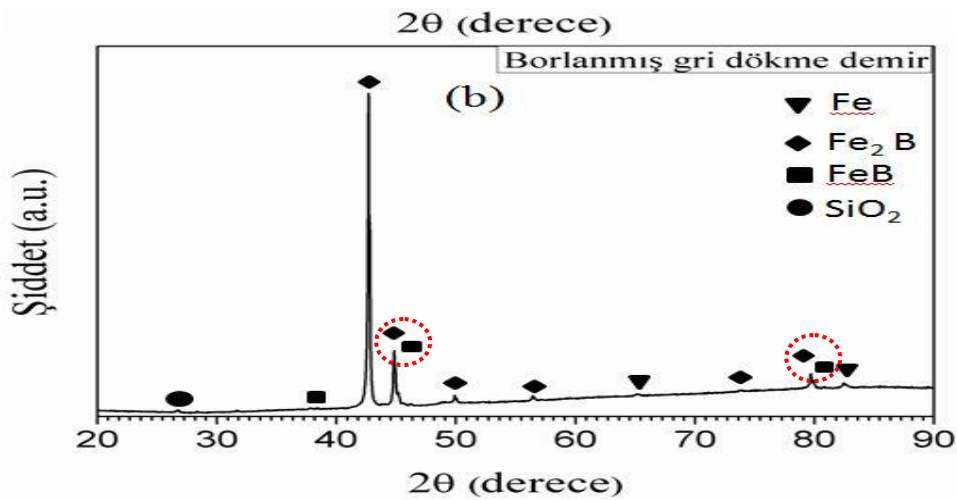
Şekil 4.31. EDAX analiz sonuçları

4.3.4. XRD Analizi

Borlama esnasında difüzyonla beraber bor atomları malzeme yüzeyinden içeri doğru ilerleyerek yapı içerisinde bor bileşikleri oluşturmaktadır. Meydana gelen bor bileşikleri tek fazlı (Fe_2B) veya çok fazlı bir yapı ($FeB + Fe_2B$) meydana getirmektedir. Fe-B denge diyagramında da görüldüğü gibi Fe-B ikili sisteminde ağırlık olarak; % 8.83'lük bor oranında Fe_2B ve % 16.23'lük bor oranında FeB , olmak üzere iki tür borür tabaka ve % 3,8 bor oranında ise ötektik oluşmaktadır (Matuschka, 1980). Yukarıda Şekil 4.25.'de borlanmış dökme demire ait SEM resminde oluşan borür tabakalar ifade edilmiştir. Bu kısımda ise kaplama tabakası içerisinde meydana gelen FeB ve Fe_2B faz yapılarını görebilmek için XRD analizi yapılmıştır. Aşağıda Şekil 4.32. ve 4.33.'de yapmış olduğumuz normal gri dökme demir ve borlanmış gri dökme demire ait XRD analiz sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.32. Gri dökme demire ait XRD analizi



Şekil 4.33. Borlanmış gri dökme demire ait XRD analizi

Şekil 4.32.'de normal dökme demire ait kimyasal kompozisyonu net bir şekilde göstermekte olup Fe elementinin pik yaptığı ve dökme demir kimyasal kompozisyonuna uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

Şekil 4.33.'de borlanmış dökme demire ait XRD Analiz sonuçlarına bakıldığında ise FeB ve Fe₂B bileşikler görülmektedir. Burada dikkat çeken husus Fe₂B bileşiğinin pik yapmış olmasıdır. Bu durum aslında beklenen bir sonuçtur, çünkü yüzeyi borlanmış silindir gömleği motor bloğuna yerleştirilmeden önce hassas honlama işlemine tabi tutularak % 2 yüzeyden ince talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem sayesinde borlanmış yüzeyde en üst tabakada oluşabilecek kırılğan FeB faz yüzeyden uzaklaştırılmıştır.

Borlanmış malzemenin tribolojik özellikleri borür tabakanın mikro yapısına bağlıdır. Fe₂B fazının üzerindeki FeB tabakası Fe₂B yüzeyinden uzaklaştırıldığında pürüzsüz temiz bir yüzey elde edilebildiğinden malzeme için faydalı olabilmektedir (Liliental vd., 1983). Yapmış olduğumuz honlama işlemi sayesinde en üstte oluşan FeB fazı yüzeyden uzaklaştırıldığı için daha temiz ve pürüzsüz olan Fe₂B fazı ortaya çıkmıştır. Borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşmaktadır. Bu tabaka metal-metal temasını geciktirmekte, katı yağlayıcı görevi yaparak sürtünme katsayısını düşürmektedir. Böylece segman-silindir gömleği ikili tribolojik sisteminde sürtünmeden dolayı meydana gelecek kayıpların önüne geçilmiştir.

Yüzeyin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlılığı, eleman çifti arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltmakta ve dolayısıyla aşınma dayanımını arttırmaktadır. Borlanmış yüzeylerin iyi aşınma özellikleri; borlanmış yüzeylerde daha az yağ kullanılmasını sağlamaktadır. Daha az yağ kullanılması ise ekonomik açıdan ve çevrenin korunması açısından önemlidir (Nair vd., 2000). Bu durum içten yanmalı bir motor için düşünüldüğünde ise sürtünmeden oluşacak kayıpların azalması ve motorun veriminin artması anlamına gelmektedir.

Diğer taraftan borlanmış tabakanın mikro sertliği önemli oranda borlanmış tabakanın kompozisyonuna ve yapısına bağlıdır. Tek Fe₂B fazı çift fazlı yapıdan daha yüksek aşınma direnci ve mekanik özellikler göstermektedir. En az aşınma Fe₂B fazında, en fazla aşınma ise daha sert (1800–2000 VSD) FeB fazının olduğu tabakada meydana gelmektedir. En yüksek aşınma dayanımının FeB içermeyen tabakalarda, yani sadece Fe₂B fazından oluşan tabakalarda elde edildiği deneylerle bulunmuştur (Karakan vd., 2002; (Matuschka,1980; Fichtl, 1983; Chatterjee ve Fischer 1981; Dearnley ve Bell, 1985; Galibois vd., 1980).

4.4. Nanoindentasyon Yöntemi ile Yüzey Sertlik Ölçümü ve Sonuçlar

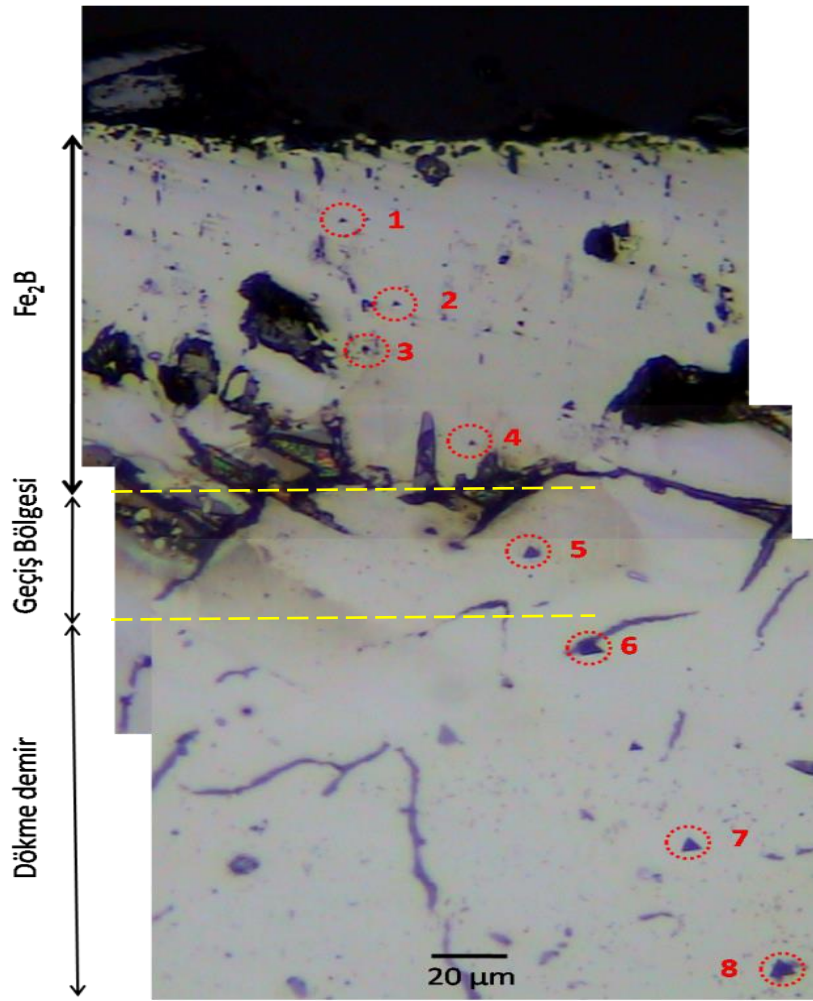
Borlanmış yüzeylerin en karakteristik özelliklerinden biride işlem sonrası yüzeyde oluşan yüksek sertlikte bir borür tabakasının oluşmasıdır. Borür tabakası işlem sıcaklığına, süresine ve borlanacak malzemenin cinsine göre ya tek fazlı (Fe_2B) veya çift fazlı ($FeB-Fe_2B$) bir yapıdan meydana gelebilmektedir. Çift fazlı yapılarda fazlar arasında genleşme katsayısı farkı olduğundan ilerde kırılmalara ve çatlamalara sebep olmaktadır. Bu nedenle endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla Fe_2B fazından oluşan borür tabakaların oluşması arzu edilmektedir.

Bu çalışmada uyguladığımız işlem şartları sayesinde tek fazlı Fe_2B fazını elde etmiş bulunmaktayız. Fe_2B fazına ait literatür çalışmaları (Chatterjee ve Fischer 1989; Kunst ve Schaaber, 1967) ve aşağıda borür fazlara ait mekanik özellikleri gösteren tablo 4.6.'da görülmekte olup elde ettiğimiz sonuçları doğrular niteliktedir.

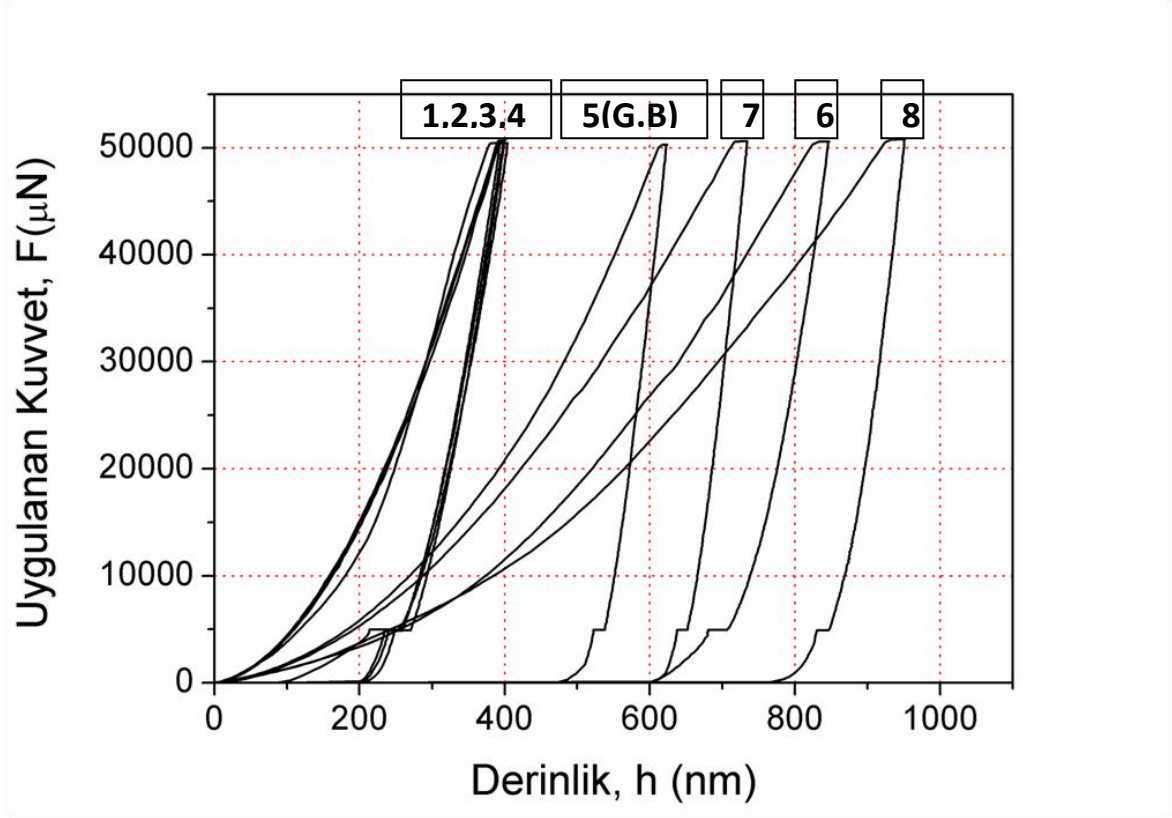
Tablo 4.6. Demir borürlerin fiziksel özellikleri (Chatterjee ve Fischer 1989; Kunst ve Schaaber, 1967).

ÖZELLİK	Fe₂B	FeB
Bileşim (%B ağı.)	8,83	16,23
Kafes yapısı ve	Tetragonal h.m	Ortorombik
Parametreleri (Å)	a=5,078 c=4,249	a=4,053 b=5,495 c=2,946
Teorik yoğunluk (g/cm³)	7,43	6,75
Ergime Noktası (C⁰)	1390	1550
Isıl iletkenlik katsayısı (W/cm. C⁰)	0,2-0,3	0,1-0,2
Isıl genleşme katsayısı		
Ppm/C⁰	7,65	23
200-600 C⁰	9,2	
100-800 C⁰		
Young Modülü(kg/mm²)	30000	60000
Özdirenç (20C⁰) (μohmcm)	38	80
Curie sıcaklığı (C⁰)	742	325
Mikro sertlik (GPa)	18-20	19-21
Elastisite Modülü (GPa)	285-295	590

Borlama sonrası dökme demir yüzeyinde oluşan borür tabakadaki Fe_2B fazı ve dökme demir yapının mekanik özellikleri nanoindentasyon yöntemiyle analiz edilmiştir. Şekil 4.34.'de nanoindentasyon analizinin yapıldığı bölgeler görülmektedir. Analizler sonrası yüzey üzerinde oluşan izler kesikli çizgiler ile belirtilmiştir. Görüldüğü üzere, 1, 2, 3 ve 4 numara ile belirtilen izler Fe_2B bölgesinde, 5 nolu iz geçiş bölgesinde (G.B), 6,7 ve 8 nolu izler ise dökme demir bölgesinde bulunmaktadır. Bilindiği üzere sertlik malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direncin bir ölçüsüdür. Bu bağlamda izlerin, Fe_2B bölgesinde oldukça küçük olması, dökme demir bölgesinde ise giderek büyümesi, Fe_2B fazının dökme demire göre daha sert olduğunun bir göstergesidir. Söz konusu bölgelerin mekanik özelliklerinin kantitatif değerlendirilmesi için nanoindentasyon testlerinden elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme (F-h) eğrileri Oliver-Pharr yaklaşımı ile analiz edilmiştir (Oliver ve Pharr, 1992).



Şekil 4.34. Nanoindentasyon analiz bölgeleri

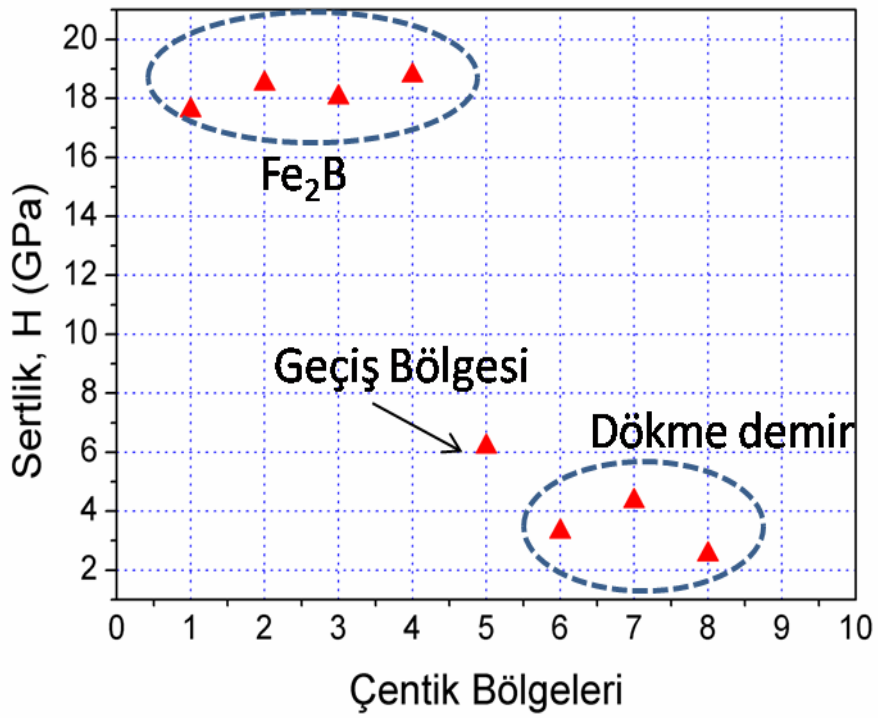


Şekil 4.35. Analiz bölgelerindeki izlere ait kuvvet-derinlik grafikleri

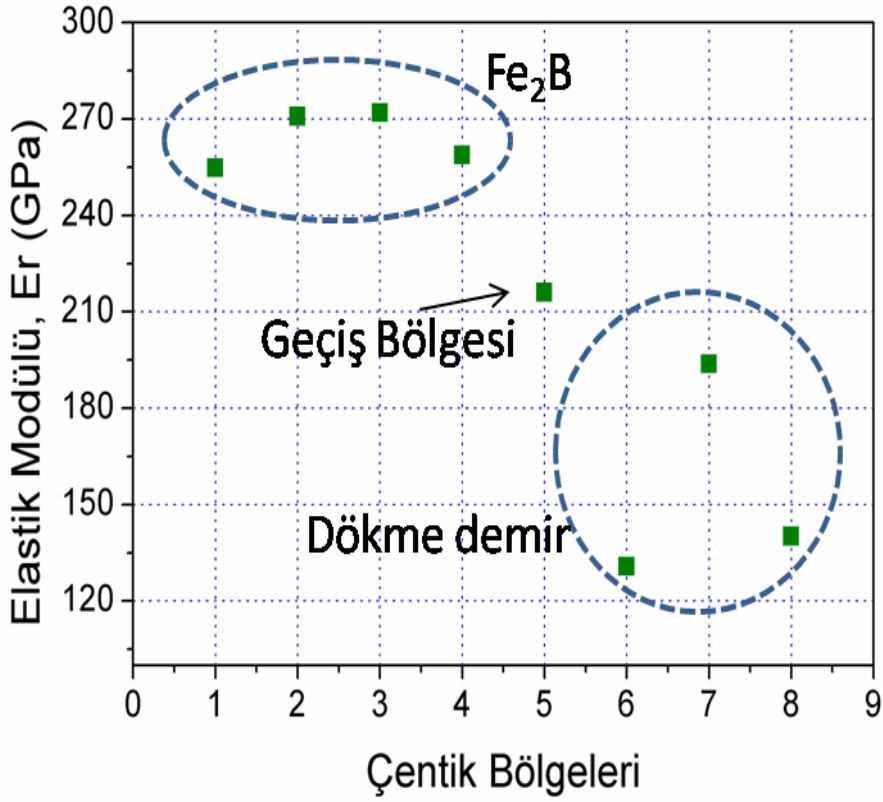
Şekil 4.35.'da sekiz ize ait F-h eğrileri verilmektedir. 1-4 nolu izlere ait F-h eğrilerinin üst üste binmesi, Fe₂B fazının her bölgede oldukça homojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda F-h eğrilerinin üst üste bindiği görülmekte ve homojen bir yapı olarak ifade edilmektedir (Yılmaz ve ark., 2013). Öte yandan dökme demir bölgesinde, F-h eğrilerinin farklı davranışlar sergilemesi, dökme demir bölgesinin homojen bir yapıya sahip olmadığını göstermektedir. Bu durumun dökme demir içerisindeki heterojen elementel (karbon ve silisyum) dağılımdan ve lamel grafitlerden kaynaklandığını düşünülmektedir.

Şekil 4.36. ve şekil 4.37.'de F-h eğrilerinden hesaplanan sertlik (H) ve indentasyon modülü (Er, indirgenmiş elastik modülü) grafikleri verilmektedir. H ve Er değerlerinin benzer davranış sergilediği görülmektedir. H değerleri Fe₂B bölgesinde birbirine yakın ve yaklaşık 18 GPa olarak bulunmuştur. Literatürde Fe₂B fazının H değerlerinin 16-20 GPa arasında değiştiği rapor edilmiştir (Silva vd., 2011; Silva vd., 2013; Castro vd., 2013). Geçiş bölgesine ait 5. izin H değeri ise ani bir düşüş göstererek 6 GPa olarak hesaplanmıştır. Bu düşük değer geçiş bölgesine bor difüzyonunun olmadığını göstermektedir. Daha alt bölgeler olan dökme demir fazında ise sertlik değeri ~3 GPa'a kadar düşmüştür.

Geçiş bölgesinin, dökme demire kıyasla yüksek sertlik değerine sahip olması, borun difüzyonu esnasında alaşımda bulunan karbon ve silisyum fazlarının daha alt bölgelere bastırılmasıyla açıklanabilir. Fe_2B , geçiş bölgesi ve dökme demir bölgelerinin Er değerleri sırasıyla ~ 250, 210 ve ~160 GPa olarak hesaplanmıştır. Farklı bölgelere ait Er değerlerinin H değerleriyle benzer davranış sergilediği görülmektedir. Ayrıca, Fe_2B fazının farklı bölgelerinden elde edilen H ve Er değerlerinin birbirine yakın olması Fe_2B fazının tüm bölgelerde homojen bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.36. Nanoindentasyon analizlerinden hesaplanan farklı bölgelere ait sertlik ölçümleri



Şekil 4.37. Nanoindentasyon analizlerinden hesaplanan farklı bölgelere ait elastik modülü değerleri.

Sonuç olarak; bor ile yapılan kaplama işlemi neticesinde yüzey sertliği 18 GPa, elastisite değeri ise 250 GPa olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte borür tabaka altında “Geçiş Bölgesi” diye adlandırılan bölgenin sertlik değeri 6 GPa, bu bölge altındaki dökme demir matrisin sertlik değeri ise ~3 GPa olarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarından da anlaşılacağı üzere, borlama işlemi ile GG-25 dökme demirin sertliğinin 6 kat arttığı belirlenmiştir.

4.5. Adhesiv Aşınma ve Yüzey Pürüzlülük Deneyi ve Sonuçlar

Materyal metod kısmında da detaylıca anlatıldığı gibi numunelere ait adhesiv aşınma davranışlarını ölçmek için pnomatik tip bir aşınma cihazı kullanılmıştır. İçten yanmalı bir motorda silindir gömleği ve segman birbiriyle temas halinde olan birbiriyle sürekli sürtünme halinde olan tribolojik bir malzeme çiftidir. Bu sebeple aşındırıcı malzeme olarak Ø30 mm x 80 mm ölçülerinde yüzeyi krom kaplı silindirik miller ve aşınan malzeme olarak da borla kaplanmış GG-25 dökme demir malzeme kullanılmıştır. Aşınma deneyi kuru ortamda gerçekleştirilmiştir. 20-35-50 N değerlerindeki üç farklı kuvvet altında; kaplanmış ve kaplanmamış numuneler adhesiv aşınma testine tabi tutulmuştur. Herbir kuvvet değeri altında kaplanmış ve kaplanmamış numuneler aşınma testine tabi tutulmuştur. Aşınma testleri kuru sürtünme şartlarında gerçekleştirilmiştir.

Numunelere ait aşınma deneyleri 1000 metre aşınma mesafesinde yapılmış olup her 100 metrede bir numunelerdeki ağırlık kayıpları hassas terazi vasıtasıyla ölçülmüştür. Her bir aşınma deneyi için aşındırıcı milin farklı bir bölgesi kullanılmıştır. Aşınmış numuneler SEM altında incelenerek görüntüler alınmıştır. Aşağıda Şekil 4.38- 4.40.'daki grafiklerde farklı yük değerleri altında bor ile kaplanmış ve normal dökme demir numunelere ait mesafe-ağırlık kaybı değerleri görülmektedir.

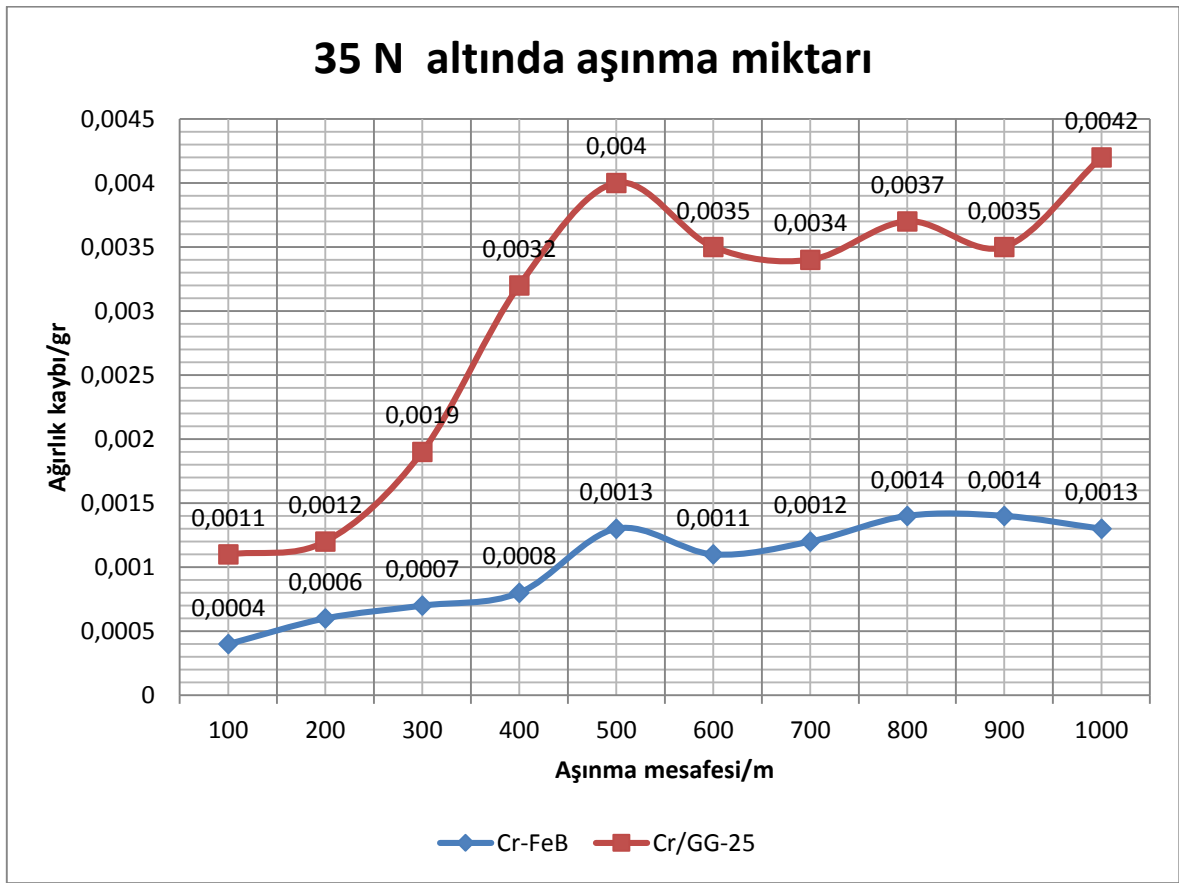
Numunelere uygulanan 3 farklı kuvvet değeri göz önüne alınarak 1000 m mesafede kaplanmış ve kaplanmamış numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları değerlendirilirse; tüm kuvvet değerleri altında bor ile yüzeyi kaplanmış dökme demir numuneler kaplanmamış numunelere göre belirgin şekilde daha az ağırlık kaybı değeri sergilemişlerdir. Dökme demir numunelerde artan mesafe ile ağırlık kaybı lineer bir artış eğilimi sergilerken bor ile kaplanmış numunelerde ise artan mesafe ile ağırlık kaybı miktarı yatay ve stabil bir seyir izlemiştir. Aşınma yolu sonunda bor ile kaplanmış numunelerde dökme demir numunelere göre çok daha az ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Uygulanan kuvvetlere göre numuneleri değerlendirirsek;

Şekil 4.38.'da görüldüğü gibi 20 N kuvvet altında dökme demir numunenin ilk 100 metredeki ağırlık kaybı 0,0013 g iken borla kaplanmış dökme demirin ağırlık kaybı 0,0002 g'dır. Aradaki ağırlık kaybı orantısal olarak yaklaşık olarak 6,5 katıdır. 1000 metre sonunda dökme demir numunedeki ağırlık kaybı 0,0025 g iken kaplanmış dökme demir numunede bu değer 0,0007 olarak gerçekleşmiştir. Aradaki ağırlık kaybı orantısal olarak 3,5 katı olarak gerçekleşmiştir. 1000 metre sonunda ölçülen toplam ağırlık kayıpları sırasıyla dökme demir ve borla kaplanmış dökme demir için 0,0176 g ve 0,0059 g olup ağırlık kaybı oranı 3 kat olarak gerçekleşmiştir.

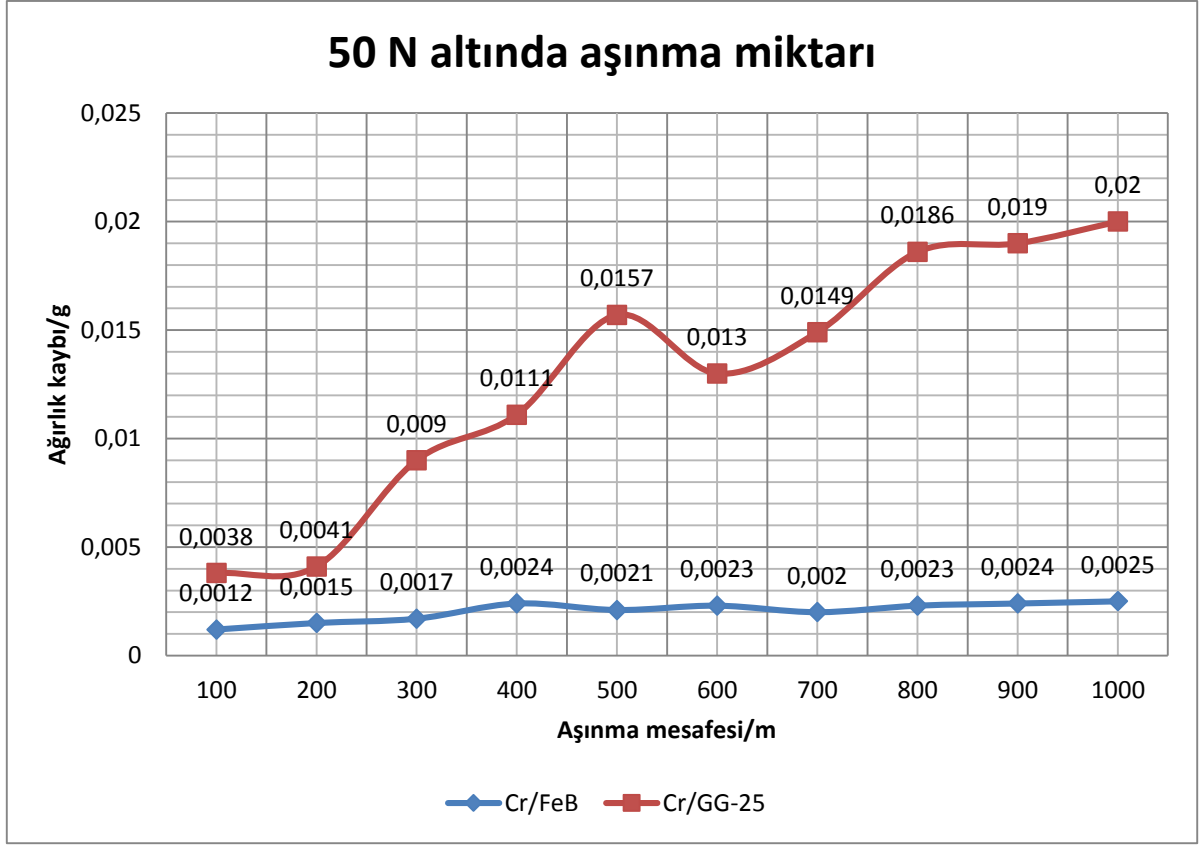


Şekil 4.38. 20 N yük altında meydana gelen aşınma miktarları

Şekil 4.39.'da görüldüğü gibi 35 N kuvvet altında dökme demir numunenin ilk 100 metredeki ağırlık kaybı 0,0011 g iken borla kaplanmış dökme demirin ağırlık kaybı 0,0004 g'dır. Aradaki ağırlık kaybı orantısal olarak yaklaşık olarak 3 katıdır. 1000 metre sonunda dökme demir numunedeki ağırlık kaybı 0,0042 g iken kaplanmış dökme demir numunede bu değer 0,0013 olarak gerçekleşmiştir. Aradaki ağırlık kaybı orantısal olarak 3,5 kat olarak gerçekleşmiştir. 1000 metre sonunda ölçülen toplam ağırlık kayıpları sırasıyla dökme demir ve borla kaplanmış dökme demir için 0,0297 g ve 0,0102 g olup ağırlık kaybı oranı 3 kat olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 4.39. 35 N yük altında meydana gelen aşınma miktarları



Şekil 4.40. 50 N yük altında meydana gelen aşınma miktarları

Şekil 4.40.'da görüldüğü gibi 50 N kuvvet altında dökme demir numunenin ilk 100 metredeki ağırlık kaybı 0,0038 g iken borla kaplanmış dökme demirin ağırlık kaybı 0,0012 g'dır. Aradaki ağırlık kaybı orantısal olarak yaklaşık olarak 3 kattır. 1000 metre sonunda dökme demir numunedeki ağırlık kaybı 0,02 g iken kaplanmış dökme demir numunede bu değer 0,0025 olarak gerçekleşmiştir. Aradaki ağırlık kaybı orantısal olarak 8 kat olarak gerçekleşmiştir. 1000 metre sonunda ölçülen toplam ağırlık kayıpları sırasıyla dökme demir ve borla kaplanmış dökme demir için 0,1292 g ve 0,0204 g olup ağırlık kaybı oranı 6,5 kat olarak gerçekleşmiştir. Şekil 4.41.'de 1000 metre aşınma yolu sonunda sırasıyla bor ile kaplanmış numune ve dökme demir numunelere ait resimler görülmektedir.

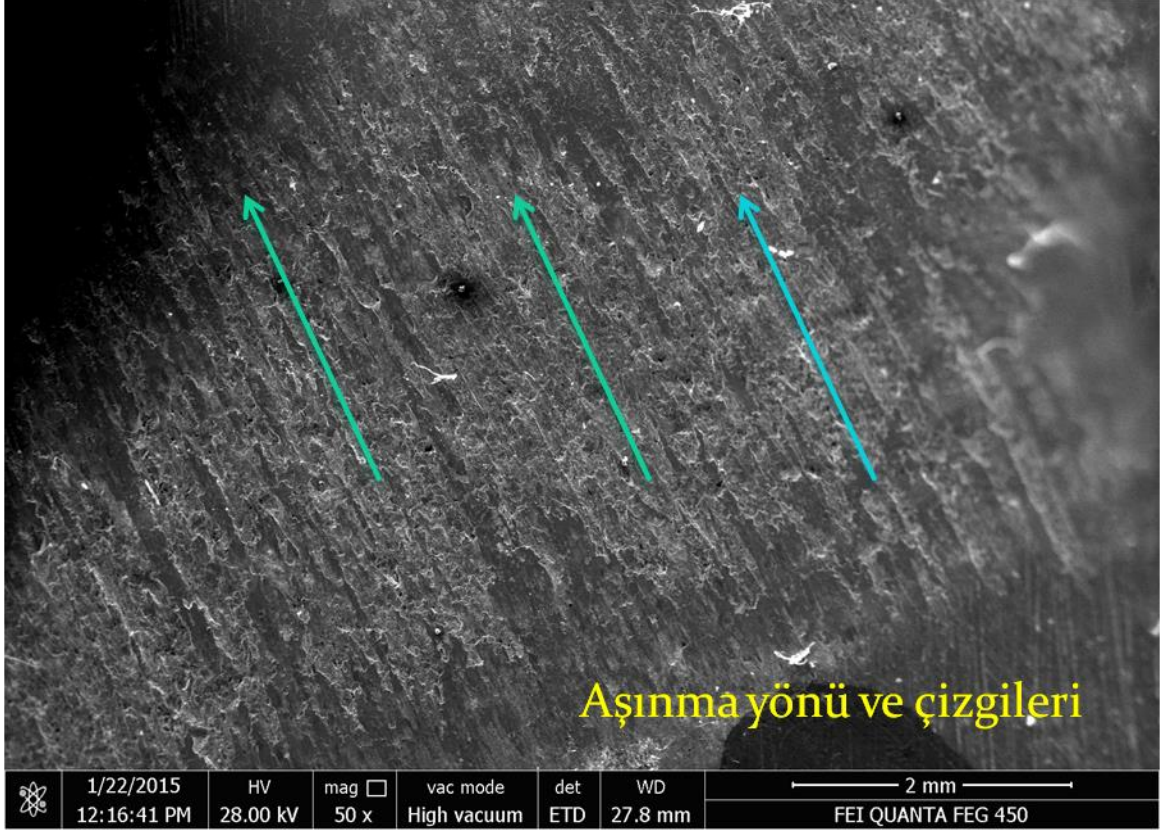


a)

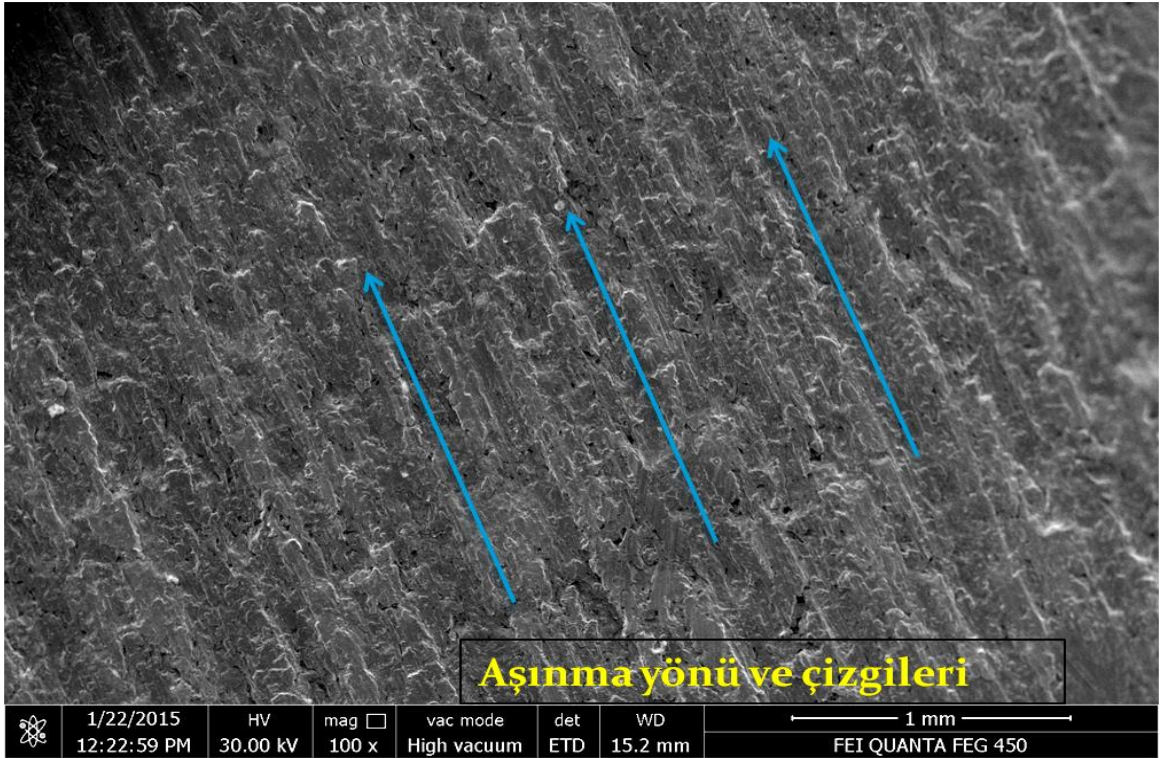
b)

Şekil 4.41. a) Bor ile kaplanmış b) Kaplanmamış normal numunelere ait aşınma deneyi sonu resimleri.

Adhesiv aşınma deneyi sonrası numunelerde meydana gelen yapısal deformasyon ve değişimleri daha iyi analiz etmek için numuneler SEM altında incelenmiştir. Şekil 4.42-45.' de dökme demir numunelere ait SEM görüntüleri görülmektedir. Dökme demire ait 50x, 100x, 200x ve 1000x SEM resimleri incelendiğinde aşınma yönü ve çizgileri net bir şekilde görünmektedir. Dökme demirde meydana gelen derin aşınma çizgileri ve geniş deformasyon alanı aşındırıcı yüzeye göre daha yumuşak bir yüzeye sahip olan dökme demirde yüzeyden kopmaların kolay olduğunun bir göstergesidir. Yüzeye uygulanan kuvvetle birlikte yumuşak olan yüzey yapısı sıklaşmakta ve daha sonra ise kopmaya uğramaktadır. Yüzeyde meydana gelen sıklaşma Şekil 4.45.'de 1000x SEM görüntüsünde net olarak görülmektedir. Bu görüntüde yüzeyde meydana gelen kütle kaybı sıvanmış bir yapı oluşturmakta olup, yüzeyde nasıl bir etki yaptığının göstergesidir. Artan yük ve mesafe ile orantılı olarak yüzeyden malzeme kaybı artmıştır. Yukarıdaki grafiklerde ki verilerde bunu doğrulamaktadır.



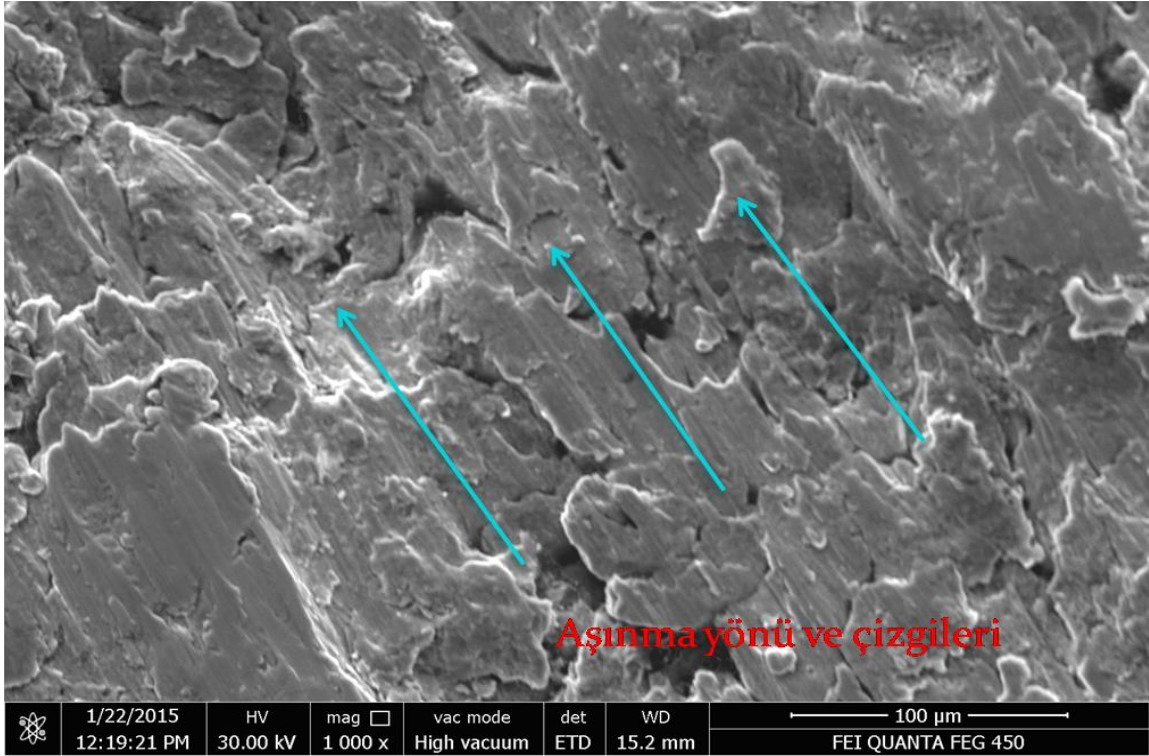
Şekil 4.42. Aşınmış dökme demirin SEM görüntüsü (50x)



Şekil 4.43. Aşınmış dökme demirin SEM görüntüsü (100x)



Şekil 4.44. Aşınmış dökme demirin SEM görüntüsü (200x)



Şekil 4.45. Aşınmış dökme demirin SEM görüntüsü (1000x)

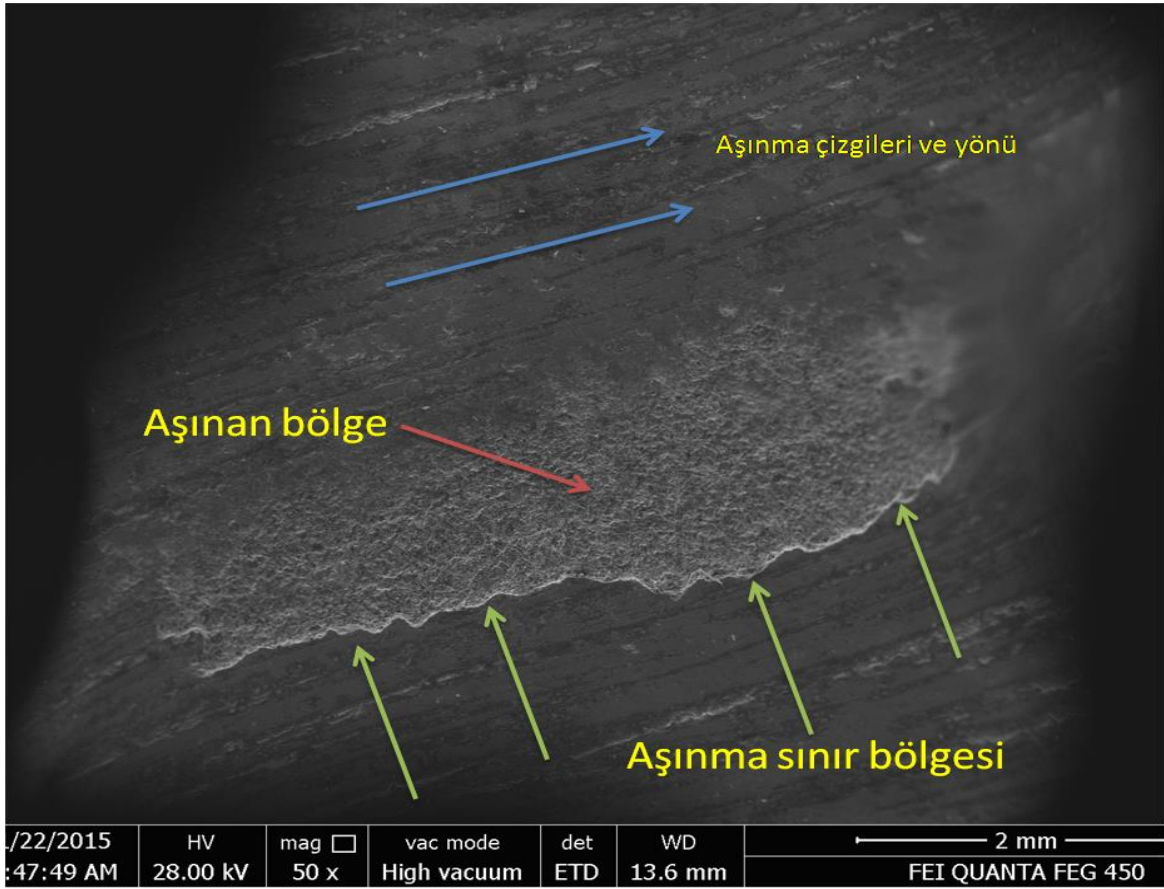
Kaplanmış dökme demire ait görüntüleri değerlendirmek gerekirse; bilindiği gibi adhezif aşınma, yapışma aşınması olarak da adlandırılır ve iki malzemenin birbiri üzerinde hareket etmesi ile metalik birleşmelerin meydana geldiği sonrasında ise birbiri üzerinde kayan parçacıkların yüzeyden ayrılmasıyla sonuçlanan bir aşınma tipidir. Temas halinde olan malzemelerde kaynamanın olduğu bölgelerde tamamen veya kısmen parçalanma meydana gelmektedir.

Borun oksijene karşı ilgisi yüksek olduğundan borür tabakası üzerinde ince bir oksit filmi oluşmaktadır. Bu tabaka metal-metal temasını geciktirmekte, katı yağlayıcılık görevi yaparak sürtünme katsayısını düşürmektedir. Yüzeyin kimyasal bileşimi ve sürtünen yüzeylerin kimyasal kararlılığı eleman çifti arasındaki yüzey çekim kuvvetini azaltmakta ve dolayısıyla aşınma dayanımını arttırmaktadır. Borlu tabakaların soğuk kaynak eğilimi düşüktür, ayrıca aşınmayı önlemek için yağlanmasına gerek yoktur. Bu durum özellikle adhesiv aşınmayı önlemede büyük yarar sağlamaktadır (Selçuk, 1994). Bu çalışmada dizel bir motorun silindir gömlekleri kaplandığı için durum daha da önem arz etmektedir. Dizel motorlar, yüksek sıkıştırma oranlarında, yüksek yanma sonu basınç ve sıcaklığında çalıştıkları için aşınma oranları yüksektir. Ayrıca bu şartlar altında yağlama verimleri düştüğü için, abrasiv ve adhesiv aşınma artar. Borür tabaka yüzeyinin oksijeni tutması ve abrasiv-adhesiv aşınmaya karşı olan mukavemeti, bu parçaların ömrünü uzatıcı etki yapacaktır.

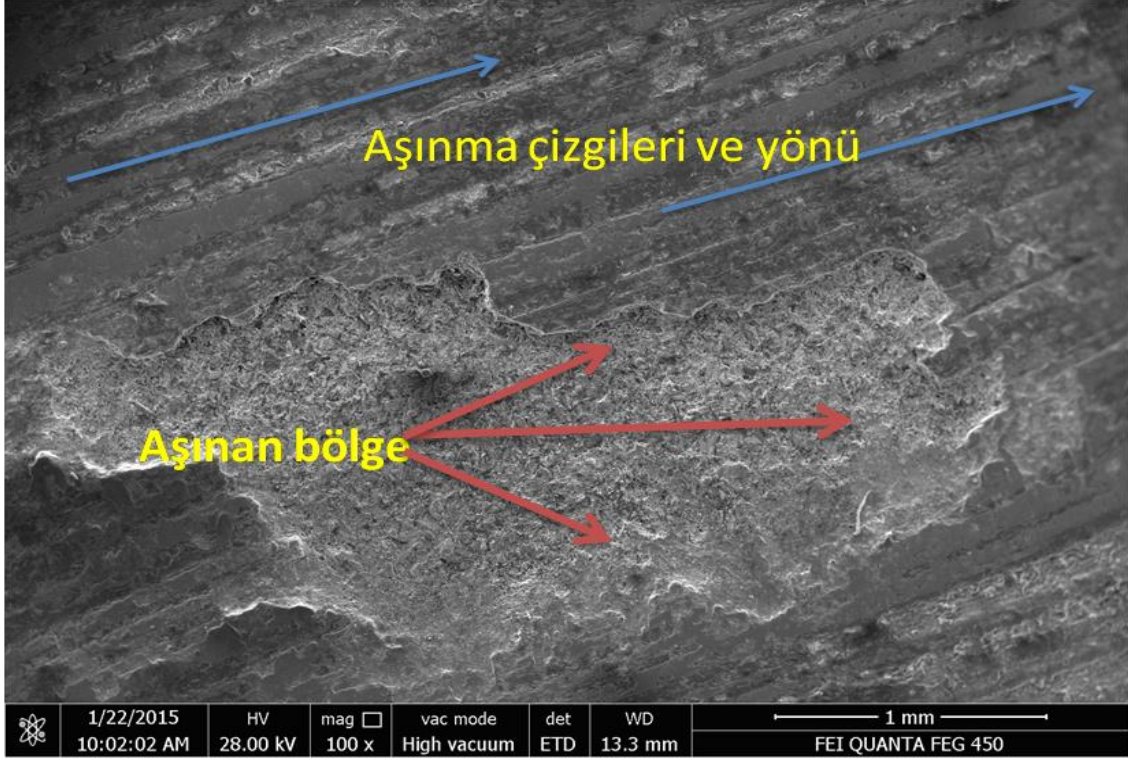
Borlama işleminin bu özelliğinden dolayı borlanmış yüzeylerin adhesiv aşınma direncinin yüksek olması beklenen bir durumdur. Aşağıda Şekil 4.46-4.50.'de borlanmış ve adhesiv aşınmaya maruz kalan numunelerin SEM altında alınan çekilen 50x, 100x, 200x, 500x ve 1000x görüntüleri görülmektedir. Resimlerden de görüldüğü gibi borlanmış yüzeylerde aşınmaya maruz kalan bölgelerde kısmi tabaka yırtılmalarının ve yüzey üzerinde atmaların olduğu görülmektedir. Kaplanmış yüzeyde meydana gelen bu aşınma mekanizmasının dökme demirde oluşan aşınma mekanizmasından farklı olduğu düşünülmektedir. Şöyleki; aşınma olayı sürtünme ile direkt olarak alakalı bir süreçtir. Bilindiği gibi borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayısı teflonunkine yakın olup dökme demir den çok daha az bir seviyededir (Atik,1997). Aynı zamanda borla kaplanmış yüzey dökme demire göre daha sert ve mukavemeti yüksek bir yüzeydir. Bir önceki bölümde yapılan yüzey sertlik ölçümlerinde borla kaplanmış yüzey sertlik değeri 18GPa iken dökme demir de bu sertlik 3 GPa olarak bulunmuştur. Bu faktörler gözönüne alındığında aşındırıcı

milin bir süre kaplanmış tabaka üzerinde kaydığı, kuru ortamda devam eden bu kayma olayı sonrasında kaplama tabakasının incelmesi, incelen tabakanın ana malzemeye olan yapışma mukavemetinin azaldığı ve yüzeyden tabakanın kalktığı düşünülmektedir. Bir diğer düşünce ise aşındırıcı yüzeye göre daha sert olan kaplanmış yüzeyin uygulanan kuvvetler altında diğer yüzeyden parçacık koparıp iki yüzey arasında abrasif aşınmaya sebep olabileceği şeklindedir. Daha önce yapılan demir esaslı malzemelere borlama işlemi uygulayarak aşınma dirençlerinin artırıldığı çalışmalar da elde ettiğimiz sonuçları doğrulamaktadır (Bayça ve Şahin, 2004; Şahin ve Meriç, 2002; Ünlü, 2004; Hunger ve Trute, 1994).

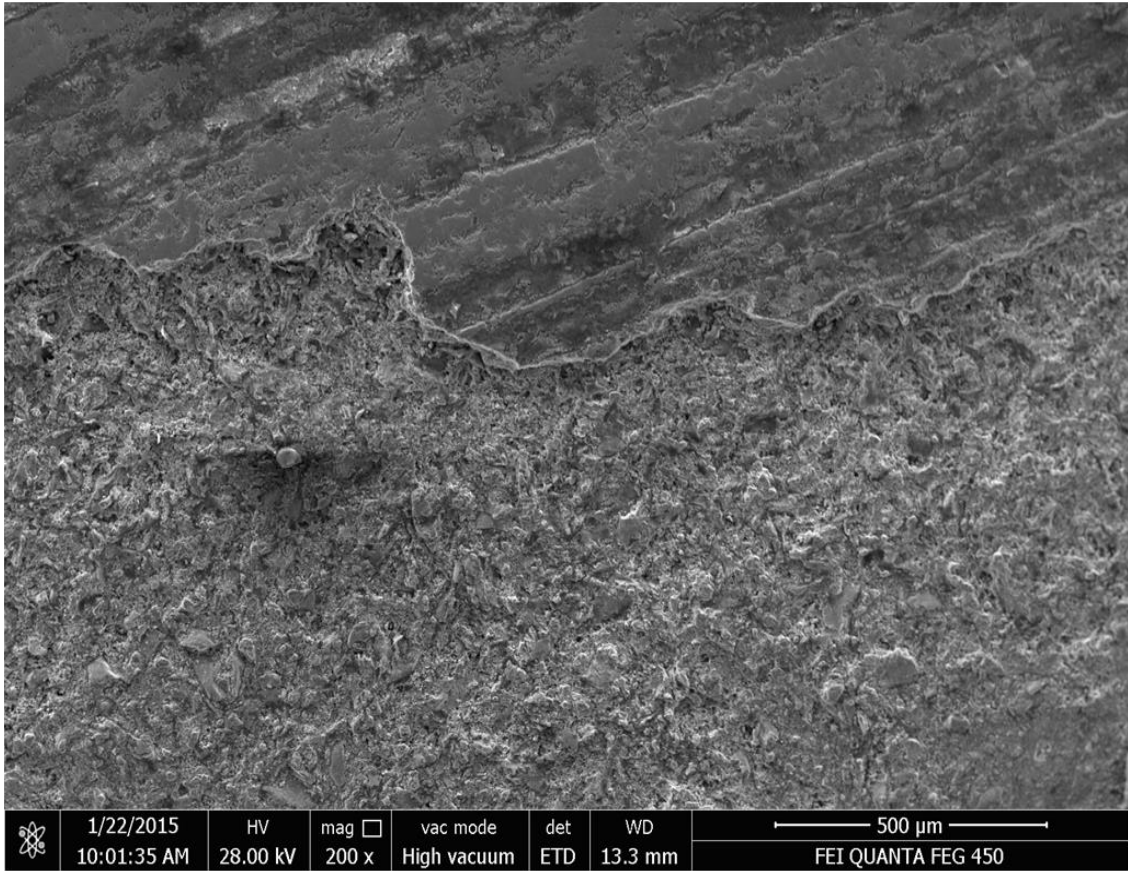
Dikkat çeken bir diğer husus da dökme demirde meydana gelen aşınmanın aksine kaplanmış yüzeydeki aşınmanın daha lokal aşınma bölgeleri oluşturmuş olmasıdır. Aşağıda aşınma bölgesinden alınan SEM görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.46-47.'de aşınma çizgileri ve yönü net bir şekilde görülmektedir.



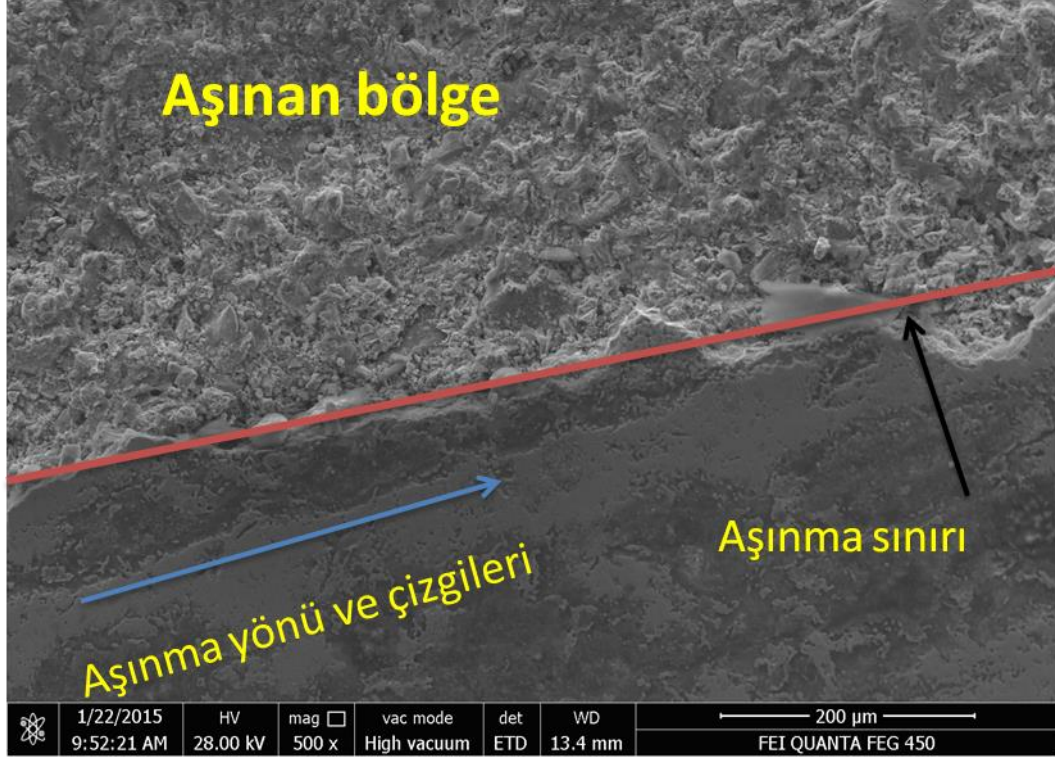
Şekil 4.46. Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x50)



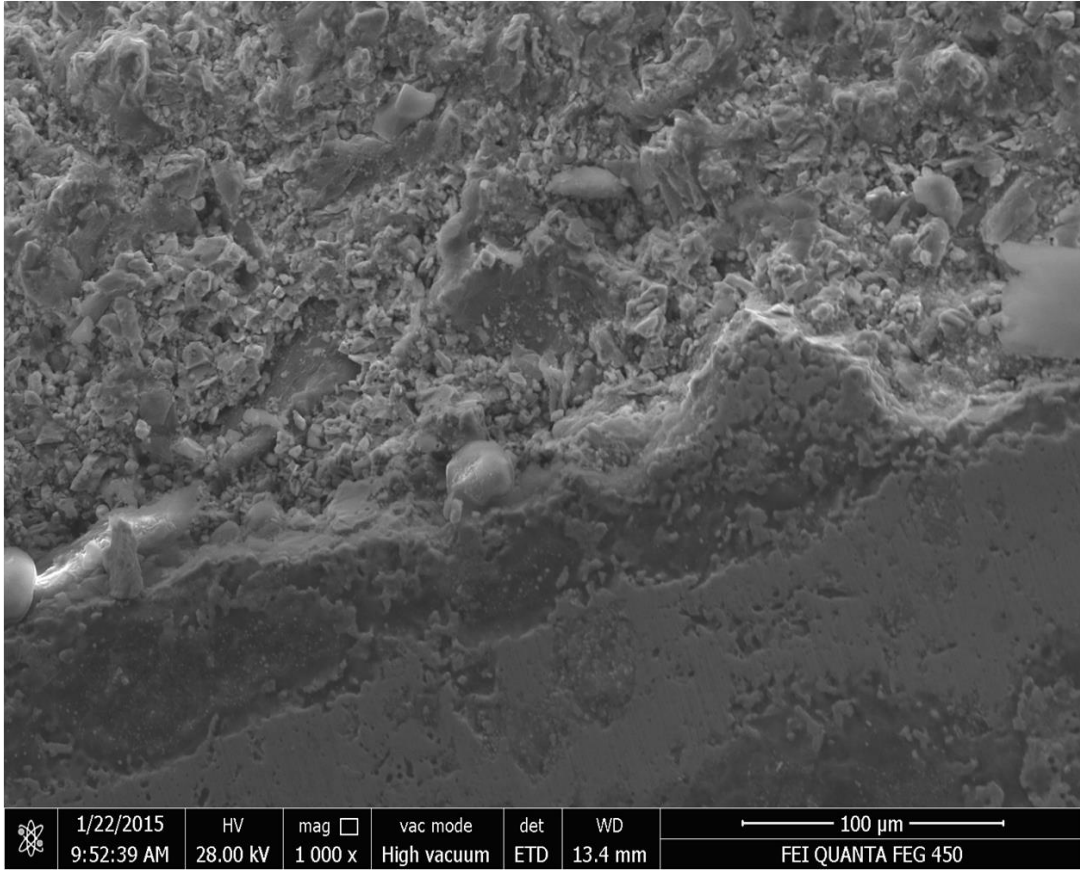
Şekil 4.47. Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x100)



Şekil 4.48. Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x200)



Şekil 4.49. Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x500)



Şekil 4.50. Borlanmış numunenin aşınma deneyi sonrası yüzey morfolojisi (x1000)

Yukarıda Aşınma deneyi sonucunda elde edilen veriler ve dökme demir ve borlanmış dökme demirden elde edilen SEM görüntüleri değerlendirildiğinde; borlanmış numunelerin ekonomik ömürlerinin ortalama olarak 3 kat arttığı anlaşılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir husus ise gerçekleştirilen adhesiv aşınma deneyinin kuru ortamda gerçekleştirilmiş olmasıdır. Bu deney yağlayıcı ortam altında gerçekleştirilmiş olsa idi borlanmış numunenin, normal dökme demir numuneye göre aşınma dayanımının daha da fazla olacağı düşünülmektedir. Elde edilen bu dayanımın, borlanmış yüzey tabakasının normal dökme demire göre 6 kat fazla olan yüzey sertliğinden ve sürtünme katsayısının düşük olmasından kaynaklanacağı düşünülmektedir. Bu veriler ışığında yüksek mertebede birbiri ile sürtünme halinde olan, başta abrasiv, adhesiv ve diğer aşınma mekanizmalarına maruz kalan, silindir gömleği gibi demir esaslı otomotiv parçalarında borlama işleminin uygulanabileceği ve böylece malzemenin ekonomik ömrünün artırılacağı anlaşılmıştır.

Kaplama tabakaları ve altlık malzemelere ait ısı iletim katsayıları tablo 4.8. de görülmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere; kaplanmış numunelerin ısı iletim katsayısında düşüş meydana gelmiştir. Bu düşüş miktarları; Kaplanmış silindir gömleği için normal silindir gömleğine göre ortalama 2,5 kat, piston üst yüzeyi için ise ortalama 10 kat olarak gerçekleşmiştir. Yanma odasının çeperlerindeki ısı iletiminin azalmasıyla birlikte motor termal yalıtımlı bir motor (LHR) haline getirilmiştir. Bu kaplama işlemleri neticesinde malzeme yüzeyinde ısı iletim direnci ve aşınma dayanımı yüksek, sürtünme katsayısı düşük, anti-korozif bir yüzey elde edilmiştir. Motora tam adyabatik özellik kazandırılırken, yüzeyde ise her türlü olumsuz şarta karşı yüksek dayanım kazandırılmıştır.

Tablo 4.7. Altlık ve kaplama tabakalarına ait ısı iletim katsayı değerleri

	GG-25	Fe₂B	AlSi12CuNi	NiCrBSi
Termal iletim (W/m. K)	53,3	20-30	151-220	7-17

Silindir gömleklerinin yüzeylerinin pürüzlülük değerleri ölçüldüğünde Ra değerinin 0,60 µm olduğu görülmüştür. Aşağıda şekil 4.51. de yüzey pürüzlülük ölçümüne ait resim görülmektedir. Pürüzlü yüzeylerde temas alanının artması sürtünme katsayısını artırdığı için aşınma miktarını da artırmaktadır. Birbiri ile temas halinde çalışan mekanizmalar için yüzey pürüzlülük değerinin ideal değerler arasında olması gerekmektedir. Katalog değer

genel olarak 0,40-0,80 μm olarak kabul edildiğinden, ölçülen yüzey pürüzlülük değeri motorun normal çalışması için gereken ideal sınırlar içerisinde olduğu şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 4.51. Yüzey pürüzlülük ölçümü

5. ÖNERİLER

Yapmış olduğumuz deneysel çalışma sonucunda oldukça dikkat çeken ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Katı ortam kutu borlama yöntemi ilk kez içten yanmalı 4 silindirli bir motorun yanma odası elemanlarına başarılı bir şekilde uygulanmış ve motor sorunsuz bir şekilde çalıştırılmıştır. Düşük ısı kayıplı veya termal yalıtımlı motor olarak adlandırılan konsept motor tipi farklı bir kaplama yöntemi ile yeniden yorumlanmıştır.

Motorda deney yakıtı olarak ASTM-D-2 yakıt ve biyodizel yakıtlar kullanılmıştır. D-2 yakıt piyasadan temin edilmiştir. Biyodizel yakıt ise laboratuvar ortamında transesterifikasyon yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen yakıtlar dizel yakıt ile % 20-50 oranlarında karıştırılarak ve %100 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen yakıtlar fizikokimyasal özelliklerini belirlemek için analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına ait veriler bulgular kısmında detaylıca anlatılmıştır. Genel olarak yakıtların fizikokimyasal özellikleri incelendiğinde uluslar arası standartlar içinde olduğu ve kaliteli bir yakıt elde edildiği genel özellikler bakımından petrodizele yakın karakteristikler gösterdiği söylenebilir.

Üretilen biyodizel yakıt ve karışımları, normal ve termal yalıtımlı motorda deney yakıtı olarak kullanılmıştır. Her iki motor da tüm yakıtlar performans ve emisyon testlerine tabi tutulmuştur. Genel olarak kaplanmış olduğumuz motordaki performans ve emisyon ölçümleri sonucunda; kaplanmış olduğumuz motorun hem performans hem de emisyon sonuçları açısından normal motora göre pozitif sonuçlar verdiği görülmüştür. Sonuçlar kısmında YT, FÖYT, FÖET, FTV, EGS ve CO, HC, NO_x, İS ile ilgili tüm veriler ve meydana gelen alçalma ve yükselme değerleri detaylıca anlatılmıştır.

Yukarıda da ifade edildiği gibi kutu borlama yöntemi ile kaplama prosedürü 4 silindirli dizel bir motor parçalarının yüzeyinin kaplanmasında ilk kez denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda:

Turbo şarjlı bir motorda borlama kaplama yönteminin uygulanması, özellikle volumetrik verimde meydana gelecek artışı görebilmek açısından ve literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Biyodizel yakıtlar kalorifik değer açısından normal D-2 yakıtlara nazaran daha düşük bir değere sahiptir. Termal olarak yalıtılmış bir motorda biyodizele ait bu düşük kalori değeri termal verimde meydana gelecek

artıŖla dengelenebileceği grlmŖtr. Bu manada alternatif biyodizel yakıtlar borlama yöntemi ile kaplanmış bu motorda kullanılarak yakıt performansı ve emisyon değerlerinde meydana gelecek deđiŖimler görülebilir. Özellikle ekonomiye kazandırıldığında önemli bir girdi sağlayacak aynı zamanda evre kirliliğinin de önüne geebileceek atık yağların toplanarak orta veya büyük ölçekte biyodizel üretim tesisleri kurularak elde edilecek yağların modifiye ettiğimiz tarzda termal yalıtımlı bir motorda yakıt olarak kullanılmasının uygun olacağı dŖnlmektedir.

Ülkemiz için önemli ve stratejik bir maden olan Bor'un otomotiv endüstrisinde aŖınma ve korozyona karŖı olan yüksek dayanımından dolayı, otomobillerde farklı parçalarda da kullanılmasını mümkün hale getirebileceği dŖnlmektedir.

KAYNAKLAR

- Abedin, M. Masjuki, H. Kalam, M. Sanjid, A. Rahman, S. Masum, B.**, 2013. Energy balance of internal combustion engines using alternative fuels, *Renew Sustain Energy Rev*, **26**, 20–33.
- Acaroğlu, M., Ünalđı, M.**, 2010. Yakıtlar ve yanma kitabı s. 132 Nobel yayınevi, İstanbul
- Agarwal, K.**, 2007. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines *Progress in Energy and Combustion Science* **33**, 233–271
- Agarwal, A.K. Garg, S.**, 2003. Characterization and utilization of biodiesel as an alternative fuels for diesel engines. *Consultative workshop in scientific strategies for production of non-edible oils for use as bio-fuels*. Organized by Jagadguru Sri Shivarathreeshwara Academy of Technical Education in Bangalore on 6–7 September
- Agarwala, D. Sinhab, S. Agarwal, A.K.**, 2006. Experimental investigation of control of NOx emissions in biodiesel-fueled compression ignition engine. *Renew Energ* **31**, 2356–69
- Akkurt, M.**, 1987. Makine Elemanları Cilt II. Birsen Kitabevi, İstanbul.
- Akyarlı, A., Alpaslan, N.**, 2004. *Biyodizel Yakıtın Uluslararası Standartlarda Üretimi Bioenerji Sempozyumu* –İzmir.
- Alam, M. Song, J. Acharya, R. Boehman, A. Miller, K.**, 2004. Combustion and emissions performance of low sulfur, ultra low sulfur and biodiesel blends in a DI diesel engine. *SAE paper*, 2004-01- 3024.
- Alibaş, K. ve Ulusoy, Y.**, 1995. Bitkilerin Yağların Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Kullanım Olanakları, *Tarımsal Mekanizasyon 16. Ulusal Kongresi*, Bursa, 147-156,
- Al-Widyan, M.I. Tashtoush, G. Abu-Qudais, M.** 2002. Utilization of ethyl ester of waste vegetable oils as fuel in diesel engines *Fuel Process Technol*; **76** 91–103.
- Alkidas, A.C.**, 1989. Performance and emissions achievements with an uncooled heavy duty, single cylinder Diesel engine. *SAE paper* 890141,
- ALTIN, R.**, 1998. Bitkisel Yağların Dizel Motorlarında Yakıt Olarak Kullanılmasının Deneysel Olarak İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
- Altun, F.**, 2005. “Bor”, Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü, Ankara,
- Assanis, D. Wiese, K. Schwarz, E. Bryzik, W.**, 1991, The Effects of Ceramic Coatings on Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions, *SAE Paper* No. 910460,
- ASM Handbook.**, 1991. Vol.4 (a) *Heat Treating* p.977
- ASM Handbook.**, 1991 vol. 4(b) *Heat Treating* p.988
- ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Volume20: Materials Selection, *ASM International*, US.
- ASM International Handbook Committee.**, 1992. ASM Handbook Volume18: Friction, Lubrication and Wear, *ASM International*
- Atık, E.**, 2001. Farklı Bir Yüzey Sertleştirme Yöntemi: Borlama, *Makina & Metal*, **117**, 86- 90.
- Atık, E.**, 1997. Çeliklerin borlanarak aşınma dayanımlarının artırılması *Mühendis ve Makine* **445**, 17-20,
- Atık, E. Yunker, U. Meric, C.**, 2003. The effects of conventional heat treatment and boronizing on abrasive wear and corrosion of SAE 1010, SAE 1040, D2 and 304 steels *Tribology International* **36**, 155–161
- Aydin, H.** 2013. Combined effects of thermal barrier coating and blending with diesel fuel on usability of vegetable oils in diesel engines. *Appl Therm Eng* **vol.51** pp.623-629.

- Aydin, H, Bayindir, H.** 2010. Performance and emission analysis of cottonseed oil methyl ester in a diesel engine. *Renew Energ*; **35**, 588–92
- Badini, C. Mazza, D.**, 1988. The Texture of Borided Layers Grown of Fe-Ni and Fe-Cr Alloy. *J. Mater. Sci. Let.*, **7**, 661-662.
- Baiju, B. Naik, M.K. Das, L.M.**, 2009. A comparative evaluation of compression ignition engine characteristics using methyl and ethyl esters of Karanja oil *Renewable Energy* **34**, 1616–162
- Banapurmath, N. Tewari, P.**, 2008. Performance of a low heat rejection engine fuelled with low volatile Honge oil and its methyl ester (HOME). *Proc Inst Mech Eng, Part A: J Power Energy*; **222**, 323–30.
- Banapurmath, N. Tewari, P.**, 2009. Performance studies of a low heat rejection engine operated on non-volatile vegetable oils with exhaust gas recirculation. *Int J Sustain Eng* **2**, 265–74
- Barie, NJ. Humke, AL.** 1981. Performance and emission characteristics of a naturally aspirated diesel engine with vegetable oil fuels. *Society of Automotive Engineers paper* No-810262,
- Başman, G.**, 2010. S.81AISI 316 L Tipi Paslanmaz Çeliğin Termokimyasal Difüzyon Yöntemi İle Borlanması, Borlama Banyosu Bileşenlerinin Borür Tabakası Özelliklerine Etkisi *Doktora Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*
- Başman, G.**, 1998. GGG 40 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin yorulma davranışına TiN kaplamanın etkisi, *Y. Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- Baştürk, S., Erten, M.**, 2006. Borlama ile Yüzey Sertleştirme Çalışmaları, *Mühendis Makina* **563**
- Baudis, U., Fichte, R.**, 1995. Boron and Boron Alloys. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Vol **A4**, 281-293
- Bayça, S. Şahin, S.**, 2004. “Borlama” *Mühendis ve Makine Dergisi*, **532**, Mayıs
- Balusamy, T. Sankara Narayanan, T.S.N. Ravichandran , K. Il Song Park , Min Ho Lee**, 2013. Pack boronizing of AISI H11 tool steel: Role of surface mechanical attrition treatment *Vacuum* **97** 36-43
- Baydoğan, Murat. Akray, S.**, 2009. Successive Boronizing And Austempering For ggg-40 Grade Ductile Iron” *Journal Of Iron And Steel Research. International*. **16(2)**: 50-54
- Berzina, I.G. Gusev, E.B. Fedina, G.N. Fedin, V.M.**, 1984. Investigation of Boron Diffusion During Boronizing of Engineering Steel 45”. *Phys. Met. Metall*, **57 (5)**, 81-84.
- Bhushan, B. and Gupta, B.K.**, 1991. “*Handbook of Tribology*”, McGraw-Hill, Inc., USA., **1168**,
- Bindal, C.**, 1991. Az alaşımlı çelikler ve ticari karbon çeliklerinde borlama ile yüzeye kaplanan borür tipi seramik kompozitlerin bazı özelliklerinin tespiti”, *Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*
- Blanter, M.E. Bosedin, N.P.**, 1955. *Metalloved. Term. Obra. Met.*, **Vol 6**, p 3-9
- Blazon, M., Stanojevic, B. and Veljkovic, V.**, 1975. Effect of alloying elements on the the formation of boride layer on steel, *Scripta Metallurgica*, **9**, 1153-1156.
- Borat, O., Balcı, M. ve Sürmen, A.**, 1992. İçten Yanmalı Motorlar Cilt 1 DAYM Matbaası, Ankara,
- Boran, E.**, 2001. Dizel Motorlarında Bazı İşletme Parametrelerinin İş Oluşumu ve Motor Performansına Etkileri Üzerine Bir Araştırma, *Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*
- Bozkurt, N.**, 1984. Bor yayınımlı çeliklerde yüzey sertleştirme, *Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.*

- Brakman, C.M. Gommers, A.W.J. and Mittemeijer, E.J.** 1988. *Proceedings of Heat Treatment '88*, The Institute of Metals, p 211-217
- Buytoz, S., Somunkıran, İ.**, 2005. "Borla Kaplanan Yüzeyin Mikroyapı ve Mekaniksel Özellikleri" *Teknolojik Araştırmalar Makina Teknolojileri Elektronik Dergisi* (4):41-45
- Buyukkaya, E.**, 2010 Effects of biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics". *Fuel*; **89**,3099–105.
- Burton, A. Kushner and Edward R. Novinski**, 1992. Friction, Lubrication, and Wear Technology was published in 1992 as Volume 18 of the ASM Handbook. p.1688-1689 "thermal spray coatings" Perkin-Elmer Corporation, Metco Division
- Burton, A. Kushner and Edward R. Novinski**, 1988. "Thermal spray coatings" Perkin-Elmer Corporation, Metco Division H. Herman, Plasma Sprayed Coatings, Sci. Am., Sept
- Campos-Silva, I. Ortiz-Domínguez, M. Keddam, M. Lopez-Perrusquia, N. Carmona-Vargas, Elhas-Espinosa, A. M.** 2009. Kinetics of the formation of Fe₂B layers in gray cast iron: Effects of boron concentration and boride incubation time *Applied Surface Science* **255**, 9290–9295,
- Carbucicchio, M., Badini, C. and Samboga, G.**, 1980. On the early stages of high purity iron boriding with crystalline boron powder, *J. Materials Science*, **15**, 1483-1490.
- Carbucicchio, M., Palombarini, G. and Cento, L.**, 1984. Electron probe microanalysis of nickel and chromium in Fe-C-Ni and Fe-C-Cr alloys borided at 850°C, *J. Materials Science*, **19**, 3732-3738.
- Castro, G.R. Silva, I.C. Gutierrez, E.C. Trinidad, J.M. Sanchez, E.H. Hernandez, A.T.**, 2013. Mechanical properties of FeB and Fe₂B layers estimated by Berkovich nanoindentation on tool borided steel, *Surface & Coatings Technology* **215**, 291-299.
- Chan, SH.**, 2001. Performance and emissions characteristics of a partially insulated gasoline engine *Int J Therm Sci*; **40**, 255–62
- Chatterjee-Fischer, R.** 1989. Chapter 8, in *Surface Modification Technologies*, T.S. Sudarshan, Ed., Marcel Dekker, Inc., p 567-609
- Chattenje-Fischer, R.**, 1977. *Powder Metall.*, Vol **20** (No.2), P 96-99
- Chatterjee-Fischer, R.** 1981. *Hart.-Tech.Mitt.*, Vol **36**(No.5). p 248-254
- Chatterjee-Fischer, R. and Schaaber, O.**, 1976. *Proceedings of Heat Treatment '76*, The Metals Society, p 27- 30
- Chindaprasert, N., Hassel E., Nocke, J., Janssen, C., Rabba, H. and Köller, M.**, 2004. Two-Zone combustion model in S.I. engine using polytropic index, *ARGESIM Report No. 27*,
- Choi, S-H. Oh. Y.**, 2006. The emission effects by the use of biodiesel fuel. *Int J Mod Phys B* **20**,4481–6.
- Ciniviz, M.**, 2010. Performance and energy balance of a low heat rejection diesel engine operated with diesel fuel and ethanol blend. *Trans Can Soc Mech Eng*; **34**, 93
- Clark, SJ. Wanger, L. Schrock, MD. Piennaar, PG.**, 1984. Methyl and Ethyl Soybean Ester as renewable fuels for diesel engines. *Journal of American Oil Chemists Society*; **61(10)**,1632–7.
- Çalık A.**, 2002. "Türkiye"nin Bor Madenleri ve Özellikleri", *Mühendis ve Makine*, **508**,
- Çanakci, M.** 2005. Performance and emissions characteristics of biodiesel from soybean Oil. *P I Mech Eng D-J Aut*; **219**,915–22.
- Çanakçı, M. Erdil, A. Erol, Klioghu, A.** 2006 Performance and exhausts emissions of a biodiesel engine *Appl Energ*; **83**,594–605.

- Çeğil, Ö., Şen.Ş.,** 2002. AISI 8620 Çeliğinin Bor-Vanadyumlanması ve Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, **6, 3**, 113-117.
- Çelikyürek,İ., Baksan, B., Gürler, R.,** 2004. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Borlanması II. *Uluslararası Bor Sempozyumu*, Eskişehir.
- Çetin M.,** 2003. Borlanmış Hadfield Çeliklerinin Aşınma Dayanımını İncelenmesi, *Y.Lisans Tezi*, Dumlupınar Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya,
- Deepak Agarwal, Lokesh Kumar, Avinash Kumar Agarwal,** 2008. Performance evaluation of a vegetable oil fuelled compression ignition engine *Renewable Energy* **33** 1147–1156
- Dearnley, P. and Bell, T.** 1985..*Surf.Eng.*, **Vol 1 (No.3)**, , p203-217
- Delikanlı, K. Çalık, A. Uzun, H.** 2003. Sade Karbonlu Bir Çeliğin Borlama Özelliklerinin İncelenmesi, *B.A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*,**5,1**, Balıkesir
- DIN 50320 Standard,** 1979. Wear; Terms. Systematic Analysis of Wear Process. Classification of Wear Phenomena, *DIN Standard*, GERMANY.
- Demirci H.,** 1996. Fe-Esaslı Malzemelerin Borlanması ile Kaviteasyon Dayanımının Değişimi”, 7. *Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, 261-269, Ankara
- Demir, B.,** 2009.Küçük Ölçekli Bir Biyodizel Sisteminin Oluşturulması, Elde Edilen Pamuk Yağı Metil Esterin Motor Performans Testleri, Enerjetik ve Ekserjetik Değerlendirilmesi *Doktora Tezi*, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İzmir
- De Almeida, SCA. Carlos, RB. Marcos, VGN. Leonardo dos, SRV, Guilherme F.,** 2002. Performance of a diesel generator fuelled with palm oil. *Fuel*;**81(16)**, 2097–102
- Deshmukh, SJ. Bhuyar, LB.,** 2009 Transesterified Hingan (Balanites) oil as a fuel for compression ignition engines. *Biomass Bioenerg*, **33**,108–12
- Di Yage, CS. Huang, ZH.,** 2009. Experimental investigation on regulated and unregulated emissions of a diesel engine fueled with ultra-low sulfur diesel fuel blended with biodiesel from waste cooking oil. *Science of the Total Environment*;**407**:835–46.
- Dorado,MP. Ballesteros,E. ArnalJM, Go´mezJ,Lo´pez, FJ.** 2003. Exhaust emissions from a diesel engine fueled with transesterified waste olive oil.*Fuel*, **82**:1311–5.
- Ediz, N., Seyfettinoğlu, M. A., Özdağ, H.,** 1997. Kil Minerallerinin Tügsaş-Kütahya Azot Fabrikası Baca Gazlarının Filtrasyonunda Kullanımın Araştırılması, 8. *ulusal Kil Sempozyumu*, Dumlupınar Ü., Ed. Işık, Kütahya, 315-325.
- Emiroğlu,H.,** 2007.Bir traktör modelinde yakıt olarak değişik oranlarda Biyodizel kullanımının Motor Karakteristiklerine etkilerinin belirlenmesi *Yüksek Lisans Tezi* A.M.Ü. Fen bilimleri Enstitüsü TM-YL-2007-0001,Aydın.
- Erol,A.,** 2006. Yağlardan Elde Edilen Biyodizellerin Karşılaştırılması *Yüksek Lisans Tezi* Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eylül, Ankara
- Esschnauer, H., Lugscheider, E.** 1985.Fortschritte beim thermischen Spritzen, *Metall*, **Heft 3**, 218-224,
- Fichtl,W. Trausner, N. and Matuschka, A.G.** 1972. Boronizing with Ekabor, in Elektroschmeltz Kempten, GmbH; and W.Fichtl, Oberflaechentech. *Metallpraxis*,Vol 11, p 434
- Fichtl, W.J.G.** 1983. "Saving Energy and Money by Boronizing," Paper presented at the *meeting of the Japan Heat Treating Association*, Tokyo, 25 Nov 1988; "Boronizing and Its Practical Applications," Paper presented at the *33rd Harterei-Kolloquium*, Wiesbaden, 5-7 Oct 1977; *Heat Treat. Met.*, p 79-80
- Fichtl, W.,** 1981. Boronizing and its Pratical Applications. *Materials in Engineering*, **2**, 276-286.
- Fichtl, W.J.G.** 1974. *Hart.Tech.Mitt.*, **Vol 29(No.2)**, p113-119

- Fichtl, W.J.G.** 1989. *Jahr. Oberflächen Tech.*, **Vol 45**, Metall-Verlag, p 420-427
- Frijters, PJM. Baert, RSG.**, 2006. Oxygenated fuels for clean heavy-duty engines. *Int J Vehicle Des*; **41**:242–55
- G40-02 Standard**, 2002. Standart Terminology Relating to Wear and Erosion *ASTM International*, US.,
- Galibois, A. Boutenko, O. and Voyzelle, B.**, 1980. *Acta Metall.*, **Vol28**, p1753-63,1765-71
- Geouriot, P., Fillit, R., Thevenot, F., Driver, J.H. and Bruyas, H.**, 1981. The influence of alloying element additions on the boriding of steel, *Materials Science and Engineering*, **55**, 9-19.
- Geouriot, P., Thevenot, F., Driver, J.H., Magnin, T.**, 1983. “Methods for examining brittle layers obtained by a boriding surface treatment(Borudif)”, *Wear*, **86**, 1-10
- Giakoumis, E.**, 2007. Cylinder wall insulation effects on the first-and second-law balances of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions. *Energy Convers Manage*, **48**, 2925–33.
- Godiganur, S. Murthy, CHS. Reddy, RP.**, 2009 6BTA 5.9 G2-1 Cummins engine performance and emission tests using methyl ester mahua (*Madhuca indica*) oil/diesel blends”. *Renew Energ* **34**,2172–7.
- Godiganur, S. Murthy, CHS. Reddy, RP.**, 2010. Performance and emission characteristics of a Kirloskar HA394 diesel engine operated on fish oil methyl esters”. *Renew Energy*, **35**, 355–9.
- Goerist, P. Fillitt, R. Thevenol, F. Driver, J.H. and Bruyas, H.**, 1982. *Mater. Sci. Eng.*, Vol 55, p 9-19
- Goering, C.**, 1992. *Engine and Tractor Power*, Breton Publishers, Boston, Massachusetts,
- Golozar, M. A.**, 2001. Effects Of Boronising On Fatigue Life Of Plain Carbon And Low Alloy Cr–Mo Steels, *Surface Engineering*, **17**, 1, 61-65.
- Guru, M. Koca, A. Can, O. Çınar, C. Şahin, F.**, 2010. Biodiesel production from waste chicken fat based sources and evaluation with Mg based additive in a diesel engine. *Renew Energ* **35**:637 43.
- Gümüş, M. Kasifoglu, S.**, 2010. Performance and emission evaluation of a compression ignition engine using a biodiesel (apricot seed kernel oil methyl ester) and its blends with diesel fuel. *Biomass Bioenerg* **34**,134–9.
- Güneş, İ., Taktak, S.**, 2012. Surface Characterization of Pack And Plasma Paste Boronized of 21NiCrMo2 Steel, *J. Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.* In Press, **Vol:27**,No:1, 99-108,
- Güneş, E. Demirel, Ç., Toprak, G., Çetin, M., Gül, F.** 2011. GGG 50 Malzemenin Abrasif Aşınma Davranışına Borlamının Etkisi, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, 16-18 May, Elazığ, Turkey
- Haas, M.J., Michalski, P.J., Runyon, S., Nunez, A., and Scott, K.M.**, 2003. Production of FAME from acid oil, a by-product of vegetable oil refining, *J. Am. Oil Chem. Soc.* **80**, **1**, 97-102.

- Habig, K.H. and Chatterjee-Fischer, R.,** 1981. *Tribol. Int.*, **Vol 14 (No. 4)**, p 209-215
- Haciseferoğulları, H. ve Sonmete, M.H.,** 2010. “Kabak Çekirdeği Harman Makinesinin Performansının Belirlenmesi”, *Selçuk Üniversitesi Selçuk Tarım ve Gıda Bilimleri Dergisi*, **24(3)**, 69-74.
- Hallems, B.,** 1994. Thermodynamic Reassessment and Calculation of the Fe-B Phase Diagram, *Z. Metallkd.*, **Vol. 85**, p 676-682
- Haşimoğlu, C. Ciniviz, M. Ozsert, İ. İcingur, Y. Parlak, A. Salman, MC.,** 2008 Performance characteristics of a low heat rejection diesel engine operating with biodiesel *Renew Energy*; **33**:1709–15
- Hansen, KF. Jensen, MG.,** 1997. Chemical and biological characteristics of exhaust emissions from a DI diesel engine fuelled with rapeseed oil methyl ester (RME). *SAE paper* 971689
- Hazar H.,** 2011. Characterization and effect of using cotton methyl ester as fuel in a LHR diesel engine. *Energy Convers Manage* **52**:258–63.
- Hazar, H.,** 2010. “Cotton methyl ester usage in a diesel engine equipped with insulated combustion chamber.” *Appl Energy* **87**:134–40.
- Hazar, H.,** 2009. Effects of biodiesel on a low heat loss diesel engine *Renew Energy*, **34**, 1533–7.
- Hazar, H.,** 2009. Effects of biodiesel on a low heat loss diesel engine.” *Renew Energy* **34** 1533–7
- Hazar, H. Öztürk, U.,** 2010. The effects of Al₂O₃–TiO₂ coating in a diesel engine on performance and emission of corn oil methyl ester. *Renew Energy*; **35**:2211–6
- Heinman, Robert B.,** 1996. “Plasma Spray Coating” VCH Verlag, ISBN 3-527-29430-9,
- Hejwowski, T. Weronki, A.,** 2002. The effect of thermal barrier coatings on diesel engine performance. *Vacuum* **65**:427–32.
- Hickman, AJ. Graham, MA.,** 1993. Performance related exhaust emissions from heavy duty diesel engines. *Sci Total Environ*; **134**:211–23.
- Hunger, H., True, G.,** 1994. Boronizing to Produce Wear-resistant Surface Layers. *Heat Treatment of Metals*, **2**, 31-39.
- İşcan, B. Aydın, H.,** 2012. Improving the usability of vegetable oils as a fuel in a low heat rejection diesel engine. *Fuel Process Technol.* **98**:59–64.
- Janardhan, N. Krishna, MVSM. Uhasri, P. Murthy, PVK.,** 2013. Control of exhaust emissions of jatropha oil in crude form and biodiesel from high grade low heat rejection diesel engine. *Int J Mech Prod Eng Res Dev*; **3**:199–212.
- Jain, S. Sharma, MP. Rajvanshi, S.,** 2008. Evaluation of engine performance on biodiesel from waste cooking oil. In: *World multi-conference on systemics, Cybernetics & Informatics under Energy, Informatics & Cybernetics*. Orlando, Florida, USA; June 29–July 2,
- Jinlin, Xue. Grift, Tony E. Hansen, Alan C.,** 2011. Effect of biodiesel on engine performances and emissions *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **15** 1098–1116

- Kadayifçılar, S. ve Acar, A.**, 1992. *Yakıtlar ve Yanma*, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayın No:1260, Ders Kitabı:362, Ankara,
- Kamo, M. Woods, M. Yamada, T. Mori, M.**, 1980. “Termal Barrier Coating for diesel Engine Piston” *ASME paper* -DGP-14.
- Karakan, M., Alsarar, A., Çelik, A.**, 2002. “Plazma Borlama”, *Mühendis ve Makine*, **512**,
- Karamış M. B.**, 1991. Tribological Behavior of Plasma Nitrided Material Under Dry Sliding Conditions, *Wear*, **147**, 385-399.
- Karaman, Y.**, 2003. Endüstriyel Borlama ve Tekstil Endüstrisinde Bir Uygulama, *Y.Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Ü. Fen Bil. Ens., Isparta. 12.
- Karmakar A., Karmakar S., Mukherjee S.**, 2010. Properties of various plants and feedstocks for biodiesel production, *Biosource Technology*, **101**, 7201-7210.
- Karaosmanoglu, F.**, 2002. *Çevre Dostu-Yenilenebilir Bir Yakıt Adayı: Biyomotorin*, Ekojenerasyon Dünyası-Kojenerasyon Dergisi, ICC120 Özel Sayısı, p:50-56, Nisan 2002, İstanbul.
- Karabektas M.** 2009. The effects of turbocharger on the performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel”. *Renew Energy* **34**:989–93.
- Karabektas M.**, 2009. The effects of turbocharger on the performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel.” *Renew Energ*; **34**:989–93.
- Keskin, A. Guru, M. Altıparmak, D.**, 2008. Influence of tall oil biodiesel with Mg and Mo based fuel additives on diesel engine performance and emission”. *Bioresource Technol*; **99**:6434–8.
- Kistler, R.B., Helvacı, C.**, 1994. Boron and Borates. *Industrial Minerals and Rocks*, 6. Edition, Society of Mining, Metallurgy and Exploration Inc., 171-186.
- Kimura, S. Matsui, Y. Itoh, T.**, 1992. Effects of Combustion Chamber Insulation on the Heat Rejection and Thermal Efficiency of Diesel Engines”, *SAE Paper* No. 920543,
- Kim, H. Choi, B.**, 2010. The effect of biodiesel and bioethanol blended diesel fuel on nanoparticles and exhaust emissions from CRDI diesel engine. *Renew Energy*; **35**:157–63.
- Kiolin, I.N. Volkov, V.A. Aliev, A.A. and Kucznietsov, A.G.**, 1970. *Steel USSR*, **Vol 7** (No.1), p 53-54
- Klopfenstein, W.E., Walker, H.S.**, 1983. Efficiencies of Various esters of fatty acids as diesel fuels. *JAACS* **60(8)**: 1596–1598.)
- Komisyon(a).**, 2002. “Bor Stratejik Bir Madendir”, *Bilim ve Ütopya Dergisi*, s.94
- Komisyon(b)**, 2003. “Bor Raporu”, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası,
- Kocakuşak S., Yalaz N., Kalafatoğlu E.**, 1986. Bor Mineralleri ve İnorganik Bileşikleri. TÜBİTAK –MAE Kimya Araştırma Bölümü Yayını, No:185, 7-13.
- Komutsu, N. Obayashi, M. and Endo, J.**, 1974. *J. Jpn. Inst. Met.*, **Vol 38**, p 481-486
- Kunst, H. ve Schaaber, O.**, 1967. *Härt.-Tech. Mitt.*, **Vol 22**, Translation HB 7122-III, p 275-292
- Körbitz, W.**, 1999. Biodiesel Production in Europa and North America an Encouraging Prospect, *Renewable Energy*, **Vol.16**, 1078-1083.
- Krawczyk, T.**, 1996. Biodiesel-Alternative Fuel Makes Inroads but Hurdles Remain, *Inform*, **vol. 7(8)**, pp.800-815,
- Kutlar, O., Ergeneman, M., Arslan, H. ve Mutlu, M.**, *Taşıt Egzozundan Kaynaklanan Kirleticiler*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.
- Labeckas, G. Slavinskas, S.**, 2006. The effect of rapeseed oil methyl ester on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions”. *Energ Convers Manage* **47**, 1954–67
- Lang E.**, 1986. Boronizing, *Coating for High Temperature Applications*, 417- 422, U.S.A.
- Lapuerta, M. Armas, O. Rodriguez-Fernandez, J.**, 2008. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Prog Energy Combust Sci*; **34**, 198–223.
- Lapuerta, M. Herreros, JM. Lyons, LL. Garcia-Contreras, R. Brice, Y.**, 2008. “Effect of the alcohol type used in the production of waste cooking oil biodiesel on diesel performance and emissions.” *Fuel*; **87**, 3161–9.

- Last, R.J. Kruger, M. Durnholz, M.**, 1995. Emissions and performance characteristics of a 4 stroke, direct injected diesel engine fueled with blends of biodiesel and low sulfur diesel fuel. *SAE paper*, 95005
- Leung D.Y.C., Wu X., Leung M.K.H.**, 2010. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification, *Applied Energy*, **87**, 1083–1095
- Lertsathapornsuka, V. Pairintrab, R. Aryasukb, K. Krisnangkura, K.**, 2008. Microwave assisted in continuous biodiesel production from waste frying palm oil and its performance in a 100kW diesel generator. *Fuel Process Technol* **89**:1330–6.
- Liluentel, W. Tacikowski, J. and Senatorski, J.**, 1983. Proceedings of Heat Treatment 81, *The Metals Society*, P 193-197
- Lin, B-F. Huang, J-H, Huang, D-Y.**, 2009. Experimental study of the effects of vegetable oil methyl ester on DI diesel engine performance characteristics and pollutant emissions". *Fuel*; **88**,1779–85
- Lu, M.J.**, 1983. Die Bildungs Und Wachstums Kinetik Monophsiger Boridschichten. *HTM*, **38**, 156-168
- Lugscheider, E. Jokiel, P.**, 1993. Plasmaspritzen- Verfahren, Anwendungen, Entwicklungen, *Metall Heft 3*, 230-235,
- Lujan, JM. Bermudez, V. Tormos, B. Pla, B.**, 2009. Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle: Performance and emissions (II). *Biomass Bioenerg* **33**, 948–56.
- Ma, S., Xinga, J., Liu, G., Yi, D., Fu, H., Zhang, J., Li, Y.**, 2010. Effect of chromium concentration on microstructure and properties of Fe–3.5B alloy *Materials Science and Engineering A* 527: 6800–6808,
- Márquez-Herrera, A. Fernandez-Muñoz, J.L. Zapata-Torres, M., Melendez-Lira, M., Cruz-Alcantar, P.**, 2014. Fe₂B coating on ASTM A-36 steel surfaces and its evaluation of hardness and corrosion resistance" *Surface & Coatings Technology* **254**, 433–439
- Massalski Th. B.**, 1986. Binary Alloy Phase Diagrams. ASM, Metals Park, Ohio
- Matuschka A.G.**, 1980. *Boronizing*. Carl Hanser Verlag, 100s, München
- Meng, X. Chen, G. Wang, Y.**, 2008. Biodiesel production from waste cooking oil via alkali catalyst and its engine test. *Fuel Process Technol* **89**,851–7.
- Miyairi Y.** 1989. Computer simulation of an LHR DI Diesel engine. *Society of Automotive Engineers* 880187,
- Motojima, S. Maeda, K. and Sugiyama, K.**, 1981. *J. Less-Common Met.*, **Vol81**, ,p 267-272
- Modi, A. Gosai, D.**, 2010. Experimental study on thermal barrier coated diesel engine performance with blends of diesel and palm biodiesel. *SAE Int J Fuel Lubricants* 3:246–59.
- MohamedMusthafa, M. Sivapirakasam, S. Udayakumar, M.**, 2011. Comparative studies on fly ash coated low heat rejection diesel engine on performance and emission characteristics fueled by rice bran and pongamia methyl ester and their blend with diesel. *Energy* **36**, 2343–51
- Mohamedmusthafa, M. Sivapirakasam, S. Udayakumar, M. Balasubramanian, K.**, 2012. Effects of Al₂O₃ coating on diesel engine performance, combustion, and emission characteristics fueled by pongamia methyl ester and its blends with diesel." *Environ Progress Sustain Energy* **31**,147–56.
- Monyem, A. Gerpen, JHV.**, 2001. The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emission. *Journal of Biomass and Bioenergy* **20**:317–25
- Murillo, S. Miguez, JL. Porteiro, J. Granada, E. Moran, JC.**, 2007. Performance and exhaust emissions in the use of biodiesel in outboard diesel engines. *Fuel* 86:1765–71.
- Nabi, MN. Najmul Hoque, SM. Akhter, MS.**, 2009. Karanja (Pongamia Pinnata) biodiesel production in Bangladesh, characterization of karanja biodiesel and its effect on diesel emissions". *Fuel Process Technol*; **90**:1080–6.

- Nair, F. Karamış, M.B. Taşdemirci, A.,** 2000. Endüstriyel Uygulamalarda Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışının İncelenmesi. 8. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, 334-343, Denizli
- Nakpong, P., Wootthikanokkhan, S.,** 2010. High free fatty acid coconut oil as a potential feedstock for biodiesel production in Thailand , *Renewable Energy*, **Volume 35, 8**, 1682-1687.
- Nas, S., Gökalp, H. ve Unsal, M.,** 1992. *Bitkisel Yağ Teknolojisi*, Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi, Erzurum,
- Ninham, A.J. and Hutchings, I.M.,** 1989. *Wear of Materials*, **Vol 1**, p 121-127
- ODTÜ Petrol araştırma merkezi (PAM) 2005-2006. biyodizel numune analiz sonuçları**
- Oliveira, J.F.G., Lucena, I.L., Saboya, R.M.A., Rodrigues, M.L., Torres, A.E.B., Fernandes, F.A.N., Cavalcante, C.L., Parente, E.J.S.,** 2010. Biodiesel production from waste coconut oil by esterification with ethanol: The effect of water removal by adsorption , *Renewable Energy*, **35, 11**, 2581-2584.
- Oliver, W.C., Pharr, G.M.,** 1992. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *J. Mater. Res.* **7 (6)**, 1564–1583.
- Öner, C. Hazar, H. Nursoy, M.,** 2009. Surface properties of CrN coated engine cylinders. *Mater Des*; **30**:914–20.
- Özçimen D., Kardaşlar D., Çulcuoğlu E., ve Karaosmanoğlu F.,** 2000. Biyomotorin Nedir? *III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, İTÜ, İstanbul, 15-17 Kasım
- Özdemir. F, Gölükçü. M, Topuz. A,** 2003. Yer Fıstığının(*Arachis Hypogaea*) Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri ve Fıstık Kavurmada Mikro Dalga Uygulamasının Yağ Asitleri Bileşimi Üzerine Olan Etkisi *Gıda* **28 (1)**: 39-45
- Özel, S., Somunkıran, İ., Kurt, B.** 2006. Düşük Karbonlu Çelik Yüzeyine FeCr+Mo Tozunun PTA Yöntemi İle Alaşımlandırılması, *11. Uluslararası Malzeme Sempozyumu*, 329-332, Denizli.
- Özmen Y., Çetincan A.,** 1992. Borlamanın Çeliklerde Aşınma Dayanımına Etkisi, *5. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi*, 583-591, Ankara.
- Ozsezen, AN. Canakci, M. Turkcan, A. Sayin, C.,** 2009. Performance and combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with waste palm oil and canola oil methyl esters. *Fuel* **88**:629–36.
- Özsoy A.,** 1988. Termal Çevrimli Borlama Uygulamaları, *Doktora Tezi*, A.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir,
- Özsoy, A.,** 2001. Borlama ile İlgili Genel Bir Değerlendirme, *Endüstriyel Yüzey Teknolojileri* , **22**, 10-13.
- Öztürk, U.,** 2010. Seramik Kaplanmış Bir Dizel Motorunda Biyodizel Kullanımının Deneysel Olarak İncelenmesi *Yüksek Lisans Tezi* Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Palombarini, G. and Carbucchio, M.,** 1984. “On the morphology of thermochemically produced Fe₂B/Fe interfaces”, *J. Materials Science Letters*, **3**, 791-794
- Palombarini, G. M. Carbucchio, and L. Cento,** 1984. *J. Mater. Sci.*, **Vol 19**, , p 3732
- Parlak, A. Sahin, B. Yasar, H.,** 2004. Performance optimisation of an irreversible dual cycle with respect to pressure ratio and temperature ratio-experimental results of a ceramic coated IDI Diesel engine. *Energy Convers & Manage*; **45**:1219–32.

- Parlak, A. Yasar, H. Sahin, B.,** 2003. Performance and exhaust emission characteristics of a lower compression ratio LHR Diesel engine. *Energy Convers & Manage* **44**,163–75
- Pawlowski, L.,** 1995. “*The Science and Engineering of Thermal Spray Coating*”, Wiley & Sons, New York, NY,
- Pinto, AC, Guarieiro, LLN. Rezende, MJC. Ribeiro, NM. Torres, EA. Lopes, WA.,** 2005. Biodiesel: an overview. *J Brazil Chem Soc* **16**:1313–30.
- Pokmurskii, V.I. Protsik, V.G. and Mokrava, A.M.** 1980. *Sov. Mater. Sci.*, Vol 10, p 185
- Prakash N., Arul Jose A. , Devanesan M. G. T.,** 2006, “Optimization of Karanja oil transesterification”, *Indian Journal of Chemical Technology* **vol.13**, 505-509.
- Pradeep Kumar, A. Annamalai, K. Premkartikkumar, S.,** 2012. Performance comparison of DI diesel engine and LHR engine with bio diesel as fuel. *Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), International Conference on. IEEE2012.* p. 312–6.
- Prasad, CV. Krishna, MM. Reddy, CP. Mohan, KR.,** 2000. Performance evaluation of nonedible vegetable oils as substitute fuels in low heat rejection diesel engines. *Proc Inst Mech Eng, Part D: J Automob Eng*; **214**:181–7.
- Process Data Sheet 4 (PDS-4),** “*Boroalloy Process*”, Lindberg Heat Treating Company
- Puhan, S. Vedaraman, N. Ram, BVB. Sankarnarayanan, G. Jeychandran, K.,** 2005. Mahua oil (Madhuca Indica seed oil) methyl ester as biodiesel-preparation and emission characteristics. *Biomass Bioenergy*, **28**, 87–93
- Puhan, S. Vedaraman, N. Sankaranarayanan, G. Bharat Ram, BV.** 2005. Performance and emission study of Mahua oil (Madhuca indica oil) ethyl ester in a 4-stroke natural aspirated direct injection diesel engine. *Renew Energ*,**30**, 1269–78.
- Qi, DH. Geng, LM. Chen, H. Bian, YZH. Liu, J. Ren, XCH.,** 2009. Combustion and performance evaluation of a diesel engine fueled with biodiesel produced from soybean crude oil.” *Renew Energy*, **34**,2706–13
- Raheman, H. Ghadge, SV.,** 2007. Performance of compression ignition engine with mahua (Madhuca indica) biodiesel”. *Fuel*,**86**,2568–73.
- Raheman, H.,** 2004. Diesel engine emissions and performance from blends of Karanja methyl ester and diesel. Elsevier. *Biomass Bioenerg*, **27**, 393–7
- Raheman, H., Phadatar, AG.,** 2004. Diesel engine emissions and performance from blends of karanja methyl ester and diesel. *J Biomass Bioenerg* **27**:393–7.
- Rajan, K. Kumar, K.,** 2011. Combustion and emission characteristics of a biodiesel fuelled diesel engine with the effect of thermal barrier coated internal jet piston”. In: *Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011), International Conference on.* IET p. 184–9.
- Rajendra Prasath, B. Tamilporai, P. Shabir, MF.,** 2010. Analysis of combustion, performance and emission characteristics of low heat rejection engine using biodiesel. *Int J Therm Sci* **49**,2483–90.
- Ramadhas, A.S. Muraleedharan, C. Jayaraj, S.,** 2005. Performance and emission evaluation of a diesel engine fueled with methyl esters of rubber seed oil” *Renewable Energy* **30**, 1789–1800
- Rao, GLN. Sampath, S. Rajagopal, K.,** 2008. Experimental studies on the combustion and emission characteristics of a diesel engine fuelled with used cooking oil methyl ester and its diesel blends. *International Journal Engineering and Applied Sciences* **4**:64–70.
- Reddy, CS. Domingo, N. Graves, RL.,** 1990. Low Heat Rejection Engine Research Status: Where Do We Go from Here?” *SAE paper* no. 900620.

- Russell, M.F., Greeves G. and Guerrassi, N.,** 2000. "More Torque, Less Emissions and Less Noise", *SAE paper*, No: 2000-01-0942.
- Safgönül, B., Ergeneman, M., Arslan, H., H. ve Soruşbay, C.,** 1995 *İçten Yanmalı Motorlar*, Birsen Yayınevi, İstanbul,
- Sahoo, PK. Das, LM. Babu, MKG. Arora, P. Singh, VP. Kumar, NR.** 2009. Comparative evaluation of performance and emission characteristics of jatropha, karanja and polanga based biodiesel as fuel in a tractor engine. *Fuel* **88**:1698–707.
- Samsonov, G.V. and Epik, A.P.,** 1966, in *Coatings on High Temperature Materials, Part I*, H.H. Hausner, Ed., Plenum Press, p 7-11
- Saravanan, N. Nagarajan, G., Sukumar Puhan.,** 2010. "Experimental investigation on a DI diesel engine fuelled with Madhuca Indica ester and diesel blend" *biomass and bio energy* **34** 838 – 843
- Sarıkaya, Ö., Anık, S., Çelik, E.** 2004. Plazma Püskürtme Yöntemiyle Al-%12 Si Ana Malzemesi Üzerine Al-Si+B4C Kaplamaların Hazırlanması ve Kaplama Özelliklerinin İncelenmesi, *10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi*, 325- 332, Denizli.
- Schwarz, E. Reid, M. Bryzik, W. Danielson, E.** 1993. Combustion and Performance Characteristics of a Low Heat Rejection Engine, *SAE Paper* No. 930988
- Scholl, KW. Sorenson, SC.,** 1993. Combustion of soybean oil methyl ester in a Direct Injection Diesel Engine *Society of Automotive Engineers paper* No. 930934,
- Schinas, P., Karavalakis, G., Davaris, C., Anastopoulos, G., Karonis, D., Zannikos, F., Stournas S. ve Lois E.,** 2009. "Pumpkin (Cucurbita pepo L.) Seed Oil as an Alternative Feedstock for the Production of Biodiesel in Greece", *Biomass and Bioenergy*, **33**, 44–49.
- Selam M.,** 1996. Borlanmış Gri Dökme Demirin Aşınma Davranışlarının Deneysel Araştırılması, *Y.Lisans Tezi*, Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri,
- Selçuk B.,** 1994. Borlanmış AISI 1020 ve AISI 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, Erciyes Ü. Fen Bil. Ens., Kayseri,
- Selvam, D.J.P. and Vadivel, K.** 2012. Performance and emission analysis of DI diesel engine fuelled with methylesters of beef tallow and diesel blends. *Procedia Engineering* **38** 342 – 358
- Senatore, A. Cardone, M. Rocco, V. Prati, MV.,** 2000. A comparative analysis of combustion process in D.I. Diesel engine fueled with biodiesel and diesel fuel. *SAE paper*, 2000-01-0691
- Senthil, KM. Ramesh, A. Nagalingam, B.,** 2003. An experimental comparison of methods to use methanol and jatropha oil in a compression ignition engine. *J Biomass Bioenerg* **25**:309–18.
- Sevimligül, E.,** 2003. Çil Döküm ve Çelikten Yapılmış Kam Millerindeki Aşınmanın İncelenmesi. *Y.Lisans Tezi*, Cumhuriyet Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, 69s
- Shaheed, A. Swain, E.,** 1999. Combustion analysis of coconut oil and its methyl esters in a diesel engine. *Proc I MECH E Part A J PowerEnergy* 213(5):417–25.
- Sharma, D. Soni, SL. Mathur, J.,** 2009. Emission reduction in a direct injection diesel engine fueled by neem-diesel blend. *Energy Source Part A* 31:500–8.
- Shailendra, S., Agarwal, AK. Sanjeev, G.,** 2008. Biodiesel development from rice bran oil Transesterification process optimization and fuel characterization , **49**, 1248-1257.
- Sharanappa Godiganur , C.H. Suryanarayana Murthy , Rana Prathap Reddy** 2009. 6BTA 5.9 G2-1 Cummins engine performance and emission tests using methyl ester mahua (Madhuca indica) oil/diesel blends. *Renewable Energy* **34** 2172–2177

- Shi, X. Yu, Y. He, H. Shuai, S. Wang, J. Li, R.,** 2005. Emission characteristics using methyl soyate–ethanol–diesel fuel blends on a diesel engine”. *Fuel* **84**:1543–9.
- Sighnal, S.C.,** 1977. “A hard diffusion boride coating for ferrous materials”, *Thin Solid Films*, **45**, 321-329.
- Smit. J.J.,** 1984. Deift University of Technology, Laboratory of Metals, *unpublished research*,
- Soydan, Y.,** 1996. Katı ortamda bor yayınımları ile sertleştirilen çelik yüzeylerinin kuru kayma halinde sürtünme ve aşınma davranışları, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Srivastava, P.K. Madhumita Verma** 2008. Methyl ester of karanja oil as an alternative renewable source energy *Fuel* **87** 1673–1677
- Srivastava, A. and Prasad,R.,** 2000. Triglycerides-based Diesel Fuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **Vol.4**, pp.111-133,
- Stachowiak, G.W. and Andrew, W.B.,** 2001. *Engineering Tribology*, Butterworth Heinemann, US.
- Sudhakar, V.,** 1984. Performance Analysis of Adiabatic Engine, *SAE Paper* No. 840431,
- Sudhir, CV. Sharma, NY. Mohanan, P.,** 2007. Potential of waste cooking oils as biodiesel feedstock. *Emirates Journal for Engineering Research* 12:69–75.
- Sukumar Puhana, N. Vedaramana, Boppana V.B. Rama, G. Sankarnarayananb, K. Jeychandranb.,** 2005. Mahua oil (Madhuca Indica seed oil) methyl ester as biodiesel-preparation and emission characteristics *Biomass and Bioenergy* **28**, 87–93
- Sukumar Puhana, G. Nagarajan , N. Vedaraman & B.V. Ramabramham.,** 2007. Mahua Oil (Madhuca Indica Oil) Derivatives as a Renewable Fuel for Diesel Engine Systems in India: A Performance and Emissions Comparative Study” *International Journal of Green Energy*, **4:1**, 89-104
- Sukumar Puhana, R. Jegan, K. Balasubbramanian, G. Nagarajan.,** 2009. Effect of injection pressure on performance, emission and combustion characteristics of high linolenic linseed oil methyl ester in a DI diesel engine. *Renewable Energy* **34**, 1227–1233
- Silva, I.C., Sanchez, E.H., Castro, G.R., Pulido, A.R., Carcia, C.L., Dominguez, M.O.,** 2011. Indentation size effect on the Fe₂B /substrate interface, *Surface & Coatings Technology* 206, 1816-1823.
- Silva, I.C., Sanchez, E.H., Castro, G.R., Cimenoglu, H., Sanches, J.L.N., Amador, A.M., Espinoza, R.C.,** 2013. A study of indentation for mechanical characterization of the Fe₂B layer, *Surface & Coatings Technology* 232, 173-181.
- Smolka, K.,** 1985. “*Thermisches Spritzen*” DVS-Verlag, 50-57,
- Şahin, S., Meriç C.,** 2002. Investigation of the effect of Boronizing on Cast Irons, *Materials Research Bulletin* 37, pp. 971-979,
- Şen U.,** 1997. Küresel Grafitli Dökme Demirin Borlanması ve Özellikleri, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,
- Şen, U. Şen, S. Yilmaz, F.,** 2004. Effect of copper on boride layer of boronized ductilecast irons *Vacuum* **72**, 199–204,
- Taşcı, A.,** 1993. Borlanmış Çeliklerin Aşınma ve Korozyon Dayanımları, *Y.Lisans Tezi*, İstanbul Ü. Fen Bil. Ens., İstanbul, 45.

- Taymaz I, Mimaroglu A, Avcı E, Ucar V, Gur M.** 1999. Comparison of thermal stresses developed in Al₂O₃-SG, ZrO-(12% Si + Al) and ZrO₂-SG thermal barrier coating systems with NiAl, NiCrAlY and NiCoCrAlY interlayer materials subjected to thermal loading. *Surf Coat Technol*, **116**, 690–3.
- Taymaz I.** 2006. An experimental study of energy balance in low heat rejection diesel engine *Energy*, **31**, 364–71.
- Taymaz I, Cakir K, Gur M, Mimaroglu A.** 2003. Experimental investigation of heat losses in a ceramic coated diesel engine. *Surf Coat Technol*. **169**:168–70
- TMMOB Bor Raporu**, 2003. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 2003. Bor Raporu, *Metalurji Dergisi*, 134, 11-72
- Tsipas D.N., Rus J.,** 1987. Boronizing of Alloys Steels, *J.Materials Science Letters*, **6**, 118-120.
- Tsolakis A.** 2006. Effects on particle size distribution from the diesel engine operating on RME-biodiesel with EGR. *Energy Fuels* 10.1021/
- Tsolakisa, A. Megaritis, A. Wyszynski, ML. Theinnoi, K.,** 2007. Engine performance and emissions of a diesel engine operating on diesel-RME (rapeseed methyl ester) blends with EGR (exhaust gas recirculation). *Energy* **32**,2072–80.
- Turhan, A.** 2008. Borlamanın Paslanmaz çeliğin Radyasyon Zırhlama Özelliğine Etkisinin Araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, SDÜ Fen Bilimleri Enst.
- Türktekin M.,** 1998. H13 Sıcak İş Takım Çeliklerine Borlama ve Nitrüleme İşlemlerinin Birlikte Uygulanması. Erciyes Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, *Y.Lisans Tezi*, 79s, Kayseri
- Turrio-Baldassarri, L. Battistelli, CL. Conti, L. Crebelli, R. De Berardis, B. Iamiceli AL,** 2004. Emission comparison of urban bus engine fuelled with diesel oil and biodiesel blend. *Sci Total Environ* 327:147–62
- Ulusoy Y.,** 2000. Kullanılmış Ayçiçek Yağı Metil Esterinin Alternatif Yakıt Olarak Kullanım Olanakları, *III. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, İTÜ, İstanbul, 15-17 Kasım
- Ulusoy Y, Arslan R, Kaplan C.** 2009. Emission characteristics of sunflower oil methyl ester. *Energ Source Part A* **31**, 906–10.
- Ulusoy, Y. Tekin, Y. Çetinkaya, M. Kapaosmanoğlu, F.,** 2004. The engine tests of biodiesel from used frying oil. *Energ Source Part A*; **26**:927–32
- Usta, N. Ozturk E. Can, O. Conkur, ES. Nas, S.** 2005. Combustion of biodiesel fuel produced from hazelnut soapstock/waste sunflower oil mixture in a diesel engine. *Energ Convers Manage* **46**,741–55.
- Uyar, T.,** 1992. *Organik Kimya*, Güneş Kitabevi, İstanbul
- Uzun, H. A.,** 2002. Borlama ile Yüzeyleri Sertleştirilen Çeliklerin Aşınma ve Korozyona Karşı Dayanımları, *Y.Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Ü. Fen Bil. Ens., Isparta,
- Uzun, A. Cevik, I. Akcil, M.,** 1999. Effects of thermal barrier coating on a turbocharged diesel engine performance. *Surf Coat Technol* **116**,–119:505–7.
- Utlı Z, Koçak MS.,** 2008. The effect of biodiesel fuel obtained from waste frying oil on direct injection diesel engine performance and exhaust emissions. *Renew Energy*; **33**:1936–41
- Usta N.** 2005. An experimental study on performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with tobacco seed oil methyl ester. *Energ Convers Manage* **46**,2373–86.
- Ültanır, M.Ö.,** 1997. Biomass Enerjiye Genel Bakış, *Termodinamik Dergisi*, Ankara, 25, 1- 40,

- Ünlü B., S.** 2004. Kaymalı Yataklarda Tribolojik Özelliklerin ve Borlanmış Demir Esaslı Malzemelerin Yatak Olarak Kullanılabilirliğinin Belirlenmesi, *Doktora Tezi* C.B.Ü Fen Bil. Enst. Manisa,
- Üstel,F.,Yüksek,E.,Altuncu,E.,** 2006. Plazma sprey Kaplama Uygulamaları ve Teknolojik Uygulamaları Galvanoteknik Dergisi Kasım-Aralık 2006/06, , **Kasım -Aralık Sayısı**, 44-49,
- Üstel F.** 1995. Plazma Sprey Kaplama Teknolojisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik. Üniversitesi, Fen Bilimleri, İstanbul,
- Vellguth G.** 1983. Performance of vegetable oils and their monoesters as fuels for diesel engines. *Society of Automotive Engineers paper* No-831358,
- V.A. Volkov and A.A. Aliev.,** 1975, *Steel USSR*, **Vol 5 (No.3)**, p 180-181
- Wu F, Wang J, Chen W, Shuai S.** 2009.A study on emission performance of a diesel engine fueled with five typical methyl ester biodiesels. *Atmos Environ* **43**:1481–5.
- Yamık, H.,** 2002. Dizel Motorlarında Alternatif Yakıt Olarak Yağ Esterlerinin Kullanılma İmkanlarının Araştırılması, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara,
- Yan, P.X., Song, Q.M., Xu, J.W., Wu, Z.G., Zhang, X.M.,** 2001. “Hightemperature behavior of the boride layer of 45# carbon steel”, *Materials Chemistry and Physics*, **71**, 107–110.
- Yapar, U.,** 2003. Düşük ve orta karbonlu çeliklerin termokimyasal borlama ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, *Y. Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, F., Uzun, O., Kölemen, U., Kılıçaslan, M.F., Başman, N., Ergen, S., Öztürk, K., Yanmaz, E.,** 2013. Nanoindentation study on Gd deposited YBaCuO superconductor, *Bull. Mater. Sci.*, **36 (7)** 1139-1145.
- Yoshiyuki, K. Changlin, Y. Kei, M.,** 2000. Effects of fuel properties on combustion and Emission characteristics of a Direct injection Diesel Engine,” *Society of Automotive Engineers paper* No. -01-1831, 2000
- Yünker U.,** 2000. Borlanmış Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi. Celal Bayar Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, *Y.Lisans Tezi*, 161s, Manisa
- Zabeti M., Wan Daud W.M.A., Aroua M.K.,** 2009, Activity of solid catalysts for biodiesel production A review, *Fuel Process. Technol.*, **90**, 770-777.
- Zhu L, Zhang W, Liu W, Huang Z.,**2010. Experimental study on particulate and NOx emissions of a diesel engine fueled with ultra low sulfur diesel, RME-diesel blends and PME-diesel blends. *Sci Total Environ* **408**,1050–8.

URL-1, <http://istil.univ-lyon1.fr/english/materiaux.html>.

URL-2,2011. www.periodensystem.net.de (Son Erişim 05.07.2011).

URL-3,2014. <http://bortec.de/en/boronizing.html>

URL-4,2010.<http://www.beslenmebulteni.com>, 14 Kasım 2010.

URL-5,2014.http://tr.wikipedia.org/wiki/Yer_f%C4%B1st%C4%B1%C4%9F%C4%B1

URL-6,2014.http://www.eie.gov.tr/biyoenjeri/02-biyodizel/bd_nedir.html

URL-7,2014. <http://www.textara.com/biodizel-biyodizel-yakit-nasil-yapilir-uretilir-teknik?page=0%2C0>

URL-8-2014.http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi144/d144_4152.pdf

URL-9-1999.<http://www.cytoculture.com/Biodiesel%20Handbook.htmS>

ÖZGEÇMİŞ

1978 Turhal/Tokat doğumluyum. İlk ve ortaokul eğitimimi Van'da tamamladım. Lise eğitimimi İzmit'te STFA Anadolu Teknik Lisesinde tamamladıktan sonra lisans eğitimimi 2002 yılında Sakarya Üniversitesinde bitirdim. Yüksek lisans eğitimimi 2010 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi / Otomotiv bölümünde tamamladım. Doktora eğitimime 2010 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi/Otomotiv bölümünde başladım. Aynı zamanda mühendislik tamamlama öğrencisi olarak Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümüne devam etmekteyim. Evliyim, Tokat'ta ikamet etmekteyim.