

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİESEL MOTORUNDA YAĞ KATKILARININ SİLİNDİR  
YÜZEYİNDE OLUŞTURDUĞU KORUMA ETKİNLİĞİ**

**DİLEK BEKTAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ENERJİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
PROF. DR. HAKAN KALELİ**

**İSTANBUL, 2011**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİSEL MOTORUNDA YAĞ KATKILARININ SİLİNDİR  
YÜZEYİNDE OLUŞTURDUĞU KORUMA ETKİNLİĞİ**

Dilek BEKTAŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 15.06.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Prof. Dr. Hakan KALELİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Hakan KALELİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. İrfan YAVAŞLIOL  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. H. Ertuğrul ARSLAN  
İstanbul Teknik Üniversitesi

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## ÖNSÖZ

---

Tez süresince çok değerli bilgi ve tecrübelerini paylaşarak beni yönlendiren ve yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hakan KALELİ'ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında yapılan çalışmalar "Journal of the Balkan Tribological Association" dergisinin 2011 yılı 17. sayısında "Effect of Additive Level on the Surface of Diesel Engine Cylinder Liner" konu başlığı ile yayınlanmış ve Sırbistan'da 11 – 13 Mayıs tarihleri arasında düzenlenen "12. Uluslararası Triboloji Konferansı"nda ise "Comparison of Additive's Protective Layer on the Cylinder Liner Surface Using Diesel Engine and Pin on Plate Test Rigs" konu başlığı ile sunulmuştur.

Bu tez çalışmasının gerçekleşmesinde yardımlarını esirgemeyen Piri Reis Üniversitesi Denizcilik Fakültesi Dekanı Prof. Dr. Süleyman ÖZKAYNAK'a, değerli çalışma arkadaşlarım Ahmet MERT ve Sarper ÖZKAYNAK'a, Antor Motor'dan Kadir SESLİ'ye, Total firmasından Ayşegül ÇELİKKESEN'e, Diesel motor test düzeneği imkanlarından dolayı Piri Reis Üniversitesi'ne, Fransa-Lyon INSA'da bulunan tribotest düzeneği ve mikroskobik inceleme imkanlarından yararlanmamı sağlayan Prof. Dr. Yves BERTHIER'e ve tez süresince bana sürekli destek olan Erman ERTAŞ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında bana destek olan ve bu çalışmanın tamamlanmasını çok isteyen fakat tez sürecinde kaybettiğim biricik babam Binali BEKTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunar ve bu vesile ile anmak isterim. Ayrıca yine bana olan desteklerini hiç bir zaman esirgemeyen annem Sevim BEKTAŞ'a ve abim Ümit BEKTAŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Haziran, 2011

Dilek BEKTAŞ

## İÇİNDEKİLER

|  | Sayfa |
|--|-------|
| KISALTMA LİSTESİ.....  | vi    |
| ŞEKİL LİSTESİ.....   | viii  |
| ÇİZELGE LİSTESİ.....   | xii   |
| ÖZET.....  | xiii  |
| ABSTRACT.....  | xv    |
| BÖLÜM 1  |       |
| GİRİŞ.....   | 1     |
| 1.1 Literatür Özeti.....   | 2     |
| 1.2 Tezin Amacı.....   | 7     |
| 1.3 Bulgular.....  | 8     |
| BÖLÜM 2.....   | 9     |
| 2.1 Yüzey Koruyucu Katkı Maddeleri.....  | 9     |
| 2.1.1 Aşınma Önleyiciler (Anti-wear, AW) ve Aşırı Basınç Düzenleyicileri (Extreme Pressure, EP)..... | 9     |
| 2.1.2 Korozyon Önleyiciler (Antikorozyon).....   | 10    |
| 2.1.3 Paslanma İnhibitörleri.....  | 10    |
| 2.1.4 Deterjanlar ve Dispersanlar.....   | 10    |
| 2.1.5 Sürtünme Önleyiciler.....  | 10    |
| 2.2 Performans Sağlayıcı Katkı Maddeleri.....  | 11    |
| 2.2.1 Akma Noktası Seyrelticileri.....   | 11    |
| 2.2.2 Viskozite İndeks Arttırıcılar.....   | 11    |
| 2.3 Yağ Koruyucu Katkı Maddeleri.....  | 11    |
| 2.3.1 Oksidasyon Önleyiciler.....  | 11    |
| 2.3.2 Köpük Önleyiciler.....   | 12    |
| BÖLÜM 3  |       |
| MOTOR SİLİNDİR YÜZEYİ DEPOZİTLERİ, ETKİLERİ ve OLUŞUMU.....  | 13    |

## BÖLÜM 4

|                            |    |
|----------------------------|----|
| AŞINMA ÇEŞİTLERİ.....      | 14 |
| 4.1 Abrazyon Aşınması..... | 14 |
| 4.2 Adhezyon Aşınması..... | 15 |
| 4.3 Kazıma Aşınması.....   | 15 |
| 4.4 Korozyon Aşınması..... | 16 |
| 4.5 Yorulma Aşınması.....  | 17 |

## BÖLÜM 5

|  |    |
|--|----|
| DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....                                 | 18 |
| 5.1 Diesel Motor Test Düzeneği.....                      | 18 |
| 5.2 Diesel Motor Performans Testleri.....                | 20 |
| 5.3 Diesel Motor Testi.....                              | 22 |
| 5.4 Pim-plaka Tribotest Düzeneği.....                    | 22 |
| 5.5 Pim-plaka Tribotest Düzeneğinde Yapılan Testler..... | 24 |
| 5.6 Deneylerde Kullanılan Silindir ve Segmanlar.....     | 24 |
| 5.7 Deneylerde Kullanılan Yağlayıcı.....                 | 25 |

## BÖLÜM 6

|                           |    |
|---------------------------|----|
| ANALİZ ÇALIŞMALARINI..... | 27 |
|---------------------------|----|

## BÖLÜM 7

|  |    |
|--|----|
| ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....   | 29 |
| 7.1 22 Saat Çalıştırılmış Diesel Motor Silindir Gömleği (ÜÖN, ON ve AÖN)<br>Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....   | 29 |
| 7.2 Pim-Plaka Tribotest Düzeneğinde Test Edilen Plakaların (A, B ve C)<br>Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....   | 44 |
| 7.3 22 Saat Çalıştırılmış Diesel Motor Silindir Gömleği (ÜÖN, ON ve AÖN)<br>ile Pim-Plaka Tribotest Düzeneğinde Test Edilen Plakaların (A, B ve C)<br>Karşılaştırılması..... | 56 |
| 7.4 22 Saat Çalıştırılmış Diesel Motor Krom Kaplı Segmanın Analiz<br>Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....   | 66 |
| 7.5 Pim-Plaka Tribotest Düzeneğinde Test Edilen Krom Kaplı Segmanın<br>Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....  | 72 |
| 7.6 22 Saat Çalıştırılmış Diesel Motor Krom Kaplı Segmanı ile Pim-Plaka<br>Tribotest Düzeneğinde Test Edilen Krom Kaplı Segmanın Karşılaştırılması ....                      | 76 |

## BÖLÜM 8

|                        |    |
|------------------------|----|
| SONUÇ VE ÖNERİLER..... | 79 |
| KAYNAKLAR.....         | 81 |
| ÖZGEÇMİŞ.....          | 84 |

## KISALTMA LİSTESİ

---

|                                |  |
|--------------------------------|--|
| ACEA                           | Avrupa Otomotiv Üreticileri Birliği (Association of European Automotive Manufacturers) |
| AFM                            | Atomik kuvvet mikroskobu (Atomic force microscope)                                     |
| AÖN                            | Alt ölü nokta (BDC, Bottom dead center)  |
| API                            | Amerikan Petrol Enstitüsü (American Petroleum Institute)                               |
| AW                             | Aşınma önleyici (Anti-wear)  |
| C                              | Karbon   |
| Ca                             | Kalsiyum   |
| CaCO <sub>3</sub>              | Kalsiyum karbonat  |
| Cl                             | Klor   |
| CO <sub>2</sub>                | Karbondioksit  |
| Cr                             | Krom   |
| Cu                             | Bakır  |
| EDX                            | Enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi  |
| EP                             | Aşırı basınç düzenleyici (Extreme pressure)  |
| FE                             | Sonlu elemanlar (Finite elements)  |
| Fe                             | Demir  |
| Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | Demir oksit  |
| INSA                           | Ulusal Uygulamalı Bilim Enstitüsü (Institut National des Sciences Appliquées)          |
| K                              | Potasyum   |
| MD                             | Moleküler dinamiği (Molecular dynamics)  |
| Mg                             | Magnezyum  |
| Mo                             | Molibden   |
| MoS <sub>2</sub>               | Molibden disülfid  |
| Ni                             | Nikel  |
| O                              | Oksijen  |
| ON                             | Orta nokta (MC, Middle center)   |
| P                              | Fosfor   |
| PPM                            | Milyondaki parça sayısı (Part per million)   |
| S                              | Kükürt   |
| SAE                            | Otomotiv Mühendisleri Derneği (Society of Automotive Engineers)                        |
| SEM                            | Tarayıcı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)                            |
| Si                             | Silisyum   |
| TBN                            | Toplam baz sayısı (Total base number)  |
| ÜÖN                            | Üst ölü nokta (TDC, Top dead center)   |

|      |  |
|------|--|
| XPS  | X-ışını foto elektron spektrometresi                   |
| ZDDP | Çinko dialkilditiofosfat (Zinc dialkyldithiophosphate) |
| Zn   | Çinko  |
| ZP   | Çinko dialkilfosfat (Zinc dialkylphosphate)            |

## ŞEKİL LİSTESİ

|           | Sayfa   |
|-----------|---|
| Şekil 4.1 | Tipik bir abrazyon aşınması [35] ..... 15   |
| Şekil 4.2 | Tipik bir adhezyon aşınması [35]..... 15  |
| Şekil 4.3 | Tipik bir kazıma aşınması [36]..... 16  |
| Şekil 4.4 | Tipik bir korozyon aşınması [36]..... 16  |
| Şekil 5.1 | (a) Kontrol paneli ve (b) Diesel motor test düzeneği ..... 18   |
| Şekil 5.2 | Diesel motor test düzeneği blok şeması ..... 19   |
| Şekil 5.3 | Özgül yakıt tüketimi – devir sayısı değişimi..... 21  |
| Şekil 5.4 | Tork – devir sayısı değişimi ..... 21   |
| Şekil 5.5 | Mekanik güç – devir sayısı değişimi..... 22   |
| Şekil 5.6 | INSA’da bulunan pim-plaka tribotest düzeneği..... 23  |
| Şekil 5.7 | (a) Pim-plaka tribotest düzeneği ve (b) plaka üzerindeki segmanın tek yönlü kayma hareketi şematik gösterimi..... 23  |
| Şekil 5.8 | Plakanın (a) perspektif görünüşü ve (b) ölçüleri ..... 24   |
| Şekil 6.1 | (a) Kesim işleminden önce silindir bloğu, (b) tormalama ve dikey kesim işleminden sonra kullanılmamış silindir gömleği ve 22 saat çalıştırılmış motordan çıkarılan silindir gömleği, (c) 22 saat çalıştırılmış silindir gömleği üst ölü noktası, (d) orta nokta ve alt ölü noktanın olduğu gömlek kesiti ..... 27 |
| Şekil 6.2 | Optik mikroskop..... 28   |
| Şekil 6.3 | Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi (EDX) cihazı ..... 28   |
| Şekil 7.1 | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN’nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları ..... 32   |
| Şekil 7.2 | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN’nin x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları ..... 33  |
| Şekil 7.3 | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN’nin x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları ..... 34  |
| Şekil 7.4 | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN’nin x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları ..... 35  |
| Şekil 7.5 | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN’nin x5000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları ..... 36  |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Şekil 7.6  | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                        | 37 |
| Şekil 7.7  | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                       | 38 |
| Şekil 7.8  | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                       | 39 |
| Şekil 7.9  | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                       | 40 |
| Şekil 7.10 | Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x5000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                       | 41 |
| Şekil 7.11 | Diesel motorda test edilen silindir gömleği AÖN'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                       | 42 |
| Şekil 7.12 | Diesel motorda test edilen silindir gömleği AÖN'nin x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                      | 43 |
| Şekil 7.13 | Diesel motor silindir gömleği ÜÖN, ON ve AÖN'nin beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri..... | 44 |
| Şekil 7.14 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                   | 46 |
| Şekil 7.15 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                  | 47 |
| Şekil 7.16 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                  | 48 |
| Şekil 7.17 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                  | 49 |
| Şekil 7.18 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x5000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                  | 50 |
| Şekil 7.19 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                   | 51 |
| Şekil 7.20 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                  | 52 |
| Şekil 7.21 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....                  | 53 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Şekil 7.22 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka C'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....  | 54 |
| Şekil 7.23 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka C'nin x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....   | 55 |
| Şekil 7.24 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A, B ve C'nin beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri.....   | 56 |
| Şekil 7.25 | (a) Diesel motor kullanılmamış silindir gömleği ve (b) kullanılmamış plakanın optik, tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....  | 57 |
| Şekil 7.26 | (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN ve (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın optik ve beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri.....   | 57 |
| Şekil 7.27 | (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN'nin x500 magnifikasyonda, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....   | 58 |
| Şekil 7.28 | (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin optik ve beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin optik ve üç farklı magnifikasyonda (x500, x1000 ve x1500) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri..... | 59 |
| Şekil 7.29 | (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x1000 magnifikasyonda, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....  | 60 |
| Şekil 7.30 | (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği AÖN'nin optik ve iki farklı magnifikasyonda (x500 ve x1000) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka C'nin optik ve iki farklı magnifikasyonda (x500 ve x1500) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri.....                           | 61 |
| Şekil 7.31 | (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği AÖN'nin, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x500 magnifikasyonlarında tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları.....   | 62 |
| Şekil 7.32 | ÜÖN ve Plaka A'nın beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri .....   | 64 |
| Şekil 7.33 | ON ve Plaka B'nin üç farklı magnifikasyonda (x500, x1000 ve x1500) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri.....  | 65 |
| Şekil 7.34 | AÖN ve Plaka C'nin iki farklı magnifikasyonda (x500 ve x1500) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri.....   | 65 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Şekil 7.35 | Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x100 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....   | 67 |
| Şekil 7.36 | Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....   | 68 |
| Şekil 7.37 | Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....  | 69 |
| Şekil 7.38 | Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....  | 70 |
| Şekil 7.39 | Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x5000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....  | 71 |
| Şekil 7.40 | Diesel motor krom kaplı segmanın beş farklı magnifikasyonda (x100, x500, x1000, x2500, x5000) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri.....   | 72 |
| Şekil 7.41 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....   | 73 |
| Şekil 7.42 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....   | 74 |
| Şekil 7.43 | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları .....   | 75 |
| Şekil 7.44 | (a) Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın optik ve beş farklı magnifikasyonda (x100, x500, x1000, x2500 ve x5000) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın optik ve üç farklı magnifikasyonda (x1000, x1500 ve x2500) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri..... | 76 |
| Şekil 7.45 | (a) Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın x500 magnifikasyonlarında tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları.....  | 77 |
| Şekil 8.1  | Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen plakalardaki (A, B ve C) ve Diesel motor test düzeneğinde test edilen silindir gömleği yüzeylerindeki (ÜÖN, ON ve AÖN) katkı maddesi dağılım karakteristiği.....  | 80 |

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

|             | Sayfa  |
|-------------|--|
| Çizelge 5.1 | Diesel motorun teknik özellikleri ..... 20   |
| Çizelge 5.2 | Motor çalışma koşulları ..... 22   |
| Çizelge 5.3 | Pim-plaka tribotest düzeneğinin teknik özellikleri..... 23   |
| Çizelge 5.4 | Silindir malzeme özellikleri ..... 25  |
| Çizelge 5.5 | Dökme demir malzemesinin mikrografik yapısı ..... 25   |
| Çizelge 5.6 | Kompresyon ve yağ segmanı element yüzdeleri ..... 25   |
| Çizelge 5.7 | Deneylerde kullanılan yağın teknik özellikleri..... 26   |
| Çizelge 5.8 | Deneylerde kullanılan yağ katkı maddeleri ..... 26   |
| Çizelge 7.1 | Diesel motor silindir gömleğinin ÜÖN, ON ve AÖN'sinin ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A, B ve C'nin incelenen magnifikasyonlardaki ortalamaları alınan katkı maddelerinin (Ca, Zn, P ve S) % atomik değerleri..... 63 |
| Çizelge 7.2 | Diesel motor ve pim-plaka tribotest düzeneği krom kaplı segmanlarının incelenen magnifikasyonlardaki ortalamaları alınan katkı maddelerinin (Ca, Zn, P ve S) % atomik değerleri..... 78  |

# DİSEL MOTORUNDA YAĞ KATKILARININ SİLİNDİR YÜZEYİNDE OLUŞTURDUĞU KORUMA ETKİNLİĞİ

Dilek BEKTAŞ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hakan KALELİ

Bu çalışmada yağ katkı maddelerinin silindir gömleği üzerindeki koruma etkinliği incelenmiştir. Konu hakkında benzer çalışmalar incelenmiş, katkı maddesi çeşitleri, silindir gömleği depozitleri, oluşumu ve aşınma çeşitleri ortaya konmuştur.

Deneysel çalışmalar Piri Reis Üniversitesi'nde bulunan Diesel motor test düzeneğinde ve Fransa-Lyon'da bulunan Ulusal Uygulamalı Bilim Enstitüsü (Institut National des Sciences Appliquées, INSA) laboratuvarındaki pim-plaka tribotest düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan silindir ve plaka yüzeyleri optik, tarayıcı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi cihazlarında incelenmiştir.

Diesel motorda 22 saat boyunca test edilen silindir gömleği üst ölü nokta (ÜÖN), orta nokta (ON) ve alt ölü nokta (AÖN) olmak üzere üç bölgede incelenmiştir. Pim-plaka tribotest düzeneğinde ise altı farklı plaka (A, B, C, D, E ve F) test edilmiş bunlardan üçü (Plaka A, B ve C) ile Diesel motorda test edilen silindir yüzeyleri arasında sürpriz şekilde benzerlik olduğu gözlemlenmiştir. Her iki test düzeneğinde kullanılan krom kaplı segmanlar da ayrıca incelenmiştir.

Silindir yüzeyleri (ÜÖN, ON ve AÖN) ve plakalar (Plaka A, B ve C) farklı magnifikasyon değerlerinde (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) incelenmiş ve gözlemlenen katkı maddeleri (Ca, Zn, P ve S) ve dağılımları ortaya konulmuştur. Sonrasında ÜÖN ile Plaka A, ON ile Plaka B ve AÖN ile Plaka C karşılaştırılarak benzerlikler vurgulanmıştır.

Her iki deney düzeneğinde kullanılan krom kaplı segmanların yüzeyleri de farklı magnifikasyonlarda (x100, x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) incelenerek gözlemlenen katkı maddeleri belirtilmiştir.

Silindir yüzeylerinden ÜÖN'de en çok, ON'de daha az katkı maddesi gözlemlenmiş olup AÖN'de ise hiçbir katkı maddesine rastlanmamıştır. Benzer dağılım plakalarda da gözlemlenmiş olup; Plaka A'da en çok, Plaka B'de daha az ve Plaka C'de daha da az katkı maddesi görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Silindir gömleği, katkı maddesi, mikroskobik yüzey incelemesi

## ABSTRACT

---

### **PROTECTIVE EFFECT OF LUBRICANT ADDITIVES ON A DIESEL ENGINE CYLINDER LINER SURFACE**

Dilek BEKTAŞ

Department of Mechanical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Prof. Dr. Hakan KALELİ

In this research, the protective effectiveness that lubricant additives have on the cylinder surface has been examined. Similar studies on this subject have been reviewed and types of additives, cylinder surface deposits, their formation and types of wear have been put forward.

The experimental studies took place in the Diesel engine testing unit of Piri Reis University and at the pin on plate test rig in the INSA (Institut National des Sciences Appliquées) laboratory based in Lyon, France. The cylinder and plate surfaces used in the experiments were examined under optical, scanning electron microscope and energy dispersive X-ray spectroscopy.

The cylinder surface tested in the Diesel engine for 22 hours was monitored in three sections which are top dead center (TDC), middle center (MC) and bottom dead center (BDC). At the pin on plate test rig, six different plates (A, B, C, D, E and F) were tested and it was observed that three of them (Plates A, B and C) surprisingly resembled the cylinder surfaces tested in the Diesel engines. The chrome coated piston rings used in both test units were also examined separately.

The cylinder surfaces (TDC, MC and BDC) and the plates (A, B and C) were examined in different magnification degrees (x500, x1000, x1500, x2500 and x5000) and observed lubricant additives (Ca, Zn, P and S) and their distribution on the surfaces were put forward. Afterward the TDC and Plate A, the MC and Plate B, and the BDC and Plate C were compared to one another and similarities were underscored.

The surfaces of the chrome-coated piston rings used in both experiments were examined in different magnifications (x100, x500, x1000, x1500, x2500 and x5000) and the additives observed were shown clearly.

Among the cylinder surfaces, the most additives were observed in TDC and fewer in MC, and none in BDC. A similar dispersion was also observed on the plates with the most additives on Plate A, fewer on Plate B and even fewer than that on Plate C.

**Key words:** Engine cylinder liner, additive's layer, microscopic surface examination

## BÖLÜM 1

---

### GİRİŞ

İçten yanmalı motorların performansı, sürtünme kuvvetine dolayısı ile silindir gömleği ve segmanlar arasındaki aşınmaya bağlıdır. Otomotiv endüstrisinde, rekabetçi dayanıklılık hedefini yakalayabilmek için silindir bloğunun sürtünen yüzeylerinde aşınmayı konu alan çalışmaların geliştirilmesi gerekmektedir. Silindir gömlekleri, işlevsellik açısından en kritik yüzey özelliklerinden bazılarını gerektirir. Segman ve silindir gömleği aşınması motor yaşam etkinliğinin belirlenmesinde çok önemli bir faktördür [1].

Modern motor yağlayıcıları çok çeşitli katkı maddeleri ve baz yağ karışımından oluşurlar böylelikle talep edilen performans ihtiyaçlarına ulaşılmaya çalışılır. Katkı maddelerinin karışımı döküm içinde ve yüzey üzerinde temizleme, aşınmayı önleme, oksidasyon ve korozyon engelleme özellikleri vardır. Katkı maddeleri termal ve oksidatif bozunmayı önlemek, viskozite karakteristiklerini değiştirmek, toz ve korozyonu minimuma getirmek, sürtünme davranışını kontrol etmek, aşınmayı azaltmak, tahrip edici (yıkıcı) metal-metal temasını önlemek ve köpüklenmeyi önlemek için kullanılmaktadırlar. Katkı maddeleri yağlama yağının fiziksel (viskozite, akma noktası, köpüklenme) ve kimyasal davranışları (temizleme, oksidasyon, korozyon, aşınma, aşırı basınç direnci) değiştirebilirler.

Silindir gömleği yüzeyinde depozitlerin oluşumu ve birikimi karışık bir prosestir [2]. Genellikle depozitlerin oluşumu ve birikimi; yakıt bileşimi, yağlayıcı formülasyonu, motor tasarımı ve yüke bağlı olduğu düşünülmektedir [3].

## 1.1 Literatür Özeti

Keller vd. tarafından yapılan çalışmanın amacı dökme demirin mikro yapısı ve kimyasal bileşiminin yüksek kapasiteli Diesel motor silindir gömleği aşınması üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir [4]. Çalışmada klasik ve mikro alaşımlı olmak üzere iki tip dökme demir numunesi “Cameron Plint” test düzeneğinde test edilmiştir. Deneylerde 5W30 sentetik yağı kullanılmıştır. Testler boyunca sürtünme katsayıları ve temas dirençleri ölçülmüştür. Numuneler üzerinde gözlemlenen aşınma yarıklarındaki film oluşumu incelenmiştir. Dökme demirin yapısında bulunan sert fosfor ötektiğinin tribokimyasal film oluşumu üzerindeki etkisi ve dökme demirin aşınması tanımlanmıştır. Tribokimyasal film oluşumu sonrası tüm numunelerde aşınma oranının oldukça azaldığı görülmüştür. Mikro alaşımlı dökme demirin klasik dökme demire göre aşınma direncinin çok daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sert fosfor ötektiği ve karbidlerin bulunduğu yerlerde katkı maddesi oluşmadığı sonucuna varılmıştır.

Kaleli ve Berthier, kayan yüzeyler arasındaki motor yağında oluşan katkı maddelerinin tribokimyasal etkileri ve görüntülenmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır [5]. Deneyler pim-plaka tribotest düzeneğinde 100 N yükte, 95 °C sıcaklıkta ve sınır yağlama koşullarına yapılmış olup 51115 ve 52100 çelikleri kullanılmıştır. Analizler; optik, tarayıcı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi altında analizleri yapılmıştır. Kaleli ve Berthier, sınır yağlama koşulları altında sürtünen yüzeyler üzerinde koruyucu tabaka oluşumunda kimyasal etkenler dışında mekanik etkenlerin de önemli rol oynadığını, yüzey bozunmasının mekanik bir proses olduğunu ve bu bozunma derecesinin katı yüzeylerde kimyasal reaksiyon oluşumunda oldukça etkili olduğunu belirtmişlerdir. Çok derin bozunmaların katkı maddesi oluşumundaki kimyasal reaksiyonları engelleyerek yüzeyde katkı maddesi birikimine olanak vermediği, fakat hafif bozunmaların kimyasal reaksiyonlara herhangi bir engel teşkil etmediği ve buna bağlı olarak da bu yüzeylerde katkı maddesi oluşumunu sağladığı belirtilmiştir. Kısaca silindir gömleği üzerinde katkı maddesi oluşumunda ana mekanizmanın yüzey bozunması olduğu gözlemlenmiştir. Deneyler sonucunda katkı maddesi olarak kalsiyum (Ca), çinko (Zn), fosfor (P) ve kükürt (S) elementleri görülmüştür. 51115 çeliğinde gözlemlenen katkı maddeleri yüzdesinin çok fazla olduğu ve tüm yüzeyi kapladığı belirtilmiştir.

Dimkovski vd., içten yanmalı motorlarda silindir gömleği yüzeyi üzerinde bulunan honlama çizgilerinde depozitlerin birikmesinin istenmeyen bir durum olduğunu bununla birlikte depozitlerin honlama çizgilerinin içini doldurarak yağ tutma yeteneğini azalttığını ve sonuç olarak motor yağ tüketimini arttırdığını belirtmişlerdir [2]. Bu bağlamda yapılan deneyler benzer yağlayıcı ve şartlar (yük ve hız) altında, farklı çalışma sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Sonrasında aksel olarak kesilmiş silindir gömleği numunelerinin yüzeyleri üzerinde oluşan katkı maddesi tabakaları incelenmiştir. Enerji dağılımlı x-ışın spektrometresi analizleri sonucu; yakıt ve yağdan kaynaklanan karbon (C), oksijen (O) ve kükürt (S), deterjanlardan kaynaklanan kalsiyum (Ca) ve magnezyum (Mg), aşınma önleyicilerden kaynaklanan çinko (Zn) ve fosfor (P), atıklardan kaynaklanan potasyum (K) ve silisyum (Si) gözlemlenmiştir. Depozit kalınlıkları beyaz ışık interferometresi ile ölçülmüş ve depozitlerin düzensiz olarak silindir gömleği üst kısımlarında yoğunlaştığı, ayrıca alt kısımlarına doğru gidildikçe azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak da üst ölü nokta ve bu noktaya yakın bölgelerde sıcaklığın yüksek olmasının etken olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca katkı maddelerinin çoğunun honlama çizgilerinde toplandığı belirtilmiştir.

Kar vd., tribofilmlerin oluşum ve karakterizasyonu konulu bir çalışma yapmışlardır [6]. Çalışmada, yağlayıcı maddelerin tribofilmler üzerindeki etkilerini anlamak için dört temel yağ kullanılmıştır. Bu yağlayıcı maddeler polietilen glikolü, mineral yağı, hint yağı ve margarindir. Bu yağ tipleri; moleküler yapıları, kutuplulukları, biyolojik parçalanabilirlikleri ve olumlu etkilerine göre seçilmiştir. Testler, pim-disk tribotest düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Yüzey karakterizasyonu stilus profilometre (sivri uçlu yazma iğnesi), tarayıcı elektron mikroskobu ve transmisyon elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hint yağı gibi yüksek kutuplu yağların çelik yüzeyde bir transfer katmanının oluşumunu geliştirdiği anlaşılmıştır. Ancak mineral yağ gibi kutupsuz yağların bunu gerçekleştiremediği belirtilmiştir. Yüksek kutuplu yağların baz yağlar gibi davranarak metal sertleşmesinin önlenmesi ve metal yüzeylere depozitlerin bağlanmasının önüne geçilmesi açısından etkili temel yağlar olarak görev aldıkları görülmüştür. Kutupsuz bileşikler olan yağların da sürtünme esnasında aşındırıcı nano parçacıklar oluşturdukları gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda margarinle yapılan deneyler, sert ve kalın bir tribofilmin oluştuğunu göstermiştir.

Kaleli, tam formüle edilmiş motor yağlarına ticari yağ takviyesi ekleyerek oluşan karışımın, kayan yüzeyler üzerindeki sürtünme, aşınma performansı ve en önemlisi

koruyucu katkı maddesi oluşumundaki rolü üzerine çalışmıştır [7]. Deneyler, pim-disk tribotest düzeneğinde sınır yağlama koşulları altındaki çelik yüzeyde 168 N değerinde yük ve 23 °C ile 145 °C sıcaklık değerlerinde yapılmıştır. Analizler; optik, tarayıcı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi kullanılarak yapılmıştır. Yüksek sıcaklıkta (145 °C) sürdürülen deneylerde çelik yüzeyi üzerinde oluşan aşınma ve sürtünmenin düşük sıcaklıkta (23 °C) çalıştırılan yüzeye göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Tarayıcı elektron mikroskobu analizi sonucunda yüzey üzerinde görülen koruyucu katkı maddelerinin kalsiyum (Ca), çinko (Zn), molibden (Mo), fosfor (P) ve klor (Cl) olduğu saptanmıştır.

Onodera vd. yaptıkları çalışmada, aşınma önleyici çinko dialkilditiofosfat (ZDDP) tarafından üretilen tribofilmin nano düzeyde film yapısının mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir [8]. Mekanik özellikleri üzerindeki etkilerin, moleküler dinamiği (molecular dynamics, MD) ve sonlu elemanlar (finite elements, FE) yöntemi kullanılarak araştırıldığı belirtilmiştir. Çelik yüzey üzerindeki oksit tabakası ile çinko metafosfat arasındaki arayüzün sürtünme davranışı MD yöntemi kullanılarak irdelenmiştir. MD sonuçlarında oksit tabaka içerisindeki demir (Fe) atomlarının sürtünme prosesi süresince fosfat tabakasına difüze olduğu, fosfat tabakası içindeki çinko atomlarının da oksit tabaka içine difüze olduğu anlaşılmıştır. Özetle, metalik atomların difüzyonu ile fosfat içeren ZDDP tribofilmin daha yüksek temas sertliği ve temas sağlamlığı gösterdiği yani mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkisi olduğu belirtilmiştir.

Ito vd., çinko dialkilditiofosfat'ın (ZDDP) demir oksit ( $Fe_3O_4$ ) üzerindeki reaksiyonu ile oluşan düşük sürtünme tribofilmini konu alan bir çalışma ortaya koymuşlardır [9]. Deneyler pim-plaka tribotest cihazında yapılmıştır. Çelik plakalar üzerine su-buhar uygulaması ile  $Fe_3O_4$  tabakası oluşturulmuştur. Kayma sonucu demir oksidin ZDDP ile reaksiyona girip çok tabakalı tribofilm oluşturduğu gözlemlenmiştir. Tribofilmin alt kısmının; 10 ile 30 nm kalınlığında çinko (Zn), demir (Fe), kükürt (S), fosfor (P) ve oksijen (O) gibi alaşımlar içerdiği ve Zn, S dağılımının en yoğun olarak gözlemlenen bölge olduğu belirtilmiştir.

Kaleli tarafından yapılan çalışmada iki farklı test düzeneği kullanılarak motor yağı içerisindeki katkı maddesi oluşumu incelenmiştir [10]. 52100 ve 51115 çelikleri, pim-plaka ve pim-disk tribotest düzeneklerinde test edilmiştir. Analizler optik, elektron

mikroskobu ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi (EDX) kullanılarak yapılmıştır. Sonuç olarak; katkı maddesi oluşumu için az miktarda yağ, düşük yük ve sürtünme katsayısı, hafif yüzey bozunması ve yüksek sıcaklık şartının sağlanması gerektiği belirtilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıkta devam eden testlerin yüksek sürtünme gösterdiği fakat tabaka oluşumunda düşük sıcaklıkta yapılan testlere göre daha az etkin olduğu belirtilmiştir. Son olarak da az miktarda krom (Cr) içeren malzemenin yüzey bozunmasının daha hızlı olacağı ve böylece daha fazla koruma tabakası oluşacağı belirtilmektedir.

Morina vd., sürtünme önleyici katkı maddesinin tam formüle yağlayıcıdan çıkarılması ve sürtünme önleyici ile aşınma önleyici çinko dialkilditiofosfat (ZDDP) katkı maddelerinin tam formüle yağlayıcıdan çıkarılması sonucu sürtünme, aşınma ve film oluşumu üzerindeki etkileri konusunda çalışmışlardır [11]. Deneyler, pim-plaka tribotest cihazı kullanılarak 20, 50 ve 100 °C sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Analizler enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi (EDX) ve x-ışını foto elektron spektrometresi (XPS) metotları kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan yağlayıcıların katkı maddesi paketleri ile oluşturduğu reaksiyon filmlerinin morfolojisinin incelenmesi için atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılmıştır. Bu çalışmada, ZDDP katkı maddesi içeren yağ kullanımı ile aşınmanın azaldığı gözlemlenmiştir. ZDDP katkı maddesi içeren yağ kullanıldığında ortaya çıkan sürtünme katsayısının sıcaklığın etkisi ile değiştiği belirtilmiştir. Sıcaklıktaki artış tribofilm oluşumunun hızını arttırdığı fakat sıcaklığın artışı ile birlikte viskozitenin azalması sonucu da tribofilmin yok olduğu gözlemlenmiştir. ZDDP içeren yağ ile daha hafif deney koşullarında oluşan tabaka katmanlı bir yapıya sahiptir ve tabakanın içinde çinko (Zn), kalsiyum (Ca), fosfor (P) ve magnezyum (Mg) katkı maddelerinin bulunduğu gözlemlenmiştir. Aşınma önleyici içermeyen yağ kullanıldığında ise deterjanlardan gelen Ca, aşınma yarıkları içinde kalsiyum karbonat (CaCO<sub>3</sub>) oluşturduğu görülmüştür. Bu koşullar altında ZDDP yağı, aşınma önleyici içermeyen yağa göre daha düşük bir sürtünme katsayısı vermektedir. Bu durumda, ZDDP ve diğer katkı maddeleri (özellikle Ca-deterjanlar) arasındaki etkileşimlerin tabaka özelliklerini, sınır yağlama koşullarındaki özelliklerini ve böylece hem sürtünme hem de aşınmayı etkilediği sonucuna varıldığı belirtilmiştir.

Braithwaite vd. çalışma süresi boyunca molibden disülfidin (MoS<sub>2</sub>) segman mekanizması üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deneyler eşit koşullar altında çalışan iki ayrı tek silindirli hava soğutmalı benzin motorunda yapılmıştır [12]. Bu motorlardan

birinde karter yağı olarak SAE15W50 kullanılmış, diğerinde ise aynı yağa %1 oranında MoS2 eklenmiştir. Deneyler motorların 20 saat çalıştırılması ile tamamlanmıştır. MoS2 içeren motor yağının kullanıldığı benzin motorunun silindir ve segman yüzeylerinde oluşan aşınmanın, SAE15W50 kullanılan yüzeye göre daha az olduğu görülmüştür. Tarayıcı elektron mikroskopunda elde edilen sonuçlarda MoS2 kullanılan yüzeyde plastik deformasyon görülürken, SAE15W50 kullanılan yüzeyde adhezyon aşınmasının etkili olduğu görülmüştür. Her iki yağlayıcının kullanıldığı yüzeyde de abrazyon aşınması görülmüştür.

Tung ve Huang silindir gömleği üzerindeki abrazyon aşınmanın modellenmesini konu alan bir çalışma yapmışlardır [13]. Çalışmada, stabil çalışma koşulları boyunca sıcaklığın, yükün, yağ bozunmasının, yüzey pürüzlülüğünün ve malzeme özelliklerinin etkileri göz önüne alınarak silindir-piston sisteminin aşınma süreci modellenmiştir. Bunun için segman-silindir gömleği simülatör sistemi kullanılarak abrazyon aşınması modeli geliştirilmiştir. Oluşturulan model, uzun sürelerde oluşan aşınma oranındaki artışın kullanılan yağın bozunma oranına bağlı olduğunu göstermiştir.

Qu vd. Diesel motor uygulamaları için yeni yağlayıcı olarak iyonik akışkanlar ve katkı maddeleri üzerine çalışmışlardır [14]. Deneyde kullanılan segmanın krom kaplı olduğu, silindir ise dökme demirden imal edildiği belirtilmiştir. Deneylerin 6 saat sürdüğü belirtilmiştir. Deneylerde yağ olarak SAE15W40 ve iki farklı iyonik katkı mineral yağ kullanılmıştır. Yağa karıştırılmış her iki iyonik akışkan ile SAE15W40 karşılaştırıldığında iyonik katkı yağların %17 ile %55 aralığında daha az sürtünme ve %21 ile %34 aralığında daha az aşınma gösterdiği gözlemlenmiştir. %5 oranındaki iyonik akışkanın mineral yağa eklenmesi ile aşınmanın %45 oranında azaldığı görülmüştür.

Truhan vd. yağlama yağının piston ve silindir gömleği üzerindeki sürtünme ve aşınma etkilerini incelemiştir [15]. Yağlama yağı olarak 15W40 kullanılmış olup, kullanılan silindir malzemesinin dökme demir, segmanın ise krom kaplı olduğu belirtilmiştir. Kurum (is) konsantrasyonunun, malzemesi dökme demir olan silindir gömleğinin aşınması üzerinde güçlü bir etkisi olduğu fakat segmanlar üzerinde herhangi bir etkisi olmadığı görülmüştür. Yağ viskozitesinin yüksek yüklerde ve sınır yağlama koşullarında segman- silindir gömleği sürtünmesi üzerindeki etkisinin düşük olduğu

belirtilmiştir. Viskozitenin, kurum içeriği ve oksidasyon seviyesinden etkilendiği ortaya konulmuştur.

Pike vd. tek silindirli Diesel ve benzinli motorların aşınmalarını karşılaştırmışlardır [16]. Deneylede değişken parametreler; yük, soğutma sıcaklığı, yakıt tipi ve yakıt kükürt içeriğidir. Sıkıştırma oranı 19:1 olan endirekt enjeksiyon dizel motorun, 5:1 sıkıştırma oranına sahip benzinli motora göre daha belirgin aşınmalar gösterdiği belirtilmiştir. Bunun nedeni Diesel motorun yüksek sıkıştırma oranı ile daha yüksek yanma basıncına sahip olmasıdır.

Papadopoulos vd. içten yanmalı motorlardaki segman ve silindir gömleği ara yüzündeki aşınma mekanizmasını araştırmışlardır [17]. Yapılan çalışmada “Plint TE77” yüksek frekans sürtünme cihazı kullanılmıştır. Örneklerin analizi ise “JOEL JSM-6400” tarayıcı elektron mikroskopu kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada şimdilerde bulunması pek de kolay olmayan molibden (Mo) kaplı segman ile ona göre daha yeni olan “Federal Mogul” marka “CKS-36” model segman kullanılmıştır. Ayrıca silindir gömleği malzemesi olarak da dökme demir kullanılmıştır. Deneylede iki farklı sıcaklık (90 °C, 140 °C) ve iki farklı basınç (3,9 MPa, 6,5 MPa) kademelerinde iki farklı yağlayıcı (SAE0W20, SAE15W40) kullanılarak yapılmıştır. Deneylede her bir numunenin cihazda 24 saat çalıştırılmasıyla tamamlanmıştır. Kullanılan “CKS-36” model segmanların Mo kaplı segmanlara göre aşınmaya karşı daha dayanıklı oldukları gözlemlenmiştir. Bu durumun “CKS-36” model segmanların düşük yüzey pürüzlülüğü ve yüksek yüzey sertliği özelliklerine bağlı olabileceği belirtilmiştir. Mo kaplı segman ile kullanılan silindir gömleğinde abrazyon aşınmasının olduğu, “CKS-36” model segman ile kullanılan silindir gömleğinde ise plastik deformasyon ve yüzey çatlaması olduğu gözlemlenmiştir. Her iki segmanda da plastik deformasyon ya da abrazyon aşınması olmadığı belirtilmiştir. Fakat Mo kaplı segmanda çatlaklar olduğu belirtilmiştir.

## **1.2 Tezin Amacı**

Bu çalışmanın amacı silindir gömleği yüzeyinde oluşun katkı maddelerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesidir. Bu katkı maddelerinin değerlendirilmesi için optik mikroskop, tarayıcı elektron mikroskopu (SEM) incelemeleri ve enerji dağımlı x-ışını spektrometresi (EDX) analizleri yapılmıştır.

Deneyler Piri Reis üniversitesinde bulunan tek silindirli bir Diesel motorda 22 saat süresince tam yük altında ve Fransa-Lyon'da bulunan INSA laboratuvarındaki pim-plaka tribotest düzeneğinde gerçekleştirilmiştir.

### **1.3 Bulgular**

İncelenen silindir yüzeylerinden en fazla katkı maddesi üst ölü noktada (ÜÖN) görülmüştür. Orta noktada (ON) gözlemlenen katkı maddesi ÜÖN'ye göre daha az olup alt ölü noktada (AÖN) hiç bir katkı maddesine rastlanmamıştır. Plakalarda yapılan incelemelerde ise Plaka A'da en çok katkı maddesi gözlemlenmiştir. Plaka B'de ise daha az, Plaka C'de daha da az katkı maddesi gözlemlenmiştir.

## BÖLÜM 2

---

### KATKI MADDELERİ

Yağlayıcılar baz yağlar ve katkı maddelerinden oluşmaktadır. Baz yağlar hidrokarbondurlar ve oksitlenme, ısı yoluyla ayrışma, polimerleşme eğilimi gösterirler. Hidrokarbonların serbest radikal mekanizması yolu ile oksitlendiği bilinmektedir. Bu mekanizma esasen dört adımdan oluşmaktadır; başlama, yayılım, kollara ayrılma ve son bulma. Demir, krom, bakır ve nikel gibi birçok metal katalitik olarak hidrokarbonları ayrıştırırlar. Çalışmalar hidrokarbonların oksijen ile tepkimeye girdiklerini ve karboksil asit gibi polar türleri oluşturduğunu ortaya koymaktadır. Bu türler metal yüzeyine tutunmakta ve metali oluşturan metal bileşikleri ile tepkimeye girmektedirler. Bu metal bileşikleri yağda çözümler sonrasında her iki homojen ve heterojen katalitik reaksiyonlar meydana gelir. Bu tür reaksiyonlar genellikle değişikliğe uğramış serbest bir radikal reaksiyon mekanizmasını takip eder. Farklı metaller, yağlayıcı oksidasyonu üzerinde katalitik aktivitelerinin farklı derecelerini sergilerler [18].

Yağlayıcı katkı maddeleri üç ana grupta incelenebilir, bunlar; yüzey koruyucu, performans sağlayıcı ve yağlama maddelerini koruyucu katkı maddeleridir [19], [20].

#### 2.1 Yüzey Koruyucu Katkı Maddeleri

Yüzey koruyucu katkı maddeleri dört grupta incelenmektedir.

##### 2.1.1 Aşınma Önleyiciler (Anti-wear, AW) ve Aşırı Basınç Düzenleyicileri (Extreme Pressure, EP)

Aşınma önleme, aşırı olmayan (makul) veya düzensiz gerçekleşen yüklemelerin neden olduğu hasarın önlenmesi ile ilgilidir. Aşırı basınç düzenleyicileri ise sürekli olarak

uygulanan ağır veya kayan yükler ve şok yüklemekten korunmayı sağlar. Bu tip yağlama maddelerinin öncelikli fonksiyonu aşınmayı azaltmaktır.

### **2.1.2 Korozyon Önleyiciler (Antikorozyon)**

Antikorozyon etkisi iki türde incelemeye alınabilir. Birincisi metal parçalarının yağdaki bileşenlerin etkisi ile, ikincisi ise metal yüzeylerinin atmosfer ve nem etkisi ile oluşacak korozyondan korunmasıdır. Korozyon önleyiciler partikül oluşumunu engeller ve dolayısıyla metal aşınmasının önüne geçer. Asitli ürünlerin etkisi ile oluşan su ve oksijeni nötralize eder.

### **2.1.3 Paslanma İnhibitörleri**

Motorda pas oluşumunu engeller, metalik yüzeylerde korozyon önleyicilere benzer olarak oluşan su ve oksijeni nötralize eder.

### **2.1.4 Deterjanlar ve Dispersanlar**

Deterjanlar, motoru kirlere temizlemekle birlikte, partikülleri de yağ filtresine ulaşmaya kadar veya filtre değişim sürecine kadar yağ içinde tutarak motor parçalarını kirlere arındırır.

Dispersanlar, motor aşınmasından dolayı oluşan küçük metal partiküllerinin veya toz gibi yabancı partiküllerin yağ tarafından tutulmasını sağlar.

Yağlama maddesine deterjan ve dispersan katkı maddelerinin katılması, zararlı tortul atıkları ve karbonu önlemek açısından önemlidir. Motorun bazı parçalarındaki tortul atıklar, motorun bozulmasına ve tamir edilmesine neden olur. Temizleyiciler ve seyrelticilerin, zararlı motor egzoz emisyonları üzerinde direkt bir etkisi bulunmaktadır, motorun ömrünü uzatırlar ve temiz motor operasyonları sağlayarak yağ tüketimini kontrol ederler [19], [21].

### **2.1.5 Sürtünme Önleyiciler**

Sürtünme önleyiciler, sürtünmede sağladıkları azalma etkisi ile güç kayıplarını minimum seviyeye indirmede etkili olmaktadır.

Bu bileşikler, yüksek basınç ve kayma koşullarında sınır sürtünme katsayısını azaltarak subap mekanizmasında da etkin olmaktadır [22], [23], [24], [25], [26].

## **2.2 Performans Sağlayıcı Katkı Maddeleri**

Akma noktası düşürücüler ve viskozite indeks arttırıcı katkı maddeleri olarak iki ana grupta incelenebilir.

### **2.2.1 Akma Noktası Seyrelticileri**

Mineral yağlar yüksek sıcaklıklarda incelme düşük sıcaklıklarda ise kalınlaşma eğilimi gösterirler. İstenen düzeyde yağlamanın sağlanabilmesi için seçilen mineral yağının çalışma sırasında oluşabilecek sıcaklık aralıklarında belirli bir kalınlıkta kalması önemlidir.

Belirli sıcaklıklarda yağın kendisi akma yeteneğine hala sahip fakat balmumu kristallerinin geçmeli dizilimli ağı akışa izin vermemektedir. Polimerik katkı maddeleri veya klorlanmış balmumunun yoğunlaşma ürünleri ve uzun zincirli alkil fenoller, balmumu kristallerinin büyümesini engellemek ve kristal ağı dizimi yapısının değiştirmek için kullanılmaktadır [27]. Akma noktası düşürücü katkı eklemek balmumu kristallerinin boyutunu küçültür ve aşırı gelişimini engeller.

### **2.2.2 Viskozite İndeks Arttırıcılar**

Yağın kalitesini arttıran ve ısının artması ile yağdaki incelmeyi önüne geçen katkı maddeleri olarak tanımlanırlar. Yüksek moleköl ağırlıklı ve yüksek viskoziteli yağda çözünen polimerler genelde viskozite indeksi arttırıcı katkı maddesi olarak kullanılırlar.

## **2.3 Yağ Koruyucu Katkı Maddeleri**

Oksidasyon önleyiciler ve köpük önleyici katkı maddeleri olarak iki ana grupta incelenebilir.

### **2.3.1 Oksidasyon Önleyiciler**

Yağın oksitlenmesinde negatif etki yaratan katkı maddeleridir. Oksitlenme, yağın motoru koruma kabiliyetini kaybetmesine, asidik ürünler ile çamur oluşmasına neden olur.

Oksidasyon önleyici olarak adlandırılan katkı maddelerine örnek olarak aromatik aminler, engellenmiş fenoller, sülfürize fenoller ve çinko ditiofosfatlar verilebilir.

Literatürde oksidasyon üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır ancak bu süreç tam olarak bütün yönleriyle açıklanamamıştır [28], [29], [30], [31].

### **2.3.2 Köpük Önleyiciler**

Yeterli çalkalanmaya maruz kalan bütün otomotiv yağları, havayı sürükler ve köpük oluşumuna neden olur. Bu istenmeyen bir durumdur çünkü yağlayıcıların oksijen ile temaslarının artmasına neden olur. Bununla birlikte; sürüklenen hava ve köpük, soğutucu ve hidrolik akışkan olarak işlev gören yağlayıcının verimliliğini azaltır.

Silikon polimerler ve organik kopolimerler köpüğün kontrolünde en çok kullanılan malzemelerdir. Bu katkı maddeleri yağlayıcıdan daha düşük yüzey gerilimine ve yağlayıcıdan düşük çözünürlüğe sahiptir. Bu da köpük kabarcıklarının yüzeyde dağılmasını sağlamaktadır.

---

### MOTOR SİLİNDİR GÖMLEĞİ DEPOZİTLERİ, ETKİLERİ ve OLUŞUMU

Silindir gömleği depozitleri, silindir gömleği üzerinde oluşan herhangi bir depozit olarak tanımlanmaktadır. Bu depozitler yüzey topografisinde değişim meydana getirir ki bu değişim, yağlama yağı tüketiminin artmasına neden olmaktadır.

Bos vd. silindir gömleği depozitlerinin, yağ katkı maddelerinin içerdiği inorganik malzemelerden oluştuğunu belirtmişlerdir [32]. İnorganik malzemelere bakılırsa %80'i depozittir ve bunların çoğu çinko (Zn), kalsiyum (Ca) tuzlarıdır [33].

Silindir gömleği depozitlerinin gömleğin üst kısmında başladığı iddia edilir. Silindir gömleği depozitlerinin silindir gömleğine segmanlar tarafından dağıtıldığı düşünülmektedir [32], [33]. Silindir gömleği depozitleri genellikle çözünmeyen yağ malzemesi ve piston depozitlerini birlikte içermektedir.

Silindir gömleği depozitleri ayrıca polimerleşmiş hidrokarbon olan organik malzemelerden de oluşmaktadır. Bu malzeme reçine olarak adlandırılır ve inorganik tuzlar için bir bağlayıcı olarak görev almaktadır.

Silindir gömleği depozitleri, reçineli malzemenin (reçine ve inorganik tuzlar) silindir gömleğine sıkıca yapışmasıyla meydana gelmektedir. Bu malzeme ise; yağlama yağı filminin sürekli açığa çıkan yanma gazları ile çözülmesiyle birlikte termal gerilimin artması ve yoğuşan yakıtın kısmi yanmasıyla oluşmaktadır.

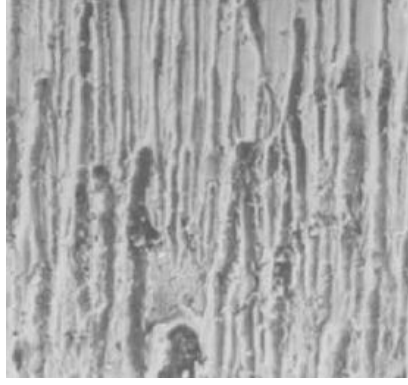
### AŞINMA ÇEŞİTLERİ

Aşınma nadiren yıkıcı olmakla birlikte çoğu zaman çalışma verimi ve motor gücü üzerinde negatif etkisi vardır. Aşınma aynı zamanda yakıt tüketimi ve komponentlerin yer değiştirme oranını arttırmaktadır. Aşınma malzemenin kendisinden gelen bir özellik olmaktan çok, bir sistemin karakteristiğine ait bir mühendislik tanımıdır. Yük, hız ya da çevresel herhangi bir faktördeki değişim temas eden her iki yüzey ya da yüzeylerden birinde makro değişikliklere neden olabilir [34].

Aşınma tipleri beş ana grupta incelenebilir. Bunlar; abrazyon, adhezyon, kazıma, korozyon ve yorulma aşınmasıdır. Endüstride en çok karşılaşılan aşınma tipi %50 oran ile abrazyon aşınmasıdır. Bu aşınma tipini %15 oran ile adhezyon aşınması takip eder [35].

#### 4.1 Abrazyon Aşınması

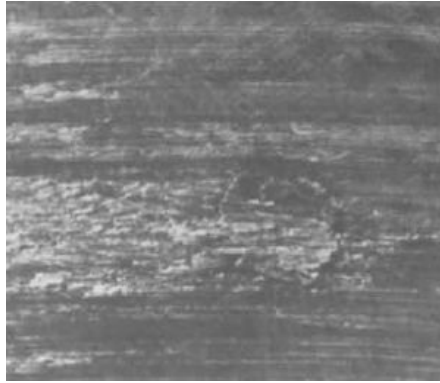
Sert parçaların yüzeye nüfuz ederek malzemeyi uzun talaşlar halinde kesmesi abrazyon aşınması olarak adlandırılmaktadır. Bu aşınma tipi, pürüzsüz yüzeylerin oldukça düzgün aşınarak belirli yoğunluktaki çizikler ile karakterize edilebilir (Şekil 4.1). Bu tip deformasyonlar, etki eden kuvvetin şiddetine bağlı olarak, tırmalama veya çizgisel sıyırma veya uzun oluklar şeklinde de tanımlanabilir.



Şekil 4.1 Tipik bir abrazyon aşınması [35]

#### 4.2 Adhezyon Aşınması

Adhezyon aşınması birbiri üzerinde kayan yüzeylerde meydana gelir ve yüzeylerde mevcut olan pürüz uçları arasında oluşan basınç, bölgesel plastik deformasyon ve adhezyon oluşumu için oldukça yüksektir. Adhezyona kayan yüzeyler arasındaki temiz yüzeylerin, oksit oluşumuna izin vermeyen koşulların, kimyasal ve yapısal benzerliklerin pozitif etkisi vardır. Adhezyon hareket süresince büyüyen bir kaç pürüz arasında meydana gelir ve bir yüzeyden diğerine metal transferi ile sonuçlanır (Şekil 4.2).

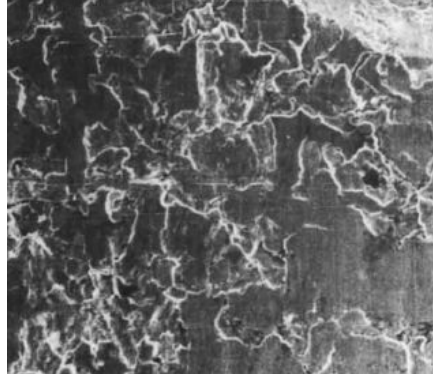


Şekil 4.2 Tipik bir adhezyon aşınması [35]

#### 4.3 Kazıma Aşınması

Kazıma aşınması, kayan yüzeyler arasındaki yağ filminin bozulması ve metalin metale teması ile yerel kaynamaların oluşumuna bağlı olarak belirlenen büyük bir yüzey hasarıdır (Şekil 4.3). Kazıma aşınması adhezyon aşınmasının bir uzantısıdır. Bu aşınma tipi, segman ve silindirlerde meydana gelmekle birlikte adhezyon aşınmasını takiben içten yanmalı motorlarda gaz kaçağının meydana gelmesine ve yağ tüketimine sebep olmaktadır. Kazıma aşınması aşınma tiplerinden en zarar verici olandır ve ciddi motor

hasarlarına sebep olabilmektedir. Aşınmanın ilerlemesi derinlik, genişlik ve uzunluk parametrelerinde artışa neden olmakta ve bu durum da yüzeyin yağ tutma özelliğini azaltmaktadır.

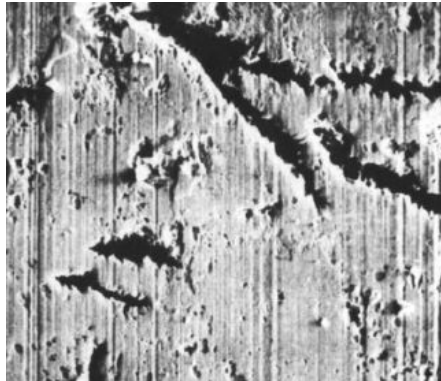


Şekil 4.3 Tipik bir kazıma aşınması [36]

#### 4.4 Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması atmosferdeki hava, nem ve karbondioksit ( $\text{CO}_2$ ) ile reaksiyona girebilen ürünlerin kimyasal etkisi, yağlayıcının oksidasyonu veya hal değiştirmesi sonucu meydana gelir (Şekil 4.4). Bu hal değişimi ile birlikte organik asitler oluşur.

Diesel motorlarda yakıt içerisinde bulunan kükürdün reaksiyonu sonucu, benzinli motorlarda ise kurşun tetrametilin reaksiyonu sonucu oluşan asitler korozyon aşınmasına ortam sağlar. Korozyon aşınması oluşum süreci şu safhalarda incelenebilir; yanma gazları içerisinde asit türleri oluşumu, asidin yağ filmine geçmesi, yağ içindeki asidin alkalik katkı maddeleri ile nötralizasyonu, nötrale olamayan asidin ise metal yüzeye yapışıp korozif aşınmayı başlatması.



Şekil 4.4 Tipik bir korozyon aşınması [36]

#### **4.5 Yorulma Aşınması**

Yüksek gerilimin etkisi ile yorulma sınırında kayma ve yuvarlanma hareketinin bir sonucu olarak genelde zayıf partiküllerin yüzeyden ayrılması yorulma aşınması olarak tanımlanmaktadır. Bu aşınma tipi dişlilerde, bilyeli yataklarda ve düz yataklarda meydana gelir.

### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar iki ana grupta incelenebilir; Diesel motor ve pim-plaka tribotest düzeneği. Diesel motorda ilk aşama performans testlerinden ve ikinci aşama Diesel motor testinden oluşmaktadır. Pim-plaka tribotest düzeneğinde ise uygun ölçülerde kullanılmamış silindir gömleğinden kesilen plakalar test edilmiştir.

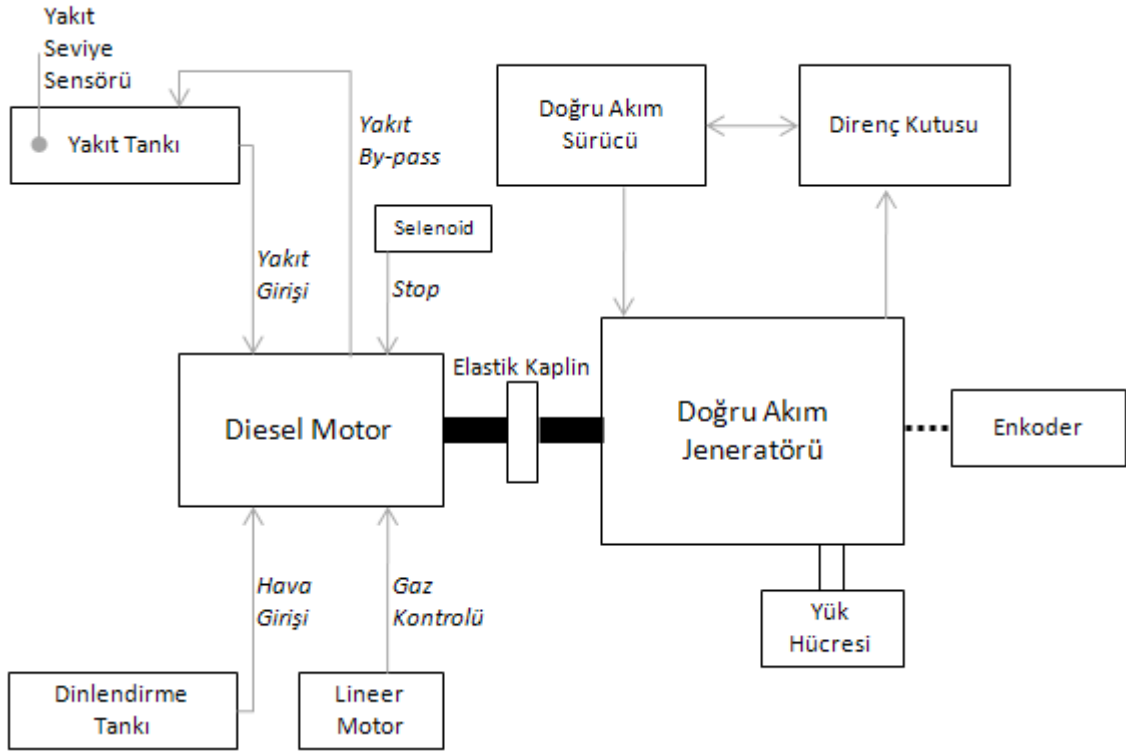
#### 5.1 Diesel Motor Test Düzeneği

Deneyler Piri Reis Üniversitesi'nde bulunan Diesel motor test laboratuvarında yapılmıştır (Şekil 5.1). Test düzeneği bilgisayar kontrollü olup; ölçüm, kayıt ve kontrol işlemleri bu bilgisayar üzerinden yapılmaktadır. Diesel motor test laboratuvarı ses yalıtımını sağlamak ve yaralanma riskini minimum seviyeye indirebilmek açısından PVC ile ikiye ayrılmıştır. Bu açıdan ölçüm ve kontrol işlemleri motor odasına girmeden gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 5.1 (a) Kontrol paneli ve (b) Diesel motor test düzeneği

Şekil 5.2’de Diesel motor test düzeneği blok şeması görülmektedir. Test düzeneğinde bulunan doğru akım jeneratörü motor şaftına elastik bir kaplin ile bağlanmıştır ve Diesel motorun yüklenmesini sağlamaktadır. Tork ölçülmesi amacıyla Diesel motor test ünitesinde kullanılan yük hücresi doğru akım jeneratörünün şasisine bağlanmıştır. Kullanılan yük hücresi “ESİT” marka yerli yapım “S” tipi bir yük hücresidir. Yakıt seviyesini ölçmek amacıyla seviye sensörü kullanılmıştır. Kartar içerisinde bulunan yağ sıcaklığının ölçülmesi için “KTY-10” tipi bir termokupl yerleştirilmiştir. Devir ölçümü için “IFM” marka optik enkoder kullanılmıştır ve bir devirde 3600 pals üretmektedir. Sensörlerden gelen sinyallerin ölçümü, kontrolü, gösterge ve kayıt işlemleri için veri toplama kartı kullanılmıştır. Kullanılan veri toplama kartı “National Instruments” marka “PCI 6221” model bir karttır ve çift çekirdekli bir bilgisayar üzerine kurulmuştur.



Şekil 5.2 Diesel motor test düzeneği blok şeması

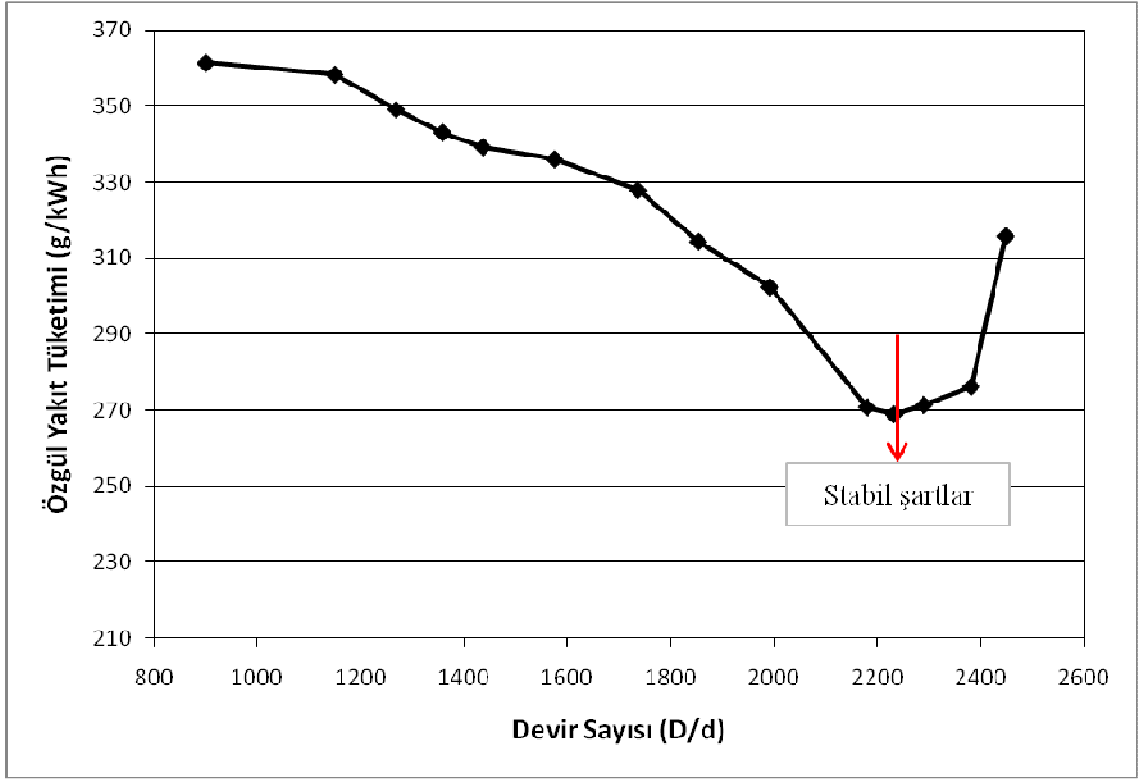
Testlerde “Anadolu Motor”da üretilen “4LD820” model Diesel motor kullanılmıştır. Tek silindirli olan Diesel motor 4 stroklu ve hava soğutmalıdır. Motorun diğer özellikleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 Diesel motorun teknik özellikleri

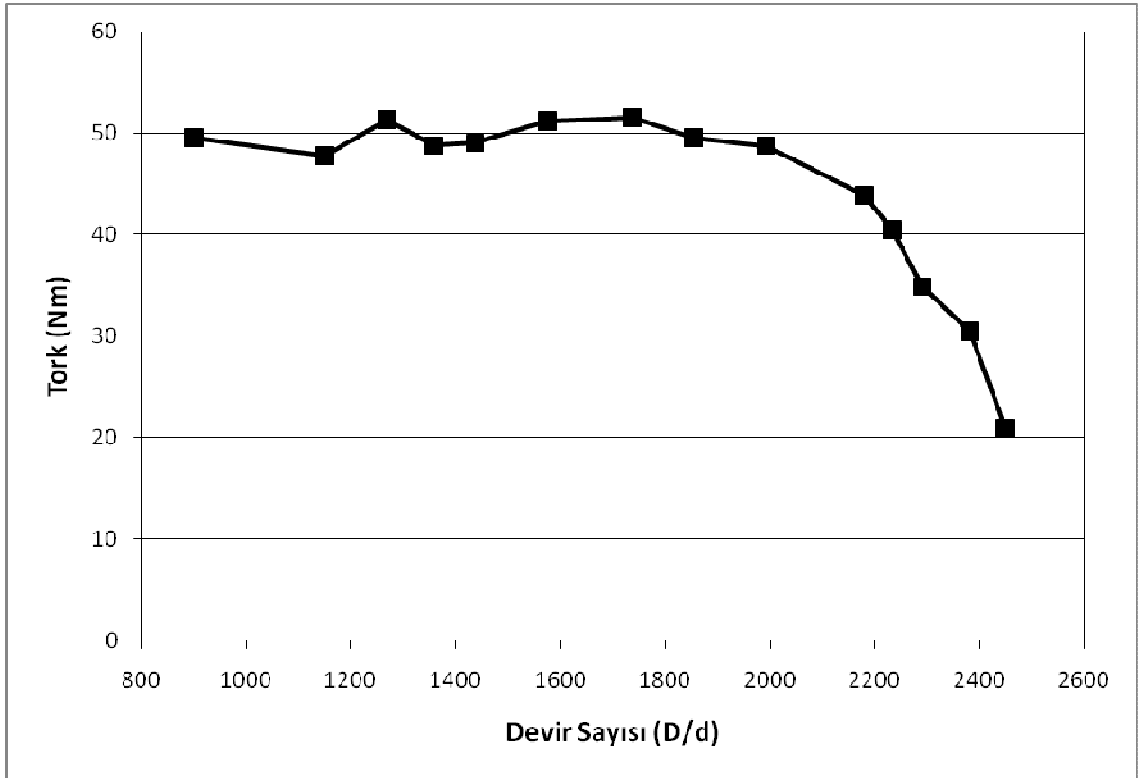
|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| Motor üreticisi                              | Anadolu Motor A.Ş. Türkiye      |
| Model  | Diesel 4LD820                   |
| Tipi   | 4 stroklu hava soğutmalı Diesel |
| Silindir adedi                               | 1                               |
| Silindir çapı x strok (mm)                   | 102x100                         |
| Silindir hacmi (cm <sup>3</sup> )            | 817                             |
| Sıkıştırma oranı                             | 17: 1                           |
| Karter yağı kapasitesi (l)                   | 2,6                             |
| Devir aralığı (rpm)                          | (2600) 3000                     |
| Püskürtme basıncı (bar)                      | 134                             |
| 1600 rpm devirde nominal güç ve tork (kW-Nm) | 13 – 48                         |

## 5.2 Diesel Motor Performans Testleri

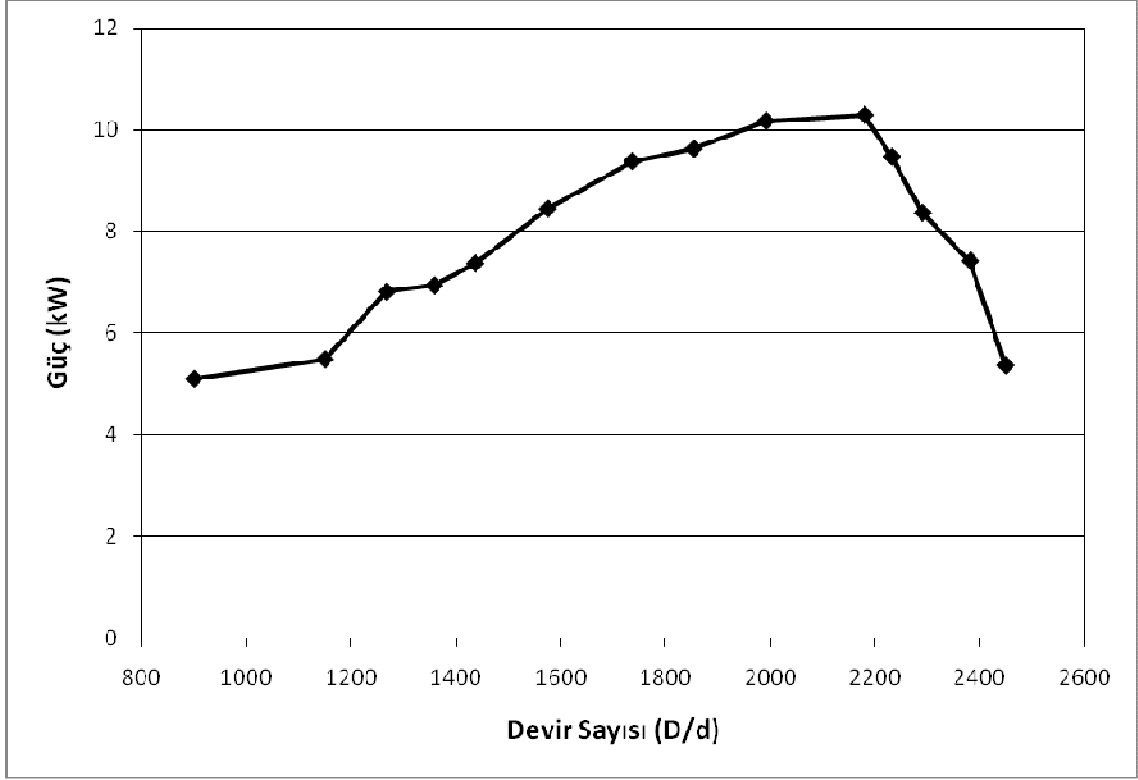
İçten yanmalı tek silindirli bir Diesel motorun performans kriterleri güç, moment ve yakıt sarfiyatı parametrelerini içermektedir. Performans testleri öncesinde motorun, silindir bloğu, piston ve segmanları yenilenmiştir. Sonrasında sistemdeki elemanların yeni olması sebebiyle motor, firma tarafından uygun görülen 30 dakika süre ralantide çalıştırıldıktan sonra yağ ve yağ filtresi değişiminin ardından testlere başlanmıştır. Bu işlemler yeni elemanlardan kaynaklanan çapak oluşumu ve montajı yeni tamamlanan elemanların birbirlerine alıştırılması amacıyla gerçekleştirilmiştir. Performans testleri gaz pedalının tam açık konuma getirilmesinin ardından on dört farklı tork değerinde değerler alınarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra her bir noktadaki motorun ürettiği tork, güç ve motorun yakıt tüketimi değerleri bilgisayar kontrol paneli aracılığı ile gözlemlenerek kayıt edilmiştir. Testler üç kez tekrarlanarak ortalama değerlerin grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafikler özgül yakıt tüketimi, tork ve gücün, devir sayısı (devir/dakika) ile değişimini göstermektedir. Şekil 5.3’de özgül yakıt tüketimi, Şekil 5.4’de tork ve Şekil 5.5’de güç grafiği verilmiştir.



Şekil 5.3 Özgül yakıt tüketimi – devir sayısı değişimi



Şekil 5.4 Tork – devir sayısı değişimi



Şekil 5.5 Mekanik güç – devir sayısı değişimi

### 5.3 Diesel Motor Testi

Performans testlerinin tamamlanmasıyla deneylere başlanmadan önce karterdeki yağ tekrar boşaltılarak yenisi ile doldurulmuştur. Çalışma şartları minimum yakıt sarfiyatındaki değerler göz önüne alınarak belirlenmiştir (Şekil 5.3). Diesel motor 22 saat boyunca 270 gr/kWh özgül yakıt tüketimi ve 2270 dev/dak motor devrinde (Şekil 5.3, stabil şartlar) çalıştırılmıştır. Tüm test parametreleri Çizelge 5.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 5.2 Motor çalışma koşulları

|  |           |
|--|-----------|
| Özgül yakıt tüketimi (gr/kWh), devir (dev/dak) | 270, 2270 |
| Yük (%)  | 100       |
| Yağlama yağı sıcaklığı (°C)                    | 65°C      |
| Ortam sıcaklığı (°C)                           | 24°C      |
| Süre (saat)                                    | 22        |

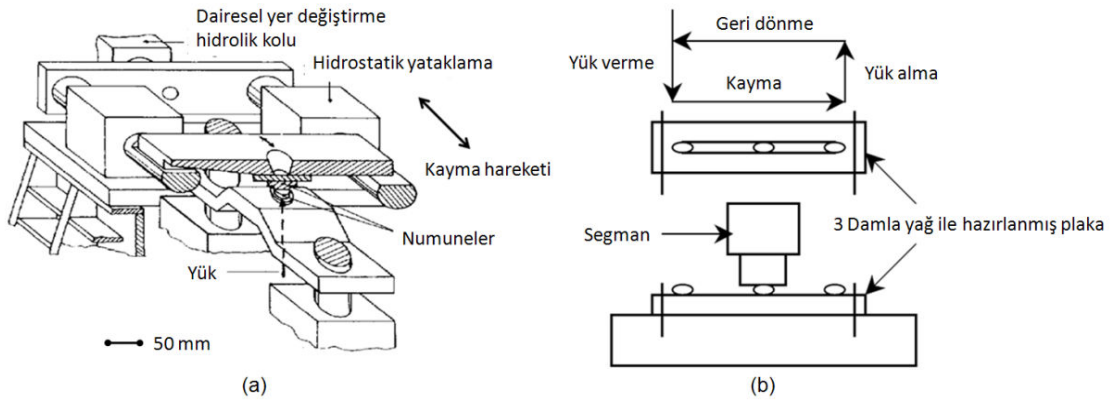
### 5.4 Pim-plaka Tribotest Düzeneği

Testler Fransa-Lyon’da bulunan Ulusal Uygulamalı Bilim Enstitüsü (Institut National des Sciences Appliquées, INSA) laboratuvarındaki pim-plaka tribotest düzeneğinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.6). Şekil 5.7(a)’da deney düzeneğinin genel şematik

gösterimi verilmektedir. Tüm testlerde kullanılan iki tip segman için de kayma yönü aynı olup, Şekil 5.7(b)'de belirtilmiştir, ayrıca testlerde kullanılan düzeneğin teknik özellikleri Çizelge 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.6 INSA'da bulunan pim-plaka tribotest düzeneği



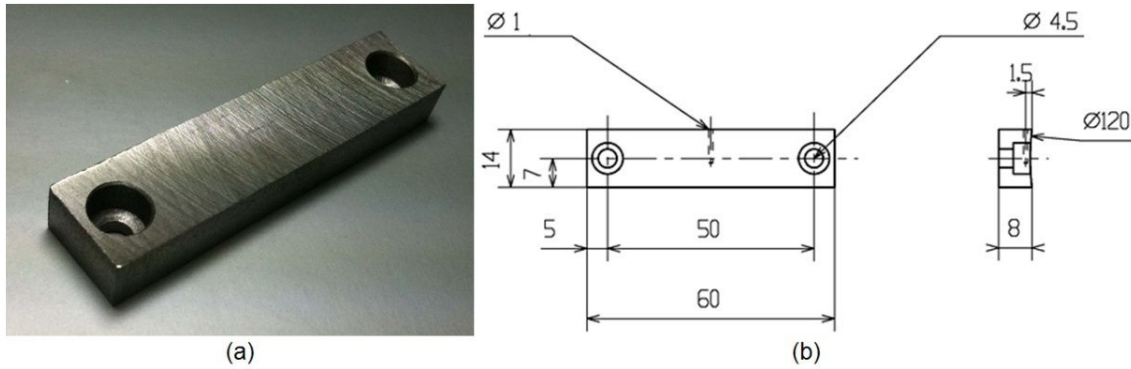
Şekil 5.7 (a) Pim-plaka tribotest düzeneği ve (b) plaka üzerindeki segmanın tek yönlü kayma hareketi şematik gösterimi

Çizelge 5.3 Pim-plaka tribotest düzeneğinin teknik özellikleri

|                  |   |
|------------------|---|
| Yük              | 50 – 1500 N                                 |
| Frekans          | 0,01 mHz – 150 Hz                           |
| Strok            | $\pm 2 \mu\text{m} \dots \pm 50 \text{ mm}$ |
| Sıcaklık         | -160...+120 °C                              |
| Temas Geometrisi | plaka-plaka, pim-plaka, disk-plaka          |

## 5.5 Pim-plaka Tribotest Düzenğinde Yapılan Testler

Testlere başlanmadan önce plakanın iki ucuna ve merkez noktasına üç damla yağ damlatılmıştır. Ardından 100 N ile katkı maddesi oluşumunun engellenmemesi için tek yönlü kayma uygulanmıştır. Tribotest düzeninde altı adet plaka (A, B, C, D, E ve F) kullanılmış olup, bunlardan Plaka A, Plaka B ve Plaka C ile Diesel motoru silindir bloğunun sürtünen yüzeyleri arasında mikroskopik incelemeler boyunca sürpriz bir şekilde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Yapılan her bir testte 60 mm uzunluğunda plakalar kullanılmış olup test süresi 42 dakika ve kayma hızı 0,03 – 0,06 m/s ve sıcaklık değeri 95 °C olarak set edilmiştir. Plakalar arasındaki farklılıklar kullanılan segman tipi ve buna bağlı olarak uygulanan temas basınçlarıdır. Plaka A ve B krom kaplı segmanlar altında, Plaka C ise krom kaplı olmayan segman altında test edilmiştir. Her iki Plaka A ve C için uygulanan temas basıncı 0,014 GPa olup Plaka B için 0,0083 GPa'dır. Segman ve plakaların test için cihaza montajının sağlanmasının ardından sistemin istenilen sıcaklığa ulaşması için pim-plaka tribotest düzenindeki elektrikli rezistans ile ısı verilmiş ve termokupl ile de ölçülerek set edilen değerlerde stabil kalması sağlanmıştır. Testler başlamadan önce plakaların iç yüzeylerinin zarar görmemesi sağlanarak Şekil 5.8'de verilen ölçülerde kesilmiştir.



Şekil 5.8 Plakanın (a) perspektif görünüşü ve (b) ölçüleri

## 5.6 Deneylerde Kullanılan Silindir ve Segmanlar

Diesel motor test düzeninde kullanılan silindir bloğu ve pim-plaka tribotest düzeninde kullanılan plakaların malzemeleri aynı olup dökme demirdir. Silindir pürüzlülük katsayısı 0,63485  $\mu\text{m}$ 'dir. Deneylerde kullanılan dökme demir malzemesinin özellikleri ve mikrografik yapısı sırasıyla Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5'de verilmiştir.

Çizelge 5.4 Silindir malzeme özellikleri

|  | <b>Gravite ile Döküm Silindir</b> | <b>Santrifüj Döküm Gömlek</b> |
|--|-----------------------------------|-------------------------------|
| Brinel sertlik 5/750/30 HB (Kg/mm <sup>2</sup> ) | 190 – 250                         | 210 – 270                     |

Çizelge 5.5 Dökme demir malzemesinin mikrografik yapısı

| <b>Yapısı</b>       | <b>Gravite ile Normal</b>                                   | <b>Santrifüj Döküm</b>                                      |
|---------------------|---|---|
| Serbest ferrit      | Kabul edilemez  | <2%   |
| Grafit              | Tip A   | Hakim olan tip  |
| Serbest semen       | Kabul edilemez  | Kabul edilemez  |
| Steatit (Sabuntaşı) | Sürekli ağ teşkil etmeyecek şekilde üniform olarak dağılmış | Sürekli ağ teşkil etmeyecek şekilde üniform olarak dağılmış |
| Matris              | Perlitik  | Lamelli perlitik  |

Testlerde kullanılan segmanlara dair malzeme bilgileri Çizelge 5.6’da belirtilmiştir. Kompresyon segman yüzeyi diğer segman yüzeylerinden farklı olarak %8 oranında krom ile kaplanmıştır.

Çizelge 5.6 Kompresyon ve yağ segmanı element yüzdeleri

| <b>İçerdiği Elementler</b> | <b>Kompresyon segmanı Element yüzdesi (%)</b> | <b>Yağ segmanı Element yüzdesi (%)</b> |
|----------------------------|---|--|
| C                          | 3,630   | 3,580                                  |
| Si                         | 3,040   | 3,020                                  |
| Mn                         | 0,650   | 0,670                                  |
| P                          | 0,500   | 0,470                                  |
| S                          | 0,039   | 0,051                                  |
| Cr                         | 0,080   | 0,060                                  |
| Ni                         | 0,040   | 0,040                                  |
| Mo                         | 0,050   | 0,060                                  |
| Cu                         | 0,050   | 0,060                                  |

### 5.7 Deneylerde Kullanılan Yağlayıcı

Deneylerde “15W40 – Rubia” tır yağı kullanılmıştır. Diesel motor test düzeneği ve pim-plaka tribotest düzeneğinde kullanılan yağlar aynı olup teknik özellikleri Çizelge 5.7’de verilmiştir.

Çizelge 5.7 Deneylerde kullanılan yağın teknik özellikleri

| Özellikler            | Birim              | Değer                |
|-----------------------|--------------------|----------------------|
| SAE viskozite sınıfı  | -                  | SAE15W40             |
| API hizmet sınıfı     | -                  | CH-4 / SJ (ACEA: E3) |
| TBN                   | mgKOH/g            | 9,7                  |
| Viskozite (100°C)     | mm <sup>2</sup> /s | 14                   |
| Viskozite İndeksi     | -                  | 130                  |
| Parlama Noktası       | °C                 | >200                 |
| Akma Noktası          | °C                 | -27                  |
| Özgül ağırlık (15 °C) | g/cm <sup>3</sup>  | 0,871                |

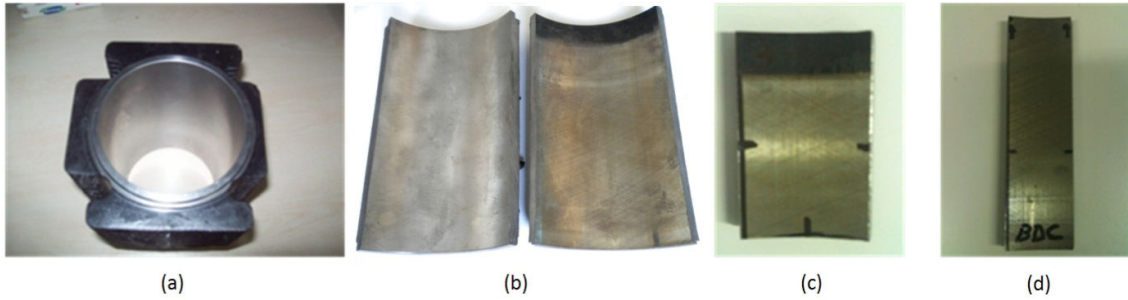
Çizelge 5.8’de yağda kullanılan katkı maddeleri belirtilmiştir. Çizelge 5.8’de belirtilen bilgiler gizli olup, Total firması ile yapılan yazışmalar ve telefon görüşmeleri sonucu alınan izin ile açıklanmıştır.

Çizelge 5.8 Deneylerde kullanılan yağ katkı maddeleri

| Katkı maddesi içeriği | Birim | Minimum değer | Maksimum değer |
|-----------------------|-------|---------------|----------------|
| Ca                    | PPM   | 2580          | 3036           |
| Zn                    | PPM   | 1363          | 1610           |
| Mg                    | PPM   | 288           | 336            |
| P                     | PPM   | 1250          | 1474           |

### ANALİZ ÇALIŞMALARI

Diesel motor testinin ardından segmanlar ve silindir bloğu motordan çıkarılmıştır. Kullanılmamış segmanlar ve silindir bloğu ile kullanılmış segmanlar ve silindir bloğu analizleri yapılmadan önce uygun boyutlarda kesilmiştir. İlk olarak silindir bloklarının etrafında bulunan soğutma kanalları tornalanmıştır ardından silindir gömleği, freze tezgahında özel ince uç kullanılarak soğutucu akışkan kullanılmadan kesilmiştir (Şekil 6.1). Her iki işlem de malzemenin ısınmasını engellemek ve yüzeyde oluşabilecek bozunmaların önüne geçilmesi amacıyla çok düşük hızlarda gerçekleştirilmişlerdir.



Şekil 6.1 (a) Kesim işleminden önce silindir bloğu, (b) tornalama ve dikey kesim işleminden sonra kullanılmamış silindir gömleği ve 22 saat çalıştırılmış motordan çıkarılan silindir gömleği, (c) 22 saat çalıştırılmış silindir gömleği üst ölü noktası, (d) orta nokta ve alt ölü noktanın olduğu gömlek kesiti

Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen plakalar zaten test öncesi istenilen boyutlarda (Şekil 5.8) kesilmiş olup analiz öncesi tekrar bir kesim işlemine tabi tutulmamışlardır.

Diesel motorda test edilen silindir gömleği ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen plakalar mikroskopik incelemelerin sağlıklı yapılabilmesi açısından test öncesi ve sonrasında hegzan ile temizlenmişlerdir. Böylelikle test sonrası yüzey üzerinde kalan gerçek katkı maddesi tabakalarının incelenmesi mümkün olmuştur.

Diesel motor ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen silindir gömleği ve plakaların analizleri Fransa-Lyon'da INSA laboratuvarında bulunan optik mikroskop, tarayıcı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılım x-ışın spektrometresi (EDX) cihazında gerçekleştirilmiştir.

Parça yüzey analizi ilk olarak optik mikroskop altında yapılmıştır. Şekil 6.2'de gösterilen optik mikroskopta parçanın genel görünümü incelenmiştir.



Şekil 6.2 Optik mikroskop

Parça yüzeylerinin daha ayrıntılı incelenmesi için tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Silindir gömleği yüzeyindeki katkı maddesi dağılımının incelenmesi için de enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi (EDX) kullanılmıştır. INSA'da bulunan ve analizlerde kullanılan bu iki sistemi de (SEM ve EDX) içeren cihaz Şekil 6.3'de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 Tarayıcı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi (EDX) cihazı

### ANALİZ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde Diesel motor silindir gömleği ÜÖN, ON ve AÖN yüzeyleri ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A, B ve C yüzeyleri incelenmiştir. Ayrıca Diesel motor ve pim-plaka tribotest düzeneklerinde kullanılan krom kaplı segmanlar incelenmiştir.

Öncelikle 22 saat çalıştırılmış Diesel motor silindir gömleği ÜÖN, ON ve AÖN yüzeyleri ile pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A, B ve C yüzeyleri çeşitli magnifikasyonlarda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) ve belirli noktalarda (1, 2, 3, 4, 5 ve 6) incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

Sonrasında 22 saat çalıştırılmış Diesel motor krom kaplı segman ile pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segman çeşitli magnifikasyonlar (x100, x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) ve belirli noktalarda (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8) incelenmiş ve karşılaştırılmıştır.

#### 7.1 22 Saat Çalıştırılmış Diesel Motor Silindir Gömleği (ÜÖN, ON ve AÖN)

##### Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 ve 7.5 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN'nin sırasıyla x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000 magnifikasyonlarındaki elektron mikroskobu görüntülerini ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresini göstermektedir.

Şekil 7.1'de 3, 4 ve 5 noktalarında Ca, Zn, P ve S katkı maddelerinin tümü gözlemlenmektedir. Bu üç noktadan 3 ve 5 noktaları honlama çizgisi üzerinde bulunmaktadır. 1, 2 ve 6 noktalarında katkı maddesi olarak yalnızca P elementi bulunmaktadır.

Şekil 7.2’de 2 noktasında katkı maddesi olarak Ca, Zn ve P elementleri, 4 noktasında ise Ca, P ve S elementleri görülmektedir. 1, 5 ve 6 noktalarında ise yalnızca P katkı maddesi gözlemlenmiştir. Bu noktalardan, 2 honlama çizgisi üzerindedir.

Şekil 7.3’de 1, 4 ve 6 noktalarında katkı maddeleri gözlemlenmektedir. Katkı maddesi gözlemlenen 6 noktasında Ca, Zn, P ve S, 4 noktasında Ca, P ve S, 1 noktasında da Ca, Zn ve P elementleri görülmektedir. Bu noktalardan 4 ve 6 honlama çizgisi üzerinde bulunmaktadır.

Şekil 7.4’de 2 noktasında Ca, P ve S, 3 noktasında ise yalnızca P elementi gözlemlenmektedir. 2 noktası honlama çizgisi üzerinde bulunmaktadır.

Şekil 7.5’de 5 noktasında katkı maddesi olarak Ca, Zn, P ve S, 4 noktasında Ca, P ve S, 1, 3 ve 6 noktalarında ise yalnızca P elementi saptanmaktadır. Bu noktalardan 4 ve 5 aşınma yarığı üzerindedir.

Şekil 7.6, 7.7, 7.8, 7.9 ve 7.10 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON’nin sırasıyla x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000 magnifikasyonlarındaki elektron mikroskobu görüntülerini ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresini göstermektedir.

Şekil 7.6’da 2 ve 5 noktalarında Ca, Zn, P ve S katkı maddelerinin tümüne rastlanmaktadır. Diğer noktalarda ise herhangi bir katkı maddesi gözlemlenmemektedir. 2 noktası honlama çizgisi üzerindedir.

Şekil 7.7’de 1, 5 ve 6 noktalarında katkı maddeleri gözlemlenmektedir. Katkı maddesi gözlemlenen noktaların tümü Ca, Zn, P ve S içermektedir ve üç nokta da honlama çizgisi üzerindedir. Diğer noktalarda ise herhangi bir katkı maddesi yoktur.

Şekil 7.8’de yalnızca 1 noktasında Zn görülmektedir. Diğer noktalarda katkı maddesine rastlanmamaktadır. 1 noktası ise honlama çizgisi üzerindedir.

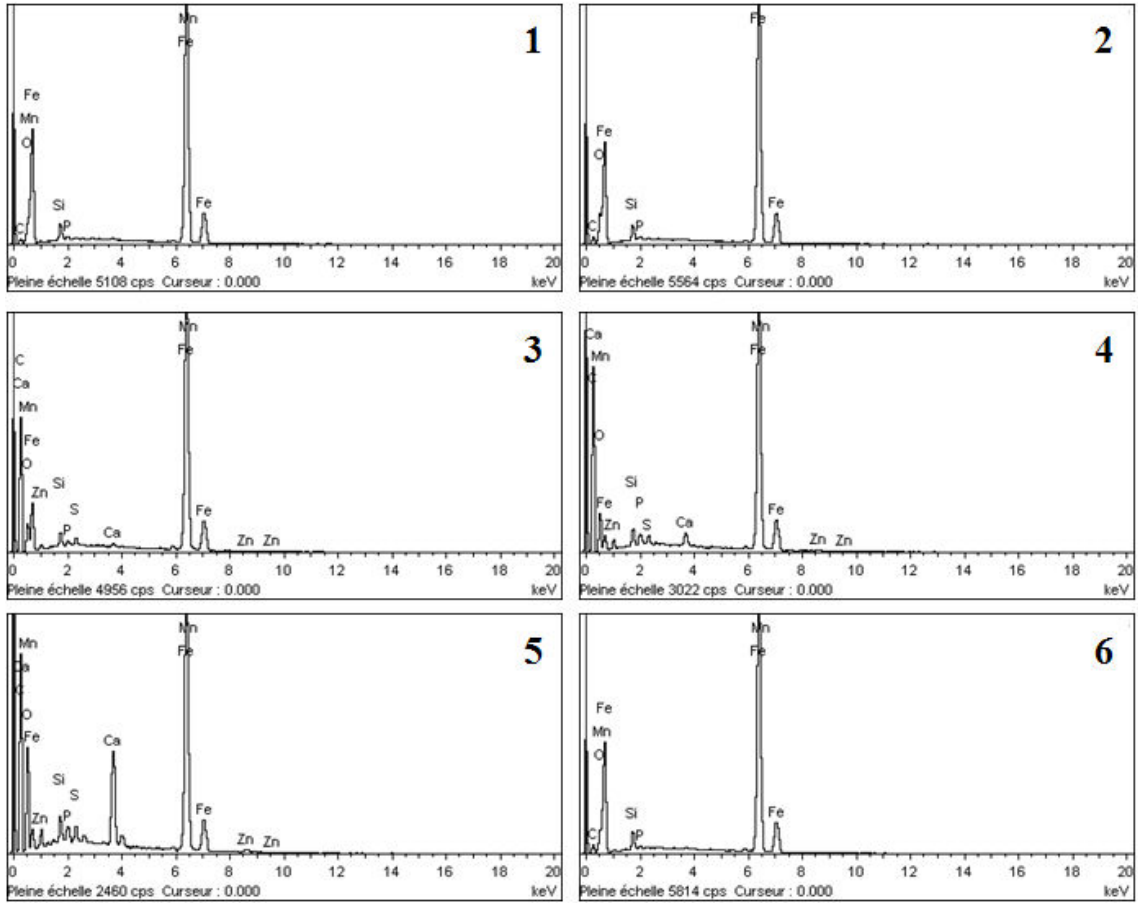
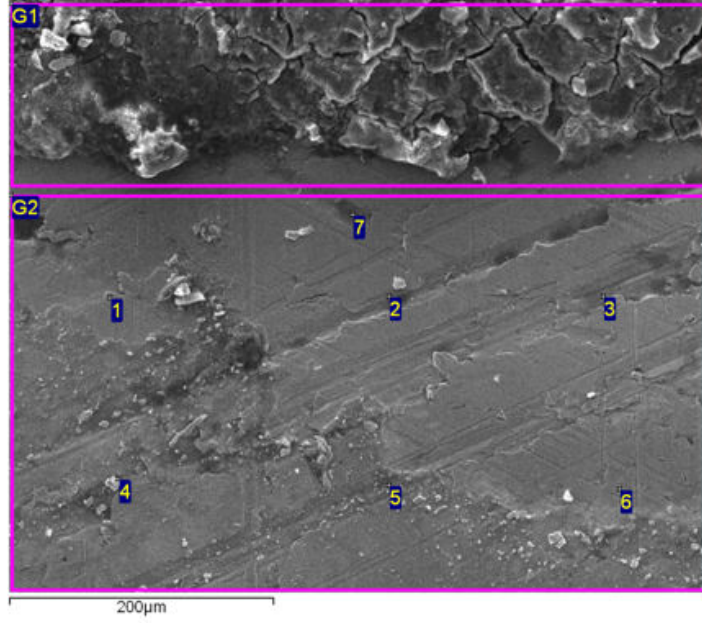
Şekil 7.9’da sadece 2 noktasında Ca, Zn, P ve S katkı maddesi elementlerinin tümü gözlemlenebilmektedir. 2 noktası honlama çizgisi üzerindedir.

Şekil 7.10’da sadece 2 noktasında Ca ve Zn katkı maddesi elementleri bulunmaktadır. 2 noktası honlama çizgisi üzerindedir.

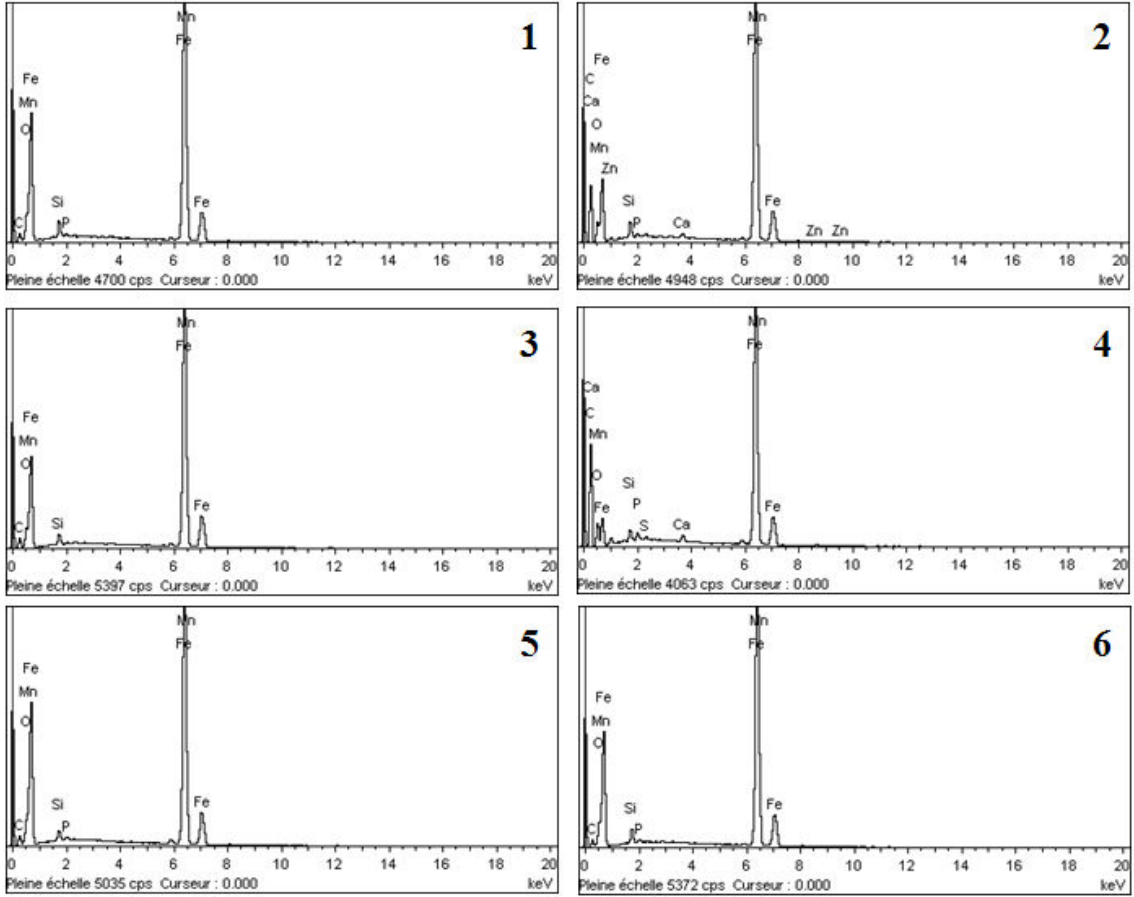
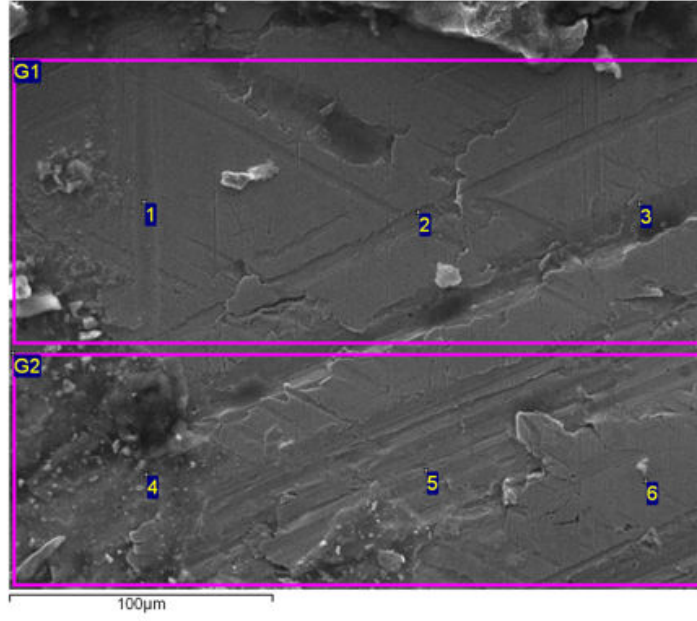
Şekil 7.11 ve 7.12 Diesel motorda test edilen silindir gömleği AÖN’nin sırasıyla x500 ve x1000 magnifikasyonlarındaki elektron mikroskobu görüntülerini ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresini göstermektedir.

Şekil 7.11 ve 7.12’de incelenen herhangi bir noktada herhangi bir katkı maddesine rastlanmamaktadır, bu sebeple AÖN’nin yalnızca iki magnifikasyonu incelenmiştir.

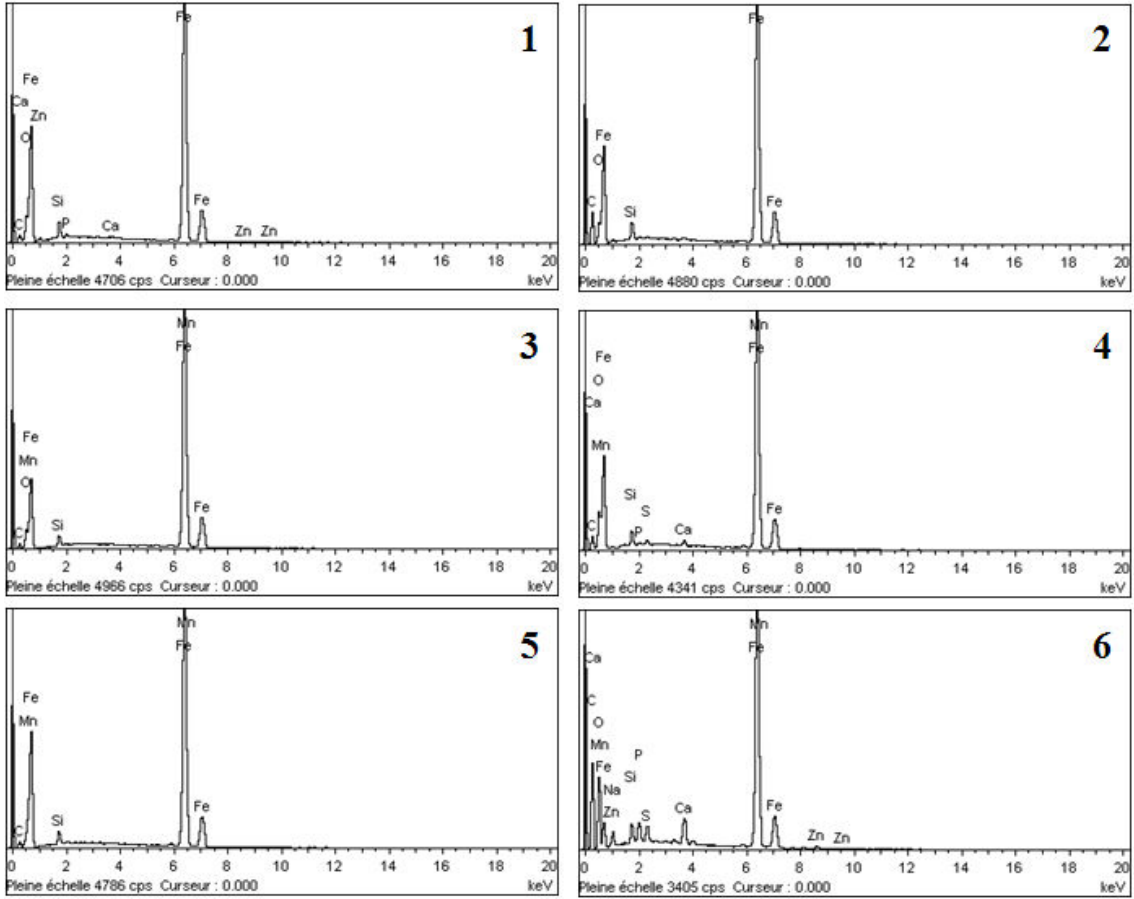
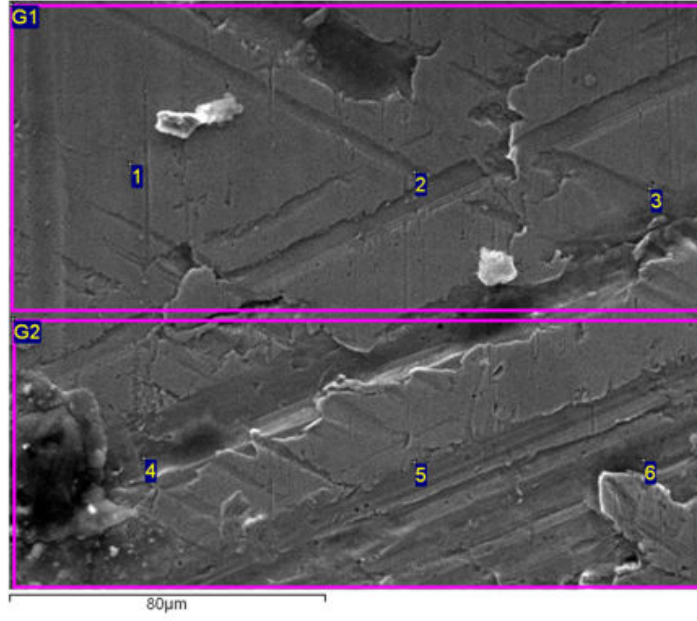
Yapılan incelemelerde ÜÖN ve ON için ölçüm yapılan her noktada katkı maddesine rastlanmaması silindir gömleğinde oluşan katkı maddelerinin tüm yüzeyi kaplamadığını, diğer bir deyişle adacıklar halinde oluştuğunu göstermektedir. Bu durum AÖN’de herhangi bir katkı maddesine rastlanılmadığı için geçerli değildir.



Şekil 7.1 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

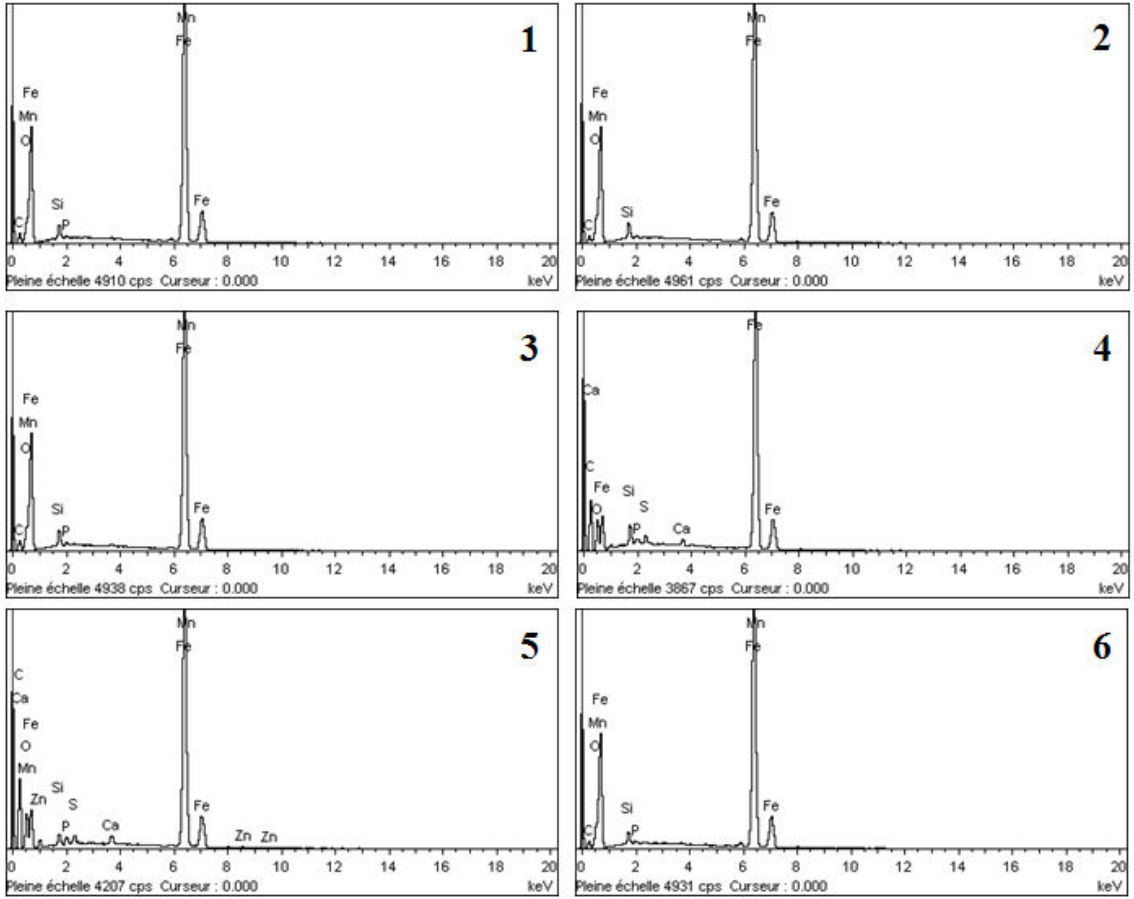
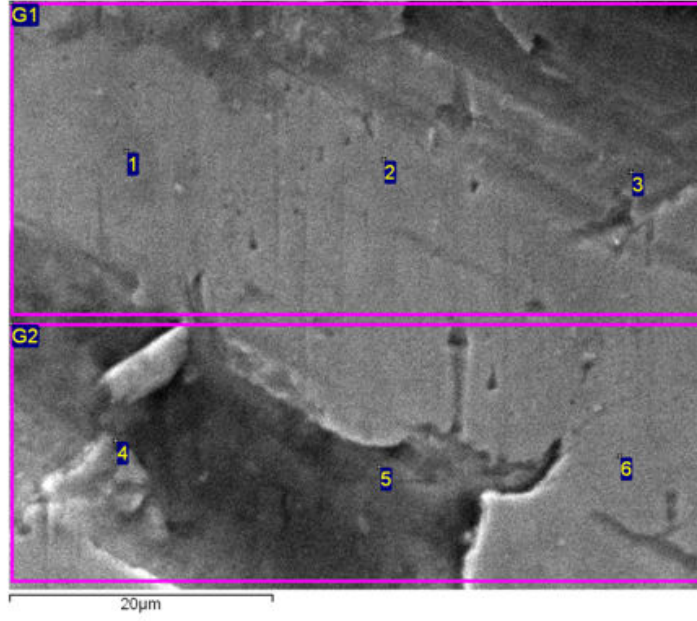


Şekil 7.2 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN'nin x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

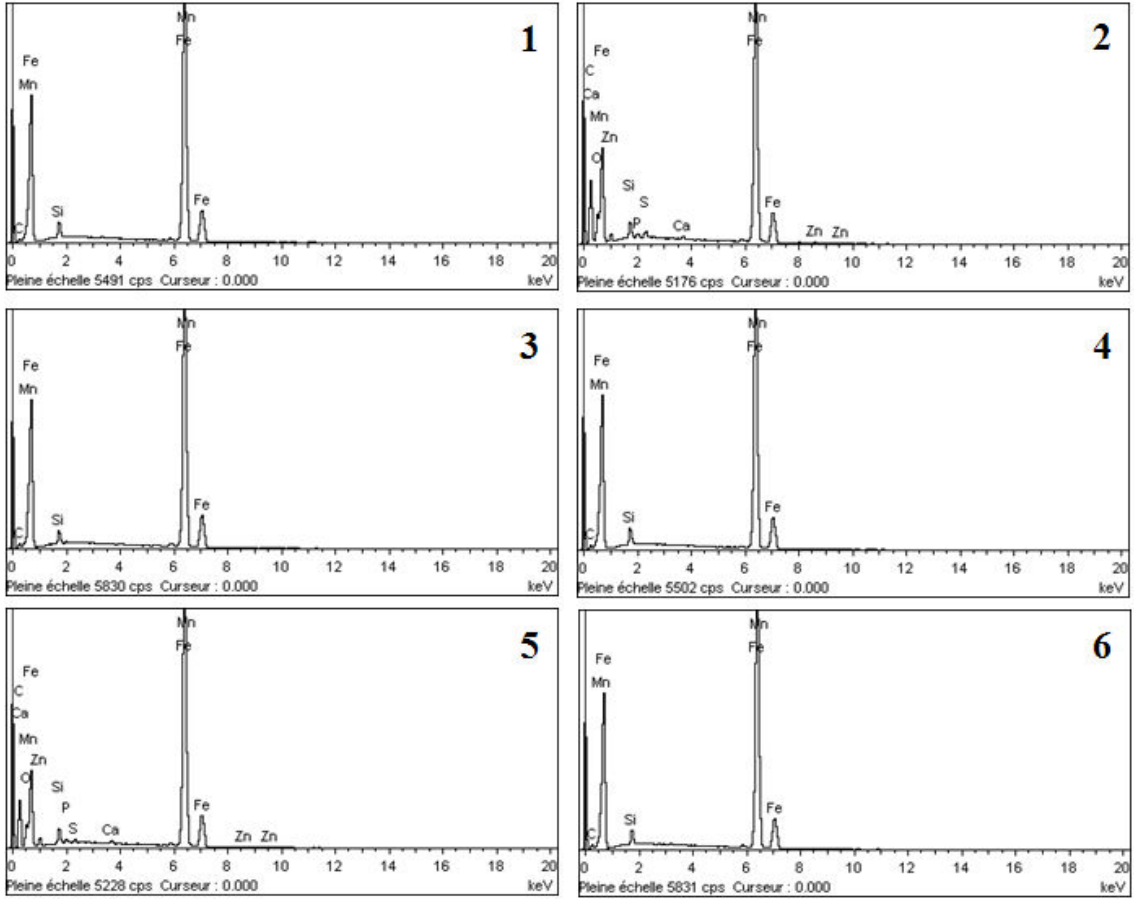
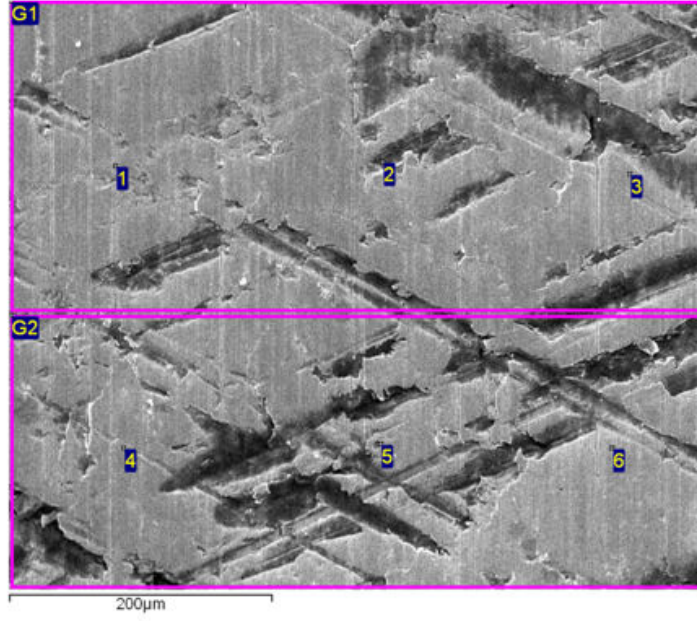


Şekil 7.3 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN'nin x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

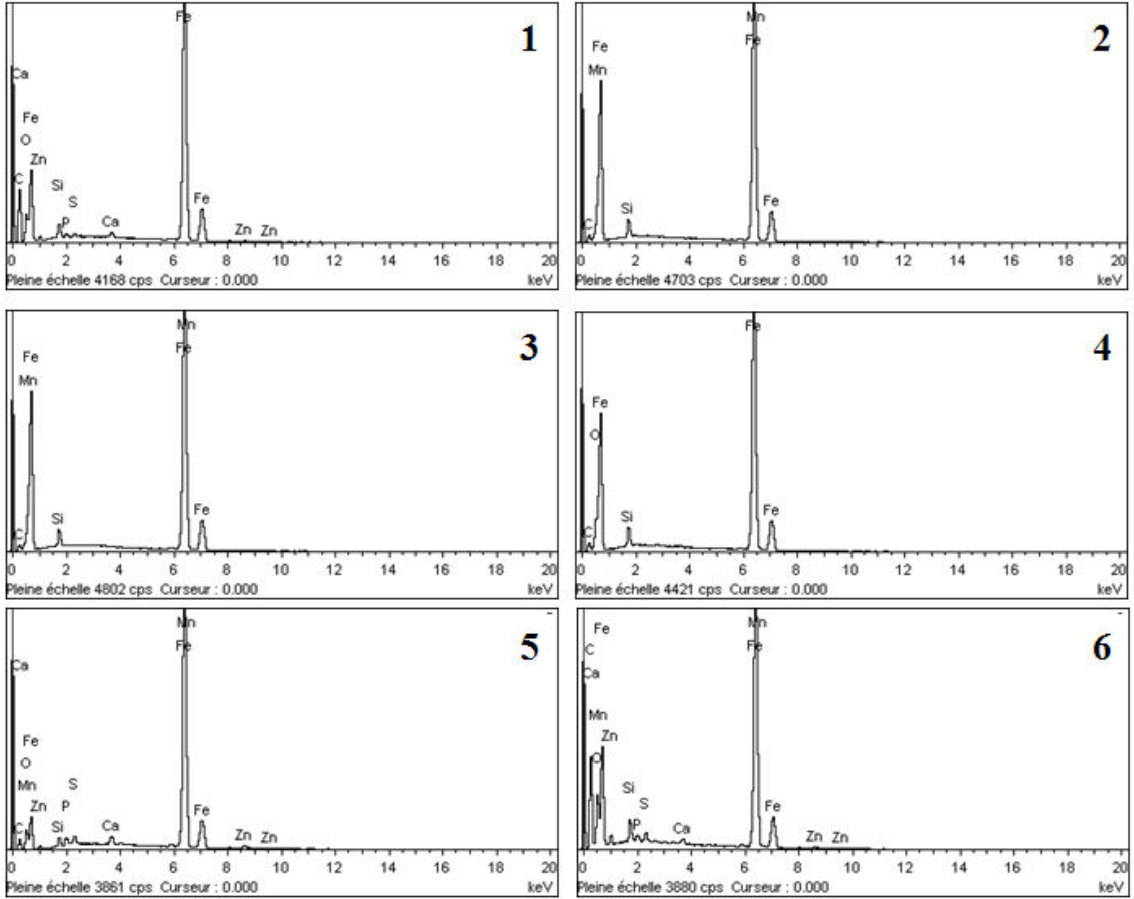
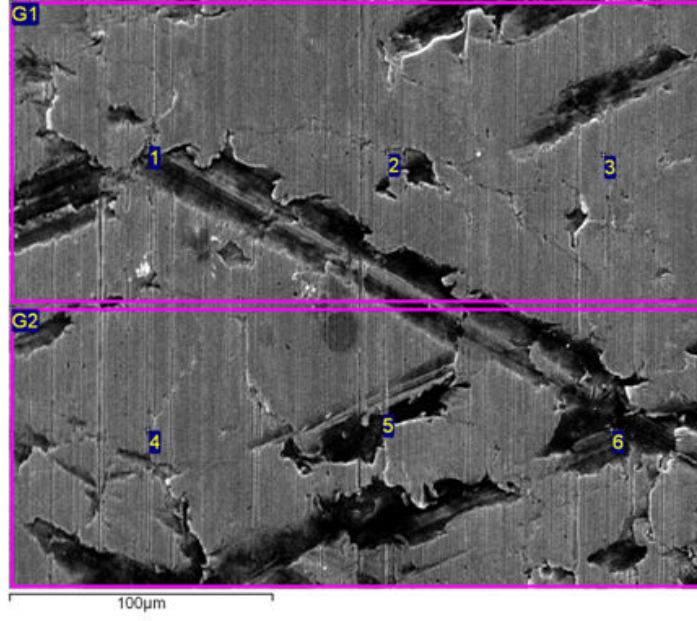




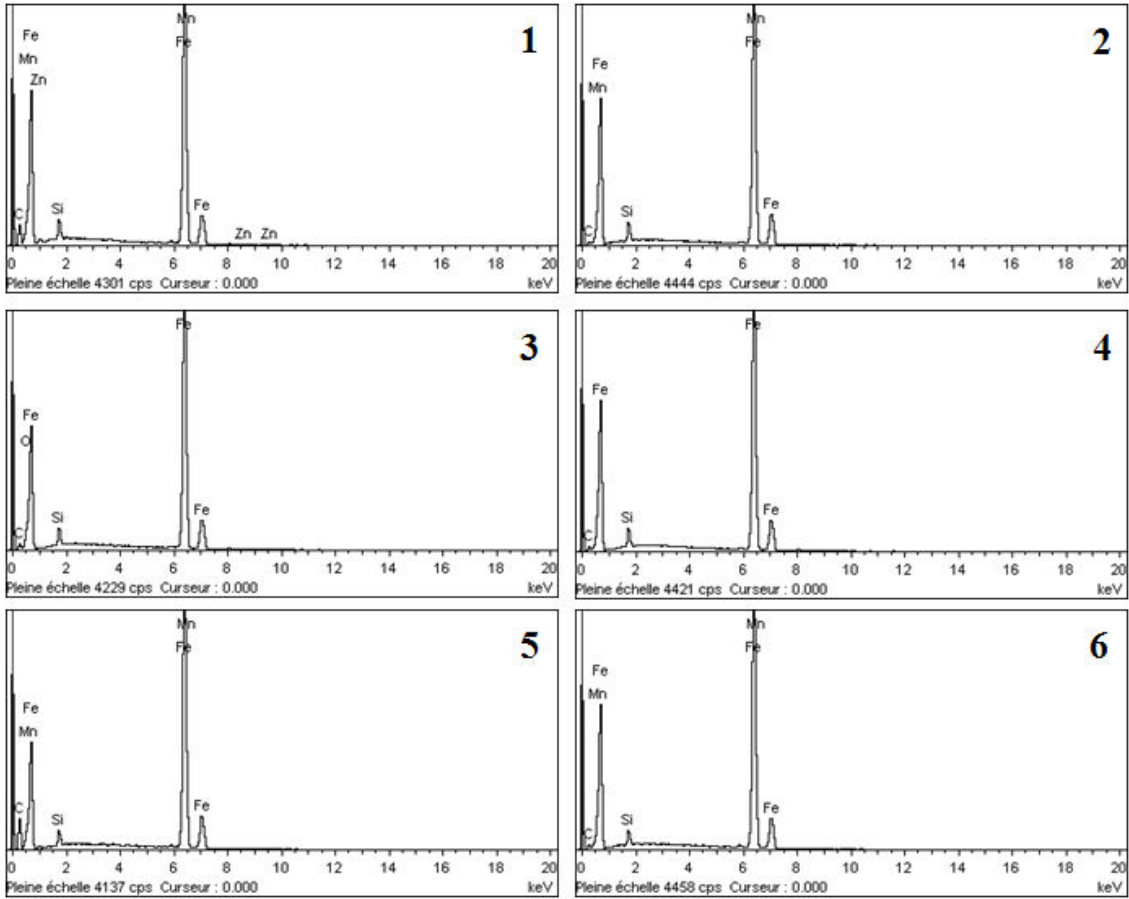
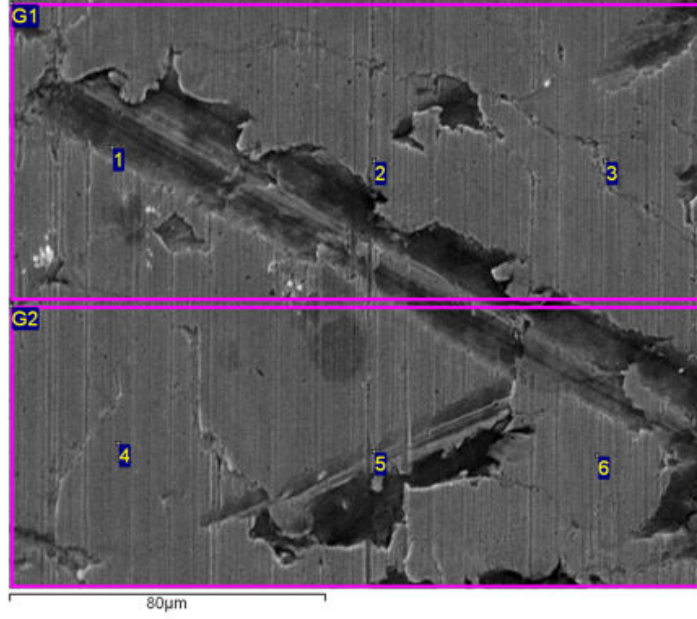
Şekil 7.5 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN'nin x5000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



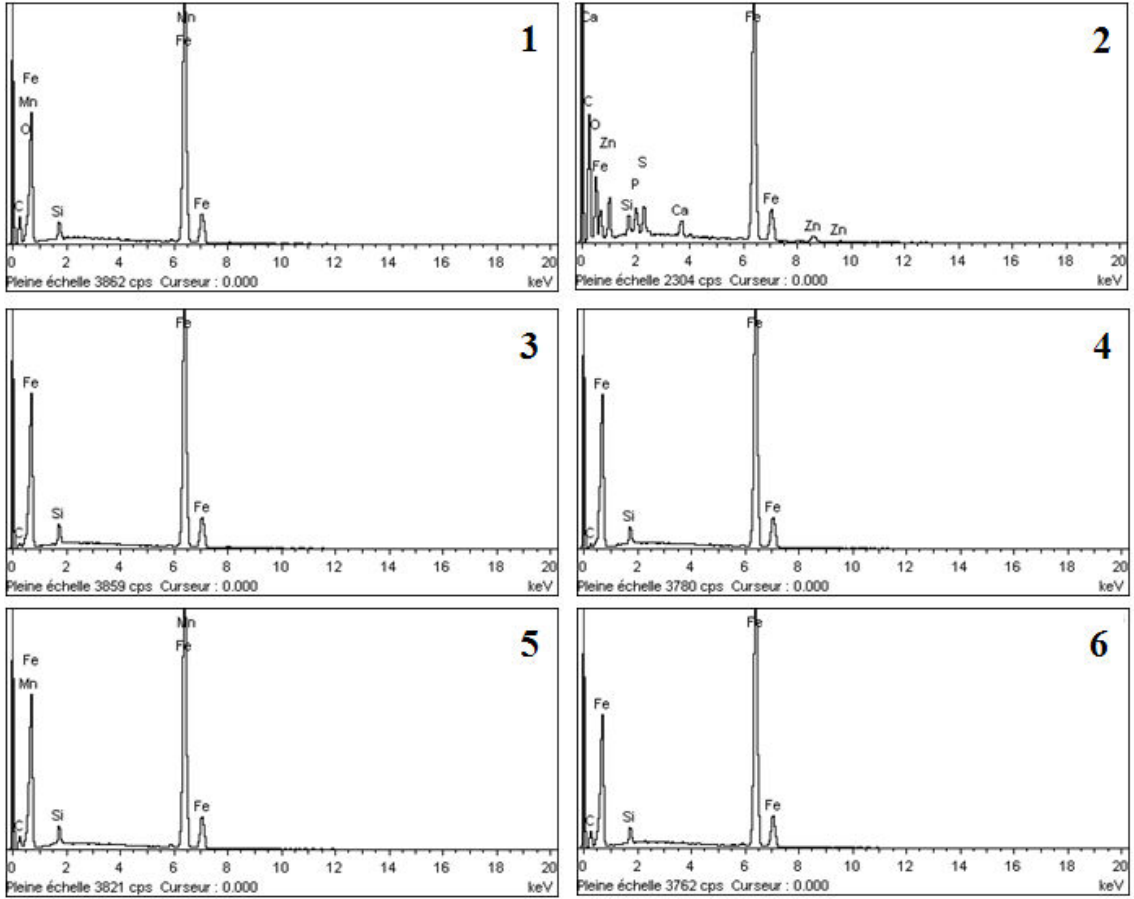
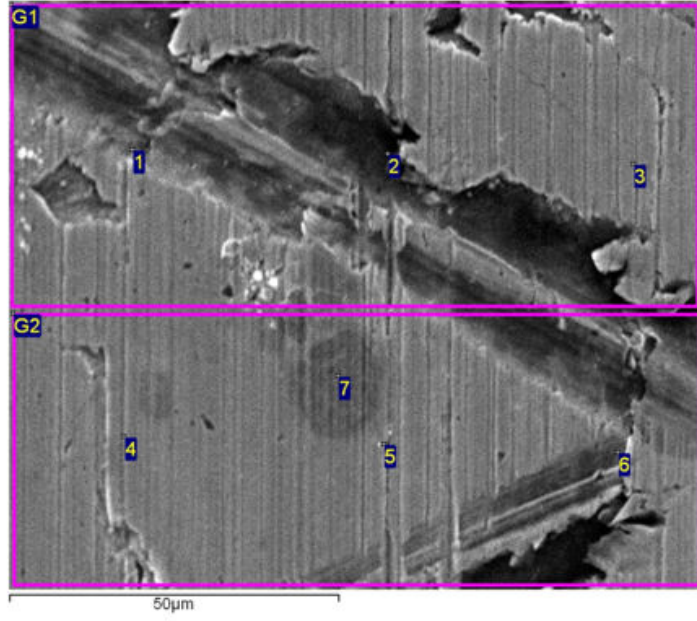
Şekil 7.6 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



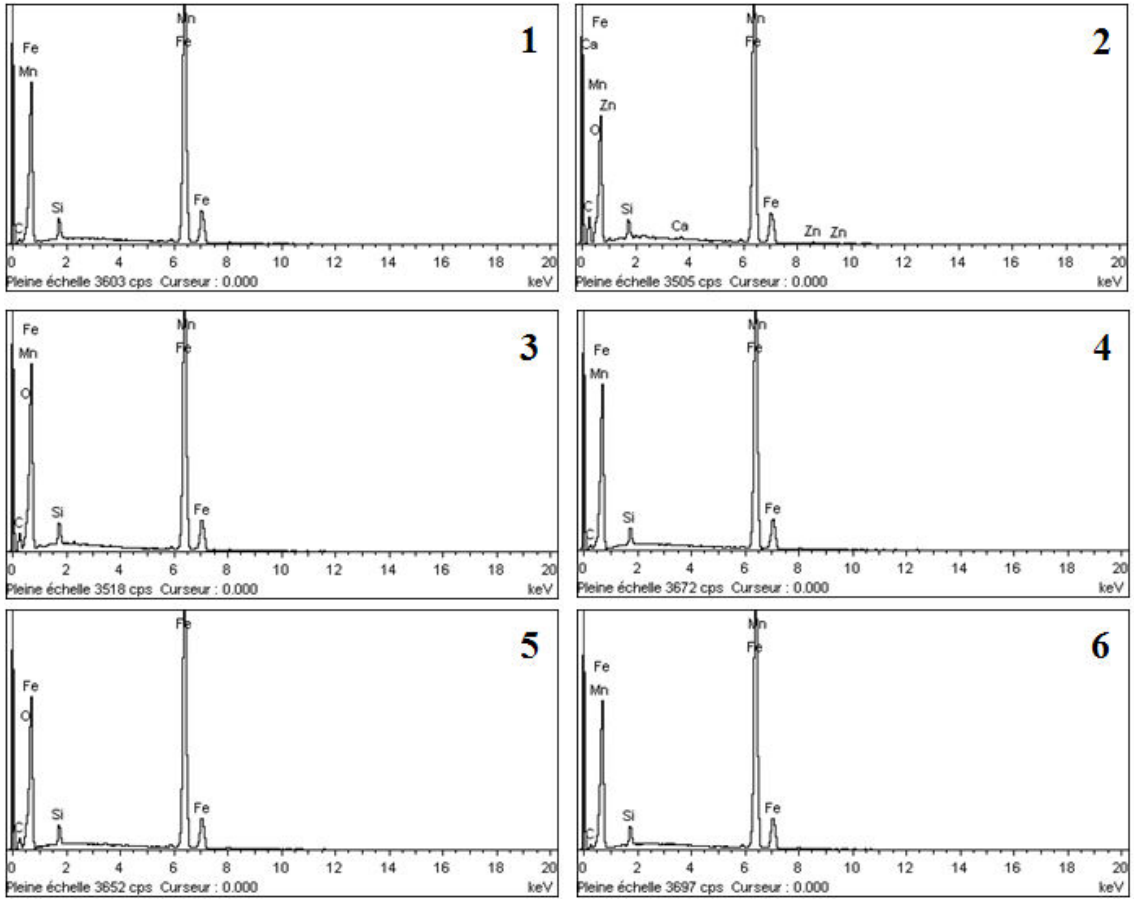
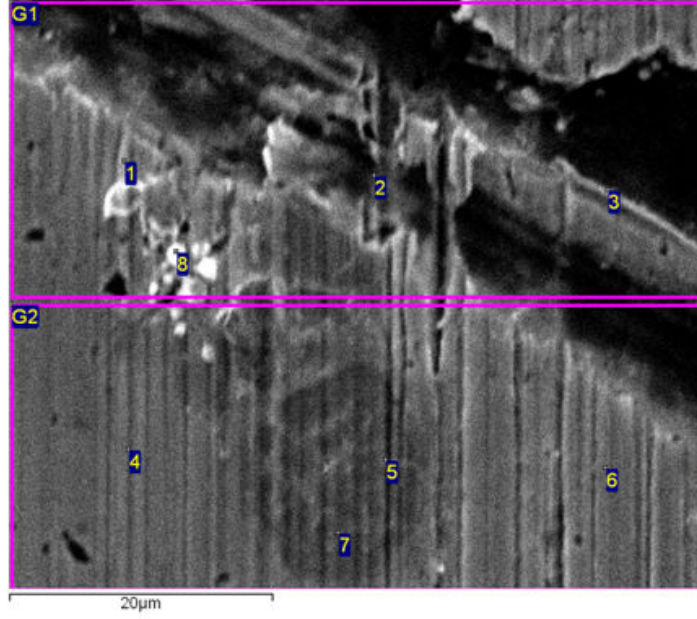
Şekil 7.7 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



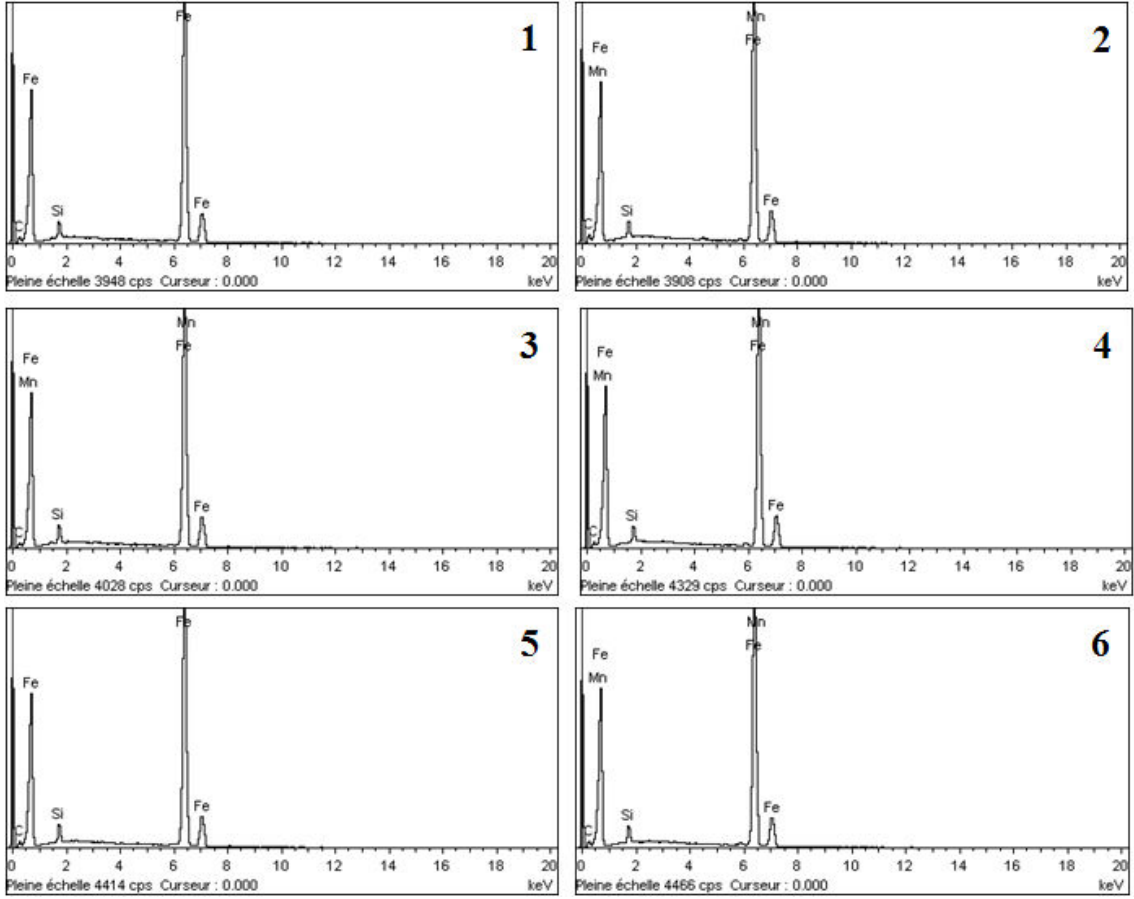
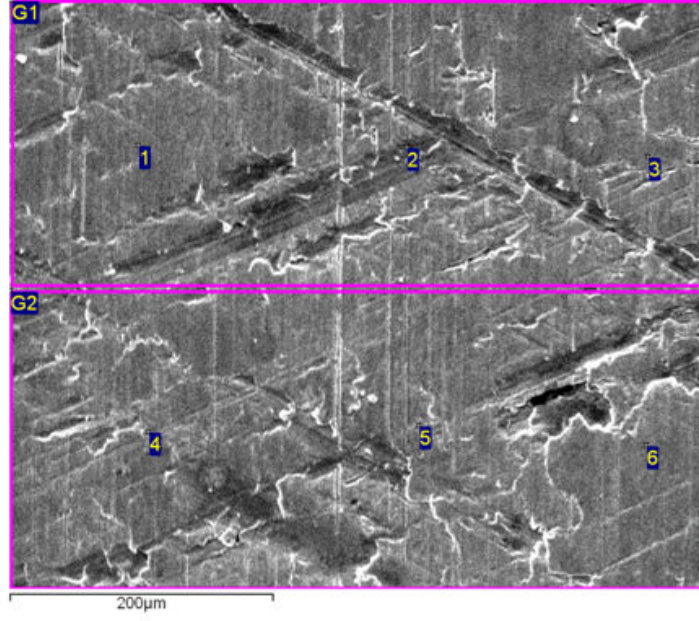
Şekil 7.8 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



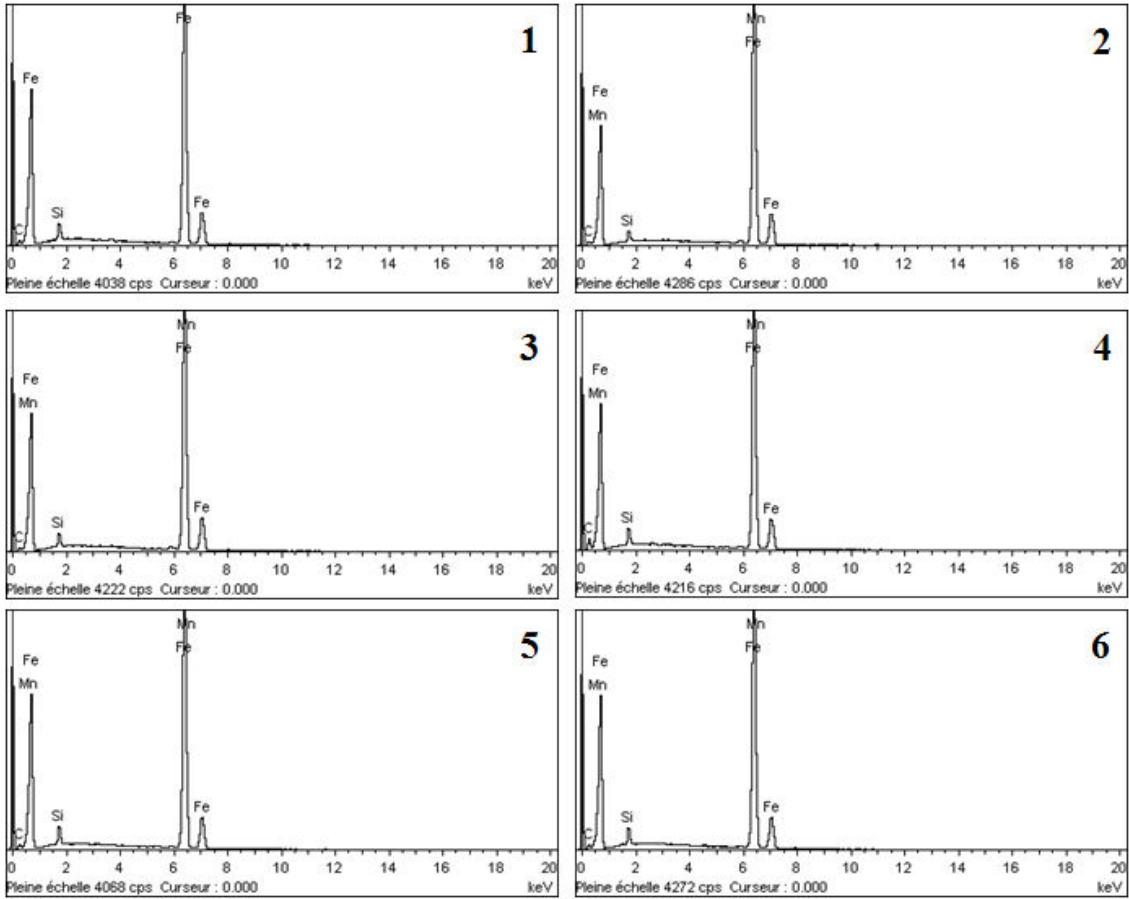
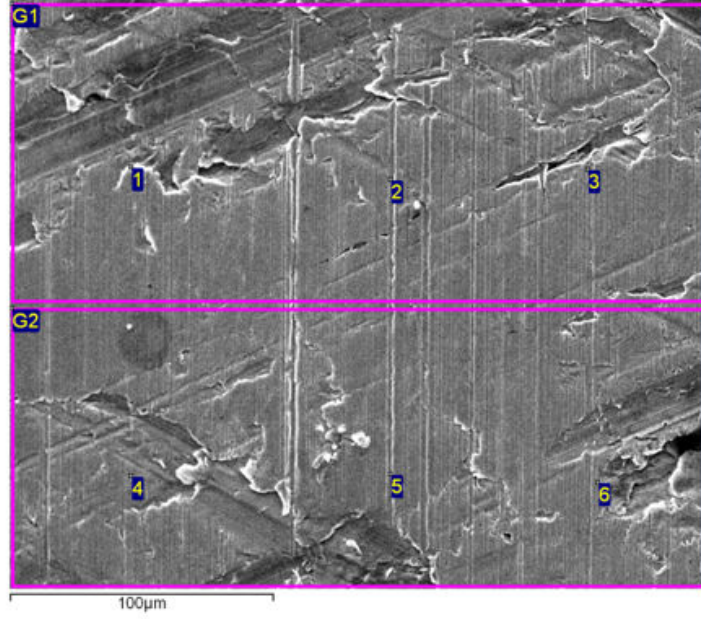
Şekil 7.9 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



Şekil 7.10 Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x5000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

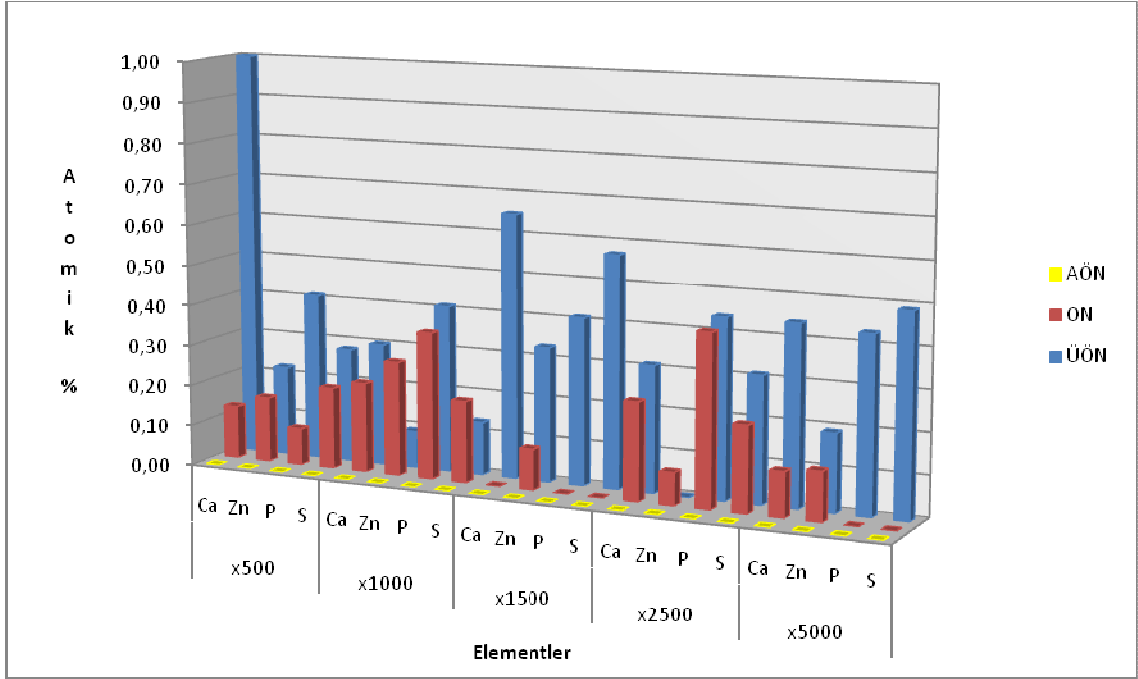


Şekil 7.11 Diesel motorda test edilen silindir gömleği AÖN'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



Şekil 7.12 Diesel motorda test edilen silindir gömleği AÖN'nin x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

Diesel motor silindir gömleği ÜÖN, ON ve AÖN'sinin incelenen tüm magnifikasyon değerlerinde (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) altı noktadaki (1, 2, 3, 4, 5 ve 6) katkı maddeleri (Ca, Zn, P ve S) değerlerinin kendi içlerinde ortalamaları alınarak Şekil 7.13'deki grafik oluşturulmuştur aynı zamanda bu değerler Çizelge 7.1'de verilmektedir. Bu grafikten de görülebileceği gibi ÜÖN en çok, ON'de daha az katkı maddesi gözlemlenmektedir ve AÖN'de ise hiç katkı maddesi gözlemlenmemektedir.



Şekil 7.13 Diesel motor silindir gömleği ÜÖN, ON ve AÖN'nin beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri

## 7.2 Pim-Plaka Tribotest Düzeneginde Test Edilen Plakaların (A, B ve C) Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 7.14, 7.15, 7.16, 7.17 ve 7.18 pim-plaka tribotest düzeneginde test edilen Plaka A'nın sırasıyla x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000 magnifikasyonlarındaki elektron mikroskopu görüntülerini ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresini göstermektedir.

Şekil 7.14'de 1 ve 4 noktalarında Ca, Zn, P ve S katkı maddelerinin tümü gözlemlenmektedir. 3, 5 ve 6 noktalarında katkı maddesi olarak yalnızca P elementi bulunmakta olup abrazyon yarığı üzerindedirler.

Şekil 7.15'de 1 ve 3 noktalarında P ve S elementleri, 4 ve 6 noktalarında ise sadece S elementi gözlemlenmektedir.

Şekil 7.16'da katkı maddesi olarak 4 noktasında yalnızca P elementi, 5 noktasında ise Zn ve P elementleri görülmektedir.

Şekil 7.17'de 2 ve 5 noktalarında katkı maddesi olarak Ca, Zn, P ve S, 3 noktasında Zn ve P, 4 ve 6 noktalarında P ve S elementleri, 1 noktasında ise yalnızca P elementi gözlenmektedir. Bu noktalardan 2 ve 5 abrazyon yarığı üzerindedir.

Şekil 7.18'de 2, 4 ve 5 noktalarında Ca, Zn, P ve S katkı maddelerinin tümü görülmektedir. Bu noktalardan 2 ve 5 abrazyon yarığı üzerinde bulunmaktadır. 1 noktasında P ve S elementleri, 6 noktasında sadece P elementi bulunmaktadır.

Şekil 7.19, 7.20 ve 7.21 pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin sırasıyla x500, x1000 ve x1500 magnifikasyonlarındaki elektron mikroskobu görüntülerini ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresini göstermektedir.

Şekil 7.19'da 2 noktasında Ca, Zn, P ve S katkı maddelerinin tümü gözlemlenebilmektedir. 2 noktası honlama çizgisi üzerinde bulunmaktadır. Diğer noktalarda (1, 3, 4, 5 ve 6) hiçbir katkı maddesine rastlanmamıştır.

Şekil 7.20'de 3 noktasında Ca, P ve S, 4 noktasında ise sadece P elementi bulunmaktadır.

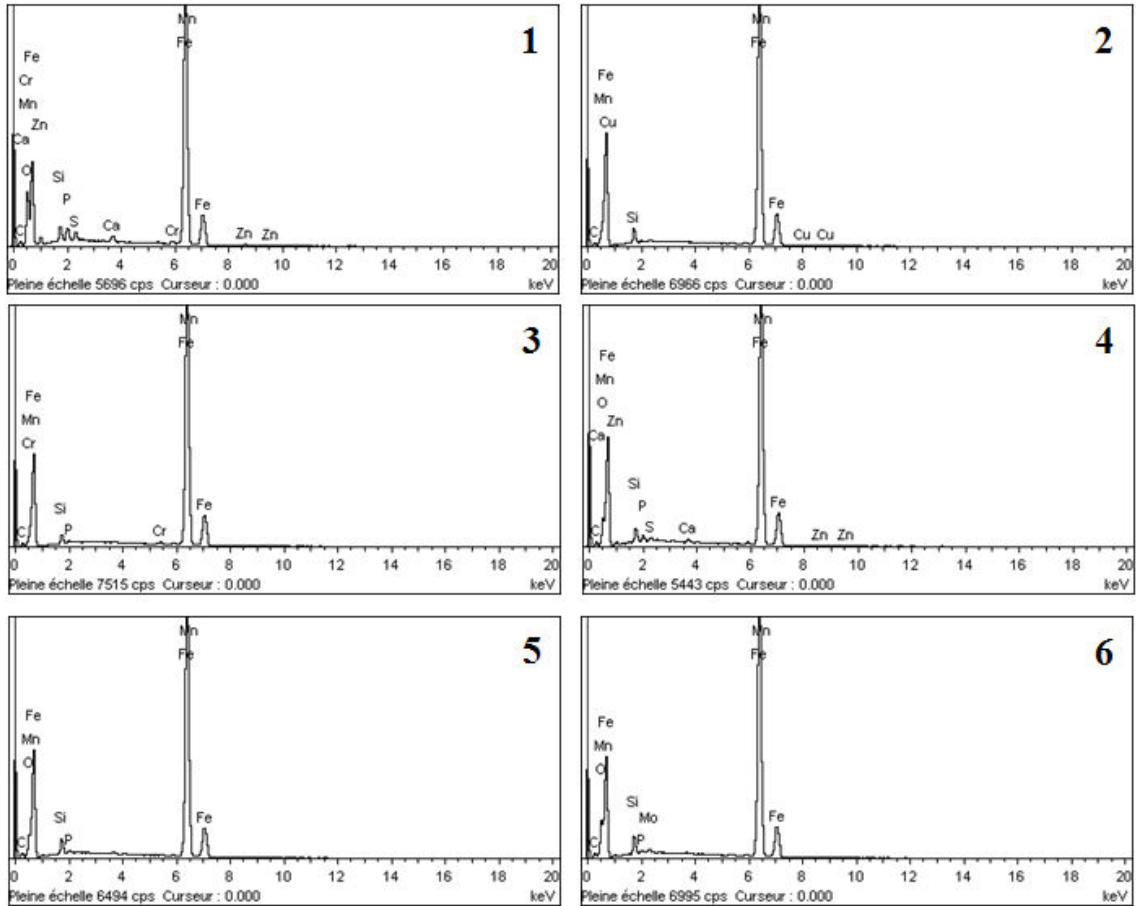
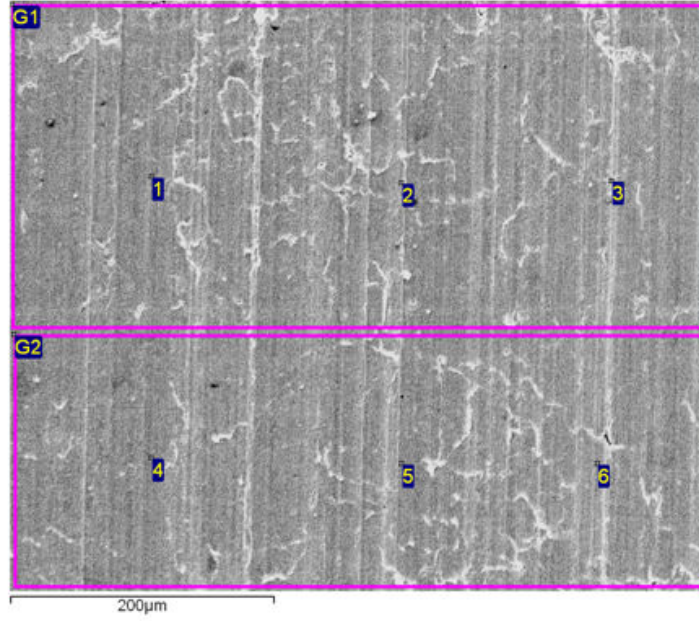
Şekil 7.21'de 1, 2 ve 4 noktalarında sadece P elementi gözlemlenmektedir. 5 noktasında Ca, 6 noktasında P ve S elementleri bulunmaktadır. Bu noktalardan 1, 2, 4 ve 5 noktaları honlama çizgisi üzerinde bulunmaktadır.

Şekil 7.22 ve 7.23 pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka C'nin sırasıyla x500 ve x1500 magnifikasyonlarındaki elektron mikroskobu görüntülerini ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresini göstermektedir.

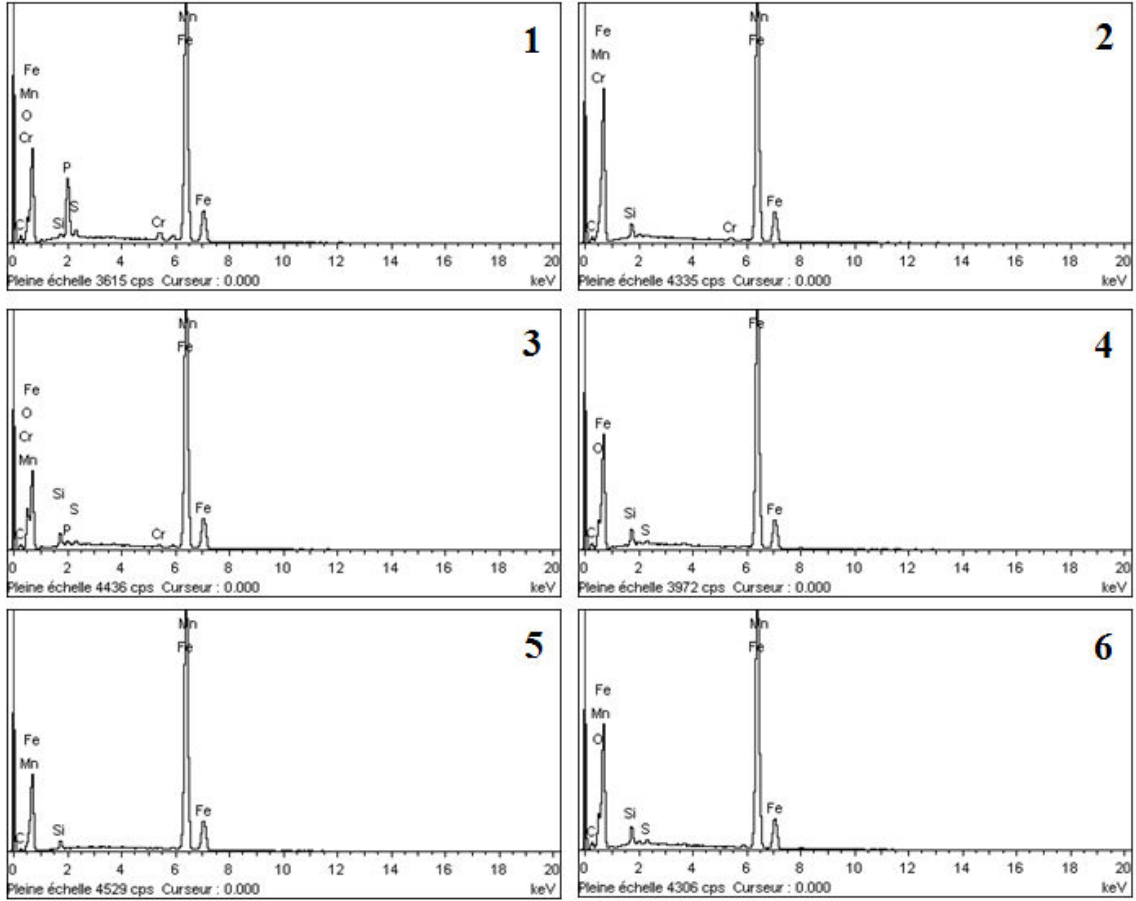
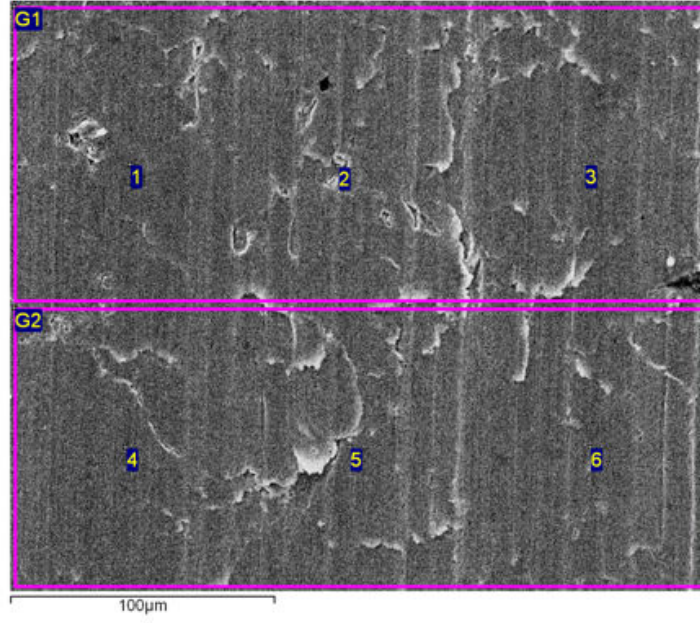
Şekil 7.22'de 3 noktasında P ve S, 6 noktasında sadece P elementi gözlemlenebilmektedir. 3 ve 6 noktaları honlama çizgisi üzerindedir. Diğer noktalarda hiçbir katkı maddesi elementi bulunmamaktadır.

Şekil 7.23'de 1, 4, 5 ve 6 noktalarında P elementi bulunup diğer noktalarda hiçbir katkı maddesi elementine rastlanmamıştır.

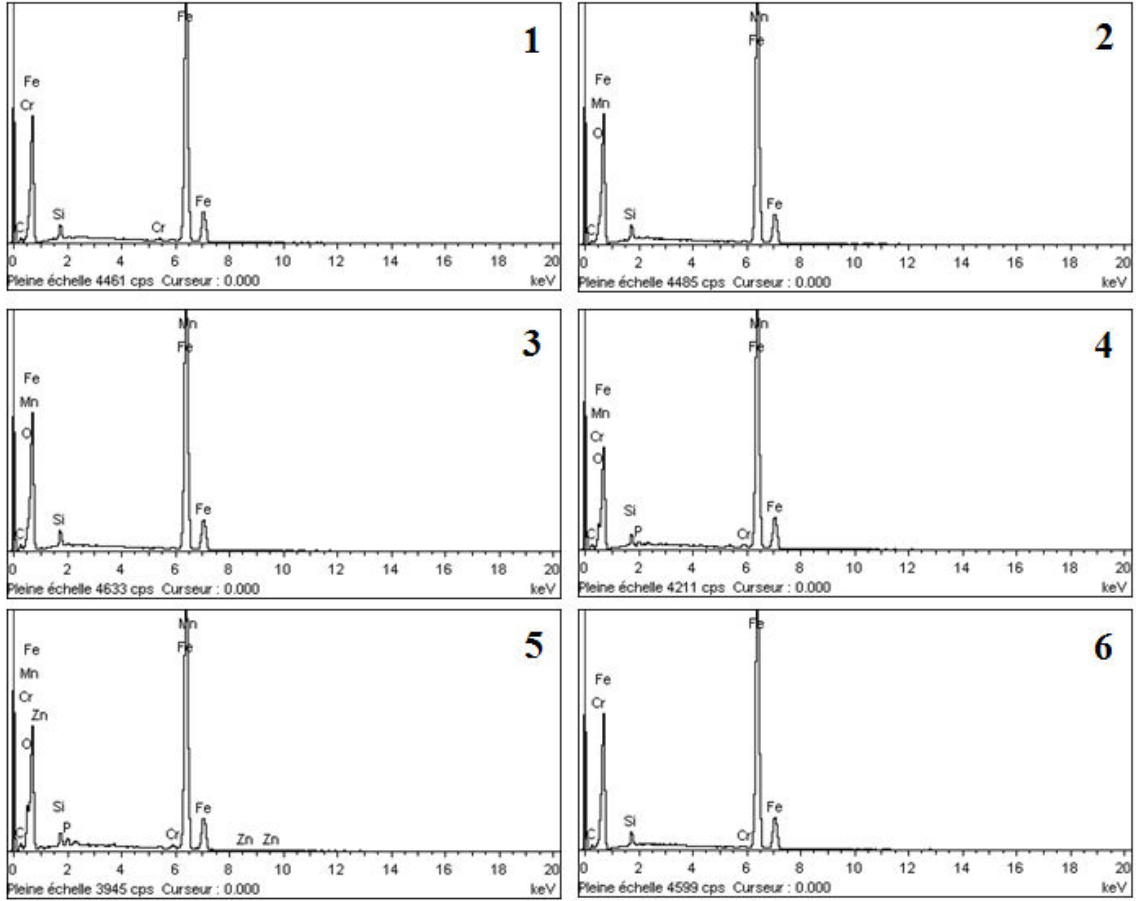
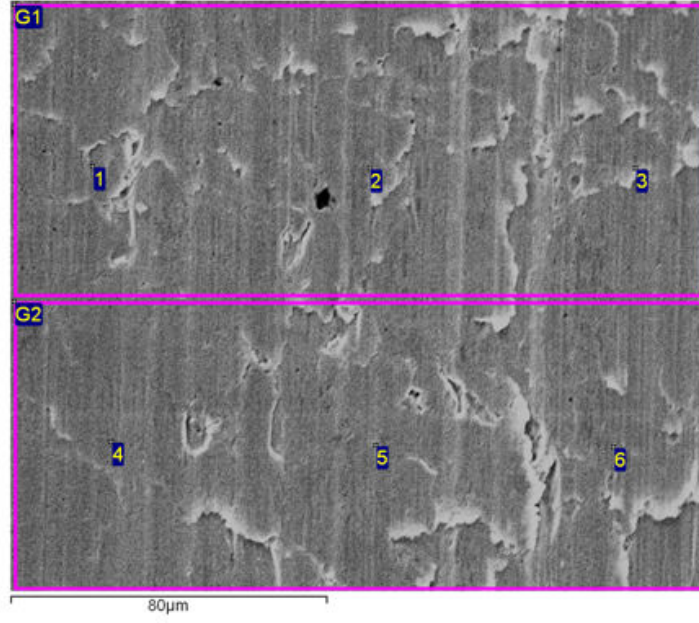
Yapılan incelemelerde Plaka A, B ve C için ölçüm yapılan her noktada katkı maddesine rastlanmaması silindir gömleğinde oluşan katkı maddelerinin tüm yüzeyi kaplamadığını, diğer bir deyişle adacıklar halinde oluştuğunu göstermektedir.



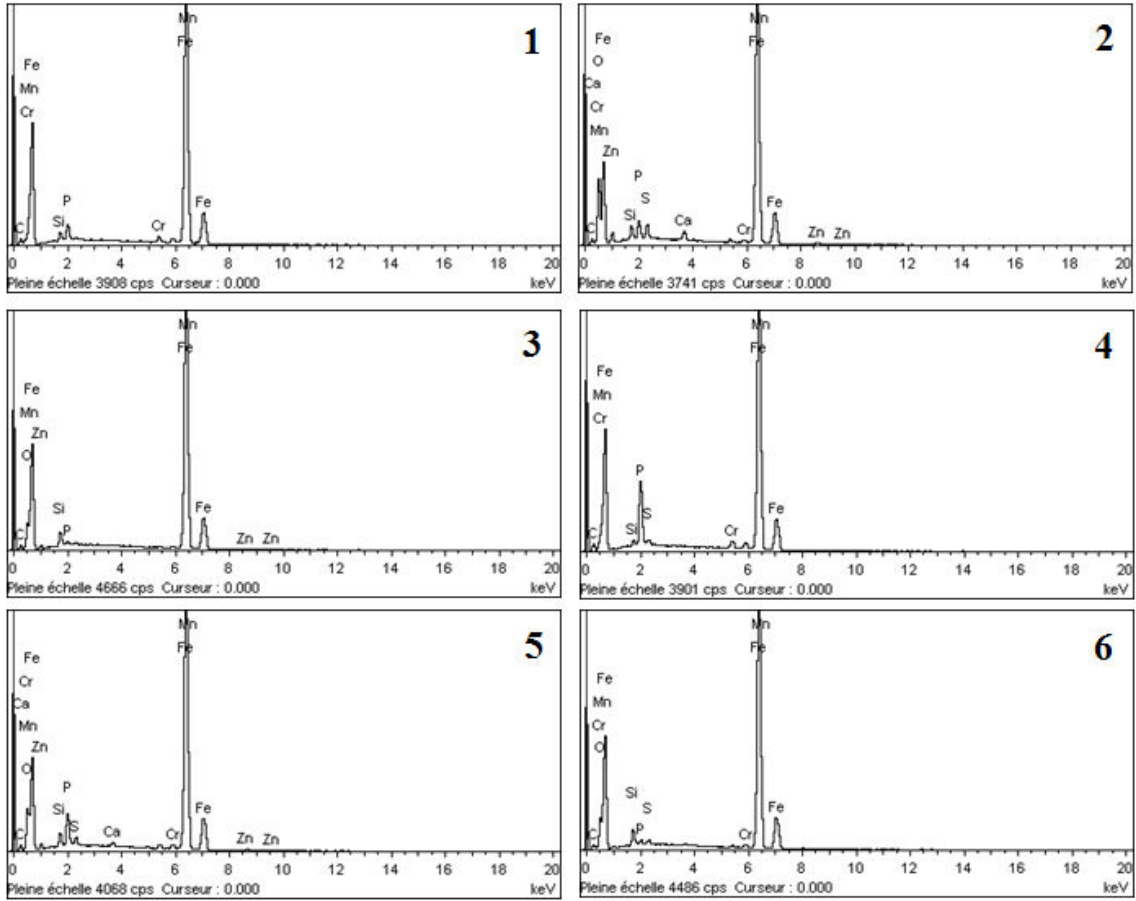
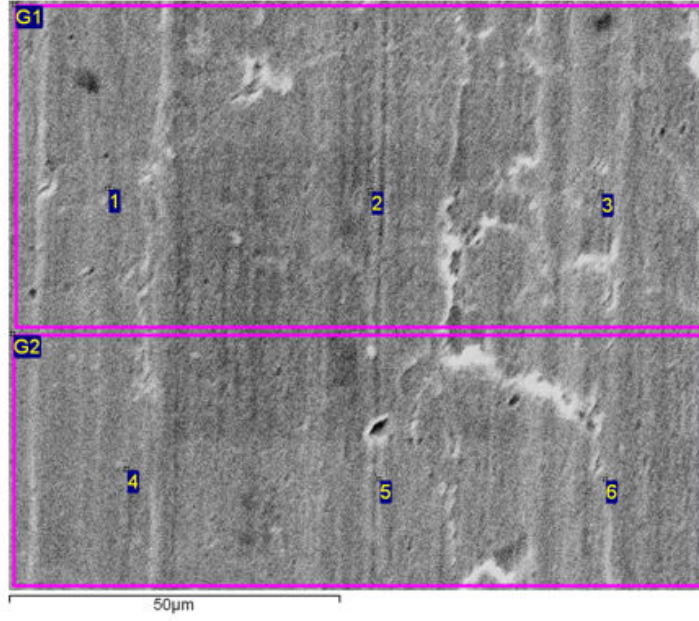
Şekil 7.14 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



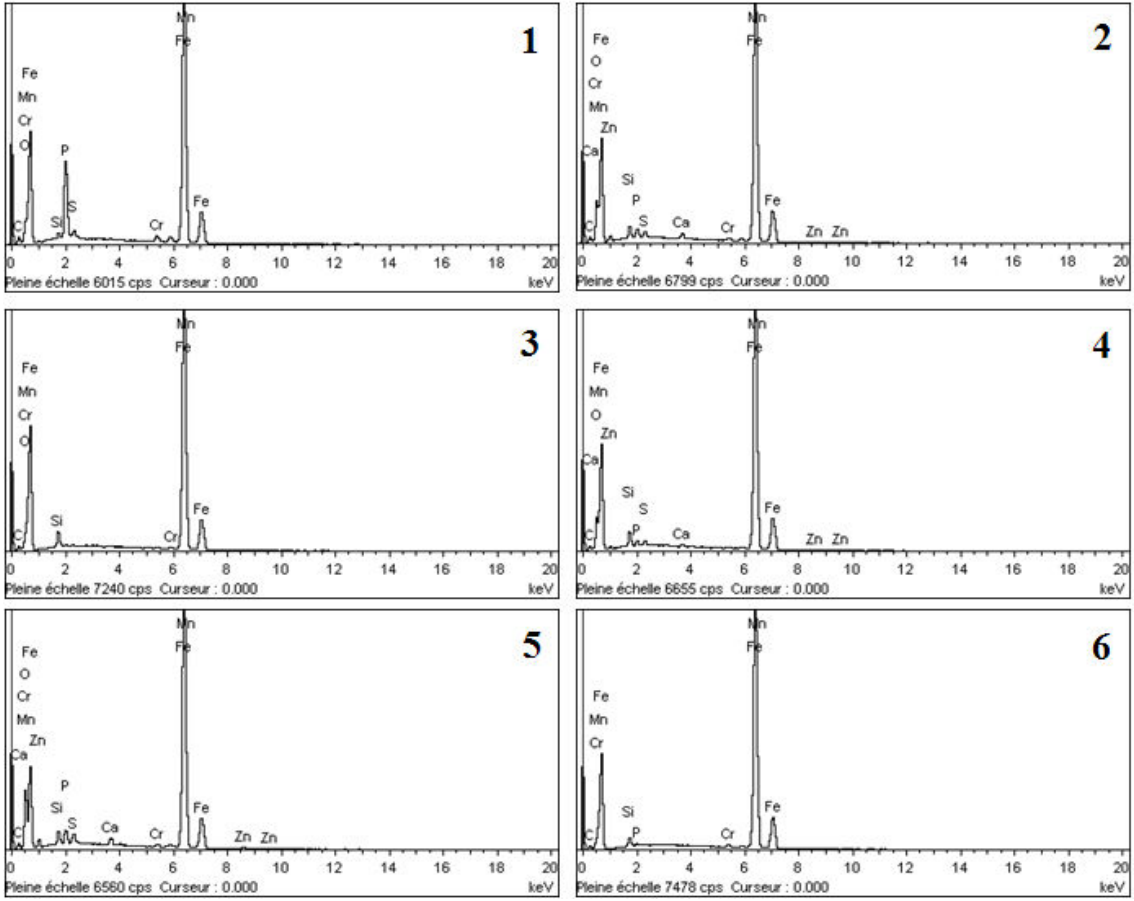
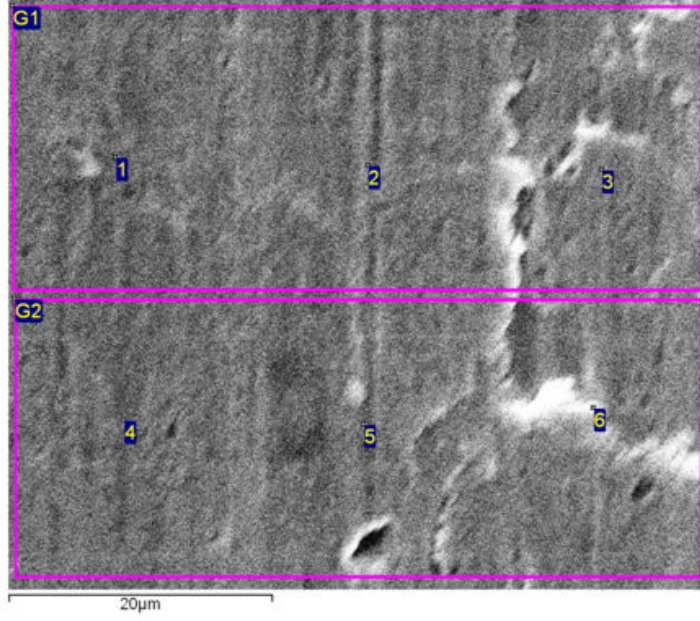
Şekil 7.15 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



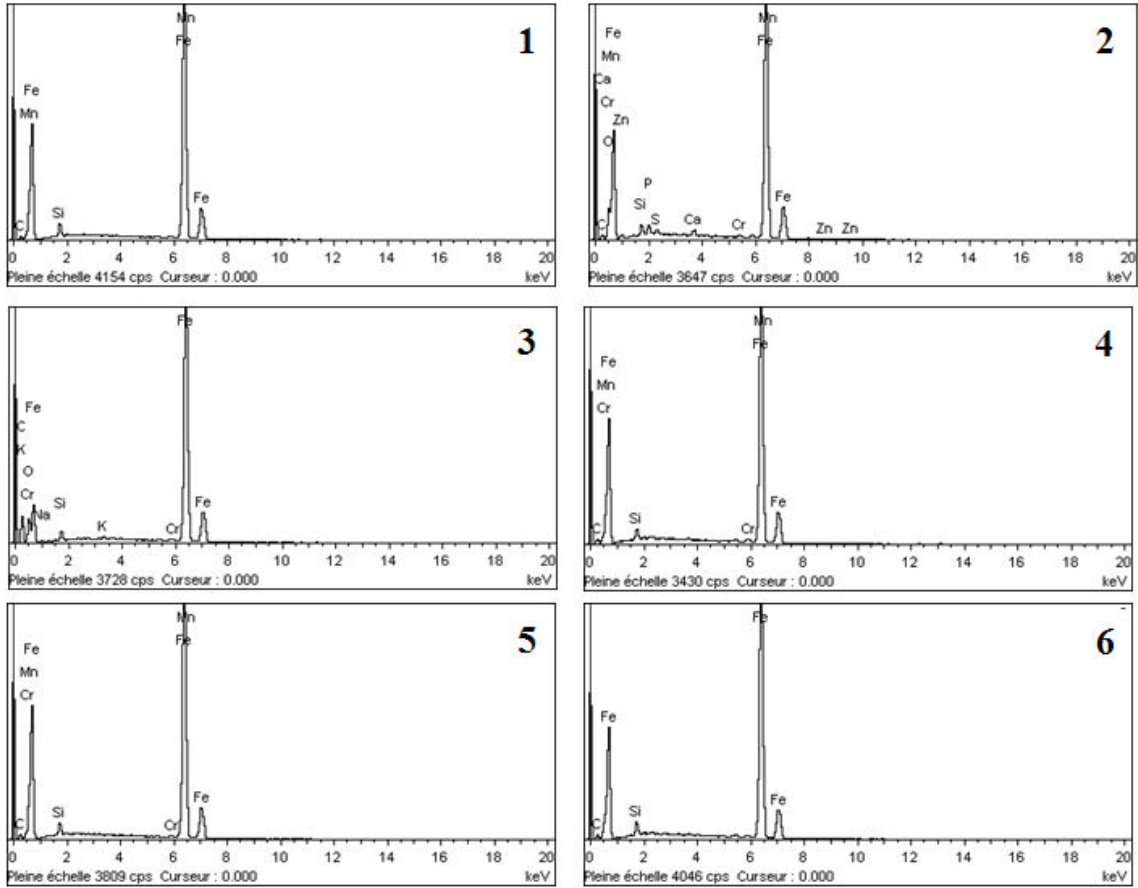
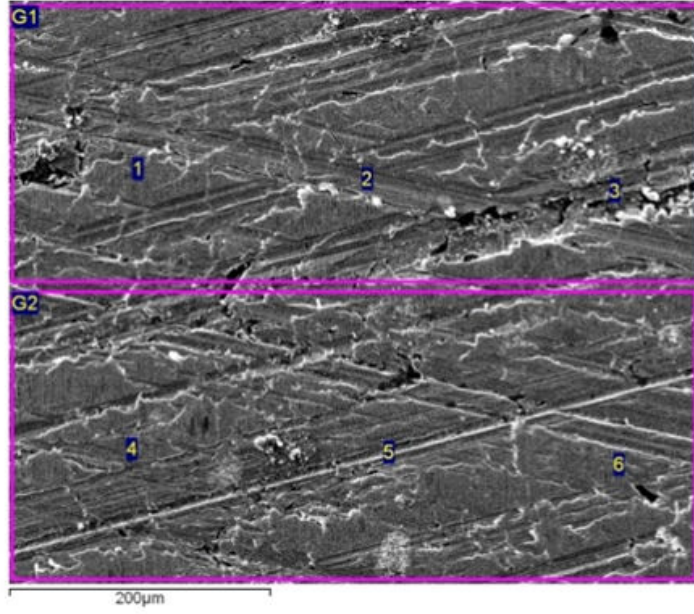
Şekil 7.16 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



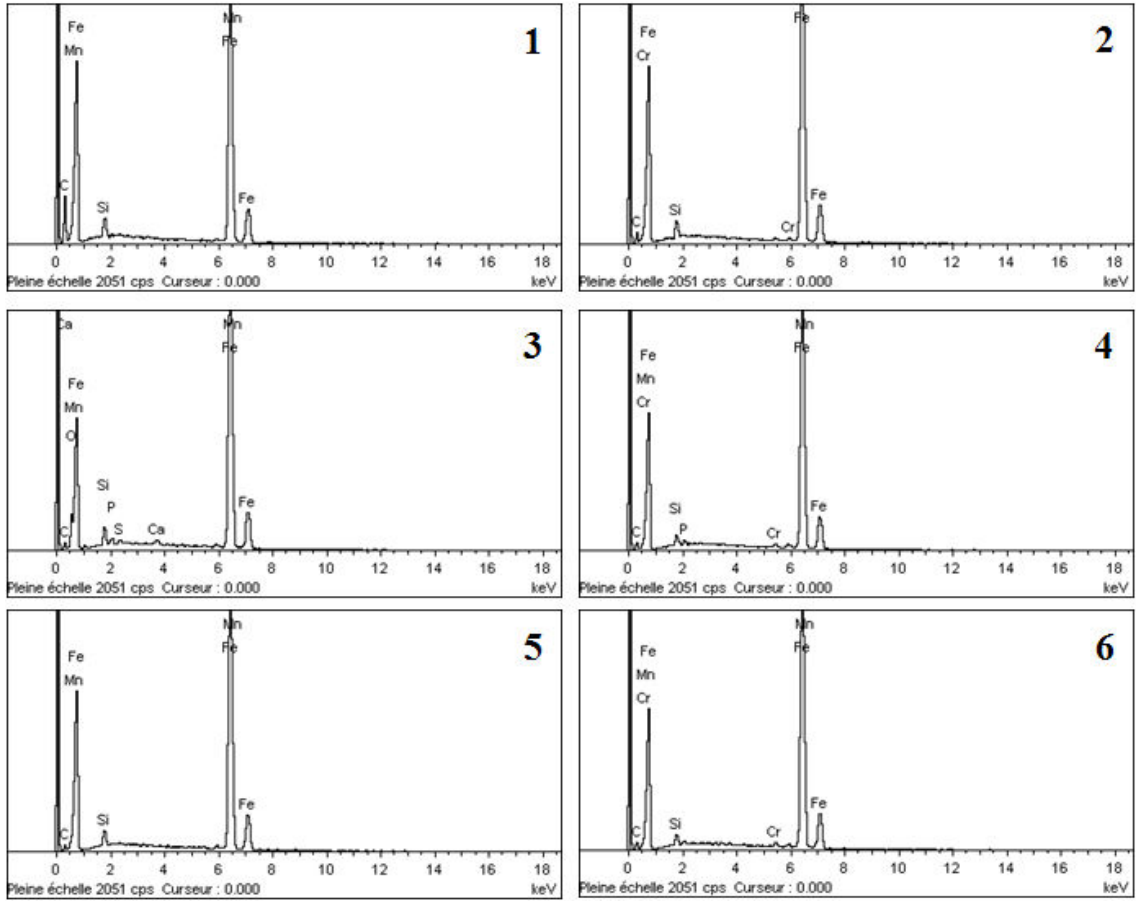
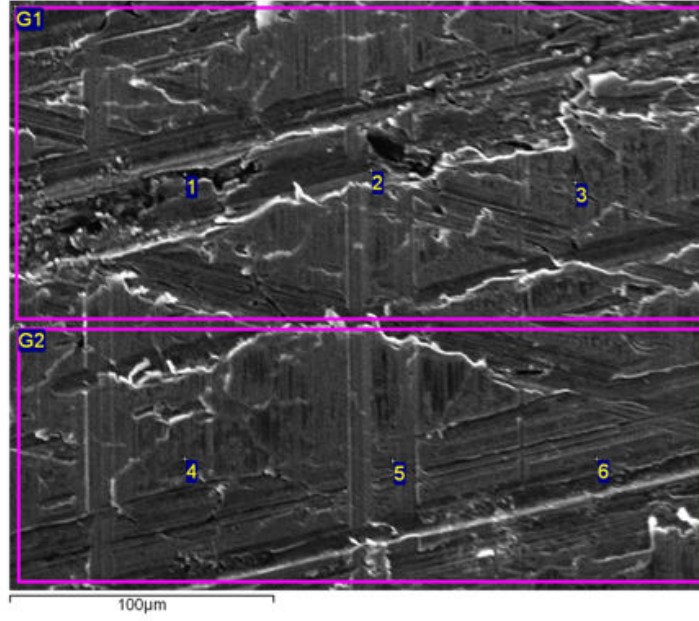
Şekil 7.17 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



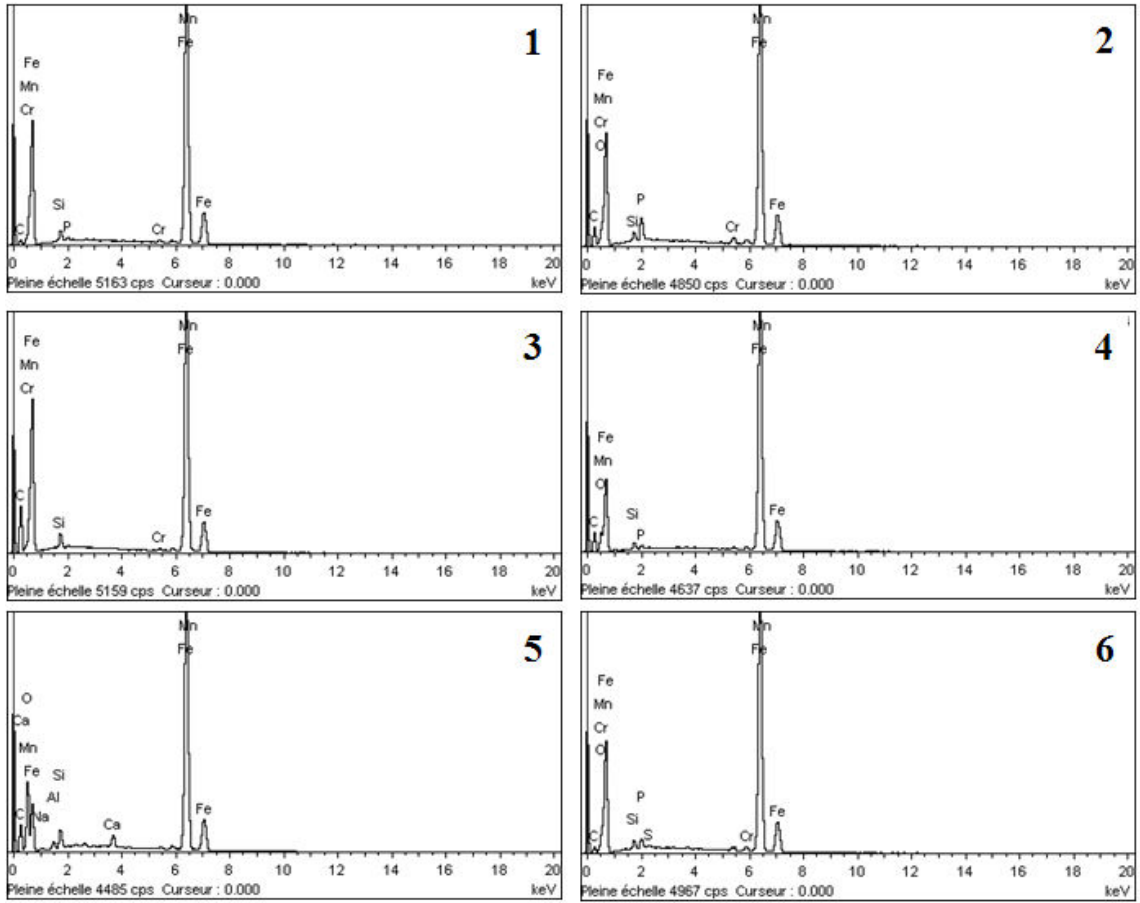
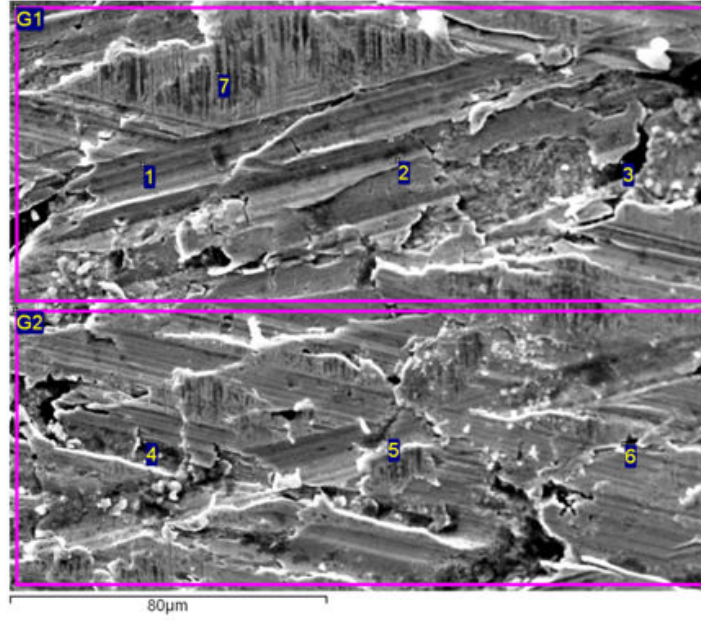
Şekil 7.18 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x5000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



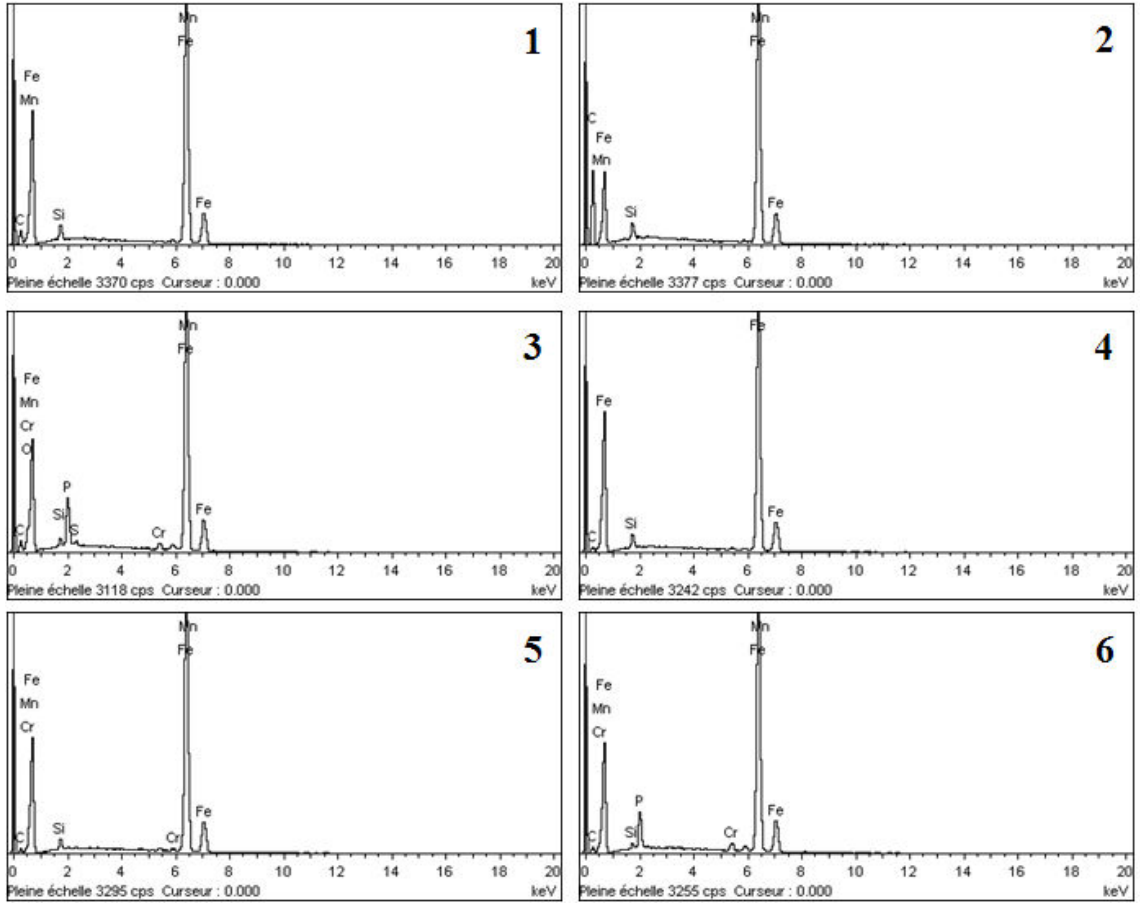
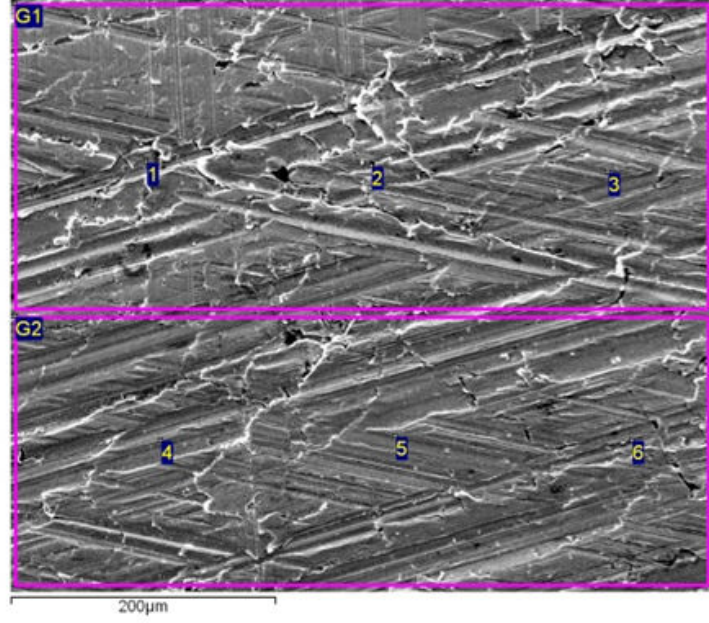
Şekil 7.19 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



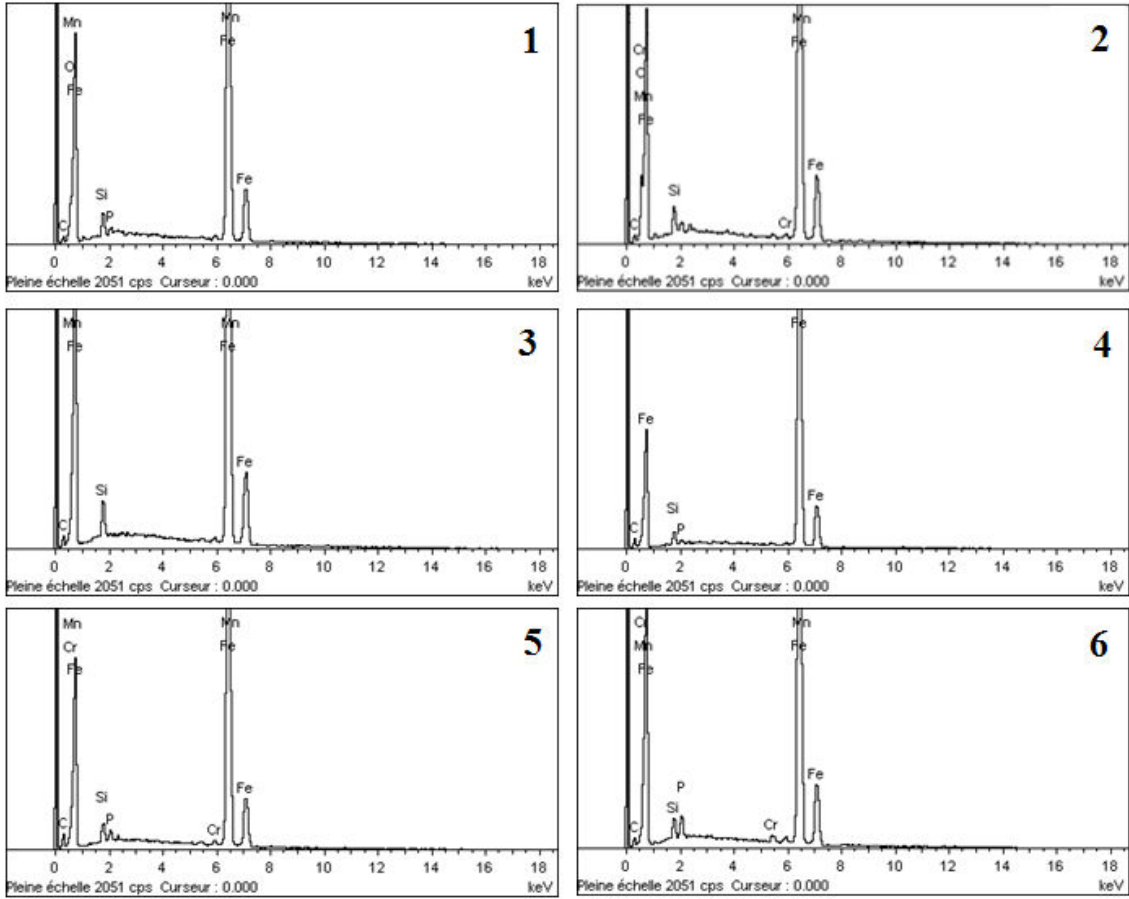
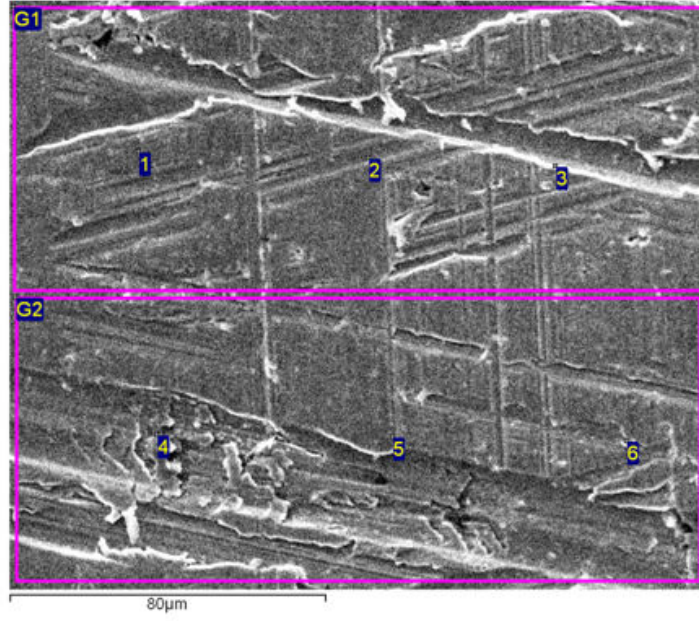
Şekil 7.20 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



Şekil 7.21 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

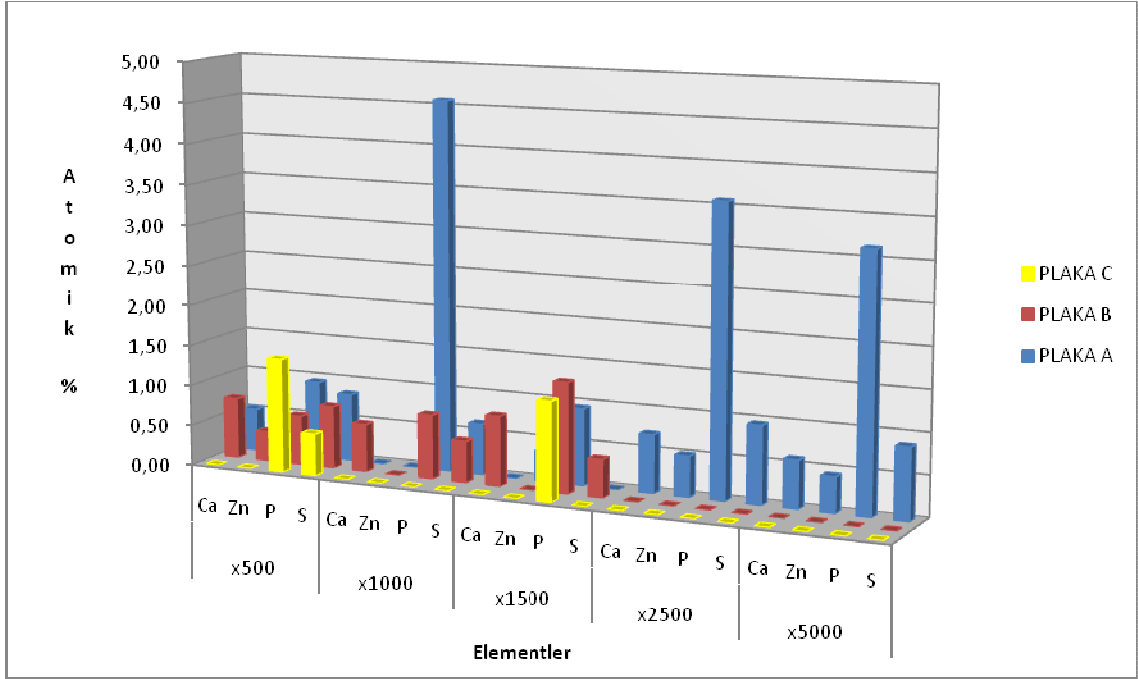


Şekil 7.22 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka C'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



Şekil 7.23 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka C'nin x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

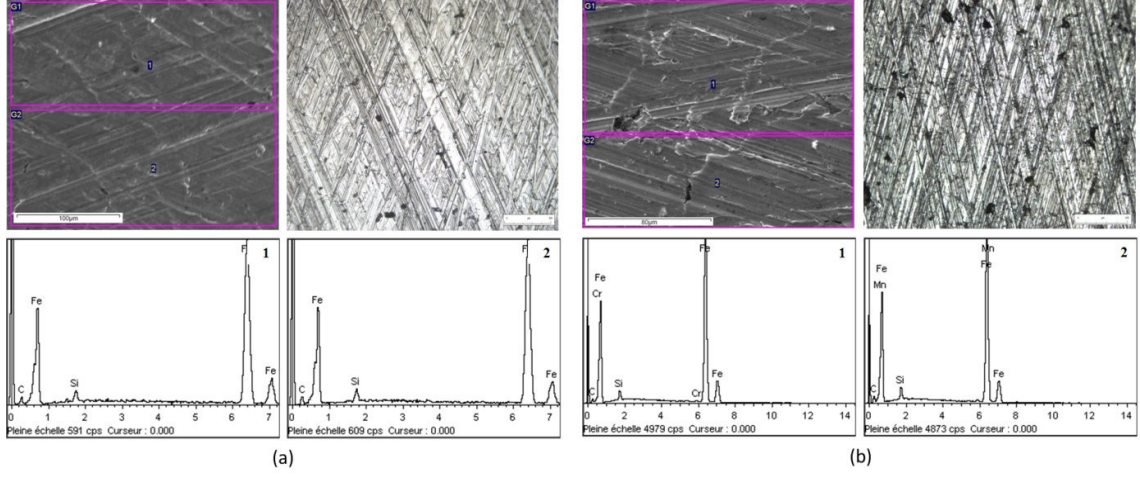
Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A, B ve C'nin incelenen tüm magnifikasyon değerlerinde (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) altı noktadaki (1, 2, 3, 4, 5 ve 6) katkı maddeleri (Ca, Zn, P ve S) değerlerinin kendi içlerinde ortalamaları alınarak Şekil 24'deki grafik oluşturulmuştur aynı zamanda bu değerler Çizelge 7.1'de verilmektedir. Bu grafikten de görülebileceği gibi Plaka A'da en çok, Plaka B'de daha az ve Plaka C'de daha da az katkı maddesi gözlemlenmiştir.



Şekil 7.24 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A, B ve C'nin beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri

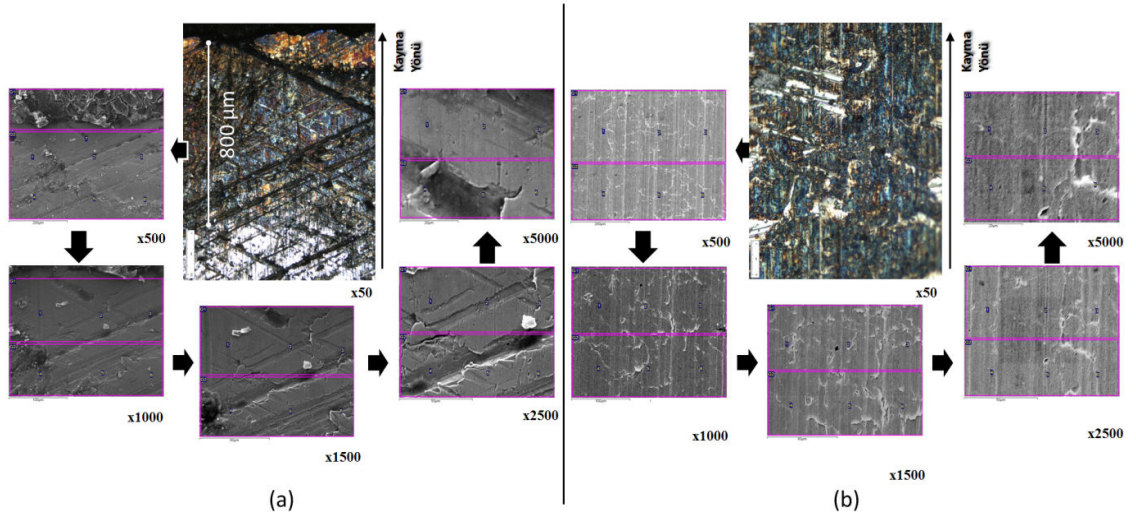
### 7.3 22 Saat Çalıştırılmış Diesel Motor Silindir Gömleği (ÜÖN, ON ve AÖN) ile Pim-Plaka Tribotest Düzeneğinde Test Edilen Plakaların (A, B ve C) Karşılaştırılması

Diesel motor kullanılmamış silindir gömleği ve kullanılmamış plaka yüzeyinin optik, tarayıcı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi Şekil 7.25'de gösterilmektedir. Diesel motora ait silindir gömleği ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilmek üzere temin edilen silindir gömleğinden kesilen plakanın malzemeleri dökme demirdir ve dökme demir bileşenleri olan Fe, C, Mn ve Si elementleri her iki örneğin de yüzeyini oluşturan temel elementlerdir.



Şekil 7.25 (a) Diesel motor kullanılmamış silindir gömleği ve (b) kullanılmamış plakanın optik, tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

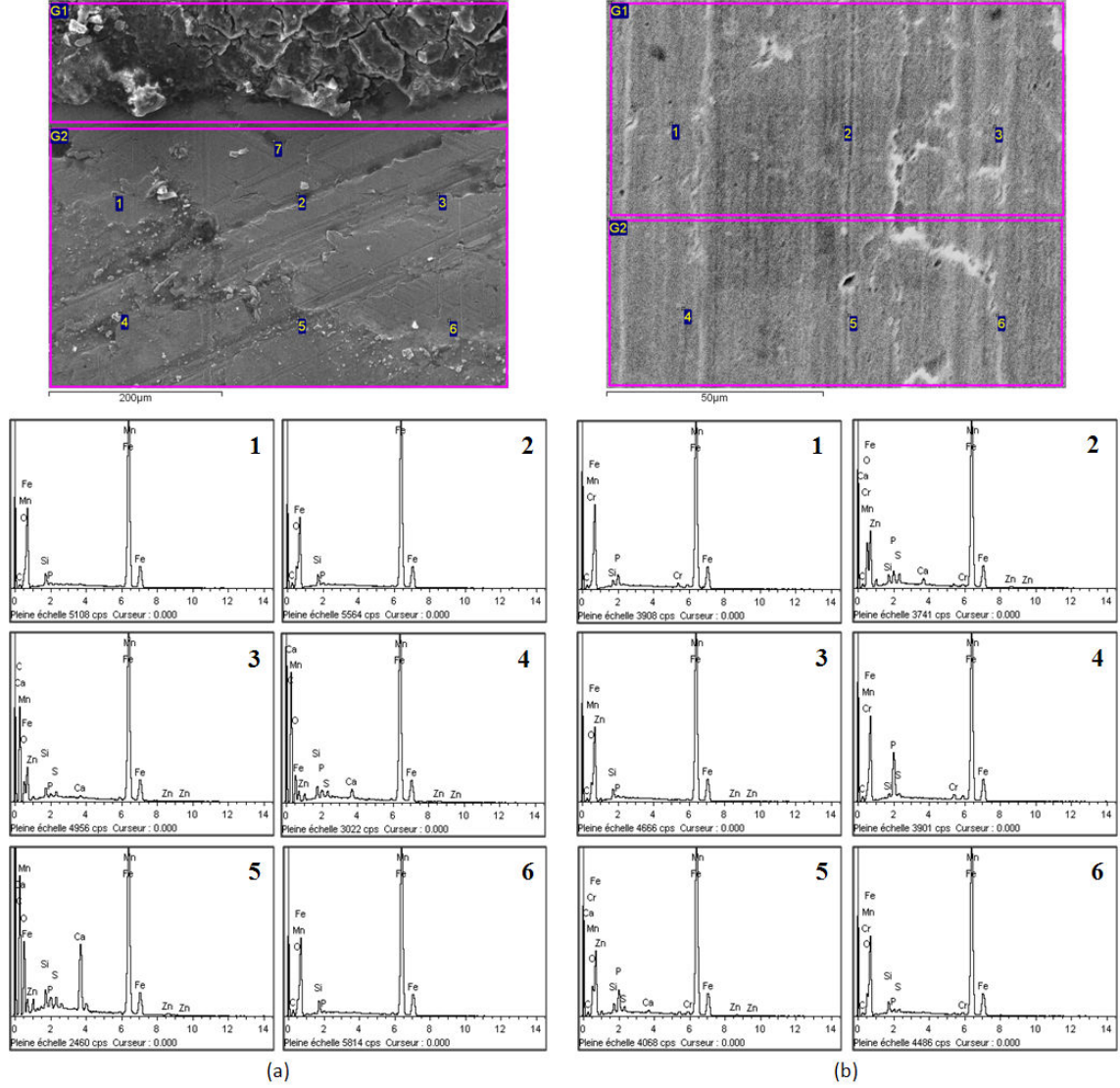
Diesel motorda test edilen silindir gömleğinin üst ölü noktası (ÜÖN) ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın yüzeyleri beş farklı magnifikasyonda Şekil 7.26'da gösterilmektedir. Şekil 7.26(a)'da optik resimde üst kısımda görülen siyah alan yanma odasının bulunduğu bölgeyi ifade etmektedir. Siyah alanın 800 μm altının renkli olduğu görülmektedir ve buda o bölgenin katkı maddeleri ile kaplandığını göstermektedir.



Şekil 7.26 (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN ve (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın optik ve beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri

Şekil 7.27, ÜÖN ve Plaka A'nın sırasıyla x500 ve x2500 magnifikasyonlarındaki altı noktanın analiz sonuçlarını göstermektedir. Analiz sonuçlarına göre ÜÖN ve Plaka A için en çok katkı maddesi içeren iki magnifikasyon karşılaştırılmıştır. Diesel motor

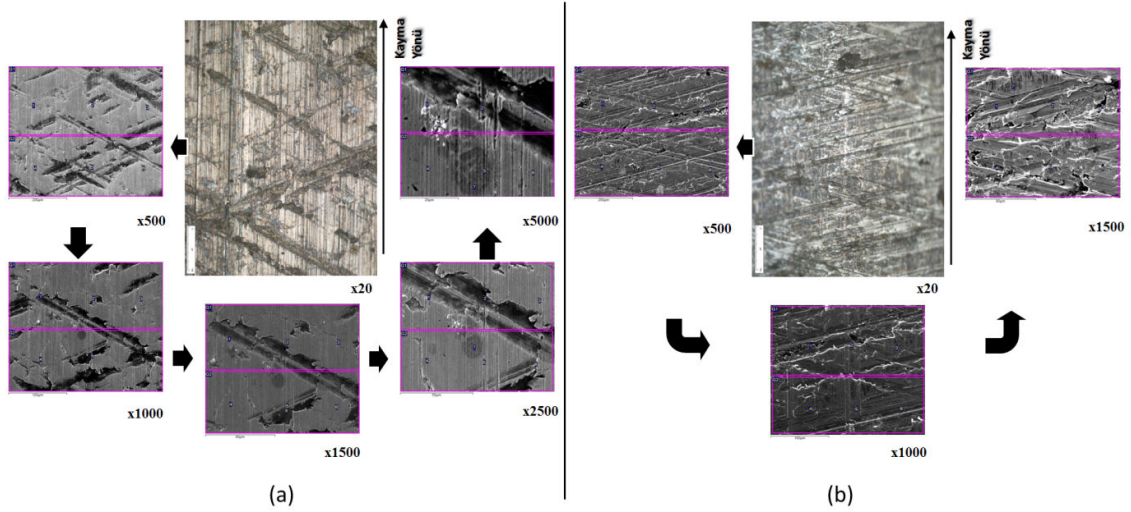
kullanılmamış silindir gömleği ve kullanılmamış plaka (Şekil 7.25) ile karşılaştırıldığında ÜÖN ve Plaka A'da temel katkı maddeleri olarak Ca, Zn, P ve S (kalsiyum, çinko, fosfat ve kükürt) gözlemlenmiştir. ÜÖN'nin 3, 4 ve 5 noktalarında tüm katkı maddeleri (Ca, Zn, P ve S), 1, 2 ve 6 noktalarında ise katkı maddesi olarak sadece P elementi saptanmıştır. Plaka A'nın 2 ve 5 noktalarında tüm katkı maddeleri (Ca, Zn, P ve S), 1 noktasında sadece P, 3 noktasında Zn ve P, 4 ve 6 noktalarında ise P ve S elementleri gözlemlenmiştir.



Şekil 7.27 (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği ÜÖN'nin x500 magnifikasyonda, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

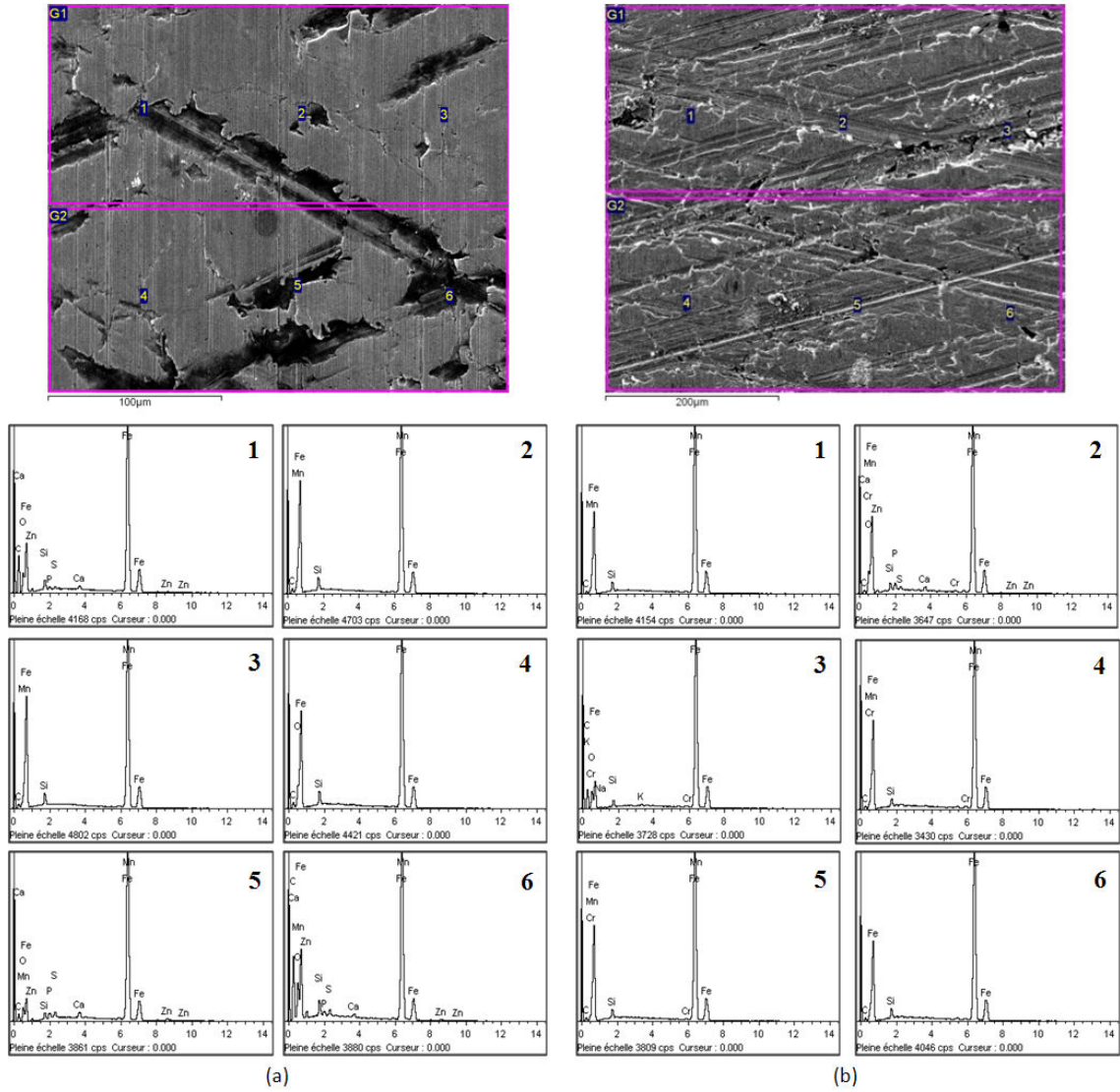
Şekil 7.28, Diesel motorda test edilen silindir gömleğinin orta noktası (ON) ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin yüzeylerini sırasıyla beş (x500,

x1000, x1500, x2500 ve x5000) ve üç (x500, x1000 ve x1500) farklı magnifikasyonda göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi ON ve Plaka B'nin yüzeylerinde honlama çizgileri gözlemlenebilmektedir. Optik mikroskop görüntülerinden de (Şekil 7.26 ve Şekil 7.28) görüldüğü gibi ON ve Plaka B yüzeyleri ÜÖN ve Plaka A yüzeyleri ile karşılaştırıldığında daha az renklidir.



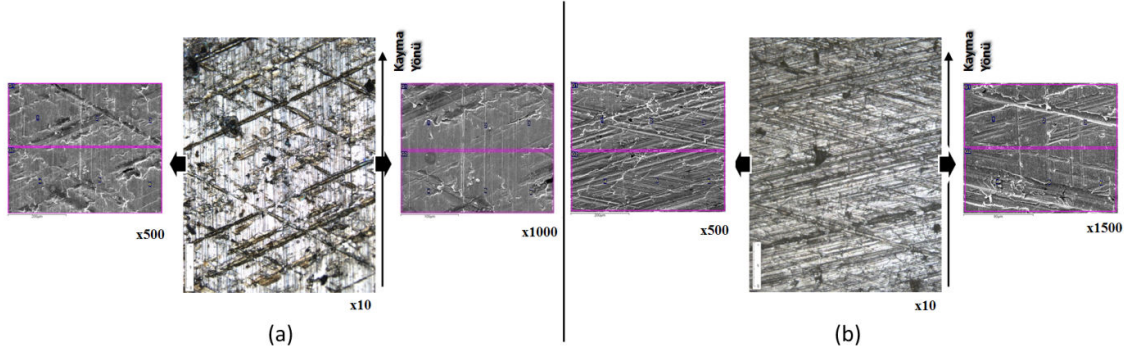
Şekil 7.28 (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin optik ve beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin optik ve üç farklı magnifikasyonda (x500, x1000 ve x1500) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri

ON ve Plaka B'nin sırasıyla x1000 ve x500 magnifikasyonlarındaki altı noktanın analiz sonuçları Şekil 7.29'de verilmektedir. Analiz sonuçları değerlendirilip, ON ve Plaka B için en çok katkı maddesi içeren iki magnifikasyon karşılaştırılmıştır. Diesel motor kullanılmamış silindir gömleği ve kullanılmamış plaka (Şekil 7.25) ile karşılaştırıldığında ON ve Plaka B'de katkı maddeleri olarak yine Ca, Zn, P ve S gözlemlenmiştir. ON incelendiğinde 1, 5 ve 6 noktalarında Plaka B'de ise 2 noktasında tüm katkı maddeleri (Ca, Zn, P ve S) saptanmıştır. Şekil 7.29'dan görülebildiği üzere ON ve Plaka B için katkı maddesi gözlemlenen noktalar honlama çizgileri üzerinde bulunmaktadır. İncelenen diğer noktalarda herhangi bir katkı maddesi görülmemiştir. Şekil 7.29'da katkı maddesi gözlemlenen noktaların Şekil 7.27 ile karşılaştırıldığında daha az olduğu görülmektedir.



Şekil 7.29 (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği ON'nin x1000 magnifikasyonda, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

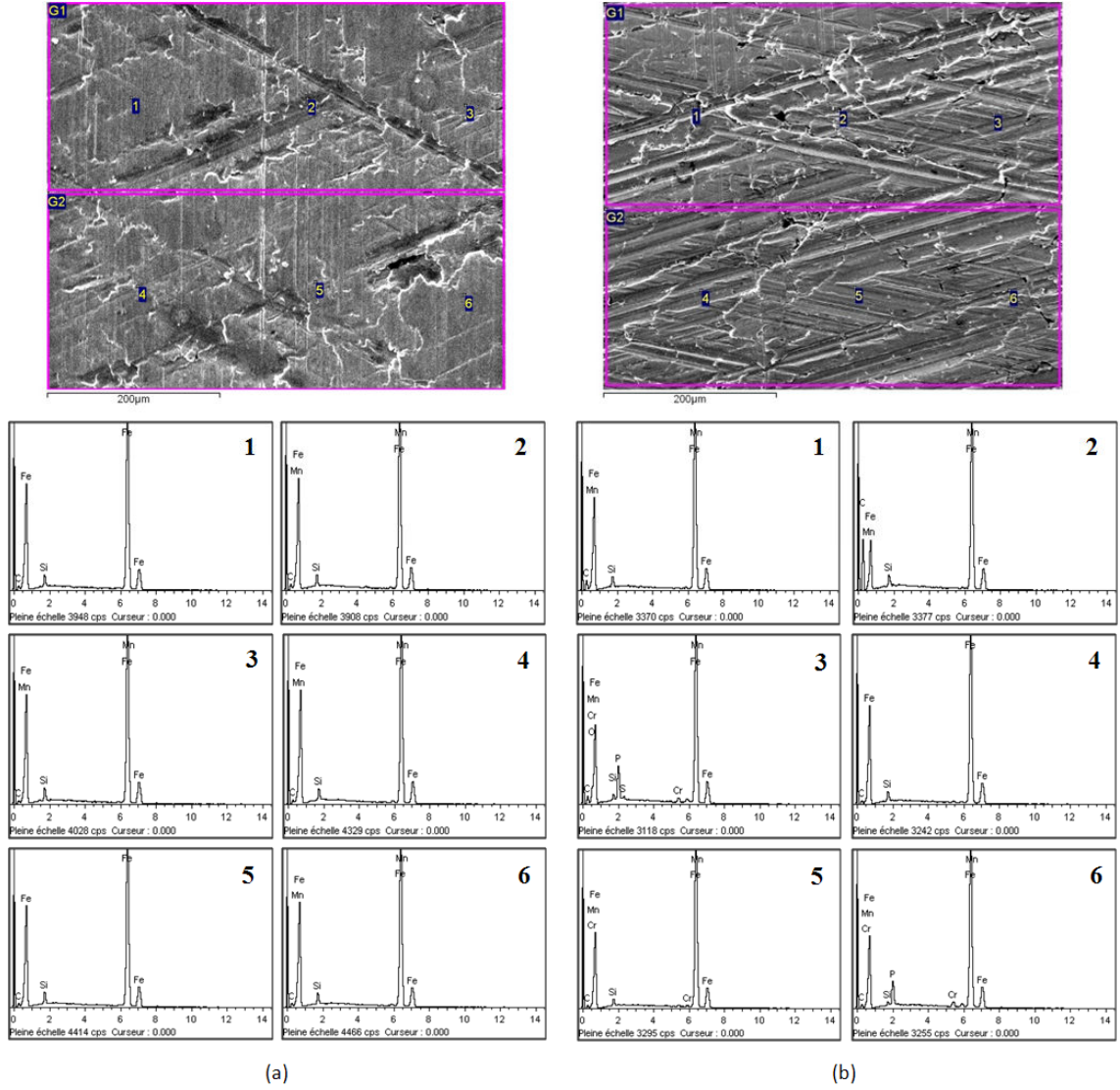
Şekil 7.30'da Diesel motorda test edilen silindir gömleğinin alt ölü noktası (AÖN) ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka C'nin sırasıyla x500, x1000 ve x500, x1500 magnifikasyonlarında ikiye tarayıcı elektron mikroskobu ve birer optik görüntüleri verilmektedir. Şekilden de rahatlıkla gözlemlenebildiği gibi AÖN ve Plaka C yüzeylerinde honlama çizgileri oldukça belirgindir.



Şekil 7.30 (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği AÖN'nin optik ve iki farklı magnifikasyonda (x500 ve x1000) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka C'nin optik ve iki farklı magnifikasyonda (x500 ve x1500) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri

AÖN ve Plaka C'nin x500 magnifikasyonlarındaki altı noktanın analiz sonuçları Şekil 7.31'de görülmektedir. AÖN'de hiç bir katkı maddesine rastlanılmamaktadır. Plaka C'de 3 ve 6 noktalarında P, 3 noktasında S elementi görülmektedir ve diğer noktalarında ise hiç bir katkı maddesi gözlemlenmemektedir. Plaka C'deki 3 ve 6 noktalarının honlama çizgisinde olduğu dikkat çekmektedir.

Diesel motor silindir gömleği ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen plakaların belirli magnifikasyonlarda karşılaştırılmasının ardından tüm magnifikasyon değerlerinde (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) ölçüm yapılan altı noktadaki (1, 2, 3, 4, 5 ve 6) katkı maddeleri (Ca, Zn, P ve S) değerlerinin kendi içlerinde ortalamaları alınarak Çizelge 7.1 oluşturulmuştur. Bu çizelgeden de görülebileceği gibi Diesel motor silindir gömleği ve pim-plaka tribotest cihazında test edilen plakalarda gözlemlenen temel katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'dir. Zn ve P elementlerinin kaynağı tipik aşınma önleyici katkı maddesi olan çinko dialkilditiofosfattır (ZDDP). Ca'nın kaynağı deterjanlar, S'nin kaynağı ise yağ ve yakıttır. Şu çok iyi bilinir ki ZDDP demir ve krom içeren alaşımlar ile tepkimeye girerek termo-mekanik gerilmelere karşı koruyucu bir film tabakası oluşturmaktadır [37].



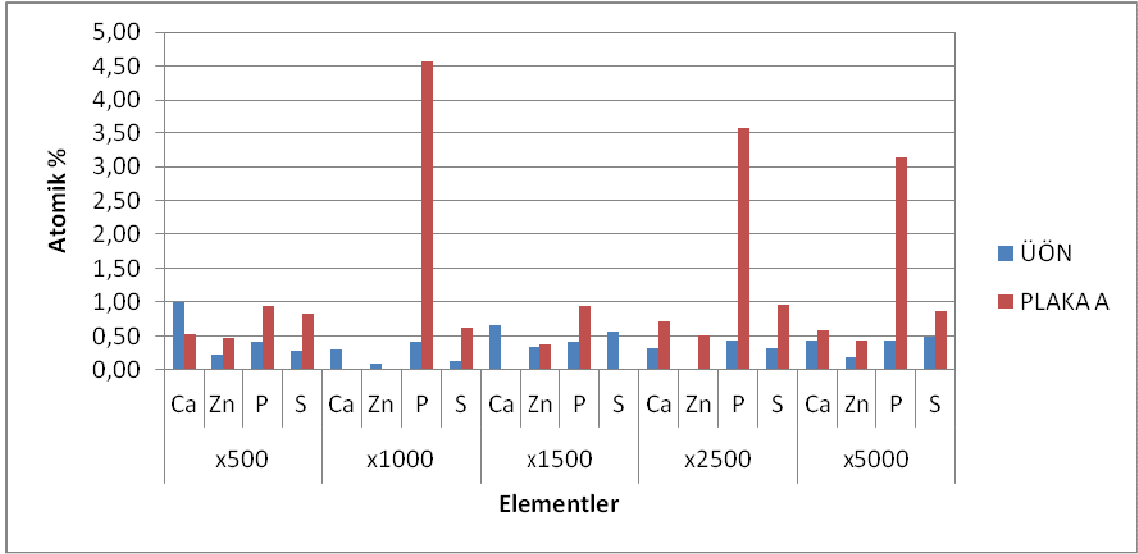
Şekil 7.31 (a) Diesel motorda test edilen silindir gömleği AÖN'nin, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin x500 magnifikasyonlarında tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

Çizelge 7.1 Diesel motor silindir gömleğinin ÜÖN, ON ve AÖN'sinin ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A, B ve C'nin incelenen magnifikasyonlardaki ortalamaları alınan katkı maddelerinin (Ca, Zn, P ve S) % atomik değerleri

|       |    | Diesel Motor Test Düzeneği   |                             |                              | Pim-plaka Tribotest Düzeneği     |                                  |                                  |
|-------|----|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
|       |    | ÜÖN<br>% Atomik<br>Değerleri | ON<br>% Atomik<br>Değerleri | AÖN<br>% Atomik<br>Değerleri | Plaka A<br>% Atomik<br>Değerleri | Plaka B<br>% Atomik<br>Değerleri | Plaka C<br>% Atomik<br>Değerleri |
| x500  | Ca | 1,00                         | 0,13                        | 0,00                         | 0,53                             | 0,75                             | 0,00                             |
|       | Zn | 0,22                         | 0,16                        | 0,00                         | 0,47                             | 0,37                             | 0,00                             |
|       | P  | 0,41                         | 0,09                        | 0,00                         | 0,95                             | 0,61                             | 1,41                             |
|       | S  | 0,28                         | 0,20                        | 0,00                         | 0,84                             | 0,77                             | 0,52                             |
| x1000 | Ca | 0,30                         | 0,22                        | 0,00                         | 0,00                             | 0,59                             | -                                |
|       | Zn | 0,09                         | 0,28                        | 0,00                         | 0,00                             | 0,00                             | -                                |
|       | P  | 0,41                         | 0,36                        | 0,00                         | 4,57                             | 0,79                             | -                                |
|       | S  | 0,13                         | 0,20                        | 0,00                         | 0,63                             | 0,51                             | -                                |
| x1500 | Ca | 0,65                         | 0,00                        | -                            | 0,00                             | 0,86                             | 0,00                             |
|       | Zn | 0,33                         | 0,10                        | -                            | 0,38                             | 0,00                             | 0,00                             |
|       | P  | 0,41                         | 0,00                        | -                            | 0,95                             | 1,35                             | 1,22                             |
|       | S  | 0,57                         | 0,00                        | -                            | 0,00                             | 0,47                             | 0,00                             |
| x2500 | Ca | 0,31                         | 0,24                        | -                            | 0,72                             | -                                | -                                |
|       | Zn | 0,00                         | 0,08                        | -                            | 0,50                             | -                                | -                                |
|       | P  | 0,44                         | 0,42                        | -                            | 3,57                             | -                                | -                                |
|       | S  | 0,31                         | 0,21                        | -                            | 0,96                             | -                                | -                                |
| x5000 | Ca | 0,44                         | 0,11                        | -                            | 0,59                             | -                                | -                                |
|       | Zn | 0,19                         | 0,12                        | -                            | 0,44                             | -                                | -                                |
|       | P  | 0,43                         | 0,00                        | -                            | 3,14                             | -                                | -                                |
|       | S  | 0,49                         | 0,00                        | -                            | 0,88                             | -                                | -                                |

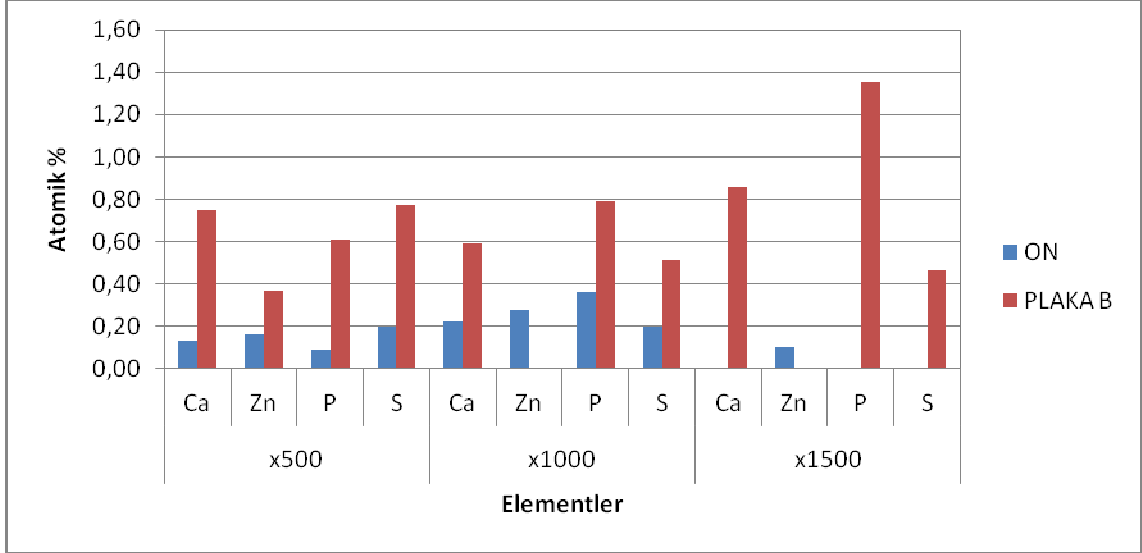
Şekil 7.32, Şekil 7.33 ve Şekil 7.34'de verilen Diesel motor silindir gömleği yüzeyleri (ÜÖN, ON ve AÖN) ile pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen plakaların (A, B ve C) karşılaştırma grafikleri Çizelge 7.1'de verilen ortalama değerler kullanılarak oluşturulmuştur.

Şekil 7.32, Diesel motor silindir gömleği ÜÖN ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka A'nın yüzeylerinde bulunan katkı maddelerinin atomik yüzdeleri göstermektedir. ÜÖN ve Plaka A'nın çoğu magnifikasyonlarında (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) Ca, Zn, P ve S'nin gözlemlendiği dikkat çekmektedir. Yine çoğu magnifikasyon değerleri için Plaka A'da gözlemlenen katkı maddesi miktarları ÜÖN'ye göre daha fazladır. Plaka A'nın incelenen her magnifikasyonunda P elementinin diğer katkı maddelerine göre (Ca, Zn ve S) daha çok olduğu Şekil 7.32'den görülebilmektedir.



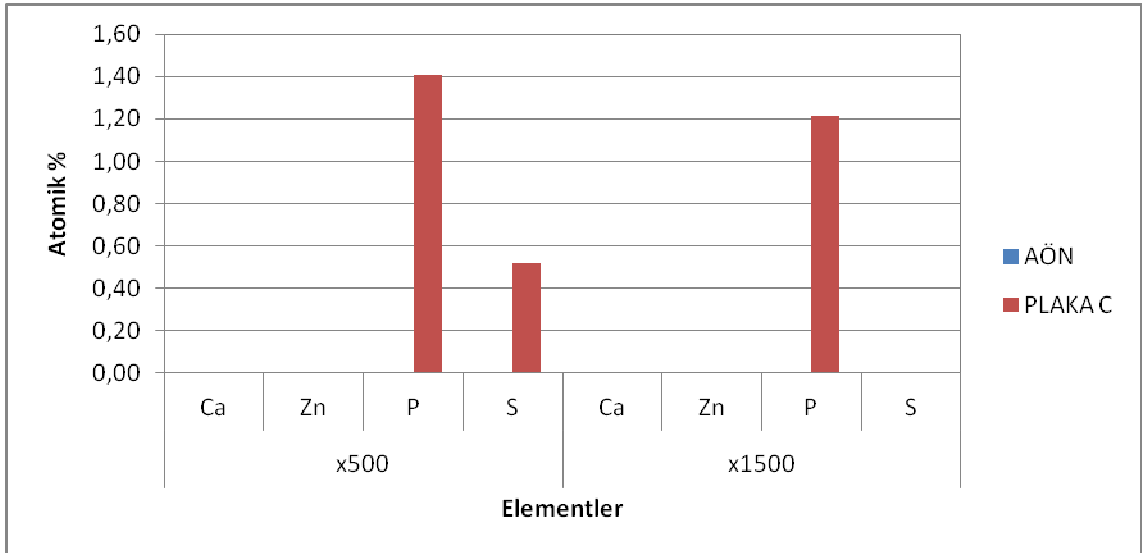
Şekil 7.32 ÜÖN ve Plaka A'nın beş farklı magnifikasyonda (x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri

Şekil 7.33, Diesel motor silindir gömleği ON ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen Plaka B'nin yüzeylerinde bulunan katkı maddelerinin atomik yüzdeleri göstermektedir. ON ve Plaka B'de katkı maddelerinin yüzde atomik dağılımları benzerlik göstermektedir. Çoğu magnifikasyon için Plaka B'de görülen katkı maddesi yüzde atomik değerlerinin ON'ye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 7.33'den görülebileceği gibi ON ve Plaka B'nin x500 magnifikasyonlarında bulunan S elementinin yüzde atomik değeri diğer katkı maddelerine göre daha fazladır. ON ve Plaka B'de x1000 magnifikasyonunda gözlemlenen P elementinin yüzde atomik değeri diğer katkı maddeleri ile karşılaştırıldığında daha fazladır. Plaka B'de x500 magnifikasyonu dışındaki bütün magnifikasyonlarda görülen Zn elementinin yüzde atomik değeri 0'dır.



Şekil 7.33 ON ve Plaka B'nin üç farklı magnifikasyonda (x500, x1000 ve x1500) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri

Şekil 7.34 AÖN ve Plaka C yüzeylerinin iki farklı magnifikasyonunda (x500 ve x1500) bulunan yüzde atomik katkı maddesi dağılımını göstermektedir. AÖN'nin hiç magnifikasyon değerinde herhangi bir katkı maddesi gözlemlenmezken Plaka C'nin x500 ve x1500 magnifikasyonlarında Ca ve Zn elementlerinin yüzde atomik değerleri 0'dır. Yine Plaka C'nin x1500 magnifikasyonunda S elementinin yüzde atomik değerinin 0 olduğu Şekil 7.34'den görülmektedir.



Şekil 7.34 AÖN ve Plaka C'nin iki farklı magnifikasyonda (x500 ve x1500) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri

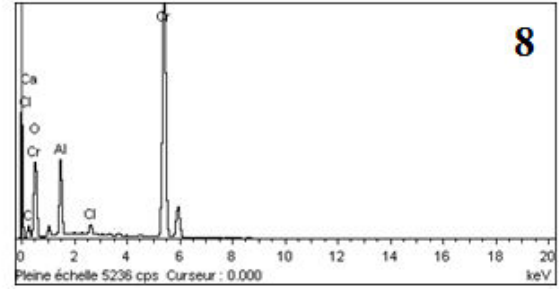
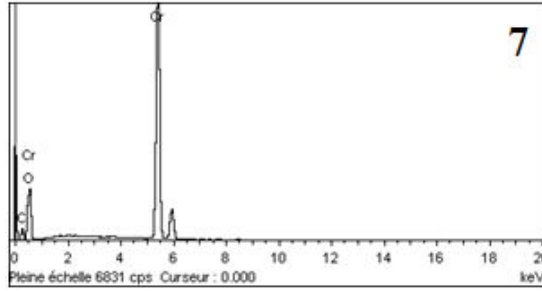
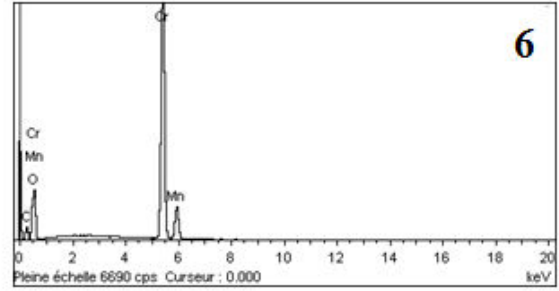
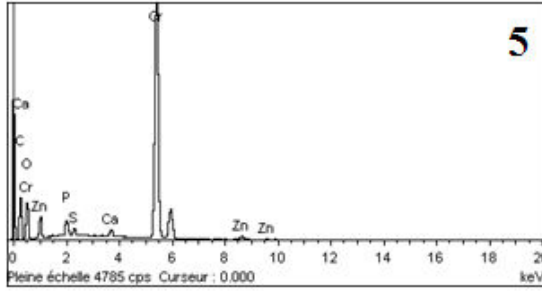
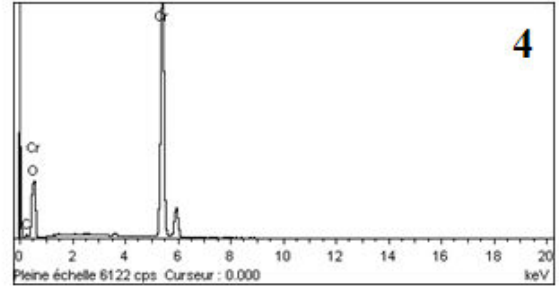
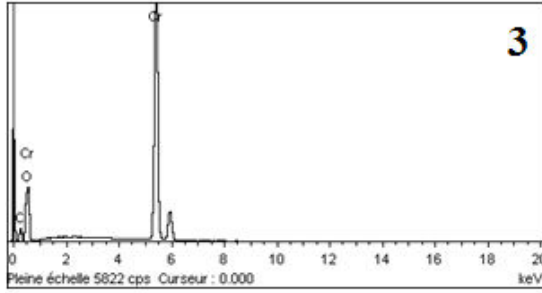
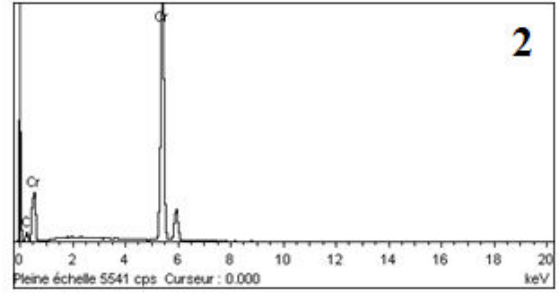
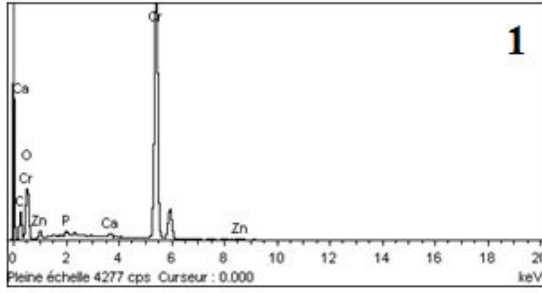
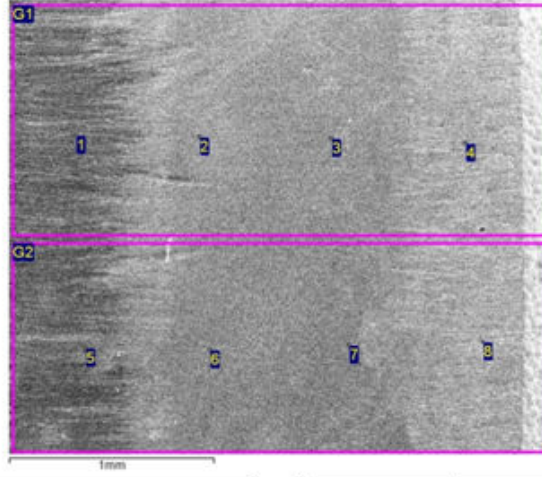
#### **7.4 22 Saat Çalıştırılmış Diesel Motor Krom Kaplı Segmanın Analiz**

##### **Sonuçlarının Değerlendirilmesi**

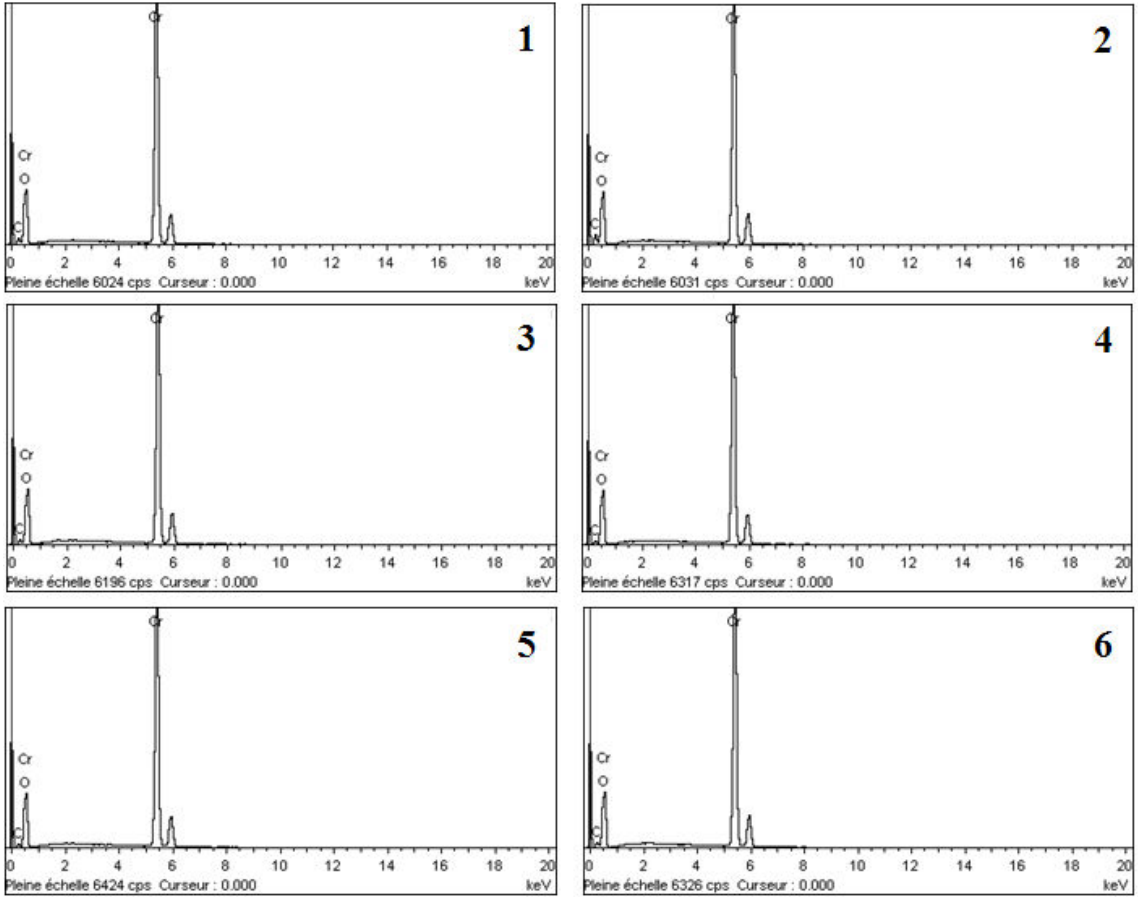
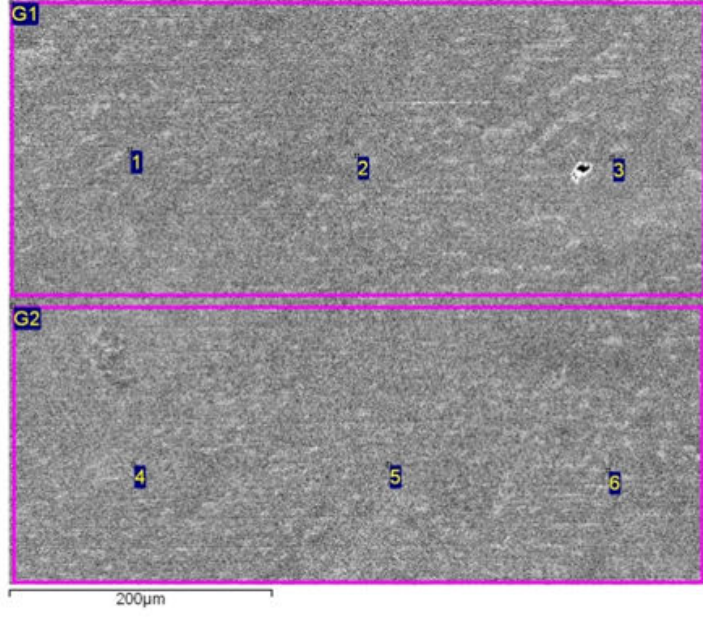
Şekil 7.35, 7.36, 7.37, 7.38 ve 7.39 Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın sırasıyla x100, x500, x1000, x2500 ve x5000 magnifikasyonlarında elektron mikroskobu görüntülerini ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresini göstermektedir.

Şekil 7.35'de 1 noktasında Ca, Zn ve P, 5 noktasında Ca, Zn, P ve S katkı maddesi elementlerinin tümü gözlemlenmiştir. 1 ve 5 noktaları segmanın, silindir gömleğinin katkı maddesi bulunan yüzeylerine temas halinde olan yüzeyinde bulunmaktadır. Diğer noktalarda (2, 3, 4, 6, 7 ve 8) katkı maddesi görülmemektedir.

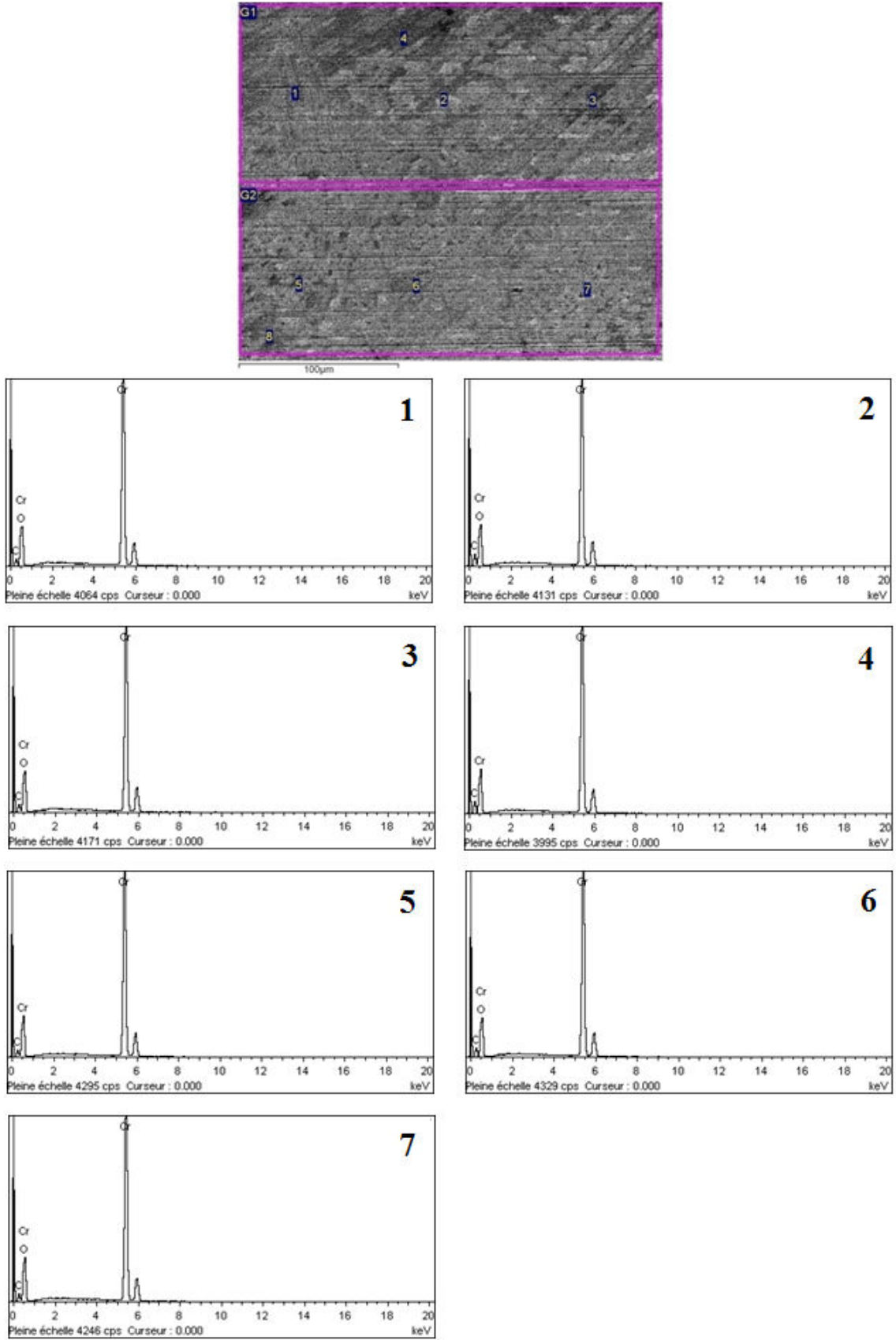
Sırasıyla x500, x1000, x2500 ve x5000 magnifikasyonlarını gösteren Şekil 7.36, 7.37, 7.38 ve 7.39'daki herhangi bir noktada Ca, Zn, P ve S katkı maddesi elementlerinin hiçbirine rastlanmamıştır.



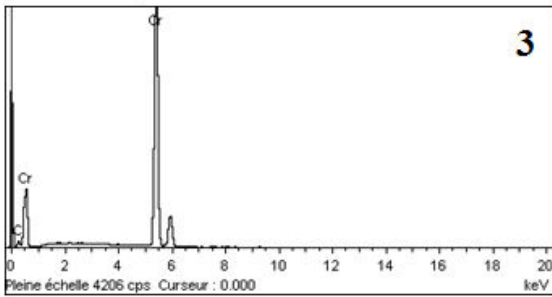
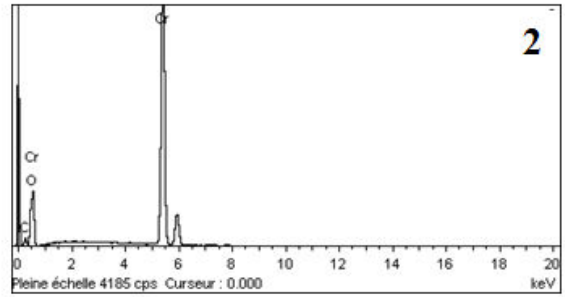
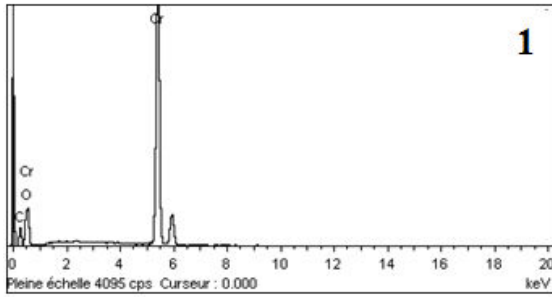
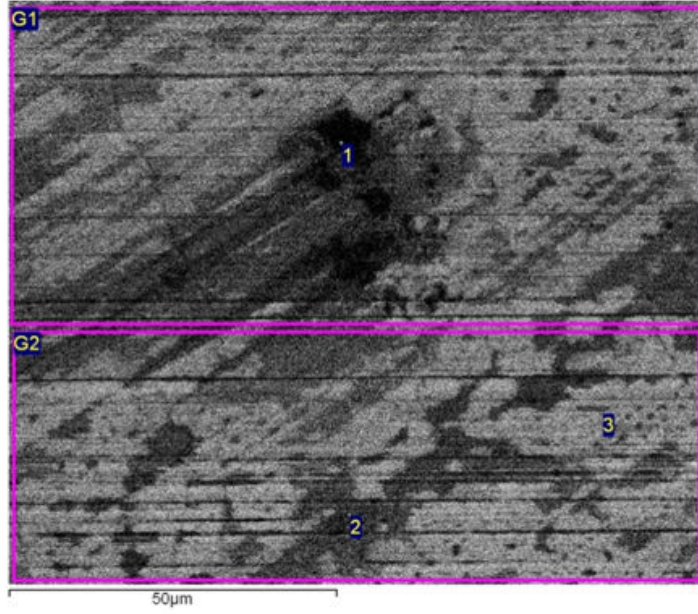
Şekil 7.35 Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x100 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



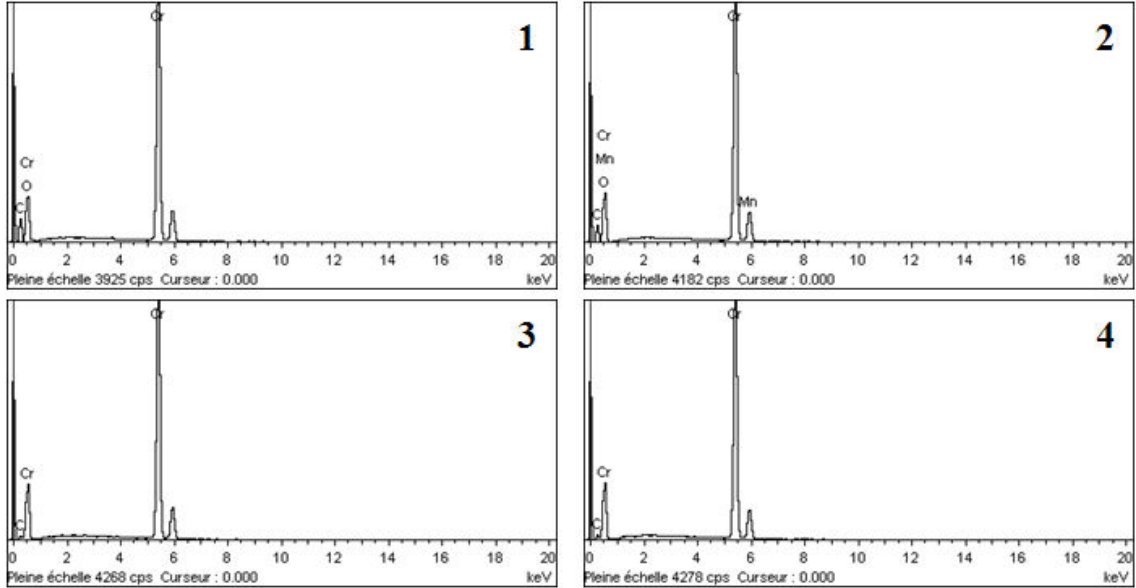
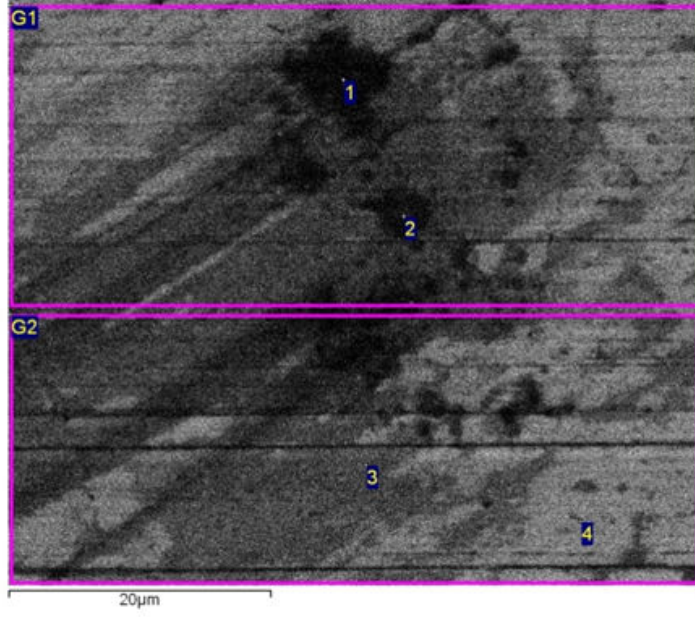
Şekil 7.36 Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



Şekil 7.37 Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

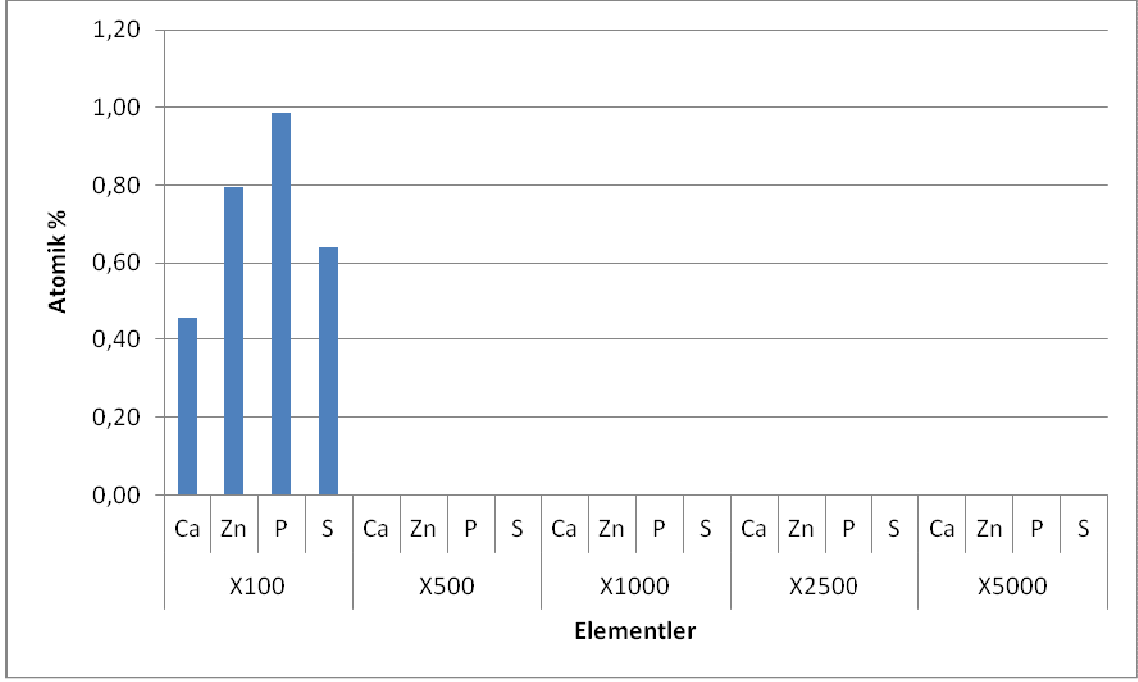


Şekil 7.38 Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



Şekil 7.39 Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın x5000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

Diesel motor krom kaplı segmanın incelenen tüm magnifikasyonlarda (x100, x500, x1000, x2500 ve x5000) ölçüm yapılan noktalardaki katkı maddeleri (Ca, Zn, P ve S) değerlerinin kendi içlerinde ortalamaları alınarak Şekil 7.40'daki grafik oluşturulmuştur. Grafikte x100 hariç incelenen tüm magnifikasyonlarda katkı maddesi olmadığı görülebilmektedir. Yalnızca x100 magnifikasyonda katkı maddesi gözlemlenmesi, bu magnifikasyonda incelenen iki noktanın (2 ve 5) silindir gömleğinin katkı maddesi bulunan bölgesine temas halinde olmasından kaynaklanmaktadır.

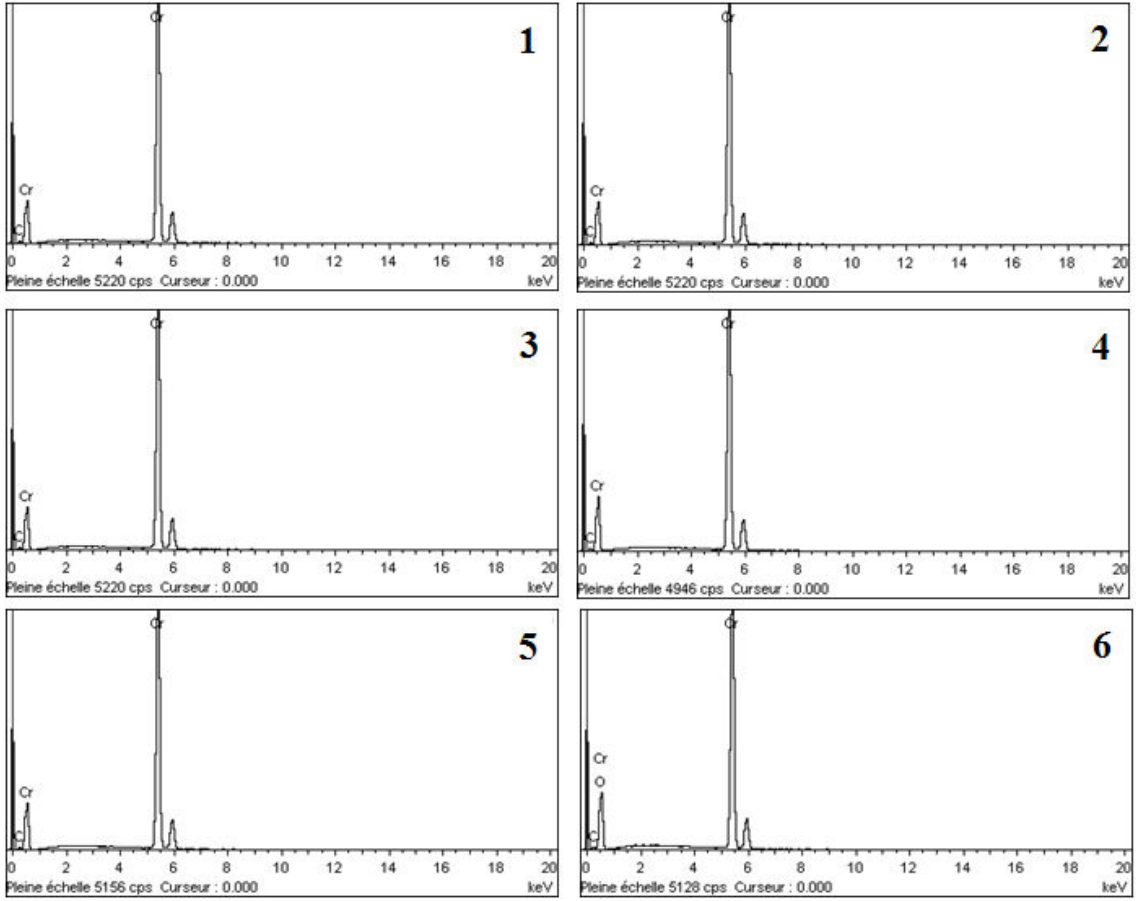
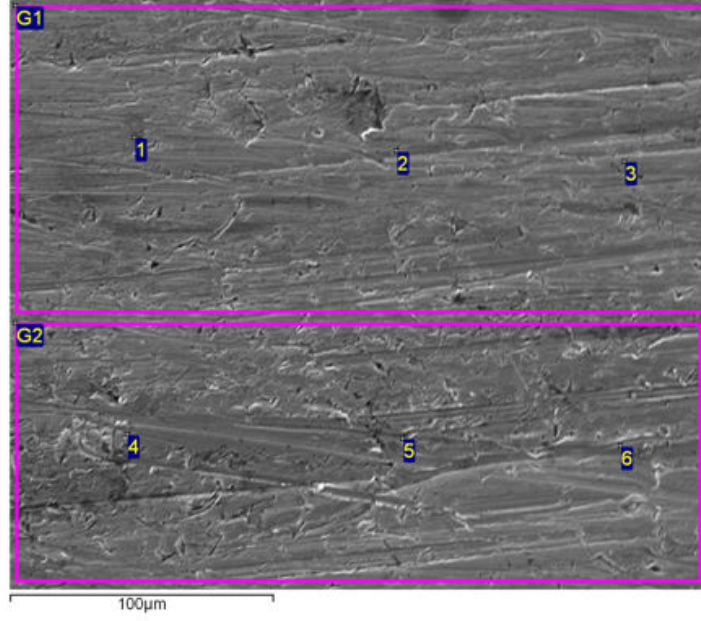


Şekil 7.40 Diesel motor krom kaplı segmanın beş farklı magnifikasyonda (x100, x500, x1000, x2500, x5000) gözlemlenen katkı maddeleri Ca, Zn, P ve S'nin % atomik ortalama değerleri

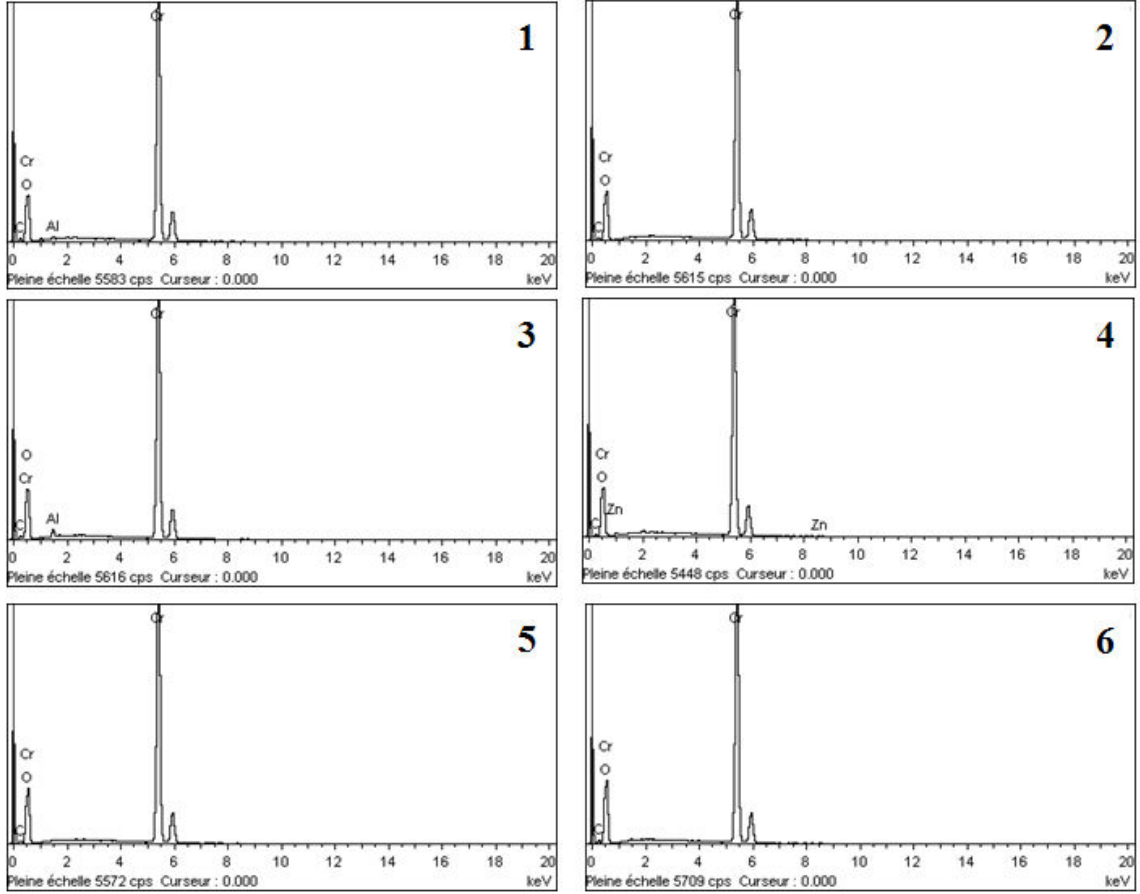
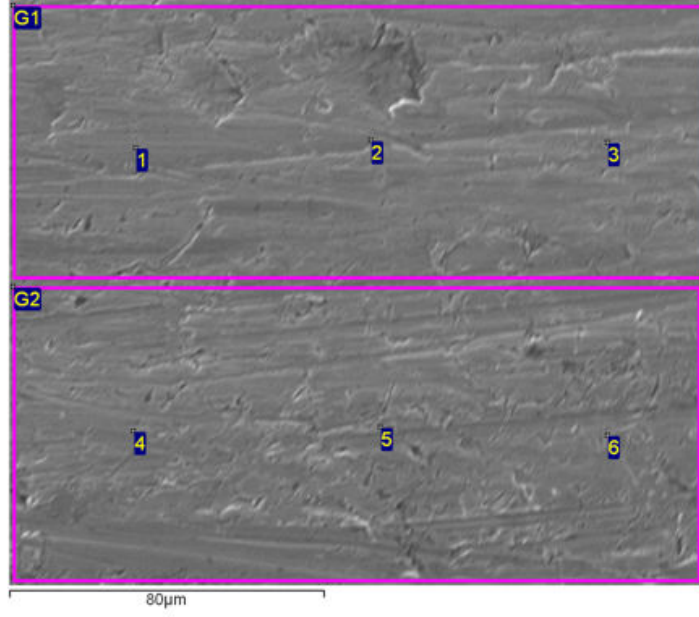
## 7.5 Pim-Plaka Tribotest Düzeneginde Test Edilen Krom Kaplı Segmanın Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 7.41, 7.42 ve 7.43 pim-plaka tribotest düzeneginde test edilen segmanın sırasıyla x1000, x1500 ve x2500 magnifikasyonlarındaki elektron mikroskobu görüntülerini ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçlarını göstermektedir.

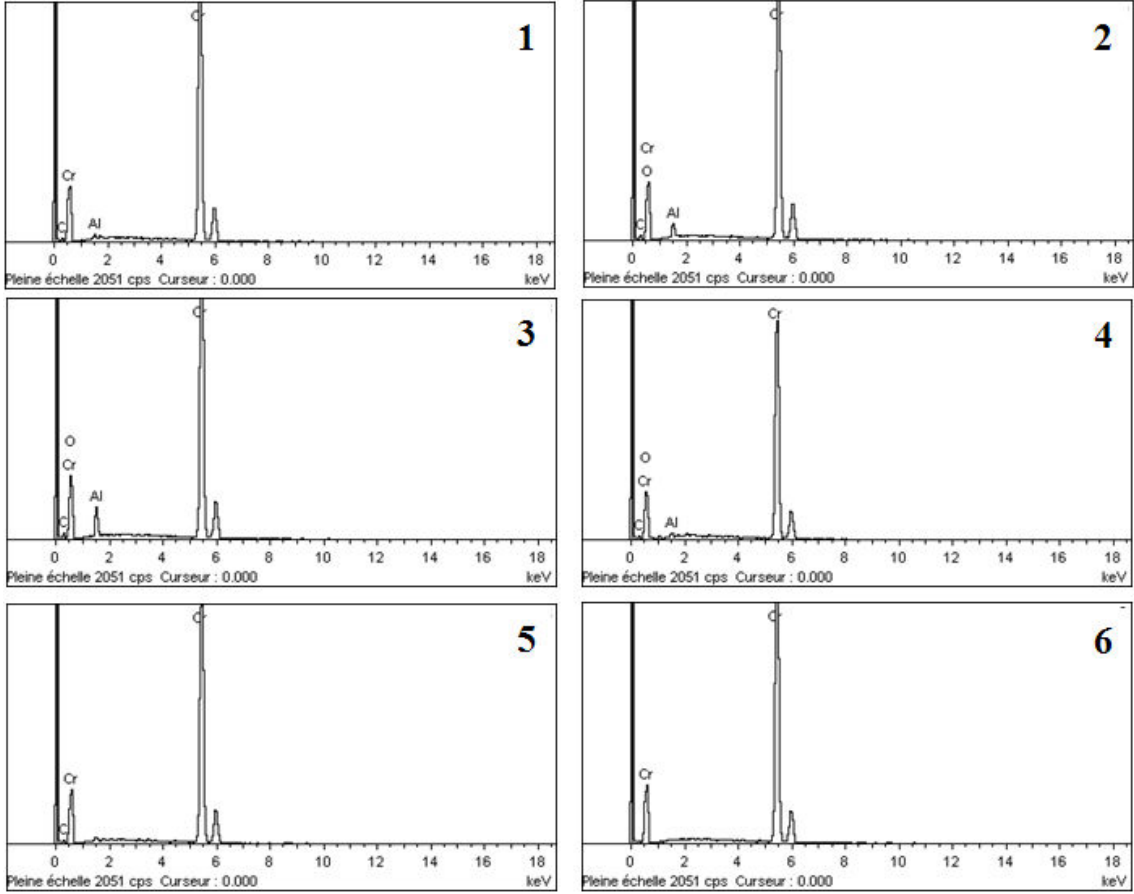
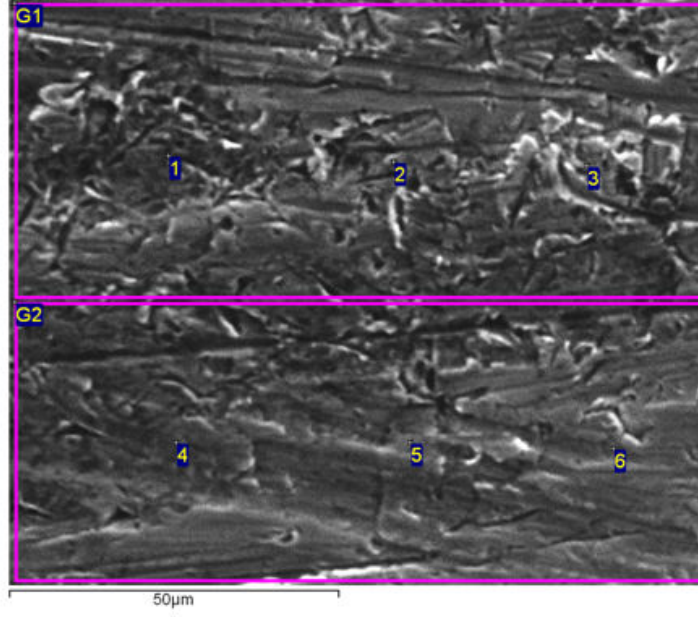
Şekil 7.41, 7.42 ve 7.43'de gösterilen x1000, x1500 ve x2500 magnifikasyonlarının ölçüm yapılan herhangi bir noktada Ca, Zn, P ve S katkı maddesi elementlerine rastlanmamıştır.



Şekil 7.41 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın x1000 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



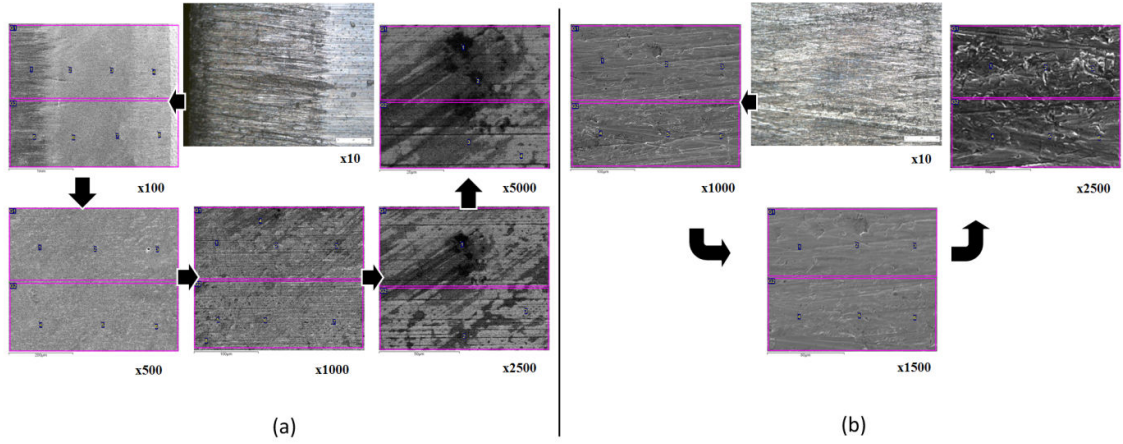
Şekil 7.42 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın x1500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları



Şekil 7.43 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın x2500 magnifikasyonda tarayıcı elektron mikroskobu görüntüsü ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

## 7.6 22 Saat Çalıştırılmış Diesel Motor Krom Kaplı Segmanı ile Pim-Plaka Tribotest Düzeneginde Test Edilen Krom Kaplı Segmanın Karşılaştırılması

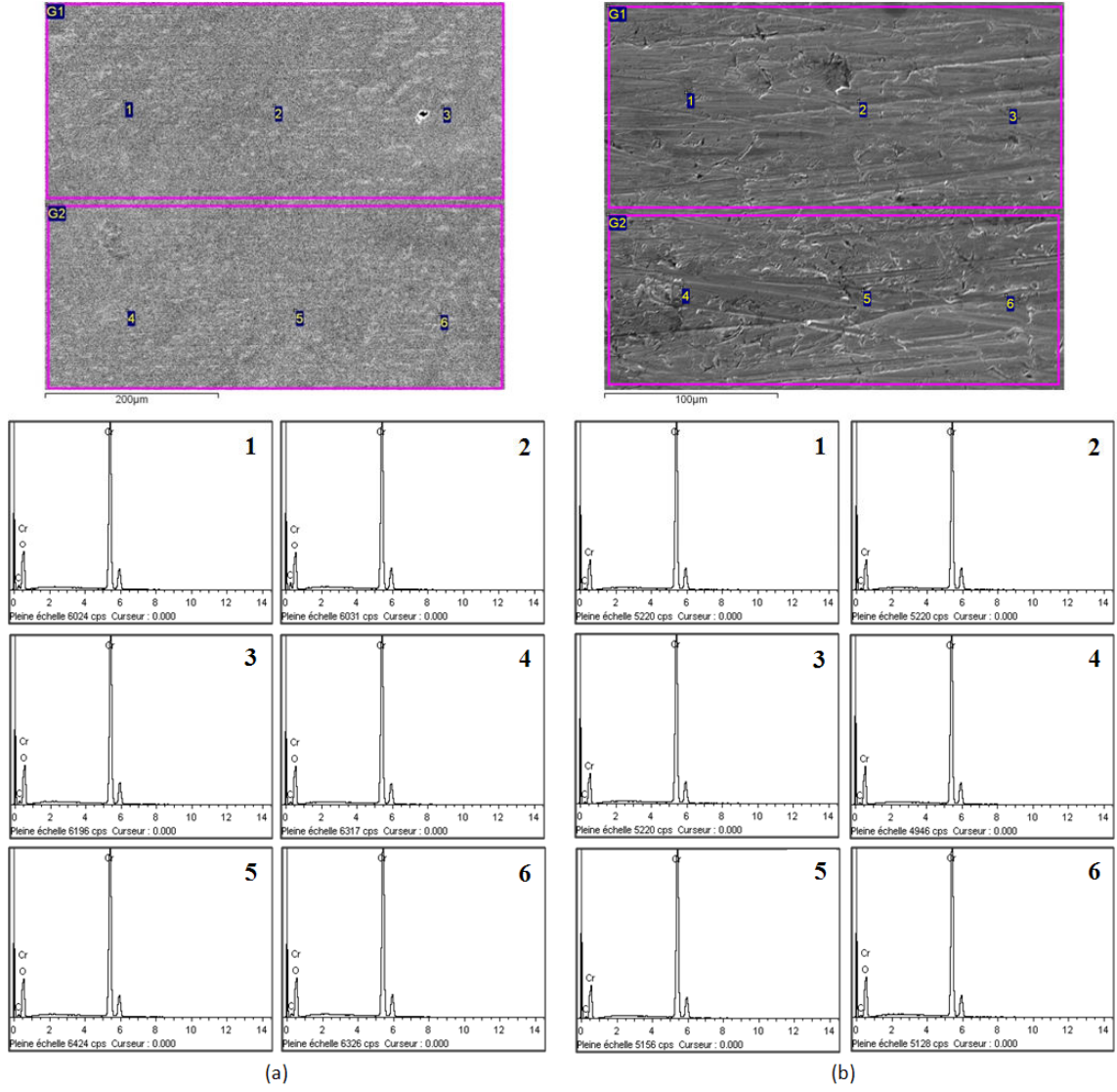
Diesel motorda test edilen silindir krom kaplı segmanın ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın yüzeyleri sırasıyla beş ve üç farklı magnifikasyonda Şekil 7.44’de gösterilmektedir.



Şekil 7.44 (a) Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın optik ve beş farklı magnifikasyonda (x100, x500, x1000, x2500 ve x5000) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın optik ve üç farklı magnifikasyonda (x1000, x1500 ve x2500) tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri

Diesel motor krom kaplı segmanı ve pim-plaka krom kaplı segmanının x500 magnifikasyonlarındaki altı noktanın analiz sonuçları Şekil 7.45’de verilmektedir. Her iki segmanda da herhangi bir katkı maddesi elementine (Ca, Zn, P ve S) rastlanmamıştır.

Diesel motor segmanı ve pim-plaka tribotest segmanının x500 magnifikasyonunda karşılaştırılmasının ardından incelenen tüm magnifikasyon değerlerinde (x100, x500, x1000, x1500, x2500 ve x5000) ölçüm yapılan noktalardaki katkı maddeleri (Ca, Zn, P ve S) değerlerinin kendi içlerinde ortalamaları alınarak Çizelge 7.2 oluşturulmuştur.



Şekil 7.45 (a) Diesel motorda test edilen krom kaplı segmanın, (b) pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanın x500 magnifikasyonlarında tarayıcı elektron mikroskobu görüntüleri ve enerji dağılımlı x-ışını spektrometresi sonuçları

Çizelge 7.2 Diesel motor ve pim-plaka tribotest düzeneği krom kaplı segmanlarının incelenen magnifikasyonlardaki ortalamaları alınan katkı maddelerinin (Ca, Zn, P ve S) % atomik değerleri

|       |    | <b>Diesel Motor Test<br/>Düzenğinde Test<br/>Edilen</b> | <b>Pim-plaka Tribotest<br/>Düzenğinde Test<br/>Edilen</b> |
|-------|----|---|---|
|       |    | Krom Kaplı Segman<br>% Atomik Değerleri                 | Krom Kaplı Segman<br>% Atomik Değerleri                   |
| x100  | Ca | 0,46  | -   |
|       | Zn | 0,80  | -   |
|       | P  | 0,99  | -   |
|       | S  | 0,64  | -   |
| x500  | Ca | 0,00  | -   |
|       | Zn | 0,00  | -   |
|       | P  | 0,00  | -   |
|       | S  | 0,00  | -   |
| x1000 | Ca | 0,00  | 0,00  |
|       | Zn | 0,00  | 0,00  |
|       | P  | 0,00  | 0,00  |
|       | S  | 0,00  | 0,00  |
| x1500 | Ca | -   | 0,00  |
|       | Zn | -   | 0,00  |
|       | P  | -   | 0,00  |
|       | S  | -   | 0,00  |
| x2500 | Ca | 0,00  | 0,00  |
|       | Zn | 0,00  | 0,00  |
|       | P  | 0,00  | 0,00  |
|       | S  | 0,00  | 0,00  |
| x5000 | Ca | 0,00  | -   |
|       | Zn | 0,00  | -   |
|       | P  | 0,00  | -   |
|       | S  | 0,00  | -   |

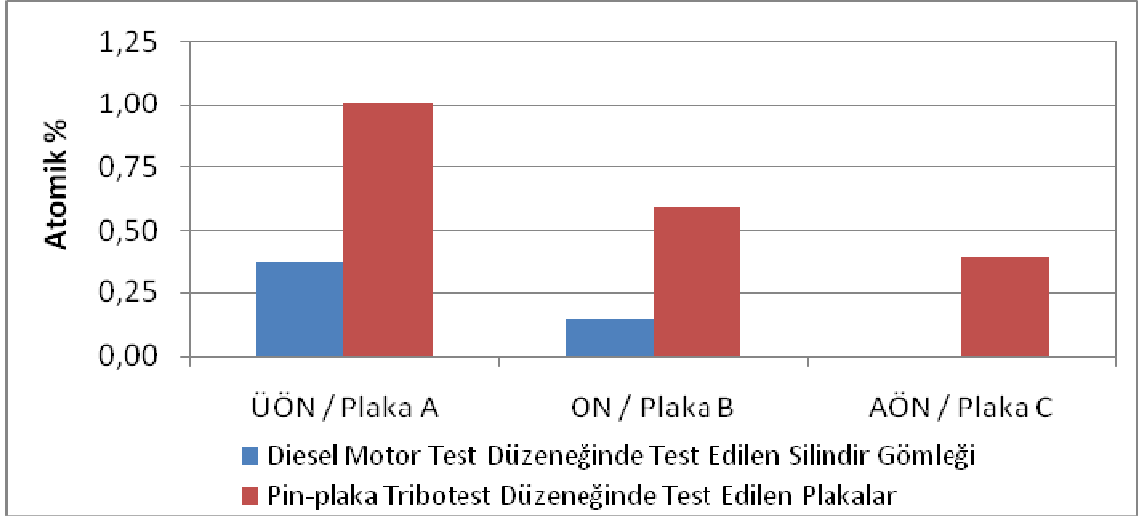
### SONUÇ VE ÖNERİLER

Diesel motorda test edilen silindir gömleği ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen plaka yüzeylerinde gözlemlenen katkı maddeleri kalsiyum (Ca), çinko (Zn), fosfor (P) ve kükürttür (S). Benzer katkı maddeleri; [2], [5], [7], [9], [11], [37] ve [38]'de belirtilen çalışmalarda da gözlemlenmiştir.

Diesel motorda test edilen silindir gömleği üç ana bölgede incelenmiştir, üst ölü nokta (ÜÖN), orta nokta (ON) ve alt ölü nokta (AÖN). Bu bölgelerde en çok katkı maddesi ÜÖN'de saptanmıştır. ON'de ÜÖN'ye göre bağıl olarak daha az, AÖN'de ise hiç katkı maddesi gözlemlenmemiştir. Bu dağılım, Dimkovski, Kaleli ve Bektas tarafından yapılan çalışmalarla da örtüşmektedir [2], [39].

Pim-plaka tribotest düzeneğinde altı adet plaka (A, B, C, D, E ve F) test edilmiştir. Bu plakalarda gözlemlenen katkı maddeleri de Ca, Zn, P ve S'dir. Bu plakalardan sırasıyla Plaka A, Plaka B ve Plaka C ile Diesel motor silindir gömleğinin yüzeyleri ÜÖN, ON ve AÖN arasında mikroskobik incelemeler sonrası sürpriz bir şekilde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu eşleşme Bektas ve Kaleli tarafından yapılan çalışmada da belirtilmiştir [40].

Plaka A ile ÜÖN, Plaka B ile ON ve Plaka C ile AÖN katkı maddesi dağılımı açısından benzerlik göstermektedir. Plaka A'da en çok, Plaka B'de Plaka A ile karşılaştırıldığında daha az, Plaka C'de de Plaka B ile karşılaştırıldığında daha da az katkı maddesi bulunmuştur. Bu dağılıma bağlı olarak silindir gömleği ile plakalar arasındaki benzerlik; ölçüm yapılan tüm magnifikasyonlardaki, ölçüm yapılan tüm noktalarda gözlemlenen tüm katkı maddesi % atomik değerlerinin, plakalar (A, B ve C) ve silindir gömleği yüzeyleri (ÜÖN, ON ve AÖN) bazında ortalamaları alındığında oluşan Şekil 8.1'deki grafikte de görülmektedir.



Şekil 8.1 Pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen plakalardaki (A, B ve C) ve Diesel motor test düzeneğinde test edilen silindir gömleği yüzeylerindeki (ÜÖN, ON ve AÖN) katkı maddesi dağılım karakteristiği

Her iki Diesel motor silindir gömleği ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen plakalarda katkı maddeleri adacıklar şeklinde gözlemlenmiştir. Keller yaptığı çalışmada da benzer sonuçları elde etmiştir [4]. Kaleli ve Berthier ise çelik yüzey üzerinde yaptıkları incelemelerde katkı maddelerinin tüm yüzeyi homojen olarak kapladığını gözlemlemişlerdir [5].

Diesel motor test düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanda ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen krom kaplı segmanda katkı maddesi gözlemlenmemektedir. Yalnızca Diesel motor krom kaplı segman yüzeyinin silindir gömleğindeki katkı maddesi ile temas halinde olan bölgesindeki iki noktada katkı maddesi gözlemlenmiştir. Kaleli'nin yaptığı çalışma da bu sonucu desteklemektedir [10].

Katkı maddesi oluşumunda ana mekanizma yüzey bozunmasıdır. Yüzey bozunmasının derecesi katkı maddesi oluşumunda oldukça etkilidir. Çok derin bozunmalar, katkı maddesi oluşumundaki kimyasal reaksiyonları engelleyerek yüzeyde katkı maddesi birikimine olanak vermez. Fakat hafif bozunmalar kimyasal reaksiyonlara herhangi bir engel teşkil etmez ve buna bağlı olarak, bu yüzeylerde koruyucu katkı maddesi tabakası oluşumu sağlar.

Testlerin ardından, çoğu honlama çizgisi Diesel motorda test edilen silindir gömleği ve pim-plaka tribotest düzeneğinde test edilen plaka yüzeylerinde gözlemlenebilmektedir.

Katkı maddeleri çoğunlukla honlama çizgisi ve abrazyon yarıklarında görülmektedir. Bu sonuç, Dimkovski ve Morina tarafından da desteklenmiştir [2], [11].

## KAYNAKLAR

---

- [1] Srivastava, D. K., Agarwal, A. K. ve Kumar, J. (2007). "Effect of Liner Surface Properties on Wear and Friction in a Non-firing Engine Simulator", *Materials and Design*, 28(5):1632-1640.
- [2] Dimkovski, Z., Baath, L., Rosén, S., Ohlsson, R. ve Rosén B. G., (2011). "Interference Measurements of Deposits on Cylinder Liner Surfaces", *Wear*, 270:247-251.
- [3] Allen, R.W. (1993). "The Influence of Marine Fuel Quality on Lubricating Oil Performance", *The International Council on Combustion Engines Paper*, 53.
- [4] Keller, J., Fridrici, V., Kapsa, P., Vidaller, S. ve Huard J.F. (2007). "Influence of Chemical Composition and Microstructure of Gray Cast Iron on Wear of Heavy Duty Diesel Engines Cylinder Liners", *Wear*, 263:1158-1164.
- [5] Kaleli, H. ve Berthier, Y., (2005). "Tribomechanical-chemical Effects and Visualization of Additive's Layer Formation in Engine Crankcase Oil between Sliding Parts", *World Tribology Congress III*, 12-16 Sep. 2005, Washington.
- [6] Kar, P., Asthana, P. ve Liang, H., (2008). "Formation and Characterization of Tribofilms", *Journal of Tribology*, 130:11-16.
- [7] Kaleli, H., (2001). "Protective Effect of Commercial Oil Fortifier in Fully-formulated Crankcase Oils", *Industrial Lubrication and Tribology*, 53:10-21.
- [8] Onodera, T., Kuriaki, T., Morita, Y., Suzuki, A., Koyama, M., Tsuboi, H., Hatakeyama, N., Endou, A., Takaba, H., Del Carpio, C.A., Kubo, M., Minfray, C., Martin, M., Martin, J. ve Miyamoto, A., (2009). "Influence of Nanometer Scale Film Structure of ZDDP Tribofilm on its Mechanical Properties: A Computational Chemistry Study", *Applied Surface Science*, 256: 976-979.
- [9] Ito, K., Martin, J., Martin, M., Minfray, C. ve Kato, K., (2006). "Low-friction Tribofilm Formed by the Reaction of ZDDP on Iron Oxide", *Tribology International*, 39:1538-1544.
- [10] Kaleli H., (2004). "Evaluation of Additive's Layer Formation in Engine Crankcase Oil Using Two Different Types of Tribological Test Rigs", *Industrial Lubrication and Tribology*, 56(3):158-170.
- [11] Morina, A., Green, J.H., Neville, A. ve Priest M., (2003). "Surface and Tribological Characteristics of Tribofilms Formed in the Boundary Lubrication

- Regime with Application to Internal Combustion Engines”, *Tribology Letters*, 15:443-452.
- [12] Braithwaite, E.R., Greene, A.B. ve Train, B.M., (1999). “The Influence of MoS<sub>2</sub> on the Mechanism of Piston-Ring Wear during the Running-in Process”, *Industrial Lubrication and Tribology*, 51: 274-286.
- [13] Tung, S. C. ve Huang, Y., (2003). “Modeling of Abrasive Wear in a Piston Ring and Engine Cylinder Bore System”, *STLE/ASME Tribology Conference*, 27-29 October 2003, Florida.
- [14] Qu J., Blau J.P., Dai S., Luo H., Meyer III M.H., (2009). “Ionic Liquids as Novel Lubricants and Additives for Diesel Engine Applications”, *Tribology Letters*, 35:181-189.
- [15] Truhan, J. J., Qu, J. ve Blau P. J., (2005). “The Effect of Lubricating Oil Condition on the Friction and Wear of Piston Ring and Cylinder Liner Materials in a Reciprocating Bench Test”, *Wear*, 259:1048-1055.
- [16] Pike, W. C., M.Sc. Student ve Newman, P., (1961). “A Comparison of the Wear of Small Gasoline and Diesel Laboratory Engines”, *Proc Znstn Mech Engrs*, 8:290-297.
- [17] Papadopoulos, P., Priest, M., ve Rainforth, W.M., (2007). “Investigation of Fundamental Wear Mechanisms at the Piston Ring and Cylinder Wall Interface in Internal Combustion Engines”, *Engineering Tribology*, 221:333-343.
- [18] Hsu, S. M. ve Gates, R. S., (2005). “Boundary Lubricating Films: Formation and Lubrication Mechanism”, *Tribology International*, 38:305-312.
- [19] Mortier, R.M. ve Orszulik, S.T., (1997). *Chemistry and Technology of Lubricants*, 2nd Edition, Blackie Academic and Professional, London.
- [20] Pirro, D.M. ve Wessol, A.A., (2001). *Lubrication Fundamentals*, 2nd Edition, Marcel Dekker, New York.
- [21] Willermet, P.A., (1998). "Some Engine Oil Additives and their Effects on Antiwear Film Formation", *Tribology Letters*, 5:41-47.
- [22] Bell, J.C, (1998). “Gasoline Engine Valve Train Design Evolution and the Antiwear Requirements of Motor Oils”, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 212:243-257.
- [23] Michalski, J., Marszalek, J. ve Kubiak, K., (2000). “An Experimental Study of Diesel Engine Cam and Follower Wear with Particular Reference to the Properties of the Materials”, *Wear*, 240:168-179.
- [24] Shirahama, S. ve Hirata, M., (1989). “The Effects of Engine Oil Additives on Valve Train Wear”, *Lubrication Science*, 1:365-384.
- [25] Soejima, M., Ejima, Y. Wakuri, Y. ve Kitahara, T., (1999). “Improvement of Lubrication for Cam and Follower”, *Tribology Transactions*, 42(4):755-762.
- [26] Zhu, G. ve Taylor, C.M., (2001). *Tribological Analysis and Design of a Modern Automobile Cam and Follower*, Professional Engineering Publishing, London.
- [27] Davis, G. H. B. ve Blackwood, A. J., (1931). “Improved Paraffins-Base Lubricating Oils”, *Ind. Eng. Chem.*, 23(12):1452-1458.

- [28] Barnes, A.M., Bartle K.D. ve Thibon, V.R.A., (2001). "A Review of Zinc Dialkyldithiophosphates (ZDDPs): Characterization and Role in the Lubricating Oil", *Tribol. Int.*, 34:389-395.
- [29] Cerny, J., Strnad, Z. ve Sebor, Z.G., (2001). "Composition and Oxidation Stability of SAE 15W-40 Engine Oils", *Tribol. Int.*, 34:127.
- [30] Gilks, J.H., (1964). "Antioxidants for petroleum products", *J. Inst. Petrol.*, 50:309.
- [31] Stadtmiller, W.H. ve Smith, A.N., (1986). "Aspects of Lubricant Oxidation", American Society for Testing and Materials.
- [32] Bos, A. B. F., Verhelst, A., Voogdt, D. ve Cannon, M.J., (1993). Mechanisms of Loss of Oil Consumption Control during Operation of Medium Speed Diesel Engines, CEC IL-21 Investigation Report, Revision 6.
- [33] Cannon, M.J., Logtenberg, J. ve Dilks, A. (1990). Cylinder Liner Lacquering in High Output Medium Speed Diesel Engines, Shell Marine Service Publication.
- [34] Czichos, H., (1974). "Failure criteria in thin film lubrication: the concept of a failure surface", *Tribology*, 8:14-20.
- [35] Eyre, T.S., (1978). "The mechanisms of wear", *Tribology International*, 11:91-96.
- [36] Eyre, T.S., Dutta, K.K. ve Davis, F.A., (1990). "Characterization and Simulation of Wear Occurring in the Cylinder Bore of the Internal Combustion Engine", *Tribology International*, 23(1):11-16.
- [37] Nicholls, M.A., Do, T., Norton, P.R., Kasrai, M. ve Bancroft, G.M., (2005). "Review of the Lubrication of Metallic Surfaces by Zinc Dialkyldithiophosphates", *Tribology International*, 28:15-39.
- [38] Buhaug, O., (2003). Deposit Formation on Cylinder Liner Surfaces in Medium-Speed Engines, PhD Thesis, Faculty of Engineering Science and Technology, Norwegian University, Trondheim.
- [39] Kaleli, H. ve Bektas, D., (2011). "Effect of Additive Level on the Surface of Diesel Engine Cylinder Liner", *Journal of the Balkan Tribological Association*, 17(1):139-150.
- [40] Bektas, D. ve Kaleli, H., (2011). "Comparison of Additive's Protective Layer on the Cylinder Liner Surface Using Diesel Engine and Pin on Plate Test Rigs", 12th International Conference on Tribology, 11 – 13 May 2011, Kragujevac, Serbia.

## ÖZGEÇMİŞ

---

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Dilek BEKTAŞ  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 01.06.1985, İstanbul  
**Yabancı Dili** : İngilizce  
**E-posta** : bektasdilek@yahoo.com

### ÖĞRENİM DURUMU

| Derece    | Alan                           | Okul/Üniversite            | Mezuniyet Yılı |
|-----------|--------------------------------|----------------------------|----------------|
| Y. Lisans | Makina Mühendisliği,<br>Enerji | Yıldız Teknik Üniversitesi | 2011           |
| Lisans    | Makina Mühendisliği            | Trakya Üniversitesi        | 2007           |
| Lise      | Sayısal                        | Pendik Lisesi              | 2002           |

### İŞ TECRÜBESİ

| Yıl         | Firma/Kurum            | Görevi              |
|-------------|------------------------|---------------------|
| 2009 - ...  | Piri Reis Üniversitesi | Araştırma Görevlisi |
| 2008 - 2009 | TÜDEV Eğitim Merkezi   | Araştırma Görevlisi |

## **YAYINLARI**

### **Makale**

1. Kaleli, H. ve Bektas, D., (2011). "Effect of Additive Level on the Surface of Diesel Engine Cylinder Liner", Journal of the Balkan Tribological Association, 17(1):139-150.

### **Bildiri**

1. Bektas, D. ve Kaleli, H., (2011). "Comparison of Additive's Protective Layer on the Cylinder Liner Surface Using Diesel Engine and Pin on Plate Test Rigs", 12th International Conference on Tribology, 11 – 13 May 2011, Kragujevac, Serbia.