

BİR DİZEL MOTORDA MoN KAPLANMIŞ PİSTONUN YÜZEY DAVRANIŞLARI

Hanbey HAZAR*

Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü, ELAZIĞ
hanbeyhazar@hotmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, bir dizel motorunun piston yüzeyi molibden nitrür (MoN) ile kaplanmış ve çalışma sonrası yüzey davranışı incelenmiştir. Yapılan deneylerde dört zamanlı bir dizel motorunun piston yüzeyi ark PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemi kullanılarak seramik bir malzeme olan MoN ile $2.0 \pm 0.3 \mu\text{m}$ kalınlığında kaplanmıştır. Önce pistonu MoN kaplanmış test motoru 1/2 yükte belirli bir süre test edilmiştir. Daha sonra aynı motor kaplamasız olarak aynı çalışma şartlarında test edilmiştir. Yapılan deneyler sonrasında pistonların yüzey karakteristiklerini araştırmak için SEM (Scanning Electron Microscopy), mikrosertlik ve yüzey pürüzlülüğü analizleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre MoN kaplanmış piston yüzeyi üzerinde, kaplanmamış pistona göre daha az deformasyon ve aşınma çiziklerinin olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dizel motor, MoN kaplama, piston, yüzey topografyası.

Surface Behaviors Of MoN Coated Piston in A Diesel Engine

ABSTRACT

In this experimental study, the surface of a piston in a diesel engine was coated with molybdenum nitride (MoN), and its surface behaviour was subsequently analyzed. In the experiments carried out, the piston surface of a four stroke diesel engine was coated with MoN- a ceramic material with a thickness of $2.0 \pm 0.3\text{-}\mu\text{m}$ using the arc PVD (Physical vapor deposition) method. Initially, the test engine MoN-coated piston was tested for a while with a load of 1/2. Then, the same engine without a MoN coating was tested under the same conditions. Analyses of SEM (Scanning Electron Microscopy), microhardness and surface roughness were carried out in order to examine surface characteristics of pistons. The results show less deformation and fewer scratches due to wear on the MoN-coated piston as compared to the uncoated one.

Keywords : Diesel engine; MoN coating; piston; surface topography.

* İletişim yazarı
Geliş/Received : 16.10.2008
Kabul/Accepted : 13.01.2009

GİRİŞ

Otomotiv sektöründeki yarış, araştırmacıları daha verimli, çevreci ve daha ekonomik motor yapımı için teşvik etmektedir [1]. Çünkü motorlara verilen toplam enerjinin çok az bir kısmı faydalı enerjiye dönüşmektedir. Bu enerjinin yarıdan fazlası ise, motor parçalarını aşırı ısıdan korumak amacıyla soğutma sistemi, sürtünme kayıpları, egzoz kayıpları ve diğer kayıplar olarak sistemden atılmaktadır. Bu enerjilerin toplamı, motor için enerji kaybı olarak ifade edilebilir. Motorun faydalı işini arttırmanın en etkin yolu, yukarıda bahsedilen bu kayıp enerjii azaltmaktır. Bunun için malzeme teknolojisine dayanan ve sürtünme yoluyla oluşan enerji kayıplarının azaltılmasına çalışılmaktadır. Bunun sağlanması, yanma odasını oluşturan parçaların ısı iletkenliği düşük, yüksek çalışma sıcaklığına dayanabilen bir malzemeden üretilmesi veya kaplanmasıyla mümkündür. Isıl iletkenliği düşük olan seramikler, malzemelerin fiziksel, termal ve kimyasal özelliklerini arzu edilen şartlara yaklaştırarak bize geniş bir alanda kullanım imkânı sunmaktadır.

Son yıllarda ileri teknoloji ürünü olan seramik malzeme alanındaki gelişmelere paralel olarak motorlarda seramik malzemenin kullanılması büyük bir hızla artmaktadır. Mevcut içten yanmalı motorlarda, özellikle malzemenin termik stabilitesi yönünden konulan sıcaklık sınırlamaları motor verimini de sınırlamaktadır [2].

İçten yanmalı motorlarda yanma odasını oluşturan parçalardan bir tanesi de pistonur. Motorlarda piston, silindir hacminin hareketli kısmını teşkil eder. Motorlarda kullanılan pistonlar genellikle Al-Si alaşımıdır. Pistonlar; basınç, ısıl zorlamalar, dinamik yükleme, değişken olan gaz, atalet ve yan kuvvetlerin etkisi altında bulunur. Ayrıca piston, çeşitli noktalarda termik zorlamalara karşı çalışır. Piston, ısıl yönden en çok zorlanan parçalardan biridir. Dolayısıyla gerekli tasarım, üretim ve malzeme tekniği açısından alınan tedbirler pistonların ömrünü yeterince uzatamamaktadır. Pistonun ömrünü azaltan diğer önemli faktör de aşınmadır. Çünkü pistonların gerek yapısal özellikleri, gerekse yüzey pürüzlülüğü ve sertliğinin yetersiz olmasından dolayı piston yüzeylerinde istenmeyen ölçüde aşınmanın meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu amaçla pistonların ömrünün uzatılması, hem motorun kullanım ömrünü uzatacak hem de ekonomiye katkı sağlayacaktır. Pistonların kullanım ömrünün uzatılmasına yönelik çalışmalardan bir tanesi de pistonların ileri teknolojik seramik malzeme ile kaplanmasıdır. Pistonların seramik malzeme ile kaplanması, meydana gelen olumsuzlukları kaplamanın karşılamasına neden olacağı için pistonun zarar görmesi engellenmiş olacaktır. İçten yanmalı motorlarda yanma odası

elemanlarının kaplanması için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bir tanesi de PVD (fiziksel buhar çökertme) kaplama yöntemidir. PVD kaplama yöntemi çeşitli motor parçalarının aşınma direncini arttırmak için kullanılmaktadır. PVD kaplama yöntemiyle birçok seramik malzeme istenilen kalınlıkta kaplanabilmektedir. Bu seramik malzemelerden bir tanesi de MoN (molibden nitrür) dür. Son zamanlarda MoN ince kaplama olarak daha iyi aşınma ve korozyon direnci gibi özelliklerinden dolayı dikkatleri üzerine çekmektedir.

İçten yanmalı motorlarda yanma odası elemanlarının seramik ile kaplanması iki amaçla yapılmaktadır. Birincisi parçaların tribolojik özelliklerini geliştirmek, ikincisi ise motor performansı ve egzoz emisyonlarını iyileştirmektir. Pistonun kaplanmasının tribolojik iyileşmelerle birlikte motor performansı ve egzoz emisyonlarını da iyileştirdiği bilinmektedir [3].

Literatür tarandığında motor pistonunun çeşitli seramik malzeme ile kaplanmasıyla ilgili çok az çalışmaya rastlanılmasına rağmen MoN kaplanmış pistonla ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanmamıştır. Dolayısıyla bu alan üzerinde literatür eksikliği mevcuttur ve konu yeterince anlaşılmamıştır. Bizim yapacağımız bu çalışmada, bir dizel motordaki aşınmanın en fazla meydana geldiği yerlerden biri olan pistonun yüzeyinin MoN ile kaplanmasının tribolojik açıdan değerlendirilmesi yapılacaktır. Böylece bu alana bir katkı sağlanacağı düşünülmektedir. Literatürler tarandığında yapılan çalışmaların umut verici olduğu ve bu alanda daha ileriye gidilebileceği görülmektedir. Bu çalışmaların çoğu gerçek motor şartları yerine laboratuvar test şartlarında yapılmaktadır. Ancak çok iyi dizayn edilmiş laboratuvar test şartlarında bile gerçek motor çalışma şartları sağlanamaz, çünkü yanma odasında meydana gelen kimyasal ve mekanik olaylar çok karışıktır [4].

Bizim yapacağımız deneylerin gerçek bir motorda yapılması bu açıdan önemlidir. Dizel motorların yanma odası elemanlarının seramik kaplanmasıyla ilgili yapılan çeşitli çalışmalarda [5-8] bu parçaların tribolojik özelliklerinin iyileştiği ve dayanımlarının arttığı tespit edilmiştir.

Motorlarda soğutma sistemine giden enerji, motor için kayıp enerji olarak değerlendirilmektedir. Bu enerjinin bir kısmının azaltılarak kazanılması, motor verimi açısından çok önemlidir. Yanma odası elemanlarının seramik kaplanmasıyla ilgili, yapılan birçok çalışmada [9-17] motor performansının ve egzoz emisyonlarının iyileştiği bildirilmiştir.

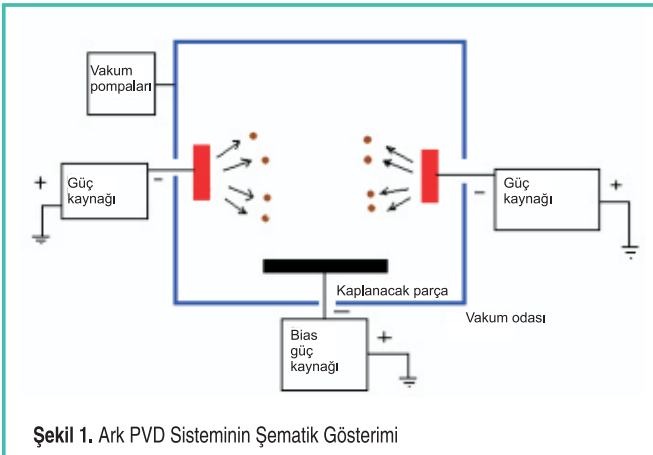
Mevcut çalışmada tek silindri, direkt püskürtmeli, hava soğutmalı bir dizel motorun piston yüzeyi ark PVD yöntemi

kullanılarak MoN ile kaplanmıştır. Bu çalışmanın amacı piston-sekman-silindir gömleği arasındaki aşınma mekanizmasında piston için yüzey kaplamasının tribolojik etkisini incelemektir.

Ark PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) Yöntemi

Deneyisel çalışmada kullanılan ark PVD yöntemi, mikro yapıyı etkilemeyerek çok katlı kaplamaların oluşturulmasına ve bileşimin değiştirilerek kaplama özelliklerinde ayarlama yapabilme imkanı sunmaktadır. PVD yönteminin diğer önemli bir avantajı da çok ince (1-5 μm) kaplama yapılabilmesi ve parça toleransının muhafaza edilmesidir. Bu sebepten dolayı kaplama yöntemi olarak ark PVD yöntemi seçilmiştir. Ark PVD yöntemi, yüksek verim ve yüksek iyon-akım yoğunluğundan dolayı tribolojik uygulamalar için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem; malzemelerin tribolojik özelliklerini iyileştirmek için MoN ile kaplanmasında oldukça iyi sonuçlar vermektedir. Birçok çalışmada MoN kaplamaların biriktirme işleminde iyi bir yapışma (adhezyon) özelliği gösterdiği [18,19] bildirilmiştir.

Bu yöntem ile; buhar fazının elde edildiği sistemlerin düşük alt malzeme sıcaklıkları, düşük katot tüketimi, yüksek biriktirme ve iyonizasyon hızlarında uygulanabilmesi bu sistemin kullanım alanlarını genişletmektedir. Bu yöntemin en büyük dezavantajı, katot yüzeyinde oluşan arkın etkisi ile makro partiküllerin kütsel olarak kopması sonucunda, kaplama yüzeylerinde droplet olarak tanımlanan kaplama hatalarının meydana gelmesidir. Bu yöntemde, Şekil 1'de gösterildiği gibi buhar fazının elde edileceği malzeme vakum odasına katot olarak, kaplanacak malzeme de anot olarak bağlanır. Yüksek akım ve düşük voltaj etkisiyle katot yüzeyinde bir ark meydana gelir. Katot yüzeyinde arkın meydana geldiği noktalarda sıcaklığın çok yüksek değerlere ulaşması, bu noktalarda ergime ve buharlaşmalara sebep olur.



Şekil 1. Ark PVD Sisteminin Şematik Gösterimi

Bu noktada meydana gelen buhar fazı, katot önündeki yüksek elektron yoğunluklu bölgede çarpışmalara maruz kalarak hızla iyonize olur. Homojen olmayan potansiyel dağılımı sebebiyle iyonlar bu bölgeden hızla uzaklaştırılır. Bias voltajı uygulanmış taban malzemeye doğru yönlendirilen iyonlar reaktif gazla reaksiyona girerek taban malzeme üzerine biriktirilirler [20].

DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneyisel çalışmada, dört zamanlı, tek silindirli, direkt püskürtmeli, hava soğutmalı bir dizel motor (6LD 400 Lombardini model) kullanılmıştır. Tablo 1' de deney motoruna ait teknik özellikler, Tablo 2' de bu çalışmada kullanılan ark PVD (fiziksel buhar biriktirme) yöntemi ve MoN kaplamaya ait üretim parametreleri verilmiştir. Bu deneyde kullanılan motorun piston yüzeyi İstanbul Teknik Üniversitesi laboratuvarlarında seramik bir malzeme olan MoN ile $2.0 \pm 0,3 \mu\text{m}$ kalınlığında kaplanmıştır. İki aşamada yapılan deneylerde, pistonu kaplanmamış ve MoN kaplanmış motorlar, aynı yük şartlarında (1/2 yükte ve 2600 d/dk.), yaklaşık olarak her motor için 450 saat çalıştırılmıştır. Uygun motor tipi, kaplama malzemesi, deney seti ve cihazları tespit edilerek gerekli test şartları hazırlanmıştır. SEM analizlerinde LEO 440 Model cihaz kullanılmıştır. Sertlik ölçümü, Fisher H100 XYPROG Model cihaz kullanılarak 10 mN yük altında, HV cinsinden yapılmıştır. Pürüzlülük ölçümlerinde ise Mitutoyo SurfTest-211 yüzey pürüzlülük cihazı kullanılmıştır. Kaplama kalınlığı SEM fotoğrafındaki (Şekil 4) ölçü sistemi kullanılarak beklenen değerde tespit edilmiştir. Kaplanmış ve kaplanmamış pistonların mikro yapı analizlerinde kullanılacak numuneler CNC tezgahında 10 mm x10 mm x10 mm ebadında kesildikten sonra 60-120-400-600-800-1200'lük zımparalar ile zımparalanmıştır. Çuhada 1 μm ' lik elmas pasta ile yüzeyleri zımparalanan numuneler parlatılmıştır. Yüzeyleri parlatılan numuneler alkol ile temizlenmiştir. Daha sonra numuneler % 2-3 nital (%98 alkol + %2 nitrik asit (HNO₃)) ile dikkatli bir şekilde dağlanmıştır. Ortamdaki nemden etkilenmemesi ve oksitlenmemesi için kutulanan numunelerin içine silikajel yerleştirilerek kapatılmıştır. Motorlara yük vermek için Şekil 2'de görüldüğü gibi Cusson P8 160 Model elektrikli dinamometre cihazı kullanılmıştır. Elektrikli dinamometre üzerindeki dijital ekrandan yapılan yüklemeler, motor devri, egzoz gaz sıcaklığı okunabilmektedir. Deneyisel çalışmadan önce yapılan literatür araştırmasında [21], ark PVD yönteminin motorlarda yanma odası parçaları üzerinde iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada kaplama yöntemi olarak ark PVD yöntemi seçilmiştir.

Çalışma öncesi kaplanmamış pistonun yüzey pürüzlülüğü (R_a) ~4.14 μm , MoN kaplanmış pistonun ise ~3.76 μm olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonrası ise kaplanmamış pistonun dayanma

yüzeyi pürüzlülüğü (R_a) $\sim 1.85 \mu\text{m}$ piston eteği yüzeyi (R_a) $\sim 2.94 \mu\text{m}$, MoN kaplanmış pistonun dayanma yüzeyi $\sim 2.78 \mu\text{m}$ piston eteği yüzeyi $\sim 3.20 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. MoN kaplanmış ve kaplanmamış pistonun mikrosertlik değerleri

Tablo 1. 6LD 400 Lombardini Motorun Teknik Özellikleri

Motorun markası ve tipi	6LD 400 Lombardini
Strok sayısı	4
Silindir sayısı	1
Silindir çapı	86 mm
Strok	68 mm
Motor gücü	6.25 / 8.5 (kW / hp)
Yakıtı	Dizel motorini
Püskürtme şekli	Direkt enjeksiyonlu
Püskürtme basıncı	200 kg /cm ²
Soğutma şekli	Hava soğutmalı
Sıkıştırma Oranı	18:1
Devir	3600 d /dk

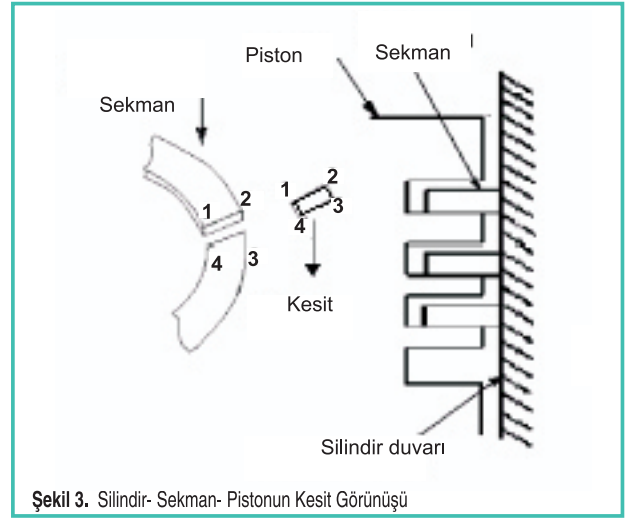
Tablo 2. Ark PVD ve MoN Kaplamanın Üretim Parametreleri

Kaplama kalınlığı (μm)	2.0 ± 0.3
Sertlik (HV)	2000 ± 400
Kaplama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	300
Çökertme zamanı (dk.)	60
Katot akımı (A)	125
Bias voltajı (V)	-100
Kaplama basıncı (Pa)	4×10^{-1}

sırasıyla $\sim 2000 \pm 400$ ve $\sim 123 \text{ HV (kg/mm}^2\text{)}$ olarak tespit edilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

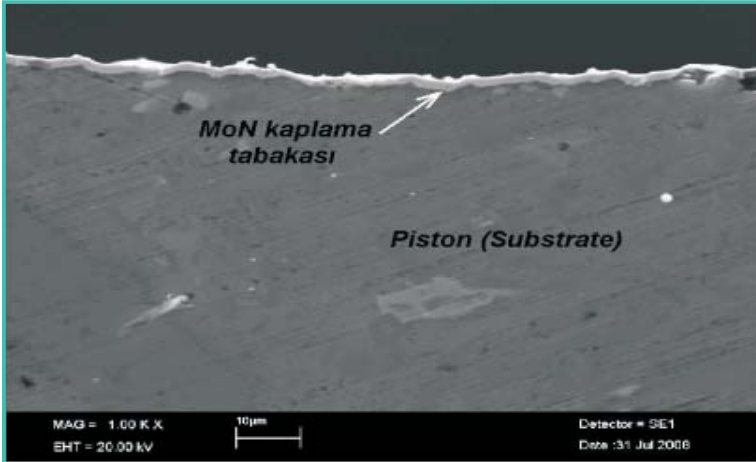
Testlerde kullanılan Al-Si alaşımı pistonlar içerisinde bulunan Al (Alüminyum) hafiflik, iyi ısı iletimi, yüksek korozyon direnci sağlarken ısıya karşı dayanıksızdır. Silisyum ise dayanımı ve aşınma direncini artırırken ısıl genişlemeyi azaltır. Pistonlar; yanma zamanında açığa çıkan gaz basıncını karşılayarak piston pimi üzerinden biyel koluna taşır ve yanma ısısını sekmanlar üzerinden silindir yüzeyine iletir. Ayrıca yanma odasından krank karteri tarafına hareketli gaz sızdırmazlığını sağlar. Şekil 3' de silindir- sekman- pistonun kesit görünüşü verilmiştir.



Şekil 3. Silindir- Sekman- Pistonun Kesit Görünüşü



Şekil 2. Deney Düzeninin Fotoğrafı



Şekil 4. Seramik Kaplanmış Pistonun Kesit Üzerinden Alınan SEM fotoğrafı (x1000)

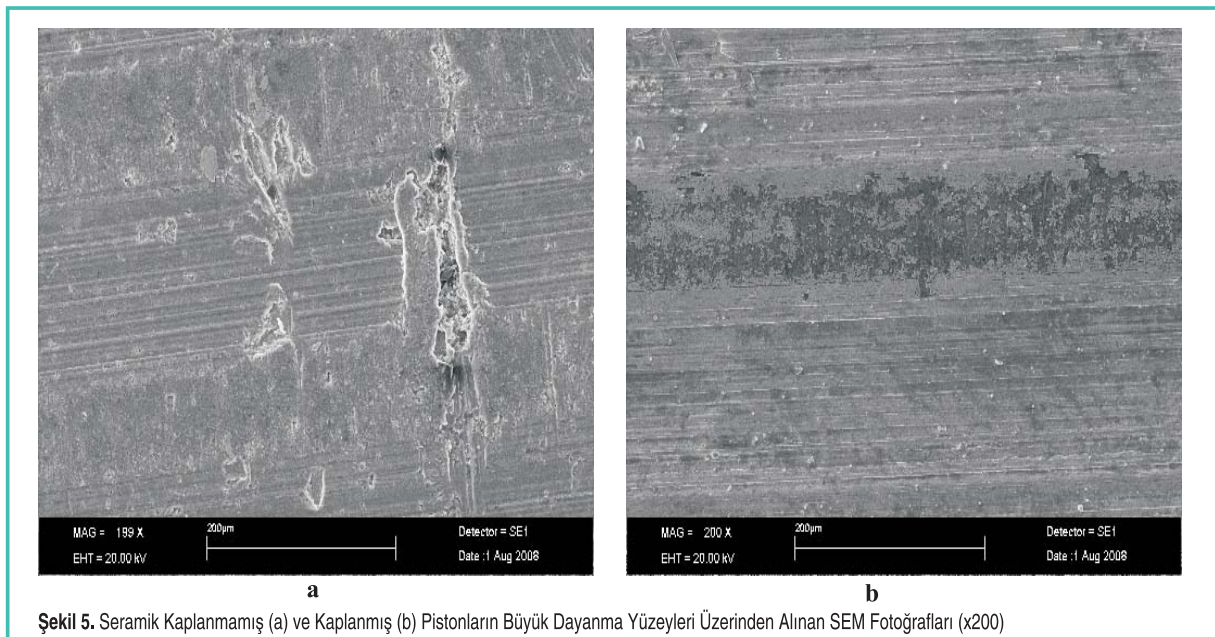
Piston üzerinde bulunan sekmanlar, Şekil 3' de görüldüğü gibi pistonun üstündeki hacmin sızdırmazlığını, ısının pistondan silindire geçirilmesini ve silindir yüzeyindeki yağın kazınmasını sağlar. Sızdırmazlığının sağlanması, silindir cidarına radyal temas ve sekmanın alt yüzeyinin yuvasına dayanması şeklinde olur. Sekman yuvalarındaki basınç, sekmanı radyal yönde silindire iter ve sürtünmeyi artırır. Yanma odasında oluşan toplam ısının % 50'si sekmanlar tarafından silindire taşınmaktadır. Yanma odasında meydana gelen ısı, piston ve sekmanlar üzerinden silindire, oradan da soğutma suyuna geçmektedir. Pistonun bu yol üzerinde olması, aşınmasını hızlandırıcı bir etken olarak düşünülebilir. Silindirlerde aşınma silindirik bir şekilde olmaz. Normal olarak büyük ve küçük dayanma yüzeylerine doğru aşınmaların dışında silindirdeki gerilme düzensizliklerinden dolayı

sekmanlar bu bozuk silindirikliğe ayak uyduramaz ve silindiri daha fazla aşındırırlar. Bu zaman zarfında pistondaki aşınma da fazla olur. Pistondaki aşınmayı hızlandıran etkenlerden bir tanesi de soğuk motorun çalıştırılmasıdır. Özellikle düşük sıcaklıklarda motor silindirlerinden süzülen yağ kartere ulaşmış ve yağ filmi aşağıya doğru biriken yakıt ilavesiyle yıkanmıştır. Motor ilk çalıştırılmaya başlandığı zaman yağ pompasının yağı karterden çekip, kanallar vasıtasıyla silindir ve pistonu ulaştırması belirli bir zaman alacaktır. Buna yağlama gecikmesi denmektedir. Bu süreye kadar motor çalıştığı için piston ve silindir yüzeyi yetersiz yağlanmaktadır. Şekil 4'de ark PVD yöntemi ile yüzeyi MoN kaplanan pistonun kesit yüzeyi üzerinden alınan SEM fotoğrafında kaplama tabakası görülmektedir.

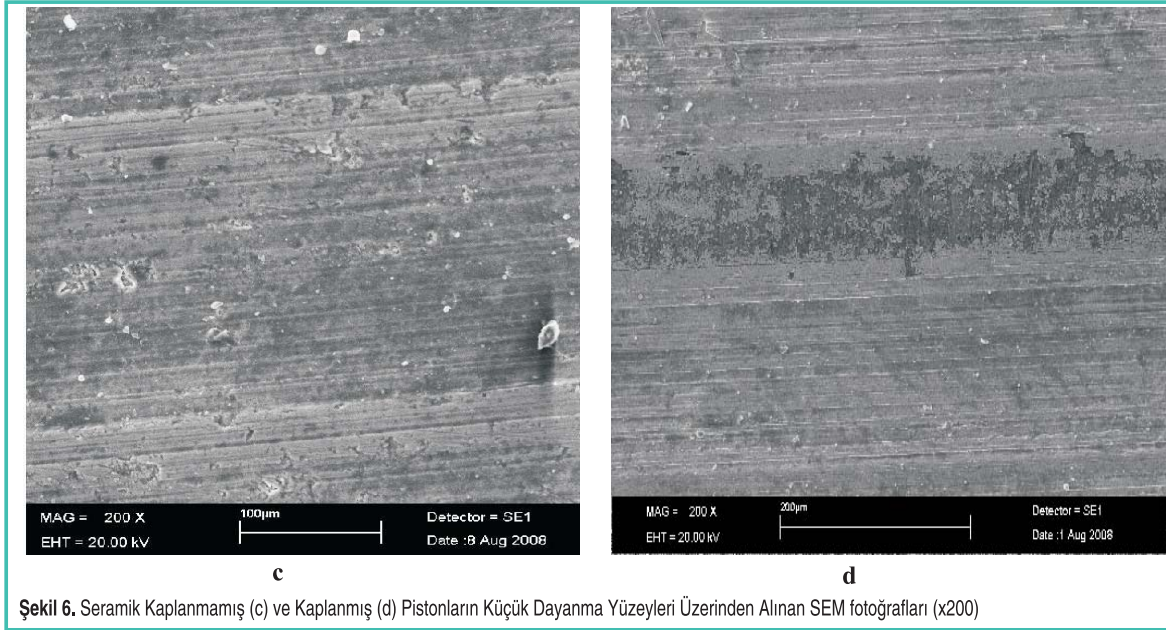
Kaplama tabakası ile esas malzeme ara yüzeyinde; boşluk ve çatlakların olmadığı açıkça görülmektedir.

Şekil 5'de seramik kaplanmamış (a) ve kaplanmış (b) pistonların büyük dayanma yüzeyleri üzerinden, Şekil 6'da seramik kaplanmamış (c) ve kaplanmış (d) pistonların küçük dayanma yüzeyleri üzerinden, Şekil 7'de ise seramik kaplanmamış (e) ve kaplanmış (f) pistonların üst yüzeyi (yanma oluğu) üzerinden alınan SEM fotoğrafları görülmektedir.

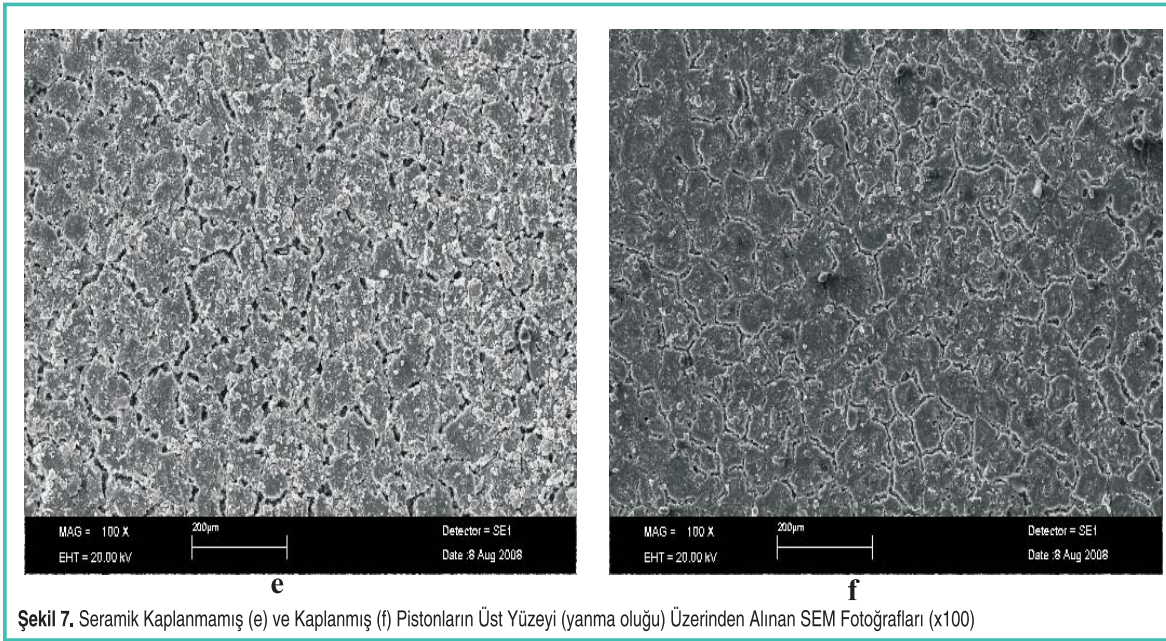
Motorlarda, piston-silindir-sekman çalışma mekanizması düşünüldüğünde, bu parçaların yüzey pürüzlülüğünün aşınma üzerinde önemli bir etkisi vardır. Pistonda en çok meydana gelen aşınma tipi olan abrasif aşınma miktarı, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması ve matris mikro sertliğinin



Şekil 5. Seramik Kaplanmamış (a) ve Kaplanmış (b) Pistonların Büyük Dayanma Yüzeyleri Üzerinden Alınan SEM Fotoğrafları (x200)



Şekil 6. Seramik Kaplanmamış (c) ve Kaplanmış (d) Pistonların Küçük Dayanma Yüzeyleri Üzerinden Alınan SEM fotoğrafları (x200)



Şekil 7. Seramik Kaplanmamış (e) ve Kaplanmış (f) Pistonların Üst Yüzeyi (yanma oluşu) Üzerinden Alınan SEM Fotoğrafları (x100)

arttırılmasıyla azaltılabilmektedir. Aşınma sistemindeki artış pürüzlü yerlerde daha çok görülmektedir. Bu mikroskopik temas alanında en yüksek gerilme, temas iç yüzeyinde görülür. Burada ince bir kaplama uygulanması, sürtünme ve aşınma özelliklerinin gelişmesi için önemlidir. Yüzy topografyası, artık gerilme (residual stress), kaplamanın mikro yapısı ve kaplama kalınlığı kaplama malzemesinin cinsi ile ilişkilidir. Şekil 5 ve 6' da SEM fotoğraflarında kaplanmamış ve MoN kaplanmış pistonların yüzey yapıları görülmektedir. Pürüzlü yüzeylerdeki temas alanının genişlemesi, piston yüzeylerindeki sürtünme katsayısının

değerini yükseltmektedir. Deneylelerden önce yapılan ölçümlerde kaplanmamış piston yüzeyinin pürüzlülük değeri $4.14 \mu\text{m}$ iken çalışma sonrası pistonun dayanma yüzeyi pürüzlülüğü (R_a) $\sim 1.85 \mu\text{m}$, piston eteği yüzeyi (R_a) $\sim 2.94 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. Pistonun malzeme yapısı dikkate alındığında özellikle dayanma yüzeyi tarafındaki pürüzlülük değerinin piston eteği yüzeyine göre daha fazla azalması beklenen bir sonuçtur. Çünkü yanma zamanı sonunda elde edilen kuvvetin bir kısmı dayanma yüzeyi tarafından silindire iletilmektedir. Böylece piston eteğine göre bu bölgede daha fazla sürtünme meydana gelmektedir. Oluşan bu sürtünme

kuvvetinin yüzeyin pürüzlülüğünün azalmasına katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Aynı şekilde MoN kaplanmış pistonun yüzey pürüzlülük değeri $\sim 3.76 \mu\text{m}$ iken çalışma sonrası pistonun dayanma yüzey pürüzlülüğü (R_a) $\sim 2.78 \mu\text{m}$, piston eteği yüzeyi (R_a) $\sim 3.20 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. Bu değerlere bakıldığında MoN kaplanmış pistonun yüzey özelliğini daha fazla koruduğu anlaşılmaktadır. Çalışma sonrası MoN kaplanmış pistonun pürüzlülük değerlerinin kaplanmamış pistonu göre daha pürüzlü olduğu görülse de MoN kaplamanın bu olumsuz etkiyi karşıladığı düşünülmektedir. Silindirlerde yağlama yapılmasına rağmen sekmanlar çalışma sırasında bu yağı sürekli bir şekilde silindir cidarlarından kazımaktadırlar. Dolayısıyla kuru metal-metal teması neden olarak aşınmayı başlatmaktadırlar. Sonuç olarak sürtünmeden meydana gelen sıcaklık, metal kaynamalarına ve yüzey bozulmalarına neden olarak yüzeyde çeşitli çatlaklar meydana getirir. Silindir yüzeyinde sızan yanmış sıcak gaz, pistonu ısıtmakta ve aşırı yük altında sekman ile birlikte silindirde sarma ve krepaj çiziklerine neden olabilmektedir. Şekil 5 (a)'da kaplanmamış piston üzerinde derin çiziklerin olduğu görülmektedir. Şekil 5 (a)'da görülen bu çiziklerin metal-metal teması sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 5 (a)'da kayma yönünde abrasif yarıklar da görülmektedir. Şekil 5 (b)'ye bakıldığında MoN kaplı piston yüzeyinin daha düzgün bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum MoN kaplı pistonun kaplanmamış piston yüzeyine göre mikro sertliğinin yüksek ve daha düzgün bir yüzey yapısına sahip olmasıyla izah edilebilir.

MoN kaplanmış pistonun kaplanmamış pistonu göre sürtünme katsayısının düşük olmasında MoN kaplamanın sertliği ve temas alanının etkisi de vardır. Seramik kaplanmış pistonun yüzeyinin kaplanmamış pistonu göre yüksek sertliği, taşıyabileceği yük kapasitesini de arttırmaktadır [22].

Motorlarda piston-sekman-silindir çalışma mekanizması düşünüldüğünde, birim alana düşen taşınabilecek yük kapasitesinin ne kadar önemli bir etkiye sahip olduğu ortaya çıkmaktadır. Parçaların daha fazla yük taşıma kapasitesi sayesinde motorların daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalıştırılabileceği düşünülmektedir. Böylece pistonu MoN kaplanmış motorların, daha fazla yük altında çalıştırılabileceği düşünülmektedir. Motorun çalışması esnasında yağ filminin zaman zaman veya ilk çalışma esnasında yırtılmasından dolayı metal-metal teması sonucu üretilmiş çeşitli metal hasarları meydana gelmektedir. Şekil 5 (a)'ya bakıldığında kaplanmamış pistonun yüzeyi üzerinde meydana gelen abrasif aşınma izleri, aşınma partiküllerinin oluşturduğu serbest yüzey kırıkları ve mikro çatlaklar açık bir şekilde görülmektedir. Mikroyapı fotoğraflarına bakıldığında

aşınma olukları dar ve derin olmasına rağmen bazı bölgelerde genişleyip derinleştiği görülmektedir. MoN kaplanmış pistonun yüzeyinde önemli bir hasarın olmadığı, ince taneli ve düzgün bir yüzey topografyasına sahip olduğu Şekil 5 (b) ve 6 (d)'de görülmektedir. MoN kaplamanın yüksek yüzey sertliğinin, pistonun aşınma direncini arttırdığı ve sonuçta aşınmayı azalttığı söylenebilir. Şekil 5 (b)'de MoN kaplanmış pistonun yüzeyine bakıldığında herhangi bir derin mikro çatlağın olmadığı ve kaplanmamış pistonu göre aşınma izinin çok az olduğu açıkça görülmektedir. MoN kaplanmış pistonun yüzey sertliğinin kaplanmamış silindire göre yüksek olmasının, aşınma iz genişliklerini azalttığı düşünülmektedir. Yapılan kaplama işleminde bileşik tabaka yapısının (adhezyonun) yüksek olması, hem iyi bir aşınma hem de iyi bir sürtünme direncine sahip olduğunu göstermektedir. Genel anlamda aşınma, sürtünme sonucu aşamalı ve düzgün bir şekilde oluşan şekil bozukluğudur. Pistondaki aşınma; sürtünme ile birlikte yanma, yağlama ve soğutmanın oluşturduğu fiziksel ve kimyasal etmenlerin piston yüzeyini etkilemeleri sonucu meydana gelir. Motorun çalışması ile artan ısı da, aynı şekilde piston çevresinde, özellikle üst tarafta farklı gerilmeler oluşturur. Değişik kaynaklı bu gerilmelerin etkisiyle piston şekil değiştirir. Dairesel olan sekmanlar ise, şekil bozukluğunun ilk anlarında, silindirin ovalliğine tam olarak uyamazlar. Bu nedenle, silindir-piston ve sekmanlar karşılıklı uyum sağlayıncaya kadar birlikte aşınır. Pistonun aşınmasını hızlandıran önemli etkenlerden bir tanesi de Ü.Ö.N. (üst ölü nokta) ya yakın bölgedeki meydana gelen aşınmadır. Çünkü bu bölgede aşırı sıcaklıktan dolayı yağlama yağının viskozitesinin düşmesi ve yağın yanarak özelliğini kaybetmesi piston, sekman ve silindirde aşınmayı hızlandırmaktadır. Yağ filminin bazı nedenlerden dolayı yırtılması metal-metal temasını sağlamakta, bu da malzemelerin hızla aşınmasına ve aşınma partikülleri oluşturmasına sebep olmaktadır. Hidrodinamik yağlamada kalın sıkıştırılmış yağ filminin oluşması, yağ filminin uzun ömürlü olmasını sağlamaktadır. Piston-sekman-silindir çalışma mekanizması düşünüldüğünde zamanla aşınma, korozyon, çizilme, yağ filminin kısmi veya genel olarak yırtılmasına neden olmaktadır. Piston-sekman-silindir mekanizmasında yağ filminin yırtılması, özellikle pürüzlü yerlerde deformasyona sebep olur ve sonuçta bu bölgelerde kırılma ve deformasyonlar meydana gelir. Piston-sekman-silindir aşınma mekanizmasında meydana gelen kırılmaların bu bölgelerde aşınma ürünlerini oluşturduğu, böylece abrasif aşınma tipi aşınmayı başlattığı söylenebilir. Oluşan bu aşınma partiküllerinin tamamını yağ kartere taşıyamaz. Bu partiküller piston ve silindir yüzeyine yapışır ya da çizilmeye sebep olarak piston ve silindir yüzeyinde mikro kesikler ve iz oluşturur.

Yağlama yağının temizliği piston-sekman ve silindir yüzeyi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [4].

Gerek yağın içindeki aşınma partikülleri gerekse yağın özelliğinin bozulması piston, sekman ve silindir yüzeylerinin bozulmasını hızlandıracaktır.

Aşınma sırasında kopan sert partiküller, toplam aşınma özellikleri üzerinde negatif bir etkiye sahiptir. Bu partiküller aşınma mekanizması sırasında yüzey üzerinde yarıp geçme şeklinde bir rol oynayarak abrasif aşınmayı meydana getirir [23].

Şekil 5 (a)'da görüldüğü gibi bu aşınma partiküllerinin piston yüzeyinde oyuklar açması ve mikro kesme davranışları göstermesi, sınır yağlama şartlarında aşınma mekanizmasının abrasif tipte olduğunu ispatlamaktadır. MoN kaplı pistonun aynı bölgesinden alınan SEM fotoğrafı incelendiğinde herhangi bir dönemli kopma, kırılma ve plastik deformasyon olmadığı Şekil 5 (b)'de görülmektedir. Bu da MoN modifikasyonu yapılmış piston yüzeyinin kaplanmamış piston yüzeyine göre daha az deformasyona uğradığını ispatlamaktadır. Sıkıştırma zamanı sonunda yanma odasında, yanma başladığı zaman alev cephesi her zaman üniform bir şekilde yayılmaz. Yanma odasında alev cephesinin düzensiz yayılması, kısmi alev çarpışmaları ve vuruş gibi olumsuz etkiler meydana getirmektedir. Böylece yanma odası parçaları termal gerilmelere ve termal şoklara maruz kalmaktadır. Bu yanma olumsuzlukları, yanma odasını oluşturan parçaların düzensiz gerilmesine ve normalden daha fazla yük altında çalışmasına sebep olmaktadır. Yanma odası elemanlarından biri de pistondur. Piston yüzeyinin seramik bir malzeme ile kaplanması, bu olumsuz etkileri kaplamanın karşılmasına neden olacaktır. Böylece ana malzeme (substrate) zarar görmemekte ve pistonun ömrünün artması sağlanmaktadır.

Ü.Ö.N' da yağ film kalınlığı incilir ve piston hızı bu bölgede düşüktür. Maksimum yağ film kalınlığının orta strok bölgesinde olduğu bildirilmiştir. Bu bölgede piston hızı maksimumdur ve hidrodinamik yağlama şartları sağlanmıştır. Böylece piston sekmanları hem hidrodinamik hem de sınır yağlama şartlarında hareket eder [24].

Şekil 5 (b) ve 6 (d)'de görüldüğü gibi modifikasyon yapılmış pistonun düzgün bir yüzey topografyasına sahip olmasının hidrodinamik yağlamanın ömrünü uzattığı düşünülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda [3] silindirin Ü.Ö.N'ya yakın bölgelerdeki yüzey pürüzlülük değerinin orta ve alt bölgelere göre daha yüksek olması bu görüşü desteklemektedir. Şekil 7 (e) ve (f)'de çalışma sonrası pistonun yanma odası yüzeyine bakan yanma oluşu üzerinden alınan SEM fotoğrafı

görülmektedir. Şekilden kaplanmamış pistonu göre MoN kaplanmış piston yüzeyinin daha düzgün bir yapıya sahip olduğu görülmektedir.

SONUÇ

Bu çalışmada hava soğutmalı, tek silindirli, dört zamanlı, direkt püskürtmeli bir dizel motorunun yanma odası elemanlarından piston yüzeyi seramik bir malzeme olan MoN ile kaplanmıştır. Gerçek motor çalışma şartlarında kaplanmış ve kaplanmamış pistonların tribolojik davranışları karşılaştırmalı olarak araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda:

- Ark PVD yöntemiyle piston yüzeyi kaplandığında, kaplama sonrası yüzeylerde herhangi bir ek işlem yapılmadan kullanılabileceği,
- Seramik kaplanmış piston yüzey pürüzlülüğünün işlem görmemiş pistonu göre deney öncesinde daha düşük olduğu, ancak çalışma sonrası kaplanmamış pistonun yüzey pürüzlülüğünün azaldığı,
- MoN kaplanmış piston yüzey sertliğinin kaplanmamış pistonu göre yüksek olmasının aşınma direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu,
- MoN kaplanmış piston yüzeyinin kaplanmamış pistonu göre yüksek sertliğinin taşıyabileceği yük kapasitesini arttırdığı, böylelikle bu motorların yanma odası elemanlarının tamamının kaplanması neticesinde daha yüksek sıkıştırma oranlarında çalıştırılabileceği sonucuna varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazar değerli desteklerinden dolayı İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Öğretim Üyesi sayın Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN'e teşekkür etmektedir.

KAYNAKÇA

1. **Tung, S.C ve Huang, Y.** "Modeling of Abrasive Wear in a Piston Ring and Engine Cylinder Bore System", Tribology Transactions, No.47, 17-22, 2004.
2. **Hazar, H.** "Bir Dizel Motoru Silindir Yüzeyinin Seramik Malzeme İle Kaplanarak Aşınma Davranışının Deneysel İncelenmesi" Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
3. **Öner, C., Hazar, H., ve Nursoy, M.** "Surface Properties of CrN Coated Engine Cylinders", Materials & Design, doi:10.1016/j.matdes.2008.05.018. 2008.
4. **Truhan, J.J., Qu, J., ve Blau, P.J.** "A Rig Test to Measure Friction and Wear of Heavy Duty Diesel Engine Piston Rings and Cylinder Liners Using Realistic Lubricants", Tribology, No. 38, 211-218, 2005.

5. **Miyairi, Y., Matsuhisa, T., ve Oawq, T.** "Selective Heat Insulation of Combustion Chamber Wall For a DI Diesel Engine with Manolithic Ceramics. SAE Technical Paper, No. 890141, 1989.
6. **Juanshang, J., ve Barbezat, G.** "The Tribological Behavior of Various PlasmaSprayed Coatings Against Cast Iron", Surface and Coatings Technology, No. 52, 169-178, 1992
7. **Tovell, J.** "Ceramics and the Reciprocating Internal Combustion Engine", Materials and Design, No. 5, 215-220, 1984.
8. **Levy, A., ve Macadam, S.** "The Behavior of Ceramic Thermal Barrier Coatings on Diesel Engine Combustion Zone Components", Surface and Coatings Technology, No. 30, 51-61, 1987.
9. **Haşimoğlu, C., Ciniviz, M., Özsert, İ., İçingür, Y., Parlak, A., ve Salman, MS.** "Performance Characteristics of a Low Heat Rejection Diesel Engine Operating with Biodiesel", Renewable Energy, doi.org/10.1016/j.renene.2007.08.002. 2007.
10. **Hejwowski, T., ve Weronki, A.** "The Effect of Thermal Barrier Coatings on Diesel Engine Performance", Vacuum, No. 65, 427-432, 2002.
11. **Sudhakar, V.** "Performance Analysis of Adiabatic Engine", SAE Technical Paper, No. 840850, 1984.
12. **Sieagla, D.C., ve Amman, C.A.** "Exploratory Study of the Low Heat Rejection Diesel for Passenger Car Applications", SAE Technical Paper, No. 840435, 1984.
13. **Nilsson, L., ve Ohlsson, R.** "Accuracy of Replica Materials When Measuring Engineering Surface", Machine Tools and Manufacture, No. 41, 2139-2145, 2001.
14. **Leising, C., ve Purchit, G.** "Waste Heat Recovery in Truck Engine", SAE Technical Paper, No. 781978, 1978.
15. **Havstad, P.H., Gervin, I.J., ve Wade, WR.** "A Ceramic Insert Uncooled Diesel Engine", SAE Technical Paper, No. 860447, 1986.
16. **Stone, R.,** Motor Vehicle Fuel Economy. London: Macmillan, 1985.
17. **Prasad, R., ve Samria, N.K.** "Heat Transfer and Stres Fields in the inlet and Exhaust Valves of a Semi-Adiabatic Diesel Engine", Computers & Structures, No. 34, 765-777, 1990.
18. **Ürgen, M., Eryılmaz, O.L., Çakır, AF., Kayalı, ES., Nilüfer, B., ve Işık, Y.** "Characterization of Molybdenum Nitride Coatings Produced by Arc-PVD Technique", Surface and Coatings Technology, No. 94-95, 501-506, 1997.
19. **Solak, N., Üstel, F., Ürgen, M., Aydın, S., ve Çakır, A.F.** "Oxidation Behavior of Molybdenum Nitride Coatings", Surface and Coatings Technology, No. 174-175, 713-719, 2003.
20. **Bozyazı, E.E.** "Comparison of Lubricated Wear Behaviours of Electrolytic Hard Chromium and CrN Coating Produced by Cathodic Arc Physical Vapour Deposition", Master thesis, Istanbul Technical University, 2002.
21. **Gadow, R., ve Scherer, R.** "Composite Coatings with Dry Lubrication Ability on Light Metal Substrate", Surface and Coatings Technology, No. 151, 471-477, 2002.
22. **Lee, S.C., Ho, W.Y., ve Lai, F.D.** "Effect of Substrate Surface Roughness on the Characteristics of CrN Hard Film", Materials Chemistry and Physics, No. 43, 266-273, 1996.
23. **Joseph, H.T., ve Oregon, A.** "Friction, Lubrication and Wear Technology", ASM, No. 18, 1992.
24. **Srivastava, D.K., Agarwal, A.K., ve Kumar, J.** "Effect of Liner Surface Properties on Wear and Friction in a Non-Firing Engine Simulator", Materials & Design, No.28, 1632-1640, 2007.