



Review Paper / Derleme Makalesi
MEASUREMENT METHODS OF WEAR BETWEEN PISTON RING AND
CYLINDER LINER

Şengül ARI*, Zeynep PARLAR

İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Gümüşsuyu-İSTANBUL

Received/Geliş: 20.06.2012 Revised/Düzeltilme: 27.12.2012 Accepted/Kabul: 10.01.2013

ABSTRACT

Considering today's competitive environment and the required emission regulations, it becomes increasingly important to reduce fuel consumption and harmful exhaust emissions in order to increase engine output power. This can be obtained by developing a well designed injection system or combustion chamber as well as by decreasing the mechanical losses, which are among the most important parameters affecting engine efficiency. The amount of wear rate and its location in the engine should be known to reduce mechanical losses. Therefore, piston ring-cylinder liner wear, which constitutes the greatest portion of mechanical losses, must be investigated. Researchers have attempted to measure the amount of wear by using various methods. In addition, there are also studies carried out to improve new coating materials or lubricants for reducing wear rate. In this study, these measurement methods are discussed and compared with each other in terms of their advantages and disadvantages

Keywords: Piston ring-cylinder wear, wear measurement methods.

PİSTON SEGMANI İLE SİLİNDİR GÖMLEĞİ ARASINDAKİ AŞINMANIN ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

ÖZET

Günümüz rekabet şartları ve gerekli emisyon düzenlemeleri göz önüne alındığında, içten yanmalı motorlarda yakıt tüketimini ve zararlı egzoz gazı emisyonlarını azaltmak, dolayısıyla motorun çıkış gücünde artış sağlamak büyük önem taşımaktadır. Bu artış, daha iyi tasarlanmış yanma odaları veya yakıt püskürtme sistemleriyle elde edilebileceği gibi, verim kaybını etkileyen en önemli parametre olan mekanik kayıpların azaltılması ile de gerçekleştirilebilir. Mekanik kayıpları azaltmak için ilk olarak aşınma miktarının ve motorun hangi bölgelerinde aşınmanın hangi oranda gerçekleştiğinin bilinmesi gerekmektedir. Bu amaçla, motorun mekanik kayıplarının en büyük bölümünü oluşturan, piston ikincil hareketinden oluşan, piston segmanı-silindir gömleği aşınmasının incelenmesi, önemli bir araştırma konusu olmuştur. Araştırmacılar birbirinden farklı birçok yöntem kullanarak bu aşınma miktarını ölçmeye çalışmışlardır. Ayrıca aşınma miktarının azaltılmasında hangi metal çiftlerinin ve yağlayıcıların kullanımının daha iyi olduğuna yönelik çalışmalar da yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında da, silindir gömleği-piston segmanı aşınmasına yönelik olarak kullanılan ölçüm yöntemleri araştırılmış, birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları tartışılmıştır.

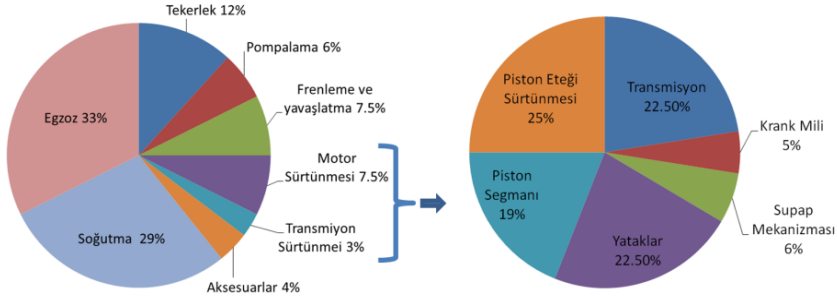
Anahtar Sözcükler: Piston segmanı - silindir aşınması, aşınma ölçüm yöntemleri.

*Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: aris@itu.edu.tr, tel: (212) 293 13 00/2447

1. GİRİŞ

Triboloji biliminin bir konusu olan aşınma, eş çalışan iki yüzey arasında izafi kayma sonucunda zamanla meydana gelen malzeme ve kütle kaybıdır. Bu kayıplar, zamanla sistemin daha kötü çalışmasına ve veriminin azalmasına neden olur. Bu nedenle, istenmeyen bir durum olan aşınmayı azaltmak üzere uygun malzeme çifti seçimi veya ara yüzeyde yağlayıcı kullanımı gibi çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Aşınmanın azaltılması kadar aşınma miktarının ve aşınan bölgelerin belirlenmesi de önemli çalışma konusudur. Veriminin artırılması için gün geçtikçe çeşitli yöntemler geliştirilen içten yanmalı motorlarda ise aşınma miktarının azaltılması oldukça büyük bir önem arz etmektedir.

İçten yanmalı motorlarda başta adhezif ve abrazif olmak üzere korozyon ve yorulma aşınması da görülmektedir. Motorda meydana gelen aşınmanın ana kaynaklarını piston segmanı-silindir gömleği, yataklar, krank mili, dişli çarklar vb. birçok sürtünme çifti oluşturmaktadır. Bir içten yanmalı motordan elde edilen enerjinin %33'ü egzoz gazı olarak atmosfere verilmekte, %29'u soğutma suyu için harcanmakta ve yine yaklaşık %30'u tekerlek, pompalama, frenleme ve aksesuarlar için harcanmaktadır. Yaklaşık %10'luk kısmı ise sistemde oluşan mekanik kayıplardır. Şekil 1.1'de de görüldüğü gibi motorda meydana gelen mekanik kayıpların %77'lik kısmına motorun sürtünme kayıpları sebep olmakta, bununı ise yaklaşık %44'lük kısmı ise piston grubundan kaynaklanmaktadır [1]. Bir taşıttan elde edilen enerji dağılımı incelendiğinde, mekanik kayıplardan %10'luk bir kazancın, yakıt tüketiminde yaklaşık %1,5-2 oranında artış sağladığı görülmektedir[2].



Şekil 1.1 Bir taşıttan enerji kayıplarının değerleri [1]

Bu durum şu şekilde açıklanabilir: pistonun silindir içinde üst ölü nokta (Ü.Ö.N.) ile alt ölü nokta (A.Ö.N.) arasında, sürekli hareketi sonunda silindirler aşınır. Aşınmış silindirlerde segmanların çevre basıncı yetersiz kaldığı için segmanlar sızdırmazlık görevlerini yapamaz. Sıkıştırma zamanında kartere gaz kaçağı olur, kartere sızan karışımın içinde bulunan yakıt, silindir yüzeylerindeki yağı sıyrır ve bu yüzden silindirler daha fazla aşınır. İş zamanında ise kartere kaçan yanmış gaz, hem motorun güç kaybına sebep olur, hem de bu yanmış gazlar yağlama yağının özelliğini bozar. Aşınmış silindirler, kartere yanmış gaz kaçırdığı gibi yağlama yağlarını da yanma odasına kaçırarak motorun yağ yakmasına ve yanma odasında aşırı karbon birikintilerine neden olur [3]. Bu da piston segmanı ile silindir gömleği arasındaki aşınmanın ölçümünün önemini bir kez daha göstermektedir. Ayrıca, araştırmacılar yalnızca aşınma miktarını ölçmekle kalmayıp, aynı zamanda farklı metal çiftleri ve yağlayıcılar kullanarak bunların aşınma ve sürtünme karakteristiklerine etkilerini de incelemiştir. Yapılan literatür incelemesinde motor piston grubunun sürtünme davranışını ele alan çeşitli derleme çalışmalarına da rastlanmaktadır [4-6]. Bunlar, pistonun ikincil hareketini, segman ve gömleğin eş çalışma yüzeylerinde meydana gelen sürtünmeyi ve sürtünme kayıplarını karşılaştırmaya yönelik çalışmalardır.

2. AŞINMA ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

2.1. Ağırlık Farkı ile Ölçüm

Aşınma ölçümü denilince akla gelen ilk yöntem, ağırlık farkının ölçülmesidir. Segmanda oluşan aşınma miktarının ölçümü için bu yöntem rahatlıkla uygulanabilir. Segman aşınmasını ölçmek için 10^{-4} gr hassasiyetli teraziler kullanılmaktadır. Silindir yüzeyinin daha büyük olması, aşınma hızının ağırlık kaybı ölçülerek belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Ayrıca, aşınma silindir eksenli boyunca her noktada farklı şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle segman aşınması basitçe ağırlık kaybı ölçülerek belirlenebilirken, silindir iç yüzeyindeki aşınmanın farklı noktalarda hassas boyutsal ölçümlerle yapılması gerekmektedir [7].

Ağırlık kaybı ölçümü yapılırken; deneylere başlamadan önce segman ve gömlek numunesi etanol ile temizlenir. Temizleme işleminden sonra numunelerde etanolün kalmaması için kurutma işlemi sağlandıktan sonra deney öncesi hassas terazide (10^{-4} g hassasiyetinde) ölçüm yapılır. Numuneler belirlenen deney şartları altında aşındırılır. Deney sonrası tekrar segman ve gömlek numunesi etanol ile temizlenir. Temizleme işleminden sonra etanolün segman numunesinden buharlaşmasını sağladıktan sonra ölçüm tekrar edilir. Ölçülen değerlerin farkları alınmak suretiyle segman ve gömlekteki aşınma miktarları belirlenir.

2.2. Profilometre ile Yüzey Profilinin Çıkarılması

Profilometre yüzey pürüzlülüğünü ölçmek için kullanılan cihazlardır. Temaslı veya temassız olarak ölçüm yapabilmektedirler. Temaslı ölçüm yapanları mekanik, temassız olanları ise optik profilometre olarak adlandırılmaktadır.

a. Mekanik Profilometre (temaslı):

Aslında düşünüldüğünde ilk akla gelmesi gereken yöntemdir. Yüzeyin bir ters kaldıraç ile taranması ve diğer ucunda belli bir oranda değişiklikleri çizen kalem ya da başka bir iz bırakıcı ile yüzeyin, iki boyutlu profilinin elde edilmesidir. Çizgisel profilometrede elmas bir uç mevcuttur. Ufak bir alanda ileri geri hareket ederek ölçüm yapılmaktadır. İyi bir sonuç elde etmek için en az 5 farklı alanda bu işlemi gerçekleştirmek gerekir. Yüzey profilometresinde tıpkı çizgisel profilometrede olduğu gibi elmadan yapılmış sert bir tarayıcı uç bulunmaktadır. Yüzey profilometresi daha geniş alanları tarayabilmektedir. Çizgisel ve yüzeysel profilometre arasındaki en temel fark yüzeysel profilometre ile yüzeyin topografik haritasının üç boyutlu olarak elde edilebilmesidir. Böylece pürüz derinlikleri ölçülebilir ve aşınmanın hangi safhada olduğu hakkında çok detaylı olmasa da veri elde edilmiş olur. Dezavantajı ise çok zaman almasıdır [7].

b. Optik Profilometre (temassız):

Bu profilometreler ise yüzeye ışınların gönderilmesi veya yüzeyde gezdirilen başka bir elemanın üzerine tutularak yansıyan ışınlardaki değişim ile yüzey profili elde edilir. Aşınma öncesinde ve sonrasında yüzey profili çıkarılarak aşınma hakkında fikir elde edilir.

Ağırlık farkı yardımıyla aşınma miktarının elde edilemediği silindir bloklarında mekanik ya da optik profilometrenin konumlandırılma problemi olduğu için genellikle yüzeyin bir kopyası çeşitli yöntemlerle elde edilir ve sonrasında ölçüm yapılır. Bu iğne (stylus) tipi denilen profilometreler 2-boyutlu izleri elde etmek için kullanılır. Aşınmanın 3-boyutlu olarak ölçülebilmesi için stylus profilometrelerin 2-boyutlu izleri eşit aralıklarla yatay olarak tekrarlanır. Bu şekilde oldukça iyi sonuçlar elde edilebilmesine rağmen çok zaman alıcı bir çözümdür. 400 ölçü yaklaşık 4 ila 8 saat arasında alınabilmektedir. Ayrıca, stylus tip profilometrelerin ucunun sık sık değiştirilmesi gerekmektedir. Temassız olan optik ölçümlerin ise çok daha uygun olduğu

görünmekle birlikte, elde edilen verilerin ışığın yansımından ve ışık kaynağının yüzeye tutunumu gibi sebepler Z yönündeki çözünürlüğü etkilemektedir.

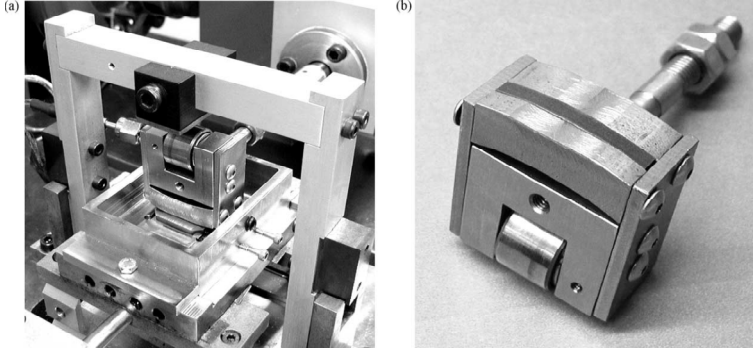
Woydt ve Ebrecht, yaptıkları çalışmada bu iki yöntemle, silindir bloğundan elde ettikleri paralel olmayan bir geometriyi kullanarak aşınan hacmi elde etmişlerdir. Lazer (temassız) profilometre kullanarak 2 mm/s lik bir hızla ve 10 µm luk bir beslemeyle, silindir gömleği numunesinin aşınma hacmi 16 dakikalık bir taramayla yaklaşık 0.0113 mm³, 15 mm/s lik bir tarama hızıyla 5 dakikalık bir taramayla aşınan hacim yaklaşık 0.0118 mm³ olarak ölçülmüştür. Aynı numune üzerinde aynı aşınma izleri stylus profilometre ile ölçülmüş ve 240 dakikalık bir taramayla 0.0122 mm³ bir aşınma hacmi ölçülmüştür [8,9].

Buradan, optik profilometrede tarama hızı arttıkça ölçülen hacmin hassasiyetinin arttığı; stylus tip profilometre ile optik profilometreye göre daha hassas bir ölçüm alındığı; fakat buna rağmen zamandan büyük kayıplar yaşandığı görülmüştür. Farklı metal çiftlerinin ve yağlayıcıların incelendiği durumlarda optik profilometre kullanımı daha uygunken, daha çok zaman almasına karşın silindir bloğunun gerçek aşınma miktarının ölçülmesinin istendiği durumlarda ise stylus denilen mekanik bir profilometrenin kullanımının daha uygun olacağı sonucu çıkarılabilir.

2.3. Laboratuvar Aşınma Deneyleri

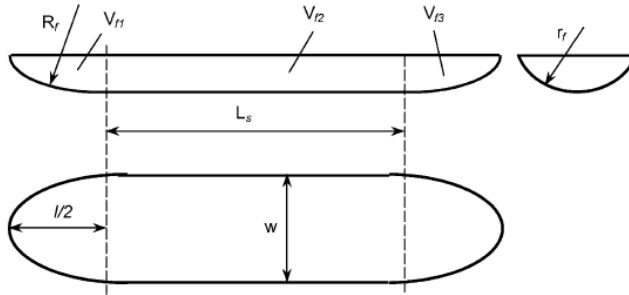
Aşınma deneyleri için en doğru yöntem parçanın kullanılacağı işletme şartlarında test edilmesidir. Ancak bu tarz deneyler hem çok pahalı hem de birçok belirsizlik içeren değişkenler için içinde olduğundan pek tercih edilmemektedir. Bu nedenle gerçek şartları mümkün olduğu kadar taklit edebilen, bu arada birçok parametreyi belirli sınırlar içinde kontrol edebilen, nispeten daha basit test düzenekleri gerçekleştirilmiştir. Bunların bazıları birbirleri ile mukayese edilebilecek aşınma değerlerini gerçekleştirebilen deney tesisatlarıdır. Bazıları ise bazı özel aşınma problemlerine cevap vermek üzere tasarlanmış, daha zor şartlar altında çalışan sistemlerdir.

Araştırmacılar, laboratuvar şartlarında geliştirilen malzeme çiftlerinin sürtünme ve aşınma karakteristiklerini, kullanılan yağ tipinin aşınma hızı üzerindeki etkilerini incelemek üzere çalışmalar yapmaktadırlar [10-13]. Şekil 2.1'de bu amaçla geliştirilmiş olan deney düzeneği görülmektedir [10]. Buna göre, piston segmanı malzemesinden hazırlanmış olan ring, tutucu kola bağlanmaktadır. Daha sonra, aynı eğrilik yarıçapında işlenmiş, silindir gömleği ile aynı malzeme ve yüzey kalitesindeki numuneye belli bir normal kuvvetle bastırılıp numune ileri geri belli bir frekansta hareket ettirilmektedir. Bu sırada, iki yüzey arasında film sürtünmesi oluşacak şekilde yağlayıcı da uygulanmaktadır. Deneyden önce hem segman hem de numune ultrasonik olarak temizlendikten sonra hassas terazi ile tartılır. Profilometre kullanılarak segmanın aşınma öncesindeki geometrisi elde edilir. Deney tamamlandıktan sonra segman ve numune çıkarılarak ultrasonik olarak temizlenir ve tekrar tartılır. Segmanda oluşan aşınma izinin çapı optik olarak ölçülür. Aynı zamanda, segmanın yüzey profili hem hareket doğrultusunda hem de harekete dik doğrultuda profilometre kullanılarak belirlenir. Böylece yüzeyi karakterize eden büyüklükler elde edilmiş olmaktadır. Benzer şekilde numune üzerindeki aşınma izine ait geometrik büyüklükler de optik olarak belirlenir. Aşağıda açıklanan geometrik model kullanılarak hacimsel aşınma miktarı hesaplanır.



Şekil 2.1 Aşınma test düzeneği ve segman tutucu kol [10]

Test düzeneğinde yapılan aşındırma deneyi sonucu elde edilecek aşınma izinin geometrisi Şekil 2.2’de görüldüğü gibidir. Burada, boyutlar μm olmak üzere L_s test düzeneğinin strok uzunluğunu, toplam aşınma uzunluğu ise pistonun meydana getirdiği l uzunluğu ve L_s ’nin toplamı, w numunenin aşınma genişliğini, R_f ve r_f de aşınma izinin sırasıyla kenarlarının ve genelini yarıçapını, V_f ise aşınma hacimlerini ifade etmektedir.



Şekil 2.2 Dökme demir yüzeyin aşınma izinin şematik görünümü [10]

Buna göre numunenin aşınma izlerinin geometrisi

$$V_{f2} = L_s \left[r_f^2 \arcsin\left(\frac{w}{2r_f}\right) - \frac{w}{2} \sqrt{r_f^2 - \frac{w^2}{4}} \right] \quad (2.1)$$

$$V_{f1} = V_{f3} = \frac{1}{2} f_r(w, l, r_f, R_f) \quad (2.2)$$

$$V_{fat} = 2V_{f1} + V_{f2} \quad (2.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Daha önce de bahsedildiği gibi bu şekilde kurulan test düzenekleri yardımıyla çeşitli metal çiftlerinin sürtünme ve aşınma karakteristiği ile kullanılan yağlayıcıların aşınma miktarlarına etkileri incelenerek birbirleriyle mukayese edilebilmektedir.

2.4. Radyonüklit Tekniği ile Aşınma Ölçümü

Radyonüklit tekniği, bir sistemin sürekli ve gerçek zamanlı olarak tribolojik durumunu incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Oldukça yüksek bir kararlılığa ve kesinliğe sahip bu metot, özellikle düşük aşınma oranlarını ölçmek için uygundur. Radyoaktif nüklitler yardımı ile aşınmanın belirlenmesi, aşınma esnasında aşınan tanecikler tarafından emilen gama ışınının ölçülmesi

esasına dayanır. Bu yöntemde, numune atomik parçacıklar tarafından bombardıman edilir. Bunun neticesinde kararlı olan numune, radyoaktif (kararsız) çekirdeğe dönüşür. Numunenin aşınma miktarı, yayılan radyasyonun ölçülmesiyle elde edilmektedir [14-17].

Genel olarak, iki farklı sürekli aşınma ölçüm metodu kullanılmaktadır. Bunlar; konsantrasyon ve farklar metodudur. İki tekniğinde avantajı, motorun durdurulmadan ve motoru söküp takmaya gerek bırakmadan motorun aşınma miktarının ölçülebilmesidir. Aşınmanın zamana bağlılığına aktive edilen malzemeden yayılan ışınlarla karar verilir. Ayrıca, bu iki teknikte de diğer geleneksel ölçüm yöntemlerine göre oldukça yüksek bir duyarlılık, daha az zaman tüketimi ve daha az maliyet söz konusudur. Bununla birlikte, daha sağlıklı ve güvenilir deney sonuçları elde edebilmek için motorun yağlayıcı ve gaz emisyonları gibi diğer verilerinin de incelenmesi gerekmektedir [18]. Bir diğer dezavantajı da kalibre edilecek yüzeyin saptanması ve yağın aktive edilmiş parçacıkların tamamını öteleyip öteleyemeyeceğidir [7].

2.4.1. Konsantrasyon Yöntemi

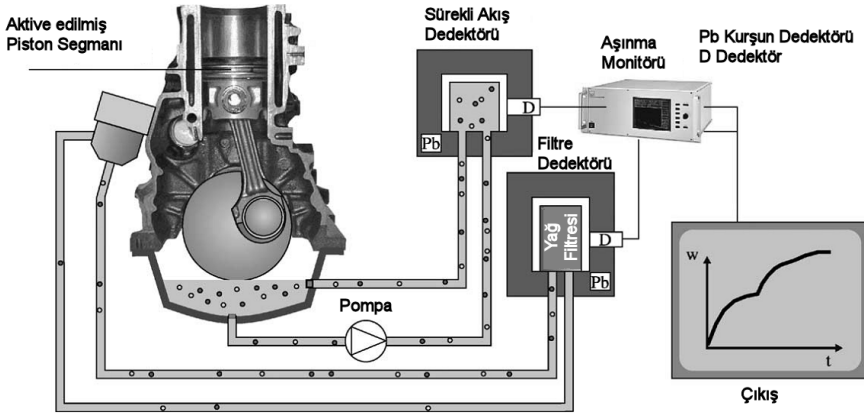
Bu yöntem, belirli bir hacimdeki aşınan parçacıklardan yayılan ışınımın ölçümüne dayanır. Bu yöntemde bahsedilen hacim, içten yanmalı motordaki yağ gibi bir yağlayıcı ya da yakıt olabilir. Hem bahsedilen ortam yani hacim hem de aşınma parçacıkları, aşınma parçacıklarda yayılan ışınımın ölçüleceği oldukça yüksek duyarlılıklı bir detektöre taşınmaktadır. Alınan ölçüm değerleri yardımıyla sistemin gerçek aşınma miktarı, sistemin kalibrasyon verileri kullanılarak mikrogram cinsinden kütleli olarak veya nanometre cinsinden lineer aşınma miktarı hacimsel olarak ölçülebilir.

a. Konsantrasyon akış metodu

Bu konsantrasyon metodunda, belirli zaman çalıştırılan içten yanmalı motorda aktive edilmiş yüzeyden ayrılan aşınma parçacıklarının motor yağı yardımıyla hareketi sağlanır. Hem yağın hem de aşınan parçacıkların belirli bir kısmı sürekli akışla (flow-through) ölçüm yerine doğru pompalanır. Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi bu kısım genel olarak, kurşun kaplama bir ölçüm muhafazasından ve NaI sintilasyon dedektöründen oluşmaktadır. Aktive edilen yüzey bölgesinden ayrılan aşınma parçacıklarından yayılan γ ışınları NaI sintilasyon dedektörü yardımıyla ölçülmekte ve bu sinyaller ölçüm sisteminde işlenmektedir [14-16].

b. Filtre konsantrasyon metodu

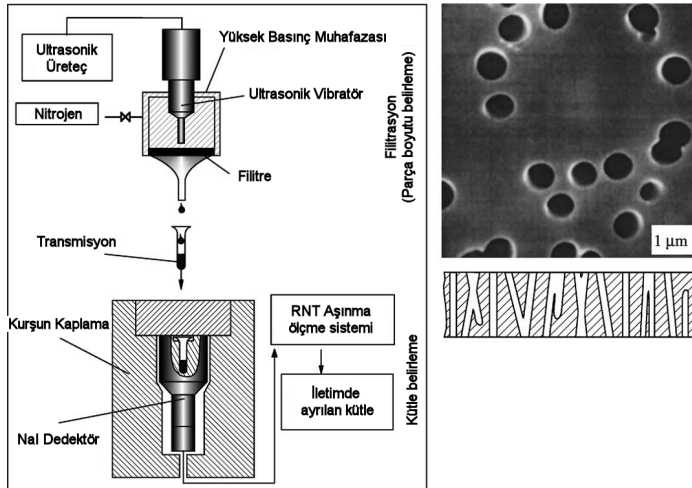
Eğer taşınan bu hacme içten yanmalı bir motordaki yağ filtresi gibi bir filtre yerleştirilirse, ölçme sitemine de bir filtre algılayıcı eklenmelidir. Bunun için şekil 2.3 de görüldüğü gibi sürekli akış algılayıcısının yanında ikinci bir ölçüm ünitesi olarak filtre algılayıcı da sisteme eklenmiştir. Filtre de kalan aktive edilmiş aşınma parçacıklarının yaydığı γ miktarı filtre ölçüm kısmındaki bir NaI sintilasyon dedektörü yardımıyla ölçülebilir. Böyle bir aşınma ölçüm sistemiyle, filtrede kalan aşınma parçacıkları ve diğer aşınan parçacık miktarı ayrı ayrı belirlenebilir. Toplam aşınma miktarı ise bu ikisinin toplamıdır ve bu yöntem aşınma ölçüm çalışmalarında en çok kullanılan yöntemdir [16].



Şekil 2.3 RNT ile yapılan aşınma ölçüm test düzeneği [16]

c. Aşınma parçacık boyut analizi

Filtre ve radyonüklit tekniğinin kullanımıyla aşınan parçacıkların boyut analizi kolayca gerçekleştirilebilir. Bu dağılım Şekil 2.4.'teki gibi bir düzenek yardımıyla kolayca yapılabilir. Bir ya da birkaç kısmı aktive edilmiş bir içten yanmalı motordan bir yağ örneği alınır ve bu numune bir seyreltme işleminden sonra bir dizi filtreden geçirilir. Aşınan parçacıklı seyreltilmiş yağ, sesüstü bir üreteç, sıkıştırılmış nitrojen ve en büyük nominal delik çapına sahip bir filtre kullanılarak filtrelenir. Geriye kalan kısım da bir derece küçük delik çaplı bir filtreden geçirilir ve bu işleme devam edilir. İki filtreleme aşaması arasındaki kütleli fark, yine bir NaI sintilasyon dedektörü yardımıyla ölçülür. Her iki filtre kademesinden sonra elde edilen kütle oranı aktive edilmiş toplam aşınma parçacıklarına göre standartlaştırılarak; aşınma parçacığının boyut dağılımı, filtre delik büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak elde edilir [16].



Şekil 2.4 Aşınma parçacık boyut analizi için kullanılan düzenek şematik görünüşü [16]

2.4.2. Fark Metodu

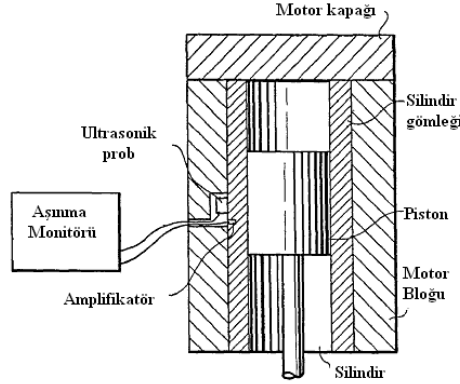
Radyonüklit teknik kullanılan ikinci bir sürekli aşınma ölçüm metoduna fark veya ince tabaka fark metodu denir. Bu teknikte, aşınma radyasyona maruz kalmış kısımların artık etkinliğindeki azalmanın ölçülmesi metoduna dayanır. Bu metot genellikle, konsantrasyon metodunun kullanılmadığı, bir akışkanın geçemeyeceği vb. durumlarda kullanılır. 1970'lerde kullanılmaya başlanmıştır [19].

Motorun aşınma miktarı, aktive edilmiş bölgenin yüzeyinde oluşan malzeme kaybıdır. Bu malzeme kaybından ötürü, ilgili parçanın toplam radyoaktivitesi azalır. Bu aktivitenin azalması tribolojik sistemin ilk halindeki aktivitenin farkıyla elde edilir. Ölçüm muhafazası, ana olarak NaI sintilasyon dedektörü ve doğal radyoaktiviteyi azaltmak için kurşun kaplama koruyucu bir muhafazadan oluşur. NaI sintilasyon dedektörü, aktive edilmiş aşınan parçacığın γ miktarını yakalar ve ölçüm sistemiyle sinyali işler. Bu şekilde, radyoaktivitede meydana gelen azalma doğrudan aşınma miktarını verir [7,16,17,20].

2.5. Ultrasonik Dalga Kullanılarak Aşınma Ölçümü

Bu yöntemde motor bloğu üzerinde bir yere ultrasonik dalga üretici ve alıcısı yerleştirilir. Daha sonra bu dalganın yüzeye ulaşıp dönme süresinden pürüzlerin derinliği dolayısıyla yüzeyin profili elde edilmiş olunur. Bu dalganın gidiş dönüş süresinde herhangi bir değişiklik olduğunda aşınmanın hızı ve şiddeti hakkında bir fikir verir. Şekil 2.5'te görüldüğü gibi alıcı ve sinyal kaynağı motor bloğu üzerine yerleştirilmektedir. Bu nedenle motor tasarımında buna uygun değişiklik yapmak gerekmektedir. Buna karşın dalganın gidiş dönüş süresinin 2×10^{-11} s hassasiyetle ölçülebilmesi, yüzey pürüzlülüğünde 5×10^{-4} mm lik değişimin dahi deney düzeneği tarafından fark edilebilmesini sağlamaktadır. Ölçme tekniğindeki yüksek hassasiyet en önemli avantajını oluşturmaktadır [7,21].

Ultrasonik ölçüm tekniği, aşınma işlemi sırasında, gerçek zamanlı olarak aşınmış yüzeyin şiddet seviyesini tespit etmekte son derece etkilidir [22].



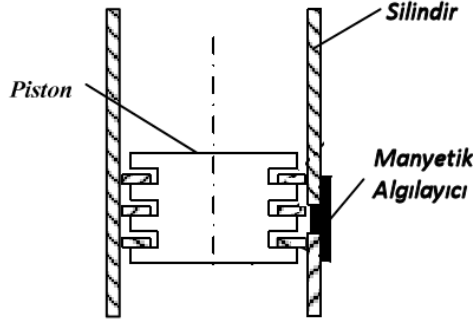
Şekil 2.5 Ultrasonik dalga yönteminin prensibi [21]

2.6. Manyetik Olarak Aşınmanın Ölçülmesi

Piston segmanı ile silindir gömleği arasındaki aşınmanın sürekli olarak izlenebildiği bir diğer yöntem ise manyetik alan değişimine dayanmaktadır [23-26]. Manyetik özellikleri bilinmekte olan krom kaplı segman ve Şekil 2.6'da görüldüğü gibi silindir üzerine yerleştirilmiş olan manyetik algılayıcı yardımı ile segmanların aşınması izlenmektedir. Motorun çalışması sırasında

her strokta segmanlar bu algılayıcıların önünden geçmekte ve oluşan aşınma manyetik alanda değişime neden olmaktadır [23].

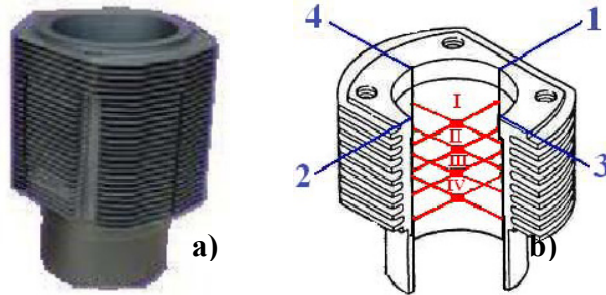
Aşınmaya maruz kalan madde manyetik geçirgenliği az olan bir madde olmalıdır. Kromun manyetik geçirgenliğinin çeliğinkinden az olması nedeniyle, segmanın manyetik direnci aşınmanın artışıyla yükselir. Algılayıcının manyetik direnç değişimiyle orantılı sinyal üretmesi nedeni ile, krom tabakası ne kadar çok aşınırsa algılayıcının ürettiği sinyaller o kadar artar. Segmanın, manyetik geçirgenliği farklı iki maddeden yapılmış olması aşınma miktarının ölçülmesini sağlar. Manyetik alandaki değişim referans değeri ile karşılaştırılarak aşınmanın ne kadar olduğu tespit edilir.



Şekil 2.6 Silindir-piston kesit görünümü [26]

2.7. Koordinatların Belirlenmesi Yöntemi ile Aşınma Ölçümü

Bu aşınma yönteminde CMM (Coordinate Measuring Machine) olarak bilinen koordinat ölçüm cihazı kullanılmaktadır. Bu ölçüm tekniği kullanılırken, CMM aleti bir gözlem mili yardımıyla gerek profilin aşınmasız halinin koordinatlarını, gerekse aşındıktan sonra oluşan çok küçük çapsal değişimlerin koordinatlarını dahi ölçebilir. Bu etaptan sonra, en küçük kareler yöntemi gibi bir sayısal yöntem yardımı ile aşınmanın matematiksel modeli oluşturularak aşınma miktarı ve yeri belirlenebilir. CMM ile aşınma ölçümü, ölçme aletinin koordinat algılayan aparatının, silindir piston mekanizmasının aşınmasını ölçmesi konstrüktif olarak bir hayli güç olduğu için, çok fazla tercih edilmemelidir. Şekil 2.7'de bu ölçüm yönteminin piston silindir aşınması ölçümünde uygulaması görülmektedir [27]. Burada 1-4 ve I-IV sırasıyla ölçümün radyal ve aksel ölçüm koordinatlarını ifade etmektedir.

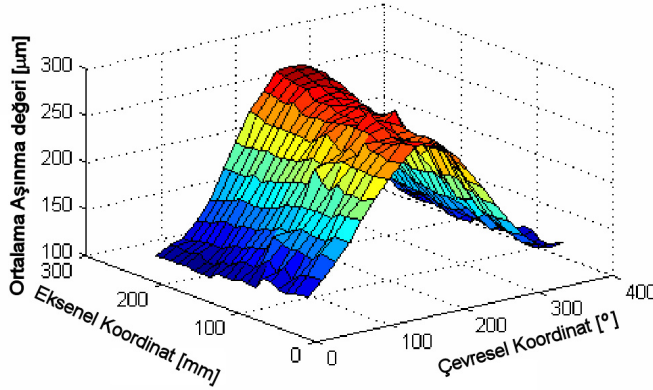


Şekil 2.7 Koordinat ölçüm cihazının silindir gömleği aşınması ölçümünde kullanımı [27]

a) Motor silindirinin yerleşim şekli b) Ölçümlerin koordinatları

2.8. Silindir Aşınmasının Kapasitans Ölçümü

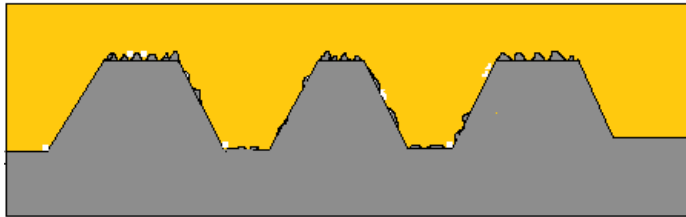
Aşınmış silindirin iki ana özelliği vardır. Birincisi iç yüzeyin eksen boyunca bir sütun şeklinde değil de kısmen konik olması; ikincisi ise yüzeyin çember yerine elips olmasıdır. Ölçülmüş bir silindir yüzeyinin şematik görüntüsü Şekil 2.8’de verilmiştir. Ölçme sistemi, kapasitans ölçme cihazı, veri toplayıcı, algılayıcı ve bilgisayardan oluşmaktadır. Silindirin iç yüzeyinden eksen boyunca 10 mm lik aralıklarla ve çevresel olarak 18° lik açılarla 400 noktadan ölçüm alınmaktadır [28]. Böylece aşınma öncesi ve sonrasında yapılan ölçümlerle silindirik iç yüzey nokta bulutu şeklinde elde edilmektedir. İlk ve son durumdaki hacimsel farktan hem aşınma miktarı hem de silindir gömleğinin hangi bölgelerinde aşınma meydana geldiği görülebilmektedir.



Şekil 2.8 400 saatten sonra silindirin iç yüzeyi[28]

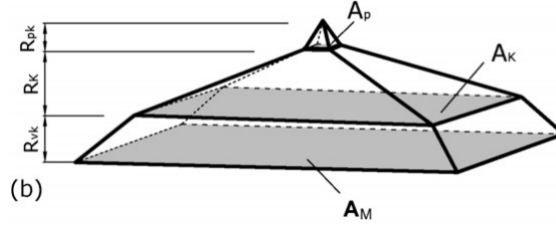
2.9. Replika Yöntemi

Buraya kadar bahsedilen yöntemler dikkate alındığında esas olarak silindir gömleği aşınmasının ölçümü hassas boyut ölçümüne dayanmaktadır. Silindirik bir delik yüzeyinde daha önce değinilen optik profilometre yardımıyla boyut ölçümünde istenen hassasiyeti yakalamak oldukça zordur. Bu nedenle aşınan iç yüzeyin negatifini alarak bunun üzerinden boyutsal ölçümleri yapmak mümkündür. Replika yöntemi olarak anılan bu yöntemde, teknik olarak temizlenmiş silindirik yüzey silikon esaslı replika malzemesi ile kaplanarak birebir kopyası elde edilir (Şekil 2.9). Yüzeydeki aşınma miktarı mikron seviyesinde olduğu için kullanılacak replika malzemesinin yüzeye çok iyi nüfuz edebilmesi gereklidir. Aynı zamanda sıcak olarak yüzeye uygulanan bu malzemenin soğuyup yüzeyin şeklini aldıktan sonra küçülüp elde ettiği profili kaybetmemesi de gereklidir [29]. Farklı çalışma sürelerinde alınan yüzey replikaları ile aşınma yoğunluğu analiz edilebilir ve yüzeyler karşılaştırılabilir [30,31].



Şekil 2.9 Replika metodunun şematik görünümü [29]

Bu yöntemde parçanın istenilen bütün yüzeyi kaplandığından parçanın pürüz profilinin tamamı elde edilmiş olur. Silindir gömleğinin başlangıçtaki profili alındıktan sonra motor çalıştırılır. İstenen zaman dilimlerinde motor demonte edilerek tekrar silindir iç yüzeyinin kopyası çıkarılır. Şekil 2.10'da görüldüğü gibi pürüz iki kesik koni ve bir küçük koninin birleşimi şeklinde modellenmektedir [17]. Bir optik profilometre yardımı ile yüzey pürüzlülüğü için önemli olan beş parametre mikron cinsinden ölçülmektedir. Bunlardan üçü Şekil 2.10'da görüldüğü üzere, R_{pk} pürüz tepesinin en üstündeki küçük koninin yüksekliği, R_k pürüz modelinin ortasındaki kesik koninin yüksekliği, R_{vk} ise pürüzün en altındaki kesik koninin yüksekliğidir. Diğer iki parametre ise M_{r1} üstteki küçük pürüzün miktar olarak tüm pürüze oranı, M_{r2} ortadaki pürüzün tüm pürüze oranıdır.



Şekil 2.10 Pürüz modeli [29]

Bu parametreler kullanılarak hacimsel olarak aşınma miktarı hesaplanabilmektedir. Buna göre, bir pürüz hacmi, bir koni ile iki kesik koninin toplamından oluşur. Kesik koni ile koninin hacim hesabı

$$V = \frac{h}{3}(A_1 + \sqrt{A_1 A_2} + A_2) \quad ; \quad V = \frac{Ah}{3} \quad (2.4)$$

şeklinde yapılabilir. Alanlar arasındaki ilişki ise

$$A_1 = A_M M_{r1} \quad ; \quad A_2 = A_M M_{r2} \quad (2.5)$$

dir. Bu denklemler hacim hesabında yerine konursa şu üç denklem karşımıza çıkacaktır.

$$V_p = \frac{1}{3} A_M M_{r1} R_{pk} \quad (2.6)$$

$$V_K = \frac{1}{3} A_M (M_{r1} + \sqrt{M_{r1} M_{r2}} + M_{r2}) R_k \quad (2.7)$$

$$V_V = \frac{1}{3} A_M (M_{r2} + \sqrt{M_{r2}} + 1) R_{vk} \quad (2.8)$$

Son olarak, bu üç hacmin toplamı bize toplam pürüz hacmini verir.

$$V_{toplaml} = V_p + V_K + V_V = \frac{1}{3} A_M \left[M_{r1} R_{vk} + (M_{r1} + \sqrt{M_{r1} M_{r2}} + M_{r2}) R_k + (M_{r2} + \sqrt{M_{r2}} + 1) R_{vk} \right] \quad (2.9)$$

$$W_{vol} = V_\delta - V_s \quad (2.10)$$

Burada;

V_p : Üstteki küçük pürüzün hacmi

V_K : Ortadaki kesik koninin hacmi

V_V : Alttaki kesik koninin hacmi

A_p : Üstteki küçük koninin taban alanı (A_1)

A_K : Ortadaki kesik koninin taban alanı (A_2)

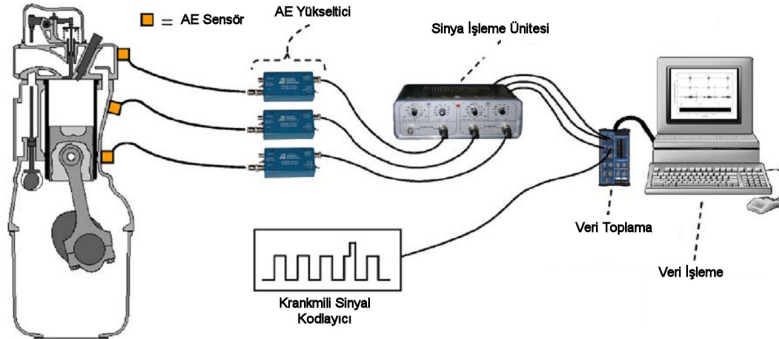
A_m : Alttaki kesik koninin taban alanı

W_{vol} : aşınan hacmi

göstermektedir.

2.10. Akustik Emisyon Yöntemi

Bu yöntem, deformasyon ve mikro kırılma gibi sürtünme ve aşınma mekanizmalarını tanımlayan temel proseslerle bir malzemenin yüzeyinde veya içinde meydana gelen 0.1 ile 1 MHz arasındaki frekanslarda değişen elastik dalgaların yayılmasının izlenmesidir. Bu ilerleyen dalgaların ölçümü, malzemenin yüzeyinde uygun bir transdüser ve veri işleme sistemi yardımıyla mümkündür [7,32]. Akustik emisyon yöntemi aynı zamanda, birçok mekanik sistemde hata analizi ve durum izleme için de kullanılmaktadır [33]. Birçok deneysel çalışmada piston segmanı ve silindir gömleği arasındaki aşınma ya kesintili olarak ölçülebilmekte ya da motora ek modifikasyonlar gerektiren sistemler kullanılmaktadır. Buna karşılık, akustik emisyon görüntüleme yöntemi, motor performansına veya güvenilirliğine zarar vermeden ve küçük bir modifikasyonla ya da hiç modifikasyon yapmaya gerek kalmadan kesintisiz bir aşınma ölçme yöntemi olarak kullanılabilir. Bu yöntemle, akustik emisyon değişimi ile aşınmaya etki eden, yük, hız ve yağlayıcı gibi çeşitli parametreler kıyaslanabilir.



Şekil 2.11 Akustik emisyonla aşınma ölçümü için gerekli test düzeneği [32]

Bu gibi çalışmalarda, fiziksel akustik sensörler motor yüzeyine ince tabaka vakum gres yöntemiyle bağlanır. Sinyal yükseltici ve bant-pass filtreler ile elde edilen sinyal işlenir. Ayrıca, üst ölü noktadaki bir mil sinyal kodlayıcısı yardımıyla da krank mili açısı ve piston pozisyonunun akustik empedans ilişkisi elde edilir. Akustik emisyon sinyalinin analizi motor çevriminin farklı kısımlarındaki akustik emisyon enerjilerinin karşılaştırılması prensibine dayanır. Bunun ilk adımı akustik emisyon sinyalinin zaman ekseninden açısal eksene çevrilmesidir. Akustik emisyon enerjisi, açı domeninde sinyalin integralinin alınmasıyla elde edilir.

$$E = \int_a^b A(\theta) d\theta \quad (2.11)$$

Burada, $A(\theta)$ akustik emisyon sinyalinin volt cinsinden büyüklüğüdür. Ayrıca, akustik emisyon ölçümleri, sürtünen yüzeylerle ilgili daha fazla bilgi sağlamaktadır [34].

2.11. Yağ Spektrumu Yardımıyla Aşınma Miktarının Ölçülmesi

Spektroskopi, içten yanmalı motorlardaki aşınmayı analiz etmek için kullanılan yöntemlerden biridir; fakat, sadece motordaki birçok sürtünme çifti sebebiyle oluşan toplam aşınma sonucu yağlayıcıya karışmış abrazyif kalıntının yoğunluğunu ölçebilir. Bir başka deyişle, bu aşınan madde miktarının silindir gömleğinden mi, dişli çarktan mı yoksa krank milinden mi oluştuğu belirsizdir. Yağ spektrumunun ölçümü, bir yağlayıcıdaki elementlerin konsantrasyonlarını ölçmek için kullanılır. Uygun bir sayısal yöntemle, elde edilen veriler işlenerek, her bir bileşenin gerçek aşınma miktarı ölçülebilir [35].

Yağ spektrumuyla aşınma ölçümü uzun zamandan beri kullanılan bir yöntemdir; fakat yağ analiz sonuçlarını etkileyecek bazı kısıtları mevcuttur. Bunlar, yağ numunesindeki kirleticiler, yağın ömrü, motorun ömrü vb. olarak sıralanabilir. Ayrıca, motor sıcaklığı, hızı, yükleme durumu gibi parametrelerin kontrol altında tutulması gerekmektedir [36-39].

İçten yanmalı motorlarda segman, silindir gömleği, dişli çark, mil, mil yatakları vb. farklı sürtünme çiftleri farklı malzemelerden yapılmakta ve dolayısıyla farklı kimyasallar farklı miktarlarda aşınmaya sebep olmaktadır. Tüm bu sürtünme çiftlerinin bir yağlayıcıda düzgün olarak dağıldığı varsayılarak, belirli bir motor parçasının aşınmasındaki bir elementin toplam miktarı her bir bileşenin aşınmasındaki ayrı ayrı aşınma miktarı toplamına eşittir. Buna göre,

$$\begin{pmatrix} P_{1,1} & P_{1,2} & \dots & P_{1,n} \\ P_{2,1} & P_{2,2} & \dots & P_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{m,1} & P_{m,2} & \dots & P_{m,n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{pmatrix} V \quad (2.12)$$

aşınma miktarı (2.11) denklemiyle hesaplanabilir.

Burada P m×n bir matris ve P_{i,j} i. elementin j. Sürtünme çiftinin oranını, W=(W₁, W₂, ...W_n) her bir bileşenin ağırlık kaybını gram cinsinden ifade etmektedir. E=(E₁, E₂, ...E_m) ise bir yağlayıcıdaki bir elemanın en büyük oranını ifade etmektedir ve V ise yağlayıcının toplam hacmidir.

E vektörü spektrumun ölçülmesiyle bulunur ve verilen sürtünme çiftlerinin elementlerinin oranıdır.

$$W = P^{-1}E V \quad (2.13)$$

denklemi çeşitli sayısal yöntemlerle çözülebilir. Böylece her bir bileşenin aşınma miktarı dolayısıyla segman gömlek arasındaki aşınma miktarı da bulunmuş olur.

3. TARTIŞMA

Bu bölümde yukarıda açıklanan piston segmanı-silindir gömleği aşınmasının ölçüm yöntemleri üstünlük ve eksiklikleri bakımından tartışılacaktır.

Segmanda meydana gelen aşınma, ağırlık farkı alınarak kolayca hesaplanabilmesine rağmen, silindir için aynı hassasiyette ölçüm yapabilmek mümkün olmadığı için çok tercih edilmemektedir. Profilometre ile yüzey profilinin elde edilmesinde dış yüzey ölçümleri yani segman için ölçüm almak sıkıntı yaratmazken, silindirik bir iç yüzeye yani profilometrenin silindir bloğuna düzgünce konumlandırılması ve ölçüm alınması çok da kolay olmamaktadır. Dolayısıyla profilometre ile ölçüm almak genellikle silindir iç yüzeyinin eşleniğinin elde edilerek ölçüm alınması ile daha mümkündür. Mekanik ve optik profilometreyle alınan ölçümler karşılaştırıldığında, eşit şartlarda çalıştırılmış aynı numuneden mekanik ve optik profilometre ile yapılan ölçümlerde, optik profilometreyle daha iyi aşınma miktarı değerleri elde edilmiştir. Mekanik profilometrenin ölçüm sonuçları daha iyi olmasına rağmen, onunla yapılan ölçüm süresi optik profilometreye göre daha uzundur ve ayrıca iğne ucunun sık sık değiştirilmesi de gerekmektedir. Optik profilometrede ise yüzeyin pürüzsüzlüğü yine ölçüm sonuçlarını olumsuz etkilemektedir. Benzer şekilde koordinatların ölçülmesi yönteminde de ölçme aletinin koordinat algılayan aparatının silindirik iç yüzeye uygun şekilde tasarımının zorluğu söz konusudur.

Araştırmacılar, çeşitli yağlayıcıların ve karşılıklı çalışacak metal çiftlerinin aşınma üzerine etkilerini incelemek üzere laboratuvar deneyleri yapmaktadırlar. Bu deneyler özellikle belirli bir km yapmış motorları söküp takmaya ihtiyaç duymadan, aynı malzemeden ve aynı eğrilik yarıçaplarında hazırlanmış numunelerin çeşitli çalışma koşullarında denenmesine dayanmaktadır. Elde edilen yüzeylerdeki aşınma miktarı optik veya mekanik profilometrelerle

ölçülebilmektedir. Bu tür çalışmaların en temel amacı, yeni geliştirilen silindir malzemesi yada yağlayıcının aynı çalışma şartlarında denenerek tribolojik özelliklerinin belirlenmesidir.

Radyonüklit ölçüm tekniği, başta biyoloji olmak üzere özellikle son yıllarda birçok alanda kullanılmaktadır. Bu yöntemin avantajı, aktive edilen silindir bölgesinin neden olduğu aşınma miktarı çok iyi bir doğrulukla, kısa zamanda ve nispeten daha düşük bir maliyetle ölçülebilmektedir. Dezavantajı ise silindirin hangi bölgesinde ne kadar aşınma olduğunun değil, motorda segman ve silindir arasında meydana gelen toplam aşınma miktarını verebilmesidir. Ayrıca deneyi yapacak kişinin de güvenliği söz konusu olduğu için güvenilir ellerde yapılması gerekmektedir. Bunun yanında, deney aşamasında daha sağlıklı veriler elde edebilmek için, motorun yağlayıcı ve gaz emisyonları gibi diğer verileri de gözlemlenmelidir. Bu yöntem, motorun ömrünü belirlemede etkin bir parametrenin ölçülmesine katkı sağlamaktadır.

Ultrasonik dalga kullanılarak yapılan aşınma ölçümleri oldukça yüksek hassasiyetle sonuç vermektedir. Bu ölçüm yönteminin en temel dezavantajı, motora monte edilmesi gereken dalga üretici ve alıcısıdır. Manyetik olarak yapılan ölçümlerde ise yine motora bir montajın söz konusu olması sıkıntı yaratmaktadır. Kapasitans ölçüm yönteminde, ölçümün hassasiyeti, alınacak ölçüm sayısına bağlı olarak değişiklik gösterirken, bu ölçüm yöntemiyle aşınmanın silindirin hangi bölgelerinde ne ölçüde olduğuyla ilgili bilgi edinilebilir.

Replika yönteminin ölçüm hassasiyeti için iki temel nokta söz konusudur. Birincisi, silindir yüzeyine nüfuz edecek malzemenin hem mikron mertebesinde boşluklara girmesi hem de kısa sürede donabilmesi; ikincisi ise bu malzemeyi yüzeye bu nüfuziyeti sağlayacak ve malzeme kurduktan sonra çıkarırken pürüz tepelerini kırmayacak bir aparatın tasarımının zorluğudur. Bu konuyla ilgili patent çalışmaları devam etmektedir.

Akustik emisyonla ölçüm yönteminde ise literatürde yapılan çalışmalarda aşınma miktarı elde edilmemiş, yalnızca farklı motorların farklı çalışma şartlarında akustik emisyon enerji değerleri karşılaştırılmıştır. Yağ spektrumu yardımıyla aşınma miktarının ölçülmesinde ise motorda aşınmaya sebep olduğu varsayılan malzeme çiftlerinin sayısına bağlı olarak matematiksel çözüm modeli geliştirilmesi gerekmektedir. Bu gerçekleştirildiği takdirde, aşınma miktarı elde edilmiş olacaktır.

4. SONUÇ

İçten yanmalı motorlarda yakıttan elde edilen verimin arttırılabilmesi, motorda meydana gelen aşınma kayıp miktarını azaltmakla mümkündür. Bunun için de ilk olarak, piston-silindir gömleğindeki aşınma miktarının ve mümkünse aşınmanın en çok görüldüğü bölgelerin belirlenmesi ve farklı metal çiftlerinin ve yağlayıcılarının motorda meydana getirdikleri aşınma miktarlarının belirlenmesi çok büyük önem teşkil etmektedir.

Sunulan çalışmada piston segmanı-silindir gömleği arasındaki aşınmayı ölçmek için kullanılan yöntemler ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Her bir yöntemin üstünlükleri ve zayıflıkları tartışılmıştır. Laboratuvar deneyleri, yeni geliştirilen malzemelerin tribolojik özelliklerinin belirlenmesi için oldukça önemlidir. Buna karşılık gerçek çalışma şartları laboratuvar şartlarından oldukça farklıdır ve kontrol edilemeyen pek çok parametreyi içermektedir. Motor üzerine herhangi bir ölçme sisteminin yerleştirilmesi gereken sürekli izleme yöntemleri motorun belirli aşamalarda sökülüp takılmasını gerektirmemekle birlikte, hem motor üzerinde modifikasyon hem de ek maliyet getirmektedir. Boyutsal ölçümlere dayalı yöntemlerde ise karşımıza delik yüzeyinde ölçüm yapma zorlukları çıkmaktadır. Ayrıca silindir gömleğinin her noktasındaki aşınma miktarı farklıdır. Bizim hedefimizin sadece aşınma hızını belirlemek ya da silindir gömleği yüzeyindeki aşınma karakteristiğini elde etmeye yönelik olması da uygulanacak aşınma ölçme yönteminin seçimini etkilemektedir.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] Totten, G. E., "Handbook of Lubrication and Tribology, Chapter 1. Automotive Engine Oil", Press 2006.
- [2] Taylor, C.M., "Automobile engine tribology—design considerations for efficiency and durability", Wear, 1998.
- [3] MEB, "Piston Biyel Krank Mekanizması", Motorlu Araçlar Teknolojisi, Ankara, 2011.
- [4] Kurbet, S. N., Malagi, R. R., 'Review on Effects of Piston and Piston Ring Dynamics Emphasis Consumption and Frictional Losses in Internal Combustion Engines', Sae Technical Paper Series, Number: 2007-24-0059, 2007.
- [5] Edara, R., 'Reciprocating Engine Piston Secondary Motion – Literature Review', Sae Technical Paper Series, Number:2008-01-1045, 2008.
- [6] Nagar, P. and Miers, S., 'Friction between Piston and Cylinder of an IC Engine: a Review', Sae Technical Paper Series, Number: 2011-01-1405, 2011.
- [7] Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W. and Stachowiak, G.B., "Experimental methods in tribology", Elsevier, Tribology Series: 44, 2004.
- [8] Woydt, M. And Ebrecht, J., "Testing friction and wear of the tribosystem piston ring and cylinder liner outside of engines", Tribotest, p.113–126, 2008.
- [9] Priest, M., Dowson, D., Taylor, C.M., "Predictive wear modelling of lubricated piston rings in a diesel engine", Vol 231, pp. 89-101, 1999.
- [10] Truhan, J.J., Qu, J., Blau, P.J., "A ring test to measure friction and wear of heavy duty diesel engine piston rings and cylinderliners using realistic lubricants", Tribology International, vol 38, pp. 211-218, 2005.
- [11] Papadopoulos, P., Priest, M. and Rainforth, W.M., "Investigation of fundamental wear mechanisms at the piston ring and cylinder wall interface in internal combustion engines", Engineering Tribology, vol. 22, pp 33-343,2007.
- [12] Radil, K.C., "Test Method to Evaluate Cylinder Liner-Piston Ring Coatings for Advanced Heat Engines", NASA TM- 1075261, 1996.
- [13] Johansson, S., Nilsson, P., Ohlsson, R. and Rosén, B., "Experimental friction evaluation of cylinder liner/piston ring contact", Wear, 2010.
- [14] Schneider, E.W. and Blossfeld, D.H., "Radiotracer method for measuring real-time piston-ring and cylinder-bore wear in spark-ignition engines", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 505, pp 559–563, 2003.
- [15] Eberle, D.C., Wall, C.M., Treuhaft, M.B., "Applications of radioactive tracer technology in the real-time measurement of wear and corrosion", Wear, vol. 259, pp. 1462–1471, 2005.
- [16] Scherge, M., Pöhlmann, K., Gervé, A., "Wear measurement using radionuclide-technique (RNT)", Wear, vol. 254, pp. 801–817, 2003.
- [17] Donghui, H., Pingsheng, W., Weizhi, T., Dequan, Z., Guangzhou, C., Bangfa, N., Xiuhua, Z., Lin, L., Guiying, Z., Cunxiong, L. and Dehong, L., "Study on real-time wear measurement of piston-ring and cylinder-bore in an engine using thin layer activation method", Applied Radiation and Isotopes, vol. 66, pp.1073–1078, 2008.
- [18] Rahnejat, H., "Tribology and dynamics of engine and power train Fundamentals, applications and future trends", Wood head publishing, 2010.
- [19] Smith, R. W., Ditrói, F., Corniani E., Wopelka Th., and Jech, M., "Measurement of surface wear using the thin layer activation (TLA) technique", International Topical Meeting on Nuclear Research Applications and Utilization of Accelerators, Vienna, 2009.
- [20] Konstantinov, I.O. and Leonov, A.I., "Surface activation for wear profile studies of piston rings", Wear, vol. 141, pp. 17–22, 1990.

- [21] Patent no: 4,711,120, "Method of wear monitoring using ultrasonic phase compression"
- [22] Ahn, H., Kim, D., "Insitu evaluation of wear surface by ultrasound", *Wear*, vol. 251 pp. 1193–1201, 2001.
- [23] Rouam, J.S.R., "Method for magnetically determining the degree of wear of a piston ring of an internal combustion engine while reciprocating thereon", 1979, Patent no: 4, 143, 319.
- [24] Patent No: 6318147, 2001, Peter Steinruck, Franz Seifert, Wolfgang Zeppelzauer, Alfred Pohl "Wear monitor"
- [25] Patent No: 5258930, 1993, "Piston ring wear diagnostic device and procedure therefor"
- [26] Peng, Z., Yang, J., Huang, Q., Yu, Y., "Research on Monitoring Wear of Piston Ring Based on Magneto-Resistive Sensor for Marine Diesel Engine", 2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, 2011.
- [27] Ali, S.H.R., Mohamed, H.H., Bedewy, M.K., "Identifying Cylinder Liner Wear using Precise Coordinate Measurements", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* vol. 10, no. 5, pp. 19-25, 2009.
- [28] Xinyong, Q., Wei, K., "A Method for Measuring the Cylinder Wear and Predicting the Cylinder Lifetime of Engine", *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, ICEMI' 2007*.
- [29] Gara, L., Zou, Q., Sangeorzan, B.P., Barber, G.C., Mc Cormick, H.E., Mekari, M.H., "Wear measurement of the cylinder liner of a single cylinder diesel engine using a replication method", *Wear*, vol. 268, issues 3–4, pp. 558–564, 2010.
- [30] Grabon, W., Pawlus P., Sep, J., "Tribological characteristics of one-process and two-process cylinder liner honed surfaces under reciprocating sliding conditions", *Tribology International*, v. 43, pp. 1882-1892, 2010.
- [31] Solecki, C., "Methods of surfaces quality comparison in mechanical engineering applications", *Hungarian Journal of Industrial Chemistry*, vol. 39, pp.31-34, 2011.
- [32] Douglas, R.M., Steel, J.A., Reuben, R.L., "A study of the tribological behaviour of piston ring/cylinder liner interaction in diesel engines using acoustic emission", *Science Direct*, vol. 39, pp. 1634–1642, 2006.
- [33] Kim, E.Y., Tan, A.C.C. and Yang, B., "Acoustic Emission for Diesel Engine Monitoring: A Review and Preliminary Analysis", In *The 5th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2010)*, 25-27 October 2010.
- [34] Shuster, M., Combs, D., Karpik, K., and Burke, D. "Piston Ring Cylinder Liner Scuffing Phenomenon on Studies Using Acoustic Emission Technique", *Sae Technical Paper Series*, Number: 2000-01-1782, 2000.
- [35] Zhang, Y., Wang, J. and Ai, F-X., "Determination of the wear of internal combustion engine components based on measurement of the oil spectrum", *Proc. I Mech E* vol. 224 Part D: *J. Automobile Engineering*, 2010.
- [36] Kwon, O.K., Kong, H.S., Kim, C.H and Oh, P.K., "Condition monitoring techniques for an internal combustion engine", *Tribology International*, vol. 20, issue 3, pp. 153–159, 1987.
- [37] Kjer, T., "Wear rate and concentration of wear particles in lubricating oil", *Wear*, vol.67, issue 2, pp.217–226, 1981.
- [38] Huo, W., Chen, D. and Wen, S., "Monitoring of the Wear Condition and Research on the Wear process for Running Equipment", *Tribology Transaction*, vol. 40, pp.87-90, 1997.
- [39] Macia'n, V., Tormos, B., Olmeda, P., Montoro, L., "Analytical approach to wear rate determination for internal combustion engine condition monitoring based on oil analysis", *Tribology International*, vol. 36, pp.771–776, 2003.