



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ
LABORATUAR FÖYÜ

AŞINMA DENEYİ

Prof. Dr. Temel VAROL
Arş. Gör. Serhatcan Berk AKÇAY

Ekim 2024

Trabzon

Deneyin Amacı: Birbirleri ile temas halindeki sürtünmeli eleman çiftlerinde oluşan aşınmayı incelemek ve aşınma miktarını hesaplayarak metalik malzemelerin aşınma özelliklerini belirlemektir.

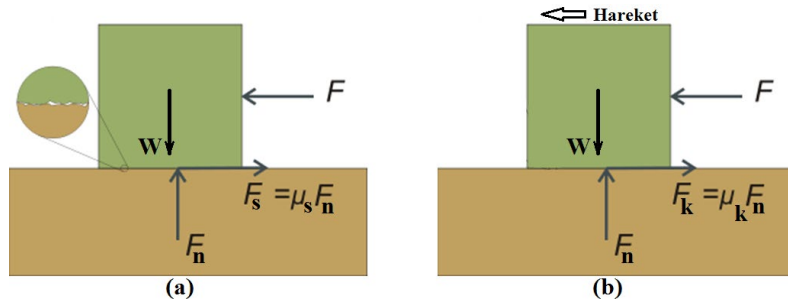
1. Giriş

Tasarım ve malzeme seçimi kıstaslarının iyi bir şekilde uygulanmasına rağmen günlük hayatımızın farklı alanlarında kullandığımız ve çeşitli malzemelerden yapılmış cihazlarda veya teknolojik uygulamalarda kullanılan makine parçalarında çalışma esnasında oluşan çeşitli hasar tiplerinden dolayı beklenen performansın oldukça altında bir çalışma verimi ile karşılaşabilmektedir. Hasar sebepleri incelendiğinde oluşan hasarların yanlış malzeme seçimi, tasarım ve üretim hataları, hatalı ısıl işlem, beklenmeyen ve uygun olmayan çalışma şartları ve kalite kontrol hatalarından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Makine elemanlarının çalışma verimini düşüren ve üretim maliyetlerini artıran hasar tiplerinden biri de aşınmadır [1]. Geçmişten günümüze artan teknolojiyle birlikte makine elemanlarındaki çalışma toleranslarının oldukça azalması, daha karmaşık ve hassas parçalara ihtiyaç duyulması, havacılık, uzay ve savunma alanlarında düşük hata ile çalışma zorunluluğu sonucunda aşınmadan kaynaklı hasar incelemeleri oldukça önemli bir konuma gelmiştir.

2. Sürtünme ve Aşınma

2.1 Sürtünme

İki malzeme birbirleri ile temas halinde olacak şekilde konumlandırılıp malzemelerden biri diğer malzeme üzerinde kaydırılmak istendiğinde uygulanan kaydırma kuvvetine zıt yönde bir sürtünme kuvveti meydana gelmektedir (Şekil 1).



Şekil 1. (a) Statik sürtünme ve (b) Dinamik sürtünme esnasında cisme etki eden kuvvetler
Kaymayı oluşturan kuvvet (F_s) ile temas yüzeyine etki eden normal kuvvet (F_n) arasında;

$$F_s = \mu_s \cdot F_n \quad (1)$$

bağıntısı mevcuttur. Burada μ_s statik sürtünme katsayısıdır.

Kayma hareketi başladıktan sonra, sürtünme kuvvetinde bir azalma olur ve bu durumda;

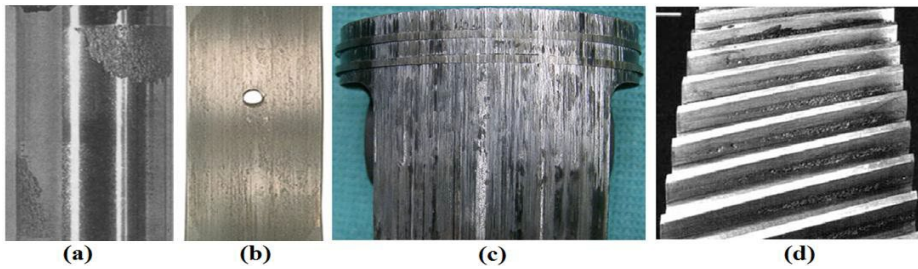
$$F_k = \mu_k \cdot F_n \quad (2)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada μ_k ($<\mu_s$) kinetik sürtünme katsayısıdır [2].

Temas halindeki yüzeylerde, sürtünme kuvvetleri güç kaybına, aşınma ise çalışma toleranslarının kötüleşmesine sebep olmaktadır. Günlük hayatımıza baktığımızda fren sistemleri gibi sürtünmenin gerekli olduğu durumlar olmasına rağmen aşınma istenmeyen bir hasar türüdür. Ayrıca talaşlı işlem uygulamalarında en asgari sürtünme ile en yüksek aşınma (talaş kaldırma) sağlanarak parça işlenmesi amaçlanmaktadır.

2.2. Aşınma

Aşınma, temas eden yüzeylerden mekanik etkiler sebebiyle mikro parçacıkların ayrılması sonucu malzemede istenilmeyen bir değişikliğin meydana gelmesi olayıdır. Temas halindeki yüzeylerde, sürtünme kuvvetleri güç kaybına neden olmakta, aşınma ise çalışma toleranslarının bozulmasına ve makine parçalarının fonksiyonlarını tam olarak yerine getirmesine engel olmaktadır. Aşınma olayı genellikle; hareket aktarım elemanı olarak kullanılan millerde, kaymalı ve rulmanlı yataklarda, fren balatalarında, motor pistonu ve silindirlerde, dişlilerde ve türbin kanatlarında görülmektedir (Şekil 2). Farklı türdeki mühendislik malzemelerinin ve makine elemanlarının verimli ömürlerine önemli oranda etki eden aşınma kaybı, aşınma ortamı, aşınma mekanizması, malzeme cinsi, yük miktarı, aşınma hızı, sürtünme esnasında oluşan yüzey film özellikleri ve sıcaklık gibi birçok faktöre bağlıdır. Aşınma olayını bir malzeme özelliği olarak düşünmektense olayı bir bütün olarak sistem içinde değerlendirmek gerekir. Bu sisteme tribolojik sistem denilmektedir. Triboloji sürtünme, yağlama ve aşınma olaylarını kapsamaktadır. Tribolojik sistem ise karşılıklı etkileşen elemanlarda hız, termal şartlar ve yükün bileşimiyle meydana gelen aşınma olayını inceler [3].



Şekil 2. Aşınma izleri; (a) mil, (b) yatak, (c) piston, (d) dişli çark [4-7]

Aşınma, diğer hasar tiplerine göre tahmin başarısı daha yüksek ve gerekli önlemlerin alınabileceği bir hasar tipidir. Birbirleri ile temasta olan malzeme yüzeyleri yağlayıcı kullanımı, yüzey sertleştirme ve oksit tabakası oluşturma gibi önlemler alınarak korunabilir, mekanik yüklemeler ve oluşan ısı etkisi ile yağlayıcı film veya oksit tabakasının

bozulması, iki yüzeyin birbiriyle direkt temasına sebep olabilir. Bu temas sonucunda ortaya çıkan sürtünme malzemenin kullanım yerindeki ömrünü ve performansını olumsuz bir şekilde etkiler. Aşınmadan dolayı oluşan hasarlar malzeme çiftinin uygun seçimi, etkin yağlama (Şekil 3a), uygun tasarım, kendinden yağlamalı yatak kullanımı (Şekil 3b) ve filtreleme gibi faktörlerle en aza indirilebilir, fakat kesinlikle önlenemez.



Şekil 3. Makine elemanları ve yağlayıcılar [8, 9]

Aşınmayı etkileyen faktörleri dört ana grup halinde toplayabiliriz.

1-Ana Malzemeye Bağlı Faktörler

Malzemenin kristal yapısı, sertliği, elastisite modülü, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve boyutu

2- Karşı Malzemeye Bağlı Faktörler ve Aşındırıcının Etkisi

3- Ortam Şartları

Sıcaklık, Nem, Atmosfer

4-Servis Şartları

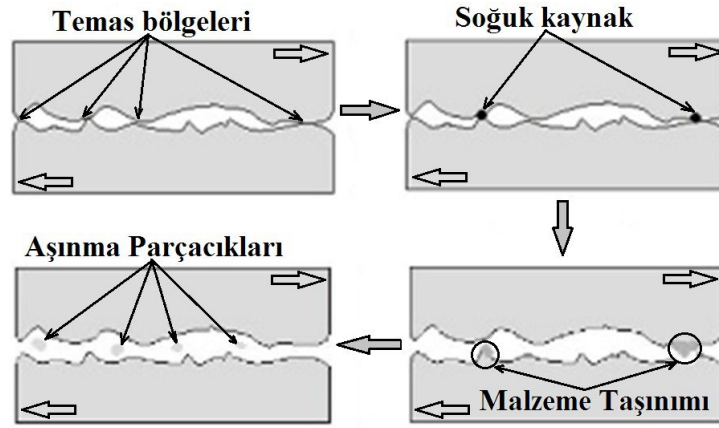
Basınç, hız ve kayma yolu [10]

2.3. Aşınma Türleri

2.3.1. Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, birbirleriyle kayma sürtünmesi yapan yüzeylerde soğuk kaynak ya da bölgesel bağlanmalar sonucu bir yüzeyden diğerine malzeme transferi ve daha sonra kayma hareketi sonucunda malzeme kaybı şeklinde gerçekleşmektedir (Şekil 4). Temas halindeki yüzeylerdeki yüzey pürüzlülükleri üzerindeki basıncın bölgesel plastik deformasyona yetecek kadar yükselmesi durumunda küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç etkir. Bu noktalardaki gerilme, pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyon, pürüzlerin birbirini çizmesi ve sıvanıp kaynaklaşma olayları başlar. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesiv aşınmayı oluşturur [11]. Adhesiv

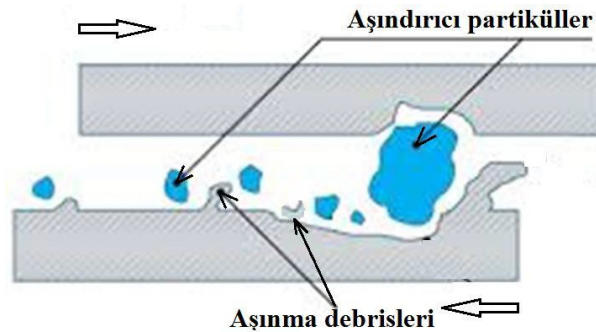
aşınmaya karşı yüzey sertleştirme yöntemleri ile temas yüzeylerinin sertleştirilmesi ve yağlayıcı kullanımı önerilmektedir.



Şekil 4. Adhesiv Aşınma [11]

2.3.2. Abrasiv Aşınma

Çizilme yâda yırtılma aşınması olarak da adlandırılabilen abrasiv aşınma, birbiri ile eş çalışan malzeme çiftinde hızlı ve büyük oranda hasar oluşturabilecek oldukça önemli bir aşınma türüdür. Bu aşınma türü, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan parçacıklarla basınç altında etkileşmesi ile sert parçacıkların malzeme yüzeylerinden parçacık kaldırılması şeklinde tanımlanabilir (Şekil 5). Bu aşınma türüne yatak malzemesi içersine olumsuz çalışma koşulları nedeniyle giren toz parçacıklarının oluşturduğu aşınma örnek gösterilebilir. Eğer aşınma olayı malzeme çifti arasındaki sertlik farkından meydana geliyorsa iki cisimli aşınma, diğer taraftan ilave aşındırıcı partiküller de aşınmayı etkiliyorsa bu aşınma türü de üç cisimli aşınma olarak tanımlanmaktadır [11].

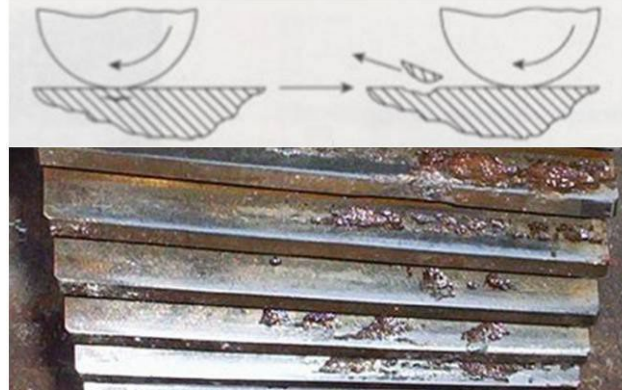


Şekil 5. Abrasiv Aşınma [11]

2.3.3. Yorulma Aşınması

Yorulma (pitting) aşınması, dişli çarklar, rulmanlı yataklar ve kam mekanizmaları gibi

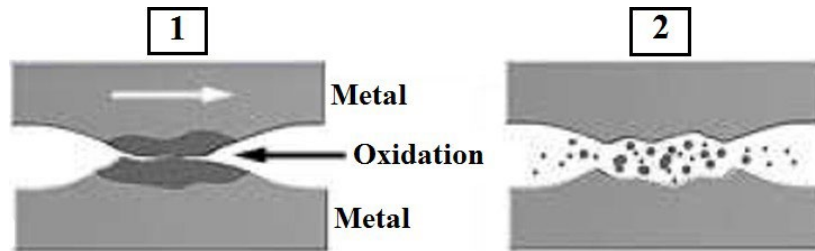
birbirleriyle sürekli temas halinde olan yüzeylerde yaygın olarak görülen bir aşınma türüdür (Şekil 6). Bu tür makine elemanlarında temas alanları çok küçük olduğundan temas yüzeylerinde Hertz basınçları oluşmaktadır. Bu basınçların etkisinde yüzeyin hemen altında kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Kayma gerilmelerinin maksimum olduğu noktada plastik deformasyon oluşmakta ve bu deformasyon zamanla yüzeye ilerleyerek yüzeyde çukurcuklar meydana gelmektedir [12].



Şekil 6. Yorulma Aşınması

2.3.4. Korozif Aşınma

Aşınan yüzeyler, aynı zamanda korozif etkilere de maruz kalırsa bu durumda korozif aşınma oluşmaktadır (Şekil 7). Kimyasal korozyon kendi başına oluşabildiği gibi diğer aşınma türleriyle birlikte oluşabilir. Temas eden yüzeylerde görülen yüzey filmi tarafından oluşturulan kimyasal reaksiyonlar yüzey aşınmasını engellemektedir. Fakat oluşan yüzey



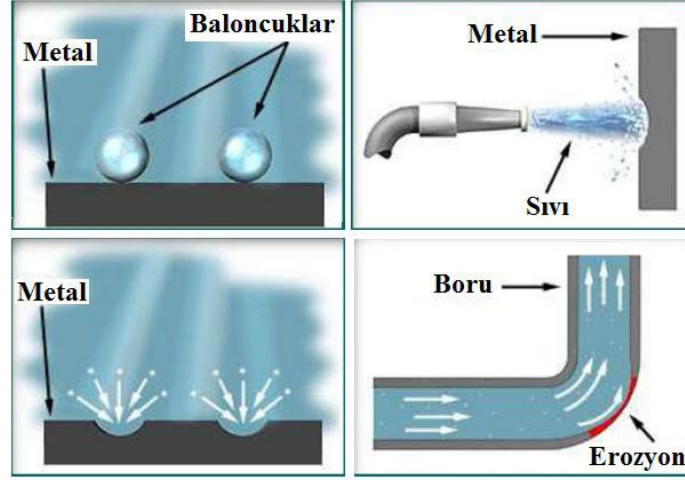
filmi kırılgan ve arayüzey bağı zayıfsa ise sürtünme esnasında filmler çatlayarak yüzeyden ayrılır ve aşınma hızı artar [12].

Şekil 7. Korozif Aşınma

2.3.5. Erozyon Aşınması

Erozyon aşınması, akışkan içerisinde bulunan aşındırıcı partiküller, yüksek hızla hareket eden sıvı damlacıkları ve yüksek hızdaki gaz kabarcıkları tarafından oluşturulan bir aşınma türüdür (Şekil 8). Sıvılar ve gazlar akış esnasında temas halinde oldukları parçanın sınır yüzeylerine çarpma etkisi yaparak yüzeyden parçacıklar koparılır ve girdaplar etkisiyle dalgalı

yüzeymeydana getirirler. Böylece aşınma daha da hızlanır. Genellikle pompalarda, pervanelerde, fanlarda, nozullarda ve boru ve tüplerin dirsek kısımlarında görülmektedir [12, 13].



Şekil 8. Erozyon aşınması türleri

3. Aşınma Kaybı Ölçüm Yöntemleri

3.1. Ağırlık Farkı Metodu

Aşınma kaybı ölçüm yöntemleri arasında en ekonomik yöntem olan ağırlık farkı metodu hassas sonuçlar elde edilmesi sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Ağırlık kaybı genellikle 10^{-3} veya 10^{-4} hassasiyete sahip teraziler kullanılarak belirlenmektedir. Bu yöntemde aşınma sonucu meydana gelen ağırlık kaybı; aşınma miktarı gram veya miligram olarak ifade edildiğinde sürtünme mesafesine karşılık olarak gr/km veya mgr/km cinsinden, birim alan için hesap edilecekse gr/cm^2 cinsinden ifade edilmektedir. Aşınma miktarı hacimsel olarak hesaplanmak istendiğinde malzemenin yoğunluğu ve numune üzerine uygulanan yük dikkate alınarak, birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybı kullanılarak ağırlık kaybı belirlenebilir. Özgül aşınma miktarı aşağıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir [14];

$$W_s = \frac{\Delta m}{d F_n S} = \frac{\Delta v}{F_n S} \quad (3)$$

Burada; W_s : Özgül aşınma miktarı (mm^3/Nm), Δm : Ağırlık kaybı (mgr), d : yoğunluk (mgr/mm^3), F_n : Uygulanan normal kuvvet (N) ve S : Aşınma mesafesi (m)'ni ifade etmektedir.

3.2. Kalınlık Farkı Metodu

Bu yöntemde aşınma miktarı, aşınma sonucunda meydana gelen boyut değişikliğinin ölçülmesi ve ilk değerler ile karşılaştırılması suretiyle belirlenmektedir. Elde edilen kalınlık farkı değerleri kullanılarak hacimsel kayıp değeri ve dolayısıyla birim hacimdeki aşınma

miktarı bulunabilir. Bu yöntemde ölçüm hassasiyetini arttırmak için hassas kalınlık ölçü aletleri (+1 µm duyarlılıkta) ile ölçüm yapılmalıdır [14].

3.3. İz Değişim Metodu

Bu yöntemde, aşınma yüzeyinde plastik deformasyon kullanılarak geometrisi belirli bir iz oluşturulur. Bu izin oluşumu için Brinell veya Vickers sertlik ölçme uçları kullanılır. Deney boyunca oluşturulan iz boyutlarının değişimi mikroskop vasıtasıyla ölçülerek değerlendirilir [14].

4. Deney Uygulaması

- Yüzeyi ayna parlaklığında hazırlanmış deney numunelerinin başlangıç ağırlığı hassas terazi yardımıyla ölçülür.
- Deney numunesi Ball-on-Disk aşınma test cihazına yerleştirilir.
- Deney esnasında kullanılacak aşınma parametreleri (Yük, devir sayısı ve aşınma mesafesi) belirlenir.
- Aşınma test cihazı çalıştırılarak planlanan test işlemleri gerçekleştirilir.
- Deney sonucunda numunede meydana gelen ağırlık kayıpları ölçülerek özgül aşınma miktarları belirlenir.
- Belirlenen özgül aşınma miktarları her bir deney için ayrı satır/sütunlarda tablo olarak hazırlanır. Elde edilen veri seti Taguchi yöntemi ile analiz edilir.

Taguchi Yöntemi ile Aşınma Deneyi Tasarımı

Amaç: Bu deneyde, aşınma davranışını etkileyen parametreleri optimize etmek ve aşınma performansını iyileştirmek için Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılacaktır. Bu yöntem, faktörler arasındaki etkileşimleri minimum sayıda deney ile anlamamıza olanak tanır.

Taguchi Yöntemi: Taguchi yöntemi, çeşitli deney parametrelerinin (kontrol faktörleri) optimize edilmesi ve sistematik bir yaklaşım kullanarak en uygun kombinasyonların belirlenmesi için kullanılan bir istatistiksel tekniktir. Bu yöntemde, her parametrenin seviyeleri belirlenir ve L-matrisi adı verilen ortogonal bir dizi ile minimum deney sayısı ile maksimum bilgi sağlanır.

Aşınma Deneyine Uygulanacak Kontrol Faktörleri: Aşınma deneyinde aşağıdaki parametreler kontrol faktörleri olarak belirlenebilir:

1. **Yük (N):** Aşındırma işlemi sırasında numune üzerine uygulanan kuvvet.
2. **Kayma Mesafesi (m):** Numunenin yüzeyinin aşındığı yol miktarı.

3. **Devir Sayısı (dev/dk):** Aşındırıcı malzemenin deney numunesi üzerindeki hareket hızı.
4. **Malzeme Türü:** Aşındırılacak malzemenin özellikleri (örn. metal, seramik, polimer).

Deney Planı: Taguchi yöntemi kullanılarak 3 faktör ve 3 seviye seçilecektir. Bu durumda kayma mesafesi sabit kalmak koşuluyla geri kalan iki faktörün üç seviyesi (düşük, orta, yüksek) olacaktır. Örneğin:

- **Yük (N):** 1, 3, 5
- **Kayma Mesafesi (m):** 100 m
- **Devir Sayısı (dev/dk):** 100, 200, 300

Bu faktör ve seviyeler ile 9 farklı deney yapılacak ve her deneyde aşınma miktarı ölçülerek sonuçlar analiz edilecektir. Tablo 1, Taguchi ile yapılacak deney tasarımı için örnek bir tablo olarak paylaşılmıştır. Tablo 1’de yer alan başlangıç ağırlığı ve son ağırlık değerleri her bir deney için ayrı ayrı ölçülerek öğrenciler tarafından doldurulacaktır. Ayrıca, yapılan ağırlık ölçümleri neticesinde özgül aşınma miktarı değerleri her bir deney için ayrı ayrı hesaplanarak yine öğrenciler tarafından doldurulacaktır.

Tablo 1. Örnek Deney Tablosu

Deney Kodu	Yük (N)	Devir Sayısı (dev/dk)	Kayma Yolu (m)	Başlangıç Ağırlığı (gr)	Son Ağırlık (gr)	Özgül Aşınma Miktarı (mm³/Nm)
1	1	100	100			
2	3	100	100			
3	5	100	100			
4	1	200	100			
5	3	200	100			
6	5	200	100			
7	1	300	100			
8	3	300	100			
9	5	300	100			

Sonuçların Analizi: Taguchi yöntemi ile elde edilen veriler analiz edilecektir. Analiz için spesifik aşınma miktarı / özgül aşınma kaybı verileri kullanılacaktır. Aşınma miktarını minimize etmek amacıyla "daha küçük daha iyidir" kriteri kullanılacaktır. Özgül aşınma kaybı verileri

dikkate alınarak optimum deney koşulları belirlenecektir.

Taguchi Yönteminin Avantajları:

- Deney sayısını azaltarak maliyet ve zaman tasarrufu sağlar.
- Parametreler arasındaki etkileşimleri daha az deney ile anlamaya olanak tanır.
- Optimal parametre kombinasyonunu belirleyerek aşınma performansını iyileştirir.

5. Deney Raporunun Hazırlanması

- Deney raporunun ilk kısmında Aşınma ile ilgili **teorik bilgiler** verilecektir. Bu bölüm 1 sayfayı aşmayacak şekilde hazırlanmalıdır.
- Deney raporunun ikinci kısmında **deneyin yapılışı** adım adım anlatılacak ve her bir adımda kullanılan malzemeler, seçilen deney parametreleri ve kullanılan cihazlar (resimleri ile birlikte) belirtilecektir.
- Deney raporunun son kısmını **Bulgular ve Tartışma** bölümü oluşturmaktadır. Bu bölümde
 - ▶ Elde edilen sonuçlar Tablo halinde birleştirilecektir.
 - ▶ Özgül aşınma miktarının uygulanan yük ile değişim grafiği
 - ▶ Özgül aşınma miktarının devir sayısı ile değişim grafiği olmak üzere iki adet grafik oluşturulacaktır.
 - ▶ Taguchi yöntemi kullanılarak yapılan analiz sonucu ilgili laboratuvar sorumlusunun üniversite akademik veri sistemi (AVESİS) sayfasından paylaşılan dosya dikkate alınarak Taguchi yöntemiyle analiz başlığı altında öğrenciler tarafından değerlendirmeler yapılacaktır.
 - ▶ Deney raporunun son bölümünde her bir deney grubu için aşağıda listelenmiş olan konu başlıkları dikkate alınarak “Deney Tasarımı” başlığı altında tasarım ve mühendislik becerilerini geliştirme uygulaması yapılacaktır.
 - Deney tasarımı başlığı altında sözel ve sayısal açıklamalar yer almalıdır. Ayrıca, 3-boyutlu ve 2-boyutlu tasarımlar mühendislik çizimi kurallarına uygun olarak eklenmelidir.

Tasarım ve Mühendislik Becerilerini Geliştirme Konu Başlıkları

Grup 1: Binek otomobil frenleme sistemlerinde kullanılan fren diski malzemesi için uygun aşınma test düzeneğini tasarlayınız.

Grup 2: Talaşlı imalat yöntemlerinden biri olan tornalama işleminde kullanılan takım ucu için kullanım ömrünün belirlenmesi amacıyla uygun bir aşınma test düzeneği sistemi tasarlayınız ve gereksinimlerini açıklayınız.

Grup 3: Otomobil motorlarında kullanılan pistonlar için kullanım ömrünü hesaplamak

amacıyla bir aşınma deney düzeneği sistemi tasarlayınız ve gereksinimlerini açıklayınız.

Grup 4: Dişli kutularında kullanılan çelik dişlilerin aşınma davranışını incelemek için bir aşınma deney düzeneği tasarlayınız. Deney düzeneğinde dikkate alınması gereken parametreler nelerdir ve test süresince bu parametrelerin nasıl kontrol edileceğini açıklayınız.

Grup 5: Tuzlu su ortamında çalışan gemi pervanelerinin aşınma performansını değerlendirmek için bir aşınma testi düzeneği hazırlayınız. Korozyon ve aşınma etkilerinin nasıl bir arada değerlendirileceğini açıklayınız.

Grup 6: Tarım makinelerinin bıçaklarında kullanılan malzemelerin aşınma dayanımını test etmek amacıyla bir aşınma düzeneği tasarlayınız. Test sırasında bıçağın toprakla temas ettiği koşulları nasıl simüle edersiniz?

Grup 7: Yapay eklem protezlerinde kullanılan biyomalzemelerin aşınma dayanımını ölçmek amacıyla bir aşınma düzeneği tasarlayınız. İnsan vücudundaki biyolojik sıvıların etkisini de içeren bir deney tasarımı nasıl yapılmalıdır?

Grup 8: Endüstriyel rulman yataklarında kullanılan malzemelerin aşınma dayanımını ölçmek için bir aşınma deney düzeneği tasarlayınız. Farklı çalışma koşulları altında rulman yatağının nasıl aşındığını belirlemek için deneysel koşulları açıklayınız.

6. Kaynaklar

- [1] N. Axén, S. Hogmark and S. Jacobson, “Friction and Wear Measurement Techniques” Modern Tribology Handbook, 2001.
- [2] P. Blau, “ASM Handbook on Friction, Lubrication and Wear Technology Technology” ASM International, 1992.
- [3] H. Czichos, “Tribology-A System Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear”, Elsevier, Amsterdam, 1987.
- [4] K.A. Esakul, “Handbook of Case Histories in Failure Analysis”, International, 1992.
- [5] <http://www.knowyourparts.com/technical-articles/types-of-engine-bearing-damage/>
- [6] B.T. Kuhnell, How Age and Contamination Affect Rolling Bearings and Gears
- [7] http://www.madsens1.com/saw_piston_fail.htm
- [8] <http://nccheurope.com/tr/solutions/lubricants-fuel-additives/greases-oils/gear-oils>
- [9] <http://www.sinterteknik.com.tr>
- [10] Y.C. Chiou, K. Kato, T. Kayaba, “Effect of Normal Stiffness in Loading System on Wear of Carbon Steel-part 1: Severe-Mild Wear Transition”, J. Tribology, 491-495, 1985.
- [11] T. Varol, “Nano Partikül Takviyeli Bakır Esaslı Fonksiyonel Derecelendirilmiş Elektrik Kontak Malzemelerinin Üretimi ve Karakterizasyonu” Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, 2016.
- [12] K. Kato, K. Adachi, “Wear Mechanism”, Modern Tribology Handbook, 2001.
- [13] T. Yıldız, A.K. Gür, “Aşınma Sistemleri”, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 86-91, 2006.
- [14] M. Karabaşoğlu (2008) “Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı” Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2008.