

AISI 1040 VE AISI 4140 ÇELİKLERİNİN DİNAMİK
SÜRTÜNME KATSAYISININ
CEVAP YÜZEY METODU İLE İNCELENMESİ

Netice DUMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

2010

CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AISI 1040 VE AISI 4140 ÇELİKLERİNİN DİNAMİK
SÜRTÜNME KATSAYISININ CEVAP YÜZEY METODU İLE
İNCELENMESİ

Öğr. Gör. Netice DUMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. BURHAN SELÇUK

SİVAS

2010

Bu çalışma Cumhuriyet Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun hazırlanmış ve Jürimiz tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

| | | |
|----------------|----------------------------|-------|
| Başkan | Doç. Dr. Burhan SELÇUK | _____ |
| Üye | Doç. Dr. Nevzat ASLAN | _____ |
| Üye | Yrd. Doç. Dr. H. Ali ERTAŞ | _____ |
| Üye (Danışman) | Doç. Dr. Burhan SELÇUK | _____ |

Bu tez çalışması, 04/02/2010 tarihinde Enstitü Yönetim Kurulu tarafından belirlenen ve yukarıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

..... / /

Prof.Dr. Sezai ELAGÖZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosunun 24.09.2008 tarihli ve 7 sayılı toplantısında kabul edilen C.Ü. Fen ve Sağlık Bilimleri Enstitüleri Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

ÖZET

AISI 1040 VE AISI 4140 ÇELİKLERİNİN DİNAMİK SÜRTÜNME KATSAYISININ CEVAP YÜZEY METODU İLE İNCELENMESİ

Netice DUMAN

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Burhan SELÇUK

2010, 60 sayfa

Bu çalışmada, metal çiftleri için teknik kuru sürtünmedeki noktasal temaslı dinamik sürtünme katsayısı iki adımda ele alındı.

Birinci adımda, AISI 1040 ve AISI 4140 çifti için temas yükü, kayma süresi, devir ve yüzey pürüzlülüğünün sürtünme kuvvetiyle olan bağıntısı araştırıldı. Benzer çalışmalara paralel sonuçlar bulundu.

İkinci adımda ise, istatistiksel bir yöntem olan Cevap Yüzey Metodu (CYM) ile modellemeye gidilerek AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri ile bir dizi deney yapıldı. Deneylerden alınan sonuçların analizi ile model elde edildi. Deney sonuçları ile modelden elde edilen tahmini sonuçlar arasında %95 uyum gözlemlendi.

Sonuç olarak triboteknik sistemlerde, sürtünme faktörlerinin sürtünme katsayısına olan etkilerini CYM ile gözlemek mümkündür.

ANAHTAR KELİMELELER: Sürtünme/ Sürtünme katsayısı / Noktasal temas / Cevap Yüzey Metodu /

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF DYNAMIC FRICTION COEFFICIENT OF AISI 1040 AND AISI 4140 STEELS BY USING OF RESPONSE SURFACE METHOD

Netice DUMAN

M. Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Doç. Dr. Burhan SELÇUK

2010, 60 pages

In this work, dry friction coefficient of dynamic friction between two pieces are studied in two steps.

In the first step, AISI 1040 and AISI 4140 steels were used. On a pair of this steel pieces, the effects of contact load, sliding time and surface roughness, friction force were studied and related results are obtained as the similar studies.

In next step Response Surface Methodology (RSM) is used on AISI 1040 ve AISI 4140 steels. Experimental results were analyzed to develop a model. It was observed that there was an accord in %95 value between experimental results and prediction of the model. As a result of tribosystems in which RSM can be used to observe and optimize coefficient of friction and system parameters.

KEY WORDS: Friction / Friction coefficient / Point contact / Response Surface Methodology /

TEŞEKKÜR

Tezin hazırlanması aşamasında bana her türlü desteği veren danışmanım Doç. Dr. Burhan SELÇUK'a teşekkür ederim.

Çalışma boyunca bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren arkadaşlarım Arş. Gör. Ahmet YÜCEL'e ve Öğr. Gör. Ersin ARSLANBULUT'a, SMYO Müdürü Prof. Dr. H. İbrahim ACAR'a ve mesai arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım için malzeme temini ve numunelerin hazırlanması konularında yardımlarından dolayı Estaş fabrikası yetkililerine ve öğrencim Yavuz Selim Koçyiğit'e teşekkür ederim.

Her konuda sabırla yardımcı olan eşim Sefa DUMAN'a, vakitlerinden çaldığım çocuklarım Kaan ve Zeynep'e, anneme ve babama desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa No |
|---|----------|
| ÖZET..... | iii |
| ABSTRACT..... | iv |
| TEŞEKKÜR..... | v |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | ix |
| SİMGELER DİZİNİ..... | x |
| KISALTMALAR DİZİNİ..... | xi |
| 1. GİRİŞ | |
| 1.1. Sürtünme..... | 1 |
| 1.2. Sürtünme İle İlgili Çalışmalar..... | 2 |
| 1.3.Sürtünme Deneylerinin Analizi..... | 3 |
| 1.4. Sürtünme Katsayısı Üzerine Yapılan Çalışmalar..... | 4 |
| 1.5. Tezin Amacı ve Kullanılan Yöntem..... | 7 |
| 2. TRİBOLOJİDE SÜRTÜNME ESASLARI | |
| 2.1. Giriş..... | 9 |
| 2.2. Sürtünme ve Triboloji İçin Temel Esaslar..... | 9 |
| 2.3. Sürtünme | 10 |
| 2.3.1. Sürtünme Kanunları..... | 11 |
| 2.3.2. Sürtünme Katsayısı..... | 12 |
| 2.3.3.Sürtünme Çeşitleri | 13 |
| 2.4. Kuru Sürtünme | 15 |
| 2.5. Sürtünmenin Aşınma Üzerine Etkileri..... | 16 |
| 2.5.1. Adhezif Aşınma | 17 |
| 2.6. Sonuç..... | 19 |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMA | |
| 3.1.Giriş..... | 20 |
| 3.2. Tribolojide Sürtünme Deneyleri ve Tribometri..... | 20 |
| 3.3. Deneysel Çalışma..... | 22 |
| 3.3.1. Numunelerin Hazırlanması..... | 23 |
| 3.3.2. Deney Cihazı..... | 24 |

| | |
|--|----|
| 3.3.3. Deney Tekniği | 26 |
| 3.3.4 Deney Programı Ve Elde Edilen Veriler..... | 27 |
| 3.4. Deney Sonuçları | 30 |
| 3.5 Aşınma Yüzey Resimleri..... | 35 |
| | |
| 4. CEVAP YÜZEY METODU | |
| 4.1. Giriş..... | 37 |
| 4.2. Cevap Yüzey Metodu (CYM)..... | 38 |
| 4.2.1. Cevap Yüzey Tasarımı..... | 39 |
| 4.3. Deney Tasarımı..... | 40 |
| 4.4. Modelin Oluşturulması ve En Küçük Kareler Regresyonu..... | 44 |
| 4.5. Modelin Uyumluluk Kontrolü | 52 |
| 5. SONUÇ ve ÖNERİLER | |
| 5.1. Giriş..... | 56 |
| 5.2. Sonuçlar..... | 56 |
| 5.3. Öneriler..... | 57 |
| 6. KAYNAKLAR..... | 58 |
| 7. ÖZGEÇMİŞ..... | 60 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

| | | |
|------------|--|----|
| Şekil 2.1 | Habig ve Czichos'a göre bir tribosistemin şematik olarak gösterilmesi..... | 10 |
| Şekil 2.2 | Kuru sürtünme modeli (Akkurt, 1990)..... | 11 |
| Şekil 2.3 | Kay-dur (Stick-Slip) olayına ait model (Akkurt, 1990)..... | 11 |
| Şekil 2.4 | Sürtünme çeşitleri (Akkurt, 1990)..... | 14 |
| Şekil 2.5 | Tipik bir kayma çifti (Selçuk, 1994)..... | 14 |
| Şekil 2.6 | Aşınma-zaman bağıntısı..... | 17 |
| Şekil 2.7 | Bazı aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (Czichos ve Habig, 1992) | 18 |
| Şekil 3.1 | En çok rastlanılan temas şekilleri (Czichos ve Habig,1992)..... | 21 |
| Şekil 3.2 | Numune ve karşı elemanın boyutları..... | 21 |
| Şekil 3.3 | Deney cihazının şematik görünüşü..... | 21 |
| Şekil 3.4 | Aşınma deney düzeneğinin şematik gösterimi..... | 26 |
| Şekil 3.5 | Deney düzeneğinden alınan ölçüm değerlerinin bilgisayara aktarılmasının şematik gösterimi..... | 27 |
| Şekil 3.6 | AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının temas yüküne göre kayma süresi ile değişimi | 30 |
| Şekil 3.7 | AISI 4140 çeliğinde sürtünme katsayısının temas yüküne göre kayma süresi ile değişimi..... | 31 |
| Şekil 3.8 | AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının 120 sn'de temas yüküne göre devir sayısı ile değişimi..... | 32 |
| Şekil 3.9 | AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının 240 sn'de yük durumuna göre devir sayısı ile değişimi..... | 32 |
| Şekil 3.10 | AISI 4140 çeliğinde sürtünme katsayısının 60 sn'de yük durumuna göre devir sayısı ile değişimi..... | 32 |
| Şekil 3.11 | AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının 200 d/dk devirdeki temas yükü ile değişimi | 33 |
| Şekil 3.12 | AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının 400 d/dk devirdeki temas yükü ile değişimi | 34 |
| Şekil 3.13 | AISI 4140 çeliğinde sürtünme katsayısının 200 d/dk devirdeki temas yükü ile değişimi..... | 34 |
| Şekil 3.14 | Sürtünme katsayısının pürüzlülük ile değişimi..... | 35 |
| Şekil 3.15 | Sürtünme sonucu oluşan aşınma yüzey resimleri..... | 36 |
| Şekil 4.1 | AISI 1040 çeliğinde deneysel ve tahmini deney sonuçlarının mukayesesi..... | 54 |
| Şekil 4.2 | AISI 4140 çeliğinde deneysel ve tahmini deney sonuçlarının mukayesesi..... | 54 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa No |
|--|-----------------|
| Çizelge 3.1 Triboteknik sistemlerle ilgili bazı veriler..... | 22 |
| Çizelge 3.2 Yüzey pürüzlülüklerinin elde edilmesi..... | 24 |
| Çizelge 3.3 AISI 1040 çeliğine ait deney verileri ve sonuçları..... | 28 |
| Çizelge 3.4 AISI 4140 çeliğine ait deney verileri ve sonuçları..... | 29 |
| Çizelge 4.1 Deney tasarımındaki faktör değerleri ve kodlamaları..... | 41 |
| Çizelge 4.2 Geliştirilen model için deney tasarımı | 42 |
| Çizelge 4.3 Deney sonuçları..... | 43 |
| Çizelge 4.4 Sürtünme katsayısı modeli için katsayı ve değişkenler..... | 49 |
| Çizelge 4.5 AISI 1040 çeliği için tahmini cevaplar..... | 50 |
| Çizelge 4.6 AISI 4140 çeliği için tahmini cevaplar..... | 51 |
| Çizelge 4.7 Modellerin analiz değerleri..... | 55 |

SİMGELER DİZİNİ

| | |
|-----------------------|--|
| A_R | Sürtünme işi, J |
| A_a | Aşınma |
| A_{em} | Şiddetli aşınmanın başladığı yer |
| B | Katsayı vektörü |
| $b_0...b_4$ | β katsayılarının tahmini değerleri |
| $b_0...b_{ij}$ | Denklemlerin katsayıları |
| d | Yoğunluk, gr/cm^3 |
| f | Faktör sayısı |
| F | Harekete zorlayan kuvvet, N |
| F_N | Normal yük, N |
| F_0 | Harekete geçiren kuvvet, N |
| F_R | Sürtünme kuvveti, N |
| F_{RD} | Dinamik sürtünme kuvveti, N |
| F_{RS} | Statik sürtünme kuvveti, N |
| k_1, k, K | Sabit katsayılar |
| M_R | Sürtünme momenti, Nm |
| n | Devir sayısı, d/dk |
| n_0 | Merkez noktadaki deney sayısı, adet |
| n_T | Toplam deney sayısı, adet |
| p | Terim sayısı, adet |
| P_R | Sürtünme gücü, W |
| r | Korelasyon Katsayısı |
| r^2 | Belirlilik Katsayısı |
| s | Kayma yolu, m |
| S | Standart Sapma |
| t | Zaman, sn |
| v | Çevresel hız, m/sn |
| $V...V_2$ | Kayma hızı, m/sn |
| X' | X matrisinin transpozesi |
| X_i | Denklemleri etkileyen faktörler |
| Y, y | Deney sonucu |
| y_0 | Cevapların aritmetik ortalaması |
| ρ | Sürtünme açısı |
| ω | Açısal hız, rad/sn |
| ϵ | Sabit varyanslı bağımsal deneysel hata |
| $\beta_0...beta_4$ | Bilinmeyen değişken katsayıları |
| $\beta_0...beta_{ij}$ | Modelin katsayıları |
| \hat{Y}, y' | Tahmini cevap |
| μ | Kinetik sürtünme katsayısı |
| μ_0 | Statik sürtünme katsayısı |

KISALTMALAR DİZİNİ

| | | | | |
|------|---|---------|-------|--------|
| AISI | Amerikan Standartları | | | |
| ASLE | American Society of Lubrication Engineers | | | |
| CÜ | Cumhuriyet Üniversitesi | | | |
| CYM | Cevap yüzey metodu | | | |
| EKK | En küçük kareler yöntemi | | | |
| MKM | | Merkezi | Karma | Modeli |

GİRİŞ

1.1. Sürtünme

Teknik sistemlerin ömrü, güvenilirliği ve verimliliği sürtünme, aşınma ve yağlama problemlerinin en uygun çözümlerine bağlıdır. Birbiri ile temasta bulunan kayma veya yuvarlanma hareketi yapan iki yüzey arasında bir sürtünme mevcuttur. Bu sürtünme bazen büyük bazen de küçük değer alabilir ama pratik olarak daima mevcuttur. Sürtünme ve buna bağlı aşınma eskiden beri gözlenen ve azaltılmaya çalışılan konular olmuştur.

Makine parçalarında ortaya çıkan başlıca hasarları, insana ve teknik esaslara bağlı nedenler oluşturur. İnsanlardan kaynaklanan %62'lik kısmı; %25 hatalı bakım, %12 konstrüksiyon kurallarına uymayan dizayn, %12 uygun olmayan çalıştırma, %6 sağlıksız personel, %7 özel nedenler şeklindedir. %38'lik kısmı oluşturan teknik esaslara bağlı nedenler ise; %11 yıpranma, %21 makinenin aşırı yük ile çalıştırılması, %6 diğer nedenler şeklindedir.

Dünya çapında yapılan istatistiklere göre makine elemanlarının % 70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Ayrıca sürtünme sonucu meydana gelen enerji kayıpları da büyük değerlere ulaşmaktadır. Almanya' da yayınlanan bir rapora göre sürtünme ve aşınma kayıpları yaklaşık gayrisafi milli hâsılanın % 4.5' e ulaşmıştır.

Sürtünme sonucu meydana gelen enerji kayıpları milyarlar tutarında harcamalara yol açar. Yine aşınmanın kaynağı olan sürtünme ile oluşan malzeme kayıpları ve makinelerin onarımı için harcanan zaman göz önüne alınırsa, bu durumun ne denli büyük ekonomik kayıplara yol açtığı anlaşılmaktadır (Akkurt, 1990).

Üretimi zor ve pahalı olan enerjinin azımsanamayacak bir bölümü sürtünme, aşınma ve metal transferi gibi mekanizmaların etkisiyle kaybolmaktadır. Bu amaçla sürtünme, aşınma, yağlama konularını ve bunlara bağlı olan olayları inceleyen bir bilim dalı olan triboloji geliştirilmiştir (Topbaş, 1993). Böylece enerji kaybının azaltılması için yeni mekanizmalar ve modellerin geliştirilmesi yoluna gidilmiştir.

Triboloji ilk defa 1966 yılında İngiltere'de bir hükümet komitesi tarafından ele alınmıştır. Komite triboloji prensiplerinin sistemli bir şekilde endüstride uygulanmasıyla elde edilecek ekonomikliğin araştırmasını yapmıştır. Komitenin daha sonraki çalışmaları optimum tribolojik dizaynlar ile elde edilen tasarruf üzerinde yoğunlaşmıştır.

Bu araştırmalara göre enerji tasarrufunun:

- ◆ Enerjinin doğrudan tasarrufu
 - Sürtünme ile harcanan enerjinin tasarrufu
 - Yenilenen parçaları üretmek için gereken enerji tasarrufu
- ◆ Enerjinin dolaylı tasarrufu
 - Tesisin ilk yatırımındaki sürtünme kayıplarını dengeleyerek elde edilen tasarruf olmak üzere iki yoldan kazanılabileceğini belirtmiştir (Hutchings, 1992).

1.2. Sürtünme ile İlgili alışmalar

Metallerin sürtünmesi ve aşınması araştırmalarında bu yüzyılın son yarısında yeni kavramlar getirilmiş ve tribolojinin ana fikirlerinde ilerlemeler kaydedilmiştir. Metallerin sürtünme karakteristiklerini anlamak, makine parçalarının tribolojik özelliklerini kontrol etmek için önemlidir. Sürtünme ya istenen ya da kaçınılması gereken bir durumdur. Her iki durumda da sürtünme boyutunun ne kadar olduğunu hesaplayabilmek önemlidir. Geçen yüzyılın sonlarında teknolojik gelişmeler nedeniyle sürtünmede önemli ölçüde ilerlemeler sağlanmıştır. Bu ilerlemelerin öncelikli sebebi sürtünme deneylerinde kullanılan cihazların keşfedilmesidir. İkinisi de sürtünme konusunun anlaşılması ve makinelerin verimini artırmanın önemidir. (Abdo J. And Shamseldin E., 2007).

Geliştirilen yeni test metotları ve araçlarıyla mikroyapı, nanoyapı ve temas basıncı bileşenleri hakkında detaylı çalışmalar yapılmıştır.

Daha nceki yıllarda katı temas mekanizması, temas alanı kavramları, pürüzlülüğün plastisitesi ve kayma süresince malzeme transferi konuları üzerinde durulmuştur. Sürtünmenin atomik seviyedeki durumuna ya da nanotriboloji konusuna olan ilgi son yıllarda artmıştır. Nanotriboloji konusu, nanometre boyutuna küçültme ihtiyaı ve sürtünme kanunlarının makro boyuttakinden farklı olduğunu göstermek için ortaya çıkmıştır. Son yıllarda elektron mikroskobu tarayıcısı, atomik güç mikroskobu gibi gelişmiş cihazlar yüzey yapısı hakkında daha detaylı bilgileri ortaya çıkarılmıştır. Yine bu yıllarda kırılma mekanikleri, moleküler dinamik ve sonlu elemanlar metodu ile sürtünme sonucu oluşan aşınmayı hesaplayan modellemeler hususunda gelişmeler kaydedilmiştir (Dowson, 1979; Blau, 1997).

1.3.Sürtünme Deneylerinin Analizi

Sürtünme konusu tasarım, makinelerin daha faydalı kullanımı ve metal modelleme işlemleriyle yakından ilgilidir.

Sürtünme deneyleri icra edilirken yapılan bir deneyin standarttan sapmadığını garanti etmek için standart bir malzemenin kontrol amacıyla kullanılması önerilmektedir. Sürtünme üzerine yapılan çalışmalarda birçok farklı deneysel düzenlemeler kullanılır. Laboratuvar sürtünme deneylerinde kullanılan numune boyutları bir milimetreden onlarca milimetreye kadar, yük ve kayma hızları da çok geniş sınırlar arasında değişebilir. Deneylerde düzeneğin yerleştirilme şekli de deney sonuçlarını etkileyebilir.

Sürtünme kanunlarını araştırmak için pek çok sayıda sürtünme cihazı kullanılmıştır. Leonardo da Vinci (1452-1519) sürtünmeyi ölçmek için ilk çalışmaları yapmıştır. Coulomb (1781) benzer bir cihaz ile, statik ve kinetik sürtünme arasındaki farkı araştırmak için bir çalışma yapmıştır. Diğer araştırmacılar Coulomb'u doğrulamışlardır. Morin (1831) dinamik sürtünme deneylerinde hız değeri 4m/s' yi geçmeyecek şekilde çalışmıştır. Kayma hızına bağlı sürtünme katsayısı çalışmaları Bochet (1858) tarafından yapılmıştır (Philippon S., Sutter G. ve Molinari A., 2004).

Kayma sürtünmesi, uygulanan kuvvet, kayma hızı, malzeme özellikleri, kayıcı ölçüleri, yüzey pürüzlülüğü, yağlanmış veya kuru ortam olması gibi pek çok parametreye bağlı karmaşık bir olaydır. Sürtünme testlerinde kullanılan kuru sürtünmedeki sürtünme katsayısını belirtilen parametreler dışında kullanılan cihazın dinamik özellikleri de etkiler.

Sıklıkla, kullanılan pin on disk cihazları bir pin ve dönen disk arasında bir temas oluşturur. Genellikle düşük kuvvet ve küçük kayma hızları için kullanılır. Yük bir kol ile, basınçlı havayla veya ağırlıklarla uygulanır. Disk genellikle çelikten yapılır. Pin malzemesi çelik, alüminyum alaşımı, çeşitli metaller olabilir. Yüzey pürüzlülüğü test öncesi ve sonrası ölçülür. Yüksek hızlı pin-disk yüksek hız ve basınç elde etmek için dizayn edilmiştir. Bu hızlar pratikte kullanılmaz. Mühendislik ve silah tasarımı çalışmalarında kullanılır.

Bu çalışmada ise; pin-on-disk yerine pin-on-ring sistemi kullanılarak teknik kuru sürtünmede dinamik sürtünme katsayısı ele alınmıştır.

1.4. Sürtünme Katsayısı Üzerine Yapılan Çalışmalar

Çok sayıdaki araştırmalara rağmen, sürtünme anlaşılması zor bir konu olarak kalmıştır. Bu kadar ilerleme olduğu halde hala çok sayıda sorun bulunmaktadır. Kuru temaslarda sürtünme katsayısının, uygulanan yük, yüzey pürüzlülüğü, kayma hızı, sıcaklık ve temas bölgesinin elastik ve plastik özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Sürtünme katsayısının bu faktörlere bağlılığı pek çok yayında bahsedilmiştir. Sürtünme katsayısının birden fazla değişkene bağlı olması üzerine yapılan çalışmalar az sayıdadır. Teorik modellemeler yaparak elde edilen çalışma şartları ile temas parametrelerinin sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi üzerinde bazı ilerlemeler olmasına rağmen pratik değerleri elde etmenin en önemli yolu deneysel çalışmalardır. Son yıllarda sürtünme üzerine yapılan çalışmalardan örnekler aşağıda sıralanmıştır.

- **Karamış M.B., Selçuk B.** (1993), çalışmalarında cıvata bağlantılarında yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmışlardır. AISI 366 çeliği kullanılmış farklı yüzey pürüzlülüğünde ve farklı sıkma momentlerinde bağlantının otoblokaj durumunu değerlendirmişlerdir. Örnekler, farklı yüzey pürüzlülüklerine sahip olmasına rağmen bütün sürtünme katsayıları 0.12-0.33 arasında bulunmuştur. Pürüzlü yüzeylerin sürtünme katsayıları bu aralıkta üst sınırlarda, ince işlenmiş yüzeylere ait sürtünme katsayıları alt sınırdadır. İlginç olarak, parlatılmış yüzeylerdeki sürtünme katsayısı, parlatılmamış yüzeylerden daha büyük değerlere sahip olduğunu görmüşlerdir. Sebep olarak da sürtünme kuvvetlerini artmasıyla gerçek temas yüzeylerinin artmasını göstermişlerdir.
- **Tanaka, K. ve Kusumi T.** (1998), çembersel diskler ve kayıcılar arasındaki sürtünmeyi ve elastik teması inceleyerek bir analitik yöntem geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, değişik nem miktarları altında ince film tabakalı rijit bir dairesel yüzey ile bir kaydırıcı arasındaki aşınmanın analitik ve nümerik analizleri verilmiştir. Analitik modelde, kuru şartlarda anizotropik güçlü bir asit kullanılan silindirik bir kaydırıcı yüzey modeli geliştirilmiştir. Bu model ile disk üzerindeki asit geometrisi ve yükseklik dağılımları yardımıyla, gerçek temas basıncı saptanmıştır. Oysa bu durumun yüzey eğilmeleri üzerinde az bir etkiye sahip olduğu gözlenmiştir.
- **Espinosa H. D., Patanella A. J., Fischer M.** (2000) Bu araştırmacılar, eksenel statik yük ve dinamik tork uygulanarak yeni bir deneysel teknik kullanmış ve bu teknikle

takım-iş parçası arasındaki dinamik sürtünme süresini araştırmışlardır. Bir çıkış çubuğuna statik bir baskı uygulamak suretiyle bir giriş çubuğu boyunca kesme gerilmesi dağılımının nasıl yayıldığını incelemişlerdir. İncelenen malzemeler değişik yüzey özelliklerine sahip AISI 1080 çelik üzerinde kayan Ti-6Al-4V, AISI 1080 çelik üzerinde kayan Al 6061-T6 ve Al 7075-T6 ya karşı Al 6061-T6 çiftleridir. Kayma hızında 6.9 m/s'lik değere ulaşmışlardır. Sürtünme üzerinde yüzey pürüzlülüğünün etkisini anlamak için değişik yüzey pürüzlülükleri kullanmışlardır. Sürtünme katsayısının malzemedeki gerilmeye bağlılığını da değerlendirmişlerdir. Ölçülen sürtünme katsayıları, literatürde diğer deneysel yöntemlerle elde edilen değerlerle kıyaslanmıştır. Deneysel metodun; yüksek hızlı işlemlerde ve metallere şekil vermede, dinamik sürtünme katsayılarının doğrudan ölçümü için iyi bir metod olduğunu gözlemlemişlerdir.

- **Rajagopalan S. ve Prakash V.** (2001), yaklaşık 10 mm'lik kayma mesafesinde 125 MPa'a kadar normal basınç ve 15 m/s'ye kadar kayma hızı altında kayan yüzeylerin dinamik sürtünme özelliklerini araştırmak için deneysel bir teknik kullanmışlardır. Bu yeni sistem malzemelerin yüksek deformasyon hızını araştırmak için geçmişte yaygın bir şekilde kullanılan Kolsky-bar konvansiyonel burulma sisteminin yenileştirilmiş şeklidir. Deneysel çalışmada sürtünme bölgesinde transduser kullanmadan sürtünme-gerilme, kayma hızı ve kayma yer değiştirmesi gibi kritik sürtünme parametrelerinin anlık ölçülmesi sağlanmıştır. Ek olarak bu deney ters kaymada olduğu gibi düz kayma sırasında da dinamik sürtünme gerilmesindeki değişim hakkında bilgi vermiştir. Deneysel çalışmalarında 6061-Al (T6)/1018 çelik ve 7075-Al (T6)/takım çeliği (D3) sürtünme çiftleri kullanmışlardır. Kinetik sürtünme katsayısının sürtünen yüzeylerdeki pürüzlülüğe bağlı olarak arttığını görmüşlerdir. Yumuşak/sert (7075 Al/ takım çeliği (D3)) sürtünme çiftinde sürtünme kuvvetinin kontrolü için sert metalin yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir. Ölçülen kinetik sürtünme katsayısı 100 Mpa basınç altında ve 2-10 m/s kayma hızında kayma hızından hemen hemen bağımsızdır. Ters kayma sırasında dinamik sürtünme gerilmesinin düz yönlüye göre iki kat daha fazla olduğu görülmüştür. Sürtünme gerilmesindeki bu artışın sebebi, kayma işlemi devam ederken sürtünen yüzeylerde oksit ve diğer tabakaların kopmasıyla düzgün yüzeyler arasındaki temasın azalmış olmasına bağlanmıştır.

- **Lin J.F. ve Chou C.C.** (2002), klasik oksidasyon teorisi yerine CYM kullanarak bir diskin aşınma oranını temas sıcaklığının bir fonksiyonu olarak göstermeye çalışmışlardır. Merkezi karma dizaynı kullanarak aşınma oranı parametresi, temas sıcaklığı ve sürtünme kuvvetini kayma hızı ve uygulanan yükün bir fonksiyonu olarak ifade etmeye çalışmışlardır.
- **Philippon S., Sutter G. ve Molinari A.** (2004), Statik ve dinamik şartlar altında metal-metal üzerinde kuru sürtünme çalışmak için yeni bir deney cihazı dizayn etmişlerdir. Aynı sürtünme cihazını kullanarak hava gazı silah seti ve hidrolik silindir ile yüksek kayma hızlarında 13 m/s'den 60 m/s'ye ve düşük hızlarda 0 m/s'den 3 m/s'ye kadar değiştirerek kayma hızının ve normal kuvvetin sürtünme üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmanın sonucunda, kayma çiftleri arasında 1m/s'den daha küçük hızlarda sürtünme katsayısının gerçek temas bölgesindeki pürüzlülüğe bağlı olduğunu görmüşlerdir. Aynı pürüzlülük şartlarında sürtünme katsayısının hıza ve normal kuvvete bağlı olduğu ve normal kuvvet sabit tutulup kayma hızı artırıldığında, sürtünme katsayısının düştüğü gözlenmiştir. Aynı şekilde sabit hız için sürtünme katsayısı uygulanan kuvvet artırıldığında azaldığını ve sürtünme katsayısındaki azalmanın sebebi kayma sırasında oluşan ısı ile artan yüksek sıcaklıklarda oksit oluşumu olduğu ifade edilmiştir. Yüksek hızlarda ve normal kuvvetlerde kayma yüzeyleri erimiş metalin yağ filmi olarak yüzeyden ayrılması ile sürtünme katsayısının düştüğü beyan edilmiştir. Sürtünme katsayısı; kullanılan deney cihazına ve yapılan deneylere de bağlı olduğu araştırmacılar tarafından belirtilmiştir.
- **Özdemir U. Ve Erten M.** (2004), Pin on disk cihazı ile oda sıcaklığında kuru sürtünme şartlarında, çelik ile sinterlenmiş karbür malzeme çifti arasında, 45 N'luk normal kuvvet ve 600 d/dk dönme hızında tüm numunelerdeki sürtünme kuvvetini ölçmüşlerdir. Sensörler yardımıyla dijital cihazdan okunan sürtünme kuvveti ile sürtünme katsayısı denklemi kullanılarak sürtünme katsayısı değerlerine geçilmiştir. Plazma nitrüleme parametrelerindeki değişime bağlı olarak takımlarda meydana gelen sürtünme katsayısı değerlerini incelediklerinde tüm nitrüleme hallerinde sürtünme katsayısının nitrüleme yapılmamış hale göre azaldığını, sürtünme katsayısının nitrüleme sıcaklığı, nitrüleme süresi ve gaz karışım oranına bağlı olarak değiştiğini görmüşlerdir.
- **Abdo,J. Ve Shamseldin E.** (2007), normal yükün, kayma hızının, yüzey pürüzlülüğünün ve malzemenin elastisite modülünün sürtünme katsayısı üzerindeki

etkilerini açıklayabilmek için cevap yüzey metodu (CYM) kullanarak sürtünme deney sonuçlarına dayalı bir analitik model geliştirmişlerdir. Sürtünme katsayısını bu faktörleri değiştirerek mikro-tribometre tezgâhında deneysel olarak incelemişlerdir. Bu tezgâhta sürtünme kuvveti, normal kuvvet ve sürtünme katsayısı ölçülmektedir. Ayrıca bu faktörlere bağlı olarak CYM kullanarak sürtünme katsayısı ile ilgili olarak bir istatistiksel model geliştirmişlerdir. Sürtünme katsayısında bu faktörlerin önemi faktör değişimlerinin incelenmesiyle vurgulanmıştır. Bağlı kayma hızı, temas yükü, ve elastisite modülü ile pürüzlülük arasındaki etkileşim önemli model terimleri olarak bulunmuştur.

1.5 Tezin Amacı ve Kullanılan Yöntem

Metallerin sürtünmesi üzerine yapılacak bir çalışmada sürtünme koşulları olarak çalışma ortamındaki sıcaklık değeri, kimyasal etkiler, hareket, konum, sistem ve yük durumları, çalışma süresi, malzemelerin kimyasal bileşimleri, sertlikleri, mikroyapı özellikleri ve uygulanmış ısıl işlemler, sürtünen yüzeyler arasındaki ara madde ve yüzey pürüzlülüğü gibi faktörler ilk akla gelenlerdir.

Tezin ilk kısmında (Bölüm III), sürtünmenin genel karakteri hakkında bilgi sahibi olmak üzere, hiçbir işleme tabii tutulmamış AISI 1040 ve AISI 4140 çelikler için, pin-on-ring sisteminde teknik kuru sürtünme deneyleri yapılmıştır. Deneylerde sürtünme koşullarındaki etkin faktörlerden olan temas yükü, kayma süresi, kayma hızı ve başlangıç yüzey pürüzlülüğünün sürtünme katsayısına olan etkileri araştırıldı. Karşı eleman olarak AISI 5115 çeliği kullanıldı. Literatürde daha önceden yapılmış, sürtünme katsayısı araştırmalarında incelenen faktörlerin benzer etkileri, bu çalışmada yapılan deneyler sonucunda da gözlemlendi.

İkinci kısımda ise, yine pin-on-ring kuru sürtünmeli noktasal temasa ait bir istatistiksel modellemeye gidildi. Bu amaçla istatistiksel modele veri teşkil edecek bir takım deneyler yapıldı. Deneyler, PLINT marka çok amaçlı sürtünme ve aşınma deney cihazında yapıldı. Deneylerde 4 değişik yük, süre, dönme hızı ve yüzey pürüzlülüğü sürtünme faktörü ve her faktöre ait 5 değişik faktör değeri kullanıldı. Deney süresince sürtünme kuvveti değerlerinin anlık değişimleri gerçek zamanlı olarak uygun bir analog/dijital çevirici kart ve yazılımla bir bilgisayara kaydedildi. Burada elde edilen ortalama sürtünme kuvveti değeri ile dinamik sürtünme katsayısına geçildi.

Modelleme için Cevap Yüzey Metodu diye bilinen (Raymond, 1971) istatistikî bir yöntem tercih edildi. Yöntemde cevap olarak kullanılmak üzere, yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar En Küçük Kareler Regresyonu ile anlamlı hale getirilerek, ikinci dereceden bir istatistiksel model elde edildi. Daha sonra modelin uygunluğu standart sapma ve korelasyon analizi ile araştırıldı. Sonuçta yük, süre, devir ve pürüzlülük faktörlerine bağlı olarak sürtünme katsayısı hakkında yaklaşık olarak %95'lik doğruluklu bir model elde edildi.

Sonuç olarak, tribolojik sistemlere Cevap Yüzey Metodu uygulayarak, sistemdeki faktörlerin etken oldukları aralıkları görmek, birbirleriyle olan etkileşim oranlarını bulmak, bunları optimize etmek mümkün olacaktır diye düşünülmektedir.

TRIBOLOJİDE SÜRTÜNME ESASLARI

2.1. Giriş

Günlük işlerimizde hemen her yerde kullandığımız makineleri oluşturan metal veya metal olmayan makine elemanları, birbirleriyle hareketli veya hareketsiz olarak temas halindedirler. Temasta olan ve birbirlerine göre rölatif hareket yapan iki elemanın temas yüzeyleri arasında hareketi engelleyici özelliğe sahip, şiddeti sınırlı olan sürtünme kuvveti mevcuttur. Bu kuvvet sonucu elemanlarda aşınma meydana gelirken, sistemde de sıcaklık artışına bağlı olarak enerji kaybı ortaya çıkar.

Dünya çapında yapılmış olan istatistiklere göre makine elemanlarının yaklaşık olarak %70'inin işe yaramaz hale gelmesinin nedeni aşınmadır. Aşınmanın bilinmesi ve önlenmesi ya da en azından azaltılması için gerekli tedbirlerin alınması aşınmayı ortaya çıkaran sürtünmenin kontrol altına alınmasıyla mümkün olabilecektir.

2.2. Sürtünme ve Triboloji İçin Temel Esaslar

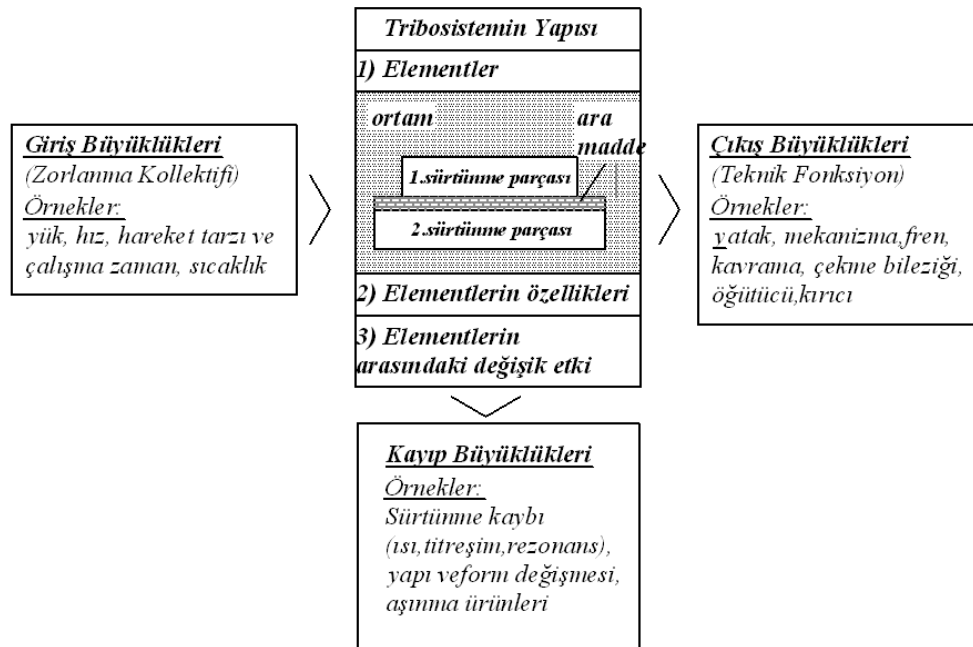
Sürtünme ve aşınma, katı cisim yüzeylerinin rölatif hareketi sonucu olur. Sürtünme, genel olarak birbiri üzerinde temas eden katı cisimlerin hareket ve hareket ihtimaline karşı gösterdiği dirençtir. Aşınma ise, mekanik olaylar sonucu, küçük parçacıkların kopmasıyla, yüzeyde meydana gelen ve arzu edilmeyen değişimlerdir.

Ancak bu tarifler, bugünün bakışı ile biraz değişiklikler göstermektedir. Sürtünme, yalnızca kuvvet ve momentle değil, ayrıca mekanik enerjinin, büyük ölçüde ısı olmak üzere diğer enerji formlarına dönüşmesiyle olur. Sürtünme kavramının, rölatif harekette, hareketin başlamasında ve sona ermesinde, temas eden madde yüzeylerinde meydana gelen mekanik enerji kaybı olarak ayrı ayrı incelenmesi gerekir.

Sürtünme ve aşınma ile ortaya çıkan tribolojik olaylar, yalnızca iştirak eden malzeme ve onların özelliklerine değil, tüm madde çiftlerinin karşılıklı etkileri ve dıştan etki eden zorlama çiftlerine bağımlı olur. Tribolojiye esas olan triboteknik yapı elemanlarını açıklayabilmek ve amaçlanan malzeme seçimini yapabilmek için, çoğu zaman Şekil 2.1 'de şematik olarak gösterildiği gibi, sistem analizine gidilir.

Tribosistem, ana cisim, karşı cisim, ara madde ve çevre olmak üzere dört elemandan meydana gelir.

Triboişlem esnasında çeşitli değişken etkiler meydana gelebilir ve malzeme çiftinin yüzey özelliklerinde önemli değişimler olabilir. Dıştan etki eden yük, hız, hareket tarzı ve çalışma, yol, zaman ve sıcaklık temel büyüklükler (birleşik zorlanma) tribosistemin yapısı üzerinde arzu edilen yararlı büyüklüklere de dönüştürülebilir. Bu duruma örnek olarak, hareket ve dönme momentinin taşındığı kaymalı taşıyıcılar, burçlar, yataklar, malzeme şekillendiren çekme silindirleri ya da hareketi durduran frenler söylenebilir. Tüm bu olaylarda, sürtünme ve aşınmanın sebep olduğu kayıp büyüklükler görülür ve tribosistem, teknik fonksiyona uygun olarak düzenlenebilir (Czichos ve Habig, 1992).



Şekil 2.1 Habig ve Czichos'a göre bir tribosistemin şematik olarak gösterilmesi

2.3. Sürtünme

Sürtünme, bir katı cismin kendisi ile temas eden başka bir katı cismin bağıl hareketine veya hareket ihtimaline karşı gösterdiği dirençtir. Birbiriyle temasta olan yüzeyler arasındaki sürtünme hareketi kayma, yuvarlanma veya bu iki hareketin bileşimi şeklindedir. Sürtünme genelde kuvvete ve enerjiye bağlı ölçü büyüklükleri ile tanımlanır. Bunlar (Czichos ve Habig, 1992) büyüklükler şunlardır:

• Sürtünme Kuvveti (F_R): Bu kuvvet sürtünmeden dolayı bir rölatif harekete karşı mekanik direnç olarak meydana gelir ve hareket yönüne zıttır. İki şekli vardır ve bunların arasında belli bir farkın gözetilmesi gerekir.

$F_{RS} \rightarrow$ Statik sürtünme (rölatif hareket olmadan)

$F_{RD} \rightarrow$ Dinamik sürtünme (rölatif hareket varken)

• Sürtünme Momenti (M_R): Sürtünmeden dolayı dönen rölatif harekete karşı direnç olarak ortaya çıkar.

• Sürtünme Katsayısı (μ): Sürtünme kuvvetinin normal kuvvete oranıdır. Normal kuvvet F_N ile gösterilirse denklem (2.1) elde edilir.

$$\mu = F_R / F_N \quad [2.1]$$

• Sürtünme İşi (A_R): Sürtünme altında bir hareket olayının meydana getirdiği iştir.

• Sürtünme Gücü (P_R): Sürtünme altındaki hareket ile harcanan güçtür.

• Sürtünme Açısı (ρ): Normal kuvvetin doğrultusu ile sürtünme kuvveti ve normal kuvvetin bileşkesinin doğrultusu arasındaki açıdır.

$$\rho = \text{Arctan}(\mu) \text{ veya } \mu = \text{Tan}(\rho) \quad [2.2]$$

Bunun dışında bir de statik sürtünme açısı vardır. Statik sürtünme açısı kayma olayının başlama anından önceki sürtünme açısıdır. (2.2) bağıntısına ‘sıfır’ indisi eklenerek tanımlanır ($\rho_0 = \text{Arctan } \mu_0$).

Sürtünme ölçü büyüklüğü tek bir maddenin veya malzemenin özelliği olarak değil, bilakis malzeme çiftiyle, yani genelde triboloji ile ilgili sistemle belirlenir. Bu da basitleştirilmiş olarak;

$$\text{Sürtünme Ölçü Büyüklüğü} = f(\text{Sistemin yapısı, Birleşik zorlama})$$

şeklinde yazılır. Sistem yapısında, sürtünmeye doğrudan iştirak eden cisimler ve malzemeler ile onların özellikleri yer alır. Birleşik zorlama denilince kinematik, normal kuvvet, hız, sıcaklık ve zorlama süresi anlaşılır. Sürtünmenin karmaşıklığından dolayı, sürtünme büyüklüklerini genelde teorik olarak hesaplamak mümkün değildir (Weck, 1991).

2.3.1.Sürtünme Kanunları

Sürtünme kuvvetinin ilk özelliği; sürtünme kuvveti cismi harekete zorlayan kuvvetten küçükse hareket oluşur. Sonuç olarak ortaya çıkan sürtünme kuvveti uygulanan kuvvete

eşit fakat zıt yönlüyse hareket olmaz. Parçayı harekete zorlayan kuvvet sürtünme kuvvetinden büyük olduğu zaman cisim bu kuvvet doğrultusunda hareket eder ve sürtünme kuvveti bu kuvvetten küçük olup yüzeye paraleldir.

Sürtünme kuvvetinin ikinci özelliği ise yatay hareket oluştuğunda sürtünme kuvveti yüzeyin bağıl hızına zıt yönde ortaya çıkar.

Sürtünme kanunları sürtünme kuvvetinin büyüklüğü ile ilgilidir. Birbirine temasta olan katı cisimler için klasik sürtünme kanunlarını Amontus (I.ve II. Yasa,1699) ve Coulomb (III. Yasa, 1781) ortaya koymuşlardır:

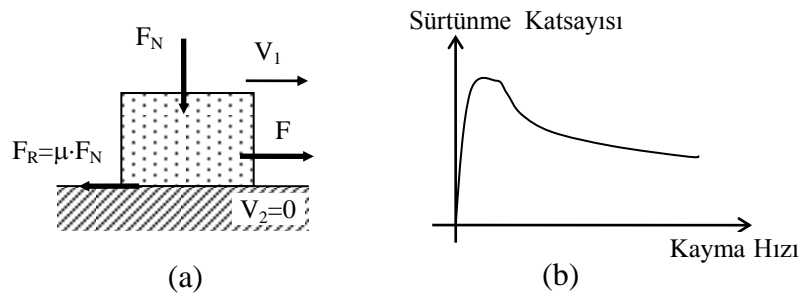
1. Sürtünme kuvveti normal kuvvet ile orantılıdır.
2. Sürtünme kuvveti sürtünen yüzeylerden bağımsızdır.
3. Sürtünme kuvveti küçük kayma hızları için kayma hızından bağımsızdır.

Bunlar, kuru sürtünme kanunları olarak bilinir. Bu kanunların doğruluk kontrolü mikroskobik ölçekte rahatlıkla görülebilir.

2.3.2. Sürtünme Katsayısı

Sürtünme katsayısının, kayma mesafesi ve süresine, sertliğe, temas yüzeyinin ortalama tane büyüklüğüne ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu çeşitli deneylerle gösterilmiştir. Bu katsayı, artan kayma mesafesi ve süresi, yüzey tabakasının artan tane büyüklüğü ile belirli bir değere kadar artar ve daha sonra yaklaşık bir değerde devam eder.

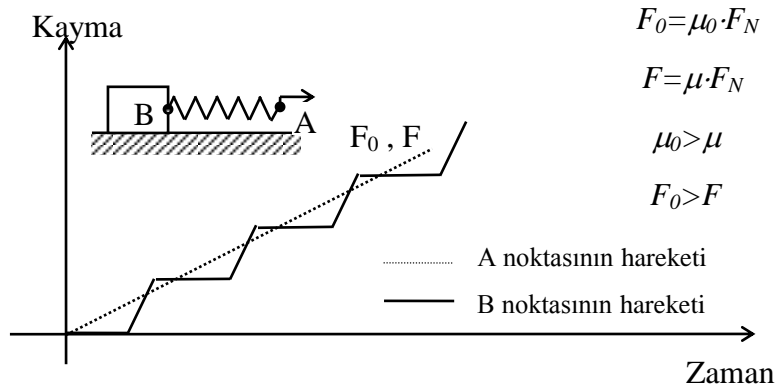
Genellikle statik sürtünme katsayısı μ_0 , kinematik sürtünme katsayısı μ' den daha büyüktür. Kayma hızı arttıkça kinematik sürtünme katsayısı az da olsa azalır. Şekil 2.2-b'den de görüldüğü gibi sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcındadır. Buna karşılık normal kayma hızlarında, hıza göre sürtünme katsayısının değişimi çok az olduğundan sürtünme katsayısı sabit sayılabilir (Akkurt, 1990).



Şekil 2.2 Kuru sürtünme modeli (Akkurt, 1990)

Hareketin başlangıcında ilk harekete geçiş anında bir kay-dur olayı gerçekleşir. Bu olay statik sürtünmenin, kinematik sürtünmeden daha büyük olması ve sürtünme halinde bulunan elemanı harekete geçiren ara elemanının, şekil değiştirme kabiliyetine sahip olmasına bağlıdır. Ara eleman bir yay olarak düşünülürse, olayı incelemek için Şekil 2.3'deki model oluşturulabilir.

Hareketsiz haldeki B elemanını harekete geçirmek için yayı, $F_0 = \mu_0 \cdot F_N$ değerinde bir kuvvetle çekmek gerekir. Eleman harekete geçtikten sonra çekme kuvveti $F = \mu \cdot F_N$ olur. $\mu_0 > \mu$ olduğuna göre $F_0 > F$ 'dir. Başlangıçta B elemanı, çekme kuvveti F_0 değerine ulaşmadan, yani sürtünme kuvveti yenilmeden harekete geçmez. Bu süre içerisinde çekme elemanlarında (yayda) şekil değiştirme meydana gelir. Verilen enerji şekil değiştirme enerjisine dönüştürülür. Hareket başladığında, sürtünme aniden azalır ve çekme elemanında biriken şekil değiştirme enerjisi B elemanını bir sıçrama şeklinde ileri kaydırır. Elemanın ataletinden dolayı, bu enerji çabuk tükenir ve eleman durur. Olaylar tekrarlanır ve B elemanı kay-dur şeklinde hareket eder. Sistemin A noktası doğrusal bir yol alırken, B elemanı kademeli bir yol çizer.



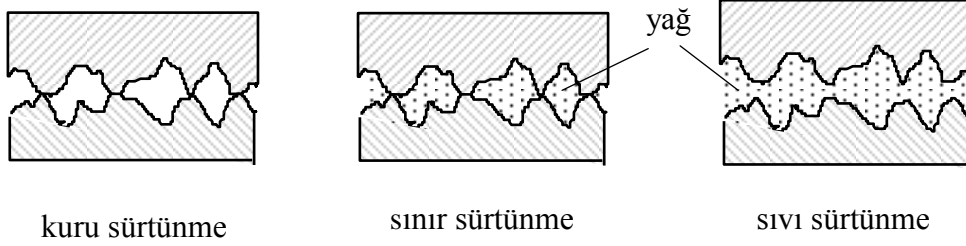
Şekil 2.3 Kay-dur (Stick-Slip) olayına ait model (Akkurt, 1990)

2.3.3. Sürtünme Çeşitleri

Triboloji çerçevesinde temas çiftinin durumuna göre sürtünme beş grupta toplanabilir. Sürtünme çeşitlerinden bir kısmı Şekil 2.4'de verilmiştir.

- Katı cisim (kuru) sürtünmesi: Katı maddenin doğrudan doğruya temastaki sürtünmesidir.
- Sınır sürtünme: Sürtünme çiftinin yüzeyi moleküler boyutta, örneğin bir yağlama maddesinin ince bir tabaka şeklinde malzeme yüzeyine yapışması durumundaki sürtünmedir.

- Sıvı Sürtünmesi: Sürtünme çiftini boşluksuz ayıran bir sıvı film içinde oluşan sürtünmedir. Bu sıvı film, hidrostatik veya hidrodinamik olarak meydana gelir.
- Gaz Sürtünmesi: Sıvı sürtünmesinde olduğu gibidir. Ancak burada çift arasında gaz filmi meydana gelir. Bu gaz filmi ise, aerodinamik ve aerostatik olarak iki şekilde bulunur.
- Karışık Sürtünme: Katı cisim sürtünmesinin sıvı veya gaz sürtünmesi ile bir arada oluşmasına denir.



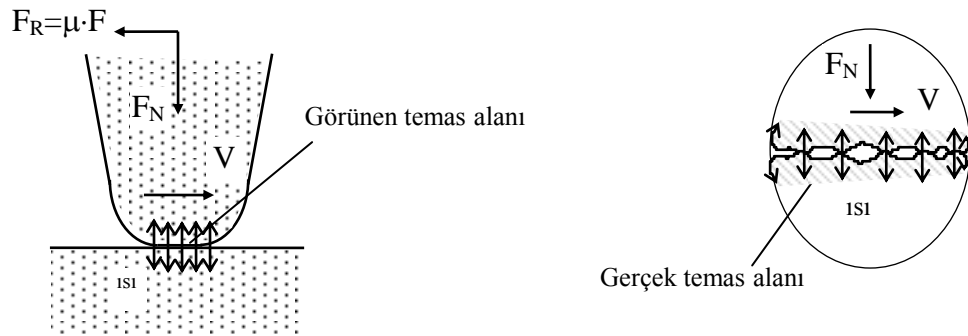
Şekil 2.4 Sürtünme çeşitleri

Fiziksel anlamda kuru sürtünme sadece vakum ortamda mevcuttur. Makine tekniğinde sürtünme, sürtünmenin meydana geldiği çevre ve çevreyi oluşturan elemanların (oksit, yağ, su buharı, pislik vb.) etkisindedir. Atmosferin etkisindeki sürtünme yüzeylerinde absorbe edilmiş gazlar, bu gazların oluşturduğu oksitler, yağlar ve pislikler gibi kimyasal bileşikler vardır. Bunlar sürtünmeyi kısmen azaltır ve bir yağlayıcı gibi rol oynarlar. Bu yüzey tabakaları çok etkin fiziksel ve kimyasal yöntemlerle vakumlu bir ortamda temizlendiğinde metalsel temiz bir yüzey elde edilir. Bu tip yüzeylerde metal-metal teması sağlamak mümkün olur ve böylece de kuru sürtünme meydana gelir. Ayrıca bu yüzey tabakalarının hareketi sonucunda üst tabakanın metal yüzeyinin yırtılmasıyla metal-metal teması olur. Metalik temas olan noktalarda ise soğuk kaynaklaşma olayı rahatlıkla meydana gelmektedir. Bu kaynaklaşma genelde tam temas eden yüzeylerdeki çeşitli kimyasal bileşikler içeren tabakalar arasında meydana gelir. Sürtünme sırasında bu kaynama noktaları, ya hareketi engeller ya da yüzeylerden parçacıklar kopartarak yırtılmaları neden olurlar. Bu duruma göre sürtünme; metal kaynak bağları ile çeşitli kimyasal bileşikler içeren tabakalar arasındaki bağların oluşturduğu dirençtir. Sürtünme kuvveti ise hem kaynak bağlarının hem de kimyevi bileşiklerin meydana getirdiği tabakaların arasındaki bağları koparan kuvvettir. O halde sürtünme kuvveti temas yüzeylerindeki düzensizlikler ve moleküler

çekme kuvvetleri nedeni ile temas eden yüzeylere etkiyen çok sayıdaki kuvvetlerin bileşkesidir.

2.4. Kuru Sürtünme

Sürtünen iki cisimde aşınmanın meydana geldiği temas alanı önemlidir. Çünkü tribolojik olayların meydana geldiği yer burasıdır. Temas alanını, gerçek ve görünen temas alanı olarak ikiye ayırmak mümkündür. Gerçek temas alanı görünen temas alanından küçüktür (Şekil 2.5). En hassas işleme yöntemleriyle de olsa işlenen katı malzemelerin yüzeyi hiç bir zaman düz değildir. Çünkü imalat tekniğinde tam olarak pürüzsüz düz bir yüzeyin elde edilmesi imkânsızdır.



Şekil 2.5 Tipik bir kayma çifti (Selçuk, 1994)

Yüzeyi elde etmede kullanılan kesici ve yontucu araçlar ne kadar itinayla hazırlanırsa hazırlansın, işlem neticesinde elde edilen yüzey üzerinde mutlaka birkaç mikron yüksekliğinde mikroskobik pürüzler bulunur. Bu yüzeylerin temas etmesiyle karşılıklı pürüzler etkileşirler. İlk temas birkaç pürüz tepeleri arasında olur. Pürüz tepeleri arasındaki girintilerde temas söz konusu değildir. Gerçek temas alanı, temasta olan pürüzlerin toplam alanıdır.

Yüklemenin şekli ve yük, temas alanının büyüklüğünü etkiler. Yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar ve ezilirler. Bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Yüklemenin devam etmesi ile de pürüz sayısı azalır ve gerçek temas alanı görünen temas alanına yaklaşır. Sürtünme deneylerindeki pek çok

faktörden biri olan gerçek temas alanı, uygulanan yükü orantılı olup malzemenin boyutundan bağımsızdır. Temas eden pürüzsüz yüzeylerde meydana gelen adhezyon yapışması soğuk metal kaynağına benzer bir işlemdir.

2.5. Sürtünmenin Aşınma Üzerine Etkileri

Cisimlerin yüzeylerinin sürtünmesiyle bir cismin yüzeyinden çok küçük parçaların kopup ayrılmasına aşınma denir. Olayın başlıca nedenlerinin; yüzey pürüzlerinin sürtünme sırasında kırılmaları ve sürtünen cisimlerin yer yer birbirlerine atomal mertebede yaklaşıp karşılıklı bağlandıktan (soğuk kaynak) sonra ancak küçük bir parçanın kopması suretiyle ayrılabilmesi olduğu sanılmaktadır.

Aşınma hakkında tam açıklayıcı bir tanım yapmak zor olmasına rağmen kabul edilen birkaç tanım şöyle verilebilir.

- Rölatif hareket ve yüzey basıncı altında kalan iki cismin teması sonucu ortaya çıkan mekanik enerjinin etkisi sonucunda, malzeme yüzeyinden parçacıkların kopması ile oluşan malzeme yıpranmasıdır.
- Mekanik etkenler ile cisimlerin yüzeyinde zamanla oluşan malzeme kaybıdır.
- Katı cismin yüzey bölgesinden tribolojik zorlamalar sonucu sürekli ilerleyen malzeme kaybıdır.
- Dış etkiler altında temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki ve kimyevi değişimlerin sonucundaki yıpranmadır.

Mühendislik malzemesinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için şu şartların mevcut olması gerekir.

- Mekanik bir etken olması,
- Sürtünmenin (bağıl hareketin) olması,
- Yavaş ve devamlı olması,
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- İsteğimiz dışında oluşmasıdır.

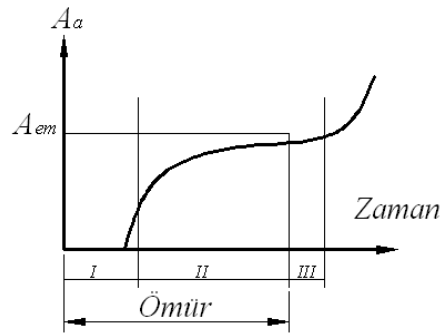
Aşınma, ne bir malzeme ve ne de bir malzemenin yüzey özelliğidir. Bilakis bir sistem özelliğidir. Çeşitli makine elemanlarının, mühendislik malzemelerinin kullanma ömürlerine büyük oranda etki eden aşınma giderilememekte ve birbiriyle sürtünerek

çalışan makine elemanlarının temas yzeyleri zamanla aşınarak değişikliğe uğramaktadır. Bu nedenle çok değişkenli bir fonksiyon olan aşınmanın srekli incelenmesi gerekir (Selçuk, 1994).

Aşınma pratikte; zaman ile gelişen aşınma ve aniden meydana gelen aşınma olarak ikiye ayrılır.

Zamanla gelişen aşınma, Şekil 2.6'da görüldüğü gibi üç safhada meydana gelir. Birinci safha (I) parçaların birbirine alıştığı rodaj isimli aşamadır. Bu safhada parçaların ilk çalışmaları sırasında Şiddetli bir aşınma meydana gelir. Bu aşınma daha sonraki aşınmayı büyük ölçüde etkiler. İkinci safha (II) aşınmanın çalışma sırasında temas noktalarında meydana gelmesidir. nc safha (III) ise, artan aşınma hızı ile Şiddetli aşınmanın başlamasıdır.

Aniden meydana gelen aşınmada ise, parçaların yzeyleri aniden bozulur veya bazı hallerde birbirine kilitlenir ve çalışamaz duruma gelir. Genellikle eř çalışan malzemelerin seçiminde yapılan hatalardan veya yağlamanın yetersizliğinden meydana gelir .



Şekil 2.6 Aşınma zaman bağıntısı

2.5.1. Adhezif Aşınma

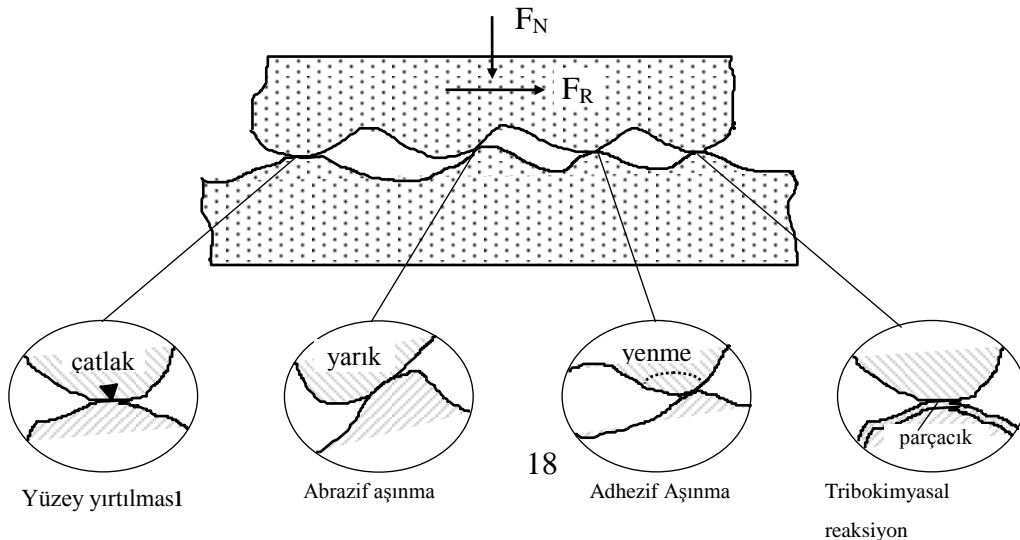
Pek çok aşınma tipleri olmasına karşın sürtünmenin esas olarak gözlenen tipi Adhezif aşınmadır:

- Adhezif aşınma: Özellikle kayma sürtünmesi yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yzeyleri arasında adhezif çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, temasta olan çok küçük pürüz tepelerine, metal

ağırlığından veya bir kuvvetten dolayı çok yüksek değerlerde bir basınç etkir. Bu basıncın değeri temas noktalarındaki pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyon meydana gelerek, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaşmasına neden olur.

Adhezif aşınma ile ilgili deneylerden elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanabilir :

- Adhezif aşınma, benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana gelmektedir.
- Olay, yüzeylerin izafi hızına ve normal kuvvete bağlıdır. Pratik bakımdan nispeten yüksek hız ve yüklemelerde görülen bir aşınma şeklidir.
- Adhezif aşınma, sürtünmeyi tayin eden bütün kaynak noktalarında meydana gelmemektedir.
- Oksit veya nemden oluşan doğal tabakanın olay üzerinde etkisi büyüktür. Temiz yüzeylerde olay daha küçük hız ve yüklemelerde meydana gelir.
- Yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi, yüzeylere yapışmış yağ tabakası büyük ölçüde adhezyon aşınmasını önlemektedir.
- Yüzeylerden birinin sertliği diğerine göre nispeten büyük ise, kaynak bağlarının kopması yumuşak malzemelerde olur ve yumuşak malzeme sert malzemenin yüzeyine transfer edilir.
- Yüzeyler arasında sert malzeme parçacıkları, yani abrazif aşınmayı meydana getirecek koşullar bulunduğu takdirde, adhezif aşınma oluşmaz. Bu nedenle adhezif aşınma, yüzeyler arasında abrazif bir etkenin bulunmaması halinde oluşan aşınma türü olarak ifade edilmektedir (Yücel, 1999).



Şekil 2.7 Bazı aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (Czichos ve Habig, 1992)

2.6 Sonuç

Günümüzdeki teknik işlemlerdeki ve bilimsel laboratuarlardaki araştırmalar sürtünmeyi ve aşınmayı azaltma ve kontrol etme çalışmaları şeklinde yoğunlaşmıştır. Böylece aşınma ve sürtünmenin azaltılması ile malzeme kaybı engellenip boyut hassasiyeti sağlanırken enerji israfı da önlenmiş olacaktır. Bu aşamada en önemli işlemler yeni malzemeler geliştirmek şeklinde devam etmektedir. Bunun en can alıcı noktasında nano teknolojili malzemeler yatmaktadır. Bu tip malzemeler nano seviyede katılan bir kısım parçacıklar sayesinde süper özellikler kazandırılmış malzemelerdir. Sürtünme konusundaki en önemli çalışma ise Amerika'da Argonne National Laboratuar'ında Prof. Dr. Ali Erdemir'in sürtünmeyi azaltmak adına geliştirdiği bir malzemedir. Bu malzeme çok sert ve yüzeyi çok kaygan olacak şekilde nano teknoloji ile üretilmiştir (basariliturkler.ufoss.com/index.php/post/208/).

Sonuç olarak temas halindeki yüzeyler ve hareket eden yüzeyler arasındaki ilişkileri inceleyen bilim dalı olan tribolojinin ve onu destekleyen malzeme biliminin getirdiği son yenilikçi çalışmalar sürtünmeyi azaltmak dolayısıyla sürtünme katsayısını küçültmek yönündedir.

DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1. Giriş

Kuru temaslarda dinamik sürtünme katsayısının, uygulanan yük, yüzey pürüzlülüğü, kayma hızı, sıcaklık ve temas bölgesinin elastik ve plastik özelliklerine bağlı olduğu bilinmektedir. Teorik modellemeler yaparak elde edilen; çalışma şartları ile temas parametrelerinin dinamik sürtünme katsayısı üzerindeki etkisi üzerinde bazı ilerlemeler olmasına rağmen pratik değerleri elde etmenin en önemli yolu deneysel çalışmalardır.

Bu bölümde yapılan deneysel çalışma, bir sonraki bölümde verilecek olan istatistiksel yöntemde kullanılmak üzere yapılacak olan deneyler için, ön araştırma deneyleri niteliğindedir. Deneylerde teknik kuru sürtünmeli pin-on-ring temas geometrisi tercih edilerek (Şekil 3.1a) noktasal temas sonucu oluşan, dinamik sürtünme katsayısı incelenmiştir. Temas yükü, kayma süresi, kayma hızı ve numune başlangıç pürüzlülük değerine bağlı olarak, sürtünme kuvveti dolayısıyla dinamik sürtünme katsayısı değişimi, AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için deneysel olarak araştırılmıştır.

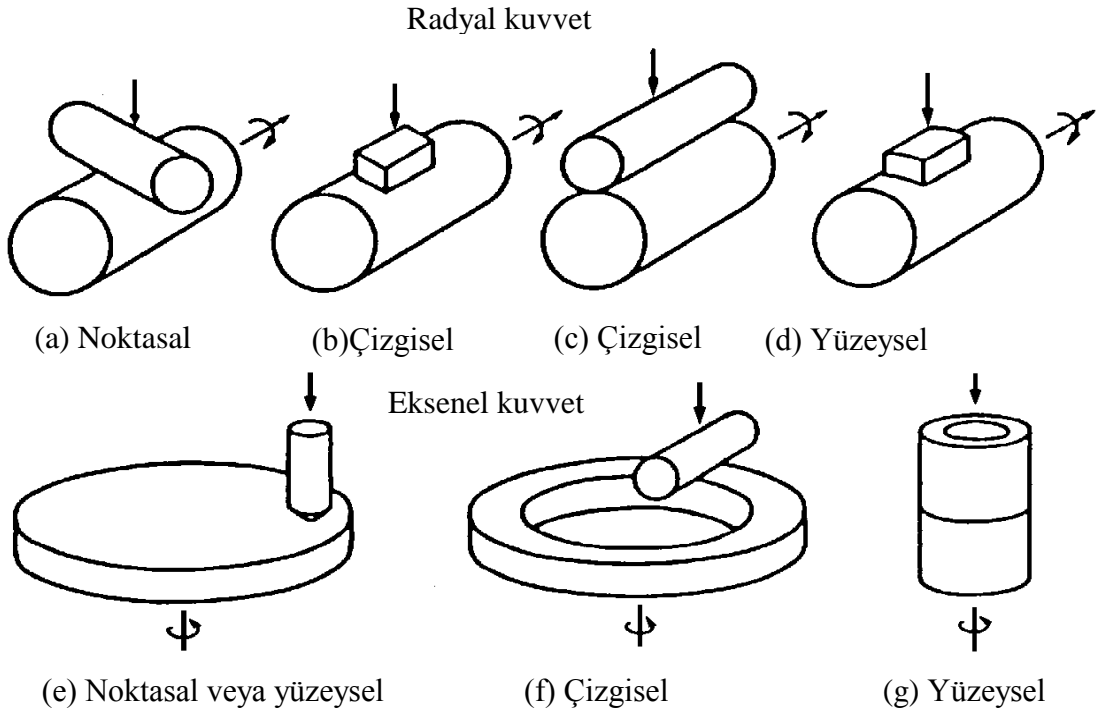
3.2. Tribolojide Sürtünme Deneyleri ve Tribometri

Tribolojik laboratuvar deneylerinin uygulanabilmesi için çok sayıda ölçü ve deney cihazları (kısaca Tribometri) geliştirilmiştir. Tribometride genellikle basit geometrik deney numuneleri kullanılmaktadır. Çok çeşitli deney veya testler için oluşturulmuş laboratuvar tribometrileri American Society of Lubrication Engineers (ASLE) araştırmaları kapsamında analiz edilmiştir. Yaklaşık 250 adet laboratuvar tribometrisinin ele alındığı bu analiz sonucunda laboratuvar deneylerinde kullanılan deney numunelerinin geometrileri şöyle sınıflandırılmıştır:

- Küre-küre teması (genellikle)
- Çapraz silindir
- Pim-disk (aynı veya zıt yönde hareketli)
- Yüzey-yüzey teması (aynı veya zıt yönde hareketli)

- Diske karşı dönen pim (alın yüzey teması)
- Pime karşı dönen disk (alın yüzey teması)
- Bilezik-bilezik (alın yüzey teması)
- Pime veya bileziğe karşı dönen makara (dış yüzey teması)
- Küp geometrisine karşı dönen makara (dış yüzey teması)
- Makara-makara veya disk-disk (dış yüzey teması)
- Çoklu deney numunesi (dört bilya)

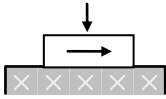
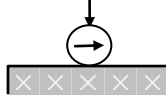

Şekil 3.1’de laboratuvar tribometrisinde sıkça kullanılan basit deney numune temas geometrilerinden bir kısmı gösterilmiştir.



Şekil 3.1 En çok rastlanan temas şekilleri (Czichos ve Habig, 1992)

Çizelge 3.1’de ise temas geometrilerine bağlı olarak hareketin şekli, hareketin seyri, zorlama şartları ve bu şartların uygun bölgeleri tanımlanmıştır.

Çizelge 3.1 Tribometrik sistemlerle ilgili bazı veriler (Czichos ve Habig, 1992)

| | | | |
|---------------------------------------|---|---|---|
| Deney sisteminin yapısı |  |  |  |
| Temas geometrisi | benzer (yüzeysel temas) | zıt (çizgisel veya noktasal temas) | |
| Örnek | Pin-Disk Siebel-Kehl | Bilye-Plaka Bilye-Disk | Amsler Dört bilye |
| Kullanım oranı(%) | 35 | 40 | 25 |
| Hareket tipi | Kayma Delme (çarpma) | Kayma Dönme-Yuvarlanma Delme (Çarpma) | Dönme-Yuvarlanma (çarpma) (kayma) |
| Hareket akışı | Sürekli Salınımlı Aralıklı | Sürekli Salınımlı Aralıklı | Sürekli Aralıklı |
| Yüzey basıncı (N/mm ²) | 10 ⁻⁴ – 4·10 ³ | 3·10 ⁻⁴ – 5·10 ³ Hertz'e göre | 10 ⁻⁴ – 5·10 ³ Hertz'e göre |
| Hız (m/sn) | 10 ⁻⁴ – 40 | 10 ⁻⁵ – 80 | 10 ⁻¹ - 60 |
| Sıcaklık (°C) | -100 ile 1500 | | |

3.3. Deneysel Çalışma

Bu kısımda yapılan çalışmanın amacı, istatistiki bir yöntem olan Cevap Yüzey Metodu (CYM) çerçevesinde oluşturulacak test programı için gerekli olan, sürtünme faktörlerinin işe yarar sonuçlar ürettiği sınır değerleri belirlemek olacaktır. Bu bölümde yer alan sürtünme katsayısı deneyleri, sürtünme faktörlerinden dört tanesinin (temas

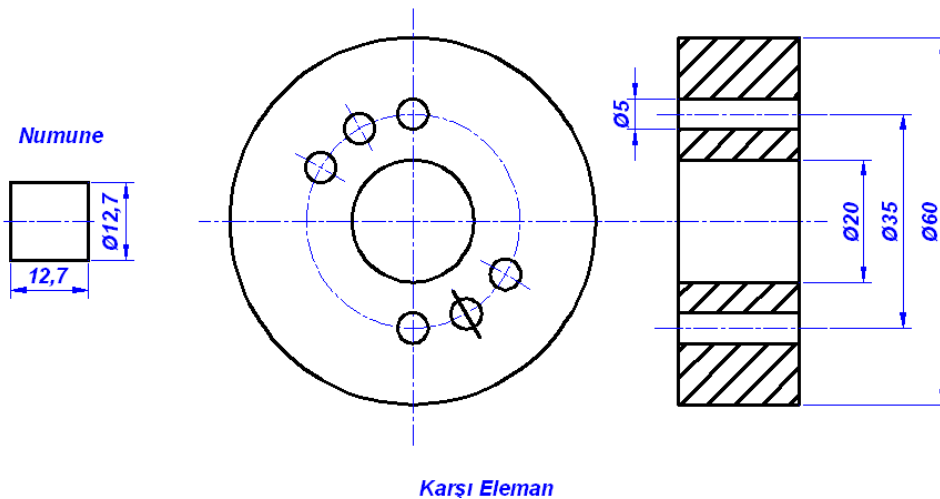
yükü, kayma süresi, kayma hızı ve numune başlangıç pürüzlülük değeri) incelenmesi amacıyla yönelik olarak yapılmıştır. Bu nedenle, burada yapılacak deneyler, seçilen sürtünme faktörlerinin bireysel olarak sürtünme katsayısına olan etkilerini belirlemek amacıyla yönelik olacaktır. Dolayısıyla deneylerde bir faktörün deney değerleri değiştirilirken diğer faktörlerin değerleri sabit tutulacaktır. Böylece her bir faktörün etkin olduğu sınır değerleri tespit edilecektir. Bu sınır değerler CYM çerçevesinde oluşturulacak test programındaki faktörler için beş farklı seviye değerlerini belirleyecektir. Burada yapılan deneyler için teknik detaylar şöyle sıralanabilir:

- Deneylerde teknik kuru sürtünme esas alınmıştır.
- Test cihazına bağlı olarak noktasal temas öngörülmüştür.
- Noktasal temas Şekil 3.1.a'daki temas geometrisiyle sağlanmıştır.
- Tribometrik büyüklük olarak sürtünme kuvveti gözlenmiş daha sonra sürtünme katsayısına geçilmiştir.
- Deneylerde ele alınan faktörler; temas yükü, kayma süresi, başlangıç yüzey pürüzlülüğü ve aşındırıcı devir sayısıdır.

3.3.1 Numunelerin Hazırlanması

Gerek deney programının oluşturulmasında ve gerekse numunelerin hazırlanmasında, deneylerde kullanılacak olan Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü laboratuvarındaki PLINT marka çok amaçlı sürtünme ve aşınma cihazının teknik verileri ve çalışma özellikleri esas alınmıştır.

Temas geometrisi seçildikten sonra numune ve karşı malzeme Şekil 3.2'de görülen boyutlarda belirlendi. Numune malzemesi olarak AISI 1040 ve AISI 4140 çeliği, karşı eleman malzemesi olarak AISI 5115 seçildi.



Şekil 3.2 Numune ve karşı elemanın boyutları

Numune boyutu belirlendikten sonra deneylerde kullanılacak numune adedine göre 5 Adet $\phi 16 \times 154$ mm ebadında (silindirik çubuk şeklinde) AISI 1040 ve AISI 4140 çeliği temin edildi.

Bu iki malzeme öncelikle tornada işlenerek çapı 16 mm'den 13.2 mm'ye, sonra iki punta arasında taşlanarak tane büyüklüğü 80, Aşındırıcı madde MCW, Bağlama maddesi V, Sertlik K, Doku 6 özelliklerine sahip 50 mm genişliğindeki taş ile 0,0025 m/sn hızla taşlanarak malzeme çapı 12,75 mm düşürüldü. Çizelge 3.2' de belirtildiği gibi numuneler işlenerek değişik yüzey pürüzlülükleri elde edildi. Daha sonra bu beş grup yüzey pürüzlülüğüne sahip çubuklar tornada kesilerek numune boyutlarına getirildi.

Çizelge 3.2. Yüzey pürüzlülüklerinin elde edilmesi

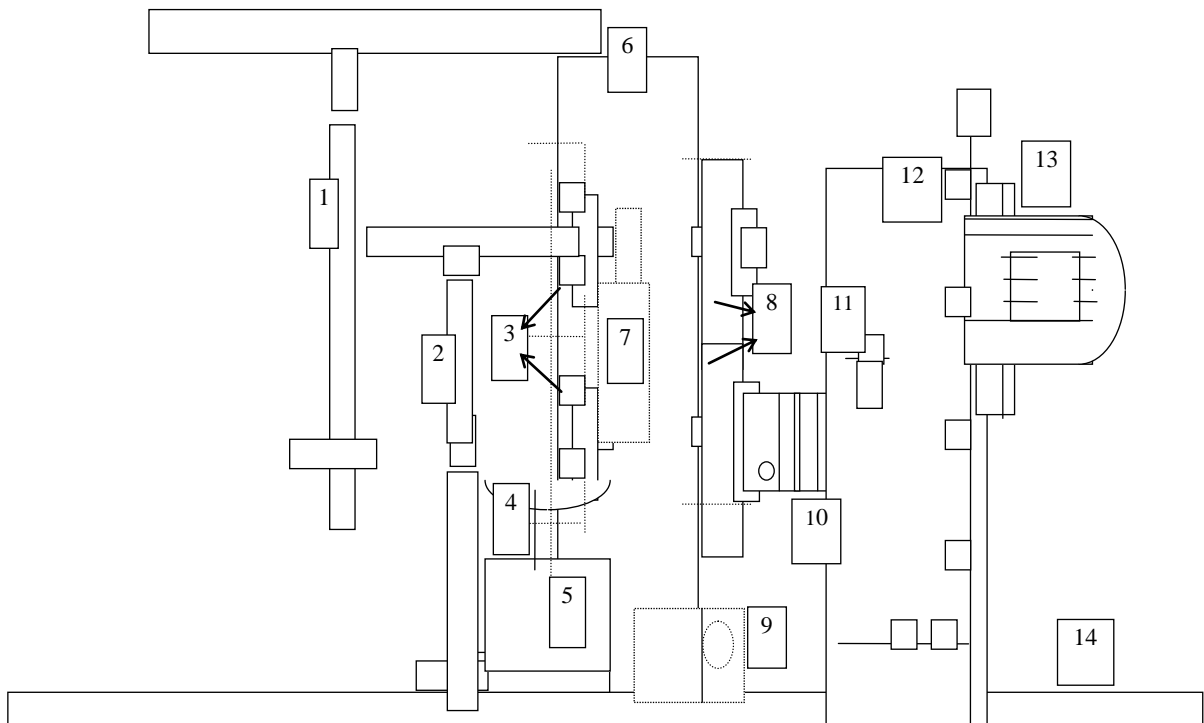
| Aşındırıcı Tipi | Dönüş Hızı n (d/dk) | İlerleme Hızı v (m/s) | Yüzey Pürüzlülüğü Ra (μ m) |
|---------------------------|------------------------|--------------------------|------------------------------------|
| 80MCW-VK6 | 1340 | 0.00166 | 0.2 |
| 80MCW-VK6 | 1340 | 0.0020 | 0.8 |
| KNUX 160405R11 uç | 500 | 0.09 | 1.4 |
| KNUX 160405R11 uç | 500 | 0.14 | 2 |
| P 80 Alüminyum zımpara | 500 | - | 2.6 |

3.3.2 Deney Cihazı

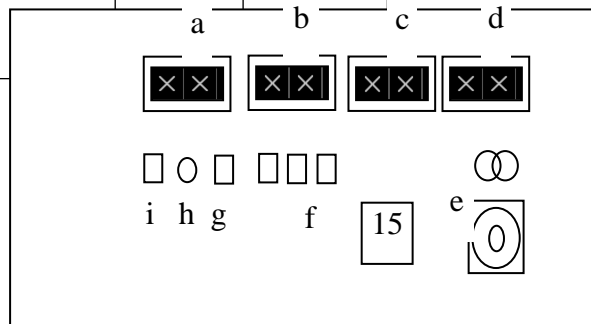
Deneyde kullanılacak cihazın genel kısımları şematik olarak Şekil 3.3'de verilmiştir. Cihazda, sürtünme kuvvetini gözleyip ölçebilmek için altı ayrı konfigürasyon mevcuttur. Cihaz mekanik işlemleri gerçekleştiren bir makine ve deney sonuçlarını gözleyen bir kontrol kabininden ibarettir. Makinenin boyutları malzeme araştırma, geliştirme, kalite kontrol ve deneyler gibi birçok görev için uygundur. Makine de başlıca iki bağlantı durumu bulunmaktadır.

Birleştirilmiş Yuvarlanma-Kayma Bağlantısı: Bağlantının bu tipinde, birbiri ile karşılıklı çalışan, yüklenmiş iki makara veya disk kullanılır. Alttaki makara motora bağlıdır. Üstteki makara ise uygun kayma-dönme oranındaki dişliler tarafından tahrik edilir. Bu bağlantı şekli; dişliler, kamlar ve kam mekanizmaları gibi birbirleri ile temasta olan sistemleri canlandırmak için kullanılır.

Tek Yönlü Kayma Bağlantısı: Bu bağlama tipinde, hareketli numune ve birçok numune geometrilerinden biri (silindir, küre, makara, pim) test için kullanılabilir. Bu bağlantının avantajı numunelerin, geniş malzeme yelpazesi aralığından, nispeten ucuz ve kolay şekilde elde edilebilmesidir. Az miktarlardaki yeni malzemelerle çalışırken bu önemli bir özellik olarak ortaya çıkar.



- 1) Ağırlık yükleme mekanizması
- 2) Değişim miktarını ölçen sensör (algılayıcı)
- 3) Sürtünmeli makara çifti
- 4) Yağlı ortam için yağ haznesi
- 5) Sıcaklık ayar sensörü ve ısıtma bölgesi
- 6) Sürtünme mekanizmasını taşıyan gövde
- 7) Sürtünme kuvvetinin sıfır ayarı
- 8) Devir oranını belirleyen dişli çifti
- 9) Kablo bağlantıları
- 10) Kavrama
- 11) Tur sayıcı sensör
- 12) Dişli kutusu
- 13) Elektrik motoru
- 14) Seti taşıyan pleyt
- 15) Çalıştırma ve izleme kabini



- a) Motor hız göstergesi (d/dk)
- b) Tur sayıcı (adet)
- c) Yükseklik (mesafe) göstergesi (mm)
- d) Kuvvet göstergesi (N)
- e) Sıcaklık kontrolü (0-200°C)
- f) Tur sayıcı start-stop-reset tuşları
- g) Motor çalıştırma-durdurma
- h) Devir ayarı (50-800 d/dk)
- i) Açma-kapama anahtarı

Şekil 3.3 Pin- on disk deney cihazının şematik görünüşü

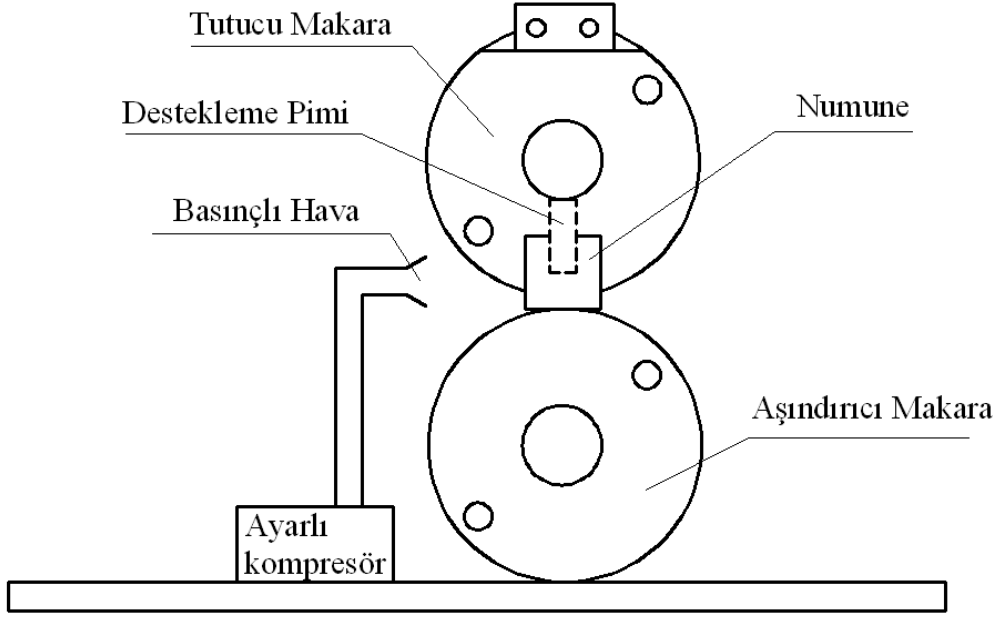
Cihaz kullanılırken veya deney yapılırken dikkat edilmesi gereken bazı hususlar şunlardır:

Cihazda kullanılacak numunelerin, malzeme performanslarını etkileyen üç önemli parametre boyutlar, yüzey kalitesi ve test yüzeylerinin temizliğidir. Üst ve alt milin merkezleri arasındaki mesafe 60 mm olduğunda bu iki mil birbirine paralel demektir. Aksi halde temas yüzeylerindeki ayarsızlık sonucu düzensiz aşınmalar gözlenecektir. Yüklemenin yapıldığı kol oranı 1/5 ve kol ağırlığı 42N'dur. Yani

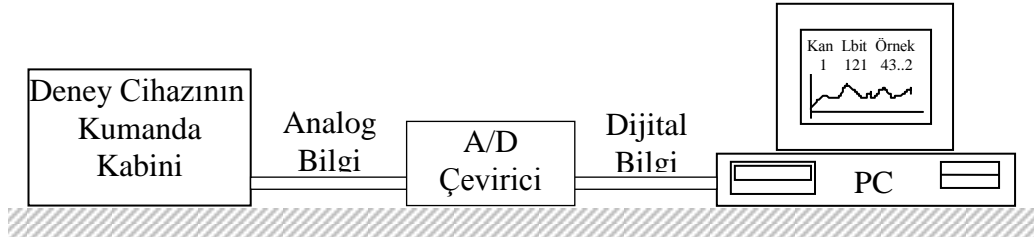
Temas Yüğü = 42 + 5 x (Newton cinsinden asılan yük ağırlığı)
değerinde bir orantı mevcuttur.

3.3.3. Deney Tekniğı

Deneylerin gerçekleştirildiğı düzeneğın ve bilgisayar bağlantısının şematik görünüşü Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'deki gibidir. Deney sırasında elde edilecek veriler Newton cinsinden sürtünme kuvvetidir. Kumanda kabininden analog olarak alınan sürtünme kuvveti değerleri, 12 bit A/D çevirici bir kart (Decision, 1996) ile dijital olarak bilgisayara aktarıldı. Bilgisayarda yazılmış uygun bir programla saniyede 3 adet aritmetik ortalamalı olarak alınan bu bilgiler dosyalara saklandı. Deney sonunda dosyadaki verilerin aritmetik ortalaması alınarak deneylere ait sürtünme kuvvetleri belirlendi.



Şekil 3.4 Aşınma deney düzeneğinin şematik gösterimi



Şekil 3.5 Deney düzeneğinden alınan ölçüm değerlerinin bilgisayara aktarılmasının şematik gösterimi

Tüm deneyler tamamlanıncaya kadar her bir numune için deney basamağı şöyle gerçekleştirildi:

- Numune uygun sürtünme yüzeyi oluşturacak şekilde tutucu makaraya, vida ve destekleme pimi yardımıyla sabitlendi.
- Deney için belirlenen programındaki yük ve devir değerleri ayarlandı.
- Bilgisayar programı, normal numuneler haricinde, gerekli süre için otomatik olarak verileri almak üzere çalıştırıldı.
- Deney sonunda cihaz ve diğer donanımlar durdurulup numune söküldü.
- Cihaz tekrar çalıştırılarak aşındırıcı makara yüzeyi P 800 boyutlu zımpara ile temizlenerek, pürüzlülük yaklaşık $Ra=0.22 \mu m$ civarına getirildi.

3.3.4 Deney Programı ve Elde Edilen Veriler

Yapılan çalışmalara ait, AISI 1040 numuneler için deney programı ve sonuç olarak elde edilen sürtünme kuvveti değerleri Çizelge 3.3’de yer almaktadır. AISI 4140 numuneler için Çizelge 3.4’de deney programı ve sürtünme kuvveti değerleri verilmiştir.

Deneyler sırasında cihaz tarafından ölçülen sürtünme kuvveti değerleri, bilgisayara takılan bir Analog/Dijital çevirici kart ve buna uygun olarak yazılmış olan bir program aracılığıyla bilgisayara anlık olarak kaydedilmiştir. Yaklaşık olarak saniyede 10 tane sürtünme kuvveti değeri alınarak veri dosyaları oluşturulmuştur. Bu kaydedilen verilerin ortalamaları alınarak çizelgelere sürtünme kuvveti değeri olarak yazılmıştır. Bulunan bu değerler temas yükü değerine bölünerek çizelgedeki sürtünme katsayısı değerleri oluşturulmuştur. Bu değerlere göre çizilen grafikler ve yorumları çizelgenin arkasından verilmiştir.

Çizelge 3.3 AISI 1040 çeliğine ait deney verileri ve sonuçları

| Yük F (N) | Süre t (sn) | Devir n (d/dk) | Pürüzlülük (Ra- μm) | Sürtünmekuvveti F_s (N) | Sürtünme katsayısı (μ) |
|--------------|----------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 52 | 120 | 200 | 0,13 | 28,392 | 0,546 |
| 62 | 120 | 200 | 0,13 | 33,480 | 0,540 |
| 72 | 120 | 200 | 0,13 | 38,376 | 0,533 |
| 82 | 120 | 200 | 0,13 | 43,378 | 0,529 |
| 92 | 120 | 200 | 0,13 | 48,484 | 0,527 |
| 52 | 120 | 400 | 0,13 | 25,792 | 0,496 |
| 62 | 120 | 400 | 0,13 | 29,884 | 0,482 |
| 72 | 120 | 400 | 0,13 | 34,056 | 0,473 |
| 82 | 120 | 400 | 0,13 | 38,130 | 0,465 |
| 92 | 120 | 400 | 0,13 | 42,320 | 0,460 |
| 62 | 120 | 600 | 0,13 | 28,272 | 0,456 |
| 82 | 120 | 600 | 0,13 | 35,916 | 0,438 |
| 92 | 120 | 600 | 0,13 | 39,836 | 0,433 |
| 62 | 120 | 800 | 0,13 | 27,590 | 0,445 |
| 82 | 120 | 800 | 0,13 | 35,424 | 0,432 |
| 92 | 120 | 800 | 0,13 | 39,192 | 0,426 |
| 52 | 240 | 200 | 0,13 | 26,780 | 0,515 |
| 62 | 240 | 200 | 0,13 | 31,186 | 0,503 |
| 72 | 240 | 200 | 0,13 | 35,640 | 0,495 |
| 82 | 240 | 200 | 0,13 | 40,016 | 0,488 |
| 92 | 240 | 200 | 0,13 | 44,712 | 0,486 |
| 52 | 240 | 400 | 0,13 | 25,116 | 0,483 |
| 62 | 240 | 400 | 0,13 | 29,264 | 0,472 |
| 72 | 240 | 400 | 0,13 | 33,264 | 0,462 |
| 82 | 240 | 400 | 0,13 | 37,392 | 0,456 |
| 92 | 240 | 400 | 0,13 | 41,768 | 0,454 |
| 52 | 240 | 600 | 0,13 | 23,764 | 0,457 |
| 62 | 240 | 600 | 0,13 | 27,838 | 0,449 |
| 72 | 240 | 600 | 0,13 | 31,688 | 0,440 |
| 82 | 240 | 600 | 0,13 | 35,752 | 0,436 |
| 92 | 240 | 600 | 0,13 | 39,376 | 0,428 |
| 52 | 240 | 800 | 0,13 | 23,244 | 0,447 |
| 62 | 240 | 800 | 0,13 | 27,342 | 0,441 |
| 72 | 240 | 800 | 0,13 | 31,392 | 0,436 |
| 82 | 240 | 800 | 0,13 | 38,457 | 0,432 |
| 92 | 240 | 800 | 0,13 | 39,284 | 0,427 |
| 52 | 360 | 200 | 0,13 | 26,416 | 0,508 |
| 62 | 360 | 200 | 0,13 | 30,752 | 0,496 |
| 72 | 360 | 200 | 0,13 | 34,920 | 0,485 |
| 82 | 360 | 200 | 0,13 | 39,278 | 0,479 |

| | | | | | |
|----|----|-----|-----|--------|-------|
| 52 | 60 | 200 | 0,2 | 26,398 | 0,508 |
| 52 | 60 | 200 | 0,8 | 25,687 | 0,494 |
| 52 | 60 | 200 | 1,4 | 25,954 | 0,499 |
| 52 | 60 | 200 | 2,0 | 26,983 | 0,519 |
| 52 | 60 | 200 | 2,6 | 28,675 | 0,551 |

Çizelge 3.4 AISI 4140 çeliğine ait deney verileri ve sonuçları

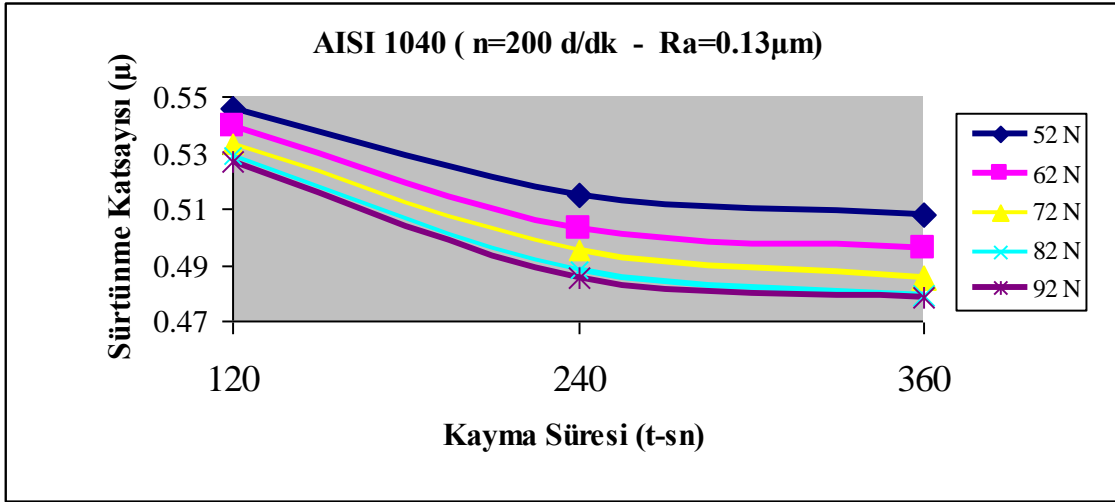
| Yük F (N) | Süre t (sn) | Devir n (d/dk) | Pürüzlülük (Ra- μm) | Sürtünmekuvveti F_s (N) | Sürtünme katsayısı (μ) |
|--------------|----------------|-------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 52 | 60 | 200 | 1,20 | 25,210 | 0,485 |
| 52 | 60 | 300 | 1,20 | 24,024 | 0,462 |
| 52 | 60 | 400 | 1,20 | 23,140 | 0,445 |
| 52 | 60 | 500 | 1,20 | 22,506 | 0,433 |
| 52 | 60 | 600 | 1,20 | 22,105 | 0,425 |
| 52 | 60 | 700 | 1,20 | 21,840 | 0,420 |
| 52 | 60 | 800 | 1,20 | 21,632 | 0,416 |
| 62 | 60 | 200 | 1,20 | 28,312 | 0,457 |
| 72 | 60 | 200 | 1,20 | 35,200 | 0,489 |
| 82 | 60 | 200 | 1,20 | 34,933 | 0,426 |
| 92 | 60 | 200 | 1,20 | 38,481 | 0,418 |
| 72 | 60 | 300 | 1,20 | 30,910 | 0,429 |
| 72 | 60 | 400 | 1,20 | 29,664 | 0,412 |
| 72 | 60 | 500 | 1,20 | 29,210 | 0,406 |
| 72 | 60 | 600 | 1,20 | 28,915 | 0,402 |
| 72 | 60 | 700 | 1,20 | 28,714 | 0,399 |
| 72 | 60 | 800 | 1,20 | 28,512 | 0,396 |
| 92 | 60 | 300 | 1,20 | 38,603 | 0,420 |
| 92 | 60 | 400 | 1,20 | 37,205 | 0,404 |
| 92 | 60 | 500 | 1,20 | 36,432 | 0,396 |
| 92 | 60 | 600 | 1,20 | 36,119 | 0,393 |
| 92 | 60 | 700 | 1,20 | 35,862 | 0,390 |
| 92 | 60 | 800 | 1,20 | 35,604 | 0,387 |
| 52 | 120 | 200 | 1,20 | 29,619 | 0,570 |
| 62 | 120 | 200 | 1,20 | 34,664 | 0,559 |
| 72 | 120 | 200 | 1,20 | 39,511 | 0,549 |
| 82 | 120 | 200 | 1,20 | 44,583 | 0,544 |
| 92 | 120 | 200 | 1,20 | 49,846 | 0,542 |
| 52 | 240 | 200 | 1,20 | 28,600 | 0,550 |
| 62 | 240 | 200 | 1,20 | 33,232 | 0,536 |
| 72 | 240 | 200 | 1,20 | 37,836 | 0,526 |
| 82 | 240 | 200 | 1,20 | 42,722 | 0,521 |
| 92 | 240 | 200 | 1,20 | 47,601 | 0,517 |
| 52 | 360 | 200 | 1,20 | 28,200 | 0,542 |
| 62 | 360 | 200 | 1,20 | 32,581 | 0,526 |

| | | | | | |
|----|-----|-----|------|--------|-------|
| 72 | 360 | 200 | 1,20 | 37,310 | 0,518 |
| 82 | 360 | 200 | 1,20 | 42,214 | 0,515 |
| 92 | 360 | 200 | 1,20 | 47,242 | 0,514 |
| 52 | 180 | 200 | 1,20 | 27,165 | 0,522 |
| 52 | 300 | 200 | 1,20 | 30,180 | 0,580 |
| 52 | 60 | 200 | 0,2 | 26,731 | 0,514 |
| 52 | 60 | 200 | 0,8 | 26,227 | 0,504 |
| 52 | 60 | 200 | 1,4 | 26,572 | 0,511 |
| 52 | 60 | 200 | 2,0 | 27,286 | 0,525 |
| 52 | 60 | 200 | 2,6 | 28,721 | 0,552 |

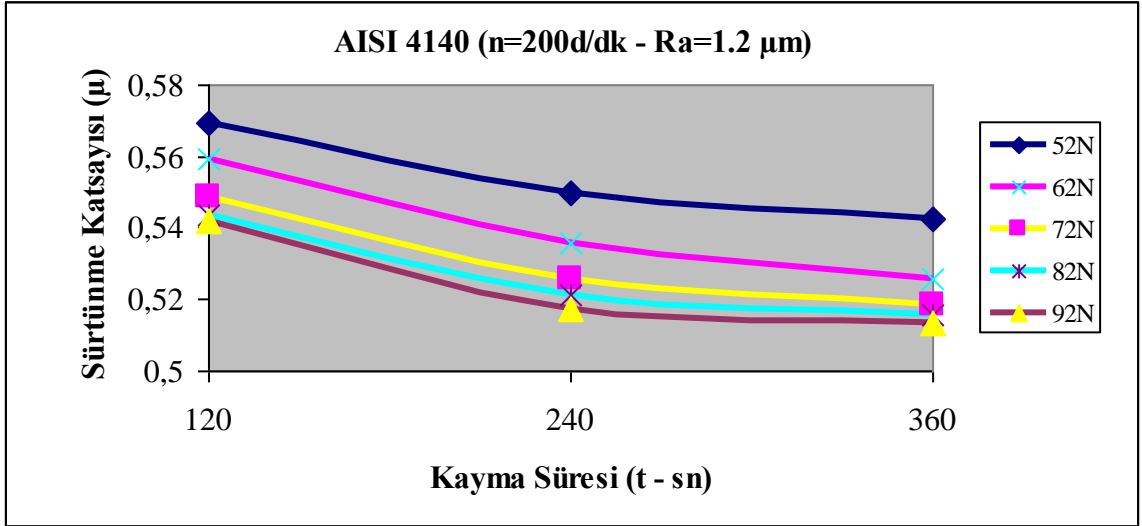
3.4. Deney Sonuçları

AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için yapılan sürtünme deneyleri sonucunda elde edilen verilere göre sürtünme katsayısı grafikleri çizilerek yorumları yapılmıştır.

Sürtünme katsayısının kayma süresine bağlı olarak değişimi Şekil 3.6' da AISI 1040 ve Şekil 3.7' de AISI 4140 çelikleri için görülmektedir. Her ikisinde de 200 d/dk sabit devirde, 120, 240 ve 360 sn sürede beş farklı temas yükü için sürtünme katsayısı değerleri bulunmuş ve grafikleri çizilmiştir.



Şekil 3.6 AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının temas yüküne göre kayma süresi ile değişimi

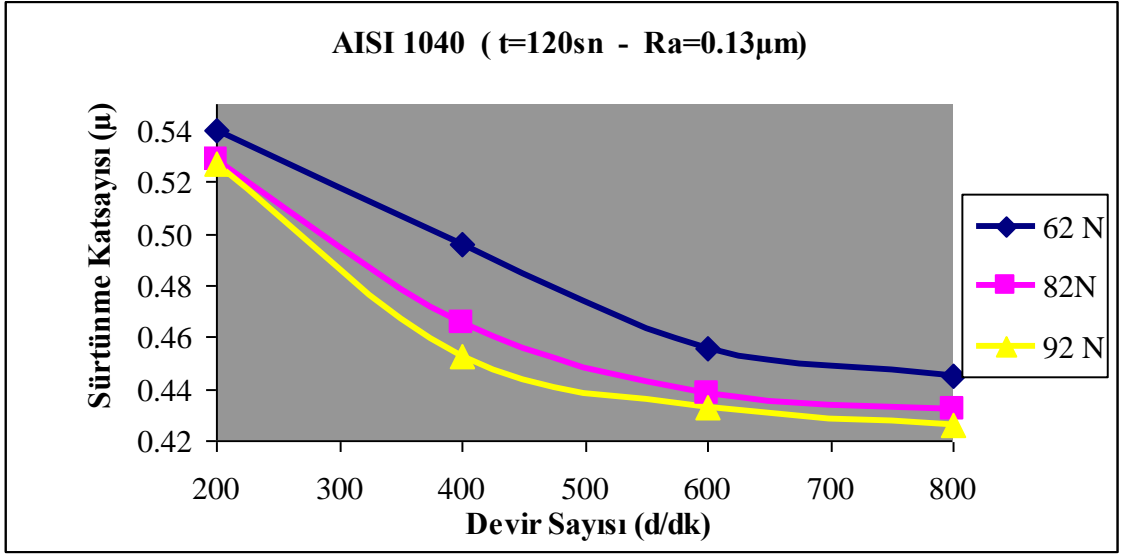


Şekil 3.7 AISI 4140 çeliğinde sürtünme katsayısının temas yüküne göre kayma süresi ile değişimi

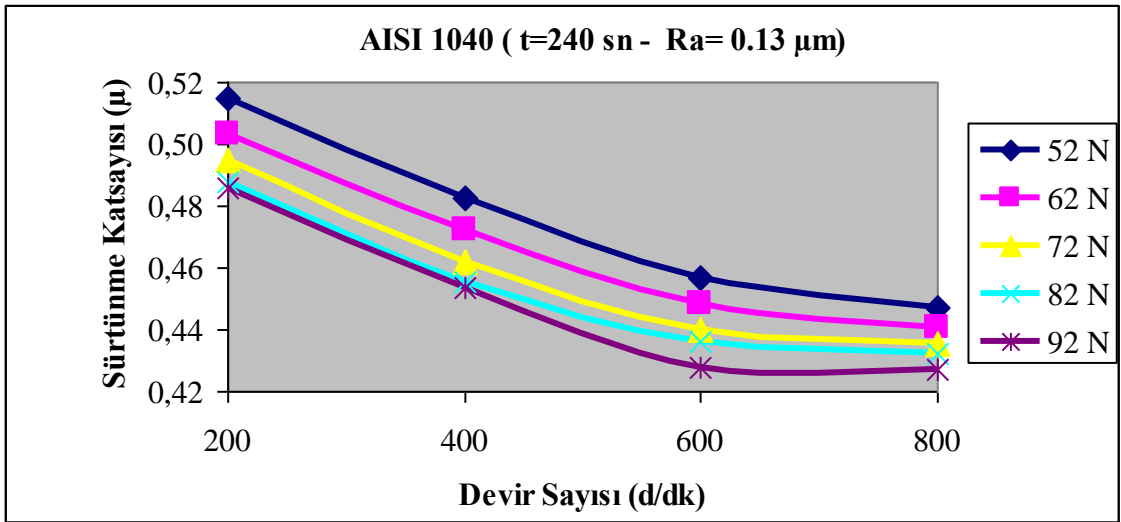
Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'ye göre kayma süresinin artan değerlerinde dinamik sürtünme katsayısının azalarak bir süre sonra yaklaşık sabitlendiği söylenebilir. Bunun sebebi olarak belli bir süre sonra sürtünmenin daha stabil bir hal aldığı düşünülebilir. Ayrıca grafikten çıkarılabilecek bir diğer sonuç, yüksek temas yükü değerleri daha düşük sürtünme katsayısı oluşturmaktadır. Yani temas yükü değerlerindeki artış miktarı kadar sürtünme kuvveti değerleri aynı miktarda artış gösterememektedir.

Grafiklerin Şekil 2.2 (b)' de belirtilen kayma hızı ve sürtünme katsayısı eğrisinin maksimum kayma hızından sonraki dinamik sürtünmenin oluşturduğu eğriye uygunluğu dikkat çekmektedir.

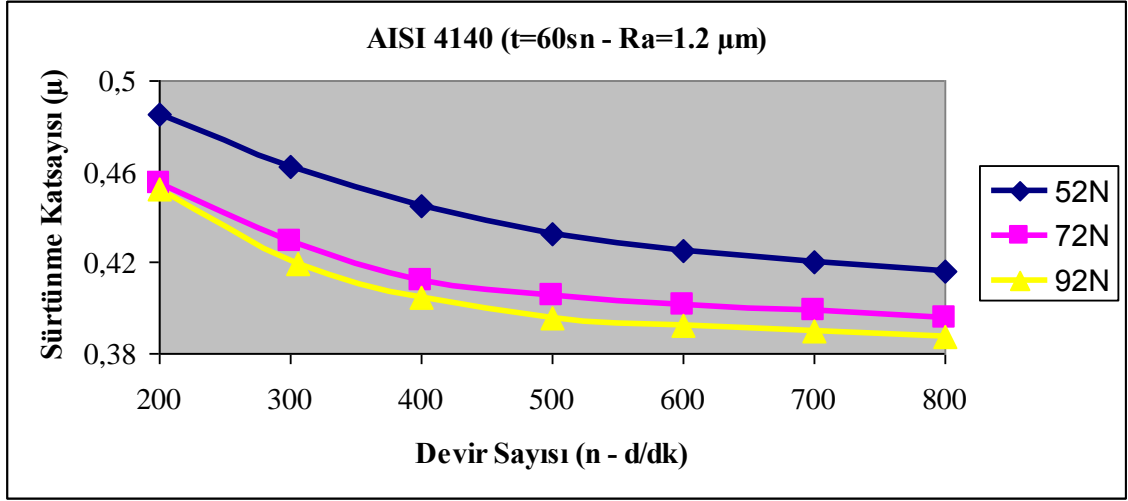
Sürtünme katsayısının devir sayısına bağlı olarak değişimi 120 sn için Şekil 3.8 ve 240 sn için Şekil 3.9' da AISI 1040 ve 60 sn için Şekil 3.10'da AISI 4140 çelikleri için görülmektedir.



Şekil 3.8 AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının 120 sn’de temas yüküne göre devir sayısı ile değişimi

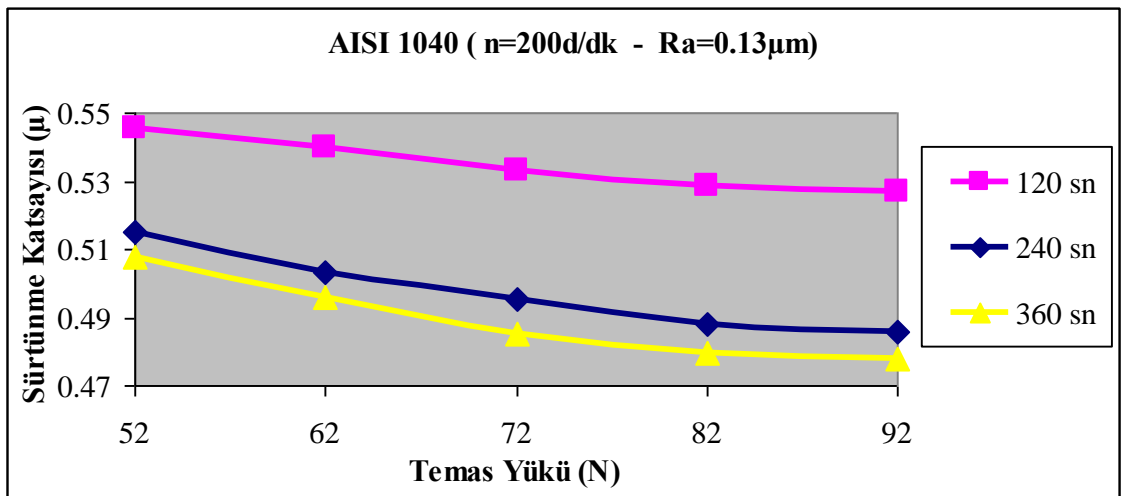


Şekil 3.9 AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının 240 sn’de yük durumuna göre devir sayısı ile değişimi

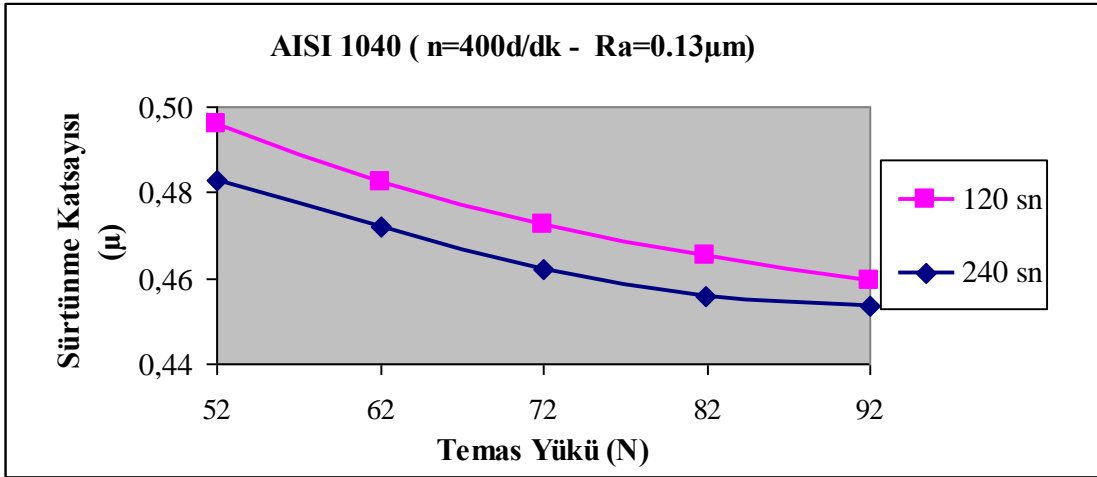


Şekil 3.10 AISI 4140 çeliğinde sürtünme katsayısının 60 sn’de yük durumuna göre devir sayısı ile değişimi

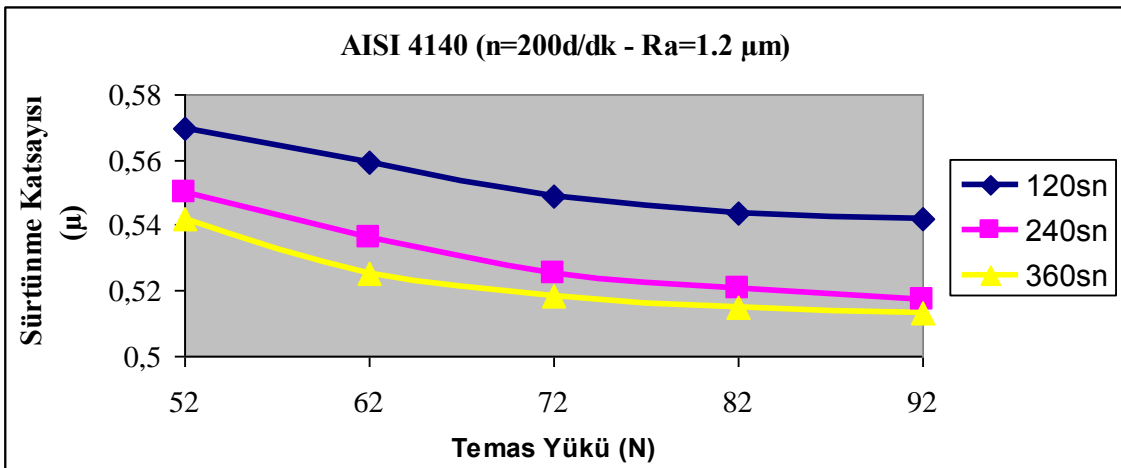
Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’ dan, devir sayısının artan değerlerinde dinamik sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. Bunun sebebinin; temas yükünün yüksek devirlerde yüzeye etki etme zamanının kısalığından dolayı ortaya çıkan sürtünme kuvvetindeki azalma olduğu düşünülebilir. Yüksek hızlarda ısı oluşumu sonucu meydana gelen oksidasyon yağ filmi gibi ayrıldığından sürtünme katsayısı düşük değerlere iner. Ayrıca grafikten çıkarılabilecek diğer bir sonuç, aynı kayma süresinde yüksek devir değerlerinde kayma mesafesi arttığından, belli bir mesafe sonra sürtünmenin daha stabil bir hal alarak, sürtünme katsayısının sabit bir değere ulaşacağıdır.



Şekil 3.11 AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının 200 d/dk devirdeki temas yükü ile değişimi

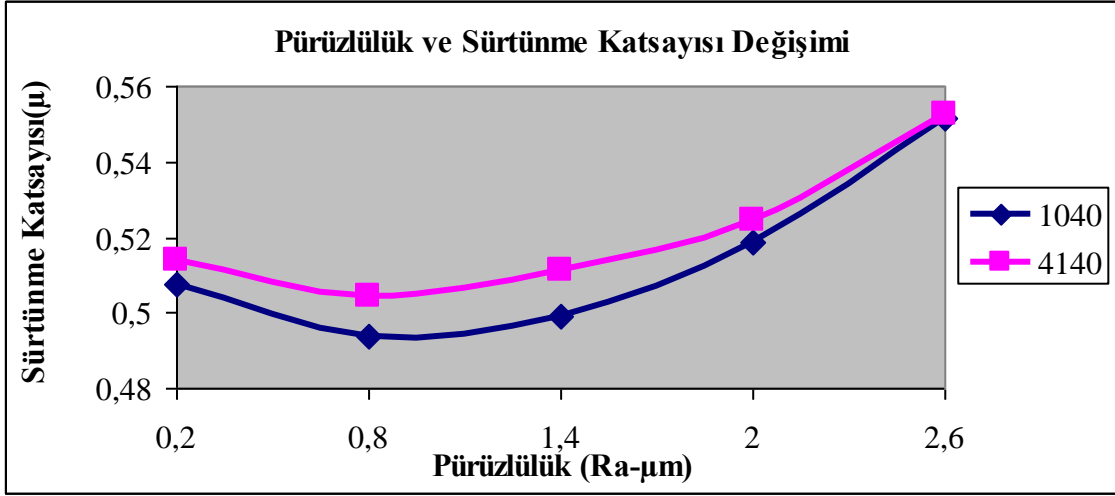


Şekil 3.12 AISI 1040 çeliğinde sürtünme katsayısının 400 d/dk devirdeki temas yükü ile değişimi



Şekil 3.13 AISI 4140 çeliğinde sürtünme katsayısının 200 d/dk devirdeki temas yükü ile değişimi

Şekil 3.11, Şekil 3.12 ve Şekil 3.13’de görüldüğü gibi temas yükünün artması ile sürtünme katsayısı azalmakta ve belirli bir bölgede ise neredeyse sabit olmaktadır. Bu durum her iki devirde de gözlenmektedir. Kayma süresiyle birlikte yine sürtünme katsayısının değerinin düştüğü görülmektedir.



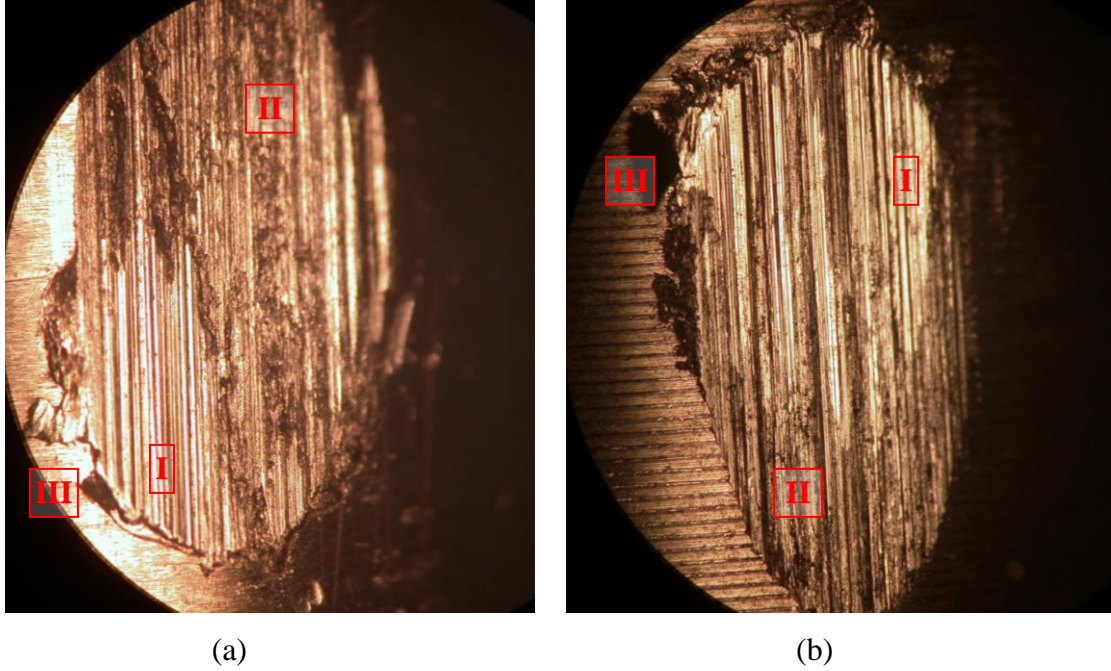
Şekil 3.14 Sürtünme katsayısının pürüzlülük ile değişimi

AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için farklı pürüzlülük değerlerinde pürüzlü yüzeylerde sürtünme katsayısında artış gözlenmiştir. Bu durumda sürtünme katsayısının artmasının sebebi pürüzlerin artmasıyla gerçek temas alanının artmasıdır. Bowden ve Tabor' a (1986) göre sürtünme katsayısı sürtünen yüzeylerden bağımsız olmasına rağmen gerçek temas alanı ile orantılıdır. Onların teorileri düz yüzeylerin mikro ölçekte pürüzlü olma gerçeğine dayanır. İki yüzey biri diğerinin üzerinde hareket ettirildiğinde, temas noktaları yüzeyin yüksek pürüz olan yerlerinde olacaktır. Bu nedenle gerçek temas alanı herhangi bağımsız nokta alanlarının toplamı olacaktır. Sürtünme yüzey pürüzlülüğüne bağlı olmasına rağmen çok düzgün ve çok pürüzlü yüzeylerdeki sürtünme katsayısında bir artış gözlenmektedir. Pürüzsüz yüzeylerde gerçek temas alanı büyümektedir. Pürüzlü yüzeylerde ise yük arttıkça ilk temas eden pürüzler şekil değişimine uğrar ve ezilirler. Bunun sonucu kısa boyutlu yeni pürüzler birbiri ile temas ederler. Atomik ölçekte sürtünme temas alanının ölçülerine bağlıdır. Orta derecedeki pürüzlülüklerde sürtünme minimumdur ve pürüzlülüğe bağlı değildir (Carpinteri A., Paggi M. 2004, Karamış M.B., Selçuk B., 1993).

3.5 Aşınma Yüzey Resimleri

Ön deney çalışmalarında test edilen numunelerin yüzeylerinde, sürtünme sonucu ortaya çıkan aşınmanın seyrine ilişkin, örnek yüzey resimleri Şekil 3.15'de verilmiştir.

Deney esnasında kullanılan numunelerin hemen hemen hepsinde de ikili veya üçlü aşınma sistemleri aynı anda temas yüzeyinde ortaya çıkmışlardır. Şekil 3.15 de bunlardan iki örnek mikro resim görülmektedir. Bu mikro resimler deneylerde kullanılan AISI 1040 (Şekil 3.15 a) ve AISI 4010 (Şekil 5.1b) malzemelere aittir.



Şekil 3.15. Sürtünme sonucu oluşan aşınma yüzey resimleri

Şekil 3.15 (a)'da AISI 1040 çeliğinin sürtünme testleri sonucunda oluşan aşınma yüzey resmi verilmiştir. Test değerleri $n=200$ d/dk, $Ra=0.13$ μm , $F=62$ N, $F_s=33.48$ N, $\mu=0.54$ ve $t=120$ sn şeklindedir. Aşınma resmine bakıldığında I ile gösterilen bölgede bariz şekilde çizgisel aşınma, II ile gösterilen bölgede adhezif aşınma meydana gelmiştir. III ile gösterilen bölge ise yüzeyden sıyrılan metallerin kopmak üzere ötelendiği kenar bölgedir. Şekil 3.15 (b)' de AISI 4140 çeliğinin sürtünme testleri sonucunda oluşan aşınma yüzey resmi verilmiştir. Test değerleri $n=200$ d/dk, $Ra=1.2$ μm , $F=62$ N, $F_s=34.66$ N, $\mu=0.55$ ve $t=120$ sn şeklindedir. Aşınma resmine bakıldığında Şekil 3.15 (a)' dakine benzer bölgelerin oluştuğu gözlemlenmiştir. Yine burada I nolu bölge çizgisel aşınmanın, II nolu bölge adhezif aşınmanın, III nolu bölge yüzeyde metal yığılmasının olduğu kenar bölgedir.

CEVAP YÜZEY METODU

4.1. Giriş

Bu çalışmada Cevap yüzey metodu (CYM) olarak adlandırılan istatistiksel yöntem kullanılmıştır. Yöntemin uygulanması, yapılan deneylerde kullanılan bağımsız değişkenlerin sonucunda elde edilen cevaplara dayanmaktadır. Bu yöntem uygun deneysel tasarımdan elde edilen nicel veriler ile çok faktörlü modellerin oluşturulması ve benzer şekilde çözümlenmesinde kullanılır. Cevap yüzeyi olarak grafik şeklinde sunulabilen bu modeller; farklı faktörlerin cevabı nasıl etkilediğinin belirlenmesinde, değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamakta ve cevap yüzeyinin tüm faktörlerinin birleşik etkisini ortaya çıkarmakta kullanılır.

Gerek sürtünme ve aşınmanın azaltılması ya da kontrol edilmesi ve gerekse diğer malzeme özellikleriyle iyileştirilmesi (optimizasyonu) sistematik bir araştırmayı gerektirir. Sistematik bir araştırma ise, ancak çalışma koşulları istenilen yönde değiştirilebilen ve deney sırasında bu koşulların sabit tutulabilmesine izin veren modeller yardımıyla olur.

Uygulamadaki sürtünme sistemlerinde (motorlar, ray-tekerlek sistemi gibi) doğrudan muayene için gereken çok uzun sürtünme zamanı ve masraflar yanında gerçek sisteme etki eden unsurlar ve ölçme büyüklüklerinin kısmen hatta tümüyle kontrol edilemez veya ölçülemez oluşu gibi bazı sorunlara rağmen, model deney standartlarındaki çalışmalar kaçınılmazdır (Demirci, 1987).

Dinamik sistemler için büyük önem taşıyan modeller, gerçek sistemleri temsil etmek üzere basite indirgenmiş şekillerdir. Modellerin kuruluş mantığı, bir bütün olarak sistem ve sistem elemanlarının giriş çıkışları arasındaki ilişkide saklıdır. Bilimsel çalışmaların üst sıralarında yer alan modeller, önemsiz etkilerin ihmal edildiği ve gerçek yöntemlerin idealleştirildiği fiziksel kanunlar çerçevesindeki işlemleri içerir (Karnopp ve Rosenburg, 1980). Modeller sayesinde sistem giriş ve çıkış değişkenleri arasında sürekli bir mukayese söz konusudur. Modelin probleme çözüm olabilmesi için, sistemin dinamik denklemlerinin elde edilmesi gerekir.

Burada sürtünme katsayısını tespit etmek için, deney sırasında ölçülebilen ve kontrol altında tutulabilen formüllemiş dört faktör ele alınarak bir model geliştirilmiştir. Modelin oluşturulmasında ve analizinde Cevap Yüzey Metodu (Raymond, 1971) adıyla bilinen istatistiksel bir yöntem kullanılmıştır.

Bu yöntem uygun deneysel tasarımdan elde edilen nicel veriler ile çok faktörlü modellerin oluşturulması ve benzer şekilde çözümlenmesinde kullanılır. Elde edilebilecek sonuçlar, farklı faktörlerin cevaba nasıl etkideğini belirlemek, değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklamak ve cevap yüzeyindeki tüm faktörlerin bileşik etkisini ortaya çıkarmak şeklinde sıralanabilir (Raymond, 1971).

4.2. Cevap Yüzey Metodu (CYM)

CYM ilk olarak 1951 yılında kimya mühendisliği araştırmalarında optimizasyon çalışmaları amacıyla Dr. G.E. Box (1980) tarafından kullanılmıştır. Bu yöntem ile mühendislik uygulamalarındaki bilimsel problemlerin bazı tiplerinin çözümünü istatistiksel olarak yapmak mümkündür. Birden fazla faktörün etkili olduğu sistemlerde tercih edilen bu yöntemin en büyük uygulamaları endüstriyel alanlardır. Yöntemin üç önemli kullanım alanı şunlardır:

- Cevabı etkileyen faktörlere verilen değerlere göre elde edilecek optimum çalışmalar
- Faktörlere verilecek özel değerlere göre cevabın ne şekilde etkilendiğini belirlemeye yönelik çalışmalar
- Cevaptan istenen özelliklerin belirlenmesi ve buna bağlı faktörlerin çalışma aralıklarının saptanması (Box ve Ark., 1980).

Bir sistemde elde edilen sonuç verileri CYM için cevap değerleridir. Cevaplar normalde sürekli ya da kesintili (başta ve sonda) olarak ölçü aletleriyle okunur ve sistemin en önemli fonksiyonudur. Bu yüzden cevapların mümkün olduğunca özenli ve uygun bir ölçme sistemiyle alınması, modelin güvenilirliği açısından önemlidir. Deneyler sonucunda elde edilen model CYM kullanılarak polinom denklemi şeklinde ifade edilir. CYM’nda esas olan iki kısım vardır:

- Deneysel olarak belirlenen faktör değerleri sonucunda elde edilen cevapların matematiksel modelde değerlendirilmesi
- Matematiksel olarak elde edilen modelin istatistiksel olarak analizi

Bu yöntemin avantajları ve dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

Avantajları;

- Ele alınan tribosistemdeki sürtünme faktörlerinin analizinin yapılabilmesi
- Seçilen faktörlere ait birimlerin modele etkilerinin olmaması
- Oluşturulan model ile sürtünme faktörlerinin optimum çalışma aralığının belirlenebilmesi

- Çok özel sürtünme faktörlerinin aşınmaya olan etkilerinin araştırılabilmesi
- Modelleme metodunun (CYM) uyum aralığının %90-%97.5 arasında seçilebilir olması

Dezavantajları ise;

- Her sistem için özel olarak uygulanabilir olması
- Uyarlanacak sisteme uygun olarak belirlenecek bir dizi deneyin yapılması
- Tahminlerin deney limitleri ile sınırlı olması

Faktör sayılarına bağlı olarak deney sayısının üstel olarak artmasıdır.

4.2.1. Cevap Yüzey Tasarımı

CYM’nda kullanılan deney tasarımı faktöreldir. Bunun avantajı, deney tasarımındaki bir faktörün değerindeki değişimin etkisinin, diğer faktörlerinkinden bağımsız olarak değerlendirilebilmesidir. Faktörel deney tasarımları her faktörün her bir düzeydeki etkileşimini kullanarak oluşturulur. Böyle tasarımlarda tüm faktörler aynı anda değiştirilebilir. Ayrıca faktörler arası ilişki ve faktörün ikincil etkisi belirlenebilir. Bu tip tasarımlarda en az üç veya daha fazla değişkene ihtiyaç vardır.

Burada modellemeye esas olarak ikinci dereceden merkezi karma deney tasarımı tercih edilmiştir. Bunun sebebi, modelin doğruluğunun kontrolü için yeterli serbestlik derecesinin elde edilmesini, modelin uyum kontrolü ve deney hata ölçümlerinin daha güvenilir olmasını sağlamaktır. Bu tasarımda toplam deney sayısı denklem (4.1)’deki şekliyle ifade edilmiştir.

$$n_T = 2^f + 2f + n_0 \quad [4.1]$$

f : Faktör sayısı

n_T : Toplam deney sayısı

n_0 : Merkez noktadaki deney sayısı

Modelin uyum ve hata kontrolü için merkez değerlerde en az üç tekrar yapılması gereklidir. Faktörlerin seviye aralıklarının geniş tutulması ve deney sayısının fazla olması modelin güvenilirliğini artırır. Deney tasarımında deney sayısı desteklenen modele uygun olmalıdır. Tahmin edilecek olan ikinci dereceden modelin formu denklem (4.2) doğrultusunda oluşturulur.

$$\hat{Y} = b_0 + \sum_{i=1}^f b_i X_i + \sum_{i=1}^f b_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^f \sum_{j=1}^f b_{ij} X_i X_j \quad [4.2]$$

($i < j$)

\hat{Y} : Tahmini cevap

X_i : Sistemdeki bağımsız faktörler

b_0, b_i, b_{ii}, b_{ij} : Denklem katsayıları

Sistemdeki bağımsız faktörler (X_i) iki şekilde kodlanır:

- a) Lineer kodlama
- b) Logaritmik kodlama

İkinci dereceden (4.2) denklemindeki toplam terim sayısı (4.3) formülü ile bulunur.

$$p = \frac{(f + 1) \cdot (f + 2)}{2} \quad [4.3]$$

p : Terim sayısı

İkinci derece ve etkileşim hesaplamalarının eklenerek genişletilmesiyle, ikinci dereceden model denklem (4.4)'deki gibi yazılabilir.

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_4 X_4 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{33} X_3^2 + b_{44} X_4^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + b_{24} X_2 X_4 + b_{34} X_3 X_4 \quad [4.4]$$

$X_1 X_2, X_1 X_3, X_1 X_4, X_2 X_3, X_2 X_4, X_3 X_4$: Faktörlerin etkileşim değerleri

$b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{44}$: İkinci derece katsayıları

$b_{12}, b_{13}, b_{14}, b_{23}, b_{24}, b_{34}$: Etkileşim değerlerinin katsayıları (Raymond, 1971).

4.3. Deney Tasarımı

Yük, süre, devir ve pürüzlülük faktörlerine ait çalışma aralığı beş seviye olarak belirlenerek Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Deney tasarımındaki faktörlerin kodlanmasında şu yol izlenir. Öncelikle merkez değeri '0' ile kodlanır ve 'Orta' seviyeyi temsil eder. Modele ait birinci derece

katsayılarını belirlemek için seçilen değerlerin düşük olanı -1 ile yüksek olanı +1 ile kodlanır. Ara değerlerin kodlanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$Kod\ değeri = (Yeni\ değer - Orta\ değer) / (Yüksek\ değer - Orta\ değer) \quad [4.5]$$

Örneğin devir faktörüne ait 310 değeri için bir kodlama aşağıdaki gibidir:

$$Kod\ Değeri = \frac{310 - 450}{600 - 450} = -0,933$$

Çizelge 4.1 Deney tasarımıdaki faktör değerleri ve kodlamaları

| Seviyeler | ¹ Yük - ² Yük (N) X ₁ | Süre (sn) X ₂ | Devir (d/dk) X ₃ | Pürüzlülük (µm) X ₄ | Kod |
|----------------|---|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----|
| En düşük | 2 – 52 | 30 | 150 | 0,2 | -2 |
| Düşük | 4– 62 | 60 | 300 | 0,8 | -1 |
| Orta | 6 – 72 | 90 | 450 | 1,4 | 0 |
| Yüksek | 8 – 82 | 120 | 600 | 2,0 | 1 |
| En yüksek | 10 – 92 | 150 | 750 | 2,6 | 2 |
| (1) Asılan yük | | (2) Sürtünme yükü | | | |

CYM ile oluşturulacak ikinci dereceden 4 bağımsız faktörlü merkezi karma deney tasarımı(MKM) için denklem (4.2) gereğince 27 adet deney uygun görülmüştür. Deney tasarımı Çizelge 4.2’de verilmiştir. Deney tasarımına göre yapılan bu deneylerden ilk 16’sı faktörlerin birinci dereceden olan katsayılarını, sonraki tekrarlanan 3 deney modelin eksikliğini gidermek için ve son 8 deney ise faktörlerin ikinci derece katsayılarını belirlemek için yapılmıştır.

Çizelge 4.3 de bu deney programı dahilinde yapılan deneylerden elde edilen sürtünme kuvvetlerinin aritmetik ortalamaları ve sürtünme katsayısı bağıntısından bulunan sürtünme katsayıları, faktör değerleriyle birlikte verilmiştir.

Çizelge 4.2 Geliştirilen model için deney tasarımı

| Deney No | Kodlanmış seviyeler | | | | Faktörler | | | |
|----------|---------------------|----------------|----------------|----------------|--------------------|--------|----------|---------|
| | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | F _N (N) | t (sn) | n (d/dk) | Ra (µm) |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 62 | 60 | 300 | 0,8 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 82 | 120 | 600 | 2 |
| 3 | -1 | -1 | -1 | 1 | 62 | 60 | 300 | 2 |
| 4 | 1 | -1 | 1 | -1 | 82 | 60 | 600 | 0,8 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 1 | 62 | 60 | 600 | 2 |
| 6 | -1 | -1 | 1 | -1 | 62 | 60 | 600 | 0,8 |
| 7 | -1 | 1 | -1 | 1 | 62 | 120 | 300 | 2 |
| 8 | 1 | 1 | -1 | -1 | 82 | 120 | 300 | 0,8 |
| 9 | 1 | -1 | -1 | 1 | 82 | 60 | 300 | 2 |
| 10 | -1 | 1 | 1 | -1 | 62 | 120 | 600 | 0,8 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | -1 | 82 | 120 | 600 | 0,8 |
| 12 | 1 | 1 | -1 | 1 | 82 | 120 | 300 | 2 |
| 13 | 1 | -1 | 1 | 1 | 82 | 60 | 600 | 2 |
| 14 | 1 | -1 | -1 | -1 | 82 | 60 | 300 | 0,8 |
| 15 | -1 | 1 | 1 | 1 | 62 | 120 | 600 | 2 |
| 16 | -1 | 1 | -1 | -1 | 62 | 120 | 300 | 0,8 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 90 | 450 | 1,4 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 90 | 450 | 1,4 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 90 | 450 | 1,4 |
| 20 | -2 | 0 | 0 | 0 | 52 | 90 | 450 | 1,4 |
| 21 | 2 | 0 | 0 | 0 | 92 | 90 | 450 | 1,4 |
| 22 | 0 | -2 | 0 | 0 | 72 | 30 | 450 | 1,4 |
| 23 | 0 | 2 | 0 | 0 | 72 | 150 | 450 | 1,4 |
| 24 | 0 | 0 | -2 | 0 | 72 | 90 | 150 | 1,4 |
| 25 | 0 | 0 | 2 | 0 | 72 | 90 | 750 | 1,4 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | -2 | 72 | 90 | 450 | 0,2 |

| | | | | | | | | |
|----|---|---|---|---|----|----|-----|-----|
| 27 | 0 | 0 | 0 | 2 | 72 | 90 | 450 | 2,6 |
|----|---|---|---|---|----|----|-----|-----|

Çizelge 4.3 Deney sonuçları

| Den, No: | Faktörler | | | | AISI 1040 | | AISI 4140 | |
|----------|--------------------|--------|----------|---------|-------------------------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------------|
| | F _N (N) | t (sn) | n (d/dk) | Ra (µm) | Sürtünme kuvveti F _s (N) | Sürtünme katsayısı (µ) | Sürtünme kuvveti F _s (N) | Sürtünme katsayısı (µ) |
| 1 | 62 | 60 | 300 | 0,8 | 25,8923 | 0,4176 | 23,2090 | 0,3743 |
| 2 | 82 | 120 | 600 | 2 | 30,5597 | 0,3726 | 30,8775 | 0,3765 |
| 3 | 62 | 60 | 300 | 2 | 24,483 | 0,3948 | 25,1215 | 0,4051 |
| 4 | 82 | 60 | 600 | 0,8 | 31,4051 | 0,3829 | 30,2726 | 0,3691 |
| 5 | 62 | 60 | 600 | 2 | 21,8237 | 0,3519 | 25,5867 | 0,4126 |
| 6 | 62 | 60 | 600 | 0,8 | 22,9531 | 0,3702 | 22,8861 | 0,3691 |
| 7 | 62 | 120 | 300 | 2 | 26,7483 | 0,4314 | 28,4447 | 0,4587 |
| 8 | 82 | 120 | 300 | 0,8 | 33,0032 | 0,4024 | 34,7568 | 0,4238 |
| 9 | 82 | 60 | 300 | 2 | 33,4434 | 0,4078 | 33,3013 | 0,4061 |
| 10 | 62 | 120 | 600 | 0,8 | 20,9958 | 0,3386 | 22,3976 | 0,3612 |
| 11 | 82 | 120 | 600 | 0,8 | 30,0302 | 0,3662 | 29,3355 | 0,3577 |
| 12 | 82 | 120 | 300 | 2 | 33,7463 | 0,4115 | 34,0379 | 0,4151 |
| 13 | 82 | 60 | 600 | 2 | 30,5207 | 0,3722 | 29,8572 | 0,3641 |
| 14 | 82 | 60 | 300 | 0,8 | 32,3977 | 0,3950 | 31,3225 | 0,3819 |
| 15 | 62 | 120 | 600 | 2 | 22,6082 | 0,3646 | 21,7739 | 0,3511 |
| 16 | 62 | 120 | 300 | 0,8 | 27,4698 | 0,4430 | 25,5854 | 0,4126 |
| 17 | 72 | 90 | 450 | 1,4 | 24,483 | 0,3400 | 24,0571 | 0,3341 |
| 18 | 72 | 90 | 450 | 1,4 | 24,7256 | 0,3434 | 24,3968 | 0,3388 |
| 19 | 72 | 90 | 450 | 1,4 | 24,6588 | 0,3425 | 24,6606 | 0,3425 |
| 20 | 52 | 90 | 450 | 1,4 | 19,7987 | 0,3807 | 20,8413 | 0,4008 |
| 21 | 92 | 90 | 450 | 1,4 | 33,2352 | 0,3613 | 32,5495 | 0,3538 |
| 22 | 72 | 30 | 450 | 1,4 | 27,2873 | 0,3790 | 23,6284 | 0,3281 |
| 23 | 72 | 150 | 450 | 1,4 | 25,7898 | 0,3582 | 23,6875 | 0,3289 |
| 24 | 72 | 90 | 150 | 1,4 | 34,0205 | 0,4725 | 36,4474 | 0,5062 |
| 25 | 72 | 90 | 750 | 1,4 | 29,3097 | 0,4071 | 27,6324 | 0,3837 |

| | | | | | | | | |
|----|----|----|-----|-----|---------|--------|---------|--------|
| 26 | 72 | 90 | 450 | 0,2 | 26,2214 | 0,3642 | 23,6971 | 0,3291 |
| 27 | 72 | 90 | 450 | 2,6 | 25,3396 | 0,3519 | 23,2090 | 0,3223 |

4.4. Modelin Oluşturulması ve En Küçük Kareler Regresyonu

Deneyler sonucunda elde edilen cevaplar Çizelge 4.3’de verilmiştir. Modelin oluşturulması için, deneylerin sonucunda elde edilen cevaplar, hata varyansını en aza indirmek ve model katsayılarını belirlemek üzere En Küçük Kareler (EKK) yöntemi ile analiz edilir.

Denklem (4.6) ikinci dereceden bir model için geçerlidir.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^f \beta_i X_i + \sum_{i=1}^f \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^f \sum_{j=1}^f \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad [4.6]$$

($i < j$)

Y : Deney cevabı

X_i : Denklemi etkileyen faktörler

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$: Modelin katsayıları

ε : Rastgele, sıfır ortalamalı ve sabit varyanslı bağımsız deneysel hata

Yukarıdaki (4.6) denkleminde $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ ve ε bilinmeyenlerdir. Aslında ε değerini bulmak oldukça zordur. Çünkü ε her deneyde değişirken, $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ sabit kalır. Bu katsayılar Y ve X_i ’nin tüm mevcut olasılıkları denense dahi kesin olarak bulunamaz. Bunun yerine EKK metodu ile b_0, b_i, b_{ii} ve b_{ij} katsayılarının tahmini yapılabilir. Model için oluşturulan (4.6) denkleminin matris dönüşümü (4.7)’deki eşitlikte verilmiştir.

$$y = X \beta + \varepsilon \quad [4.7]$$

Model için gerekli olan X matrisi, y cevap matrisi, β vektörü ve β vektörünün tahmininde kullanılacak B matrisleri aşağıda verilmiştir.

| | AISI 1040 | AISI 4140 | | |
|----|-------------|-------------|----|-----------------|
| | 0,417617742 | 0,374338710 | | |
| | 0,372679268 | 0,376554878 | | |
| | 0,394887097 | 0,405186774 | | |
| | 0,382989024 | 0,369178049 | | |
| | 0,351995161 | 0,412689677 | | |
| | 0,37021129 | 0,369131774 | | |
| | 0,431424194 | 0,458786774 | | |
| | 0,402478049 | 0,423864146 | | |
| | 0,407846341 | 0,40611439 | | |
| | 0,338641935 | 0,361251613 | | |
| | 0,366221951 | 0,357750122 | | |
| | 0,411540244 | 0,415096707 | | |
| | 0,372203659 | 0,364113171 | | |
| y= | 0,395093902 | 0,381981951 | β= | β ₀ |
| | 0,364648387 | 0,351192903 | | β ₁ |
| | 0,44306129 | 0,412669194 | | β ₂ |
| | 0,340041667 | 0,334126528 | | β ₃ |
| | 0,343411111 | 0,338845000 | | β ₄ |
| | 0,342483333 | 0,342508889 | | β ₁₁ |
| | 0,380744231 | 0,400795385 | | β ₂₂ |
| | 0,361252174 | 0,353799239 | | β ₃₃ |
| | 0,378990278 | 0,328172222 | | β ₄₄ |
| | 0,358191667 | 0,328994028 | | β ₁₂ |
| | 0,472506944 | 0,506214583 | | β ₁₃ |
| | 0,407079167 | 0,383784306 | | β ₁₄ |
| | 0,364186111 | 0,329126667 | | β ₂₃ |
| | 0,351938889 | 0,322347361 | | β ₂₄ |
| | | | | β ₃₄ |
| | | | B= | b ₀ |
| | | | | b ₁ |
| | | | | b ₂ |
| | | | | b ₃ |
| | | | | b ₄ |
| | | | | b ₁₁ |
| | | | | b ₂₂ |
| | | | | b ₃₃ |
| | | | | b ₄₄ |
| | | | | b ₁₂ |
| | | | | b ₁₃ |
| | | | | b ₁₄ |
| | | | | b ₂₃ |
| | | | | b ₂₄ |
| | | | | b ₃₄ |

B vektörü β vektörünün yerine kullanıldığında, elde edilen cevabın tahmin edilen değerden sapmaması için, hataların kareleri toplamı, en küçük değerde olmalıdır. Yani denklem (4.8)'de verilen eşitlik geçerli olmalıdır.

$$S = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \cdot \varepsilon \quad [4.8]$$

Denklem (4.8) açık olarak denklem (4.9)'daki gibi yazılır.

$$S = (y - XB)'(y - XB) \quad [4.9]$$

Denklem (4.9)'in sağ tarafı genişletildiğinde denklem (4.10) elde edilir.

$$S = y'y - 2B'X'y + B'X'XB \quad [4.10]$$

B vektörünün denklem (4.10) için en küçük değerini bulmak üzere diferansiyel kurallar uygulanırsa denklem (4.11) elde edilir.

$$\frac{\partial S}{\partial B} = -2X'y + 2(XX')B \quad [4.11]$$

Kısmi çıkarımı sıfıra eşitleyip B için çözüm yapılırsa denklem (4.12) bulunur.

$$(X'X)B = X'y \quad [4.12]$$

$(X'X)$ matrisinin determinantının sıfırdan farklı olduğu kabul edilerek (4.12)'de görülen EKK tahmini denklemi elde edilir.

$$B = (X'X)^{-1}X'y \quad [4.13]$$

Bu denklem B vektörünün tahmini için normal denklem olarak adlandırılır ve çözüm için kullanılır.

Çözüm için, EKK doğrultusunda aşağıdaki işlemler yapılır.

$$(XX')^{-1} = \begin{pmatrix} 0,033 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0,1 & -0,1 & -0,1 & -0,1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,0417 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,04 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0,04 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0,04 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,083 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,05 & 0,02 & 0,02 & 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,083 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0,05 & 0,02 & 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,083 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0,02 & 0,05 & 0,02 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0,083 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0,02 & 0,02 & 0,05 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,06 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,06 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,06 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,06 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,06 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0,06 \end{pmatrix}$$

AISI 1040 için EKK hesaplamasının son iki adımı aşağıda verilmiştir.

$$X'y = \begin{bmatrix} 10,32437 \\ -0,04042 \\ -0,00375 \\ -0,51521 \\ -0,03359 \\ 9,191525 \\ 9,172267 \\ 9,741884 \\ 9,08804 \\ -0,04828 \\ 0,138629 \\ 0,044064 \\ -0,10827 \\ 0,068869 \\ 0,016015 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,3419787 \\ -0,0016841 \\ -0,0001561 \\ -0,0214672 \\ -0,0013994 \\ 0,00802321 \\ 0,00742141 \\ 0,02522193 \\ 0,00478929 \\ -0,0030174 \\ 0,00866431 \\ 0,002754 \\ -0,0067666 \\ 0,00430429 \\ 0,00100096 \end{bmatrix}$$

AISI 4140 için EKK hesaplamasının son iki adımı aşağıda verilmiştir,

$$X'y = \begin{bmatrix} 10,2086 \\ -0,14459 \\ 0,07608 \\ -0,56104 \\ 0,12601 \\ 9,25828 \\ 8,86857 \\ 9,7999 \\ 8,8458 \\ 0,02932 \\ -0,00275 \\ -0,08136 \\ -0,21116 \\ -0,04738 \\ -0,04509 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,33849 \\ -0,00602 \\ 0,00317 \\ -0,02338 \\ 0,00525 \\ 0,01317 \\ 0,001 \\ 0,0301 \\ 0,00028 \\ 0,00183 \\ -0,00017 \\ -0,00508 \\ -0,0132 \\ -0,00296 \\ -0,00282 \end{bmatrix}$$

Bulunan katsayılar matrisine göre (B matrisi) AISI 1040 çeliği için; modelde kullanılmak üzere geliştirilen temas yükü (X_1), kayma süresi (X_2), devir (X_3) ve

pürüzlülüğe (X_4) bağlı olarak sürtünme katsayısını tahmin etmekte kullanılacak denklem (4.14)'deki gibi yazılır.

$$\mu = \left| \begin{array}{l} 0,341979-0,001684X_1-0,000156X_2-0,021467X_3-0,001399X_4+0,008023X_1^2 \\ + 0,007421X_2^2+ 0,025222X_3^2+ 0,004789X_4^2 -0,003017X_1X_2+0,008664X_1X_3 \\ + 0,002754X_1X_4 -0,006767X_2X_3+ 0,004304X_2X_4+ 0,001001X_3X_4 \end{array} \right|$$

[4.14]

AISI 4140 çeliği için ise μ sürtünme katsayısını bulmak için oluşturulacak model denklem;

$$\mu = \left| \begin{array}{l} 0,338497- 0,006025X_1+ 0,00317X_2- 0,0023377X_3+ 0,00525X_4+ 0,013174X_1^2 \\ + 0,000994X_2^2+ 0,030098X_3^2+ 0,000284X_4^2+ 0,001833 X_1X_2- 0,000171X_1X_3 \\ - 0,005086X_1X_4- 0,013198X_2X_3- 0,002961X_2X_4- 0,002819X_3X_4 \end{array} \right|$$

[4.15]

Sürtünme katsayısı modeli için katsayı ve değişkenler Çizelge 4.4'de verilmiştir. Temas yükü (X_1), süre (X_2), devir (X_3) ve başlangıç yüzey pürüzlülüğü (X_4) faktör değerleri kodlanarak model denklemde yerine konur. Böylece faktörlerin değişik değerleri için sürtünme katsayısı değeri hesaplanır.

Çizelge 4.4 Sürtünme katsayısı modeli için katsayı ve değişkenler

| AISI 1040 | Değişkenler | AISI 4140 |
|-----------|-------------|------------|
| 0,341979 | sabit | 0,338497 |
| -0,001684 | X_1 | - 0,006025 |
| -0,000156 | X_2 | 0,00317 |
| -0,021467 | X_3 | - 0,002337 |
| -0,001399 | X_4 | 0,00525 |
| 0,008023 | X_1^2 | 0,013174 |
| 0,007421 | X_2^2 | 0,000994 |
| 0,025222 | X_3^2 | 0,030098 |
| 0,004789 | X_4^2 | 0,000284 |
| -0,003017 | X_1X_2 | 0,001833 |
| 0,008664 | X_1X_3 | 0,000171 |

| | | |
|-----------|----------|------------|
| 0,002754 | X_1X_4 | - 0,005086 |
| -0,006767 | X_2X_3 | - 0,013198 |
| 0,004304 | X_2X_4 | - 0,002961 |
| 0,001001 | X_3X_4 | - 0,002819 |

Çizelge 4.5 ve 4.6’de AISI 1040 ve AISI 4140 çeliklere ait deney sonucunda bulunan sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı ile oluşturulan model çerçevesinde bulunan tahmini cevaplar verilmiştir.

Çizelge 4.5 AISI 1040 çeliği için tahmini cevaplar

| Deney No | Kodlanmış seviyeler | | | | Faktörler | | | | Deney Sonuçları | | CYM Sonuçları | |
|----------|---------------------|-------|-------|-------|-----------------------|----------------------|------------------------|------------------------------|--|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | X_4 | X_1 F_N (N) | X_2 t (sn) | X_3 n (d/dk) | X_4 R_a (μ m) | Ortalama Sürtünme kuvveti F_s (N) | Sürtünme katsayısı (μ) | Sürtünme kuvveti F_s (N) | Sürtünme katsayısı (μ) |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 62 | 60 | 300 | 0,8 | 25,8923 | 0,4176 | 25,3333 | 0,4190 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 82 | 120 | 600 | 2 | 30,5597 | 0,3726 | 29,6667 | 0,3696 |
| 3 | -1 | -1 | -1 | 1 | 62 | 60 | 300 | 2 | 24,4830 | 0,3948 | 24,4583 | 0,4001 |
| 4 | 1 | -1 | 1 | -1 | 82 | 60 | 600 | 0,8 | 31,4051 | 0,3829 | 31 | 0,3848 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 1 | 62 | 60 | 600 | 2 | 21,8237 | 0,3519 | 21,5 | 0,3554 |
| 6 | -1 | -1 | 1 | -1 | 62 | 60 | 600 | 0,8 | 22,9531 | 0,3702 | 22,125 | 0,3703 |
| 7 | -1 | 1 | -1 | 1 | 62 | 120 | 300 | 2 | 26,7483 | 0,4314 | 26 | 0,4280 |
| 8 | 1 | 1 | -1 | -1 | 82 | 120 | 300 | 0,8 | 33,0032 | 0,4024 | 32,5 | 0,3974 |
| 9 | 1 | -1 | -1 | 1 | 82 | 60 | 300 | 2 | 33,4434 | 0,4078 | 31,8333 | 0,3910 |
| 10 | -1 | 1 | 1 | -1 | 62 | 120 | 600 | 0,8 | 20,9958 | 0,3386 | 21,1667 | 0,3539 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | -1 | 82 | 120 | 600 | 0,8 | 30,0302 | 0,3662 | 29,2917 | 0,3563 |
| 12 | 1 | 1 | -1 | 1 | 82 | 120 | 300 | 2 | 33,7463 | 0,4115 | 32,625 | 0,4068 |
| 13 | 1 | -1 | 1 | 1 | 82 | 60 | 600 | 2 | 30,5207 | 0,3722 | 30,625 | 0,3809 |
| 14 | 1 | -1 | -1 | -1 | 82 | 60 | 300 | 0,8 | 32,3977 | 0,3950 | 32,4583 | 0,3989 |
| 15 | -1 | 1 | 1 | 1 | 62 | 120 | 600 | 2 | 22,6082 | 0,3646 | 21,2917 | 0,3562 |
| 16 | -1 | 1 | -1 | -1 | 62 | 120 | 300 | 0,8 | 27,4698 | 0,4430 | 26,125 | 0,4297 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 90 | 450 | 1,4 | 24,483 | 0,3400 | 24 | 0,3419 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 90 | 450 | 1,4 | 24,7256 | 0,3434 | 24 | 0,3419 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 90 | 450 | 1,4 | 24,6588 | 0,3424 | 24 | 0,3419 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|---------|--------|---------|--------|
| 20 | -2 | 0 | 0 | 0 | 52 | 90 | 450 | 1,4 | 19,7987 | 0,3807 | 18,375 | 0,3774 |
| 21 | 2 | 0 | 0 | 0 | 92 | 90 | 450 | 1,4 | 33,2352 | 0,3612 | 33,875 | 0,3707 |
| 22 | 0 | -2 | 0 | 0 | 72 | 30 | 450 | 1,4 | 27,2873 | 0,3789 | 26,2083 | 0,3719 |
| 23 | 0 | 2 | 0 | 0 | 72 | 150 | 450 | 1,4 | 25,7898 | 0,3581 | 26,0417 | 0,3713 |
| 24 | 0 | 0 | -2 | 0 | 72 | 90 | 150 | 1,4 | 34,0205 | 0,4725 | 34,7083 | 0,4858 |
| 25 | 0 | 0 | 2 | 0 | 72 | 90 | 750 | 1,4 | 29,3097 | 0,4070 | 28,5417 | 0,3999 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | -2 | 72 | 90 | 450 | 0,2 | 26,2214 | 0,3641 | 25,875 | 0,3639 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 2 | 72 | 90 | 450 | 2,6 | 25,3396 | 0,3519 | 25,375 | 0,3583 |

Çizelge 4.6 AISI 4140 çeliği için tahmini cevaplar

| Denev No | Kodlanmış seviyeler | | | | Faktörler | | | | Deney Sonuçları | | CYM Sonuçları | |
|----------|---------------------|----------------|----------------|----------------|---|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|------------------------------|---|------------------------------|
| | X ₁ | X ₂ | X ₃ | X ₄ | X ₁ F _N (N) | X ₂ t (sn) | X ₃ n (d/dk) | X ₄ Ra (µm) | Ortalama Sürtünme kuvveti F _s (N) | Sürtünme katsayısı (µ) | Sürtünme kuvveti F _s (N) | Sürtünme katsayısı (µ) |
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 62 | 60 | 300 | 0,8 | 23,209 | 23,6324 | 0,3743 | 0,3816 |
| 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 82 | 120 | 600 | 2 | 30,8775 | 28,2808 | 0,3765 | 0,3396 |
| 3 | -1 | -1 | -1 | 1 | 62 | 60 | 300 | 2 | 25,1215 | 25,6217 | 0,4051 | 0,4138 |
| 4 | 1 | -1 | 1 | -1 | 82 | 60 | 600 | 0,8 | 30,2726 | 29,4271 | 0,3691 | 0,3613 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 1 | 62 | 60 | 600 | 2 | 25,5867 | 24,0807 | 0,4127 | 0,3882 |
| 6 | -1 | -1 | 1 | -1 | 62 | 60 | 600 | 0,8 | 22,8861 | 22,7985 | 0,3694 | 0,3672 |
| 7 | -1 | 1 | -1 | 1 | 62 | 120 | 300 | 2 | 28,4447 | 27,1170 | 0,4588 | 0,4370 |
| 8 | 1 | 1 | -1 | -1 | 82 | 120 | 300 | 0,8 | 34,7568 | 34,0896 | 0,4238 | 0,4187 |
| 9 | 1 | -1 | -1 | 1 | 82 | 60 | 300 | 2 | 33,3013 | 31,9746 | 0,4061 | 0,3883 |
| 10 | -1 | 1 | 1 | -1 | 62 | 120 | 600 | 0,8 | 22,3976 | 21,5510 | 0,3612 | 0,3494 |
| 11 | 1 | 1 | 1 | -1 | 82 | 120 | 600 | 0,8 | 29,3355 | 28,8936 | 0,3577 | 0,3508 |
| 12 | 1 | 1 | -1 | 1 | 82 | 120 | 300 | 2 | 34,0379 | 34,1838 | 0,4151 | 0,4187 |
| 13 | 1 | -1 | 1 | 1 | 82 | 60 | 600 | 2 | 29,8572 | 29,5938 | 0,3641 | 0,3619 |
| 14 | 1 | -1 | -1 | -1 | 82 | 60 | 300 | 0,8 | 31,3225 | 31,1009 | 0,3819 | 0,3764 |
| 15 | -1 | 1 | 1 | 1 | 62 | 120 | 600 | 2 | 21,7739 | 22,0538 | 0,3512 | 0,3585 |
| 16 | -1 | 1 | -1 | -1 | 62 | 120 | 300 | 0,8 | 25,5854 | 25,9072 | 0,4126 | 0,4166 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 90 | 450 | 1,4 | 24,0571 | 24,3715 | 0,3341 | 0,3384 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 90 | 450 | 1,4 | 24,3968 | 24,3715 | 0,3388 | 0,3384 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|---------|---------|--------|--------|
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 90 | 450 | 1,4 | 24,6606 | 24,3715 | 0,3425 | 0,3384 |
| 20 | -2 | 0 | 0 | 0 | 52 | 90 | 450 | 1,4 | 20,8413 | 20,9053 | 0,4008 | 0,4032 |
| 21 | 2 | 0 | 0 | 0 | 92 | 90 | 450 | 1,4 | 32,5495 | 34,6007 | 0,3538 | 0,3791 |
| 22 | 0 | -2 | 0 | 0 | 72 | 30 | 450 | 1,4 | 23,6284 | 24,2346 | 0,3281 | 0,3361 |
| 23 | 0 | 2 | 0 | 0 | 72 | 150 | 450 | 1,4 | 23,6875 | 25,1964 | 0,3289 | 0,3488 |
| 24 | 0 | 0 | -2 | 0 | 72 | 90 | 150 | 1,4 | 36,4474 | 36,4660 | 0,5062 | 0,5056 |
| 25 | 0 | 0 | 2 | 0 | 72 | 90 | 750 | 1,4 | 27,6324 | 29,7290 | 0,3837 | 0,4121 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | -2 | 72 | 90 | 450 | 0,2 | 23,6971 | 23,8223 | 0,3291 | 0,3291 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 2 | 72 | 90 | 450 | 2,6 | 23,2090 | 25,1989 | 0,3223 | 0,3501 |

4.5. Modelin Uyumluluk Kontrolü

Modelin uyumluluk analizi birçok yöntemle yapılabilir (Drapher ve Smith, 1980). Burada bu yöntemlerden iki tanesi için analiz yapılmıştır:

1) Standart Sapma: Kısaca tahminin standart hatası veya regresyon denkleminin standart hatası da denilen bu değer genellikle S harfi ile gösterilir. EKK yöntemiyle $\sum(y - y')^2 = \text{minimum}$ koşuluyla elde edilen regresyon denklemiyle tahmin yapıldığında bir tahmin hatası vardır ama en aza indirilmiştir. Bilindiği gibi gözlenen bir y değeri, bir y' tahmini değeri ve ε gibi bir hata değeri içermektedir. İşte tüm y' değerlerine ait olan bu hataların ortalama değerlerine *standart hata* adı verilmektedir. Regresyon denkleminin standart hatası (4.16) eşitliğiyle bulunur.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(y - y')^2}{n}} \quad [4.16]$$

n : Deney cevap sayısı

y : Deney cevapları

y' : Tahmini cevaplar

Standart hatanın sıfır veya sıfıra yakın olması fonksiyonun iyi seçildiğini ve aynı zamanda X değişkeninin y üzerinde önemli etkisi olduğunu gösterir. Ancak herhangi bir üst sınırı olmadığı için hangi değere kadar kabul edilebilir olduğunu söylemek imkânsızdır (Orhunbilge, 1996).

2) Korelasyon Analizi: Korelasyon kısaca değişkenler arasındaki ilişkinin derecesini tanımlayan kelimedir. Korelasyon analizi denklem katsayıları ile denklem değişkenleri arasındaki ilişkiyi oran olarak gösteren korelasyon katsayısının

hesaplanmasına dayanır. Genelde r ile gösterilen korelasyon katsayısı 1 ile -1 arasında bir değerdedir. Katsayının 1'e yaklaşması ilişkinin güçlü, 0'a yaklaşması zayıf olduğunu, işaret ise ilişkinin yönünü yansıtır. Değişkenler birlikte artıyor veya azalıyorsa korelasyon katsayısı pozitif işaret alır. Negatif işaret ise değişkenlerden biri artarken diğeri azalıyor demektir. Korelasyon katsayısı, alt ve üst sınırı (0-1) bilindiği için model seçiminde araştırmacılara yardımcı olan en önemli göstergedir. Korelasyon katsayısı 1'e yaklaştıkça standart hata düşmektedir.

Çoklu korelasyon analizinde diğer bağımsız değişkenler (faktör değerleri) sabit tutulduğunda tek tek bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken (cevap) üzerindeki etkisini gösteren Kısmi Korelasyon Katsayıları da söz konusu olmaktadır. Korelasyon analizinde korelasyon katsayısının karesi ile ifade edilen Belirlilik Katsayısını r^2 'yi de bulmak mümkündür. Korelasyon analizi denklem (4.17)'deki eşitlikle bulunur (Barkana ve Akgün, 1984).

$$r = \pm \sqrt{\frac{\sum (y' - y_0)^2}{\sum (y - y_0)^2}} \quad [4.17]$$

y_0 : Cevapların aritmetik ortalaması

Yukarıda bahsi geçen iki analizin yapılabilmesi için oluşturulan model yardımıyla her deney için tahmini cevaplar gereklidir. Çizelge 4.5 ve 4.6 'da deney cevapları ve tahmini sürtünme katsayısı değerleri verilmiştir. Değerler bulunurken denklem (4.15) ile verilmiş modelde, Çizelge 4.6'daki F_N , t , n ve R_a faktörlerine ait değerler yerine konur. Böylece elde edilen tahmini cevaplar ile deney cevapları korelasyon analizine tabi tutulur.

AISI 1040 Modele ait standart sapma ve korelasyon katsayısı aşağıdaki şekliyle elde edilmiştir.

$$\text{Standart Sapma: } S = \sqrt{\frac{\sum (y - y')^2}{n}} = \sqrt{\frac{0,001665}{27}} = 0,007852$$

$$\text{Korelasyon Katsayısı: } r = \pm \sqrt{\frac{\sum (y' - y_0)^2}{\sum (y - y_0)^2}} = \sqrt{\frac{0,027587}{0,029247}} = 0,971121$$

AISI 4140 Modele ait standart sapma ve korelasyon katsayısı aşağıdaki şekliyle elde edilmiştir.

$$\text{Standart Sapma: } S = \sqrt{\frac{\sum (y - y')^2}{n}} = \sqrt{\frac{0,005992}{27}} = 0,01489$$

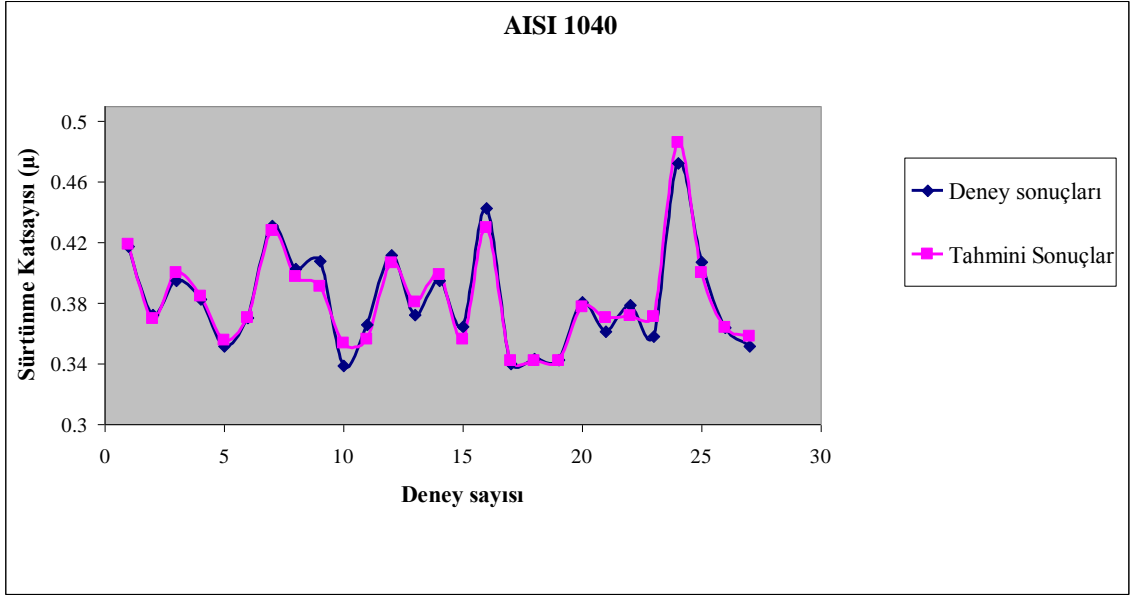
$$\text{Korelasyon Katsayısı: } r = \pm \sqrt{\frac{\sum (y' - y_0)^2}{\sum (y - y_0)^2}} = \sqrt{\frac{0,0424}{0,04839}} = 0,936$$

Çizelge 4.7 Modellerin analiz değerleri

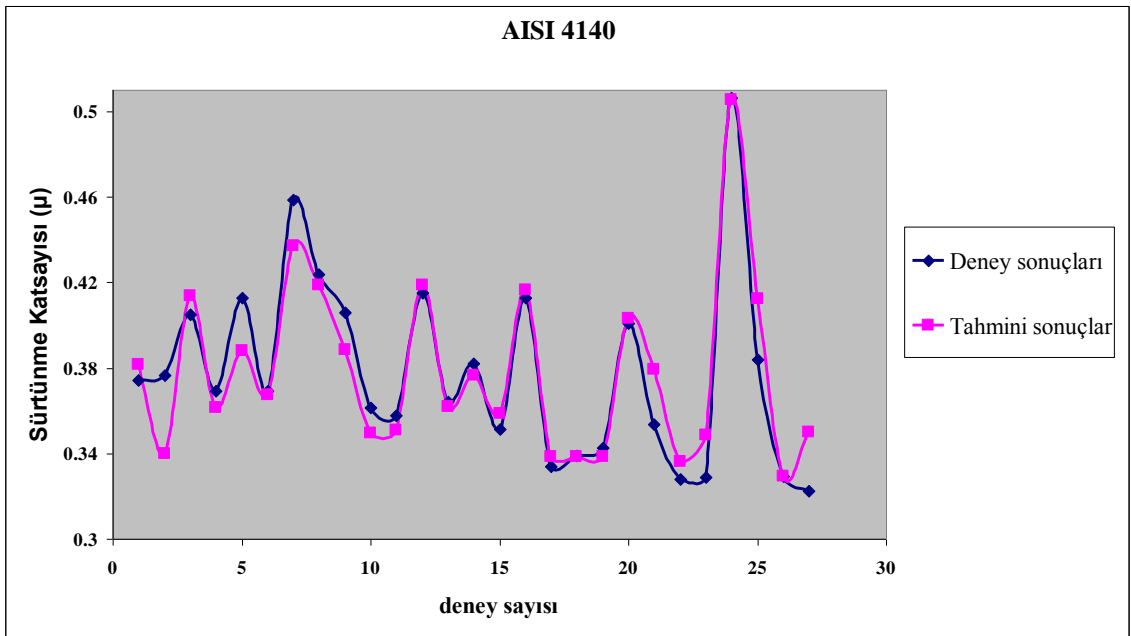
| Modellerin Analiz Değerleri | | |
|-----------------------------|---------------------|-----------|
| AISI 1040 | | AISI 4140 |
| 0,27587 | $\sum (y' - y_0)^2$ | 0,0424 |
| 0,029247 | $\sum (y - y_0)^2$ | 0,04839 |
| 0,001664 | $\sum (y - y')^2$ | 0,005992 |
| 27 | n | 27 |
| 0,9430 | r^2 | 0,8760 |
| 0,9711 | r | 0,9360 |
| 0,0078 | S | 0,0149 |

Çizelge 4.7'deki sonuçlara göre deney cevaplarıyla tahmini cevaplar arasında mükemmel yakın bir korelasyon olduğunu söylemek mümkündür. Bu sonuçlara göre modeller ortalama olarak %95 uyumludur.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de deney cevaplarıyla tahmini cevapların grafiksel olarak karşılaştırılması görülmektedir. Grafikten de görüldüğü gibi, sürtünme katsayısı için oluşturulan model tahmini cevapları ile deney sonuçları birbirine çok yakın değerlerde gerçekleşmektedir.



Şekil 4.1 AISI 1040 Çeliği deneysel ve tahmini sonuçlarının mukayesesi



Şekil 4.2 AISI 4140 Çeliği için deneysel ve tahmini deney sonuçlarının mukayesesi

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Giriş

Genel görünüş itibariyle iki bölümden meydana gelmiş bir plan içerisindeki bu çalışmada, teknik kuru sürtünmede noktasal temas için dinamik sürtünme katsayısının deney faktörleri ile değişimleri incelendi. Çalışmada 2 değişik malzeme çifti kullanılarak 4 değişik faktör ele alınıp toplam 146 adet sürtünme deneyi gerçekleştirildi.

Pratikte çok kullanılan AISI 1040 ve AISI 4140 çelikleri için temas yükü, numune başlangıç yüzey pürüzlülüğü, kayma hızı ve devir faktörleri için sürtünme katsayısı araştırıldı.

Daha sonra sürtünme katsayısının modellenmesine yönelik tipik bir çalışma yapıldı. Kuru sürtünmede iki malzeme çifti için CYM ile ikinci dereceden matematiksel modellemeye gidildi. Model dahilinde yapılan sürtünme katsayısı deneylerinin cevaplarıyla sürtünme katsayısı modeli için merkezi karma dizayn çerçevesinde ön görülen 15 katsayı EKK regresyonu ile tahmin edildi. Analiz neticesinde temas yükü, kayma süresi, devir ve başlangıç pürüzlülük faktörlerine bağlı olarak sürtünme katsayısının hesaplandığı bir model oluşturuldu.

5.2. Sonuçlar

Sürtünme genel karakteristiği üzerine yapılan Bölüm III'deki deneysel çalışmalar sonucunda, çeliklerde sürtünme katsayısının, dört değişken faktör (süre, kayma hızı, temas yükü ve başlangıç yüzey pürüzlülüğü) ile olan ilişkilerini gözlemek mümkündür. Literatürde sıkça karşılaşılan bu tür ilişkiler sürtünme olayında genel karakteristik durumlardır.

Deneyler sonucunda:

- Temas yükü arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır.
- Kayma hızı arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır.
- Kayma süresi arttıkça sürtünme katsayısı azalmıştır.
- Orta derecedeki pürüzlülüklerde sürtünme katsayısının daha hassas yüzeylere göre azaldığı ve pürüzlülüğün yüksek değerlerinde arttığı gözlenmiştir.

Literatüre paralel sonuçlar bulunmuştur.

CYM ile tasarlanan modellemenin yapılan analizinde % 95 uyumlu olduğu görülmüstür.

5.3. neriler

Bölüm IV'de yapılan modelleme çalışmasını genel itibariyle ele aldığımızda, özel tribolojik sistemlere uygulanabilecek bir tribometri yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır. CYM ile yapılan modelleme sadece seçilen sürtünme çifti için geçerlidir. Modelin uygunluğunu tartışmak için daha farklı malzeme çiftleri ile çalışmak uygun olacaktır. Modeller için esas alınan cevapların sayısı artırılarak daha hassas sürtünme katsayısı modelleri elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Akkurt, M. (1990). Makina Elemanları- Cilt I, Birsen Yayınevi, İstanbul
- Abdo,J., Shamseldin, E. (2007). Experimental Technique for Characterization of friction in Dry Contact, Journal of solid Mechanics and Materials Engineering, Vol.1, No.10, 1197 -1208
- Barkana, A. ve Akgün, Ö.R. (1984). Basic Programlama ve Nümerik Hesap, Bilim Teknik Yayınevi
- Blau, P.J., (1997). Fifty Years of Research on The Wear of Metals, Tribology International, Volume 30, Number 5, 321-331
- Box, G.E. Hanter, G. Hanter J. (1980). Statistics for Experimenters, John Willey and Sons, New York
- Carpinteri A. ve Paggi M. (2005). Size-scale effects on the friction coefficient , International Journal of Solids and Structures, Vol. 42 Issue. 9-10, 2901- 2910
- Czichos, H. Habig, Karl H. (1992). Tribologie Handbuch-Reibung und Verschleiss, Vieweg,
- Decision Computer International Co. Ltd. (1996). Data Capture System-Operations Manual
- Demirci, A.H. (1987). Teknik Kuru Sürtünmeli Bir Aşınma Deney Düzeneği Tasarım ve İmalatı, Mühendis ve Makina Dergisi, Cilt 29, Sayı 330, 24-29
- Dowson, D. (1979). History of Tribology, Longman, London,
- Drapher, N.R. ve Smith, H. (1980). Applied Regression Analysis, Jhon Willey ve Sons, New York
- Espinosa, HD. Patenella, AJ. Fischer, M. (2000). Dynamic Friction Measurement at Sliding Velocities Representative of High Speed Machining Processes, Journal of Tribology-Transactions of the Asme, Volume 122, Issue 4, 834 -848
- Hutchings, I.M. (1992). Tribology: Friction and wear Engineering Materials, London,
- Karnopp, D.C. Rosenburg, R.C. (1980). Introduction to Physical System Dynamics, Mc Graw- Hill, New York

- Karamış M. B. ve Selçuk, B. (1993). Analysis of The Friction Behaviour of Bolted Joints, *Wear*, Vol. 166, 73 -83
- Lin J.F. Chou C.C. (2002). The Response surface Method and the Analysis of Mild Oxidational Wear, *Tribology International*, Vol 35, 771-785
- Orhunbilge, N. (1996). Uygulamalı Regresyon ve Korelasyon Analizi, İstanbul
- Özdemir U. Erten M. (2004). Plazma Nitrürlemenin Sert Metal Plaketlerde Sürtünme Katsayısına Etkisi, *Havacılık ve Uzay teknolojileri dergisi*, cilt1, sayı 3, 29 -38
- Philippon S. Sutterb G. and Molinarib A. (2004). An Experimental Study of Friction at High Sliding Velocities *Wear*, Volume 257, 777 -784
- Raymond, H.M. (1971). *Response Surface Methodogy*, Boston
- Rajagopalan, S. Prakash V. (2001). An Experimental Method to Study High Speed Sliding Characteristics During Forward and Reverse Slip, *Wear*, Vol. 249 Issue. 8 687 -701
- Selçuk, B. (1994). Borlanmış AISI 1020 ve 5115 Çeliklerinin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, E.Ü.Fen Bil.Ens., Kayseri,156 s
- Tanaka, K. ve Kusumi, T. (1998). Elastics Contact and Friction Between Sliders and Circumferentially Textured Disks, *Journal of Tribology*, V120, 28 -34
- Topbaş, M.Ali (1993). *Endüstri Malzemeleri-II. Cilt*, Yıldız
- Weck, M. (1991). *Werkzeugmaschinen fertigungssysteme - Band 2: Konstruktion und Berechnung*, VDI-Verlag
- Yücel, A. (1999). Çeliklerde Aşınmaya Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas, 76s

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel bilgiler

| | |
|----------------------|--|
| Adı Soyadı | Netice DUMAN |
| Doğum Yeri ve Tarihi | Sivas, 21/10/1969 |
| Medeni Hali | Evli |
| Yabancı Dil | İngilizce |
| İletişim Adresi | Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Tek. Bölümü, 58140-Sivas |
| E-posta Adresi | nduman@cumhuriyet.edu.tr |

Eğitim ve Akademik Durumu

| | |
|---------------|-------------------------------|
| Lise | Sivas Lisesi, 1986 |
| Lisans | Cumhuriyet Üniversitesi, 1991 |
| Yüksek Lisans | Cumhuriyet Üniversitesi, 2010 |

İş Tecrübesi

| | |
|-------------------------|--|
| Özel Şirket | Makina mühendisi, KÜMSAN A.Ş., 1991-1993 |
| Cumhuriyet Üniversitesi | Öğr. Gör. Divriği MYO 1993-1997 |
| Cumhuriyet Üniversitesi | Öğr. Gör. Sivas MYO 1997- |

Ödüller, Teşvikler ve Üyelikler

| | |
|-----------|-------|
| TMMOB/MMO | 1991- |
|-----------|-------|

