

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MoS₂ KATKILI PA 66 RULMANLI MAKARANIN KAPLAMA YAPILMIŞ AISI
1050 İMALAT ÇELİĞİ KARŞISINDA AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hamit KENAN

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim

Programı : Herhangi Program

OCAK 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MoS₂ KATKILI Pa 66 RULMANLI MAKARANIN KAPLAMA YAPILMIŞ AISI
1050 İMALAT ÇELİĞİ KARŞISINDA AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hamit KENAN
(50311208)**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Konstrüksiyon Programı

**Tez Danışmanı: Yrd.Doç.Dr.İ.Mehmet PALABIYIK
Anabilim Dalı : Herhangi Mühendislik, Bilim
Programı : Herhangi Program**

OCAK 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503111208 numaralı Yüksek LisansÖğrencisi **Hamit KENAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**MoS₂ KATKILI Pa 66 RULMANLI MAKARANIN KAPLAMA YAPILMIŞ AISI 1050 İMALAT ÇELİĞİ KARŞISINDA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. İ. Mehmet PALABIYIK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Vedat TEMİZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cüneyt FETVACI
İstanbul Üniversitesi

Teslim Tarihi : **12 Ocak 2015**
Savunma Tarihi : **19 Ocak 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Tez kapsamında yapılan bu çalışmada asansör kapı mekanizmalarında kullanılan rulmanlı plastik makaraların farklı kaplama türlerine karşı çalıştırılarak aşınma grafiklerinin elde edilmesiyle aşınma davranışlarının incelenmesi amaçlanmıştır.

Öncelikle tez konusu belirleme aşamasında bana yardımcı olan ve deneyler için gerekli donanımı sağlayan hocam Yrd.Doç.Dr. İ.Mehmet PALABIYIK'a, deneyleri gerçekleştirmem hususunda maddi ve manevi desteği sağlayan Tempo Rulman Ltd. Şti. genel müdürü sayın Erol BATUK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Yine bu süreçte bana destek olan aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ocak 2015

Hamit KENAN
(Makine Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	2
2. KOROZYON VE AŞINMA DIRENCİ İÇİN YÜZEY İŞLEMLERİ	5
2.1 Yüzey Mühendisliği	5
2.2 Korozyon ve Aşınmanın Ekonomik Etkileri	7
2.3 Korozi Aşınma	7
2.4 Korozyonu Kontrol Etme Metodları	7
2.5 Aşınmayı Kontrol Etme Metodları.....	9
3. SÜRTÜNME VE AŞINMA PRENSİPLERİ	11
3.1 Sürtünme	11
3.2 Çeşitli Malzeme Çiftleri İçin Sürtünme Katsayıları.....	13
3.3 Aşınma	15
3.3.1 Aşınmanın sınıflandırılması	15
3.4 Korozyonu Kontrol Etme Metodları	15
3.4.1 Abrasif aşınma	17
3.4.1.1 Abrasif aşınma kategorileri	18
3.4.1.2 Malzeme özelliklerinin abrasif aşınma üzerindeki etkileri	22
3.4.2 Katı parçacık erozyonu	23
3.4.3 Sıvı erozyon	23
3.4.4 Sulu erozyon	24
3.4.5 Adhesiv aşınma	24
3.4.6 Sürtünme yapışması	27
3.4.7 Titreşimli aşınma.....	28
3.4.8 Yuvarlanma temaslı aşınma	29
4. POLİAMİD 66.....	31
5. KAPLAMA YÖNTEMLERİ	33
5.1 Kataforez Kaplama.....	33
5.2 Toz Boya Kaplama.....	33
5.3 Galvaniz Kaplama	34
5.4 Krom Kaplama	34
6. DENEYSEL ÇALIŞMA	35
6.1 Deney Düzenegi	37
6.2 Deneyin Yapılışı.....	40
6.3 Aşınma Oranlarının Hesaplaması.....	43
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	47

7.1 Deney Sonuçları	47
7.2 Değerlendirme	50
KAYNAKLAR.....	53
EKLER.....	55
ÖZGEÇMİŞ	65

KISALTMALAR

MoS₂	: Molibden Disülfür
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
PA	: Poliamid
ÇYMAPE	: Çok Yüksek Moleküler Ağırlıklı Polietilen
POM	: Polioksimetilen
PEEK	: Polietereeterketon
PET	: Polietilenteraflat
LDPE	: Düşük Yoğunluklu Polietilen
PTFE	: Polietilenfloretilen
ASM	: Amerikan Metal Derneği

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Yüzey mühendisliği uygulamaları ve faydaları.....	6
Çizelge 2.2 : Aşınma ve korozyon mekanizmaları arasındaki sinerjik ilişkiler	8
Çizelge 3.1 : Çeşitli malzeme çiftleri için sürtünme katsayıları	14
Çizelge 3.2 : Bazı malzeme çiftleri için aşınma katsayıları.....	26
Çizelge 4.1 : Poliamid özellikleri	31
Çizelge 6.1 : Asansör kapı genişlikleri ve açılıp kapanma süreleri	40
Çizelge 6.2 : Kataforez kaplanmış numune diske ait yüzey pürüzlülük değerleri	42
Çizelge 6.3 : Toz boya kaplanmış numune diske ait yüzey pürüzlülük değerleri	42
Çizelge 6.4 : Galvaniz kaplanmış numune diske ait yüzey pürüzlülük değerleri.....	42
Çizelge 6.5 : Krom kaplanmış diske ait yüzey pürüzlülük değerleri.....	42

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Çeşitli yüzey mühendislik işlemlerinin yaklaşık kalınlıkları	9
Şekil 3.1 : Sürtünme açısının gösterimi	13
Şekil 3.2 : Blau'ya göre aşınma sınıflandırması	16
Şekil 3.3 : Budinski'ye göre aşınma sınıflandırması.....	17
Şekil 3.4 : Seramik parça tarafından aşındırılmış yumuşak bakır yüzeyindeki hasar	18
Şekil 3.5 : Abrasif aşınma boyunca temas tipleri a) açık 2 maddeli b) kapalı 2 maddeli c) açık 3 maddeli d) kapalı 3 maddeli	19
Şekil 3.6 : 4 tip abrasif aşınmanın şematik gösterimi a) düşük gerilme aşınması b) yüksek gerilme aşınması c) oyma aşınması d) parlatma aşınması	20
Şekil 3.7 : Abrasif aşınmanın 5 farklı mekanizması.....	21
Şekil 3.8 : Sulu erozyon örneği.....	24
Şekil 3.9 : Sulu erozyon aşınma tipleri a)abrazyon-korozyonu b)oyulma aşınması c)abrasif aşınma d)yüksek hız erozyonu e)düşük hız erozyonu f)sıçarama g)kavitasyon	25
Şekil 3.10 : Adhesiv aşınma	25
Şekil 4.1 : Poliamid Kimyasal Yapısı.....	31
Şekil 6.1 : Asansör kapı mekanizması.....	35
Şekil 6.2 : MoS ₂ Katkılı Pa 66 malzemeden imal edilmiş ray makarası	38
Şekil 6.3 : Çift disk deney düzeneği şematik gösterimi	39
Şekil 6.4 : Çift disk deney düzeneği genel görünüşü	39
Şekil 6.5 : Kaplama yapılmış numune diskler a) kataforez b) toz boya c) galvaniz .	41
Şekil 6.6 : Aşınma oranlarının hesaplanması	45
Şekil 7.1 : Toz boya kaplamaya karşı yapılan deneyde makara yüzeyinde görülen a) oyuk ve b) kesme aşınması hasarı	48
Şekil 7.2 : Kataforez kaplamaya karşı yapılan deneyde makara yüzeyinde görülen aşınma hasarı	49
Şekil 7.3 : Galvaniz kaplamaya karşı yapılan deneyde makara yüzeyinde görülen aşınma hasarları.....	49

Şekil A.1 : MoS ₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların toz boya kaplama karşısında aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişimi	56
Şekil A.2 : MoS ₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların toz boya kaplama karşısında yüzey sıcaklığının kayma mesafesi ile değişimi	57
Şekil A.3 : MoS ₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların kataforez kaplama karşısında aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişimi	58
Şekil A.4 : MoS ₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların kataforez kaplama karşısında yüzey sıcaklığının kayma mesafesi ile değişimi	59
Şekil A.5 : MoS ₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların galvaniz kaplama karşısında aşınma miktarının kayma mesafesi ile değişimi	60
Şekil A.6: MoS ₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların galvaniz kaplama karşısında yüzey sıcaklığının kayma mesafesi ile değişimi	61
Şekil A.7 : MoS ₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların krom kaplama karşısında aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişimi	62
Şekil A.8 : MoS ₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların krom kaplama karşısında yüzey sıcaklığının kayma mesafesi ile değişimi	63

MoS₂KATKILI PA 66 RULMANLI MAKARANIN KAPLAMA YAPILMIŞ AISI 1050 İMALAT ÇELİĞİ KARŞISINDA AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Polimer malzemeler, birbirleri ile sürtünerek çalıştığı polimer ve metal malzemeler ile birlikte endüstride yaygın olarak kullanılan malzeme çiftleridir. Polimer malzemeler ve kompozitler, kirlenmeyle ilgili problemlere sahip yağlama ihtiyacından kaçınmak için kendinden yağlama özelliklerinin kullanıldığı dişliler, kamlar, yataklar, güç aktarma kayışları gibi kayma/yuvarlanma parçalarında yaygın olarak kullanılırlar.

Plastikler, sanayinin tüm alanlarında yaygın olarak kullanılan, ucuz ve kolay temin edilir malzemelerdir. Bunun yanı sıra düşük mukavemetli olduklarından aşınma yoluyla yıpranıp kullanılamaz hale gelirler. Karşılıklı çalışan iki malzeme çifti arasında temas meydana geldiğinde sürtünme ve aşınma problemi meydana gelmektedir. Polimerlerin aşınmasında üç temel mekanizma rol oynamaktadır. Bunlar, adhesiv aşınma, abrasif aşınma ve yorulma aşınmasıdır.

Aşınma direncinin artması ve sürtünme katsayısının azalması doğru malzeme çifti seçimine bağlıdır. Aşınma, katı, sıvı veya gaz temasının mekanik etkisiyle malzemenin yer değiştirmesi veya ayrılmasıyla katı yüzeyinde meydana gelen hasar olarak tanımlanmaktadır. Bu hasar çoğunlukla malzeme kaybını da içermektedir. Aşınma konusunda yapılan araştırmalar neticesinde bir çok aşınma tipi ve kategorisi tanımlanmasına rağmen belli bir standart oluşturulamamıştır. Bu standartın oluşturulamamasında aşınma mekanizmalarının malzemenin tipine, ortam koşullarına, işletme şartlarına göre değişkenlik göstermesi yatmaktadır. Korozyon da aşınmaya etki eden faktörler arasında bulunabilmektedir. Aralarında bulunan sinerjik ilişkilerden dolayı birbirini tetikleyen faktörler olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Ortam, ara yüzey ve malzeme üçgeninde meydana gelen korozyon metallerin doğada bulundukları hale dönmesinde itici bir güç olarak görev yaparken, bu süreç sonucunda oluşan korozyon ürünleri malzeme yüzeyinde birikir, çözünür ve malzeme iç yapısında değişikliklere sebep olur. Bu durum da malzeme yüzey özelliğinin değişmesine, ağırlık kaybına ve yapısal süreksizlik oluşumu gibi korozyon hasarı meydana getirmektedir. Malzeme yüzeyinde meydana gelen bozulmalar karşı malzeme için de sorun teşkil etmektedir. Bundan dolayı, sadece korozyona uğrayan malzeme yüzeyi değil beraber çalıştığı karşı yüzey de bu hasardan etkilenmektedir. Bu durumda aşınmayı kontrol etmek için korozyona karşı da önlem alma ihtiyacı gerekir. Korozyonu önlemek için bir yöntem de korozyona uğrama potansiyeline sahip malzeme üzerine kaplama yapmaktır.

Yapılan çalışma ile asansör kapı mekanizmalarında kullanılan MoS₂ katkılı poliamid 66 malzemesinden üretilen rulmanlı makaranın farklı kaplama türleri karşısında çalıştırılmasıyla aşınma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Doğrusal bir ray

üzerinde çalışan bu makaranın mekanizmadaki görevi hem kayma hem de yuvarlanma hareketi yaparak kapı panellerinin açılıp kapanmasını sağlamak ve aynı zamanda kapı panel ağırlığını taşımaktır. Yapılan çalışmada bu görevler göz önünde bulundurularak tasarlanan makaranın çalışmasını simüle eden bir çift disk deney düzeneği kullanılmıştır. Deney düzeneği aynı anda dört makaranın test edilmesine izin verecek şekilde dizayn edilmiştir. 400 mm çapında bir disk etrafına aralarında 90° açı olacak şekilde konumlandırılmış ve pnömatik kollar yardımıyla değiştirilebilen basınç değerleriyle diske teması sağlanan makaralar, diskin ayarlanabilen hızı ile dönerek hem kayma hem de yuvarlanma hareketi yapmaktadır. Deney düzeneğindeki manyetik bir sensörün disk üzerine sabitlenmiş mıknatısı kullanarak devir sayısını göstermesi ile kayma mesafesi hesaplanabilmektedir. Deney düzeneği kullanılarak kayma hızı, makaralara gelen yük miktarı, makara malzemesi veya geometrisi, ray malzemesi veya geometrisi değiştirilip çeşitli testler yapılabilmektedir.

Çalışmada makara malzemesi ve geometrisi, ray geometrisi, kayma hızı ve yük miktarı sabit tutularak ray malzemesi üzerine yapılan kaplamalar değiştirilip üç farklı deney yapılmıştır. Ray malzemesi kaplaması olarak ekonomik nedenlerden dolayı piyasada tercih edilen kataforez, toz boya ve galvaniz kaplama seçilmiştir. Aşınma davranışını incelemek için deney başlangıcından bitişine kadar sık aralıklarla makarada meydana gelen kütle kaybı hassas terazi ile ölçülmüş ve makaranın ray ile temas ettiği noktadan kızıl ötesi termometre ile sıcaklık değeri okunmuştur. Manyetik sensöre bağlı sayaç ile de kayma mesafesi hesaplanarak aşınma miktarının ve sıcaklığın kayma mesafesi değişimi grafiklerle gösterilmiştir.

Her deney 1.256 m/s sabit hız ve 3 MPa sabit basınç değerleri kullanılarak üç farklı kaplama ile gerçekleştirilmiştir. Her üç deney ile 1500 km kayma mesafesine ulaşılmıştır. Aşınma oranları hesaplandığında en fazla oranı kataforez kaplama vermesine rağmen makaralar üzerinde en az aşınma hasarının da kataforez kaplama ile yapılan deney sonucunda elde edildiği gözlemlenmiştir.

INVESTIGATION OF THE WEAR BEHAVIOUR OF PA 66 MIXED MoS₂ BEARING PULLEY AGAINST COATED AISI 1050 WORK STEEL

SUMMARY

Polymer materials are widely used in the industry along with pairs of polymer and metal parts rubbing against each other to work. Polymer materials and composites, are commonly used in slipping/rolling parts as gears, cams, bearings, power transmission belts that have self-lubricating properties to avoid the lubrication requirement that has problems related to pollution.

Plastics are the materials which is cheap, easy to obtain and used in the all field of industry. On the other hand, they become useless by sloughing through wear since they have low strenght. When the contact happens between the reciprocating material pair, friction and wear problems occur. There are three mechanism having a role in polymer wear. These are adhesive, abrasive and fatigue wear.

Abrasive wear is defined as wear due to hard particles or hard protuberances forced against and moving along a solid surface. This form of wear in metals is most frequently caused by nonmetallic materials, but metallic particles can also cause abrasion. Generally, a material is seriously abraded or scratched only by a particle harder than itself. When two surfaces contact, wear occurs on both surfaces. Individuals and industry tend to focus on the wearing surface that has the greatest potential for their own economic loss, and consider the other surface to be the abrasive. Abrasion is typically categorized according to types of contact, as well as contact environment. Types of contact include two-body and three-body wear. The former occurs when an abrasive slides along a surface, and the latter, when an abrasive is caught between one surface and another. Several mechanisms have been proposed to explain how material is removed from a surface during abrasion. These mechanisms include fracture, fatigue, and melting. Because of the complexity of abrasion, no one mechanism completely accounts for all the loss. Although hardness is the most important factor in the resistance to abrasion, other properties such as elastic modulus, yield strength, fracture toughness, microstructure, and composition also play an important role. Prevention of abrasive wear is possible through proper material selection and the use of surface engineering treatments.

Adhesive wear is defined as wear by transference of material from one surface to another during relative motion under load due to a process of solid-state welding; particles that are removed from one surface are either permanently or temporarily attached to the other surface. Adhesive wear may be between metallic materials, ceramics, or polymers, or combinations of these. It is dependent on adhesion between thematerial, and that, in turn, depends on surface films like oxides or lubricants, as well as the mutual affinity of one material for another. Solid surfaces are almost never perfectly smooth but rather consist of microscopic or macroscopic asperities of various shapes. When two such surfaces are brought into contact under a load normal to the general planes of the surfaces, the asperities come into contact and elastically or plastically deform until the real area of contact is sufficient to carry the load. A bond may then occur between the two surfaces that is stronger than the intrinsic strength of the weaker of the two materials in contact. When relative motion between the two surfaces occurs, the weaker of the two materials fails, and material is

transferred to the contacting surface. In subsequent interactions, this transferred material may be retransferred to the original surface (probably at a different location) or may become totally separated as a wear debris particle of an irregular morphology.

Increasing of the wear resistance and decreasing of the friction coefficient depend on selection of the right material pairs. Wear is defined as the damage on the solid surface with the material displacement or removal by the mechanical effect of the solid, liquid or gas contact. The damage include mostly material removal. Even though there are many wear type and categories defined as a result of studies on wear problem, a certain standard could not be established. The varying from material type, enviroment conditions to operating conditions of the wear mechanisms lie behind failing to create this standard. Corrosion may also be in the factors which is responsible for effecting the wear. Because of the synergistic relations among them, they appear as the factors effecting each other. While corrosion which occurs in the triangle of enviroment, inter surface and material, participate in returning of the materials into their first form in nature as a driving power, the corrosion products composed after the process accumulate on the material surface, dissolve and cause changes in the internal structure of material. That situation generate corrosion damage as the changes of the material surface feature, weight loss and structural discontinuity formation. Breakups on the material surface also pose a problem for the encounterer material surface. In this case, not only the surface corroded but also the encounterer surface is effected by the corrosion damage. That why it is needed to take precautions against corrosion to control the wear. One of the method for precaution against the corrosion is making coating on the surface which has potential to corrosion.

In the study, it is aimed to investigate the wear behaviour of Pa 66 mixed MoS₂ bearing pulley which is working against to steel coated with different coatings in the elevator door mechanism. Polyamides developed in order to take the place of natural cotton by W.carothers in 1934 is one of today's most widely used engineering plastics. Poylamide applications are desirable for the good sliding friction properties (low friction coefficient), high thermal resistance, good electrical properties, impact resistance, elasticity resistance and dimensional stability against chemicals. MoS₂ is a solid lubricant is used to reduce the wear rate and increase the pv limits in nylons and composites.

The mission of bearing pulleys in the mechanism is to open and close the elevator door by making both sliding and rolling motion on the lineer rail and simultaneously carry the elevator door panel weight. A double disk test device which had been designed by considering working these functions, was used in this study. The test device was designed to be able to test four specimens simultaneously. The bearing pulleys which was positioned around the 400 mm diameter disc with such an angel 90° among them and contacted to the disc using pneumatic pistons with adjustable pressure settings are able to make both sliding and rolling motion by rotating disc velocity. Sliding distance can be measured using a fixed magnet on the disc with a magnetic sensor showing the number of cylcle in the test device. Several test can be carried out by changing sliding velocity, pressure, pulley material, rail material or geometry.

In the study, four different tests carried out with four different coating by keeping pulley material, geometry, rail geometry, sliding velocity and pressure constant. Cathaphoresis coating, powder paint coating, galvanized coating and chrome coating were chosen as coating type because of commonly used in industry. The weight loss was measured with a precision scales frequently from the beginning to the end of the test to investigate the behaviour of wear and the interface temperature on the contact area was measured using an infrared thermometer. The changing of wear amount and interface temperature with calculating sliding distance using the data taken from the magnetic sensor was shown in graphics.

Every test was carried out with constant value of velocity 1,256 m/s and pressure 3 MPa. At the end of the all four test, bearing pulleys reached to 1500 km as sliding distance. The resulting wear rates are $1,69 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm}$, $1,35 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm}$, $0,67 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm}$, $2,38 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm}$ for powder coating, cathaphoresis coating, galvanized coating and chrome coating, respectively.

The first experiment was performed against powder paint coated disk. Shortly after the experiment began, the powder paint coating started to wear by the bearing pulleys which had harder surface comparing to itself. This situation reflected to the bearing pulleys as abrasive wear effect since it disrupted the powder paint surface structure. During the test, the number three bearing pulley had to be canceled by getting damaged in a short time because of the positioning error of the pneumatic arm. At the same time, it was observed several wear mechanisms which effected the bearing surface negatively by reason of disk oscillation in vertical direction and it caused to cancel the number four bearing pulley as well. Because of the oscillation gouging wear type was observed in the beginning of the test and during the ongoing process galling wear showed up on the bearing pulleys surface. The number one and two bearing pulleys reached up to 1500 km without losing their functionality after all.

The second experiment was performed against cathaphoresis coated disk by repairing the disk balance. During the test which was observed uniform wear, there were not any gauging wear damage, cracking, pitting wear damage depending on surface fatigue. Instead of these wear damages, cutting and polishing wear damage which caused weight loss was observed in the direction of pulley and disk contact point. All four bearing pulleys reached up to 1500 km without losing their functionality.

In the third experiment, the bearing pulleys worked against to the galvanized coated disk. Even though it gave the minimum wear rate comparing to the other coating types, it had the worst wear damage. Even the four bearing pulley reached to the 1500 km, at the end of the test it was concluded that this type of coating was not practical for the system.

The fourth experiment was performed against to the chrome coated disk. The maximum wear rate was observed in this test but we have not any information on what type of wear damage occurred during the test since it's test data has taken from the previous study. We just can say that it gave the worst wear rate value with respect to the other coating types.

As a result, even though chrome coating gave the maximum value after calculating the wear rate, it was observed the cataphoresis coating caused the lightest wear damage on the bearing pulleys.

1. GİRİŞ

Plastikler günümüzde sanayinin tüm alanlarında yaygın olarak kullanılan, fiyatı oldukça ucuz ve piyasada kolay temin edilebilen malzemelerdir. Ancak bu malzemelerin aşınma yoluyla yıpranması ve bu nedenle kısa sürelerde kullanılamaz duruma gelmesi teknikte en az bunların mukavemetlerinin bir çok amaç için yetersiz kalması kadar büyük önem taşımaktadır. Aşınma mekanizmaları birbirine benzemekle beraber, aşınma davranışları açısından plastikler metallere göre bazı önemli farklılıklar gösterir. Ayrıca plastik malzemeler çoğu kez kullanıldıktan ve yıprandıktan sonra çevreye atılmakta ve bunların atıkları çevre kirlenmesi açısından çok önemli sayılabilecek sorunlar yaratmaktadır. Metallerde aşınan makine elemanının hurda şeklinde yeniden ergitilip değerlendirilmesi tamamen mümkünken, plastiklerin belli türleri dışında yeniden ergitilip değerlendirilmesi hemen hemen mümkün olmamaktadır. [1]

Plastik malzemelerde meydana gelen hasarların tespit edilmesi ve önlem alınması için çeşitli test cihazları geliştirilmiştir. Plastik elemanlardaki atık miktarının en aza indirilmesinde alınacak önlemlerin belirlenmesi için öncelikle hasara sebep olan etmenlerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla plastik malzemelerde ne tür aşınma mekanizmalarının meydana geldiği araştırılıp buna göre alınacak önlemler araştırmacılar tarafından belirlenmiştir. Farklı malzeme çiftlerinin farklı koşullar altında gösterdikleri tribolojik özellikler değişken olduğundan plastiklerin aşınma davranışı hakkında genel bir yargıda bulunmak kolay değildir. Bundan dolayı araştırmacılar durum analizi üzerine yoğunlaşarak plastik malzemeler ile bunların çalıştıkları karşı malzemeleri ve iki malzeme çiftinin çalıştıkları ortam koşullarını referans alarak bu tribolojik sistemi sağlayan test cihazları tasarlayarak deneyler gerçekleştirmiş ve sonuçları yorumlamışlardır.

1.1 Literatür Araştırması

Yapılan çalışmada MoS₂ katkılı poliamid 66 malzemeden yapılmış rulmanlı makaranın kaplama yapılmış AISI 1050 imalat çeliği karşısında aşınma davranışı incelendiğinden konu ile alakalı olarak plastiklerin aşınma davranışı ve plastiklerin aşınma davranışını etkileyen kayma hızı, uygulanan yük, yüzey pürüzlülüğü, sertlik gibi konularda yapılan çalışmalar araştırılmıştır.

Liu ve arkadaşları, sulu ortam şartlarında PA, ÇYMAPE ve PA/ÇYMAPE karışımlarının aşınma davranışlarına kayma mesafesi, yüzey pürüzlülüğü, uygulanan yük ve kayma hızının etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışmalar neticesinde uygulanan yükün ve karşı yüzey pürüzlülüğünün kontrol edilebilir parametreler olduğu ve kayma mesafesi ile kayma hızının ise aşınma üzerinde daha az etkiye sahip olduğu sonuçlarına ulaşmışlardır[2].

Koç R, poliamid 6 (PA6), dökümpoliamid 6 (PA6G), poli-okis-metilen (POM), poli-eter-eter-keton (PEEK) ve poli-etilen-terafat (PET) mühendislik polimerlerini disk-üstü pim deney düzeneğinde üç farklı yük ve iki farklı kayma hızı kullanarak AISI 1040 çeliğine karşı kuru ortamda aşınma davranışlarını incelemek amacıyla kullanmıştır. Kayma hızının artışı ile aşınma oranlarının ve sürtünme katsayılarının arttığını tespi etmiştir. PEEK, PAG6 ve PET mühendislik polimerlerinde yükün artmasıyla sürtünme katsayısının arttığını, PA6 ve POM mühendislik polimerlerinde ise azaldığını tespit etmiştir[3].

Brostow W. ve Arkadaşları, ana malzeme olarak düşük yoğunluklu poli-etilen (LDPE) olmak üzere yüzde on dağılmış faz olarak mikro boyutlu ve makro boyutlu metal parçacık içeren kompozitlerle çalışmışlardır. Kullanılan metal boyutu ve türüne göre deformasyon, yapraklanma, abrazyon, adezyon ve yuvarlanma oluşumu olmak üzere birkaç aşınma mekanizması gözlemlemişlerdir[4].

Chowdhury ve Arkadaşları, Poli-etilen-flor-etilen (PTFE) ve naylonun düşük karbonlu çelik karşısında sürtünme katsayısı ve aşınma oranını incelemişlerdir. Üç farklı yük , üç farklı kayma hızının kullanıldığı, pürüzlü ve pürüzsüz düşük karbonlu çeliği teflon ve naylon disk üzerinde kaydırıldığı deneyde pin–disk aşınma test cihazı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki teflon ve naylonun pürüzlü veya pürüzsüz yüzeye karşı olmak üzere her iki durumda artan yük ile sürtünme katsayısı

azalmıştır. Diğer yandan artan kayma hızı ile sürtünme katsayısının arttığı gözlenmiştir. Bunlara ek olarak artan yük ve kayma hızında aşınma oranının arttığı tespit edilmiştir[5].

Franklin , yaptığı çalışmada katkısız POM, 30% cam elyaf takviyeli POM (POM+%30CE), %20 PTFE katkılı POM (POM+%20PTFE), PA-66, 30% cam elyaf takviyeli PA-66 (PA-66+%30CE) ve ÇYMAPE gibi polimerlerin aşınma ve sürtünme davranışlarına kayma hızı ve aşındırıcı yüzey pürüzlülüğünün etkisini araştırmışlardır. Düşük yüzey pürüzlülüğünde, kayma hızının artması ile birlikte PA-66, POM+%20PTFE ve POM+%30CE polimerleri için aşınma oranı artarken, POM, UHMWPE ve PA-66+%30CE polimerleri için azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğünün artması ile katkısız POM polimerinin aşınma oranı artarken, POM+%30CE ve PA-66+%30CE polimer kompozitlerinde azaldığı tespit edilmiştir[6].

Wang W.J ve arkadaşları ağır yük tekerlek/ray sisteminin hasar davranışını ve lazer kaplamanın aşınma üzerine etkisini MMS-2A laboratuvar ölçekli yuvarlanma-kayma test aparatında incelemişlerdir. Kobalt tabanlı toz alaşımın kaplama malzemesi olarak kullanıldığı deney sonrasında kaplama öncesi duruma göre tekerlek/ray malzemelerinin yüzey sertliklerinin sırasıyla %41.9 ve %43.1 artış gösterdiği tespit edilmiştir. Kaplamasız ve kaplamalı olmak üzere her iki durumda da ray malzemesinin yüzey sertliğinin tekerlek malzemesinin yüzey sertliğine göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir. 0.8-1.2 mm olarak yapılan kaplama neticesinde kaplama öncesi duruma göre tekerlek ve ray da meydana gelen aşınma miktarı sırasıyla %78.8 ve %78.5 oranında azalma göstermiştir. Ek olarak, sistemdeki aşınma mekanizması kaplamasız durumda yapışma aşınması ve yüzey çatlama aşınmasıyken kaplama sonrası aşınma mekanizması abrasif ve az miktarda kazıma aşınması olarak tespit edilmiştir[7].

2. KOROZYON VE AŞINMA DIRENCİ İÇİN YÜZEY İŞLEMLERİ

2.1 Yüzey Mühendisliği

Yüzey mühendisliği, mühendislik elemanlarının fonksiyon ve işletilebilirliğini geliştirmek için yüzey özelliklerini değiştirmeyi amaçlayan birden çok akademik disiplini ilgilendiren bir faaliyettir. ASM Handbook yüzey mühendisliğini “Malzemenin bütününden beklenen fonksiyonlardan bağımsız olarak, yüzeyin sağlaması gereken fonksiyonlara izin veren, malzeme yüzeyine ve yüzeye yakın bölgelere uygulanan işlem” olarak tanımlar. Yüzey mühendisliği uygulaması neticesinde şu özellikler arzu edilir.

- Geliştirilmiş korozyon direnci
- Geliştirilmiş oksidasyon ve/veya sülfidasyon direnci
- Geliştirilmiş aşınma direnci
- Azaltılmış sürtünme enerjisi kaybı
- Geliştirilmiş mekanik özellikler, artırılmış yorulma ve tokluk
- Geliştirilmiş elektronik veya elektriksel özellikler
- Geliştirilmiş termal yalıtım
- Geliştirilmiş estetik görünüm

Çizelge 2.1’ de gösterildiği gibi bu özellikler metalürjik, mekanik, kimyasal veya kaplama ile artırılabilir.

Malzemenin bütünü veya alt kısımları yüzey işleminden tamamen bağımsız olarak düşünülemez. Çoğu yüzey işlemi doğrudan yüzey bölgesi ile sınırlı değildir. Örneğin, difüzyon ısıtma işlemi kaplamaları (karbürleme, nitrürleme gibi) yüksek sıcaklık termal çevrimler içerir ki bu da alt kısmı faz değişimlerine sebep olan sıcaklıklara maruz bırakabilir[8].

Çizelge 2.1 Yüzey mühendisliği uygulamaları ve faydaları[8].

Yüzey İşlemi / Kaplama Tipi	Birincil Faydaları
<i>Yüzey Metalurjisini Değiştirme</i> • Yerel Yüzey Sertleştirme • Lazer Ergitme • Bilyalı Sertleştirme <i>Yüzey Kimyasını Değiştirme</i> • Fosfat Kimyasal Dönüşüm Kaplamaları • Kromat Kimyasal Dönüşüm Kaplamaları • Siyah Oksit Kimyasal Dönüşüm Kaplamaları • Buharlı İşlem • Karbonlama • Nitrüleme, • Karbonitrüleme • Borlama • İyon İmplantasyonu <i>Bir Yüzey Katmanı Ekleme veya Kaplama</i> • Organik Kaplamalar • Seramik Kaplamalar • Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplama • Sıcak Daldırma Alüminyumlama • Çinko-Nikel Alaşım Kaplama • Elektrokaplama • Elektriksiz Kaplama • Mekanik Kaplama • Termal Sprey • Plakaj • Lazer Plakaj • Karbit Difüzyon • Kimyasal Buhar Çökeltme • Fiziksel Buhar Çökeltme	• Sert martensitik yüzey oluşumu sayesinde gelişmiş aşınma direnci • İnce dispersiyon çökeltme olumuşu ve tane arıtma yoluyla gelişmiş aşınma direnci • Gelişmiş yorulma direnci • Öncelikli olarak çeliklerde gelişmiş korozyon direnci için kullanılır. • Gelişmiş boyalı ya da boyasız korozyon direnci, gelişmiş boya adhezyonu • Dekoratif uygulamalar için kullanılır. • Demir toz metalurjik parçalar üzerinde aşınma direncini artırmak için kullanılır. • Çeliklerin aşınmaya, eğilme yorulmasına ve yuvarlanma temaslı yorulmasına direncini artırmak için kullanılır. • Çeliklerin aşınma direncini geliştirmek, yorulma direncini artırmak ve korozyon direncini geliştirmek için kullanılır. • Çeliklerin aşınma direnci için kullanılır. • Gelişmiş aşınma direnci, oksidatif aşınma ve yüzey yorulması • Çeşitli altlıklar için gelişmiş sürtünme ve aşınma direnci • Gelişmiş korozyon direnci, aşınma direnci • Gelişmiş aşınma direnci, ısı direnci • Gelişmiş çelik altlık korozyon direnci • Gelişmiş çelik altlık korozyon direnci • Gelişmiş çelik altlık korozyon direnci • Gelişmiş korozyon, aşınma direnci • Gelişmiş korozyon, aşınma direnci • Gelişmiş aşınma direnci • Gelişmiş aşınma, korozyon, oksidasyon direnci, termal bariyer koruma ve boyutsal onarım • Gelişmiş korozyon direnci • Gelişmiş aşınma direnci • Takımlar için gelişmiş aşınma direnci • Gelişmiş aşınma, erezyon ve korozyon direnci

2.2 Korozyon ve Aşınmanın Ekonomik Etkileri

Endüstriyel fabrikalarda kullanım sırasında metalik yüzeylerde korozyondan ve aşınmadan dolayı ilerleyen bozulma en nihayetinde fabrika verimini düşürmeye ve en kötüsüne fabrikanın kapanmasına öncülük eder. Korozyon ve aşınma kaynaklı malzeme hasarları doğrudan ve dolaylı yoldan para kaybına sebep olur[8].

2.3 Korozif Aşınma

Aşınma ve korozyonun beraber olarak etkisinin her birinin tek başına gösterdiği etkiden daha büyük malzeme kaybıyla sonuçlanması gerçeği karışık bir durumdur. Korozyon genellikle mekanik aşınma yokluğunda meydana gelmesine rağmen nadiren tersi durumda olabilir. Korozyon vakum ve inert ortam haricinde tüm ortamlarda aşınmaya bir ölçüde eşlik eder. Korozyon ve aşınma, maden, mineral işlemler, kimyasal işlemler, kağıt hamuru ve kağıt üretimi, enerji üretimi gibi birçok endüstri alanında büyük zarara sebep olmada beraber rol alırlar. Korozyon ve aşınma etkilerinin karşılıklı desteğine öncülük eden birçok birleşik mekanizma içerirler. Tanımlanmış olan ıslak ve yaş çevrelerde malzeme bozulmasını büyük ölçüde artıran abrazyon, darbe ve korozyon arasındaki sinerjik etkiler Çizelge 2.2’ de listelenmiştir.

2.4 Korozyonu Kontrol Etme Metodları

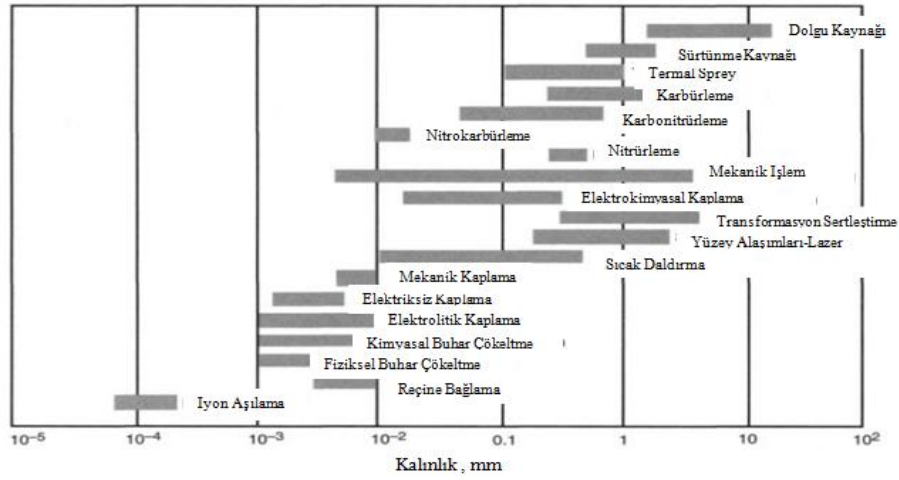
Pek çok uygun karakteristik özelliği nedeniyle çelik, mühendislik uygulamalarında geniş bir yelpazede kullanım için uygundur ve düşünülen çeşitli korozyon kontrol adımları için burada ele alınabilir. Çelik, dayanım, sertlik, süneklik ve çentik direnci gibi birçoküstün mekanik özelliklere sahiptir. Çelik ayrıca şekil verilebilirlik, kaynak edilebilirlik, boya yapılabilirlik gibi özellikleri de içeren iyi imal edilebilirlik özelliği sağlar. Diğer pozitif faktörler uygunluğunu, ferromanyetik özelliklerini, tekrar kullanılabilirliğini ve fiyatını içermektedir. Çelik rutubetin varlığında korozyona, yüksek sıcaklıklarda oksidiyona duyarlı olduğundan dolayı, yukarıda bahsedilen özelliklerin başarılı olarak kullanılması için bir takım önlemler almak gerekir.

Çizelge 2.2 Aşınma ve korozyon mekanizmaları arasındaki sinerjik ilişkiler [8].

Aşınma ve Korozyon Mekanizmaları Arasındaki Sinerjik İlişkiler
Abrazyon Oksitlenmiş koruyucu metali ve polrize kaplamaları oksitlenmemiş metali ortaya çıkarmak için kaldırır. Mikroskobik oluklar oluşturur ve hücre korozyonu konsantrasyonu için çukur açar. Korozyona sebep olan mikroskobik yüzey bölgesini artırır. Sertleştirilmiş yüzey katmanını kaldırır. Yüksek gerilimli metal-mineral temasından kaynaklı plastik deformasyon pekleşmeye ve kimyasal saldırıya yatkınlığa sebep olur.
Korozyon Mikroçatlaklar içeren oyuklar oluşturur. Oyuklardaki mikroçatlaklar etki boyunca hidrolik ayrılmaya davetiye çıkarır. Metali uzaklaştırmak için gerekli enerjiyi düşürerek, yüzeyi pürüzlendirir.
Darbe Plastik deformasyon bazı bileşenleri korozyona daha yatkın yapar. Gevrek bileşenleri kırar, sünek bileşenleri çatlak korozyonu bölgeleri oluşturmak için yırtarak ayırır. Abrazyon mekanizmasının gerçekleşmesi için kinetik enerji sağlar. Korozyon etkilerini artırmak için akışkanları, cevheri, yuvarlak metali ısıtır.

- Sade karbonlu çelik veya düşük alaşımlı çelik yerine yüksek alaşımlı ve pahalı paslanmaz çelik kullanmak
- İnhibitör kullanarak veya kurutmayla ortamı değiştirmek
- Katodik veya anodik akım uygulamasıyla elektrokimyasal potansiyeli kontrol etmek
- Organik, metalikveya inorganic kaplama uygulamak

Korozyona dirençli kaplamaların uygulanması, en yaygın kullanılan çelik koruma yöntemlerinden biridir. Şekil2.4’de gösterildiği üzere, elde edilebilir kaplama kalınlığı, parça çarpılması, öngörülen sıcaklık, korozif çevre, parça boyutu ve uygulanabilirlik tabanlı birçok kaplama yöntemi mevcuttur.



Şekil 2.1 Çeşitli yüzey mühendislik işlemlerinin yaklaşık kalınlıkları[8].

Boyama muhtemelen en yaygın kullanılan çeliği korozyondan koruma yöntemidir. Açık hava, deniz atmosferi, suya batırma, kimyasal duman, aşırı gün ışığı, yüksek nem ve kısmen yüksek sıcaklıklar için geliştirilmiş birçok kaplama formülasyonu mevcuttur. En yaygın kullanılan korozyon dirençli metalik kaplamalar sıcak daldırma çinko, çinko-alüminyum ve alüminyum kaplamalardır. Bu kaplamalar atmosferik korozyona karşı üstün direnç gösterirler ve yapı, otomobil ve cihaz endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar. Çelikler için diğer önemli kaplama işlemleri elektro-kaplama, elektriksiz-kaplama, termal spre, dolgulu sementasyon alüminyumlama ve dış kaplamayı içermektedir[8].

2.5 Aşınmayı Kontrol Etme Metodları

Birçok aşınma tipi olmasına rağmen aşınmaya sebep olan dört ana aşınma sistemi mevcuttur.

- Nispeten pürüzsüz katıların diğer pürüzsüz katılar üzerinde kayması
- Sert, keskin malzemelerin daha yumuşak yüzeylerde kayması
- Tekrar eden yüklemelerden dolayı yüzey yorulması
- Katı bir yüzeye ilişkin katı parçacıklı veya parçacıksız akış

Yukarıdaki tribo sistemlerdeki aşınmayla başa çıkılmak için uygulanan en genel altı yöntem şu şekildedir.

- 1- Yağlayıcı film ile uygun yüzeylere ayırmak

- 2- Sert dolgu, ısıtıl işlem, sert krom kaplama veya daha yeni geliştirilmiş buhar çökeltme ya da yüksek enerji işlemleri ile aşınma yüzeyini sertleştirmek
- 3- Aşınma yüzeyini çatlamaya dirençli hale getirmek. Bir çok aşınma süreçleri yüzeyden malzeme çatlamasını içerir. Bundan dolayı sertlik ve çatlama direnci aşınma dirençli yüzeylerde büyük rol oynar. Seramik, sinterlenmiş karbür ve sert krom gibi sert malzemelerin kullanılması sert yüzeylerin yararlarını etkisiz bırakan çatlama problemlerine öncülük edebilir.
- 4- Aşındıran yüzeyi korozyona dirençli hale getirmek. Kobalt esaslı sert dolgu alaşımlarının sıvı erezyon, kavitasyon ve sulu erezyona direnç göstermesi için, alüminyum bronz sert dolgu alaşımlarının deniz pervanelerinde meydana gelen kavitasyon hasarlarından korunmak için, nikel esaslı sert dolgu alaşımlarının kimyasal saldırı için kullanıldığı örnekler mevcuttur.
- 5- Kayma durumunda etkileşime dirençli malzeme çifti seçmek. Kobalt esaslı ve nikel-krom-bor alaşımları gibi sert dolgu alaşımları metal-metal aşınmasını içeren uygulamalar için yıllardır kullanılmaktadır.
- 6- Aşınma yüzeyini yorulma dirençli yapmak. Yuvarlanmalı yataklar, dişliler, kamlar, ve benzer güçaktarım organları sıklıkla yüzey yorulma mekanizmalı aşınmaya maruz kalırlar. Tekrarlanan noktalarda veya çizgilerdeki temas gerilmeleri yüzey oyuklarını üretilen ve sonunda organın bozulmasına yol açan yüzey altı çatlamalara öncülük edebilir. Sertleştirilmiş çelik, ağır sementasyon çeliği, alevle sertleştirilmiş çelik, indüksiyonla sertleştirilmiş çelik, elektron demetiyle veya lazerle sertleştirilmiş çelik kullanımıyla önlem almak mümkündür [8].

3. SÜRTÜNME VE AŞINMA PRENSİPLERİ

3.1 Sürtünme

Sürtünme, aşınma ve yağlama bir makinenin çalışma verimini ya da bir elemanın servis ömrünü etkileyen karışık ve birlikte ele alınmış konulardır.

Sürtünme, temas halindeki iki elemanın izafi harekete zorlanmaları durumunda bu harekete karşı oluşan dirençtir. Yüzey topoğrafyasıyla birlikte sunulan yüzey filmleriyle veya yağ ile çalıştırılabilen aşınma mekanizmaları ile yakından ilişkilidir. Sürtünme etkileşimi dağılımı sonucu oluşan ısı, yağlayıcıların performansını etkileyebilir, temas eden malzemelerin ya da yüzey filmlerinin özelliklerini değiştirebilir ve bazı durumlarda işlemde geçirilen ürünün özelliklerini değiştirebilir. Sürtünme ısının bu sonuçları yapısal zayıflama, aşınma, yanma ve patlama sebebiyle parçaların mekanik hasar tehlikelerinden dolayı birçok güvenlik problemine sebep olabilir.

Hareket eden makinelerde sürtünme, fazla enerji kaybından ve israfından sorumludur. Sürtünmeye harcanan enerji kaybı, kayma hareketini devam ettirmek için sürekli olarak sağlanması gereken enerji giriş miktarını gösterir. Sistemde kaybolan bu enerji, en başta hasardan kaçınmak için soğutma ile tahliye edilmesi gereken ısı enerjisi, makinenin çalışabileceği koşulları sınırlayabilir. Bazı enerjiler kayan yüzeylerin aşınmasıyla sonuçlanan çeşitli deformasyon işlemlerinde harcanırlar.

Sürtünmeyi kontrol etme ihtiyacı arkasındaki itme kuvvetidir. Birçok durumda düşük sürtünme katsayısı arzu edilir(yataklar, dişliler, malzeme işleme operasyonları) ve bazen yüksek sürtünme amaçlanır(frenler, kavramalar, vida dişi, yol yüzeyi). Tüm durumlarda, hatasız ve verimli çalışacak makineler ve parçaların tasarımı için sabit, tekrarlanabilir ve tahmin edilebilir sürtünme değerleri gereklidir.

Sürtünme ısı, sürtünme enerjisi, sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti gibi sürtünmeyle alakalı çeşitli terim ve kavramları açık bir şekilde ayırmada fayda vardır.

Sürtünme kuvveti bir katının temas gövdesinin diğeri üzerinde kayması için sağlaması gereken teğet kuvvetidir. Yüzey düzlemine etki eder ve genellikle yüzeye normal kuvvetle orantılıdır.

$$F = \mu N \quad (3.1)$$

Genellikle μ ya da f olarak gösterilen, sürtünme kuvveti, F ve yük, N arasındaki oran sürtünme katsayısı olarak isimlendirilir.

$$\mu = F / N \quad (3.2)$$

Sürtünme katsayısı, çok iyi yağlanmış yatak için 0.03 den kuru kayma için 0.5, 0.7 'ye ve hatta vakum ortamında temiz metal yüzeyler için 5'e kadar değişkenlik göstermektedir. 0.2-0.3 arası bir sürtünme katsayısı değeri rahat bir yürüyüş sağlar; bununla birlikte, buz-ayakkabı çifti için sürtünme katsayısı 0.05 den küçük olabileceği için buz üzerinde yürümek oldukça zordur.

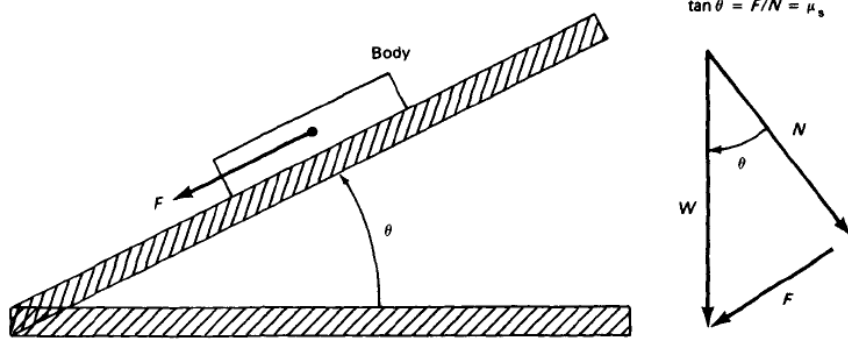
Statik sürtünme katsayısı μ_s , genellikle dinamik ya da kinetik sürtünme katsayısı μ_k dan daha büyüktür.

Düz bir zeminde W ağırlığındaki bir cisim, Şekil 3.1'de gösterildiği gibisürtünme açısı olarak isimlendirilen belli bir θ açısıyla eğimlendirildiğinde hareket etmeye başlayacaktır. Statik sürütünme katsayısı:

$$\mu_s = \tan \theta \quad (3.3)$$

Bu statik sürtünmek atsayısı, μ_s 'i ölçmek için kolay bir yol sunar, fakat kuvvet ölçümleri daha yaygın olarak hem statik hem dinamik ya da kinetik sürtünme katsayılarını ölçmede kullanılır. Bu ölçümlerden elde edilen sonuçlar ortama, yüzeylerin temizliğine ve ayrıca ölçme sistemlerinin çeşitli karakteristik sınırlarına

bağıdır. Bu bağımlılık sürtünme katsayısının sadece malzeme özelliğiyle ilgili olmadığını altını çizmektedir.



Şekil 3.1 Sürtünme açısının gösterimi[8].

Sürtünme kuvvetinin oluşumunda bir çok mekanizma etkili olduğundan, açıkça görülmektedir ki sürtünme kuvveti sadece malzeme özelliği değildir. Bunun yerine yüzey pürüzlülüğüne, oksitlenmiş ve absorbe edilmiş tabakanın varlığına veya yokluğuna, kısmen ölçme koşullarına bağlıdır. Bu karmaşıklıktan dolayı, farklı metodlar ve farklı laboratuvarlardan elde edilen sürtünme katsayısı değeri benzer test koşullarındaki farklı laboratuvarlardan elde edilen değerlerin %20-30 u içinde olma eğilimindedir.

Pürüzlerde ve temas noktalarındaki deformasyon yoğun olarak bölgeseldir ve çok yüksek sıcaklıklar çok kısa zaman sürelerinde meydana gelebilir. Bu sıcak bölgesel noktalarda, hızlı oksidasyon, plastik akış ya da yayınışma meydana gelebilir ve bunların hepsi aşınmayı etkiler. Bazı durumlarda kıvılcımlar bile oluşabilir. Bu sıcaklıklar ısının ne kadar hızlı üretildiğine (yük ve hıza bağlıdır) ve ne kadar çabuk tahliye edildiğine (kayan yüzeylerin ısıl iletkenliklerine bağlıdır) bağlıdır[8].

3.2 Çeşitli Malzeme Çiftleri İçin Sürtünme Katsayıları

Birbiri üzerinde hareket eden veya etmek üzere olan katılar arasındaki sürtünme katsayısı etkileri duruma göre değişen bir çok faktörün bir fonksiyondur.

- Malzemelerin karışımları
- Her katının yüzey pürüzlülüğü
- Ortamın doğası

- Katıları temasta tutan kuvvet
- Bağlı hareket hızı
- Bağlı hareket özellikleri
- Temas şekli
- Ara yüzey bölgesinin sıcaklığı
- Yüzeylerin bir önceki kayma geçmişi
- Ekli malzemelerde fiktürlerin ve makinenin karakteristiği

Özdeş test koşulları altındaki malzemeler için kapsamlı bir sürtünme katsayısı listesi çıkartılmamıştır. Bu nedenle neredeyse tüm elkitapları değişken test koşulları altında elde edilen bilgilere dayanmaktadır. Malzeme tipine göre listelenmiş sürtünme katsayıları Çizelge 3.1’de görülebilmektedir.

Çizelge 3.1 Çeşitli malzeme çiftleri için sürtünme katsayıları[8].

Malzeme		Test Geometrisi	Sürtünme Katsayısı	
Sabit Numune	Hareket Eden Numune		Statik	Kinetik
Aseton	Aseton	TW	0.06	0.07
Naylon 6/6	Naylon 6/6	TW	0.06	0.07
PMMA	PMMA	NSp	0.80	-
Polyester PBT	Polyester PBT	TW	0.17	0.24
Polistiren	Polistiren	NSp	0.50	-
Teflon	Teflon	NSp	0.04	-
Naylon6 (Döküm)	Yumuşak Çelik	TPOD	-	0.35
Naylon 6/6	Yumuşak Çelik	TPOD	-	0.37
PA 66	Çelik, 52100	BOR	-	0.57
PEEK	Çelik, 52100	BOR	-	0.49
PEI	Çelik, 52100	BOR	-	0.43
PETP	Çelik, 52100	BOR	-	0.68
Poliüretan(c)	Yumuşak Çelik	TPOD	-	0.51
Poliüretan(d)	Yumuşak Çelik	TPOD	-	0.35
POM	Çelik, 52100	BOR	-	0.45
PPS	Çelik, 52100	BOR	-	0.70
Teflon	Alüminyum	FOF	0.24	0.19
	Bakır	FOF	0.13	0.11
UHMWPE	Yumuşak Çelik	TOPD	-	0.14
Çelik, Karbon	ABS Reçine	POF	0.40	0.27
Çelik, Yumuşak	ABS	TW	0.30	0.35
Çelik, 52100	HDPE	POD	-	0.25

3.3 Aşınma

Genel olarak aşınma, katı, sıvı veya gaz temasının mekanik etkisiyle malzemenin yer değiştirmesi veya ayrılmasıyla katı yüzeyde meydana gelen hasar olarak tanımlanabilir. Sıklıkla kademeli bozulma ima edilir ve etkileri çoğunlukla yüzeyle ilişkili durumlar içindir. Fakat aşınma sorunlarını ve hatalarını analiz ederken sadece bu sınırlamalar uygulanmamalıdır. Ayrıca kimyasal korozyon diğer aşınma faktörleriyle bir arada olabileceğinden aşınmanın tamamıyla mekanik olduğu varsayımı da kabul edilmemelidir[8].

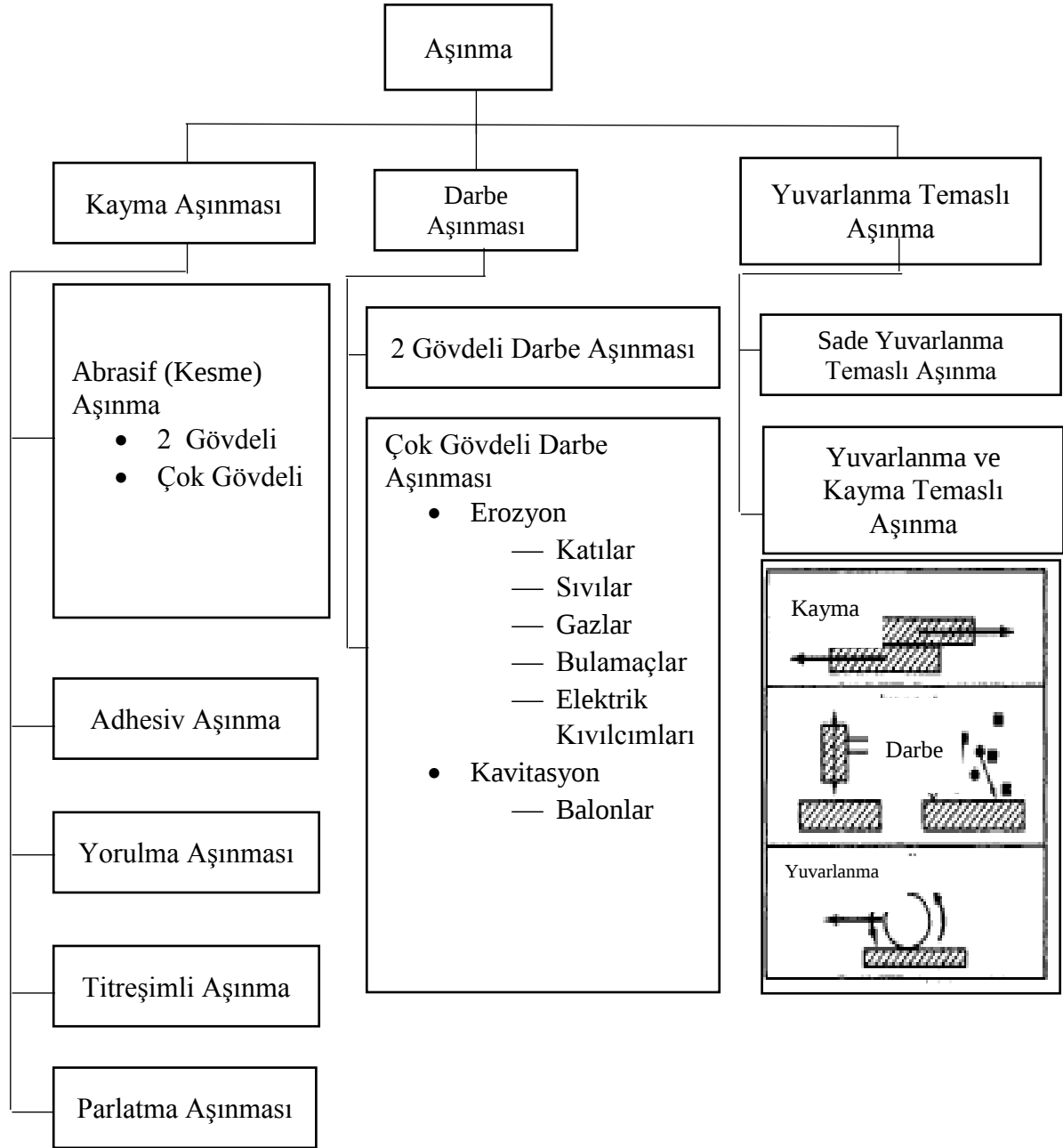
3.3.1 Aşınmanın sınıflandırılması

Aşınma çeşitli tarzlarda sınıflandırılmıştır. En basit aşınma sınıflandırmalarından biri yağlı ya da yağsız aşınma olarak isimlendirilen etkin yağlamanın varlığına veya yokluğuna dayanmaktadır. Diğer olasılık ise faaliyette bulunan esas mekanizma tabanlı olarak aşınmayı sınıflandırmaktır. Maalesef bu yaklaşım, aynı anda birden fazla mekanizma faaliyette bulunabileceğinden ve gelişen aşınma sınıflandırma şemaları farklı altyapıyla ve deneyimlerle geleceğinden dolayı karmaşıktır. Sonuç olarak, aşınma mekanizmaları tabanlı olan farklı sınıflandırma şemaları geliştirilmiştir ve çoğu makul seviyede benzer özelliklere sahip olmalarına rağmen hiçbir şema evrensel olarak kabul edilmemiştir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 Blau ve Budinski çalışmalarına göre iki sınıflandırmayı göstermektedir. Blau karşılaşılan hareket tipine göre-kayma, darbe, yuvarlanma- aşınmayı üç kategoriye ayırıyor. Budinski aşınma işlemini dört kategoriye indiriyor ki bunlar abrasyon, erezyon, adezyon ve yüzey yorulmasıdır. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3’de gösterilen her iki sınıflandırma şeması da geçerli olmasına rağmen, ortak mekanizma tabanlı aşınma işlemi sınıflandırmasındaki ana zorlukları göstermektedir[8].

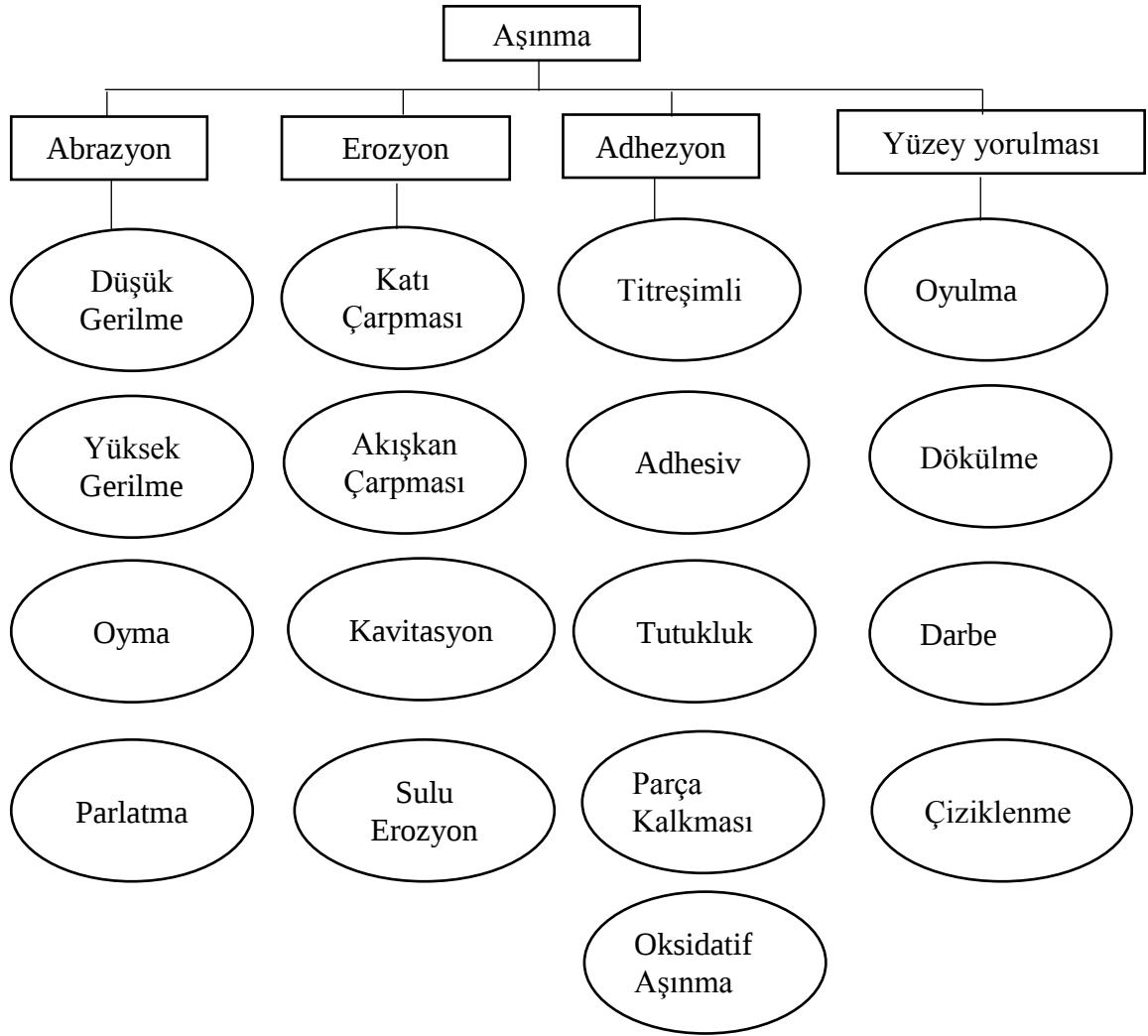
3.4 Korozyonu Kontrol Etme Metodları

Pek çok uygun karakteristik özelliği nedeniyle çelik, mühendislik uygulamalarında geniş bir yelpazede kullanım için uygundur ve düşünülen çeşitli korozyon kontrol adımları için burada ele alınabilir. Çelik, dayanım, sertlik, süneklik ve çentik direnci gibi birçok üstün mekanik özelliklere sahiptir. Çelik ayrıca şekil verilebilirlik, kaynak edilebilirlik, boya yapılabilirlik gibi özellikleri de içeren iyi imal edilebilirlik özelliği

sağlar. Diğer pozitif faktörler uygunluğunu, ferromanyetik özelliklerini, tekrar kullanılabilirliğini ve fiyatını içermektedir. Çelik rutubetin varlığında korozyona, yüksek sıcaklıklarda oksidiyona duyarlı olduğundan dolayı, yukarıda bahsedilen özelliklerin başarılı olarak kullanılması için bir takım önlemler almak gerekir.



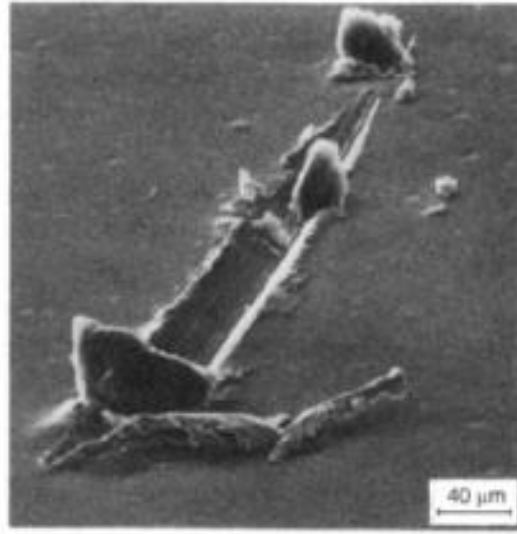
Şekil 3.2 Blau'ya göre aşınma sınıflandırması[8].



Şekil 3.3 Budinski'ye göre aşınma sınıflandırması[8].

3.4.1 Abrasif aşınma

Abrasif aşınma, sert parçacıkların veya sert tümseklerin katı yüzey boyunca hareketinden ve yüzeye karşı uyguladığı kuvvetten dolayı meydana gelen aşınma olarak tanımlanır. Metallerdeki bu aşınma türüne sıklıkla metal olmayan malzemeler sebep olur fakat metalik parçacıklar da abrasif aşınmaya sebep olabilir. Genellikle, bir malzeme sadece kendisinden daha sert bir parçacıkla aşınmaya uğrar veya çizilir. Şekil 3.4 sert bir seramik parça tarafından aşındırılmış yumuşak bakır yüzeyindeki hasarı göstermektedir.



Şekil 3.4 Seramik parça tarafından aşındırılmış yumuşak bakır yüzeyindeki hasar[8].

Abrasyonun masrafı yüksektir ve sanayileşmiş bir milletin gayri safi milli hasılasının yüzde 1 ila yüzde 4 aralığında olduğu tahmin edilmektedir. Abrasyonun etkisi özellikle tarım endüstrisi alanında görülmektedir.

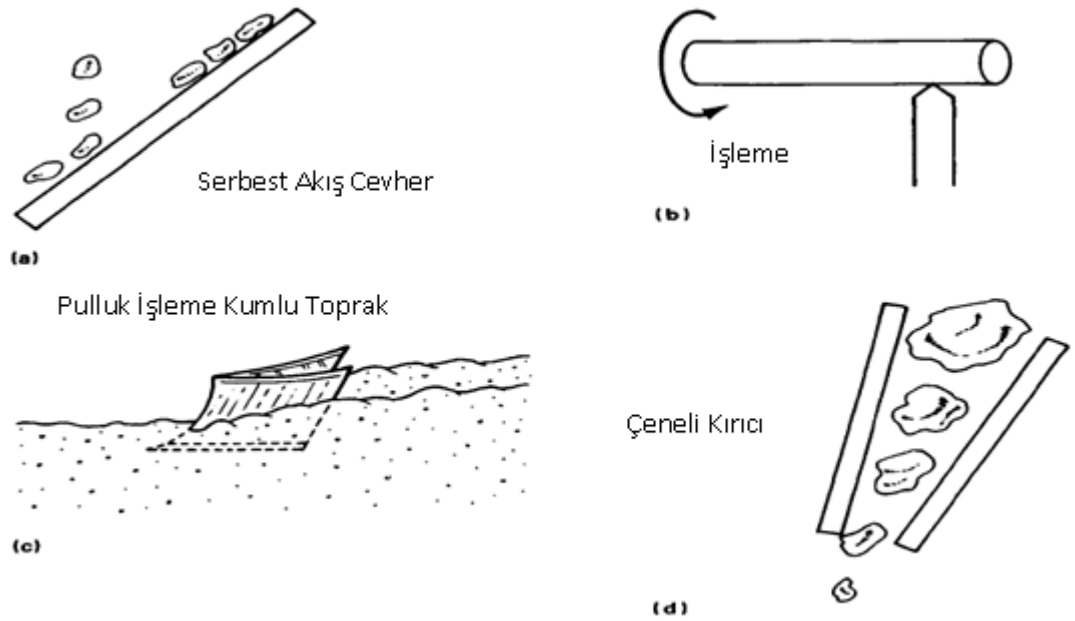
İki yüzey temas ettiğinde her iki yüzeyde de aşınma meydana gelir. Sanayiciler ekonomik kayıplar için büyük potansiyele sahip aşınan yüzeye odaklanma eğilimindedir ve diğer yüzeyi aşındırıcı olarak hesaba katar.

Yüzeylerdeki aşınma oranları her yüzeyin karakteristiğine bağlıdır. Bunlar birinci ve ikinci yüzey arasında aşındırıcıların varlığı, temas hızı, ve diğer çevre koşulları olarak örneklenebilir. Kısaca kayıp oranları malzemeye özgü değildir. Yukarıda verilen örneğe dayanarak, aşınan veya aşındıran malzemenin değiştirilmesi karşı yüzeydeki aşınmayı değiştirir[8].

3.4.1.1 Abrasif aşınma kategorileri

Abrasif aşınma tipik olarak temas ortamının yanı sıra temas tipine göre kategorize edilir. Temas tipi iki gövdeli ve iç gövdeli teması içermektedir. İki gövdeli aşınma, bir aşındırıcı yüzey üzerinde kaydıığında; üç gövdeli aşınma ise aşındırıcı iki yüzey arasında sıkıştığında meydana gelir. İki gövdeli sistem genellikle verilen bir yük ve aşınma yolu uzunluğu için üç gövdeli sistemin 10 ile 1000 katı kadar kaybı tecrübe

eder. Şekil 3.5 temas çevreleri açık (serbest) ve kapalı (sınırlı) olarak sınıflandırılmıştır. Yapılan testler göstermiştir ki verilen bir yük ve aşınma yolu uzunluğu için aşınma oranı hem kapalı hem açık sistemler için aynıdır. Bununla birlikte, kapalı sistemlerdeki kaybın ölçüleri genellikle açık sistemdeki kayıptan fazla gözükcektir. Bu durum muhtemelen kapalı sistemlerin daha yüksek kuvvetlerle test edilmesinden meydana gelir. Şekil 3.3 de görüldüğü üzere abrazyon düşük gerilme aşınması, yüksek gerilme aşınması, oyma aşınması ve parlatma aşınması olarak kendi içerisinde kategorize edilir. Şekil 3.6'da abrasif aşınma kategorilerinin şematik görünüşleri mevcuttur.



Şekil 3.5 Abrasif aşınma boyunca temas tipleri a)açık 2 maddeli b)kapalı 2 maddeli c)açık 3 maddeli d)kapalı 3 maddeli[8].

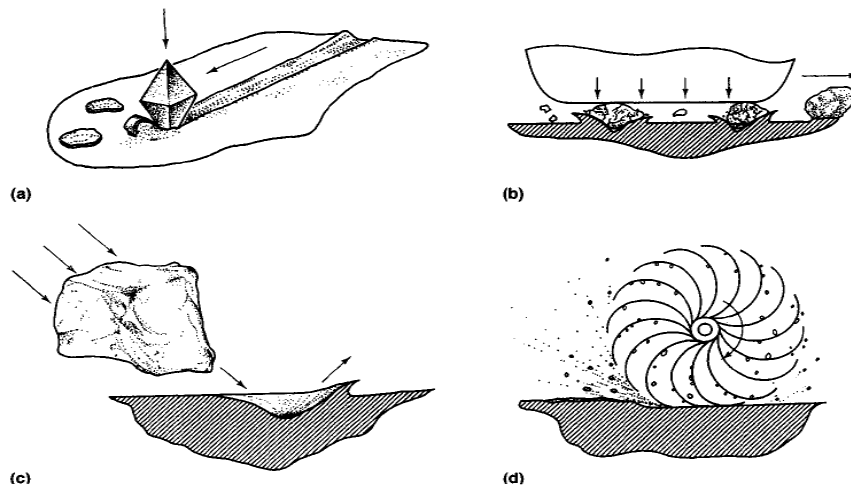
Düşük gerilme aşınması

Düşük gerilme aşınması (kazıma) abrasif parçacıkların metalle nispeten düşük ovalama temaslı topak olumuna sebep olan aşınma olarak tanımlanır. Düşük gerilme aşınması için belirlenmiş kriter, kuvvetlerin aşındırıcının kırılmasını önleyecek kadar düşük olmasıdır. Aşınma izi genellikle çizikler halindedir ve yüzey altı deformasyon miktarı çok azdır. Netice itibarıyla, yüzey gözle görünür derecede sertleştirme yapmaz. Ekranlar, oluk astarları, bıçak ağızları ve kayışlar gibi parçalar düşük

gerilmeli aşınmanın gerçekleşebileceği aşındırıcılara maruz kalırlar. Tozlu ortamda çalışan burçlar, contalar ve zincirler gibi bir çok makine parçaları düşük gerilmeli aşınmaya aşınacaklardır[8].

Yüksek gerilme aşınması

Yüksek gerilme aşınması aşındırıcının kırılmasına yetecek kadar yüksek bir gerilme seviyesinin altındaki aşınmadır. Önemli oranda metal yüzeyinin uzama sertleşmesi meydana gelir. Maden öğütme toplarının aşınması, yuvarlanma temaslı yataklar, dişliler, kamlar yüksek gerilmeli aşınmaya örnek verilebilir.



Şekil 3.6 4 tip abrasif aşınmanın şematik gösterimi a) düşük gerilme aşınması b) yüksek gerilme aşınması c) oyma aşınması d) parlatma aşınması[8].

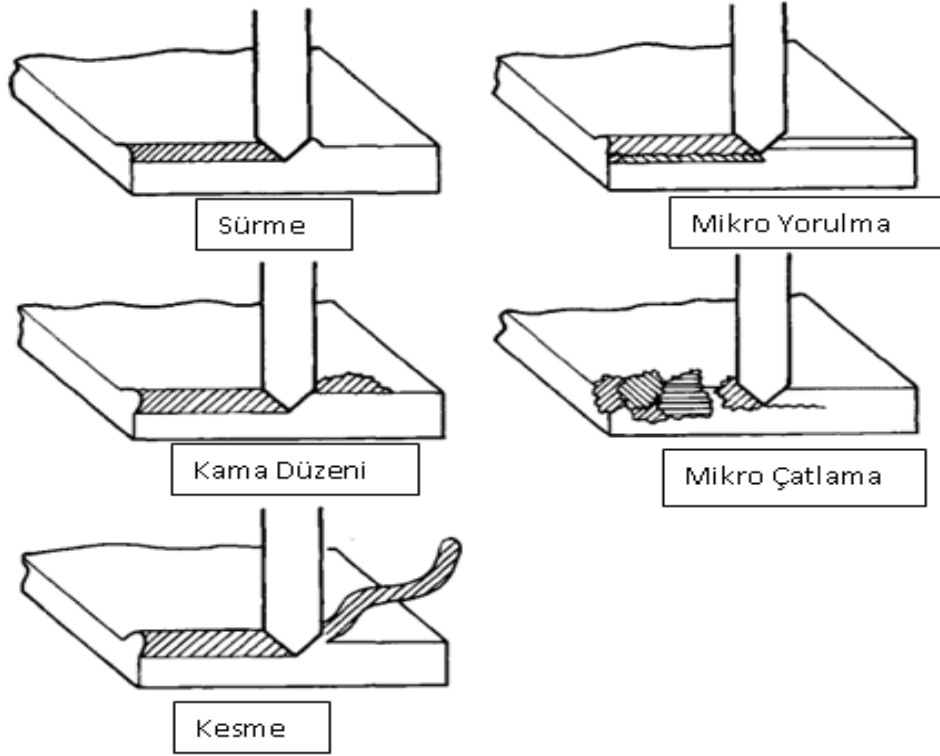
Oyma aşınması

Oyma aşınması terimi aşınmış yüzeyde oldukça büyük oyuklarla veya oluklarla sonuçlanmış yüksek gerilmeli aşınmayı tanımlamak için kullanılır. Uzama sertleşmesi ve plastik deformasyon baskın faktörlerdir.

Parlatma aşınması

Parlatma aşınması, açık bir şekilde tanımlanmamış mekanizma için aşınmanın son derece hafif bir formudur. Parlatmaya konu olan yüzeyler genellikle yumuşatılmış parlatılmıştır. Fakat bu yumuşatma ve parlatma malzeme kaldırmayı gerektirir. Bazı durumlarda kullanışlılık kaybına sebep olabilir. Örneğin aşınmış ve kaygan merdiven basamakları.

Aşınma boyunca bir yüzeyden malzemenin nasıl kalktığını açıklamak için birçok mekanizma önerilmiştir. Bu mekanizmalar kırılmayı, yorulmayı ve ergimeyi içermektedir. Aşınmanın karmaşıklığından dolayı, hiçbir mekanizma tam olarak tüm kayıpları hesaplayamaz. Şekil 3.7 bir tek aşınma ucu yüzeyi bir uçtan bir uca geçtiğinde mümkün olabilecek bazı işlemleri tasvir etmektedir. Bu işlemler sürme, kama düzeni, kesme, mikro yorulma ve mikro çatlamayı içermektedir.



Şekil 3.7 Abrasif aşınmanın 5 farklı mekanizması[8].

Sürme malzemenin oluktan yan taraflara yerinin değişmesi işlemidir. Hafif yükler altında meydana gelir ve malzeme kaybı yaşanmaz. Soğuk işlem ile dislokasyonların birikmesi şeklinde malzemenin yakın yüzeyinde hasar meydana gelir. Eğer daha sonra bu soğuk işlenmiş yüzeyde çizilme meydana gelirse, ilave iş mikro yorulma boyunca kayıp ile sonuçlanabilir.

Kütlenin kayma mukavemetine bağlı olarak temas ara yüzünün kayma mukavemeti oranı yeterince yüksek bir seviyeye yükselirse, aşındırıcı ucun önünde bir kama gelişebildiği bulunmuştur. Bu durumda, oluktan yer değiştiren toplam malzeme miktarı kenarlara çıkarılan malzeme miktarından fazladır. Bu kama formasyonu yine de abrasif aşınmanın oldukça hafif bir şeklidir.

Sünek malzemeler için aşınmanın en ağır formu kesmedir. Kesme işlemi boyunca, aşındırıcı uç takım tezgahlarının yaptığı gibi ince bir dilim çıkarır. Bu da oluğun boyutuna bağlı olarak çok az miktarda yer değiştirmiş malzeme kaldırılmasıyla sonuçlanır. Keskin bir aşındırıcı parçacık için, sürmeden kesmeye geçiş durumunda kritik bir açı olur. Bu açı aşındırılmış olan malzemeye bağlıdır.

Gevrek malzemeler mikro çatlamak ve mikro yorulma olarak isimlendirilen ilave abrasif aşınmaya sahiptir. Bu durumlar malzemenin kırılma dayanımı aşındırıcı taneyle uygulanan kuvvetlerle aşıldığında meydana gelir. Bu durum genellikle seramik malzemelerin aşınmasında ağır basan tiptir[8].

3.4.1.2 Malzeme özelliklerinin abrasif aşınma üzerindeki etkileri

Sertlik abrazyona karşı dirençte en önemli faktör olmasına rağmen, elastiklik modülü, akma mukavemeti, kırılma dayanımı, mikro yapı ve kompozisyon gibi diğer özellikler de önemli rol oynarlar. Örneğin, demir metallerin aşınma direnci büyük oranda metalürjik değişkenlere bağlıdır: mikroyapı, sertlik ve karbon içeriği. Doğal olarak sert martenzitik yapı yumuşak ferritik ve östenit yapıya göre tercih edilir. Bu özellikle ufak arayüzey deformasyonun meydana geldiği düşük gerilmeli aşınmada önemlidir. Yüksek gerilmeli aşınmayla karşılaşıldığında yüksek sertlik değerli alaşımlar düşük sertlik değerli alaşımlarla kıyaslandığında aşınma direncini geliştirmişlerdir.

Abrasif aşınmayı önlemek uygun malzeme seçimiyle ve yüzey mühendisliği işlemi kullanımıyla mümkündür. Birçok malzeme ailesi abrasif aşınmaya iyi direnç göstermişlerdir.

Uygulanabilir yüzey işlemleri şu şekildedir.

- Sert dolgu kaplaması. Örneğin, yüksek karbonlu demir-krom alaşımları, takım çelikleri, nikel-krom-boron alaşımları, kobalt esaslı alaşımlar ve östenitik manganez çelikleri
- Plazma sprey ile tevdi edilmiş seramik veya sermet thermal sprey malzemeler, patlatma tabancası, ya da yüksek hızlı oksijen yakıtlı işlemler
- Sert krom kaplama
- Yüzey sertleştirme işlemleri
- Sertleştirme işlemleri, örneğin, alevle sertleştirme

- Aşınma plakaları, örneğin beyaz dökme demir ya da manganez çelikleri
- Buhar biriktirmeyle üretilen sert kaplamalar, örneğin, TiN[8].

3.4.2 Katı parçacık erozyonu

Katı parçacık erozyonu, ufak katı parçacıkların tekrarlı etkisinden meydana gelen yüzey malzemesi kaybıdır. Bazı durumlarda katı parçacık erozyonu tercih edilen bir işlemdir. Kumlama ve yüksek hızlı abrasif su jeti kesme gibi durumlarda katı parçacık erozyonundan faydalanılır. Fakat birçok mühendislik sisteminde ciddi bir problem olarak ele alınır. Buhar ve jet türbinleri, boru hatları, partikül madde taşıyıcı valfler gibi sistemlerde istenmeyen bir durum olarak ele alınır[8].

3.4.3 Sıvı erozyon

Katı yüzey erozyonu, katı abrasif partiküller olmaksızın da sıvı ortamda meydana gelebilir. Kavitasyon, sıvı erozyonun bir çeşididir. Yüzeyden malzeme kalkmasıyla oluşan işlem kavitasyon erozyonu olarak adlandırılır ve meydana gelen hasar kavitasyon hasarı olarak isimlendirilir. Yüksek hızda sıvı damlacıklarının katı yüzeye çarpması sıvı çarpma erozyonu olarak adlandırılan sıvı erozyon şekli ile sonuçlanır.

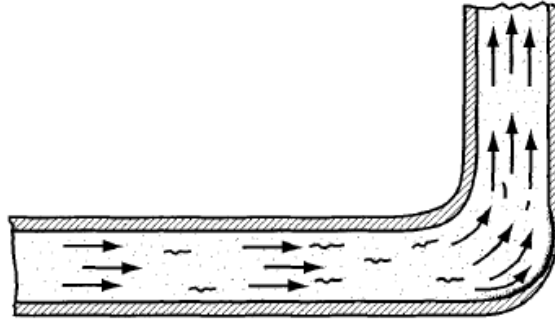
Kavitasyon hasarı gemi pervanelerinde ve su kanatçıklarında, barajlarda, su savaklarında, tünellerde ve diğer hidrolik yapılarda, hidrolik pompalarda, türbinlerde görülebilmektedir. Bu cihazlardaki yüksek hızlı sıvı akışı hızlı ve çok değişken yerel hidrodinamik basınçlara sebep olur. Mekanik cihazlarda da, akış bölgelerindeki ciddi daralmalar kavitasyon hızına sebep olur.

Sıvı erozyon, mikroskobik olarak küçük alanlarda tekrarlı yüklemeler neticesinde bir yüzeyden malzeme kalkması işlemini içermektedir. Korozyon, hasar işleminde rol oynamasına rağmen, sıvı dinamiği de büyük bir öneme sahiptir. Sıvı erozyon işlemi diğer aşınma işlemleri kadar anlaşılamamaktadır. Yüzeyden ayrılan parçalarla metalürjik işlemler ve erozyona sebep olan hidrodinamik durumları tanımlamak oldukça zordur. Açıkça görülüyor ki hem kavitasyon hem de sıvı çarpması katı yüzey üzerine benzer hidrodinamik kuvvetler uygulamaktadır. Hasar görmüş yüzeyler ve malzemeler hasara karşı bağlı direnci hem sıvı çarpması hem de kavitasyon için benzerdir.

Sıvı erozyon hasarından, erozyon dirençli malzemeler kullanılarak sıvı çapma ve kavitasyon gücünün azaltılmasıyla korunulabilir veya en aza indirilebilir[8].

3.4.4 Sulu erozyon

Sulu erozyon, katı yüzeye göre hareket halindeki sıvıda katı parçacık karışımlarıyla katı yüzeyden devam eden malzeme kaybı olarak tanımlanır. Şekil 3.8’de sulu erozyon örneği görülmektedir.



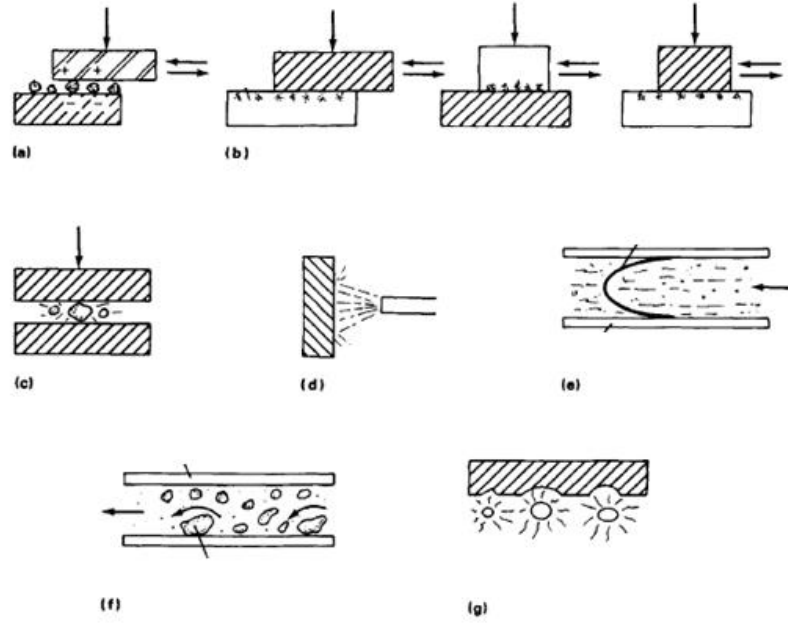
Şekil 3.8 Sulu erozyon örneği[8]

Tanım olarak sulu, katı parçacıkların ve pompalanabilir yoğunluklu sıvının fiziksel karışımıdır. Sulu aşınma ele alınırken diğer aşınma tipleriyle de karşılaşılmıştır. Şekil 3.9’da görülebildiği gibi bu aşınma tipleri, abrazyon-korozyon, oyulma aşınması, abrasif metal-metal aşınması, yüksek hız erozyonu, düşük hız erozyonu, sıçrama ve kavitasyondur.

3.4.5 Adhesiv aşınma

Bir katı hal kaynağı işleminden dolayı yük altındaki bağıl hareket boyunca bir yüzeyden diğerine malzeme transferiyle gerçekleşen aşınma adhesiv aşınma olarak tanımlanmaktadır. Adhesiv aşınmada parçacıklar bir yüzeyden diğerine ya geçici olarak ya da kalıcı olarak transfer olurlar.

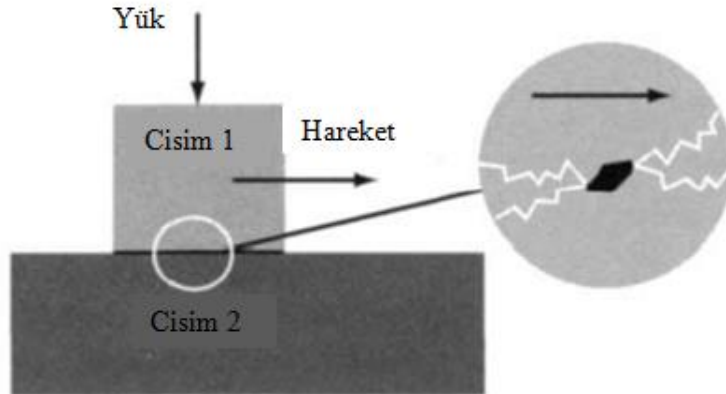
Adhesiv aşınma metalik malzemeler, seramikler, polimerler ya da bunların kombinasyonları arasında olabilir. Adhesiv aşınma malzemeler arasındaki yapışmaya bağlıdır ki bu da bir malzemenin diğerleri için karşılıklı eğiliminin yanı sıra oksit ya da yağlayıcı gibi yüzeydeki filme bağlıdır



Şekil 3.9 Sulu erozyon aşınma tipleri a)abrazyon-korozyonu b)oyulma aşınması c)abrasif aşınma d)yüksek hız erozyonu e)düşük hız erozyonu f)sıçarama g)kavitasyon[8]

Eğer yükler hafif ve metalin doğal kendiliğinden olan oksidasyonu aşınmaya çıkarılma oranını takip edebiliyorsa o zaman aşınma oranı bağıl olarak az olacaktır. Buna orta aşınma denir.

Eğer yükler ağır ve koruyucu oksit yakın metal-metal temasına ve yapışmasına izin vermek için bozulmuş ise o zaman aşınma oranı yüksek olacaktır. Buna sert aşınma denir.



Şekil 3.10 Adhesiv aşınma[8].

Katı yüzeyler hemen hemen hiçbir zaman mükemmel bir düz yüzeye sahip değildir bunu yerine çeşitli şekillerde mikroskobik ve makroskobik pürüzler içerirler. İki yüzey her iki yüzeye normal bir kuvvet altında temas halinde olduğunda, pürüzler temas eder ve elastik veya plastik olarak yükü taşımak için yeterli temas alanı sağlanıncaya kadar biçim değiştirirler. İki malzeme arasında temas halindeki malzemelerin zayıf olanının iç dayanımından daha kuvvetli bir bağ oluşabilir. İki yüzey arasında bağıl hareket sağlandığında, malzemelerden zayıf olanı hasar görür ve malzeme temas yüzeyine taşınır. Bir sonraki etkileşimde, bu taşınan malzeme ilk yüzeye tekrar taşınabilir (muhtemelen farklı bir noktada) ya da aşınma talaş parçacığı olarak tamamen ayrılabilir. Adhesiv aşınma formu için önerilen formül aşağıdaki gibidir.

$$V_{ad} = \frac{kSL}{3H} \quad (3.4)$$

Bu formülde V aşınma izi hacmi, S kayma mesafesi, L yük, H yumuşak yüzeyin sertliği ve k ise olasılık faktörüdür. Aşınma katsayısı k, çeşitli test geometrileri ve koşulları altında birçok malzeme çifti için deneysel olarak belirlenmiştir. Bu değerler 10^{-3} ile 10^{-8} arasında değişmektedir. Bazı malzeme çiftleri için verilen aşınma katsayıları Çizelge 3.2’de görülebilmektedir.

Çizelge 3.2 Bazı malzeme çiftleri için aşınma katsayıları[8].

Kayma Kombinasyonu		Aşınma Katsayısı, k	Yumuşak Malzemenin Sertliği, 10^6 g/cm^2
Silindir Malzeme	Halka Malzeme		
Düşük Karbonlu Çelik	Düşük Karbonlu Çelik	7.0×10^{-3}	18.6
60-40 Pirinç	Sertleştirilmiş Çelik	6.0×10^{-4}	9.5
PTFE	Sertleştirilmiş Çelik	2.5×10^{-5}	0.5
Bakalit	Sertleştirilmiş Çelik	7.5×10^{-6}	2.5
Berilyum Bakır	Sertleştirilmiş Çelik	3.7×10^{-5}	21.0
Takım Çeliği	Sertleştirilmiş Çelik	1.3×10^{-4}	85.0
Stellit	Sertleştirilmiş Çelik	5.5×10^{-5}	69.0

Adhezyon için malzeme seçimi iş parçasının kendisinin ihtiyaç duyduğu fonksiyonel performansa ek olarak iş parçasının işletme şartları da dikkat gerektirir. Çeliklerin aşınma özellikleri çok geniş işlemlerle ve ısı işlemlerle değişmektedir. Çoğu kimyasala tepkisizlik, kendi kendini yağlama ve düşük sürünme eğilimi gibi doğal özelliklerinden dolayı kayma teması uygulamaları için polimerler tercih edilmektedir. Seramikler ise yüksek sıcaklık oksidasyonuna veya yüksek korozyon malzemelere direncin gerekli olduğu yerlerde kullanılırlar. Seramikler, polimerler ve metallerde adhesiv aşınmadan kaçınmak için tavsiye edilenler aşağıdaki gibidir.

- Benzer malzemelerin beraber kaymasından kaçınmak
- Tekrar eden yüksek temas basıncından dolayı oluşan yorulma muhtemel bir problem değilse, sertlik arzu edilen bir özelliktir. Bununla birlikte, talaş yerleşmesinden ve sürtme aşınmasından kaçınmak için yağlanmış sistemlerde sert metalin sert metal üzerinde kaymasından kaçınmak
- Malzemelerde bağlı faz sertlik etkilerinin ele alınması. Örneğin, yüksek krom dökme demir makul olan 400 HB sertliğe sahip olabilir. Bununla birlikte, Cr₇C₃ içeren bu dökme demir, 400 HB den dört kat daha fazla sertliğe sahiptir ve karşı yüzeye büyük ölçüde zarar verecektir. Aynı şey metallere göre daha yumuşak gözüken polimerlere de uygulanır. Bununla birlikte, aşınma dirençli polimerler genellikle metal karşı yüzeyi oldukça ciddi şekilde aşındıran cam veya diğer sert dolgular içerirler. Tek gövde içerisindeki sert fazlar parçalanabilir ve karşı yüzeye gömülebilir. Bundan dolayı parçalar yüzey üzerine genişlerse abrazyona sebep olur.
- Yetersiz yapışsa dahi, yağlama aşınmayı azaltacaktır. Bazı yağlamalar yüzey filmi formu vermek için korozyon olan atmosfere uygulanabilir[8].

3.4.6 Sürünme yapışması

Sürünme yapışması adhesiv aşınmasının daha sert formu olarak düşünülebilir. Yüksek yüklemeler ve zayıf yağlama ile, kayan metal parçalarda yüzey hasarı meydana gelebilir. Hasar makroskobik malzeme transferi ile sınıflandırılır ki bunlar, ya tek ya da her iki yüzeyde görülebilen büyük kopuk parçalar ya da yüzey çıkıntılarıdır. Bu büyük hasar genellikle sürünme yapışması olarak tanımlanır ve eşleşmiş yüzeyler arasındaki hareketten sadece birkaç çevrim sonra meydana gelir. Ciddi sürünme yapışmaları metal yüzeylerinin tutmasıyla sonuçlanabilir.

Ayak sürtme aşındırması ve çizilme de yağlı koşullar altında benzer yüzey hasarlarını tanımlamak için kullanılmaktadır. Ayak sürtme aşınması, piston halkası-silindir teması gibi yağlı yüzeylerde meydana geldiğinde tercih edilen terimdir. Çizilme, genellikle nispeten uzun oyukların şeklini alan hasarları tanımlar.

Sınırlı sünekliğe sahip malzemeler sürtünme yapışmasına daha az yatkındırlar. Çünkü yüksek yükler altındaki yüzey pürüzleri birbirine geçtiğinde kırılmaya başlayacaktır. Malzemenin ufak kopuk parçacıkları kaybolabilir fakat meydana gelen hasar sürtünme yapışmasından ziyade çizilmeye benzer olacaktır. Yüksek sünek malzemeler için, pürüzler plastik olarak şekil değiştirme eğilimindedirler, dolayısıyla eşleşmiş temas bölgesi alanı arttıkça, sonuç olarak sürtünme aşınması meydana gelir. Sürtünme yapışmasından korunma uygun bir tasarım ile başarılabilir. Örneğin, sıkı geçirilmiş parçalar sürtünme yapışmasına daha yatkın oldukları için parçalar yeterli boşluğa sahip olmalıdır. Uygun yağlama ve çeşitli sert yüzey kaplamaları da sürtünme yapışmasından korunmaya yardımcı olabilir. Yüzey pürüzlülüğünün kontrolü diğer bir önemli faktördür. Cilalanmış yüzeyler ($<0,25 \mu m$) ya da çok pürüzlü yüzeyler ($>1,5 \mu m$) sürtünme yapışmasına ve aşınmaya eğilimi artırır. Kanıtlanmıştır ki pürüzler arasındaki çukurların olmamasından dolayı çok düz yüzeyler aşınma parçacıklarını muhafaza etmekten yoksundur. Bu da pürüzlerin dahafazla etkileşime sahip olacağı anlamına gelir. Aynı zamanda yağlayıcılar daha temiz yüzeyi temizleme eğiliminde olacaktır. Çok pürüzlü yüzey pürüzlerinin kenetlenmesine sebep olur ki bu da kopmayı ve sürtünme yapışmasına yol açar[8].

3.4.7 Titreşimli aşınma

Titreşimli aşınma, eşleşmiş iki yüzey arasında meydana gelir. Başlangıçta adhesivdir ve titreşim ya da küçük genlikli salınım temel etkidir. Titreşimli aşınma sıklıkla korozyonla birlikte meydana gelir. Genel olarak titreşimli aşınma, çok küçük genlikli bağıl hareketli devire bağlı olan iki sıkı geçme yüzey arasında meydana gelir.

Titreşimli aşınma genellikle birbirlerine hareket halinde sabitlenmesi istenen yüzeyler arasında meydana gelmektedir. Parçalar arasındaki bağıl yer değiştirmeler oldukça küçüktür ($<50-150 \mu m$).

Titreşimli aşınmayla oksidasyonun büyük rolünden dolayı, elektriksiz nikel ya da yumuşak kendinden yağlamalı gümüş ve indium gibi oksidasyon dirençli kaplamalarla aşınmaya karşı önlem alınabilir[8].

3.4.8 Yuvarlanma temaslı aşınma

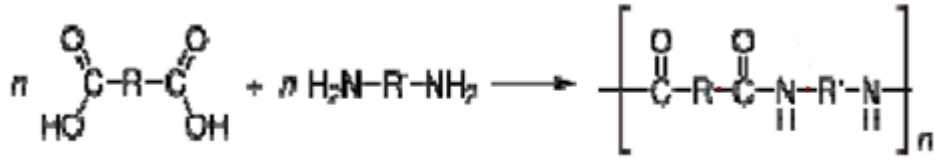
Bir parçanın diğeri üzerinde yuvarlanması, yuvarlanmalı yataklarda olduğu gibi, alt yüzey malzemelerinin tekrarlı gerilmeleri ile mikro çatlak çekirdeklenmesiyle, çukur ve parçacıklarla sonuçlanabilir.

Çünkü yuvarlanma temaslı aşınma genellikle tekrarlı mekanik gerilmelerle meydana gelir. Yatakların ve dişlilerin analizi gösteriyor ki dişli, kam bağlantılarında olduğu gibi bazı kayma dereceleri yuvarlanma teması durumlarında meydana geliyor. Bundan dolayı yuvarlanma temaslı durumlar düşünüldüğünde komponentler üzerinde kayma aşınmasını görmek mümkündür.

Uygun tasarım, yük oranları, yağlama ve sertleştirmeye ya da sertleştirilmiş birinci sınıf alaşımlı çeliklerle yuvarlanma temaslı aşınmadan korunmak mümkündür[8].

4. POLİAMİD 66

1934 yılında W.Carothers tarafından doğal pamuğun yerini alması amacıyla geliştirilen poliamidler günümüzde en çok kullanılan mühendislik plastiklerinden birisidir.



Şekil 4.1 Poliamid kimyasal yapısı.

PA'in sahip olduğu özellikler polimerin kimyasal yapısına bağlıdır. Aşağıdaki tabloda mühendislik uygulamalarında kullanılan bazı poliamidlerin özellikleri görülebilmektedir.

Çizelge 4.1 Poliamid özellikleri.

Poliamid	Ergime Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	Eğme Çarpanı (GPa)	Yoğunluk (g/cm ³)
PA 6	225	50 – 90	0.8 – 2	1.12 – 1.14
PA 6.6	265	45 – 85	0.8 – 3	1.13 -1.15
PA 4.6	296	65 – 85	1 – 3.2	1.17 – 1.19
PA 11	185	27 – 46	0.5 – 1.5	1.03 – 1.08
PA 12	175	26 – 51	0.5 – 1.8	1.0 – 1.05

PA'in mekanik özellikleri, çekme dayanımı gibi, malzemenin içerdiği nem miktarına bağlıdır. Nem soğurumu su ile temasa, bağlı neme ve kullanım süresine bağlı olarak yüze 7-8'e kadar ulaşabilir.

PA'in sürtünme özellikleri bir çok uygulama için önem arz etmektedir. Sürtünme katsayısı polimer tipine, takviyeye ve yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır.

PA uygulamaları, iyi kayma sürtünme özellikleri (düşük sürtünme katsayısı), yüksek ısıl direnç, iyi elektriksel özellikler, darbe dayanımı, elastik özellikler, kimyasallara karşı direnç ve boyutsal kararlılıktan dolayı tercih edilmektedir.

Esas PA 6 uygulamaları otomotiv sektöründe görülmektedir fakat aynı zamanda enjeksiyonla kalıplanmış dişliler ve kış sporları giysileri için de geniş kullanım alanına sahiptir. PA 6.6 aerosol kaplarında, alet muhafaza antalarında, PA 4.6 otomotivlerde hava emme manifoldunda, ev ve bahçe araçlarında, PA 11 ve 12 araba camı yıkama setlerinde kullanılmaktadır[9].

MoS₂, naylon ve diğer kompozitlerde, aşınma oranlarını azaltmak ve pv limitlerini artırmak için kullanılan bir katı yağlayıcıdır. Naylonları daha kristalin yapmak suretiyle yapılarını değiştirerek, daha iyi, daha sert ve aşınma direnci daha yüksek bir yüzey oluşturur. Ayrıca metallerle etkileşerek metalin mikroskopik deliklerini doldur, metal yüzeyini kaygan hale getirir. [10]

5. KAPLAMA YÖNTEMLERİ

5.1 Kataforez Kaplama

Kataforez boya, ürünlerin dış yüzeyinin korozyon direncini artırmak için uygulanan, elektrokimya prensiplerine dayanan bir elektro-kaplama prosesidir. Çeşitli aşamalar içermektedir. Yağ alma ile kaplama yapılacak yüzeyin kir ve pastan arındırılması sağlanır. Durulama ile temizleme işlemi bitirilerek aktivasyon aşamasına geçilir. Bu aşamada uygulanan ve komple daldırmaya dayanan aktivasyon prosesi fosfatlama reaksiyonunu hızlandırarak satırlarda düzgün kristalli fosfat tabakasının oluşmasını sağlar. Burada kullanılan eriyik fosfat kristallerinin yüzeyi aşındırarak kaplama yapılacak parçanın aktif hale gelmesine yardımcı olur. Daha sonra tri katyon çinko kimyasal malzemesi kullanılarak aktivasyondan gelen parça gövdesinin fosfat kristalleriyle kaplanması sağlanır. Bu uygulama kataforez boyanın daha iyi yapışmasını sağlayarak korozyon direncini artırmaktadır. Tekrar durulama aşamasından geçirilen parça pasivasyon bölgesinde yüzeyindeki fazla fosfat kristallerinin temizlenmesiyle kataforez kaplamaya hazır hale getirilir. Korozyona karşı direncinden dolayı öne çıkan kataforez ile 19-25 µm kalınlığında bir kaplama yapılmaktadır. Kataforez sonrası yapılan durulama ile parça fırına gönderilerek kaplama işlemi tamamlanır.

5.2 Toz Boya Kaplama

Toz boya da kataforez boya kaplama ile aynı aşamalardan geçilerek yapılmaktadır. Kataforez kaplanan parça fırından çıktıktan sonra püskürtme yöntemiyle toz parçacıklarının kataforez üzerine nüfuz etmesi amaçlanır. Püskürtülen toz boya ile parça gövdesi üzerinde katman oluşturulur ve parça son olarak fırınlanarak kaplama işlemi sonlandırılır. Bu sayede kataforez boya kaplamaya göre daha fazla kaplama kalınlığına sahip bir katman elde edilir.

5.3 Galvaniz Kaplama

Galvaniz kaplama metalin korozyona karşı çinko ile kaplanmasıdır. İki şekilde yapılabilir. Birincisi elektro galvaniz ile ikincisi ise sıcak daldırma galvaniz ile kaplamadır. Metale, çinko kaplanarak aşınma direnci artırılır. Çinko, çelikten daha reaktif olduğu için ilk olarak çinko galvaniz kaplama kaplama korozyona uğrayarak alt katmanda bulunan çeliği korur.

Elektro galvaniz kaplama yönteminde, elektrolitle dolu bir kazanın içine iki adet elektrot daldırılır. Bunlar anot ve katot elektrotlarıdır. Anot elektrotuna çinko, katoduna ise kaplanacak malzeme bağlanır. Yüksek akım, düşük gerilim üretici ve redresör ile elektrik verilip anottan elektron koparılıp katoda yani malzemenin yüzeyine yapışması sağlanır. İşlem sonucunda pasivasyon yapılarak kaplamanın kalıcı olması sağlanır ve kaplama işlemi bitirilir.

5.4 Krom Kaplama

Metalik bir element olan krom, çok sert ve erime noktasının 1857°C olmasından dolayı metallere sertlik ve dayanıklılık kazandırmak için kullanılmaktadır. Aşınma ve korozyonun asgariye indirilmesi için uygulanan krom kaplama, korozyona karşı dayanıklılığın artmasına yardımcı olan ve yumuşak yüzeylerde yüzey kayganlığını sağlamak için parçalara uygulanan bir kaplama yöntemidir. Krom kaplama neticesinde yüzey sertliğinde artış meydana gelmektedir ve aynı zamanda düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmektedir.

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmada kullanılan PA 66 malzemeden üretilmiş rulmanlı makaralar asansör kapı mekanizmalarında ray üst makarası olarak kullanılmakta ve Şekil 6.1’de görüldüğü üzere bir ray üzerinde kayma ve yuvarlanma hareketi ile asansör kapısının açılıp kapanmasını sağlayıp aynı zamanda kapı panellerinden kaynaklanan ağırlığı taşımaktadır. Bu sebeple makaraların aşınma ve yük taşıma kapasitesinin üst düzeyde olmasının yanısıra servis ömrünün de uzun olması istenir. Bu isteklerin sağlanması imal edilen makaraların üretim kalitesine bağlı olmakla birlikte bu makaraların kullanım amacı doğrultusunda fonksiyonunu yerine getirdiği ortam koşullarına ve beraber çalıştığı parçanın özelliklerine de bağlıdır.,



Şekil 6.1 Asansör kapı mekanizması[10].

Karşılıklı olarak çalışan iki malzeme çifti düşünüldüğünde karşılaşılması muhtemel en temel sorun sorun aşınmadır. Aşınma daha önce de belirtildiği üzere katı, sıvı veya gaz temasının mekanik etkisiyle malzemenin yer değiştirmesi veya ayrılmasıyla katı yüzeyde meydana gelen hasar olarak tanımlanmaktadır. Yapılan araştırmalar neticesinde bir çok aşınma tipi ve kategorisi tanımlanmasına rağmen belli bir standart oluşturulamamıştır. Bu standartın oluşturulamamasında aşınma mekanizmalarının malzemelerin tipine, ortam koşullarına, işletme şartlarına göre değişkenlik göstermesi yatmaktadır. Franklin yaptığı çalışma sonucunda düşük yüzey pürüzlülüğünde, kayma hızının artması ile birlikte PA-66, POM+%20PTFE ve POM+%30CE polimerleri için aşınma oranının arttığı, POM, UHMWPE ve PA-66+%30CE polimerleri için azaldığı sonucuna varmıştır[6]. Liu ise yaptığı çalışmalar neticesinde aşınma davranışı üzerinde kayma mesafesi ile kayma hızından ziyade uygulanan yükün ve yüzey pürüzlülüğünün etkili olduğu ve kontrol edilebilir parametreler olduğu sonucuna varmıştır[2]. Yapılan birçok aşınma davranışı çalışmalarında aşınma davranışını etkileyen faktörler değişkenlik gösterdiğinden ve buna bağlı olarak farklı aşınma mekanizmaları gözlemlendiğinden malzemelerin aşınma davranışı ile ilgili standart bir yorumda karar kılınamamıştır.

Bu sebeple çeşitli malzemelerin aşınma davranışlarının tespiti için çalışma durumlarına göre çeşitli tribometreler geliştirilmiş ve kullanılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmada makaraların aşınma davranışının tespiti için çalışma durumları göz önünde bulundurularak makaranın ray üzerindeki hareketini simüle eden özel olarak tasarlanmış deney düzeneği kullanılmıştır.

Daha önce belirtildiği üzere aşınma ve korozyon aralarında bulunan sinerjik ilişkilerden dolayı birbirini tetikleyen faktörlerlerdir. Metaller doğada oksitlenmiş halde bulundukları için birbirlerinden ayırmak gerekir ve bunun için de büyük miktarda enerji harcanmaktadır. Termodinamik anlamda, bu süreç sonunda metaller daha yüksek bir enerji düzeyine taşınırken, entropileri düşer. Korozyon ise metallerin doğada bulundukları duruma dönme eğilimi sürecini tetikleyen itici güç olarak davranır. Ortam, ara yüzey ve malzeme üçgeninde meydana gelen korozyon neticesinde korozyon ürünlerinin malzeme yüzeyinde birikmesi, çözünme ve malzeme iç yapısında meydana gelen değişiklikler ile malzeme yüzey özelliği değişimi, ağırlık değişimi ve yapısal süreksizlik oluşumu gibi korozyon hasarları

meydana gelmektedir. Malzeme yüzeyinde meydana gelen bozulmalar karşı malzeme için de sorun teşkil etmektedir. Yani sadece korozyona uğrayan malzeme yüzeyi değil beraber çalıştığı karşı yüzey de bu hasardan etkilenmekte ve duruma göre aşınan parça olarak karşımıza çıkmaktadır. Yapılan çalışmanın konusu da bu sorun gözetilerek belirlenmiştir. Asansör kapı rayları için piyasada kullanılan malzemelerin büyük bir çoğunluğu metal olup korozyon hasarlarının gerçekleşme potansiyeli mevcuttur. Makaraların üzerinde çalıştığı ray malzemesinin önemi burada devreye girmektedir. Gerekli önlem alınmadığı takdirde metaller oksitlenerek hasar görmektedirler. Yüzeyde başlayan oksitlenme zamanla ilerleyerek tüm yüzeyi kaplar ve yüzeyin bozulmasına sebep olur. Bu bozulma da metal ray yüzey pürüzlülüğünü artıracığından karşı malzeme için aşındırıcı bir etken olmaktadır. Bunun önüne geçmek için bazı önlemler almak gerekir. Bu önlemlerin en başında da daha önce belirtildiği üzere çeliğe korozyona dirençli kaplamalar uygulanması bulunmaktadır. Buradan yola çıkarak bu deneyde korozyonu önlemek için ray malzemesi yüzeyine dört farklı kaplama uygulanmış ve dört farklı deney ile makaralar denenerek aşınma grafikleri elde edilmiştir.

6.1 Deney Düzeneği

Bu çalışmada şekil 6.2’de görülebilen MoS₂ katkılı Poliamid 66 malzemeden imal edilmiş makaraların farklı kaplama türlerine karşı çalıştırılarak aşınma durumları deneysel olarak incelenmiştir.

Asansör kapılarında kullanılan ray üst makaralarının polimer kısımlarının çeşitli parametrelere bağlı olarak aşınma miktarının takibi ve makaraların aşınmaya bağlı ömürlerinin belirlenmesi amacıyla bir çift disk deney tesisatı geliştirilmiştir. Çift disk deney tesisatının şematik görünüşü ve elamanları Şekil 6.3’de görülebilmektedir. Şekillerden de görüleceği gibi, normal kuvvetin kaynağı olarak pnömatik sistem kullanılmıştır. Pnömatik sistemin tercih nedeni montaj kolaylığı, rahat kumanda edilebilmesi, istenen kuvvet aralığında ayarlanabilmesi ve sönümleme özelliğinden dolayı daha sağlıklı bir deneye imkan vermesidir. Kompresöre bağlı olan, yataklı çift millî, piston çapları 25 mm olan pnömatik silindirler, disk etrafına 90° aralıklarla normal kuvvet uygulayacak şekilde monte edilmiştir ve regülatör yardımıyla piston basınçları 0-10 bar (makaralara etkiyen normal yük 0-981,7 N) arasında rahatlıkla ayarlanabilmektedir.



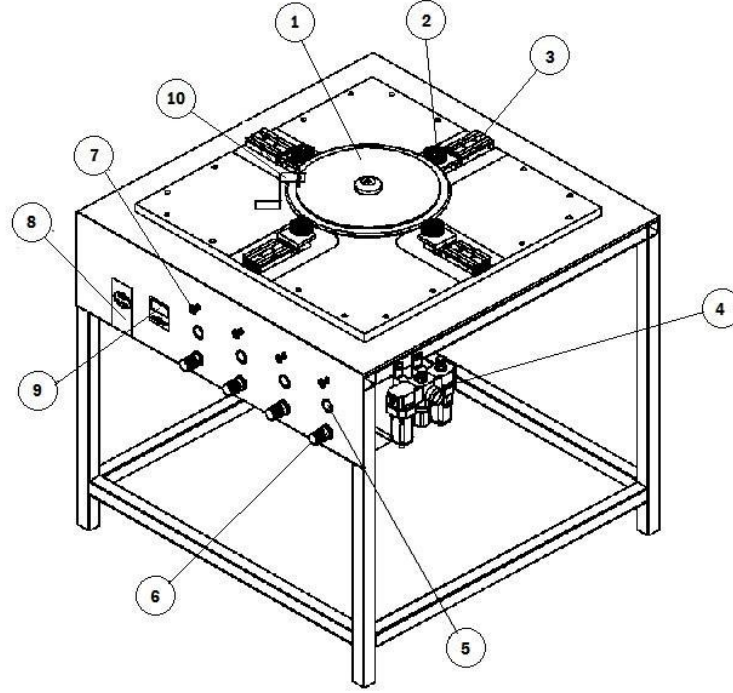
Şekil 6.2 MoS₂ katkılı Pa 66 malzemeden imal edilmiş ray makarası.

Polimer makara yüzeylerinin karşı temas yüzeyi olarak doğrusal rayı temsilen AISI 1050 malzemeden imal edilmiş 400 mm çapında ve kenarlarına 5 mm radiüs verilmiş bir disk kullanılmıştır. Kaplamalar bu disk üzerine yapılarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

Tahrik elemanı olarak 1/15 tahvil oranına sahip bir redüktöre ve bir invertöre bağlı şekilde , dönme hızı 0-120 d/d arasında ayarlanabilen bir DC motor kullanılmıştır.

Devir sayısını takip etmeyi kolaylaştırmak amacıyla disk üzerine mıknatıs monte edilmiş ve dönmeyi algılayacak bir manyetik sensör ve ona bağlı bir sayaç kullanılmıştır.

Deney tesisatına ek olarak deneylerde ölçüm amacıyla 0.0001 gr ‘a duyarlı bir hassas terazi ve bir kızılötesi termometre de kullanılmıştır. Hassas terazi ile aşınmadan kaynaklı kütle kaybı, kızılötesi termometre ile de numune temas yüzeyinin sıcaklığı ölçülmüş ve takip edilmiştir.



- | | | |
|-----------------------------|----------------------------|--|
| 1-Disk ve tahrik elemanları | 2-Rulmanlı makara (numune) | 3-Yataklı çift milli pnömatik silindir |
| 4-Şartlandırıcı | 5-Gösterge | 6-Regülatör ayar düğmesi |
| 7-Start-stop butonu | 8-İnvertör | 9-Devir sayacı |
| 10-Manyetik sensör | | |

Şekil 6.3 Çift disk deney düzeneği şematik gösterimi.



Şekil 6.4 Çift disk deney düzeneği genel görünüşü.

6.2 Deneyin Yapılışı

Deney düzeneği aynı anda 4 tane makaranın test edilmesine imkan verecek şekilde tasarlandığı için her deneyde aynı süreçte imal edilen numunelerden temin edilmiş toplam 20 adet makara kullanılmıştır. Deney düzeneği kullanılarak değiştirilebilen parametreler, uygulanan yük, kayma hızı olmasına rağmen amaç ray kaplamasının plastik makara üzerindeki aşınma davranışını incelemek olduğu için sabit bir yük değeri ve kayma hızı seçilip deneyler gerçekleştirilmiştir.

Her bir makaranın taşıdığı yük miktarı kullanıldığı sistemdeki asansör kapı paneli ağırlıklarına göre değişmektedir. Aynı şekilde kayma hızları da kullanıldıkları asansörlerin kapı tiplerine göre farklılık göstermektedir. Çizelge 6.1’de kapı tipine ve kapı genişliğine göre kapı açılma ve kapanma süreleri görülmektedir.

Çizelge 6.1 Asansör kapı genişlikleri ve açılıp kapanma süreleri[11].

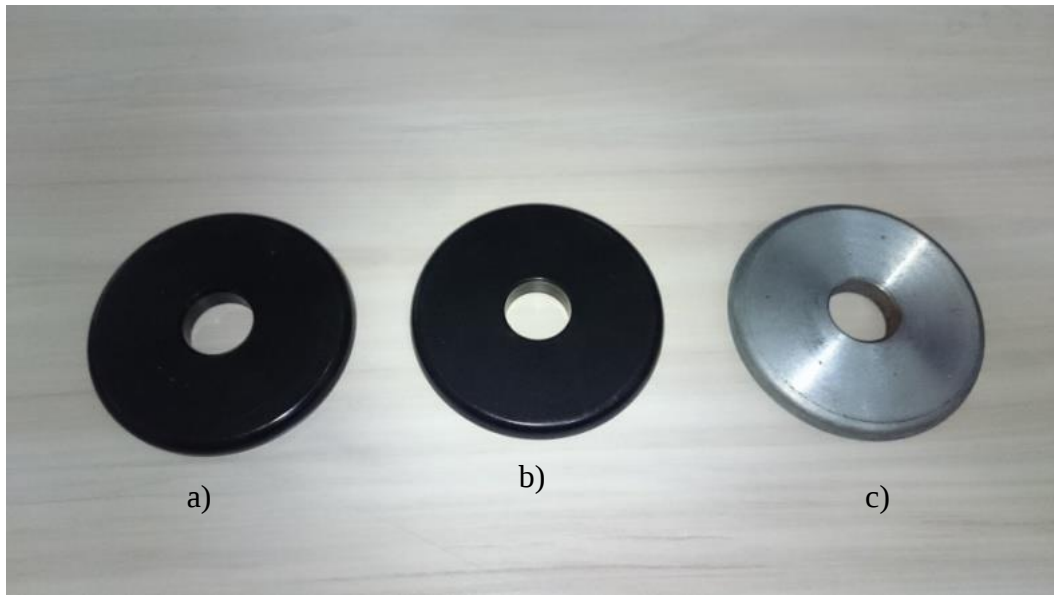
Kapı Tipi	Kapı Genişliği [mm]	t_a [s]	t_k [s]
Kenara Toplamalı	800	2.5	3.0
	900	2.5	3.8
	1060	2.9	4.0
	1100	3.0	4.0
	1420	3.7	5.0
Ortadan Açılan	800	2.0	2.5
	900	2.3	2.9
	1060	2.5	3.3
	1100	2.5	3.5
	1420	2.7	3.7

Görüleceği üzere maksimum kapı genişliği 1420 mm iken maksimum hız ortadan açılan tipte 1420 mm kapı genişliği ve 2.7 s açılma süresi ile elde edilen 0.52 m/sn lik hızdır. Deney düzeneğinde ise 1256 mm çevre uzunluğuna sahip 400 mm çapındaki disk deney süresini minimuma indirmek adına dakikada 60 devir yapacak şekilde döndürülmüştür. Böylece 1.256 m/s hızı ile bir tur sonunda 1256 mm mesafe alacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiş ve yaklaşık olarak 14 günde kat edilen 1500 km kayma mesafesi sonunda testler sona erdirilmiştir.

Makaralara uygulanan yük ise aşınma davranışının daha net gözlemlenmesi adına daha önce de yapılan çalışmalar göz önüne alınarak 3 bar silindir basıncı ile sağlanmıştır. Bu sayede her bir makara üzerine 1 kg/cm² lik basınç etki ettirilmiştir.

Yapılan 4 farklı deneyde kataforez, toz boya, galvaniz ve krom olmak üzere dört farklı kaplama türü disk üzerine uygulanmış ve her biri 14 gün süren testler gerçekleştirilmiştir. Aşınma oranının kayma mesafesi ile olan değişimini grafik üzerine yansıtmak için mümkün olduğunda sık ölçüm alınmaya çalışılmış ve her ölçümde 4 makara da 10⁻⁴ g hassasiyete sahip terazi ile tartılarak ağırlık kaybı hesaplanmıştır. Yine her ölçüm esnasında ısıölçer ile makara yüzey sıcaklığı ölçülerek test süresi boyunca sıcaklık değişimleri gözlemlenmiştir.

Numunelerin değişik kaplama çeşitleri karşısında sergiledikleri aşınma davranışlarını yorumlamak için ihtiyaç duyulan diskin kaplama sonrası yüzey pürüzlülük değerlerini tespit etmek amacıyla disk ile aynı malzemeden olmak üzere 80 mm çapında 10 mm kalınlığında 5 mm radyüs verilmiş numune diskler imal ettirilmiş ve portatif yüzey pürüzlülük cihazıyla makaraların disk ile temas ettiği noktalardan değerler alınmıştır. Krom kaplı diskin yüzey pürüzlülük ölçümü daha önce alındığı için 3 tane numune disk imal ettirilmiştir. Bu yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 6.2, Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4’de görülebilmektedir.



Şekil 6.5 Kaplama yapılmış numune diskler a) kataforez kaplama b) toz boya kaplama c) galvaniz kaplama

Çizelge 6.2 Kataforez kaplanmış numune diske ait yüzey pürüzlülük değerleri.

	Kataforez	
	Alt Değer (μm)	Üst Değer (μm)
Ra	0,40	0,62
Ry	2,49	3,58
Rz	2,06	2,83
Rq	0,49	0,70

Çizelge 6.3 Toz boya kaplanmış numune diske ait yüzey pürüzlülük değerleri.

	Toz Boya	
	Alt Değer (μm)	Üst Değer (μm)
Ra	0,70	1,05
Ry	6,45	11,42
Rz	5,42	7,58
Rq	0,91	1,44

Çizelge 6.4 Galvaniz kaplanmış numune diske ait yüzey pürüzlülük değerleri.

	Galvaniz	
	Alt Değer (μm)	Üst Değer (μm)
Ra	0,87	1,47
Ry	7,37	13,39
Rz	5,55	9,43
Rq	1,08	1,94

Çizelge 6.5 Krom kaplanmış diske ait yüzey pürüzlülük değerleri.

	Krom	
	Alt Değer (μm)	Üst Değer (μm)
Ra	0,98	1, 72
Ry	1,23	2,11
Rz	6,59	13,17
Rq	5,60	9,18

Çizelgelerden görüldüğü gibi kataforez ve krom kaplama birbirlerine yakın değerler verirken her ikisi de toz boya kaplamaya göre ve toz boya kaplama da galvaniz kaplamaya göre daha iyi yüzey seçeneği sunmaktadır. Yapılan sertlik ölçümleri sonucuna göre ise kataforez kaplama ve galvaniz kaplamanın hemen hemen aynı sertlikte ve toz boya kaplamanın bu ikisine göre daha yumuşak olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

6.3 Aşınma Oranlarının Hesaplaması

Deney süresince yapılan ölçümler neticesinde kayma mesafesine karşılık gelen aşınma miktarları ölçülmüştür. Yapılan ölçüm ayısı kadar nokta kullanılarak bir eğri elde edilmiş ve bu eğriden yola çıkarak da regresyon yöntemi ile eğimler tespit edilip çıkan sonuç yüke bölünerek aşınma oranları elde edilmiştir.

Aşınma oranları aşağıdaki denklem kullanılarak şu şekilde hesaplanmıştır.

Disk yan yüzeyi ve makara kanal yüzeyi tam oturduğu durumda temas alanı A, temas bölgesi dikdörtgensel projeksiyon alanı ayrıtları $a=5\pi$ mm olmak üzere ve $b=6,25$ mm kabulü ile,

$$A = a \cdot b \quad (6.1)$$

$$A = 5\pi \cdot 6,25 = 98,17 \text{ mm}^2 = 98,17 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (6.2)$$

Olarak bulunur. Ara yüzey basıncı $p=1\text{MPa}$, F_N normal yük olmak üzere,

$$F_N = p \cdot A = 1 \times 10^6 \times 98,17 \times 10^{-6} = 98,17 \text{ N} \quad (6.3)$$

olur.

$$W = \frac{Eğim}{Yük \times 1000} \quad (6.4)$$

Bu denkleme göre 3 MPa yüzey basıncı için,

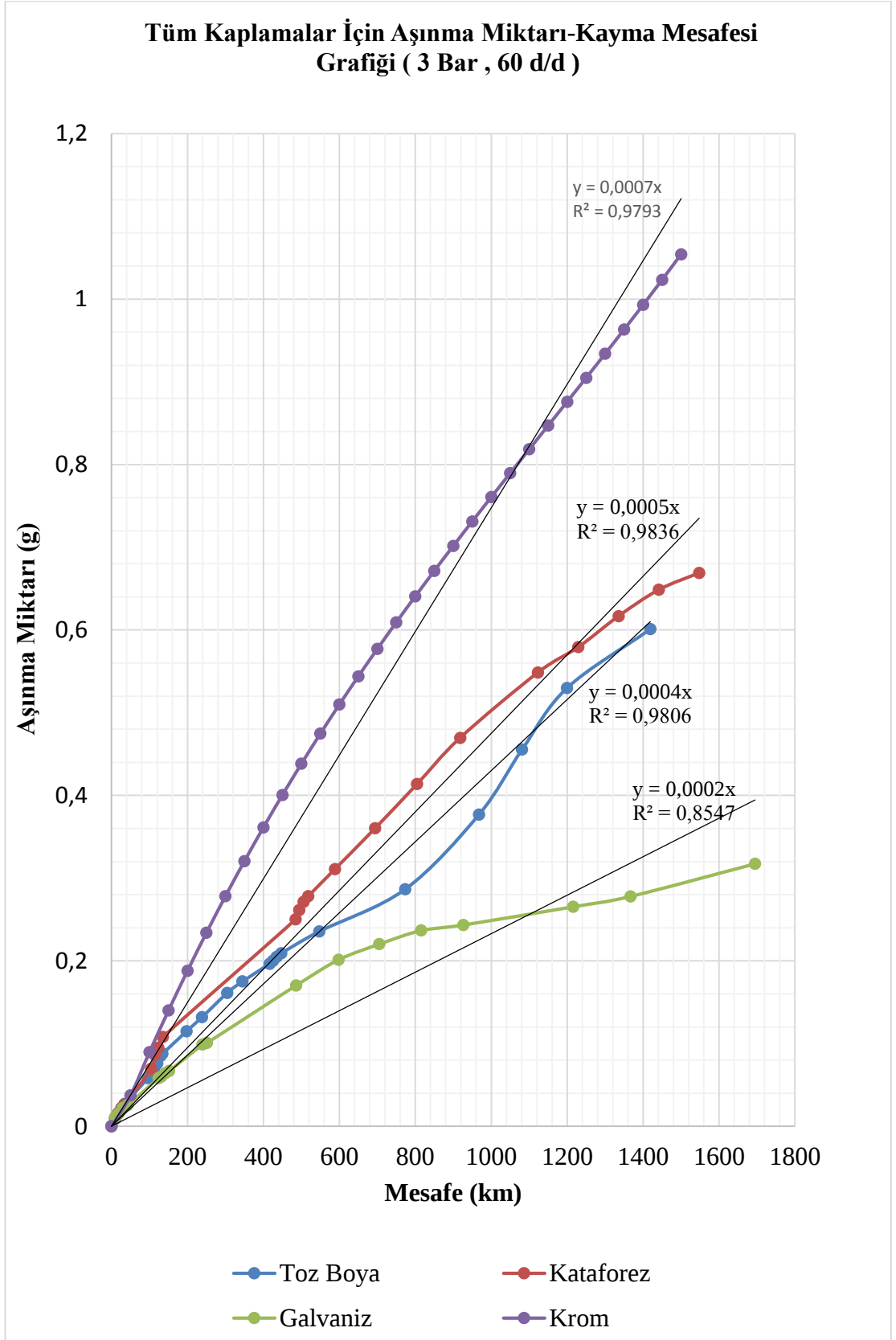
$$W_{kataforez} = \frac{0,0005}{294,52 \times 1000} = 1,69 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm} \quad (6.5)$$

$$W_{toz \text{ boya}} = \frac{0,0004}{294,52 \times 1000} = 1,35 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm} \quad (6.6)$$

$$W_{galvaniz} = \frac{0,0002}{294,52 \times 1000} = 0,67 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm} \quad (6.7)$$

$$W_{krom} = \frac{0,0007}{294,52 \times 1000} = 2,38 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm} \quad (6.7)$$

olarak hesaplanır.



Şekil 6.6 Aşınma oranlarının hesaplanması.

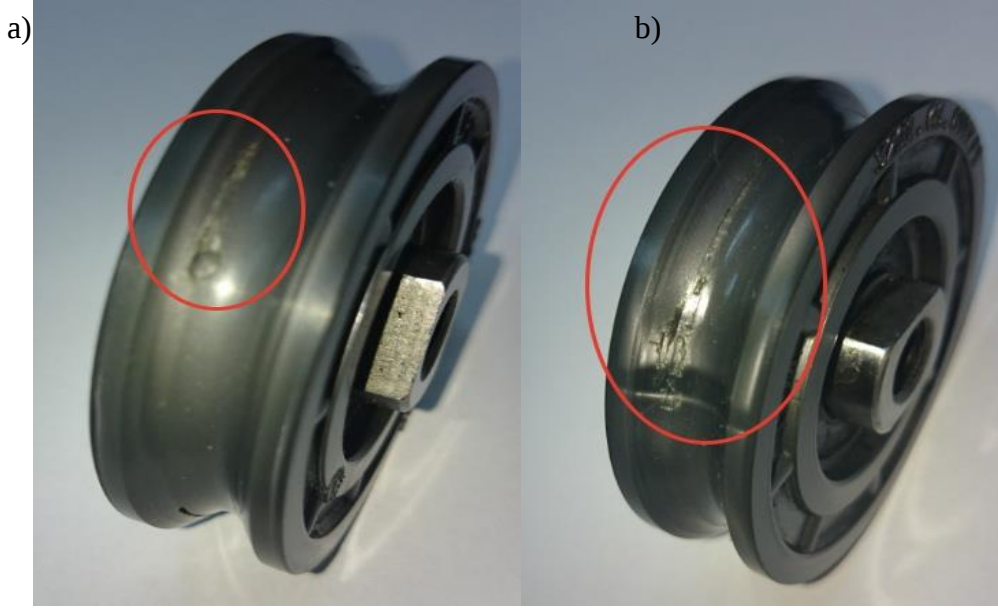
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

7.1 Deney Sonuçları

Asansör kapı mekanizmalarında kapı panellerinin hareketini sağlayan ve aynı zamanda taşıyıcı olarak görev yapan MoS₂ katkılı PA 66 rulmanlı makaraların 3 farklı kaplamaya karşı çalışması sağlanarak aşınma davranışları incelenmiştir. Oda sıcaklığında yapılan deneylerde 1,256 m/s sabit kayma hızı ve 294,52 N yük uygulanarak kaplama çeşitlerinin makara üzerinde etkisi gözlemlenmiştir. Deney esnasında makaraların ağırlıkları ölçülerek aşınma miktarları ve her ölçümde makara yüzey sıcaklığı ölçülerek kayma mesafesi boyunca meydana gelen sıcaklık değişimi tespit edilmiştir. Elde edilen aşınma oranları kataforez kaplama için $1,69 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm}$, toz boya kaplama için $1,35 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm}$ galvaniz kaplama için $0,67 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm}$ ve krom kaplama için $2,38 \times 10^{-9} \text{ gr/Nm}$ olarak hesap edilmiştir.

İlk deney toz boya kaplama yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deney başladıktan kısa bir süre sonra toz boya kaplaması kendisine göre daha sert olan makara tarafından yüzeyden kaldırılmaya başlamıştır. Bu durum toz boya yüzeyinin yapısını bozarak makaraya abrasif aşınma olarak yansımıştır. Deney düzeneğinde üç numaralı pnömatik kolun konumlanma hatasından dolayı bu koldaki makara kısa sürede hasar görüp iptal edilmiştir. Aynı zamanda deney için imal ettirilen diskin yaklaşık 0.7 mm salınım yapması da toz boya deneyinde kullanılan makaralar için olumsuz yönde etki ederek çeşitli aşınma mekanizmalarının görülmesine sebep olmuştur. İptal edilen 3 numaralı makaradan sonra salınım hareketi 4 numaralı makara üzerinde etkisini gösterdiğinden 4 numaralı makara da deney bitmeden iptal edilmiştir. Diskin yapmış olduğu salınım hareketinin etkilerinden dolayı deneyin ilk kısımlarında makaralarda oyma aşınması görülmüş ve zamanla bu aşınma türünün parça kalkması şeklinde devam ettiği tespit edilmiştir. Abrasif aşınmaya bağlı kesme şeklinde de aşınma tipi gözlemlenmiştir. Meydana gelen aşınma hasarlarına rağmen toz boya kaplama

karşısında çalışan 1 ve 2 numaralı makaralar 1500 km kayma mesafesini fonksiyonel açıdan hasar görmeden tamamlamışlardır.



Şekil 7.1 Toz boya kaplamaya karşı yapılan deneyde makara yüzeyinde görülen a) oyuk ve b) kesme aşınması hasarı

İkinci deneye geçilmeden önce disk üzerindeki toz boya kaplaması sökülüp yeni kaplama için hazır hale getirildikten sonra ilk deneyi olumsuz yönde etkileyen salınımın en aza indirilmesi için balans ayarı yapılarak kataforez kaplama yapılmıştır. Balans ayrı neticesinde 0.7 mm olan salınım 0.2 ye düşürülerek etkisi en aza indirilmiştir.

İkinci deney diskin kataforez kaplama yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Düzenli bir aşınma karakteristiği gösteren bu deneyde makaralar üzerinde herhangi bir oyuk, çatlama, yüzey yorulmasına bağlı olarak oyulma gibi aşınma hasarları görülmemiştir. Bunların yerine makara ile diskin temas noktası boyunca kütle kaybına sebep olan Şekil 7.1’de görülebilen abrasif aşınma kaynaklı kesme ve partlama aşınması görülmüştür. Fakat aşınma oranlarına bakıldığında kataforez kaplamanın en fazla aşınma oranına sebep olmasına rağmen makaralar 1500 km kayma mesafesini fonksiyonel açıdan hasar görmeden tamamlamışlardır.



Şekil 7.2 Kataforez kaplamaya karşı yapılan deneyde makara yüzeyinde görülen aşınma hasarı

Üçüncü deneyde ise disk galvaniz kaplama yapılarak deney gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü açısından diğer kaplamaların verdiği sonuçlara göre daha kötü durumda olmasına rağmen en az aşınma oranını sağlayan galvaniz kaplama, toz boya kaplamada olduğu gibi makara üzerinde oyulma, çatlama, çizilme, kesme gibi aşınma hasarlarına sebep olmuştur. En az aşınma oranını vermesine ve 1500 km'yi makaraların fonksiyonunu kaybetmeden çalışmalarını sağlamasına rağmen yüzeye ciddi olarak hasar vererek pratik açıdan uygun olmadığını göstermiştir.



Şekil 7.3 Galvaniz kaplamaya karşı yapılan deneyde makara yüzeyinde görülen aşınma hasarları

7.2 Değerlendirme

Şekil 6.5’den de görüldüğü üzere 1500 km mesafe kat edecek şekilde gerçekleştirilen deneyler sonucunda en fazla aşınma krom kaplamaya karşı çalışan numunelerde, en az aşınma ise galvaniz kaplamaya karşı çalışan numunelerde meydana gelmiştir. Şekil 6.5’de gösterilen krom kaplamaya ait aşınma oranı başka bir çalışmaya aittir[10]. Bu sebeple makara yüzeylerinde meydana gelen hasar türleri hakkında bilgi mevcut değildir. Bundan dolayı değerlendirmede kataforez, toz boya ve galvaniz kaplama için yorumda bulunulmuştur.

Kataforez kaplama en fazla aşınma miktarına sebep olmasına rağmen deney esnasında yapılan gözlemler sonucunda makara üzerinde düzenli bir aşınma karakteristiği gözlemlenmiştir. En az aşınma meydana gelen galvaniz kaplamaya karşı çalışan numunelerde ise düzensiz bir aşınma karakteristiği gözlemlenmiş ve makara üzerinde gözle görülebilir derece de oyuklar, kopmalar ve çatlaklar meydana gelmiştir. Toz boya kaplamaya karşı çalışan numuneler ile yapılan testin ilk aşamalarında toz boya yüzeyden kalkmaya başlamış ve yüzeyden tamamen kalkana kadar bu durum devam etmiştir. Haliyle aşınan toz boya ortamın kirlenmesine sebep olup makara ile disk arasında birikerek aşınmanın düzensiz gerçekleşmesine sebep olarak makara yüzeyinde yer yer oyukların oluşmasına sebep olmuştur.

Yapılan kaplamalar neticesinde elde edile yüzey pürüzlülüklerinin aşınma oranlarından ziyade aşınma mekanizmalarını etkilediği sonucuna varılmıştır. Diğerlerine göre daha pürüzsüz bir yüzey sağlamasına rağmen en fazla aşınma oranına sebep olan kataforez kaplama bu duruma örnek verilebilir. Aynı zamanda karşılıklı çalışan iki malzemenin sertlik değerlerinin de önemli olduğu daha önce belirtilmişti. Yapılan ölçümlerde kataforez ile galvaniz kaplamanın hemen hemen aynı sertlik değerine sahipken toz boya kaplamanın daha yumuşak malzeme olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum kaplamaların plastik makaralar tarafından aşındırılmasına sebep olmuştur. Yani deneyde kullanılan numuneler sadece aşınan değil aynı zamanda aşındırıcı olarak da sisteme etki etmişlerdir. Artan kayma mesafesiyle makaraların etkisi altında yüzeyden kaldırılan toz boya ve kataforez kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri değişerek abrasif etkiyi artırıcı olarak etki etmişlerdir. Makaralar ile benzer malzeme olmalarından dolayı hem toz boya kaplama hem de kataforez kaplama ile yapılan deneylerde abrasif aşınmanın yanı

sıra adhesive aşınma etkisi de görülmüştür. Her iki deney boyunca karşılıklı malzeme transferi gerçekleşmiştir. Malzeme transferi abrasif etkiyi artırıcı bir etken olsa da daha hafif aşınma hasarlarına sebep olmuştur. Bu durum yani adhesif aşınmanın gözlemlenmediği galvaniz kaplamayla yapılan deneyde galvaniz kaplama yüzey pürüzlülüğü deney süresince diğer kaplama yüzeylerindeki kadar değişmediğinden yaşanmamıştır. Bundan dolayı abarasif aşınma ağırlıklı hasarlar oluşmuş ve numune yüzeyleri ciddi anlamda hasar görmüşlerdir.

Deney süresince yapılan her ölçümde numunelerin disk ile temas noktasından sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu ölçümlere ait grafikler Şekil A.2, Şekil A.4, Şekil A.6 ve Şekil A.8’de görülebilmektedir. Grafiklere baktığımızda artan kayma mesafesi ile sıcaklığın arttığı görülmektedir. Toz boya kaplamaya karşı çalışan makaralarda maksimum sıcaklık 40,9°C, kataforez kaplamaya karşı çalışan makaralarda 49,8°C, galvaniz kaplamaya karşı yapılan makaralarda 43,8°C ve krom kaplamaya karşı çalışan makaralarda 45,5°C olarak ölçülmüştür. Deney öncesi ortalama olarak oda sıcaklığına sahip makaralarda deney başlangıcından itibaren sürtünmeye bağlı olarak temas yüzeylerinde sıcaklık artışı görülmüş, sıcaklık değeri maksimum seviyeye ulaştıktan sonra azalarak belli bir değer aralığında artma ve azalma davranışı göstermiştir. Kayma hızına, sürtünme katsayısına bağlı olduğu bilinen sıcaklık değişiminin aşınmaya etkisi deneyin sabit kayma hızında yapıldığından ve sürtünme katsayısını verecek donanımı olmadığından tespit edilememiştir.

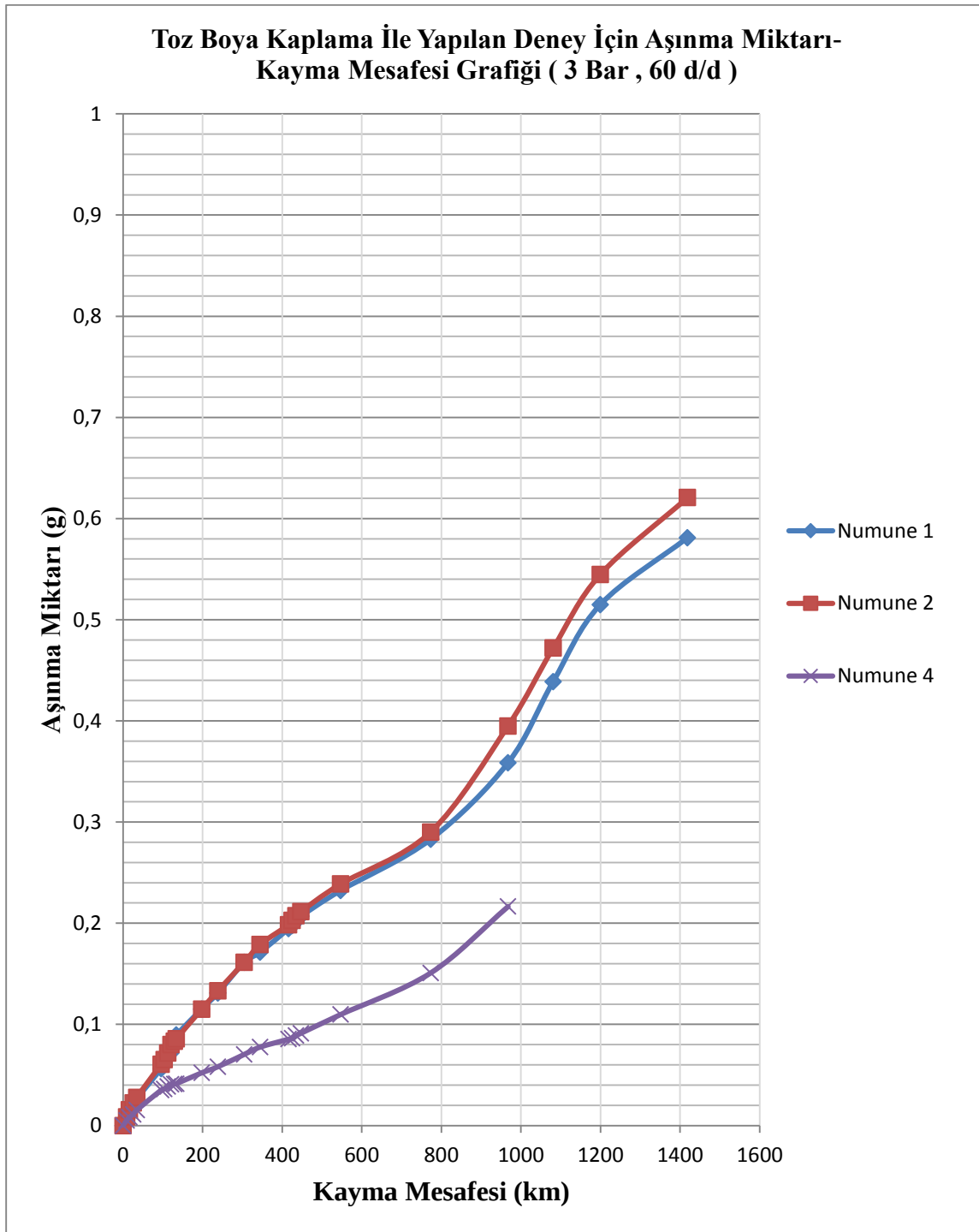
Sonuç olarak şunu söyleyebiliriz ki, yapılan üç farklı kaplama da numunelerin fonksiyonelliğini kaybetmeden 1500 km kayma mesafesinde çalışmasına olanak vermiştir. Kataforez kaplama en fazla aşınma oranını vermesine rağmen kaplama ile numune arasında meydana gelen aşınma mekanizmasından dolayı düzenli, kararlı bir aşınma meydana gelmiştir. Bundan dolayı üç kaplama arasından kataforez kaplamanın pratik kullanıma daha yatkın olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

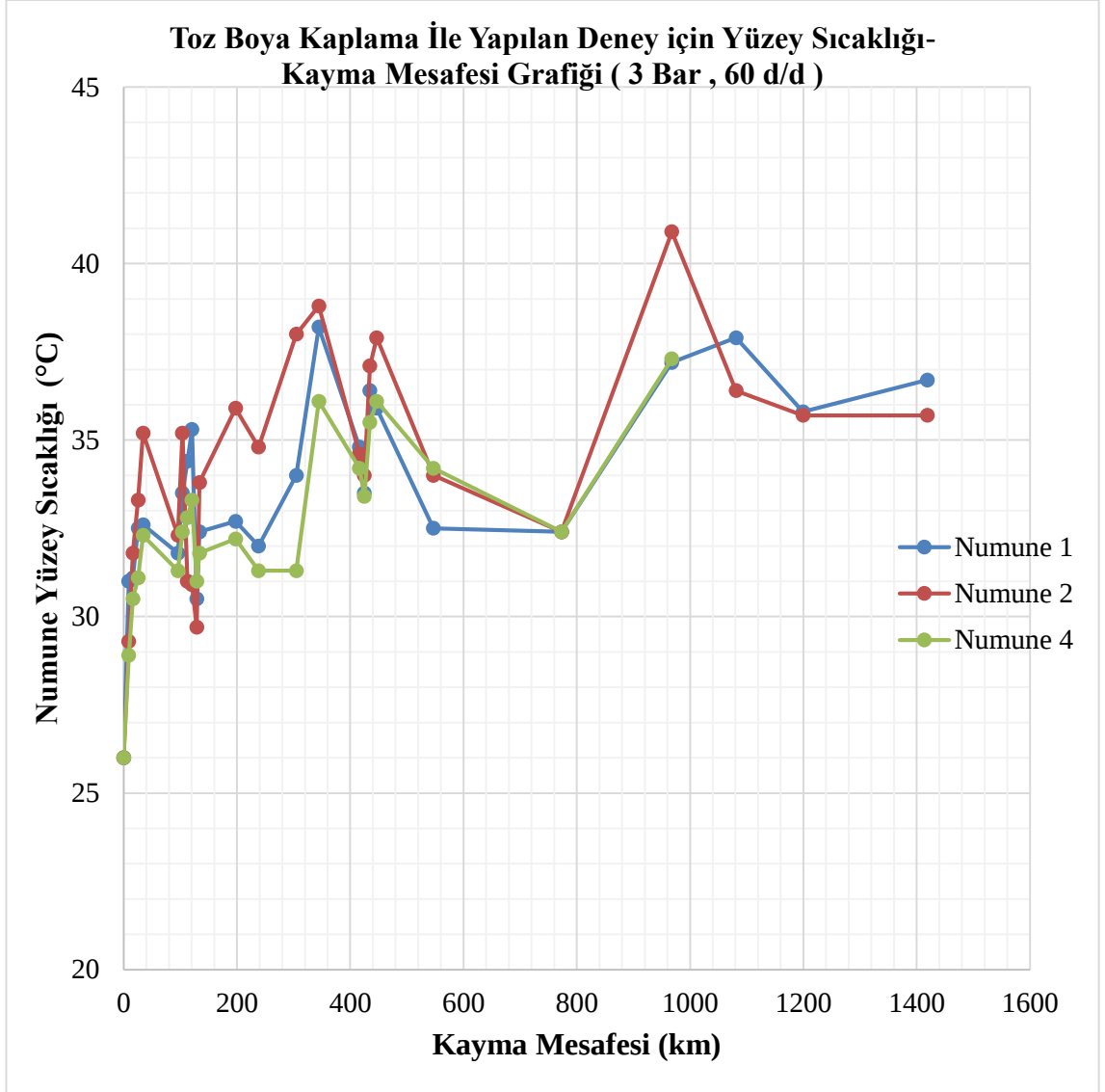
- [1] **Varol, N., YILDIRIM, M.**(1995) Plastiklerin Aşınma Davranışları, 6.Denizli Malzeme Sempozyumu, 12-14 Nisan 1995, Bildiri Kitabı, S. 488-497,Denizli
- [2] **C.Z. Liu, L.Q. Ren, J.Tong, S.M. Green, R.D. Arnell,** (2000) Effects Of Operating Parameters On The Lubricated Wear Behaviour Of A PA-6 / UHMWPE Blend: A Statistical Analysis, Wear 253, 878-884,
- [3] **Koç R.,** (2011) Mühendislik Plastiklerinin Aşınma Davranışlarının Deneysel İncelenmesi, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi Cilt:8, No:2, (27-40)
- [4] **Brostow W.,Olea-Mejia O., Buchman E.,** (2010) Wear Resistance and Wear Mechanisms in Polymer + Metal Composites, Journal of Nanoscience and Nanotechnology Vol. 10, 1-6.
- [5] **Chowdhury M.A., Nuruzzaman D.M., Kowser A., Rahman M., Roy B. K., Chakraborty S., Hossen S., Uddin I., Hossain S.,** (2014) Frictional Behaviour of Polymers Sliding Against Smooth and Rough Mild Steel Counter Faces, Middle-East Journal of Scientific Research 21 (3): 477-486.
- [6] **S.E. Franklin,**(2001). Wear experiments with selected engineering polymers and polymer composites under dry reciprocating sliding conditions, Wear 251, 1591–1598.
- [7] **W.J. WANG, J. HU, J. GUO, Q.Y. LIU, M.H. ZHU,** Effect of Laser Cladding On Wear And Damage Behaviors Of Heavy-Haul Wheel/Rail Materials, Tribology Research Institute, State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University,China
- [8] **J. R. Davis,** ASM International, Introduction to Surface Engineering For Corrosion And Wear Resistance
- [9] **Carlos A. A. Bernardo ,** (2012) Introduction / Main Commercial Plastics, European Master in Engineering Rheology, Univerity of Minho
- [10] **Erdoğan, Y.E** (2014) Pa 66 Kompound Malzemededen İmal Edilmiş Asansör Kapı Makaralarının Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi
- [11] **Boğaçlu, M.,Sağırılı, A.,** Transport Tekniği 2 Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi

EKLER

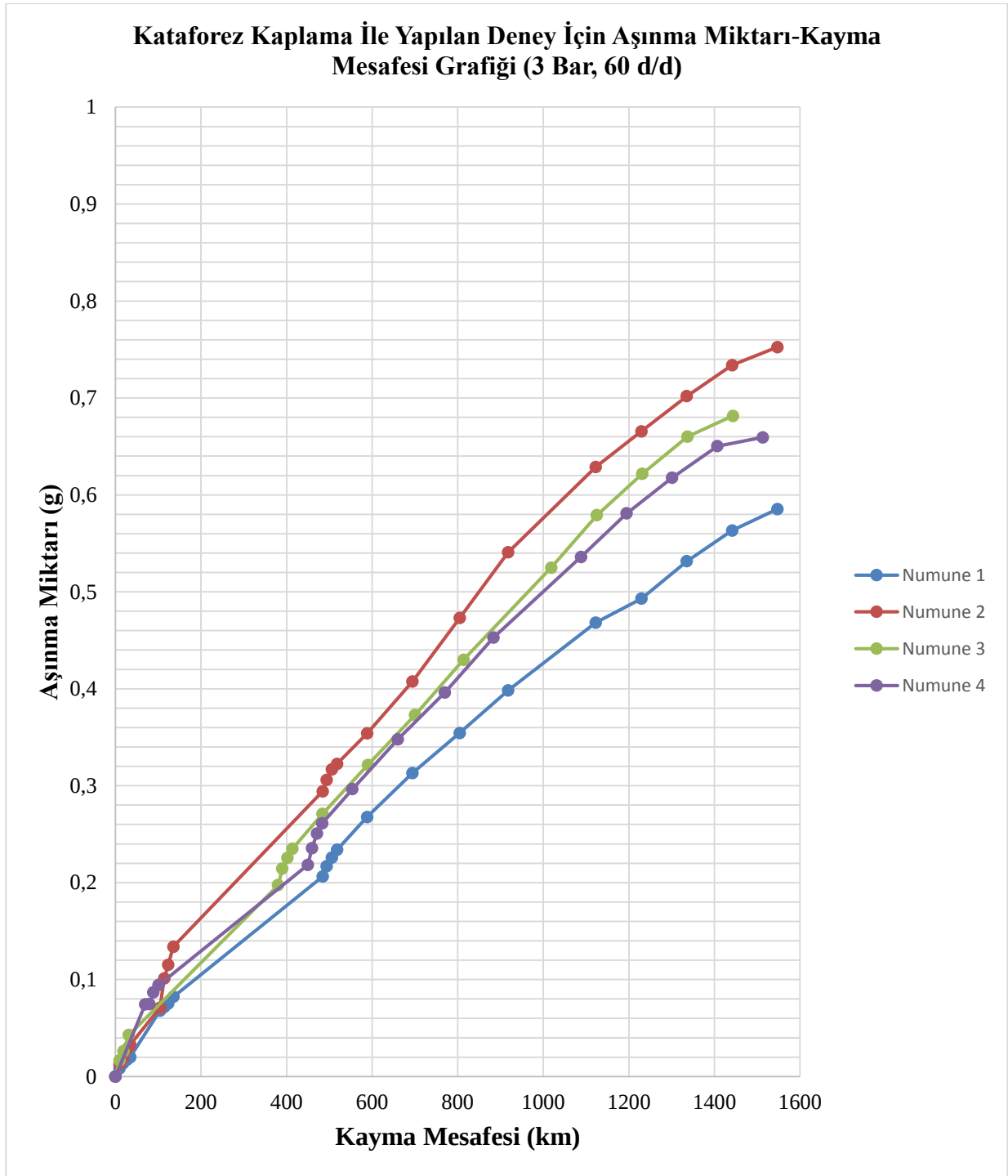
EK A: Grafikler



Şekil A.1 MoS₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların toz boya kaplama karşısında aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişimi

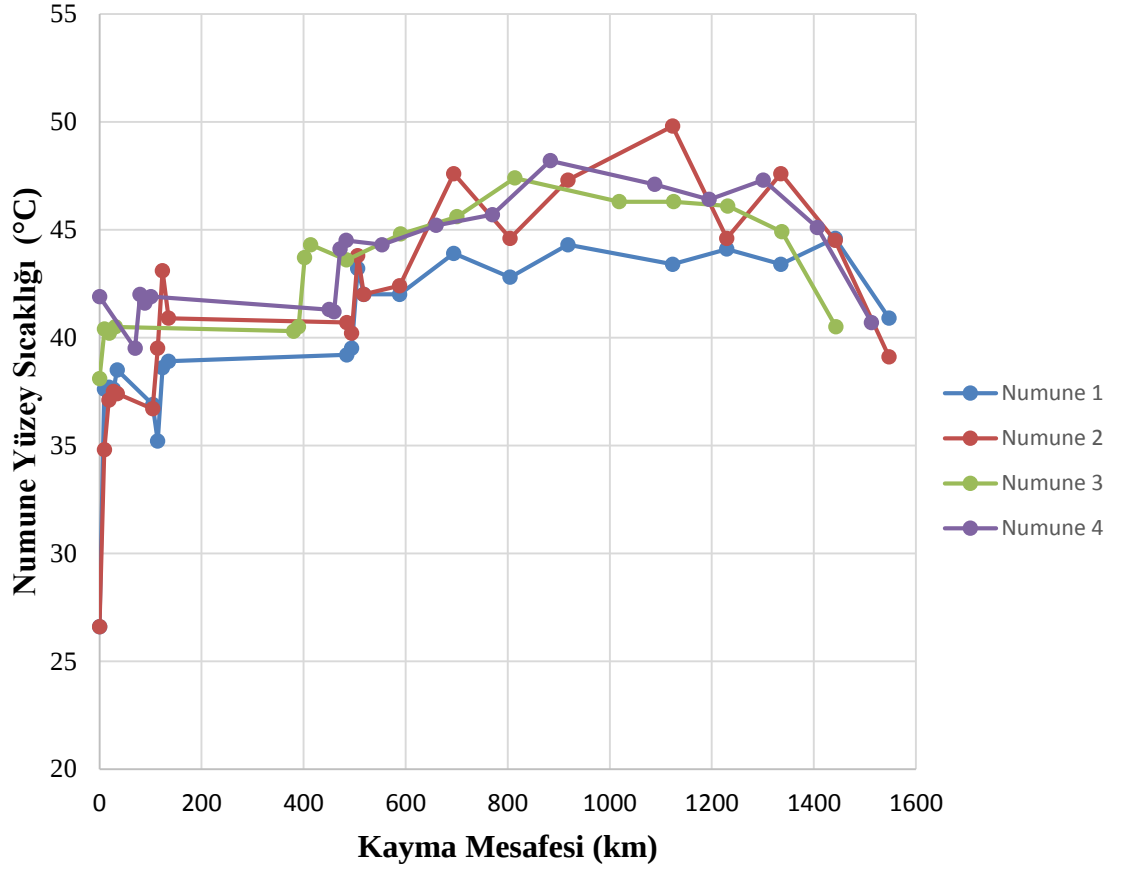


Şekil A.2 MoS₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların toz boya kaplama karşısında yüzey sıcaklığının kayma mesafesi ile değişimi



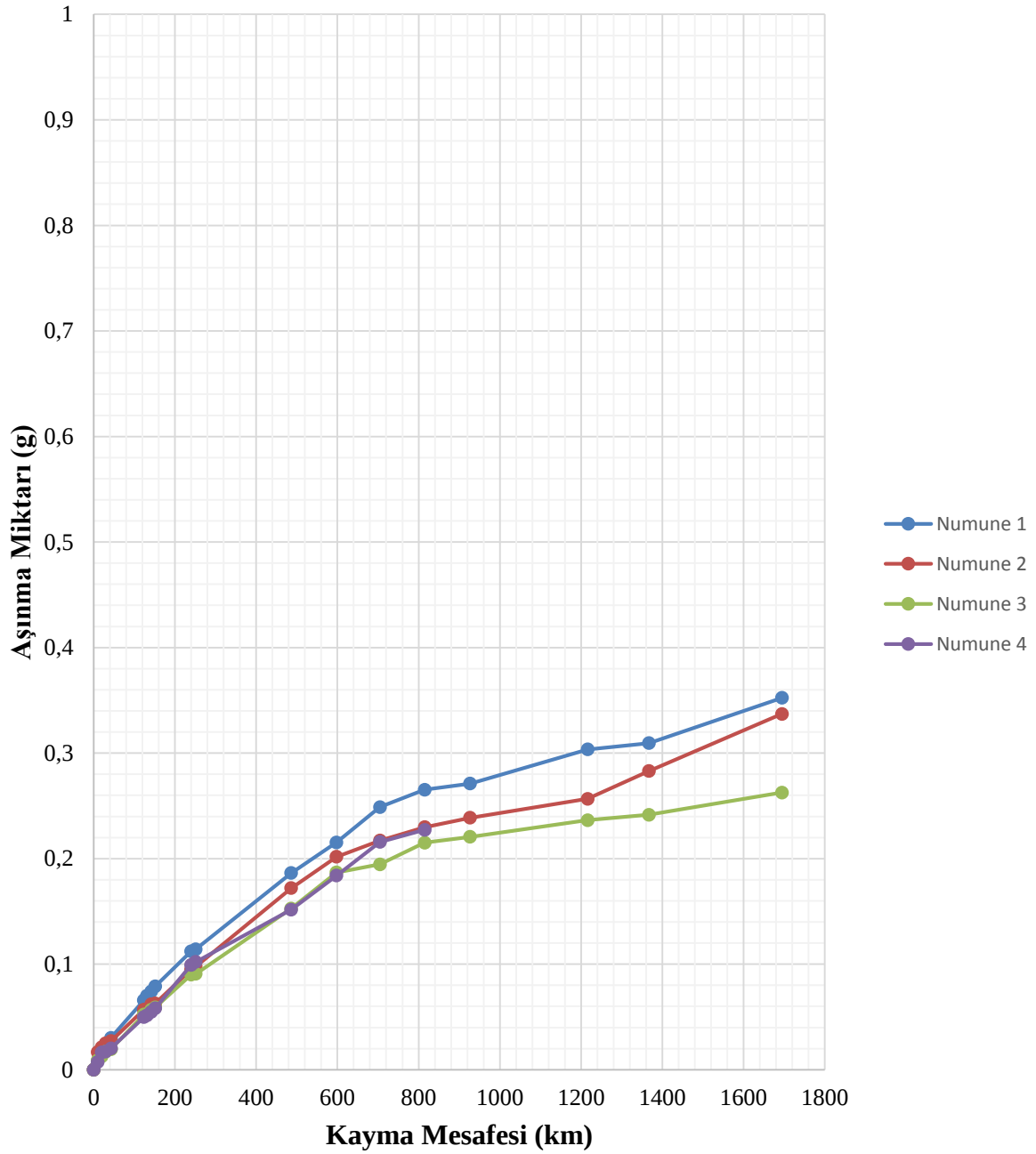
Şekil A.3 MoS₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların kataforez kaplama karşısında aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişimi

Kataforez Kaplama İle Yapılan Deney İçin Yüzey Sıcaklığı-Kayma Mesafesi Grafiği (3 bar, 60 d/d)

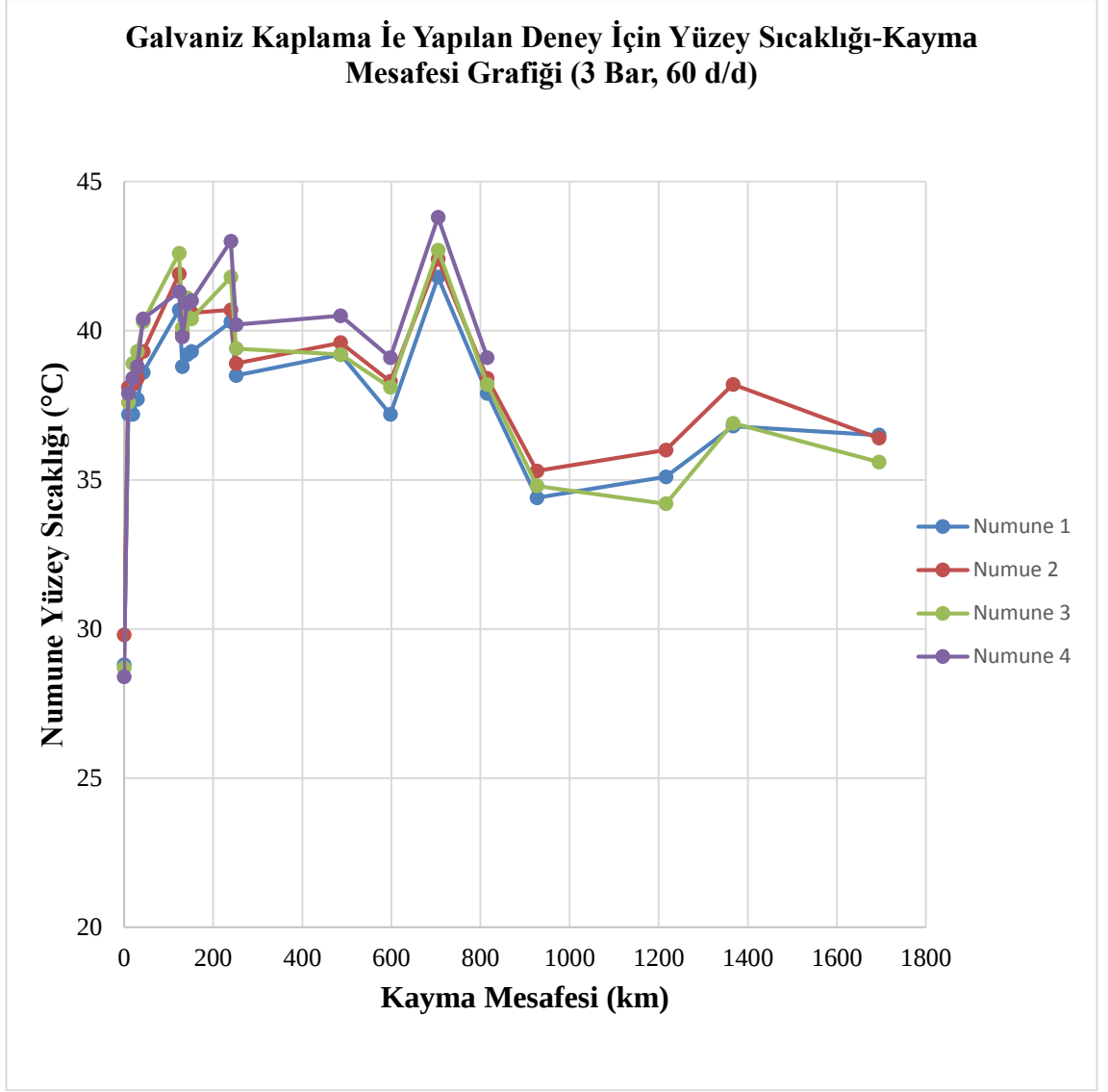


Şekil A.4 MoS₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların kataforez kaplama karşısında yüzey sıcaklığının kayma mesafesi ile değişimi

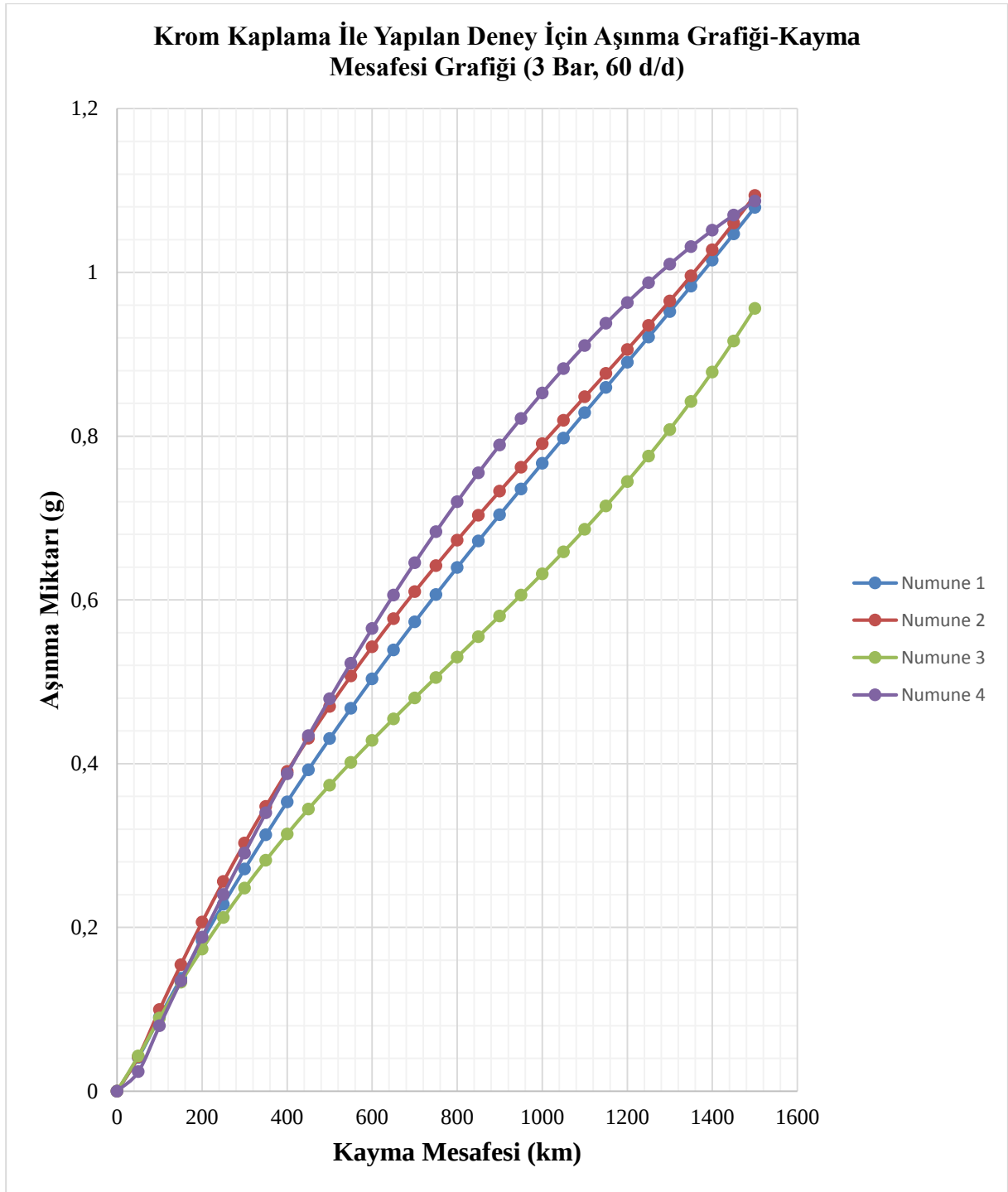
Galvaniz Kaplama İle Yapılan Deney İçin Aşınma Miktarı-Kayma Mesafesi Grafiği (3 Bar, 60 d/d)



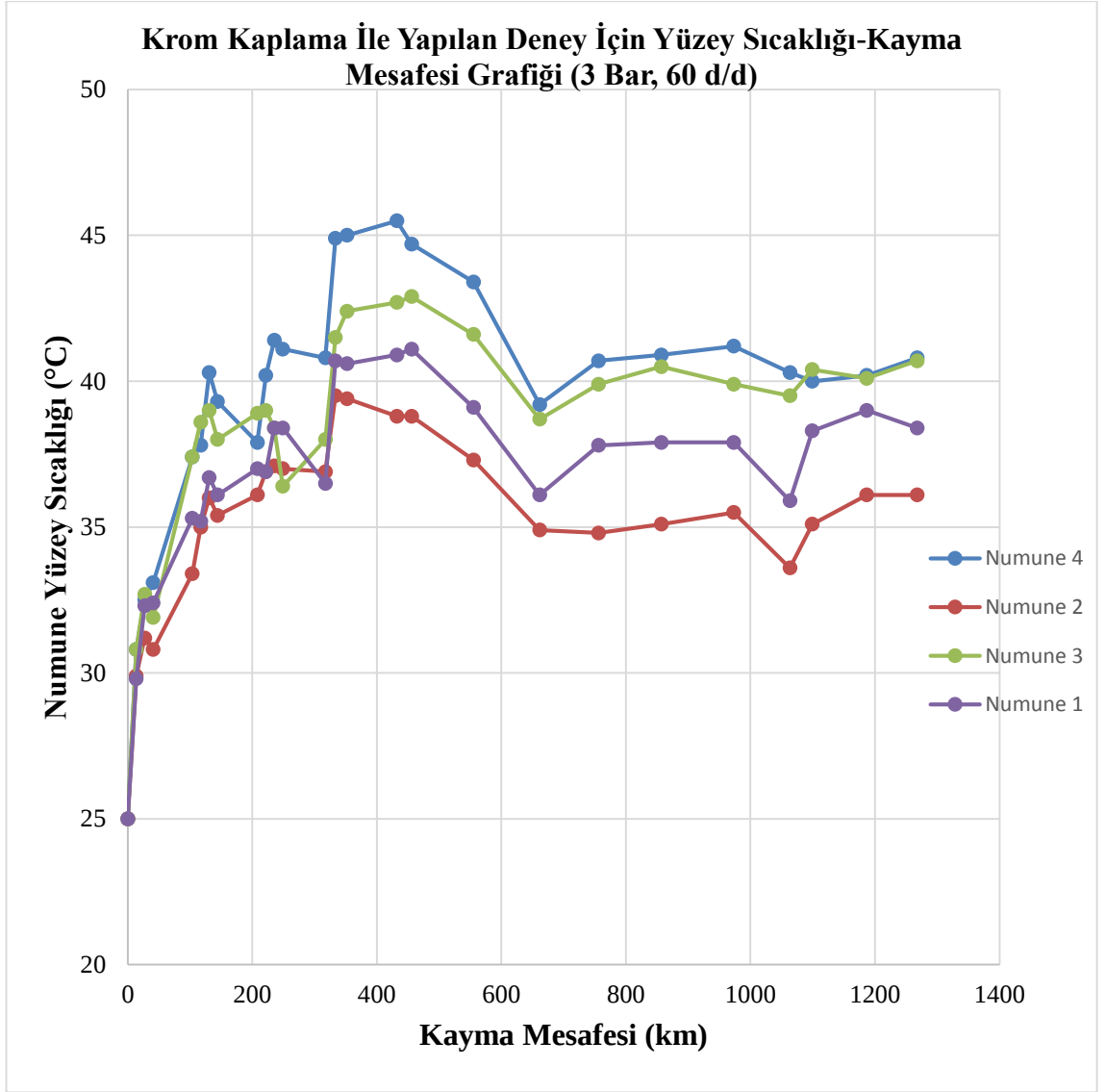
Şekil A.5 MoS₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların galvaniz kaplama karşısında aşınma miktarının kayma mesafesi ile değişimi



Şekil A.6 MoS₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların galvaniz kaplama karşısında yüzey sıcaklığının kayma mesafesi ile değişimi



Şekil A.7 MoS₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların krom kaplama karşısında aşınma miktarlarının kayma mesafesi ile değişimi



Şekil A.8 MoS₂ katkılı Pa 66'dan imal edilmiş makaraların krom kaplama karşısında yüzey sıcaklığının kayma mesafesi ile değişimi

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad : Hamit KENAN
Doğum Yeri ve Tarihi : İSTANBUL – 14.09.1988
E-Posta : hmtknn@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2006-2011, Uludağ Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği
2010-2011, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği (FARABI Değişim Programı)
- **Yüksek lisans** :2011-2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği, Konstrüksiyon Anabilim Dalı
2012-2013 Güz Dönemi, Minho Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Polimer Mühendisliği (ERASMUS Değişim Programı)

MESLEKİ DENEYİM:

- 2014 - , Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konstrüksiyon Anabilim Dalı Araştırma Görevlisi
- 2010, TOFAŞ (Proje Stajyeri)