İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ÜZERİNE UYGULANAN KOMPOZİT KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Fatih KILIÇ

Anabilim Dalı : METALURJİ ve MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

Programı : MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2006

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ALÜMİNYUM ÜZERİNE UYGULANAN KOMPOZİT KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. Müh. Fatih KILIÇ
(506031108)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 19 Aralık 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Şubat 2006

Tez Danışmanı : **Prof.Dr. E.Sabri KAYALI**

Diğer Jüri Üyeleri: **Prof.Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU (İTÜ)**

Prof.Dr. Mehmet KOZ (MÜ)

OCAK 2006

ÖNSÖZ

Çalışmam süresince ilgi ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen, tez danışmanım Sn. Prof. Dr. E. Sabri KAYALI'ya saygılarımla şükranlarımı sunarım.

Çalışmamla çok yakından alakadar olması ve beni sürekli yönlendirmesi sebebiyle Sn. Prof. Dr. Hüseyin ÇİMENOĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Bilgi ve tecrübelerini daima benimle paylaşan, bana yol gösteren ve çalışmamın her aşamasında emeği geçen Araş. Gör. Yük. Müh. Harun MİNDİVAN'a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, ilgi ve yardımlarından dolayı tüm mekanik metalurji laboratuvarı araştırma görevlilerine teşekkürlerimi sunarım.

Beni yetiştiren, bugünlere gelene dek maddi ve manevi hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve bu çalışma sırasında sürekli destekleyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Aralık 2005 Fatih KILIÇ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ **ii**
İÇİNDEKİLER **iii**
KISALTMALAR **v**
TABLO LİSTESİ **vi**
ŞEKİL LİSTESİ **vii**
SEMBOL LİSTESİ **x**
ÖZET **xi**
SUMMARY **xii**

1. GİRİŞ ve AMAÇ **1**

2. AŞINMA **2**
2.1. Aşınma Tanımı 2
2.2. Tribolojik Sistem 3
2.3. Aşınma Mekanizmaları 6
2.3.1. Adhesiv Aşınma 8
2.3.2. Abresiv Aşınma 12
2.3.3. Oymalı Sürtünme Abrosyon Aşınması 13
2.3.4. Yüksek Gerilmeli Abrasyon Aşınması 13
2.3.5. Düşük Gerilmeli Abrasyon Aşınması 14
2.3.6. Tribokimyasal Aşınma 15
2.3.7. Yorulma Aşınması 16
2.4. Malzeme Aşınmasının Genel Karakteristikleri 16
2.5. Aşınmayı Etkileyen Faktörler 17

3. ISIL PÜSKÜRTME **19**
3.1. Isıl Püskürtme Yöntemleri 26
3.1.1. Alev ile Püskürtme Yöntemi 27
3.1.2. Elektrik Ark Püskürtme Yöntemi 29
3.1.3. Patlatmalı Tabanca ile Püskürtme Yöntemi 31
3.1.4. Plazma Püskürtme Yöntemi 32
3.1.5. Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt ile Püskürtme Yöntemi (HVOF) 35

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **37**
4.1. Kaplama Prosesi 37
4.2. Kaplamaların Karakterizasyonu 37
4.3. Aşınma Deneyleri 38

5. DENEY SONUÇLARI VE İRDELENMESİ **39**
5.1. Kaplama Karakterizasyonu Sonuçları 39
5.2. Aşınma Deneyi Sonuçları 42
5.2.1. Kuru Ortam Aşınma Deneyleri Sonuçları 42
5.2.2. Sıvı Ortam Aşınma Deneyleri Sonuçları 47

6. GENEL SONUÇLAR **52**

KAYNAKLAR **53**

EKLER **57**

ÖZGEÇMİŞ **81**

KISALTMALAR

DIN	: Deutsces Institut für Normung (Alman Standartı)
TEM	: Taramalı Elektron Mikroskop
HVOF	: High Velocity Oxygen Fuel Thermal Spray Process (Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme Yöntemi)
HEP	: High Energy Plasma Spray Process (Yüksek Enerji Plazma Püskürtme Yöntemi)
APS	: Atmospheric Plasma Spray Process (Atmosferik Plazma Püskürtme Yöntemi)
VPS	: Vakuum Plasma Spray Process (Vakum Plazma Püskürtme Yöntemi)
LPP	: Low Pressure Plasma Spray Process (Düşük Başınç Altında Plazma Püskürtme Yöntemi)
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işınları Difraksiyon)

TABLOLİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1. Ticari ısıl püskürtme yöntemlerine ait bazı önemli özellikler.....27
Tablo 4.1. Kullanılan kaplama tozlarının toz karışım oranları.....37
Tablo 5.1. Kaplamaların mikroyapı bileşen oranları.....39
Tablo 5.2. Kuru sürtünme koşulları için Şekil 5.2'den hesaplanan aşınma hızı değerleri.....43
Tablo 5.3. Kuru sürtünme koşulları için % bağıl aşınma direnci.....43
Tablo 5.4. Kuru ortam sürtünme koşullarında yapılan aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin aşınma hızı değerleri 45
Tablo 5.5. Kuru ortam sürtünme koşullarında yapılan aşınma deneyleri sonucu kaplamalara ve kullanılan altlık malzemeye ait sürtünme katsayısı değerleri…….....46
Tablo 5.6. 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile kuru ortamda ve sıvı ortam içerisinde yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin kesit alanları 48
Tablo 5.7. 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile kuru ortamda ve sıvı ortam içerisinde yapılan aşınma deneylerinde kaplamaların % bağıl aşınma direnci …….49
Tablo 5.8. 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile kuru ortamda ve sıvı ortam içerisinde yapılan aşınma deneylerinde karşı malzemede oluşan aşınma iz alanları…….....…….....49
Tablo 5.9. 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile kuru ortamda ve sıvı ortam içerisinde yapılan aşınma deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.....…….....50
Tablo 5.10. Korozyon çözeltisi pH değişimi.....51
Tablo C.1. Kuru sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin ortalama boyutları ve alanları.....62
Tablo C.2. Kuru sürtünme koşullarında çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin ortalama boyutları ve alanları.....63
Tablo E.1. Kuru ortam aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerde oluşan aşınma miktarı.....65

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Bir tribolojik sistemin elemanları....4
Şekil 2.2 : (a) Tribosistemin genel "giriş-çıkış" tanımı. (b) Krank-Biyel mekanizmasında tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi....5
Şekil 2.3 : Aşınma modelleri ile aşınma yöntemlerinin sınıflandırılması....6
Şekil 2.4 : Yüzey mikroyapısı 7
Şekil 2.5 : Dört esas aşınma mekanizmasının şematik olarak gösterilmesi 8
Şekil 2.6 : Metallerin teması sonucunda oluşan kaynak bağları (a) Soğuk kaynak (b) Sıcak kaynak....9
Şekil 2.7 : Yüzeyler arasındaki bağların ayrılması....10
Şekil 2.8 : Aşınma oranı-yük ve aşınma oranı-hız arasındaki ilişki....10
Şekil 2.9 : Abrasiv aşınmanın türleri....12
Şekil 2.10 : Abrasiv aşınma kaybı modeli....14
Şekil 2.11 : Tribokimyasal aşınmanın oluşum mekanizması....16
Şekil 3.1 : Isıl püskürtme kaplama işleminin şematik gösterimi....20
Şekil 3.2 : Isıl pürkürtme kaplama tabakasının şematik gösterimi....21
Şekil 3.3 : Isıl püskürtme tabakasının oluşumu....21
Şekil 3.4 : Isıl püskürtülmüş kaplamanın şematik kesit görüntüsü....22
Şekil 3.5 : Ergimiş partikülün katılaşma esnasındali şekil değişimi ve parçalanarak dağılması....22
Şekil 3.6 : Partikül hızının etkisi çarpma hızı (a) 86 m/s (b) 172 m/s....23
Şekil 3.7 : Taramalı elektron mikroskobunda (TEM) plazma püskürtme yöntemiyle tungsten kaplamanın kesit görünümü. (a) Lameler mikroyapı (b) Damlacıkla oluşan sütunsal tane yapısının görünümü....23
Şekil 3.8 : Plazma jetinin geometrisi ve sıcaklık dağılımı....23
Şekil 3.9 : Isıl püskürtme yöntemleri....27
Şekil 3.10 : Toz alev püskürtme tabancası....28
Şekil 3.11 : Tel veya çubuk püskürtme tabancası....28
Şekil 3.12 : Elektrik ark püskürtme işleminin şematik görünümü....30
Şekil 3.13 : Elektrik ark püskürtme tabancası....30
Şekil 3.14 : Patlatmalı tabanca ile püskürtme yönteminin şematik görünümü....31
Şekil 3.15 : Plazma püskürtme yöntemi ile kaplamanın şematik görünümü....32
Şekil 3.16 : Plazma püskürtme sisteminin bileşenlerinin şematik gösterimi....34
Şekil 3.17 : HVOF ile kaplamanın şematik görünümü....36
Şekil 4.1 : Salınım hareketli (reciprocating) aşınma deney cihazının şematik görünümü....38
Şekil 5.1 : XRD sonuçları....40
Şekil 5.2 : (a) 1 (b) 2 (c) 3 (d) 4 (e) 5 nolu kaplamaların optik mikroskop kesit görüntüleri....41
Şekil 5.3 : Kuru sürtünme koşullarında (a) Al_2O_3 ve (b) Çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin kesit alanının deney yükü ile değişimi....42

Şekil 5.4 : Kuru sürtünme koşullarında (a) Al_2O_3 ve (b) Çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, karşı malzeme yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin kesit alanının deney yükü ile değişimi.....45
Şekil A.1 : Optik mikroskop kesit görüntüleri. Kaplama no; (a) 1 (b) 2 (c) 3 (d) 4 (e) 5 (f) 1 (g) 2 (h) 3 (i) 4 (j) 5.....57
Şekil B.1 : Kuru sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu görünümü.....58
Şekil B.2 : Kuru sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin üç boyutlu görünümü.....59
Şekil B.3 : Kuru sürtünme koşullarında çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu görünümü.....60
Şekil B.4 : Kuru sürtünme koşullarında çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin üç boyutlu görünümü.....61
Şekil D.1 : Kuru ortam aşınma deneyi karşı malzeme olarak kullanılan bilyelerin aşınma yüzeyleri görüntüleri (a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5 (g) 2014-T6 (h) 1 (i) 2 (j) 3 (k) 4 (l) 5.....64
Şekil F.1 : 1 nolu kaplamada sürtünme katsayısının deney süresince değişimi (a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 0,5N (f) 1N (g) 1,5N (h) 1,5N.....66
Şekil F.2 : 2 nolu kaplamada sürtünme katsayısının deney süresince değişimi (a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 0,5N (f) 1N (g) 1,5N (h) 1,5N…...67
Şekil F.3 : 3 nolu kaplamada sürtünme katsayısının deney süresince değişimi (a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 1N (f) 1,5N (g) 2N.....68
Şekil F.4 : 5 nolu kaplamada sürtünme katsayısının deney süresince değişimi (a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 0,5N (f) 1N (g) 1,5N (h) 1,5N.....69
Şekil F.5 : 5 nolu kaplamada sürtünme katsayısının deney süresince değişimi (a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 0,5N (f) 1N (g) 1,5N (h) 1,5N.....70
Şekil F.6 : 2014-T6 altlık malzemede sürtünme katsayısının deney süresince değişimi (a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 0,5N (f) 1N (g) 1,5N (h) 1,5N.....71
Şekil G.1 : HCl çözeltisi içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu görünümü. (a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5.....72
Şekil G.2 : HCl çözeltisi içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin üç boyutlu görünümü.(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5.....73
Şekil G.3 : H_2O_2 çözeltisi içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu görünümü (a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5.....74
Şekil G.4 : H_2O_2 çözeltisi içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin üç boyutlu görünümü.(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5.....75
Şekil G.5 : Saf su içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki ve üç boyutlu görünümü.....76

Şekil H.1 **:** Sıvı ortam içerisinde aşınma deneyi karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzeyleri görüntüleri (a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5 (g) 2014-T6 (h) 1 (i) 2 (j) 3 (k) 4 (l) 5…….....…..77
Şekil I.1 **:** Korozif HCl çözeltisi içerisinde sürtünme katsayısının deney süresince değişimi (a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5.....78
Şekil I.2 **:** Korozif H_2O_2 çözeltisi içerisinde sürtünme katsayısının deney süresince değişimi (a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5 ……...79
Şekil I.3 **:** Saf su içerisinde sürtünme katsayısının deney süresince değişimi (a) 2014-T6 (b) 3 (c) 5.....80

SEMBOLLER

V	: Aşınana Malzeme Hacmi
k	: Malzemeye Bağlı Aşınma Katsayısı
W	: Normal Yük
H	: Aşınan Malzemenin Sertliği
L	: Kayma Yolu

ALÜMİNYUM ÜZERİNE UYGULANAN KOMPOZİT KAPLAMALARIN AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Düşük mukavemet / ağırlık oranları nedeniyle hafif endüstriyel ürünler içerisinde, özellikle otomobil ve hızlı taşıma sistemlerinde önemli bir yere sahip olan alüminyum alaşımlarının aşınma direncinin düşük olması bu malzemelerin daha yaygın kullanımını sınırlamaktadır. Aluminyum alaşımlarının Al_2O_3 ve SiC gibi partiküllerle takviye edilmesi (aluminyum matrisli kompozit), sertlik ve mukavemetin yanı sıra üstün aşınma direncini de önemli oranda artırmaktadır.

Bu çalışma, 2014-T6 kalite alüminyum alaşımının yüzeyinin ısıl püskürtme yöntemi ile aluminyum matrisli partikül takviyeli kompozit ile kaplanarak aşınma direncinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda plazma ve alev püskürtme yöntemleriyle uygulanan, mikroyapılarında SiC, MoO, ve B_4C partikülleri bulunan Al-12Si matrisli ortalama 450 μm kalınlığındaki kompozit kaplamaların kuru kayma koşullarında ve iki farklı korozyon çözeltisi içerisindeki aşınma davranışları incelenmiştir. Aşınma deneyleri salınım hareketli karşı yüklemeli (reciprocating) aşınma test cihazında gerçekleştirilmiş olup, aşındırıcı olarak seramik (Al_2O_3) ve çelik (AISI 52100) toplar kullanılmıştır.

Altlık malzeme ile kıyaslandığında plazma püskürtme yöntemi ile uygulanmış olan SiC takviyeli kompozit kaplamalar yüksek, alevle püskürtme yöntemi ile uygulanmış olan B_4C takviyeli kompozit kaplamalar ise daha düşük sertliğe sahiptir. Kuru ortamda yapılan aşınma deneylerinde; en yüksek aşınma direnci, sertliği en yüksek olan SiC takviyeli kompozit kaplamada görülmüştür. B_4C takviyeli kompozit kaplamaların sertliği altlık malzemeye göre çok düşük olmasına rağmen aşınma dirençleri altlık malzemeden daha yüksektir. SiC takviyeli kompozit kaplamalar, H_2O_2 çözeltisi içerisinde HCl çözeltisine nazaran daha yüksek korozif aşınma direnci sergilemiştir. B_4C takviyeli kompozit kaplamalrın H_2O_2 çözeltisi içerisinde korozif aşınma direnci HCl çözeltisinden daha düşüktür.

INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOUR OF COMPOSITE COATINGS DEPOSITED ON ALUMINIUM

SUMMARY

Low wear resistance restricts the use of aluminum alloys which are widely used especially in automobile and fast transportation industries due to the their low strength/weight. Al_2O_3 and SiC particle reinforced aluminum matrix composites have higher hardness, strength and wear the resistance when compared to aluminum alloys.

This study aims to investigate the wear behaviour of particle reinforced aluminum matrix composites coated on the surface of the 2014-T6 aluminum substrate by thermal spray technique. The composite coatings having a average thichness of 450μm consist of Al-12Si, SiC, MoO and B_4C particles. The present study discusses wear behaviour of composite coatings sliding against Al_2O_3 and AISI 52100 steel balls under the dry sliding condition and in two different corrosion solutions using a reciprocating wear tester.

When compared to the 2014-T6 aluminum substrate, SiC reinforced composite coating produced by plasma spray technique has higher hardness, and B_4C reinforced composite coating obtained by flame spray technique has lower hardness. SiC reinforced composite coating which have the highest hardness values, showed the highest wear resistance under the dry sliding conditions. B_4C reinforced coating having the lowest hardness showed better wear resistance than the 2014-T6 aluminum substrate. SiC reinforced composite coatings showed higher wear resistance in H_2O_2 solution when compared to HCl solution. B_4C reinforced composite coatings showed lower wear resistance in H_2O_2 solution when compared to HCl solution.

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Alüminyum ve alaşımları, yüksek mukavemet/ağırlık oranı, yüksek elektrik ve termal iletkenlik ve mükemmel korozyon direnci gibi özellikleri nedeniyle kimya, otomobil ve havacılık endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Ancak, sertlik ve mukavemetlerinin düşük olması bu malzemelerin tribolojik uygulamalardaki kullanımını sınırlamaktadır. Aluminyum ve alaşımlarına çeliklerde olduğu gibi difüzyonlu sertleştirme yöntemleri (karbürleme, nitrürleme) uygulamak mümkün olmasa da sert anodizasyon, elekrokaplama ve fiziksel buhar biriktirme gibi çeşitli yüzey işlemleri ile aşınma direncinin geliştirmeye yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Ancak oluşturulan ince yüzey tabakası özellikle yüksek yüklerde kolayca kırılmakta ve aşınma direncine olumlu katkı sağlayamamaktadır.

Malzemelerin aşınma direncini geliştirmek amacıyla 20.yy'nin başından beri kullanılmakta olan bir diğer yüzey işlemi ise ısıl püskürtmedir. Bu yöntemin esası; toz, tel veya çubuk halindeki kaplama malzemesinin ergiyik yada kısmi ergiyik duruma getirilerek, kaplanacak yüzeye olabildiğince hızlı bir şekilde püskürtülmesine dayanır. Bu yöntemle malzeme yüzeyinde kalın sert kaplamalar oluşturulmakta ve hafif metal ve alaşımlarının aşınma direncinin geliştirilmesinde ince kaplamalara nazaran daha başarılı sonuçlar elde edilmektedir.

Bu çalışmada yaygın bir kullanım alanına sahip olan 2014 kalite alüminyum alaşımının aşınma direncine, ısıl püskürtme yöntemi ile uygulanan kaplamaların etkisi, kuru ortam ve iki farklı korozyon çözeltisi (HCl çözeltisi ve H_2O_2 çözeltisi) içerisinde incelenmiştir.

2. AŞINMA

2.1 Aşınma Tanımı

Teorik olarak incelemiş olduğumuz sürtünmeden dolayı oluşan aşınma, tüm endüstri kollarında çok önemli bir tehlike olarak karşımıza çıkmaktadır. Eğer zamanında ve sistematik önlemler alınmaz ise çok pahalıya mal olabilecek sonuçlar görülebilir [1].

Aşınma olayı çok karmaşık olmasından dolayı günümüze kadar birçok tanımı yapılmıştır. Temel olarak mekanik hareket sonucu katı bir yüzeyden malzeme kaybıdır. Malzemeden ayrılan parçaların miktarı, aşınma prosesinin karakteristik özelliğidir [2].

Alman Standardı DIN 50320'ye göre aşınma, "katı, sıvı veya gaz karşı cisme göre izafi hareket ve temas şeklinde mekanik bir etkiden dolayı katı bir cismin yüzeyinde malzemenin ileri derecede istenilmeyen kaybı" [3] olarak tanımlanır.

Misra ve Finnie [4] ise aşınmayı mekanik etkileşimler sonucunda katı bir yüzeyden malzeme kaldırılması şeklinde ifade ederek malzeme kaldırılmasının kimyasal etkenlerle de olabileceğini belirtmiştir.

Bu tanımlara göre, yüzeylerin taşlanması, parlatılması veya mekanik parçaların ayrıştırılmasını aşınma olayı olarak incelememek gerekir, zira bu olaylardaki yüzey değişikliği arzu edilen bir işleme olayıdır. Kimyasal, termik, elektriksel veya fiziki nedenlerle eksilme veya yüzeyden büyük parçaların kırılarak ayrılması da aşınma olayı olarak düşünülmektedir [5].

Aşınma olayının meydana gelebilmesi için aşağıdaki şartların oluşması gereklidir.

- Mekanik bir etkinin olması
- Sürtünme olması (izafi hareket)
- Yavaş ancak devamlı olması
- Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi
- İstenmediği halde meydana gelmesi [1]

Bu şartlardan birini sağlamayan yıpranma olayı (örneğin genel korozyon) aşınma olarak ifade edilmemelidir. Çünkü korozyon, diğer bütün şartları sağlamasına rağmen sürtünme ve mekanik hareket olmaksızın (sadece kimyasal ve elektrokimyasal etki ile) meydana gelmektedir. Ancak sürtünme sırasında aşınmanın karakterine etki eden faktörlerden biriside çevredir. Çevre şartlarına bağlı olarak aşınmanın karakteri de değişebilir. Mekanik etki ile birlikte kimyasal veya elektrokimyasal etki ile de malzeme yüzeyinden mikro tanecikler kopar veya yüzey bölgesi değişikliğe uğrar. Böyle durumlarda,hem sürtünme ve hem de korozyon birlikte tahribata neden olabilirler. Sürtünmeyle müşterek olarak kimyasal etkilerle meydana gelen korozyon aşınma kapsamına alınmalıdır. Nitekim,korozif etkenlerle bile olsa tribolojik zorlanma sırasında meydana gelen yüzey bölgesi değişiklikleri veya parçacıkların kopması, aşınma kavramı içinde düşünülmelidir [6].

Haddeleme veya dövme sırasında yüzeyden ince tabakaların kalkması "yavaş" olma şartını sağlamadığından aşınma sayılmaz. Talaşlı şekillendirme veya alıştırma kapsamına aldığımız ve aşınma esasına dayanarak yaptığımız; taşlama, honlama, raspalama ve eğeleme gibi işlemler "yavaş" olmadıkları gibi isteyerek yaptığımız aşınmalardır [6].

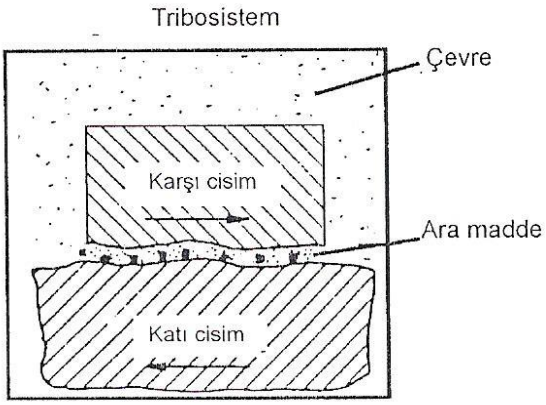
2.2 Tribolojik Sistem

Triboloji "bir izafi hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği" olarak tanımlanır. Triboloji, aşınma problemlerinin çözümü ile ilgilenen ve malzeme bilimi, kimya, fizik ve mühendislik bilimleri gibi çeşitli bilim dallarını içeren bir bilimdir [25].

Aşınmayı, aşınmaya etki eden faktörlerin bileşik etkilerini dikkate alarak incelemek gerekir. Yani aşınma bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır. Aşınma özelliği veya mukavemeti, sertlik veya çekme mukavemeti gibi spesifik bir malzeme özelliği değil bir sistem özelliğidir [6]. Bu sisteme tribolojik sistem denilmektedir. Aşağıda bir tribolojik sistemin ana elemanları görülmektedir (Şekil2.1).

Aşınma hızı veya direnci ve sürtünme katsayısı; sertlik ve çekme mukavemeti gibi bir malzeme özelliği olmayıp tribosistem özelliğine bağlı olarak değişir. Sürtünme, harekete karşı direnci ifade eder ve katı cisimlerde gerçek temas alanlarının iç

etkileşimleri sonucunda artar. Sürtünme büyük enerji kayıplarına neden olurken aşınma büyük malzeme kayıplarına neden olmaktadır [7].



Şekil 2.1. Bir tribolojik sistemin elemanları [6]

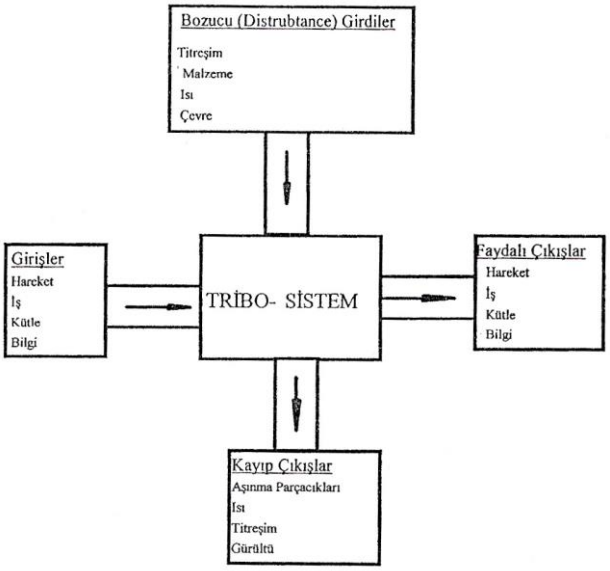
Aşınma olayında beş parametre gözlenir:

- Ana malzeme (aşınan)
- Aşındıran
- Ara malzeme
- Hareket
- Yük

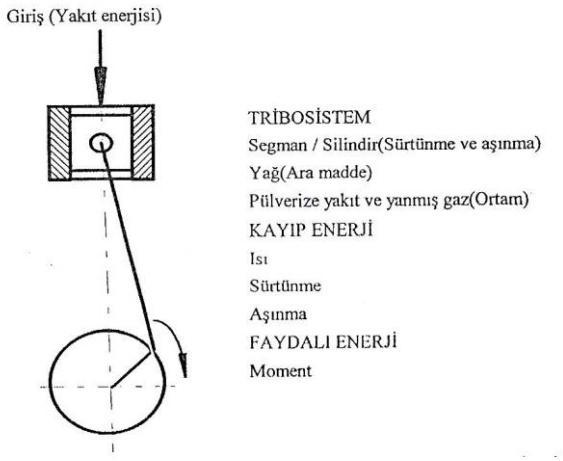
Aşınma çiftini oluşturan ana cisim ve karşı cisim aralarında belirli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Sistemi medya getiren elemanlardan ana malzeme metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisimdir. Aşındıran (karşı eleman) eleman katı, sıvı veya gaz halinde olabilir. Bu iki eleman tribolojik sistemi meydana getirmede yeterli olabilirlerse de çevre etkisi sistemde her zaman olacağından tam "kuru sürtünme" sağlanamaz. Çünkü sürtünme sırasında ara madde olabileceği gibi çok iyi temizlenmeyen yüzeylerde yağlayıcı özellik gösteren ara maddeler olabilir. Ara madde ise katı, sıvı, gaz fazlarından birinde veya bunların karışımı şeklinde olabilir. Hareket kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi biçimlerde olabilir.

Yük ise gerilmenin az veya çok olmasının yanı sıra sabit, değişken, artan, azalan ve darbeli olabilir [1,6,8,9].

Tribosistemi etkileyen bu faktörlerden yük ve hareket, sisteme giren enerjilerdir. Giriş faktörlerinin enerjisi, sistemde faydalı ve kayıp enerjiye dönüştürülür. Giriş ve çıkış enerjileri arasındaki fark ise özellikle sürtünme ve aşınma ile mekanik titreşimler, ısı ve ses şeklinde kayıp büyüklüklerini oluşturan enerjiye dönüşür. Bu durum Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



(a)



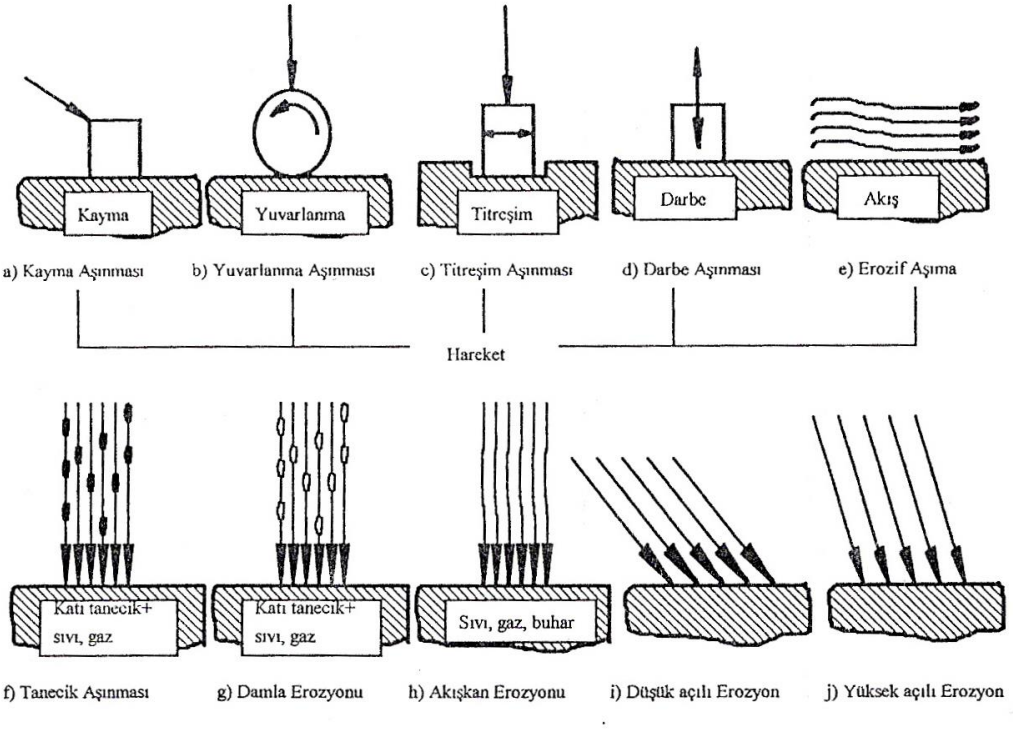
(b)

Şekil 2.2. (a) Tribosistemin genel "giriş-çıkış" tanımı. (b) Krank-Biyel mekanizmasında tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi [6]

2.3 Aşınma Mekanizmaları

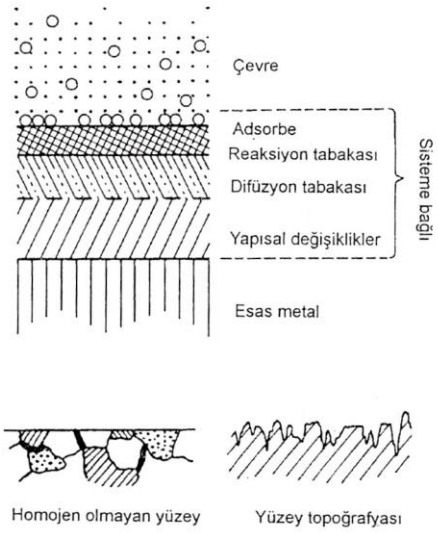
Bir tribosistemin, parametrelerine bağlı olarak farklı aşınma mekanizmaları oluşabilir. Aşınma mekanizmasını, bir tribosistemin elemanları arasında malzeme ve enerji etkileşimi olarak tanımlayabiliriz. Birbirleri ile temasta olan katı yüzeyler, oksit filmler ve sınır yağlayıcıları ile korunsalar bile mekanik yüklemeler altında oksit film tabakasının parçalanması nedeni ile, katı-katı temas meydana gelir. Bu temas aşınmaya sebep olur ve bunun sonucunda da malzeme kaybı oluşur [7].

Tribosistemdeki elemanların birbiri ile olan etkileşimleri veya elemanlar üzerine olan etkileri çok değişik olabilir. Esas sürtünme elemanı üzerine olan etkiler; kayma, yuvarlanma, titreşim ve akma şeklinde olabilir (Şekil 2.3). Dolayısı ile aşınma işlemleri de kayma aşınması,yuvarlanma aşınması,titreşim aşınması ve erozif aşınma şeklinde sınıflandırılabilir. Aşınma işlemlerinin diğer bir sınıflandırması da karşı elemanın fiziksel durumunu içermektedir. Karşı eleman,esas sürtünme elemanına katı veya sıvı olarak değişik açılarda etki edebilir [10].



Şekil 2.3. Aşınma modelleri ile aşınma yöntemlerinin sınıflandırılması [10]

Sürtünme ve aşınma, hareketli parçaların yüzeylerinde meydana gelmektedir. Dolayısı ile yüzeyler bütün etkileşimlerin ana bölgesi şeklinde önemli bir rol oynamaktadır. Bütün katı yüzeyler mikro ölçekte incelendiğinde ideal olarak süreksiz biçimde değildir. (Şekil 2.4)



Şekil 2.4. Yüzey mikroyapısı [11]

Yüzeyin boyuna kesiti incelendiğinde; talaş kaldırma işlemlerinden dolayı yapısal değişimlerin oluştuğu tabakalar ortaya çıkmaktadır. Bu değişim tabakaları malzemenin yapısına ve işlenmesine bağlıdır. Özellikle, ısıl işlem veya yüksek çalışma sıcaklıklarından sonra elementlerin içeriye ve dışarıya doğru yayıldığı difüzyon tabakası, reaksiyon tabakası ile aralarında bağlantısı olan tabakalardır.

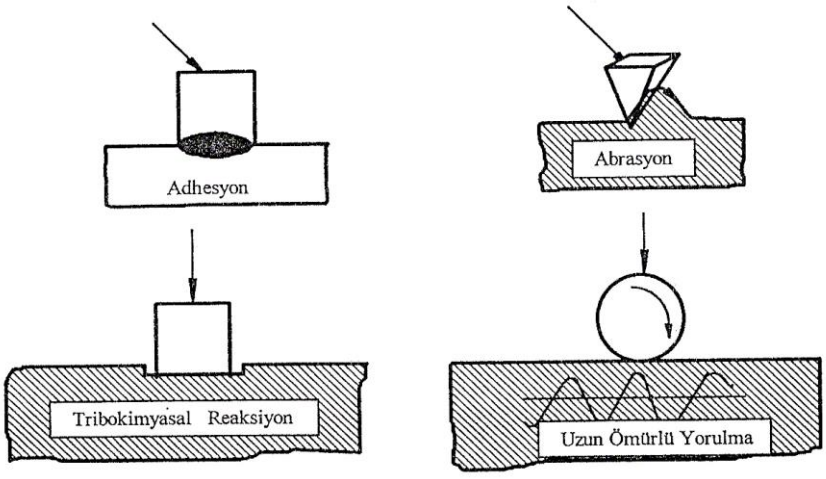
Yüzeyin enine kesitinde ise, farklı fazlar ve/veya faklı tane yönleri şeklinde heterojen bir yapı ve pürüzlü veya dalgalı biçimde yüzey topografyası görülmektedir[12].

Aşınmanın başlaması ve devamı için gerekli giriş büyüklüklerinin tribolojik sistem içerisinde yaptığı etkinin iletilmesine göre farklı aşınma mekanizmaları ortaya çıkmaktadır. Bazı araştırmacılar yenme, erozyon, korozyon, yüzey yorulması, kavitasyon, oksidasyon gibi aşınma mekanizmalarını içerecek şekilde farklı gruplandırma yapmışlardır. Ayrıca aşınma işlemleri, aşınma izinin görünüşüne göre, malzeme kaldırılmasının veya hasarın meydana geldiği fiziksel mekanizmaya göre aşınmanın gerçekleştiği koşullara göre üç ayrı grupta da sınıflandırılabilirler. Aşınma izi görünüşü çukurlanma, pullanma, çizilme, parlama, oyulma, kemirilme ve kazıma şeklinde olabilir. Aşınmanın gerçekleştiği fiziksel mekanizma adhezyon, abrazyon ve

oksitlenme şeklinde olabilir. Aşınma ortamı da yağlı aşınma, yağsız aşınma, metal-metal kayma aşınması, yuvarlanma aşınması, yüksek gerilmeli kayma aşınması ve yüksek sıcaklık metalik aşınma şeklinde sınıflandırılabilir. DIN 50320'ye göre dört esas aşınma olduğu kabul edilmektedir [12].

- Adhesiv Aşınma (yapışkan)
- Abrazif Aşınma
- Tribokimyasal Aşınma
- Yorulma Aşınması

Bu aşınma mekanizmaları Şekil 2.5'de şematik olarak gösterilmiştir.



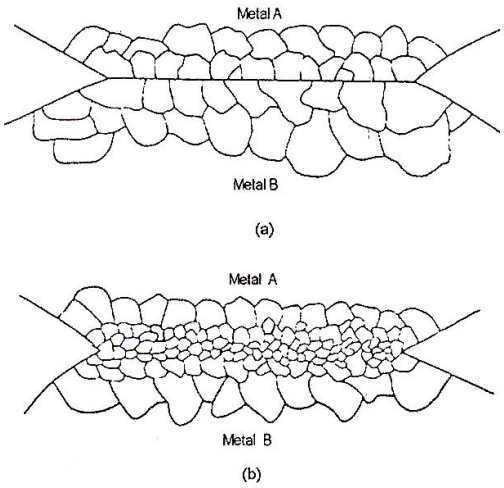
Şekil 2.5. Dört esas aşınma mekanizmasının şematik olarak gösterilmesi [10].

2.3.1 Adhesiv Aşınma

Adhesiv aşınma, birbiri ile kayma sürtünmesi yapan metal-metal aşınma çiftinde oluşan basınç kaynağının (kaynama veya yenme aşınması) bir sonucudur. Birbiri ile temasta bulunan benzer kafes yapılı iki metalik yüzey arasında adhezyon adı verilen bir çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvveti oluşturabilmek için malzemelerin moleküllerini birbirine çok yaklaştırmak gerekmektedir. Temas halindeki iki metal, yüzeylerindeki pürüzler vasıtasıyla etkileşirler [7].

Adhezyon teorisine göre temas halindeki yüzeylerde temas noktalarındaki bölgesel basınçların çok yüksek olması dolayısı ile, küçük kaynak bağları teşekkül eder (soğuk kaynama) (Şekil 2.6.a). Kayma halinde yüksek bölgesel basınçlara ilaveten

sürtünme ısısı ile bu bölgelerde sıcaklığın yükselmesi kaynak bağlarının teşekkülünü kolaylaştırır (sıcak kaynama) (Şekil 2.6.b) [2].

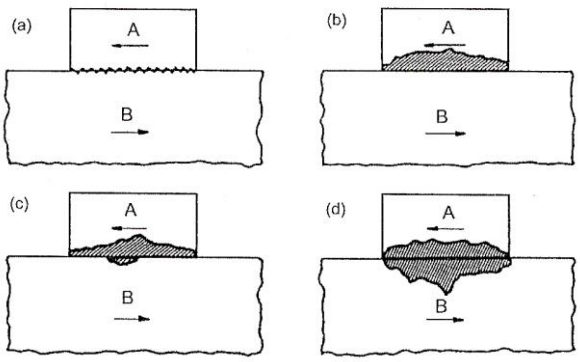


Şekil 2.6. Metallerin teması sonucunda oluşan kaynak bağları [2]
a) Soğuk kaynak b) Sıcak kaynak

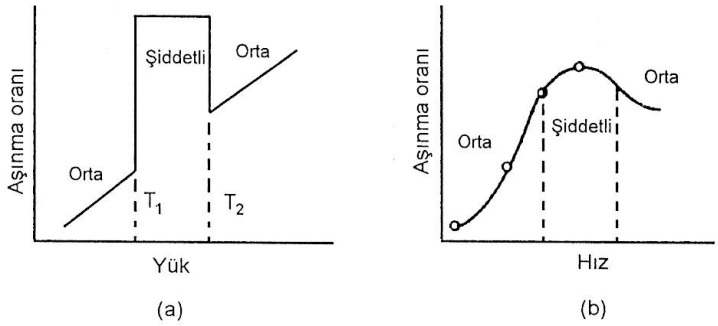
Karşılıklı çalışan yüzeyler ne kadar hassas işlenirse işlensin moleküler düzgünlükte değildirler. Böyle teknik düzgünlükteki yüzeylerde görünüşteki temas alanından çok daha az olan gerçek değme noktalarında, taşınmakta olan yükün etkisi ile malzemenin akma sınırı aşılmakta ve gerçek temas alanı bu yükü taşıyabilecek genişliğe ulaşıncaya kadar artmaktadır.

Kaynak bağları oluşmuş yüzeylerin ayrılmaları Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Bölgesel bağlantıların kayma mukavemeti bağlantıyı oluşturan malzemelerin kayma mukavemetinden düşük ise temastaki yüzeyler birbirinden ara yüzeylerde ayrılır (Şekil 2.7.a). Bu durum yüzeylerin yapışmasını azaltan rutubet, yağ, oksit filmi ile kapsamına durumunda oluşur. Ancak A malzemesinde meydana gelir (Şekil 2.7.b). Yüksek mukavemetli bölgesel bağlarda ise yine A malzemesinin kayma mukavemeti B malzemesininkinden küçük ise ayrılma çoğunlukla A malzemesinden olur (Şekil 2.7.c). Eğer malzemeler aynı veya eşit özelliklerde ise ayrılma her iki yüzeyden de eşit olur (Şekil 2.7.d).

Adhezif aşınma orta ve şiddetli aşınma şeklinde iki gruba ayrılır. Aşınma ile oluşan hasar kayma hızı ve yük ile artarken sıcaklıktaki artış ile iyileşecektir (Şekil 2.8). Kayma hızındaki artış aynı anda zamanda sürtünme ısısı etkisini de artıracaktır. Hızdaki artış ile meydana gelen hasar, artan sıcaklık ile oluşan iyileşme etkisinden daha çok olabilir ve daha sonra sistem orta şiddette aşınmaya dönebilir [1].



Şekil 2.7. Yüzeyler arasındaki bağların ayrılması [10]



Şekil 2.8. Aşınma oranı-yük ve aşınma oranı-hız arasındaki ilişki [3]

Aşınma davranışı ya aşınma hacmi ile kayma mesafesi arasındaki basit bir doğrusal oranı yada başlangıçtaki yüksek aşınma oranının daha düşük aşınma oranına değişiklik gösterdiği bir durum gösterir. Başlangıçtaki yüksek aşınma oranına "geçiş aşınması", sonraki aşınma oranına ise "denge aşınması" denilmektedir [12].

Ağırlığın veya herhangi bir dış kuvvet etkisi neticesinde, normal basınç elastik bölgede bile olsa gerçek alanın görünen alandan çok küçük olması nedeni ile yüzeydeki pürüzlerin tepelerine gelen basınç büyüktür ve malzemelerin akma sınırına erişir hatta geçer. Bu zorlamayı taşımayan pürüz tepecikleri, plastik deformasyona uğrar. Malzemenin deformasyon kabiliyeti yüksek ise, yüzeye adsorbe edilmiş olan sıvı, gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanacaktır. Bu parçalanma karşılıklı malzeme atomlarını direk temasa geçirir. Böylece atomlar arası çekme kuvveti etkisini gösterir ve basınç kaynağı oluşu eğer izafi bir hareket var ise, kesme kuvvetlerinin etkisi ile genelde kaynak yerinin dışından bir parça kopar. Bu kopan parçacıklar, iki metal arayüzeyinde serbest kalabildikleri gibi diğer metale kaynaklı hale de gelebilirler. Her iki durumda da adhesiv aşınma olayı meydana gelmiş olur [7].

Adhezif aşınmada, HOLM'a göre aşınan malzeme hacmi

$$V = k\,W\,L\,/\,H \qquad \textbf{(2.1)}$$

olarak ifade edilebilir.

V : Aşınan malzemenin hacmi

k : Malzemeye bağlı aşınma katsayısı

W : Normal yük

H : Aşınan malzemenin sertliği

L : Kayma yolu (cm) dur [9].

Başka bir araştırmacı Archard ise, adhesiv aşınmayı

$$V = k\,W\,L\,/\,3H \qquad \textbf{(2.2)}$$

olarak ifade etmiştir [3]. Bu denklemin Holm'un ifadesine göre farkı, keyfi olarak seçilen "k" aşınma katsayısının burada değişik aşınma kombinasyonları için deneysel olarak bulunmasıdır. Örneğin, az karbonlu çelik çiftinde $k=45.10^{-3}$, paslanmaz çelik çiftinde $k=21.10^{-3}$, bakır-az karbonlu çelik çiftinde bakır için $k=1{,}5.10^{-3}$ ve çelik için $k=0{,}5.10^{-3}$ dür [9].

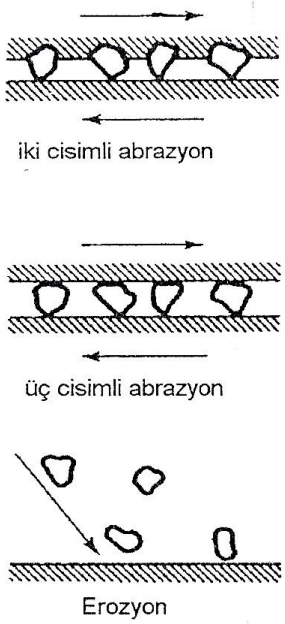
Sonuç olarak, adhesiv aşınmayı en aza indirmek için; temas yüzeyine uygulanan basıncın azaltılması ve temas eden malzemenin yüzey sertliğinin arttırılması gereklidir.

Adhezif aşınma; metal-metal, seramik-metal, plastik-metal, seramik-seramik, plastik-plastik ve diğer aşınma çiftlerini içermektedir. Metal-metal çiftlerinde, saf metaller ile düşük soğuk sertleşmeli ve tek fazlı alaşımlardan kaçınmak gereklidir. Sert metal çiftler yumuşak-sert çiftlere göre daha az aşınırlar. Seramik-metal çiftlerinde ise seramik malzemenin yüzeyinin pürüzsüz olması, yağlayıcı ve sert metal kullanılması gereklidir. Plastik-metal durumunda ise, cam gibi sert inorganik dolgu içeren plastiklerden kaçınılmalı ve tamamen sertleştirilmiş metal kullanılmalıdır. Seramik-seramik çiftlerinde ise aynı malzemelerden kaçınılması gereklidir. Örneğin alüminyum-alüminyum yerine alüminyum-krom kullanılmalıdır [13].

2.3.2 Abrasiv Aşınma

Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisi ile temas eden iki cisimden daha sert olanın, pürüz tepecikleri yada taneleri vasıtasıyla diğer cismi çizerek üzerinden mikron mertebesinde talaş kaldırma olayıdır. Aşınma talaşları, çizme, kesme, raybalama ve çarpma sonucunda meydana gelebilir. Burada katı-katı, tanecik-katı, katı-sıvı gibi pek çok aşınma çiftleri olabilir [10].

Abrazif aşınma genel olarak iki gruba ayrılır; sürtünen cisimlerin direkt olarak karşılıklı etkileşimleri sonucunda meydana gelen abrazif aşınmayı "İki Cisimli Abrazif Aşınma" , eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip eden sert taneciklerde bulunuyorsa bu tür abrazif aşınmaya "Üç Cisimli Abrazif Aşınma" denir (Şekil 2.9). Bu tanecikler aşınma sonucu oluşan tanecikler olabileceği gibi sisteme dışarıdan giren taneciklerde olabilir. Bir sistem içinde yüksek hızlı parçacıkların tek bir yüzeye hücum etmesi ile "erozyon" olarak bilinen abrasiv aşınmanın özel bir şekli ortaya çıkar [6]



Şekil 2.9. Abrasiv aşınmanın türleri [25]

Genellikle aşınma, iki cisimli abrasiv veya adhesiv olarak başlar ve araya giren toz, mineral tanecikleri, aşınma talaşı kalıntıları yada bütün olarak kalan oksit parçacıkları sonucu üç cisimli abrasiv olarak devam eder.

Abrazif aşınma; kesilme, kazıma ve tek veya tekrarlanan deformasyon gibi yüzeyi tahrip eden çeşitli mekanizmalar ile meydana gelir. Abrazif aşınma olabilmesi için,

sürtünme sırasında, abrazif aşındırıcı sertliğinin aşınma malzemesi sertliğinden daha fazla olması gerekir. Yani, sürtünen iki cisimden aşınması izlenen cismin sertliği diğerinden daha az ise abrazif aşınma meydana gelir [1].

Katı, sıvı, gaz veya bunların birkaçının kayma veya darbe etkisi ile katı yüzeyler üzerinde erozif aşınma oluşmaktadır. Erozif aşınma, tekrarlı şekildeğişimi ve kesmenin kombine işlemidir. Kesme işlemine, dar açıda katı yüzeye çarpan tanecikler ve yüzeyden bir miktar malzemenin kazılması olayı katkıda bulunur. Erozif aşınmanın püskürtme erozyonu, çamur erozyonu, yağmur erozyonu, erozyon-korozyon ve ısıl erozyon şeklinde değişik çeşitleri vardır [3]. Erozyon aşınmasında, aşındırıcı taneciğinin boyutu ile birlikte tanecik hızı ve darbe açısı erozif akışın kinetik enerjisinin bir ölçüsüdür. Aşınmaya uğrayan yüzey gevrek kırılma yüzeyine benzer şekilde ince taneli bir görünüşe sahiptir [1].

Üç cisimli abrasiv aşınma kendi içinde şu şekilde sınıflandırılır [4];

1. Oymalı Sürtünme Abrasyon Aşınması (Gouging)
2. Yüksek Gerilmeli Abrasyon Aşınması
3. Düşük Gerilmeli Abrasyon Aşınması

2.3.3 Oymalı Sürtünme Abrasyon Aşınması

Herhangi bir malzeme ve abrazif taneciği için aşınmanın şiddeti etkili olan kuvvete bağlıdır. Etki eden kuvvetin şiddeti yüksek olduğunda her abrazif taneciği başına aşınma oranıda yüksek olabilecektir. İster sabit tanecik olsun ister serbest tanecik olsun bu tür aşınma mekanizmasına oyucu abrazyon denilmektedir [12].

Bu aşınma mekanizması genellikle hafriyat tipi araçlarda, kazıcı tipi kepçelerde ve buldozerlerde görülür. Bunun sonucunda hafriyat araçlarının iç kısımları, kazıcı ve buldozerlerin kepçe ve yürüyen aksamları aşınmaya maruz kalır [7].

2.3.4 Yüksek Gerilmeli Abrasyon Aşınması

Yüksek gerilmeli abrasyon, büyük yükler altında aşındırıcı parçaların kırılarak küçük keskin köşeli parçacıklar oluşturup yüzeyi çizerek malzeme kaybına sebep olması sonucunda meydana gelir [14]. Bu aşınma türü, konveyör zincirleri, dişli zincir yuvası, açık dişliler, toprak kaldırma makinelarının bazı parçaları ile doğal

minerallerin öğütüldüğü bilyalı ve çubuklu değirmenlerde göreceli olarak yüksek basınçlarda ortaya çıkmaktadır [12].

2.3.5 Düşük Gerilmeli Abrasyon Aşınması

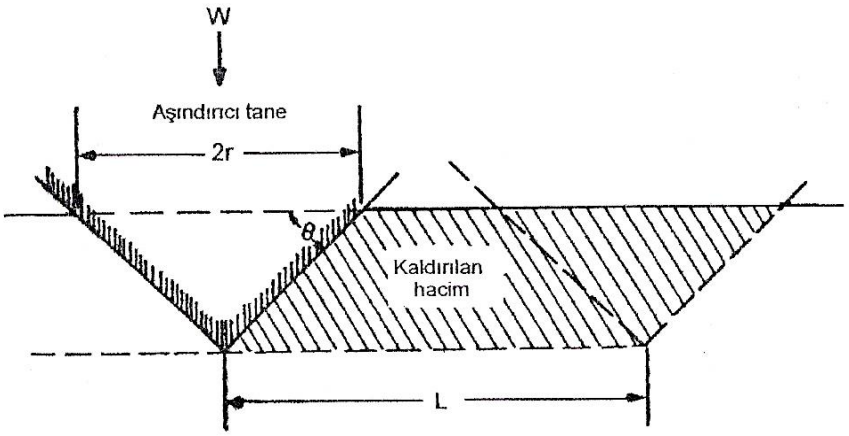
Düşük gerilmeli abrasyon aşınması, aşınma yüzeyleri arasında aşındırıcı taneciklerinde kırılma olmaksızın parçayı aşındırmak suretiyle gerçekleşir [14]. Düşük gerilmeli çizici abrazyonda metal parçaları, değişen hızlarda yüzeyde hareket eden sert, keskin taneciklerin tekrarlı çizici etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Hız, sertlik, kenar keskinliği ve tanecik boyutunun başlangıç açısı; aşınma miktarını etkileyen parametrelerdir [1].

Abrazif aşınma işlemi genel olarak basit bir kesme işlemi gibi abrazif taneciği de küre, koni veya piramit şeklinde basit bir şekil olarak düşünüldüğünde (Şekil 2.10) kaldırılan malzeme hacmi;

$$V = W L \tan\theta / \pi H \qquad \textbf{(2.3)}$$

Bu denklemde; W, yük; L, koninin ilerlediği mesafe; θ, koninin eğim açısı; H ise malzemenin sertliğidir. (2.3) abrazif aşınma ile (2.2) adhezif aşınmanın denklemleri birbirlerine eşitlendiğinde abrazif aşınma katsayısının değeri denklem (2.4)'deki gibidir [15].

$$k = 0{,}96 \tan\theta \qquad \textbf{(2.4)}$$



Şekil 2.10. Abrasiv aşınma kaybı modeli [15]

2.3.6 Tribokimyasal Aşınma

Tribokimyasal aşınma, ortamla reaksiyona giren ve sürtünen yüzeyler arasında oluşur. Korozif ortam gaz veya sıvı olabilir. Tribokimyasal aşınma temas halindeki yüzeylerden metalik ve kimyasal reaksiyon ürünlerin uzaklaştırılması şeklinde oluşur [10]. Özellikle, kimyasal maddeler bulunan ortamda çalışan makine elemanlarının yüzeyleri, bu maddeler ile reaksiyona girdiğinde ve ayrıca yağlayıcıda bulunan maddelerinde etkisinden dolayı ortaya çıkan bu sınır tabaka, yükün etkisi ile kırılmakta ve böylece aşınma parçacıklarını meydana getirmektedir. Sınır tabakanın kırılmasından sonra temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucunda yeniden sınır tabaka oluşmakta ve bu durum sürekli devam etmektedir [12].

Şekil 2.11'de gösterildiği gibi tribokimyasal aşınmanın mekanizmaları 4 kategoriye ayrılabilir;

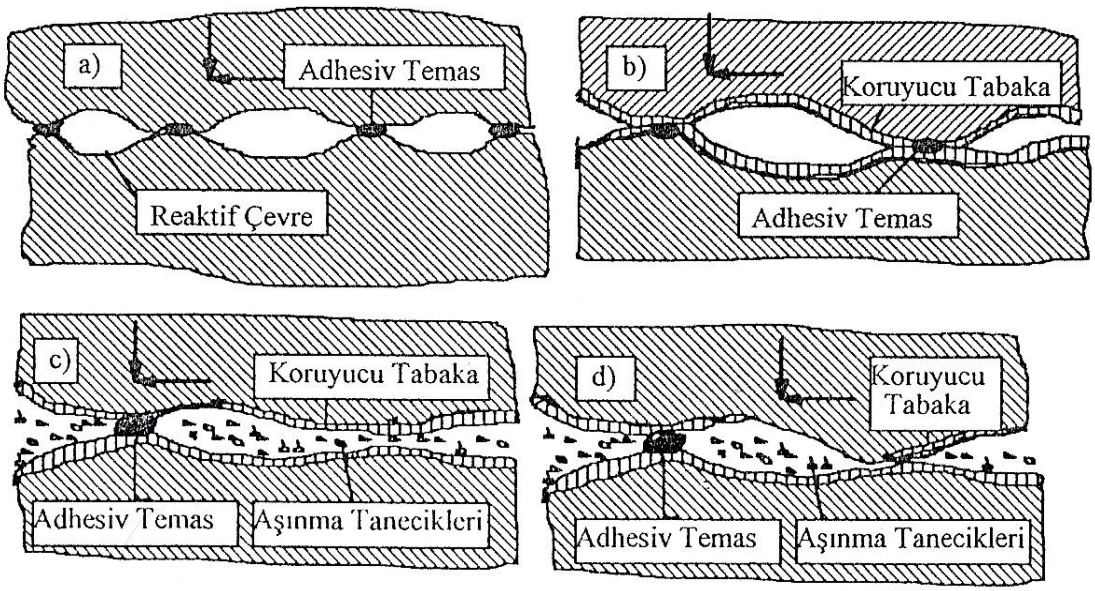
a) Adhezyon aşınması sonucunda oluşan küçük metalik tanecikler oksitlenebilir.

b) Metallerin ortamla kimyasal reaksiyonları sonucunda metalle teması sağlayan koruyucu yüzeyler oluşabilir.

c) Yerel yüksek basınçlar veya mikro yorulma sonucunda koruyucu yüzey tabakalarının çatlaması metalsel olmayan aşınma taneciklerin oluşumuna neden olur.

d) Metal veya metal olmayan aşınma parçacıkları bir abrasiv parçacığı gibi etki eder.

Aşınma hızı veya direnci ve sürtünme katsayısı; sertlik ve çekme mukavemeti gibi bir malzeme özelliği olmayıp tribosistem özelliğine bağlı olarak değişir. Sürtünme, harekete karşı direnci ifade eder ve katı cisimlerde gerçek temas alanlarının iç etkileşimleri sonucunda artar. Sürtünme büyük enerji kayıplarına neden olurken aşınma büyük malzeme kayıplarına neden olmaktadır [7].



Şekil 2.11. Tribokimyasal aşınmanın oluşum mekanizması [10]

2.3.7 Yorulma Aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma aşınması, değişken tekrarlı zorlanma altında zamana bağlı olarak meydana gelir. Yüzey bölgesi, titreşimli değişken zorlanmaya maruz kaldığı zaman (örneğin, tekrarlı yuvarlanma veya kayma teması) malzeme yüzeyinin hemen altında mikro çatlaklar oluşur. Bu çatlakların yüzeye olaşması sonucunda da yüzeyden pullanma şeklindeki parçacıklar ayrılır, yüzeyde çukur ve oyuklar oluşur. Tekrarlı gerilmeler genelde elastik sahada değiştiğinden bu tür yorulma uzun ömürlü yorulmadır.

Bu yorulma aşınmasına pitting de denilmekte; buna genellikle dişli çark mekanizmalarında, araçların kam pili mekanizmalarında, rulmanlı yataklarda, demir yolu raylarında, soğuk ve sıcak haddemeler de, sirkülasyon pompaları gibi makine elemanlarında rastlamak mümkündür [7].

2.4 Malzeme Aşınmasının Genel Karakteristikleri

Temas tabakasında meydana gelen çeşitli değişmeler, çeşitli aşınma tiplerine götürüyor. Bir özgül aşınma tipi tek bir terimle tanımlanamaz; onun birkaç karakteristiği ile tanımlanması gerekir. Yüzey tahribinin mekanizması çeşitlidir.

Yüzey arası ortama bağlı olarak kuru aşınma, sınır-yağlama aşınması ve abrasif aşınma arasında ayrım yapılır. Elastik temas sırasında sınır sürtünmesinde yorulma

aşınması gibi bir özgül aşınma tipinin tanımlanması için üç karakteristik kullanılacaktır. Sabit sürtünme koşulları altında aşınma sürecinin üç safhası yer alır:

- Alıştırma
- Sürekli hal aşınma
- Ağır aşınma dönemi.

Alıştırma süreci, sürtünen yüzeylerdeki çıkıntıların şekil değiştirmesi ve malzemenin işlenme sertleşmesine uğramasından ibarettir. Bu iki sürecin sonucu olarak elastik temasa neden olan koşullar yerleşir. Sürtünen yüzeylerde elastik temasın sağlanması, minimum aşınma ile sürtünme kuvvetinin stabil bir büyüklüğünü temin eder.

Alıştırma, sürtünen yüzeylerin daha şiddetli aşınması ve daha yüksek ısı meydana getirilmesi ile belirginleşir. Bunları hem yüzey geometrisinde hem de malzemelerin yüzey tabakalarının fiziksel ve mekanik niteliklerinde değişmeler meydana gelir.

Alıştırma sürecinde belli çalışmalar altında yaşamaya en az dayanabilecek olan çıkıntılar şiddetle tahrip olur. Başlangıçtakilerden şekil ve boyut itibariyle yeni çıkıntılar oluşur. Değişik kayan çiftlerde çeşitli koşullarda alıştırmadan sonra belli sürtünme koşullarına özgü bir stabil yüzey pürüzlüğü meydana gelir. Bu sürtünme süreci sırasında zamanla değişmeyip aksine pekişir.

Malzemelerin aşınmalarının anlaşılmasında başlıca zorluk; sürtünen parçaların yüzey altı tabakalarının karşılıklı mekanik etkileşime uğramalarının dışında, çevreden fiziko-mekanik özellikleri, malzeme özelliklerinden farklı olmasıdır (17).

2.5 Aşınmayı Etkileyen Faktörler

Aşınma olayının karmaşık bir özellik göstermesi, oldukça fazla aşınma mekanizmalarının varlığı ve bu mekanizmaları etkileyen birçok değişkenlerin olması nedeni ile bu değişkenlerin tribolojik sistemi ne şekilde etkileyeceğini önceden belirleyebilmek oldukça zordur [12].

Aşınma direnci, karakteristik bir malzeme özelliği değildir. Tüm aşınma olayları tribolojik sistemin bir parçası şeklinde dikkate alınmalıdır. Aşınma olayını etkileyen çeşitli tribo-sistem parametreleri şöyledir;

- Yüzeye bağlı; Yüzey filmin etkisi, oksit filmler, sınır yağlama, diğer yüzey tabakaları,
- Çevreye bağlı; Sıcaklık, çözünürlük, yük
- Malzemeye bağlı; Kristal yapı, yüzey sertliği ve kalitesi [16].

3. ISIL PÜSKÜRTME

Genel olarak mühendislikte kullanılan malzemelerin istenilen mukavemete sahip olması uygulanan yükleri taşınamsı gerekmektedir. Bu tür özellikler malzemenin kendisi ile doğrudan ilgilidir. Ayrıca, malzemelerin verimli olarak kullanılabilmesi için bazı yüzey özellikllerinide taşıması gerekir. Bu özellikler elektrik, optik ve ısıl özellikler olabileceği gibi malzemenin kullanım süresi ile yakından ilgili olan korozyon ve aşınma dirtenci gibi özelliklerde olabilir.genellikle bütün bu istenilen mekanik ve yüzey özelliklerini tek bir malzemede bulmak olanaksız veya çok pahalı olmaktadır. Bu nedenle mühendislik malzemelerin gerekli yapısal özellikleri sağlayan ucuz bir malzemeden seçilmesi ve diğer yüzey özelliklerinin ise yüzey işlemleri ile sağlanması en uygun çözümdür [1].

Modern yüzey işlemleri yöntemi malzemenin kullanım özelliklerini iyileşirmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemler malzemenin korozyon direncini, aşınma direncini, yorulma mukavemetini, fiziksel özelliklerini, estetik görünümünü veya bunların bileşimi olan özellikleri daha iyi yönde iyileştirmek için kullanılabilir. Bunlardan biride ısıl püskürtme yöntemidir.

Isıl püskürtme; toz, tel veya çubuk şeklindeki hammaddelerin kullanılarak bir malzemenin diğer malzeme üzerine sıcaklık ve hız kullanılarak kaplanmasını sağlayan prosesleri içerir. Diğer bir deyişle kalınlığı 50 mikrometrenin üzerinde olan kaplama, partikül formunda veya tel şeklinde ergitilmiş malzemenin tamamen veya kısmen ergimiş damlacıkların yüzeyde form almasıdır [19].

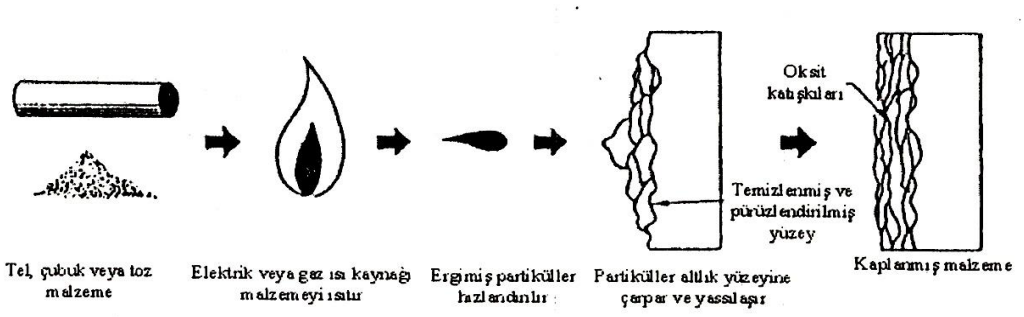
Aslında ısıl püskürtme son 50 yılda gelişme göstermiştir fakat gerçek büyümeyi bir çok farklı alanda kullanılan yüksek performans kaplamalar arasına girerek son 10 yılda gerçekleştirmiştir. Isıl püskürtme yöntemiyle yapılan kaplamaların geniş kullanım alanları vardır.

Uygulamalar; aşınma, yüksek sıcaklık, kimyasal bozunma, alt yapı sistemleri bakımı mühendislik uygulamalarında olağan çevresel korozyonlardan korunmayı kapsamaktadır [20].

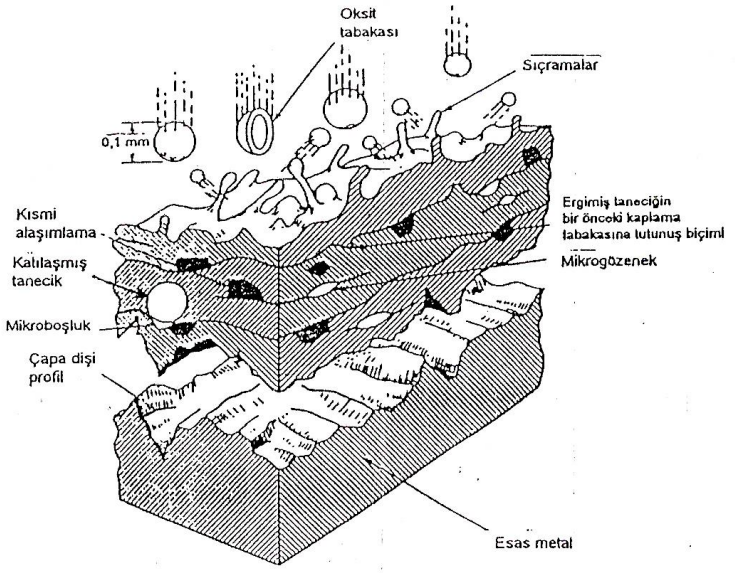
50'li yılların sonlarına kadar alevle püskürtme ve elektrik ark tel püskürtme olmak üzere iki cins ısıl püskürtme yöntemi mevcut idi. Bu kaplamalar başlıca aşınmış parçaların onarımında ve abresiv, adhesiv aşınma dirençli alaşım ve sermetler üzerine oldukça kalın tabakalar uygulamakta kullanılırlardı. Bu kaplamaların oksit içerikleri ve gözenekleri oldukça yüksek olmakla beraber bağ mukavemetleri de bir o kadar düşüktü. İlerleyen teknoloji ile birlikte bu iki yöntemi yüksek hızlı oksi-yakıt kaplama yöntemi izledi. Bu kaplamaların bağ mukavemetleri çok daha yüksekti, gözenek ve oksit seviyeleri daha düşüktü. Bu gelişmelerle birlikte kaplamaların dirençleri gelişmiş ve ısıl püskürtme yöntemleri hemen her endüstride kullanılır olmuştur [21].

Aşınmaya dirençli malzemelerin kullanımı ile oluşturulan yüzey kaplamalarını oluşturmak üzere en yaygın kullanılan yöntemlerin başında eritme esaslı ısıl püskürtme yöntemleri gelmektedir. Isıl püskürtme yöntemleri kolay uygulanabilirlikleri, malzemede çarpılma tehlikesi yaratmayacak ısı girdileri, bir çok tür malzemenin çeşitli amaçlar için püskürtülebilme olanağı sağlamaları gibi üstünlüklere sahiptirler. Kaplanan tabakaların kullanım sırasında gösterdikleri yüksek aşınma dirençleride kullanım artışının bu yönde gelişmesini teşvik etmektedir [31].

Isıl püskürtme yönetimi esas prensibi çubuk, tel veya toz halindeki kaplama malzemesinin ergime noktasına yakın bir sıcaklığa kadar ısıtılıp, ergimiş veya kısmen ergimiş damlacıklar halinde basınçlı gaz akımı etkisiyle alt malzeme yüzeyine kaplama esasına dayanır [22].

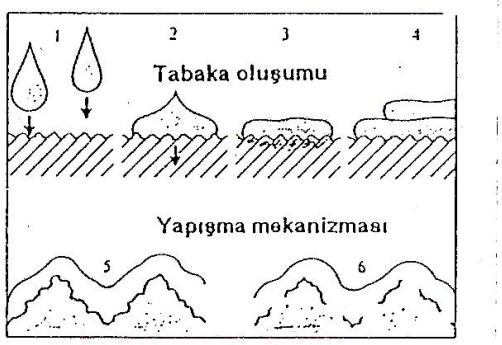


Şekil 3.1. Isıl püskürtme kaplama işleminin şematik gösterimi [23].



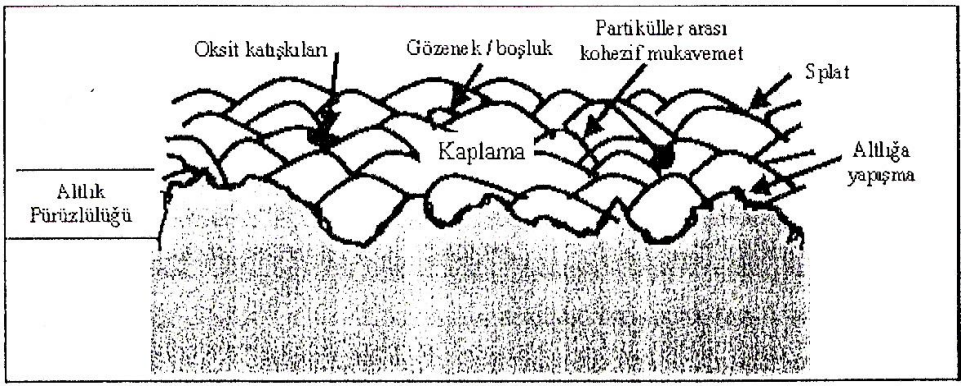
Şekil 3.2. Isıl pürkürtme kaplama tabakasının şematik gösterimi [29].

Isıl püskürtme torcu kaplama malzemesini ergitmek için gerekli olan sıcaklığı yanıcı gazlar, elektrik arkı veya plazma arkı ile elde eder. Plastik şekil değiştirmiş yada ergimiş durumdaki kaplama malzemesi yöntemde kullanılan taşıyıcı gazlar ile kaplanacak malzemeye doğru gönderilir. Altlığa çarpan tanecikler darbeye bağlı olarak düzleşir ve ince plakalar oluşturmak için altlık ile bağ oluşturur [24]. Bu durum Şekil 3.3' de görülmektedir.



1. Yüzeye doğru giden kaplama malzemesi, 2. Yüzeye çarpma, 3. Esas metal ile ısı transferi, 4. Katılaşma ve kaplama malzemesinin teması, 5. Mekanik bağlanma, 6. Bölgesel erimeler.

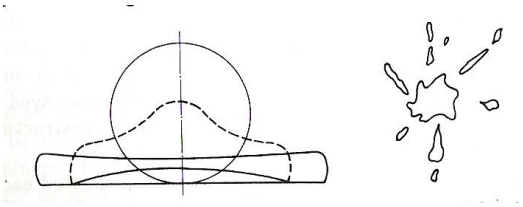
Şekil 3.3. Isıl püskürtme tabakasının oluşumu [24]



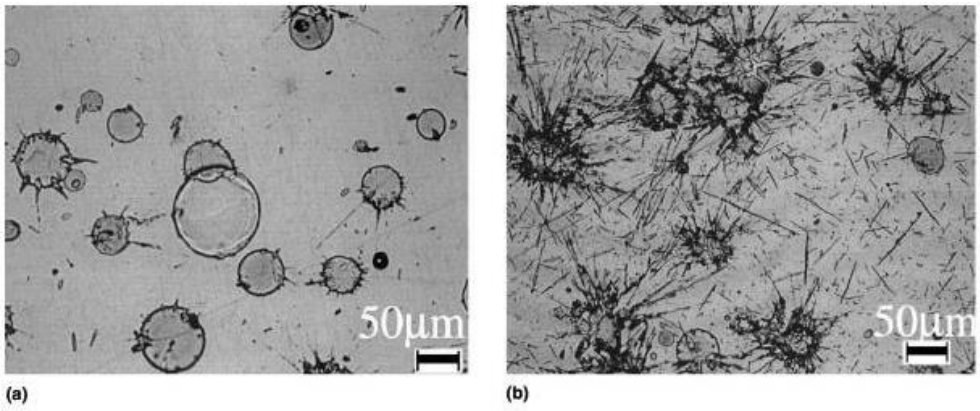
Şekil 3.4. Isıl püskürtülmüş kaplamanın şematik kesit görüntüsü [22]

Ergiyen kaplama malzemesi kaplanacak olan parçanın soğuk yüzeyine püskürtülür. Yüzey darbe etkisiyle çarpan tanecikler, düzleşmekte ve esas metale olan ısı transferi ile soğuyarak katılaşmakta ve birbiri ile temas haline gelerek tabakalar meydana getirmektedir. Ergiyen kaplama malzemesinin esas metal ile birleşmesi ve tabaka oluşturması difüzyon veya kaynak kabiliyetine bağlıdır. Kaplamalar, genelde mekanik bağlanma ve bölgesel olarak çeşitli sınıflarda kimyasal bağ kuvvetleri ile oluşmaktadır [24].

Püskürtülen damlacıkların hızı ve plastikliği, damlacıklar alt malzemeye yapışıp şekil alabilecek kadar yüksek değerde olmalı. Partikül hızının etkisini Şekil 3.6 de görebilirsiniz. Kaplamanın kalınlığı malzemeyi püskürten torcun aynı yerden geçmesi ile artar. Kaplama kalınlığını oluşturan çok sayıda tabakanın birbiri üzerine yığılması için damlacıkların yüzeye çarptığı anda çok hızlı soğuyarak katılaşması gerekir böylece sonradan gelen damlacık önceden gelip tabakalaşmış damlacık üzerine tutunabilir [27].

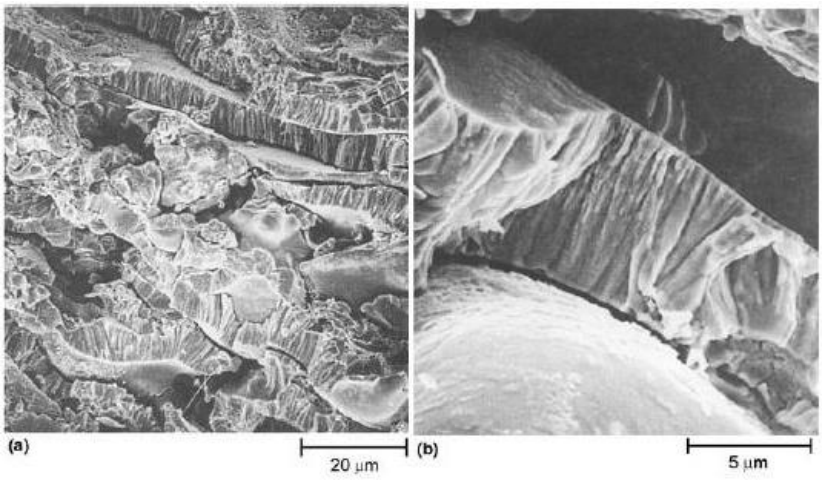


Şekil 3.5. Ergimiş partikülün katılaşma esnasındali şekil değişimi ve parçalanarak dağılması[35].

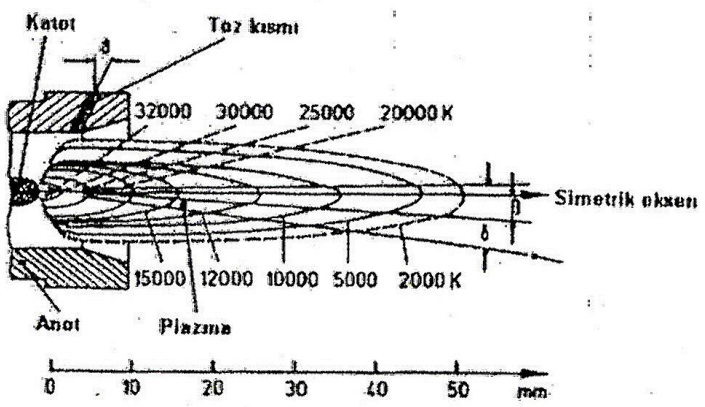


Şekil 3.6. Partikül hızının etkisi çarpma hızı (a) 86 m/s (b) 172 m/s [32]

Çarpışma sonucunda oluşan tabakalaşma lameler olarak meydana gelir (Şekil 3.7)



Şekil 3.7. Taramalı elektron mikroskobunda (TEM) plazma püskürtme yöntemiyle tungsten kaplamanın kesit görünümü. (a) Lameler mikroyapı (b) Damlacıkla oluşan sütunsal tane yapısının görünümü. [28]



Şekil 3.8. Plazma jetinin geometrisi ve sıcaklık dağılımı [27].

Kaplama malzemesi parçacıkları gaz jetinin içerisinde yol alırken gaz jetindeki sıcaklık dağılımına ve gaz içindekiş ortalama parçacık boyutu dağılımına göre ısı alarak tamamen veya kısmen ergir (Şekil 3.7).

Çökelen kaplama tabakasın ergimemiş veya yarı ergimiş tanecikler, boşluk inklüzyonlar ve tamamen erimiş tabakalardan meydana gelmiştir. Oksit kalıntıları püskürtme jetindeki sıcak taneciklerin bir kısmının çevre ile reaksiyonundan dolayı oksitlenmesi sonucu meydana gelmektedir ve milyonlarca tanecik aynı anda ısıtıldığından her biri aynı ısı etkisinde kalmamaktadır. Taneciklerin bir kısmı tamamen ergimemekte ve kaplamada boşluk ve ergimemiş tanecikler meydana gelmektedir. Böyle bir durumla karşılaşıldığında ise;

- Isıl püskürtme yöntemine
- Seçilen işlem parametrelerine ve
- Püskürtülen malzemeye

dikkat edilmelidir [25,26].

Isıl püskürtme yöntemiyle kaplamadaki ana malzeme ile kaplanacak malzeme ara yüzeyindeki bağlanma mekanizması bir çok sebebe bağımlı bir alanda gerçekleşir. Genellikle bu durum mekanik bağlanma ve difüzyon bağları ile sağlanır.

Isıl püskürtme yöntemiyle kaplamada bağlanma mekanizması:

- Mekanik bağlanma
- Difüzyonla bağlanma
- Diğer adhesiv, kimyasal ve fiziksel bağlanma mekanizmaları- oksit filmleri, Van der Waals kuvvetleri v.b.

Bağlanmayı ve kaplamanın ilerleyen aşamalarını etkileyen faktörler:

- Temizlik
- Yüzey alanı
- Yüzey topogrofisi ve profili
- Sıcaklık (ısıl enerji)
- Süre (reaksiyon hızı ve soğuma hızı vb.)

- Hız (kinetik enerji)
- Fiziksel ve kimyasal özellikler
- Fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar,

Temizlik altlık malzemenin hazırlanmasında çok önemlidir, bu iyi bir bağlanma için yüzeyin kimyasal ve fiziksel olarak daha aktif olmasını sağlar. Yüzey alanının artması kaplama bağının kuvvetini artırır. Pürüzlü yüzey mekanik etkiyi artırmaktadır.

Yüksek sıcaklık difüzyon bağlanmanın daha aktif hale getirirken bunun yanında yüksek bağ kuvvetlerinin bozulmasını sağlayan oksitlenmeyi de artırır.

Isıl püskürtme yöntemiyle oluşturulan tüm kaplamalar bir miktar boşluk içermektedir (%0.025 - %50). Boşlukların oluşma sebepleri;

- Düşük çarpışma enerjisi (ergimemiş partiküller ve düşük hız)
- Gölgeleme etkisi (ergimemiş partiküller ve püskürtme açısı)
- Büzülme ve gerilme azalması etkisi

Yukarda ki etkiler kullanılan kaplama malzemesinin kimyasal ve fiziksel özelliklerine göre değişiklik gösterebilirler.

Soğuma ve katılaşma çoğu malzemelerde büzülmeyi de beraberinde getirir. Partiküllerin yüzeye çarpmasıyla hızla soğur ve katılaşırlar. Böylece partiküller üzerinde çekme gerilmesi ve altlık yüzeyinde de basma gerilmeleri meydana gelir. Kaplamanın devam edip büyümesi ile gerilmelerde çoğalır. Kaplamanın ilerlemesi ile çekme gerilmeleri bağlanma kuvvetini veya yapışma kuvvetini aşmasıyla kaplama zayıf olacaktır.

Östenitik paslanmaz çelik gibi çekilebilen malzemeler, fazla gerilmeye dayanıklı olmadığından kaplama kalınlıkları düşük tutulur. Genellikle ince yapılan kaplamalar kalın kaplamalara göre daha uzun ömürlüdür.

Kaplamanın yöntemi ve mikroyapısı kaplamadaki gerilme artışını etkilemektedir. Yoğun olan kaplamalar genellikle boşluklu kaplamalara nazaran daha fazla gerilme içerir. Örneğin, alevle püskürtme yöntemiyle kaplanan malzemeler plazma püskürtme yöntemiyle kaplanan malzemelere nazaran daha fazla gerilme içermektedir.

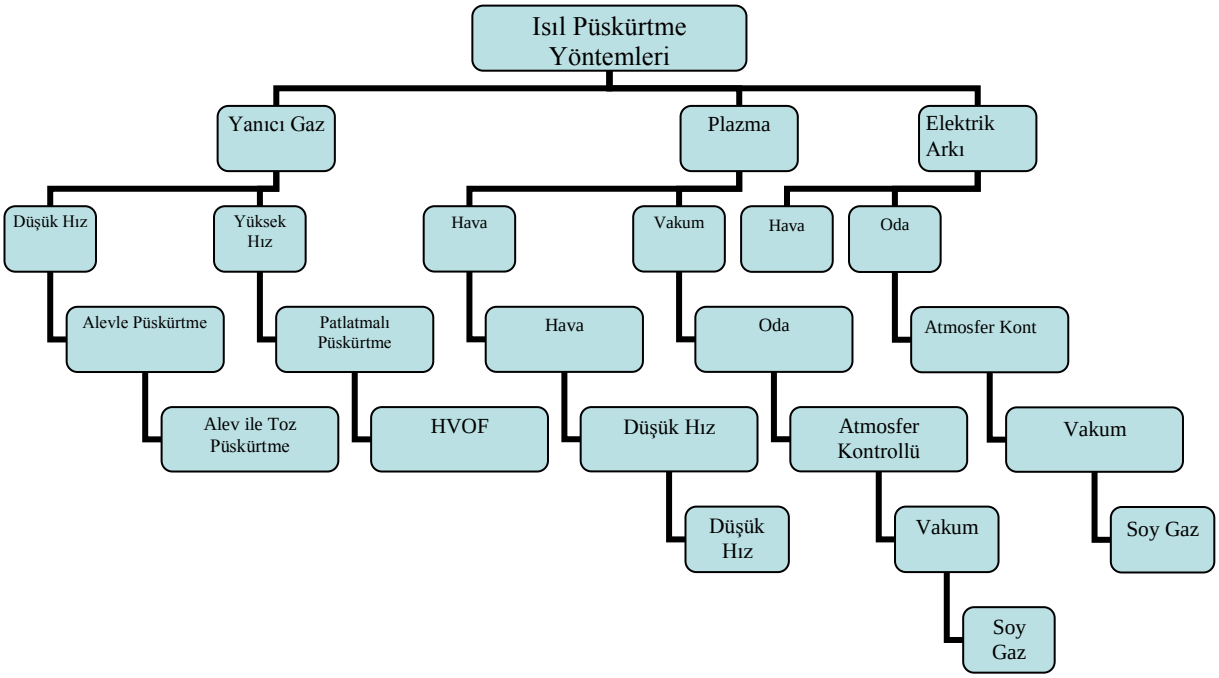
Bunlara karşıt olarak, yüksek kinetik ve düşük kinetik enerji kullanan sistemler (HVOF, HEP, soğuk püskürtme) diğer kaplamalara oranla son derece doğun olan gerilmeler içerir. Bu durum çarpan partiküllerin etkisiyle oluşan mekanik deformasyonun basma gerilmelerinden kaynaklanır [30].

3.2 Isıl Püskürtme Yöntemleri

Isıl püskürtme yöntemleri esas malzemede herhangi bir metalurjik değişiklik olmaması ve malzeme seçiminin çok bol olması sebebi ile aşınmaya karşı kaplama yöntemleri arasında oldukça yaygındır. Yöntemler esas olarak kullanılan enerji kaynağı, kaplama ortamı ve kaplama malzemelerine göre sınıflandırılabilir. Enerji kaynağı; yanıcı gaz veya elektrik enerjisi, kaplama ortamı; düşük başınç veya hava ve kaplama malzemesi de seçime göre tel veya toz olabilmektedir. Isıl püskürtme yöntemleri;

- Alevle püskürtme
- Elektrik ark püskürtme
- Patlatmalı tabanca ile püskürtme
- Plazma püskürtme
- Yüksek hızlı oksi-yakıt püskürtme (HVOF)

şeklinde sıralanabilir.



Şekil 3.9. Isıl püskürtme yöntemleri [33]

Tablo 3.1. Ticari ısıl püskürtme yöntemlerine ait bazı önemli özellikler [34].

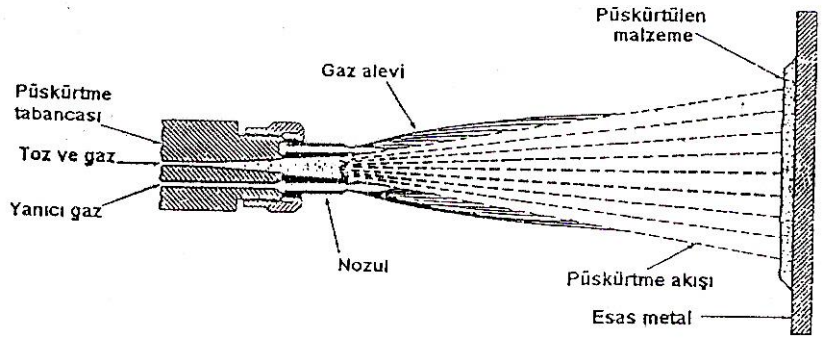
Kaplama Yöntemi	Isı Kaynağı	Sevk Edici	Beslenen Malzeme	Tabanca Sıcaklığı (°C)	Partikül Hızı (ms^{-1})	Kaplama Malzemesi Türü	Kaplama Gözenekliliği (%)	Nispi Bağ Mukavemeti
Alevle Püskürtme	Oksi-asetilen/Oksi-hidrojen	Hava	Tel Toz	3300	240 30-120	Metalik Metalik/Seramik	8-15 10-20	İyi
Plazma Püskürtme	Plazma arkı	Yansız gaz	Toz	16000	120-450	Metalik/Seramik/ Plastik ve Karışımları	2-5	İyi-Mükemmel
Patlatmalı Tabanca	Oksijen / asetilen / gaz patlaması	Patlatma şok dalgaları	Toz	4500	800	Metalik/seramik ve Karışımları	0.1-1	Mükemmel
Elektrik Ark Püskürtme	Elektrotlar arasındaki ark	Hava	Tel	6000	240	Nispeten sünek malzemeler	8-15	İyi

3.2.1 Alev ile Püskürtme Yöntemi

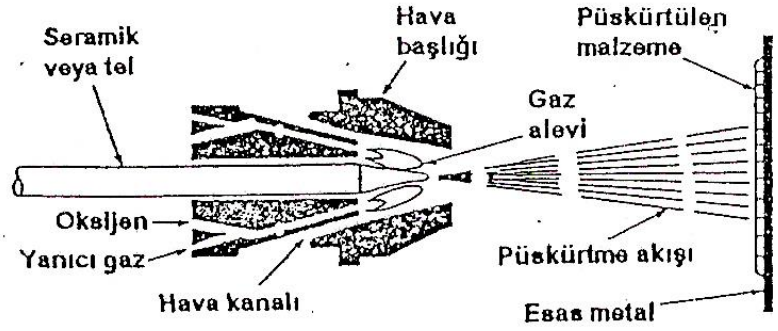
Alevle püskürtmenin tutuşmasında sıkıştırılmış hava veya oksijen çeşitli yakıtlarla (örn., asetilen propilen, propan, hidrojen) karıştırılarak partikülleri ergitmede ve prosesi ilerletmede kullanılır. Genel olarak bu proses düşük performanslı kaplamaları sağlar, ve yüksek yoğunlukta iyi bağ içeren kaplamaların gerektiği durumlarda kullanılmaz. Bunun nedeni ise yaklaşık 50 m/s olan düşük alev hızı ve yaklaşık

3000 ^{o}C olan düşük alev tutuşturma sıcaklığıdır. Tutuşma alevle kaplamada toz, tel veya çubuk olan kaplama malzemesinin her ikisi birden kullanılır ve fiyat uygunluğu ve diğerlerine oranla kolaylık açısından dünyada kullanımı yaygın olarak bulunur [20].

Değişik biçimdeki kaplama malzemelerini püskürtmek için alev püskürtme tabancasında yapılan değişiklik nozul ve hava başlığı şeklindedir. Toz püskürten alev püskürtme tabancası Şekil 3.10'da, tel veya çubuk püskürten alev püskürtme tabancası ise Şekil 3.11'de gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Toz alev püskürtme tabancası [36].



Şekil 3.11. Tel veya çubuk püskürtme tabancası [36].

Toz alev püskürtme yönteminde, toz alev tabancasının içerisine beslenmekte ve bir taşıyıcı gazın yardımı ile toplanıp ergitilmek üzere tabancanın ağızlığına taşınmaktadır. Burada ergitilen tozlar kaplamayı oluşturmak üzere altlık malzeme üzerine püskürtülür. Bu yöntemle genellikle seramik tozlarının yanı sıra oksidasyona dirençli metal ve alaşımlarda püskürtülmektedir [37].

Tel veya çubuk biçimindeki kaplama malzemesi durumunda alev içinde bir erime ucu oluşturulur ve buraya basınçlı havanın püskürtülmesi ile alev, püskürtme akışına dönüştürülür ve iş parçasına doğru tanecikler gönderilir. Yöntemde metalik tel, hızı ayarlanabilir bir motor vasıtasıyla uçlarının ergitildiği bir ağızlık içerisine sürekli beslenmektedir [36,37].

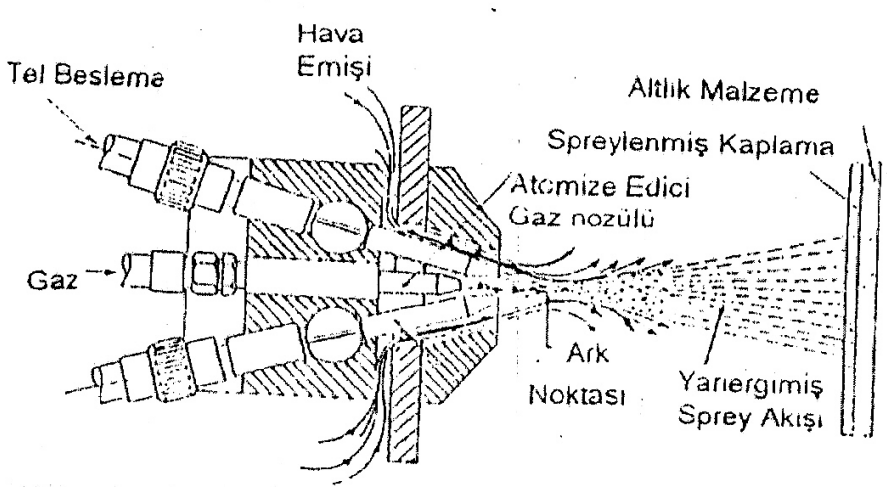
Bu yöntemde gözenek aralığı % 5-20 olabilmektedir. Bunun sebebi ise kaplamanın hava içerisinde yapılmasından dolayı havanın önemli miktarda yakalanmasıdır. Havanın diğer etkisi ise, püskürtme işlemi esnasında ergimiş olan damlaların oksitlenmesidir. Alevle püskürtme yöntemi ile 25-30 MPa bağlantı mukavemeti elde edilebilir [25,36].

Alevle püskürtmede elde edilen metalik kaplamalardaki boşluk, püskürtme işleminden sonra yüzeye uygulanan ısıtma işlemi azaltılabilir. Ayrıca bu yöntemde alev sıcaklığı 3000 ^{o}C dolaylarında, ergimiş damlalar 2000 ^{o}C nin üzerinde olup yaklaşık 100 m/s hızla esas metale çarpmaktadır [25].

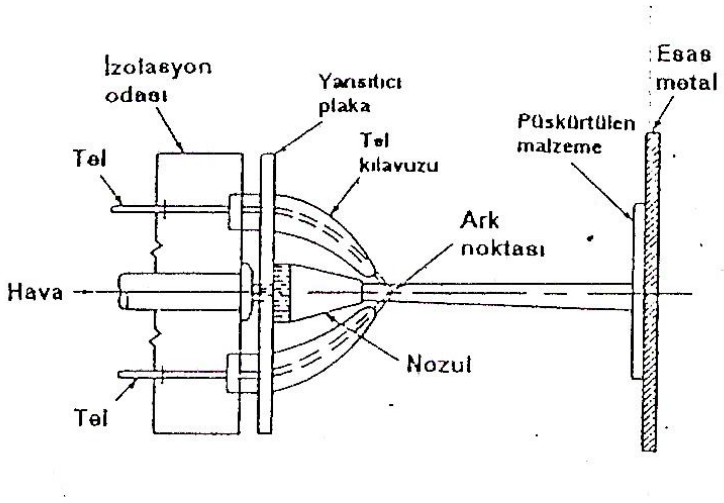
3.2.2 Elektrik Ark Püskürtme Yöntemi

Elektrik ark püskürtme yöntemi, iki tane iletken telli elektrik akım kaynağının ark noktasında ergimenin oluşması ile meydana gelir. Ergimiş malzeme sıkıştırılmış hava ile atomize edilerek, yüksekliği 40 kg/saat olabilen çok güçlü sprey ile form alır. Bu oran termal sprey püskürten tabancalar arasında endüstrideki en yüksek değerdir. Bu proses kaplamalar arasında, denizcilik endüstrisinde çinko ve alüminyumun korozyon direncine izin vermede ve alt yapı uygulamalarında etkili bir sonuç vermektedir. Modern kalkınma çerçevesinde elektrik ark tabancaları inert atmosferde, argon ve nitrojen atomizasyonu ve kimyasal endüstride korozyona karşı koruma için zirkonyum ve titanyum gibi reaktif metaller püskürtülür [20].

Bu yöntem ile 5500 ^{o}C ye kadar yüksek sıcaklıklara çıkılabilir. Oluşan mikroyapı alevle püskürtmede oluşan mikroyapıya benzerlik gösterir. Elektrik ark yöntemi ile üretilen kaplamalar alevle püskürtme yöntemi ile kıyaslandığında daha yüksek bağ mukavemeti, daha yüksek çökelme hızı, kaplamada ki oksit miktarının azaltılabilmesi ve kaplama maliyetinin daha düşük oluşu gibi çeşitli üstünlüklere sahiptir [34,38].



Şekil 3.12. Elektrik ark püskürtme işleminin şematik görünümü.



Şekil 3.13. Elektrik ark püskürtme tabancası.

Bu yöntemle yüksek dolgu oranları elde edilebilir ve otomatik sistemlere uyarlanmasıda kolaydır. İşlem özellikle büyük malzemeler üzerine kalın kaplamaların yüksek hızlarda çökeltilmesi için uygundur. Tel ergime veriminin çok yüksek hızlarda gerçekleşmesi, işlemde yüksek çökelme hızlarının elde edilmesine imkan tanımaktadır [34].

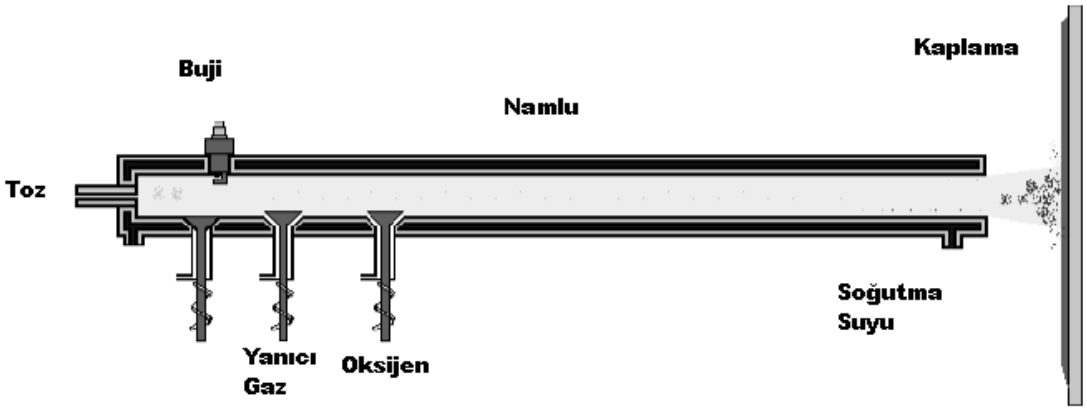
Bu yöntemin uygulanması ile 30 MPa bağlama mukavemeti, % 10-15 porozite ve % 15 oksit bileşimi içeren kaplamalar yapılabilir [36].

Elektrik ark püskürtme yönteminin dezavantajlarından birisi kaplanacak malzemenin elektriksel olarak iletken olması diğeri ise fazla miktarda gürültü ve toz açığa çıkmasıdır. Gürültü ve toz için gerekli önlemler alınarak bu problem ortadan

kaldırılabilir. Düşük üretim maliyet, hızlı üretim yapabilme gibi avantajlarının yanında alev veya plazma kullanılmadığı için altlık malzemeye az ısı verme özelliği ile tercih edilebilir [33,38].

3.2.3 Patlatmalı Tabanca ile Püskürtme Yöntemi

Patlatmalı tabanca ile püskürtme yönteminde, asetilen ve oksijen tepkime va taşıyıcı gazla (azot) gelen kaplama parçacıkları yanma bölümü içinde karıştırılarak kıvılcım ile şiddetli patlamalar meydana getirilir. Patlama etkisiyle toz parçacıkları ısı ve yüksek kinetik enerjiyle altlık malzeme üzerine püskürtülür [33].



Şekil 3.14. Patlatmalı tabanca ile püskürtme yönteminin şematik görünümü .

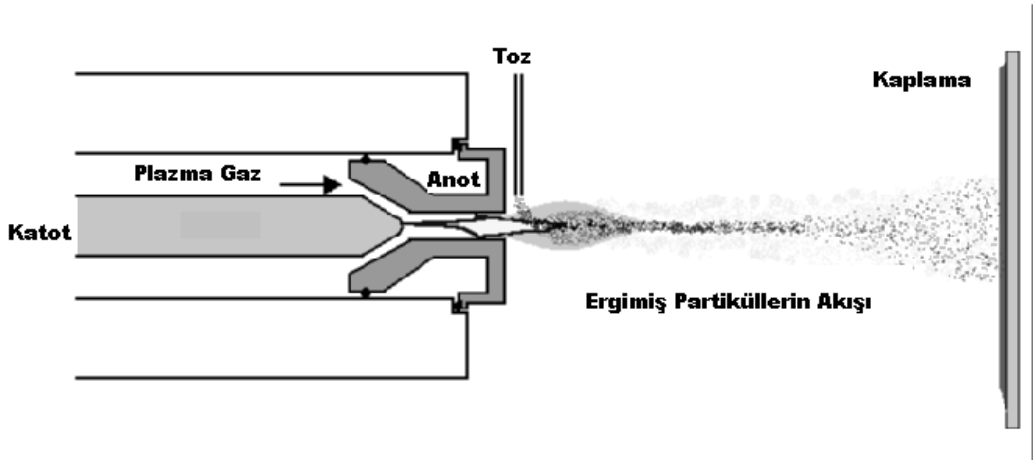
Bu yöntem, yanıcı gazların ısıl ve kinetik enerjilerinden faydalanmaktadır. Boşluk seviyesi düşük, iyi bağlanmış tabakalar elde edilmektedir. Püskürtme tabancası uzun namlu biçimindeki bir tüpten oluşmakta ve toz halindeki kaplama malzemesi azot gazı süspansiyonunda verilmektedir [38].

Bu yöntemde, alev sıcaklığı yaklaşık 3000 ^{o}C sıcaklıkta, saniyede 5-10 defa birbiri ardına patlamalar gerçekleştirilir. Patlatmalı püskürtme yöntemini diğerlerinden ayıran esas fark kesintisiz yapılıyor olmasıdır. Toz parçacıklarının hızının 900 m/s'e çıkabildiği bu yöntemde taneciklerin yüzeye yüksek kinetik enerjiyle çarpması sonucu tabakalar arası yapışıp kaynaşma çok iyidir. Bu yüzden yüksek bağlantı mukavemetli, yoğun kaplamalar elde edilir [22,27]. Yöntem çok gürültülü olup ses şiddeti 150 dB'den fazladır. Bu yüzden işlem ses izolasyonlu bir odada yapılmakta ve operatör tarafından uzaktan kontrol edilmektedir [38].

Sistemde kullanılan namlu her patlatma sonrası nitrojen gazı ile temizlenmektedir. Namlunun çapı yaklaşık 25,4’ mm dir ve her patlatma sonrasında yaklaşık 25 mm çapında birkaç mikron kalınlığında kaplama tabakaları oluşur. Titiz bir püskürtme sonrası düzenli kalınlıkta ve yapıda kaplamalar elde edilebilir. Bu yöntemde hemen hemen bütün metalik, seramik ve sermet malzemeler püskürtülebilmektedir[34].

3.2.4 Plazma Püskürtme Yöntemi

Plazma kaplama yöntemi bir tabakanın kuvvetlendirilmiş yüzey özellikleri ile bir ana metalin farklı nitelikli bir tabaka ile kombinasyonuna imkan sağlar. Endüstride kullanılan plazma sprey yardımıyla, aşınma ısınma ve korozyon ile bozulmuş bölgelerin kaplanmasıyla tamiratı da mümkündür. Plazma kaplama aynı zamanda işlem esnasında ana metal sıcaklıklarını düşük tutarak hassas parçaların ısıl deformasyona uğrama endişesini ortadan kaldırır [39].



Şekil 3.15. Plazma püskürtme yöntemi ile kaplamanın şematik görünümü.

Plazma püskürtme yöntemini açıklamadan önce kısaca plazmanın ne olduğunu tanımlamak gerekirse; eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulunduran, genellikle maddenin 4. hali olarak nitelendirilen yoğunlaştırılmış bir gazdır. Normal gazlar (CO, CO_2, SO_2) ısıtıldıklarında klasik fizik ve termodinamik kanunlarına uygun davranış gösterirler. Plazma ise bu kanunların dışında bir davranış göstermektedir. Bu nedenle bilinen gaz halinden daha yüksek enerji seviyesine ulaşmış gaz halini tanımlamak için plazma terimi kullanılmaktadır [39].

Plazma püskürtme diğerlerine oranla genel düşünce açısından daha düz fakat işlev bakımından daha komplekstir. Bir plazma gaz (genel olarak argon veya diğer inert

gazlardan biri, tamamlayıcı olarak ta düşük bir yüzde de hidrojen gibi entalpi artırıcı bir gaz) tabancanın arka tarafında ilk olarak oluşur ve gaz girdap şeklinde dönerek anot ağızlığın uç kısmında çıkar. Katottan anoda doğru tamamlanan akımın oluşturduğu elektrik arkı sonraki aşamada dış yüzeyde, plazma gazın girdap momentumuna sahip eksenel dönme ile dışarıya çıkmasını sağlar. Plazma gazın hemen çıkış sıcaklığı, tipik bir 40 kW doğru akım kaynağı için 15000 K den fazladır. Plazma gaz sıcaklığı çıkıştan itibaren çok hızlı bir şekilde düşüş gösterir, bununla birlikte alevin bu en sıcak parçalarında proses oluşum göstermeye başlar. Bu partiküller yaklaşık olarak 40 mikrometre çapında, alevde ergitilip yüksek hızda (100-300 m/saniye) hızlandırılarak yüzeye çarpıp hızlı bir soğumaya uğrarlar (106 K/saniye). Plazma sprey 50 mikrometreden daha kalın kaplamaların gerektiği endüstride geniş yer alır. Bunlara nikel ve demir alaşımları, alüminyum oksit ve zirkonya esaslı seramikler gibi refrakter seramiklerde dahildir [20].

Plazma püskürtme yöntemi ile yapılan kaplamalarda bağlanma mukavemetini artırmak amacıyla, kaplama öncesi yüzeyin pürüzlendirilmesi zorunludur. Kaplama uygulanacak yüzeye ergitilen partiküller hızla püskürtülür ve çarpıtılır. Böylece yüzeye çarpan partiküller hızla soğuyarak katılaşırlar. Yüzeydeki pürüzlükler, ergimiş partiküllerin katılaşması sırasında gerilmelerin yoğunluk kazandığı bölgelerdir. Bu bölgesel gerilme noktaları yüzeye çarpan partiküllerin yüzeye tutunmasını sağlar. Plazma sprey kaplamaların yapısı yüzeye paralel tabakalar şeklindedir. Yüzeye dik bağlanma kuvvetini artırmak için önce yüzey pürüzlendirilir ve böylece kaplama işlemi sonucu, yüzeye tamamen paralel tabakalar yerine dalgalı tabakalar oluşturulur [39].

Plazma sprey yöntemini etkileyen birçok parametre vardır. Bunların bir kısmı kaplamada kullanılan tabancaya bir kısmı ise kaplama tozuna bağlıdır. Tabancayla ilgili olanlar, taşıyıcı gaz, plazma gazı, gerilim akım ve sprey mesafesi vb. tozlarla ilgili olan parametreler ise; tozun boyutu, dağılımı ve morfolojisidir.

Plazma spreyin faydaları şöyle sıralanabilir.

- Kaplamada kullanılanlar; metaller, seramikler veya bu malzemelerin diğer kombinasyonlarıdır.
- Kaplama formunda mikroyapı nispeten daha iyi, eşit büyüklükte taneler ve tane sınırları köşeli değildir [20].

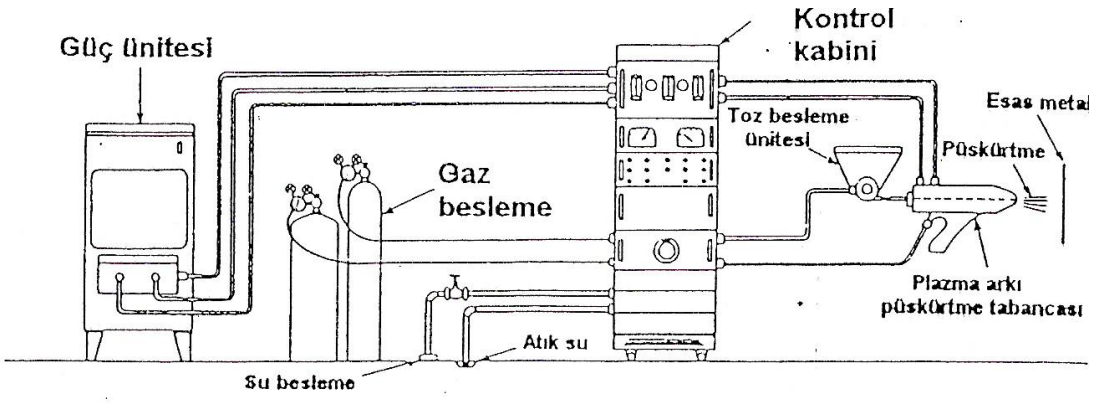
Kaplamanın yapışma mukavemetine etki eden faktörlerden biriside kaplamanın kalınlığıdır. Kaplama kalınlığının artmasıyla tabakadaki iç gerilmeler artmakta, bu gerilmelerin bağ mukavemetini aştığı anda kaplama tabakasında kopma meydana gelmektedir. Uygulamada, amaca uygun olan en ince kaplama ile çalışmak daha uygundur [40].

Alevle püskürtme ve elektrik ark püskürtme yöntemlerine üretim maliyeti plazma arkı ile püskürtme yönteminde daha fazla olmasına karşın, üretim koşullarının sağladığı çeşitlilik ve esneklik ve buna ilaveten yöntemin kaplama malzemesine sağlayabileceği üstün özellikler bu tekniğin endüstride çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmasına sebep olmuştur [33].

Plazma püskürtme sistemi;

- Kontrol kabini ünitesi,
- Güç ünitesi,
- Toz besleme ünitesi,
- Gaz besleme ünitesi,
- Soğutma sistemi,
- Püskürtem tabancası

Şeklindeki bileşenlerden oluşur. Temel bir plazma jeti ile püskürtme sisteminin bileşenleri Şekil 3.16'da görülmektedir [38].



Şekil 3.16. Plazma püskürtme sisteminin bileşenlerinin şematik gösterimi [38].

Plazma püskürtme yöntemi, işlemin uygulandığı atmosfere göre çeşitli sınıflara ayrılmaktadır;

- Atmosferik plazma sprey yöntemi (APS),
- Vakum plazma püskürtme yöntemi (VPS),
- Düşük basınç altında plazma püskürtme yöntemi (LPP),
- Yüksek güç plazma püskürtme yöntemi,
- Su altı plazma püskürtme yöntemi,
- Eksenel enjeksiyonlu plazma püskürtme yöntemi,
- Reaktif plazma püskürtme yöntemi.

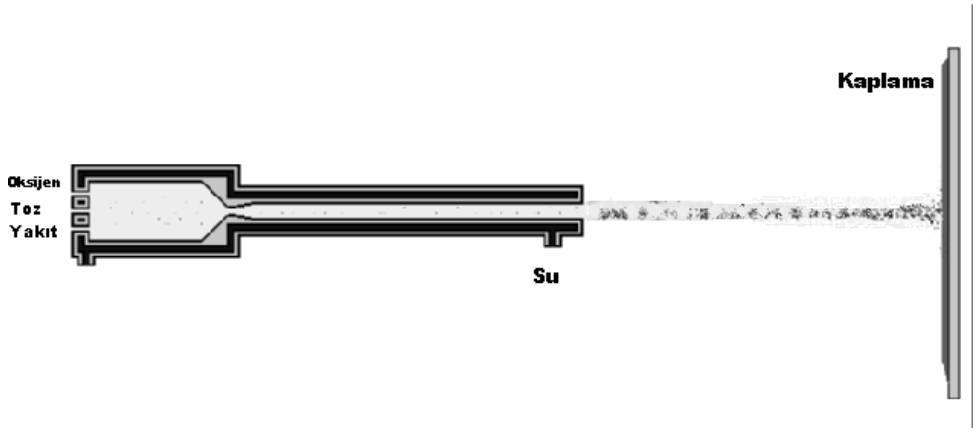
Bu yöntemler arasında endüstriyel alanda yaygın olarak, atmosferik plazma yöntemi (APS), vakum altında plazma yöntemi (VPS) ve düşük basınç altında plazma yöntemi (LPP) kullanılmaktadır ve diğer yöntemler hala gelişme aşamasındadır [38,39].

3.2.5 Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt ile Püskürtme Yöntemi (HVOF)

Yüksek hızlı oksi-yakıt püskürtme yönteminde, oksijen ve sıvı yakıt bir odacıkta yakıldıktan sonra tozların enjekte edildiği nozula doğru yönlendirilir. Nozulda bulunan tozlar ve yanıcı gazlar, gaz jetinin genleşmesi ile ses üstü bir hızda atmosfere çıkmaktadır.

Bu yöntemde özel bir alev püskürtme mekanizması esas alınır, sıkıştırılmış alev makinesinin çıkışında serbest genleşmeye uğrar ve bu suretle beklide uçağın ses hızına oranla gaz hızlandırılması sağlanır. Kaplanacak malzeme çok hızlı şekilde alevle püskürtülmesi ile ana malzemeye çarpar ve partiküller yüzeye ve kendi aralarında iyi bir bağ oluşturacak şekilde ince bir şekilde dağılır. Fakat kaplamanın yapışma kalitesi, dağılabilirliği ve yoğunluğu plazma kaplama kadar iyi değildir [20].

Bu yöntemin en büyük özelliği, püskürtme anında esas metalin yüzeyi yaklaşık 100 ^{o}C'yi aşmamasıdır. Bundan dolayı malzemede distorsiyon ve metalurjik olarak bir değişme meydana gelmez. Püskürtme torcu ve esas yüzey arasındaki mesafenin ayarlanmasıyla esas yüzeyde anormal bir sıcaklık artışı görülmez [41].



Şekil 3.17. HVOF ile kaplamanın şematik görünümü.

Bu yöntemde uygulama sıcaklığı 3000 ^{o}C civarındadır. Toz parçacıklarının hızı 600 m/s'e kadar ulaşabilir. 80 MPa'dan fazla bağ mukavemeti ve %1'den az boşluk içeren kaplamalar elde edilebilir. Kaplamanın mikroyapı ve mekanik özellikleri plazma arkı püskürtme yöntemindeki kaplamlara benzemekle birlikte daha yüksek yoğunluğa ve daha yüksek bağlantı mukavemetine ulaşabilir. Bunun sebebi parçacık hızının yüksek hızlı oksi-yakıt püskürtme yönteminde daha yüksek olmasındandır [27,33].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Kaplama Prosesi

Bu çalışma kapsamında 2014-T6 kalite alüminyum alaşımından çıkarılan 37mm çapında ve 10 mm kalınlığındaki numuneler plazma püskürtme ve alev püskürtme yöntemiyle Tablo 4.1'de verilen tozlarla kaplanmıştır. Kaplamaların altlığa iyi bağlanmasını sağlamak amacıyla aluminyum altlığın yüzeyi kum püskürtülerek pürüzlendirildikten sonra Ni-Al ara bağlayıcı ile kaplanmış ve daha sonra ara bağlayıcı üzerine söz konusu tozlar uygulanmıştır.

Tablo 4.1. Kullanılan kaplama tozlarının toz karışım oranları.

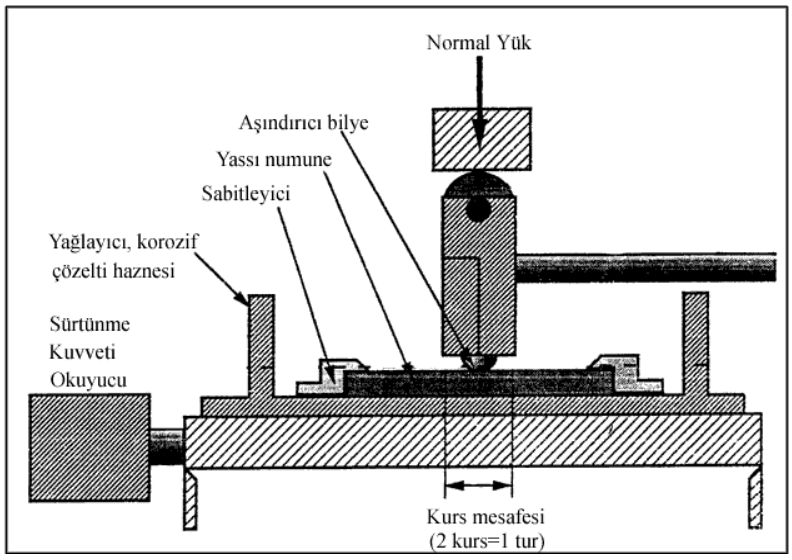
Kaplama No	**Kaplama Yöntemi**	**Toz Karışım Oranları (% Ağırlık)**			
		Al-12Si	**SiC**	**MoO**	**B_4C**
1	*Plazma Püskürtme*	75	15	10	-
2		65	25	10	-
3		45	45	10	-
4	*Alev püskürtme*	75	5	10	10
5		75	-	10	15

4.2 Kaplamaların Karakterizasyonu

Kaplamaların karakterizasyonu; mikroyapı incelemeleri, XRD çalışmaları ve mikrosertlik ölçümleri ile yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ile metalografik yöntemlerle hazırlanan numunelerin kalınlık kesitinde yapılmıştır. Bu amaçla bakalite alınan numuneler standart yöntemlerle zımparalanıp parlatılmış ve optik mikroskopta incelenmiştir. XRD çalışmaları Philips marka cihazda yapılmıştır. Sertlik ölçümleri, numunelerin yüzeylerinde zımparalama ve parlatma işlemleri sonrasında Shimadzu marka mikrosertlik cihazında, Vickers ucu kullanılarak 500 gr. yük ile yapılmıştır. Sertlik ölçümleri 10 ölçümün ortalaması alınarak değerlendirilmiştir.

4.3 Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri salınım hareketli (reciprocating) aşınma test cihazında (Şekil 4.1) kuru sürtünme koşullarında ve üç farklı (HCl, H_2O_2 çözeltileri ve saf su) sıvı ortam içerisinde içinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan HCl ve H_2O_2 çözeltilerinin bileşimi sırası ile "30 g/l NaCl + 10 ml/l HCl" ve "57 g/l NaCl + 10 ml/l H_2O_2" dir. Kaplamalar, aşınma deneyinden önce 1200 gritlik SiC zımpara ile hafifçe zımparalanmıştır. Altlık malzeme için böyle bir işlem yapılmamıştır. Kuru ortamda yapılan aşınma deneyleri esnasında karşı malzeme olarak 10mm çapında alümina (Al_2O_3) ve 52100 kalite çelik top, sıvı ortam içerisinde gerçekleştirilen aşınma deneylerinde sadece 10mm çapında alümina (Al_2O_3) top kullanılmıştır. Kuru ortamda yapılan aşınma deneyleri 20±2 ^oC sıcaklıkta ve %50±2 nem seviyelerinde, 50-100-150-200 g olmak üzere dört farklı yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sıvı ortam içerisinde gerçekleştirilen aşınma deneyleri 200g sabit yük altında yapılmıştır. Aşınma deneylerinde kayma hızı 0,026 ms^{-1} olup, toplam kayma mesafesi 120 m'dir. Deneyler süresince sürtünme kuvveti ve dolayısıyla da sürtünme katsayısı devamlı olarak kaydedilmiştir. Aşınma deneyleri bittikten sonra aşınma yüzeylerinin profili alınmış ve Leica marka sterio mikroskopta aşınma yüzeyleri incelenmiştir.



Şekil 4.1. Salınım hareketli (reciprocating) aşınma deney cihazının şematik görünümü

5. DENEY SONUÇLARI ve İRDELENMESİ

5.1 Kaplama Karakterizasyonu Sonuçları

Metalografik çalışma sonrası kaplamaların kalınlık kesitinden alınan optik mikroskop fotoğrafları Şekil 5.2'de verilmiştir. Ayrıca 20 ve 40 büyütmede alınan fotoğraflar Ek A'da, sunulmuştur. Şekil 5.2'deki fotoğrafların üst kısmında kaplama, alt kısmında 2014-T6 altlık malzeme ve arada ise Ni-Al ara bağlayıcı yer almaktadır. Kaplama tabaka görünümünde olup, kaplamada bulunan poroziteler siyah renkte görülmektedir. Takviye partiküller (SiC ve B_4C) koyu renkte olup, MoO partikülleri açık renklidir. Kaplamaların ortalama kalınlıklar, ortalama sertlikleri ve mikroyapı bileşen oranları Tablo 5.1'de verilmektedir. Kaplamadaki mikroyapı bileşen oranları lineer kesişme yöntemine göre hesaplanmıştır.

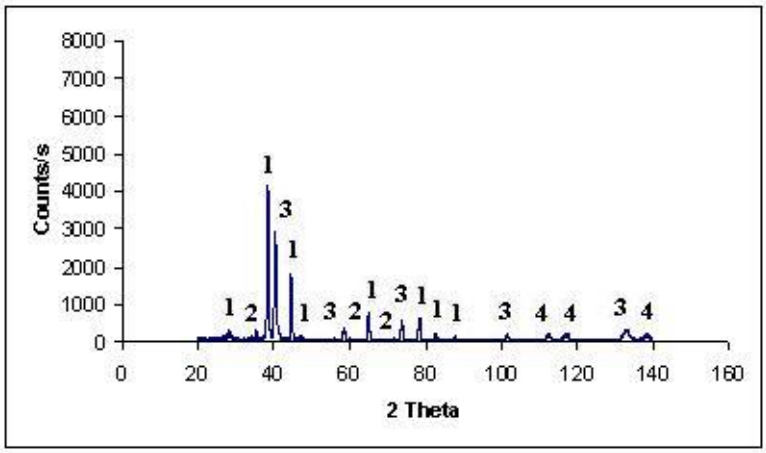
Tablo 5.1. Kaplamaların mikroyapı bileşen oranları

Kaplama No	Sertlik ($HV_{0,5}$)	Kalınlık (µm)	Mikroyapı Bileşen Oranları			
			SiC (%)	MoO (%)	B_4C (%)	Porozite (%)
2014-T6	130 ± 15	-				
1	135 ± 12	510 ± 17	3	8	0	2
2	140 ± 18	490 ± 13	5	5	0	2
3	160 ± 13	450 ± 8	7	9	0	3
4	75 ± 23	400 ± 1	1	5	2	4
5	75 ± 4	280 ± 9	0	6	6	7

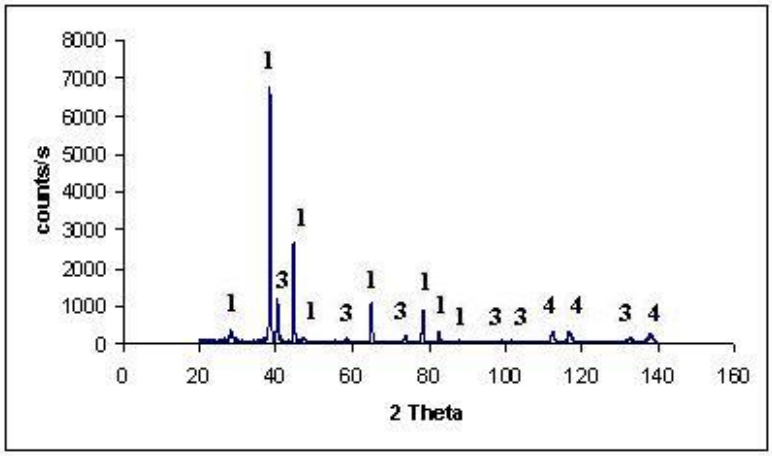
Altlık malzemenin (2014-T6) sertliğine göre bir kıyaslama yapıldığında plazma püskürtme yöntemi (1, 2 ve 3 nolu kaplamalarda) sertliği artırırken, alev püskürtme yöntemi (4 ve 5 nolu kaplamalarda) sertliği düşürmüştür. Plazma püskürtme yöntemi

ile uygulanan kaplamalar arasında SiC içeriği en yüksek olan 3 nolu kaplama en yüksek sertliğe, SiC içeriği en düşük olan 1 nolu kaplama en düşük sertliğe sahiptir. Diğer taraftan alev püskürtme yöntemi ile uygulanan kaplamalar arasında B_4C içerikleri farklı olmasına rağmen hemen hemen aynı sertlik değerleri elde edilmiştir. Kaplamaların mikroyapı bileşen oranlarının (Tablo 5.1) başlangıçta belirlenen toz karışım oranlarından (Tablo 4.1) daha düşük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi olarak kaplama prosesinde, kaplama tozlarının proses esnasında yanması ve yüzeye oksit olarak kaplanması gösterilebilir.

XRD çalışmaları sadece en fazla SiC içeren 3 nolu kaplama ve SiC içermeyen 5 nolu kaplama için yapılmış olup inceleme sonucunda elde edilen değerler Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

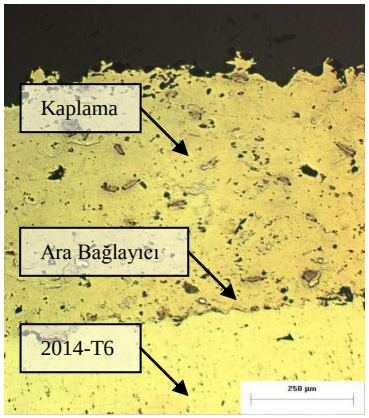


(a)

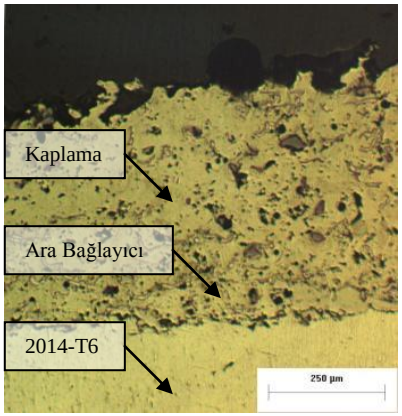


(b)

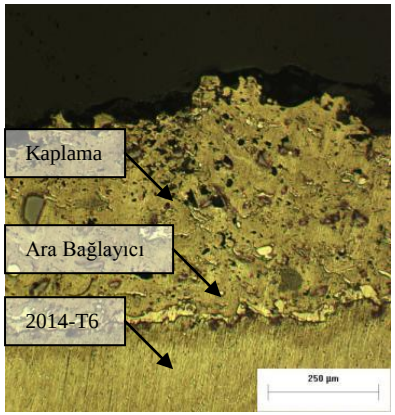
Şekil 5.1. XRD sonuçları
(a) Kaplama 3 (b) Kaplama 5 (1:Al-Si, 2:SiC, 3:Mo, 4:Al)



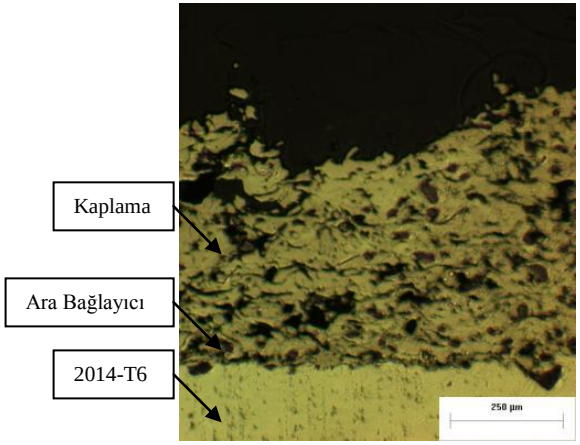
(a)



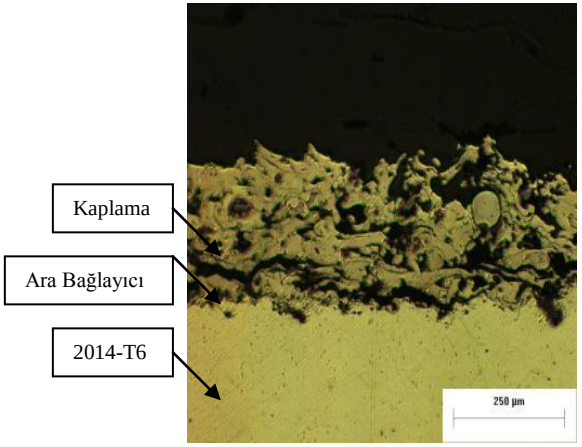
(b)



(c)



(d)



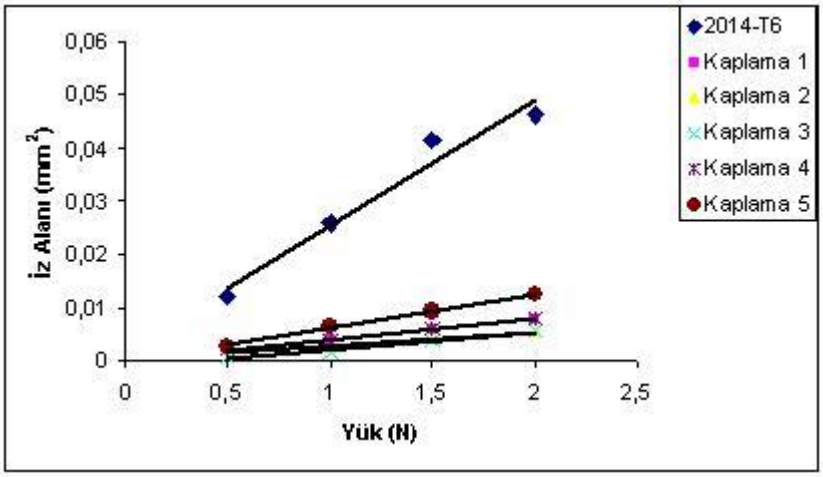
(e)

Şekil 5.2. (a) 1 (b) 2 (c) 3 (d) 4 (e) 5 nolu kaplamaların optik mikroskop kesit görüntüleri

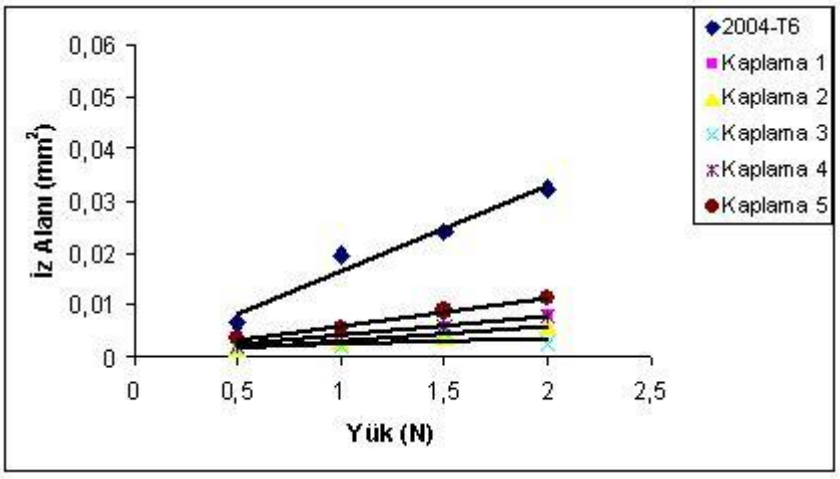
5.2 Aşınma Deneyi Sonuçları

5.2.1 Kuru Ortam Aşınma Deneyleri Sonuçları

Kaplamaların ve altlık malzemenin, Al_2O_3 ve çelik top ile yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerine ait iki ve üç boyutlu yüzey profilleri EK B'de görülmektedir. Üç boyutlu yüzey profillerinden hesaplanan iz alanları EK-C'de verilmiş ve Şekil 5.3'de deney yüklerine göre değişimi çizilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.3. Kuru sürtünme koşullarında (a) Al_2O_3 ve (b) Çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin kesit alanının deney yükü ile değişimi.

Gerek Al_2O_3 bilye ve gerekse çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde artan deney yükü ile aşınma miktarı (iz alanı) doğrusal olarak artmıştır. Bu doğrunun eğiminden mm^2/N biriminde hesaplanan aşınma hızı değerleri Tablo 5.2 de görülmektedir. Altlık malzemenin Al_2O_3 bilyeye karşı aşınma hızı referans alınarak,

$$\% \text{ Bağıl Aşınma Direnci} = \frac{\text{Altlık malzemenin } Al_2O_3 \text{ bilyeye karşı aşınma hızı}}{\text{Diğer malzemelerin aşınma hızı}} \times 100$$

formülüne bağlı olarak aşınma direncine çevrilmiş ve Tablo 5.3'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Kuru sürtünme koşulları için Şekil 5.2'den hesaplanan aşınma hızı değerleri

Kaplama No	**Sertlik ($HV_{0,5}$)**	**Kalınlık (µm)**	**Aşınma Hızı (mm^2/N) x10^3**	
			Al_2O_3 Bilye	**Çelik Bilye**
2014-T6	130 ± 15	-	25	16,5
1	135 ± 12	510 ± 17	3,9	4
2	140 ± 18	490 ± 13	2,8	3
3	160 ± 13	450 ± 8	2,5	2,2
4	75 ± 23	400 ± 1	4	4
5	75 ± 4	280 ± 9	6,2	5,7

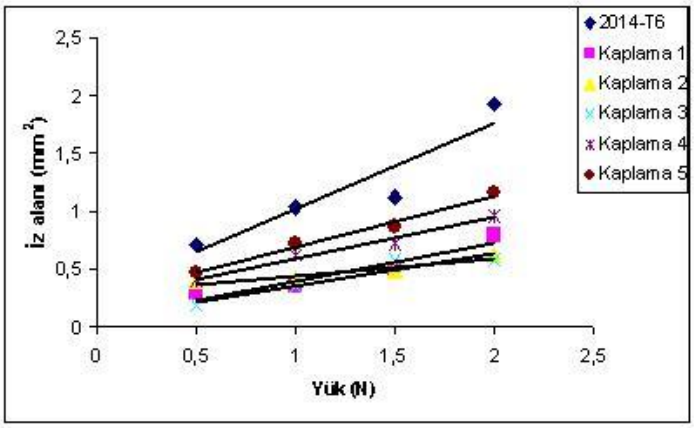
Tablo 5.3. Kuru sürtünme koşulları için % bağıl aşınma direnci

Kaplama No	**Sertlik ($HV_{0,5}$)**	**Kalınlık (µm)**	**% Bağıl Aşınma Direnci**	
			Al_2O_3 Bilye	**Çelik Bilye**
2014-T6	130 ± 15	-	100	152
1	135 ± 12	510 ± 17	641	625
2	140 ± 18	490 ± 13	893	833
3	160 ± 13	450 ± 8	1000	1135
4	75 ± 23	400 ± 1	625	625
5	75 ± 4	280 ± 9	403	439

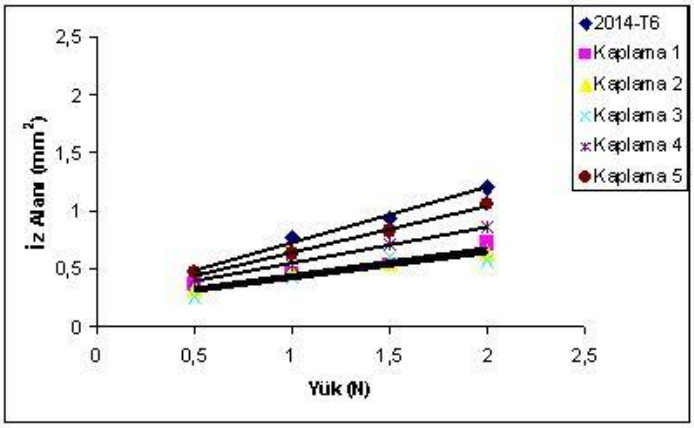
Şekil 5.3'de görüldüğü gibi 2014-T6 alaşımına SiC veya B_4C takviyeli Al matrisli kaplama uygulanması durumunda aşınma hızında belirgin bir azalma olmaktadır. İncelenen kaplamalar içerisinde 3 nolu kaplama her iki bilyeye karşı en düşük aşınma hızını göstermiştir. Karşı malzeme olarak Al_2O_3 bilye kullanılması halinde, en yüksek aşınma direncine sahip olan 3 nolu kaplama altlık malzemeye nazaran yaklaşık 10 kat daha fazla aşınma direnci göstermiştir. Karşı malzeme olarak çelik bilye kullanılması halinde ise bu oran yaklaşık 11 katına yükselmektedir. Bu durum göstermektedir ki, karşı malzeme olarak Al_2O_3 ve çelik bilyelerin kullanılması kaplamaların aşınma direncini bir miktar değiştirmektedir. 4 ve 5 nolu kaplamalar ise SiC içeren kaplamalara nazaran daha düşük aşınma direnci sergilemişleridir. 2014-T6 altlık malzemeye kıyasla karşı malzeme olarak Al_2O_3 bilye kullanılması halinde 4 nolu kaplama yaklaşık 6 kat, 5 nolu kaplama ise yaklaşık 4 kat aşınma direnci göstermiş. Karşı malzeme olarak çelik top kullanılması halinde ise bu oranlar yine; 4 nolu kaplama için yaklaşık 6 kat, 5 nolu kaplama için ise yaklaşık 4 kat olmuştur. 5 ve 6 nolu kaplamalar, 2014-T6 altlık malzemeden daha düşük sertliğe sahip olmasına rağmen, çok yüksek aşınma direnci sergilemektedir.

Ek B'de verilen aşınma iz alanı resimleri incelendiğinde bu durum daha açık görülmüştür. Yükün artması ile aşınma izlerinin genişlediği ve çelik bilye kullanılması halinde yüzeyde oluşan oksit tabakasının arttığı görülmektedir

Aşınma alanlarının hesaplandığı, bilyelerin aşınma yüzeylerinin görüntüleri EK D'de, diğer aşınma iz alanları ise EK-E'de gösterilmiştir. Şekil 5.4'de aşınma deneylerinde karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 ve çelik bilyelerin aşınma iz alanı-yük eğrileri görülmektedir. Her iki bilyedeki aşınma, artan deney yükü ile doğrusal olarak artmakta olup, doğruların eğiminden mm^2/N biriminde hesaplanan aşınma hızı değerleri Tablo 5.4' de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 5.4. Kuru sürtünme koşullarında (a) Al_2O_3 ve (b) Çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, karşı malzeme yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin kesit alanının deney yükü ile değişimi.

Tablo 5.4. Kuru ortam sürtünme koşullarında yapılan aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerin aşınma hızı değerleri

Kaplama No	**Aşınma Hızı (mm^2/N) $x10^3$**	
	Al_2O_3 Bilye	**Çelik Bilye**
2014-T6	925	640
1	378	382
2	345	366
3	330	348
4	509	468
5	610	562

Kaplamaların aşınma deneylerinde kullanılan bilyeler, altlık malzemenin aşınma deneylerinde kullanılan bilyelere nazaran daha düşük aşınma hızına sebep olmuştur. İncelenen sonuçlar içerisinde, iki bilye için en yüksek aşınma direnci 3 nolu kaplamanın aşındırılması halinde görülmüştür. Al_2O_3 bilye için aşınma direnci incelendiğinde en yüksek aşınma direncini 3 nolu kaplamanın aşındırılması esnasında göstermiştir ve yaklaşık altlık malzemenin 3 katıdır. Çelik bilye için bu oran altlık malzemenin yaklaşık 2 katına düşmektedir. Bu durum bir kez daha göstermektedir ki Al_2O_3 bilye çelik bilyeye nazaran daha fazla aşındırmaktadır. 4 ve 5 nolu kaplamaların aşındırılması esnasında ise her iki bilyedeki aşınma dirençleri düşmektedir.

Aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının değişimi EK F'de verilmiştir. Bu grafiklerde sürtünme katsayısının sabitlenip kararlı hale geldiği değer Tablo 5.5'de verilmiştir.

Tablo 5.5. Kuru ortam sürtünme koşullarında yapılan aşınma deneyleri sonucu kaplamalara ve kullanılan altlık malzemeye ait sürtünme katsayısı değerleri

Kaplana No	**Sürtünme Katsayısı**							
	Al_2O_3 Bilye				**Çelik Bilye**			
Yük (g)	**50**	**100**	**150**	**200**	**50**	**100**	**150**	**200**
2014-T6	1,23	1,12	0,99	0,97	1,07	0,97	0,8	0,85
1	1,14	0,92	0,85	0,81	1,17	0,84	0,83	0,83
2	0,83	0,78	0,72	0,76	2	0,88	0,65	0,84
3	0,98	1,26	1,14	1,08	-	0,75	1,01	0,93
4	1,06	1,15	1,08	1,17	1,33	1,36	1,3	1,29
5	1,65	1,57	1,22	1,22	1,31	1,54	1,22	1,45

Tablo 5.5'de görüldüğü gibi, yük arttıkça kaplamaların sürtünme katsayılarında düşüş meydana gelmiştir. Kaplamalarda altlık malzemeye nazaran daha düşük sürtünme katsayısı değerleri görülmüştür. Özellikle Al_2O_3 bilye kullanılması halinde sürtünme katsayısındaki düşüşün çelik bilyeye nazaran daha fazla olduğu görülmektedir. Kaplamaların etkisi ile aşınmaya karşı gösterilen direnç bu düşüşü etkilemektedir. Aynı şekilde alev püskürtme yöntemi ile kaplanan 4 ve 5 nolu kaplamalarda sürtünme katsayısının plazma püskürtme yöntemine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

5.2.2 Sıvı Ortam Aşınma Deneyleri Sonuçları

Kaplamaların ve altlık malzemenin, aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerine ait iki ve üç boyutlu yüzey profilleri EK G'de görülmektedir. Kaplamaların ve altlık malzemenin, Al_2O_3 bilye ile 200 g yük altında ve 3 ayrı sıvı ortamda yapılan aşınma deneyleri sonrası oluşan aşınma izlerinden hesaplanan aşınma iz alanı değerleri Tablo 5.6'da verilmiştir.

Tablo 5.6'da görüldüğü gibi sıvı ortam içerisinde yapılan deneylerde de aşınma miktarında azalma gözlemlenmiştir. HCl çözeltisi içerisinde en fazla aşınma direncine sahip olan kaplama 5 nolu kaplamadır. H_2O_2 çözeltisi içerisinde 3 nolu kaplama en fazla aşınma direncine sahip olan kaplamadır. Saf su içerisinde yapılan deneylerde de görülmüşürki en fazla aşınnma direncine sahip kaplama 3 nolu kaplamadır. H_2O_2 çözeltisi içerisinde yapılan deneyde, kuru ortamda yapılan deneyde olduğu gibi 4 ve 5 nolu kaplamalarda aşınmada miktarında artış olduğu gözlenmektedir. HCl çözeltisi içerisinde yapılan deneyde çözeltinin asidik olması sebebi ile B_4C miktarından bağımsız olarak aşınma direncinin gittikçe arttığı görülmektedir. Saf su içerisinde yapılan deneylerde altlık malzemenin aşınma direncinin çok düşük ancak kaplamaların aşınma direncinin çok yüksek olduğunu görülmüştür. Üç farklı sıvı ortam arasında, H_2O_2 çözeltisi içerisinde yapılan deneylerde HCl çözeltisi içerisinde ve saf su içerisinde yapılan deneylere nazaran B_4C içermeyen kaplamaların ve altlık malzemenin daha yüksek bir aşınma direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir. B_4C içeren kaplamalar arasında ise en fazla aşınma direnci saf su içerisinde yapılan deneylerde elde edilmiştir. Ek G'de verilen aşınma iz alanı resimleri incelendiğinde HCl çözeltisi içerisinde aşınma izlerinin daha büyük ve belirgin olduğu görülmektedir.

Yapılan incelemeler sonucunda kuru ortamda ve sıvı ortamda aynı şartlarda (200 g-Al_2O_3 bilye) yapılan deneyler sonrasında elde edilen aşınma iz alanı değişimlerine göre hesaplanmış olan bağıl aşınma hızı Tablo 5.7 'de verilmiştir.

Tablo 5.6. 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile kuru ortamda ve sıvı ortam içerisinde yapılan aşınma deneylerinde kaplamaların yüzeylerinde oluşan aşınma izlerinin boyutları ve kesit alanları.

Kaplama No	**Ortam**	**Ortalama İz Genişliği (mm)**	**Ortalama İz Derinliği (mm)x10^3**	**Ortalama İz Alanı (mm^2)x10^3**
2014-T6	**Kuru**	1,37	43,05	46,5
	HCl Çözeltisi	1,71	50,7	68
	H_2O_2 Çözeltisi	0,98	15,4	12
	Saf Su	1,71	59,5	80,2
1	**Kuru**	0,82	11,86	7,7
	HCl Çözeltisi	0,96	13,83	10,5
	H_2O_2 Çözeltisi	0,68	9,77	5
	Saf Su	-	-	-
2	**Kuru**	0,68	10,05	5,3
	HCl Çözeltisi	0,86	11,1	7,5
	H_2O_2 Çözeltisi	0,62	0,62	3
	Saf Su	-	-	-
3	**Kuru**	0,71	10,06	5,6
	HCl Çözeltisi	0,75	7,6	4,5
	H_2O_2Çözeltisi	0,41	2,73	0,9
	Saf Su	0,67	2,1	1,1
4	**Kuru**	0,95	10,7	8
	HCl Çözeltisi	0,77	7	4
	H_2O_2 Çözeltisi	0,86	7,9	5,5
	Saf Su	-	-	-
5	**Kuru**	1,03	15,46	12,5
	HCl Çözeltisi	0,73	6,23	3,5
	H_2O_2 Çözeltisi	0,96	11,47	8,7
	Saf Su	0,62	3,8	1,8

Tablo 5.7. 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile kuru ortamda ve sıvı ortam içerisinde yapılan aşınma deneylerinde kaplamaların % bağıl aşınma direnci

Kaplama No	Kuru Ortam	HCl Çözeltisi	H_2O_2 Çözeltisi	Saf Su
2014-T6	100	68	388	57,98
1	604	443	930	
2	877	620	1550	
3	830	1033	5813	4228
4	581	1163	845	
5	372	1329	547	2584

Aşınma deneylerinde karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma alanlarının hesaplandığı, bilyelerin aşınma yüzeylerinin görüntüleri EK H'de gösterilmiştir. Aşınma iz alanı değerleri Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8. 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile kuru ortamda ve sıvı ortam içerisinde yapılan aşınma deneylerinde karşı malzemede oluşan aşınma iz alanları.

Kaplama No	Karşı Malzeme Aşınma İz alanı (mm^2) $x10^3$			
	Kuru Ortam	HCl Çözeltisi	H_2O_2 Çözeltisi	Saf Su
2014-T6	1,2	2,7	2,7	4,3
1	0,8	0,6	2	-
2	0,6	0,6	1,5	-
3	0,6	0,3	0,7	0,5
4	0,9	1	1	-
5	1,1	1,2	1,3	0,6

Üç farklı sıvı ortam içerisinde yapılan deneyler için de en yüksek aşınma direnci 3 nolu kaplamanın aşındırılması halinde görülmüştür. Saf su içerisinde yapılan aşınma deneylerinde kullanılan bilyeler daha yüksek aşınma direnci görtermektedir. Her iki korozyon çözeltisi içinde yapılan deneylerde altlık malzemenin aşındırılması için kullanılan bilyeler yaklaşık aynı aşınma direnci göstermektedir, fakat saf su içerisinde yapılan deneyde kullanılan bilye çok düşük bir aşınma direnci göstermiştir. Genel olarak kuru ortamda yapılan aşınma deneylerinde kullanılan bilyeler daha yüksek aşınma direnci göstermiştir.

Sıvı ortam içerisinde yapılan aşınma deneyleri sırasında sürtünme katsayısının tamamının değişimi EK I'da görülmektedir. Deneylerde, sürtünme katsayısının aşınma deneyleri sırasında kararlı hale geldiği değerler Tablo 5.9'de verilmiştir.

Tablo 5.9. 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile kuru ortamda ve sıvı ortam içerisinde yapılan aşınma deneylerinde elde edilen sürtünme katsayısı değerleri.

Kaplama No	**Sürtünme Katsayısı**			
	Kuru Ortam	**HCl Çözeltisi**	**H_2O_2 Çözeltisi**	**Saf Su**
2014-T6	0,97	0,83	1,26	0,92
1	0,81	0,54	1,12	-
2	0,76	0,38	1,38	-
3	1,08	0,36	0,6	0,63
4	1,17	0,33	0,72	-
5	1,22	0,37	0,97	0,65

Tablo 5.9'de görüldüğü gibi HCl çözeltisi içerisinde yapılan deneylerde kaplamalar altlık malzemeden daha düşük aşınma direnci sergilemiştir. Bu durum H_2O_2 çözeltisi için çok belirgin değildir. 4 ve 5 nolu kaplamalarda sürtünme katsayısında artış görülmektedir. Saf su içerisinde sürtünme katsayısının kuru ortama gore daha düşük olduğu görülmüştür. Kuru ortam ile kıyaslandığında H_2O_2 çözeltisi içerisinde SiC içeren kaplamalar (1, 2 ve 3) daha yüksek sürtünme katsayısı göstermiştir. HCl çözeltisi ve saf su içerisinde ise her zaman en düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir.

Korozif ortamda yapılan deneylerde kullanılan çözeltilerin deney başlangıç ve bitişindeki pH değerleri arasındaki fark Tablo 5.10'da görülmektedir.

Tablo 5.10. Korozyon çözeltisi pH değişimi

Kaplama No	**HCl Çözeltisi**		**H_2O_2 Çözeltisi**	
	Başlangıç pH	**Bitiş pH**	**Başlangıç pH**	**Bitiş pH**
2014-T6	1,15	1,2	5,5	8,9
1	1,15	1,25	5,5	9,2
2	1,15	1,35	5,5	9
3	1,15	1,4	5,5	9,2
4	1,15	1,4	5,5	9
5	1,15	1,4	5,5	9,4

6. GENEL SONUÇLAR

Farklı oranlarda SiC, B_4C, Al-12Si ve MoO içeren tozların, 2014 kalite alüminyum alaşımı üzerine plazma püskürtme ve alev püskürtme yöntemiyle kaplanarak, kuru ve korozif ortamda aşınma davranışlarının incelendiği bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

1- Kaplama prosesi esnasında SiC ve B_4C tozlarının yanması nedeniyle kaplamaların mikroyapısında bulunan bu karbürlerin miktarı başlangıç toz karışım oranlarından daha düşük elde edilmiştir. SiC takviyeli kaplamalar altlık malzemeden yüksek, B_4C takviyeli altlık malzemeden daha düşük sertlik sergilemiştir.

2- Kuru ortamda yapılan aşınma deneylerinde; en yüksek aşınma direnci, sertliği en yüksek olan SiC takviyeli kompozit kaplamada görülmüştür. B_4C takviyeli kompozit kaplamaların sertliği altlık malzemeye göre çok düşük olmasına rağmen aşınma dirençleri altlık malzemeden daha yüksektir.

3- SiC takviyeli kompozit kaplamalar, H_2O_2 çözeltisi içerisinde HCl çözeltisine ve saf suya nazaran daha yüksek aşınma direnci sergilemiştir. B_4C takviyeli kompozit kaplamaların saf su içerisinde korozif aşınma direnci H_2O_2 çözeltisi ve HCl çözeltisi içerisine oranla daha yüksektir. İncelenen kompozit kaplamalar sıvı çözelti içerisinde kuru ortam koşullarına nazaran daha fazla aşınma direnci göstermiştir.

KAYNAKLAR

[1] **Akman, H.**, 2001. Endüstride Karşılaşılan Aşınma Problemlerinin İncelenmesi ve Tamir-Bakım Kaynak Yöntemleri Uygulanarak Kullanım Ömürlerinin Uzatılması, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[2] **Rabinowicz E.**, 1995. Friction and Wear of Materials, John Wilwy and Sons, Inc., USA.

[3] **Ramesh, C.S., Seshardri, S.K., Iyer, K.J.L.**, 1989. Asurvey of Aspeects of Wear of Metals, Indian of Technology, 29(4), pp. 179-185, Indian.

[4] **Misra, A., Finnie, I.**, 1982. A Rewiew of The Abrasive Wear of Metals, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol 104, pp.94-101.

[5] **Gürleryik, M.Y.**, 1985. Soğuk Deforme Edilen Metalik Malzemelerin Aşınma Dirençleri Artmaktadır, 1. *Otomotiv ve Yan Sanayi Sempozyumu, Bursa*, 4-8 Kasım.

[6] **Karamış, M.B.**, 1985. Toprak İşleme Aletlerinde İş Organının Aşınmasının Etüdü, *Doktora Tezi*, Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

[7] **Sevim, İ.**, 1998. Çeliklerin Abrasif Aşınmasında Aşındırıcı Tane Büyüklüğünün Aşınma Direncine Etkisi, *Doktora Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[8] **Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M.**, 1993. Bakım ve Tamir İşlerinde Kaynak ve Metal Püskürtme, *Metal ve Kaynak*, 49. s21-25.

[9] **Ulusoy, E.**, 1981. Bazı Toprak İşleme Alet ve Makinalarında İş Organlarını Aşınması Üzerine Araştırmalar, Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, No 390, s.11, İzmir.

[10] **Zum Gahr, K.H.**, 1987. Microstructure and Wear of Materials, *Tribology Series*, No:10, Elsevier, pp.560.

[11] **Wutrich, N.**, 1986. Materials Science and Wear, *Technical Review*, 3, pp. 37-40.

[12] **Sarı, N.**, 1999. Klasik Isıl İşlemler ve Modern Yüzey İşlemleri Uygulanmış Ç.1050 (C45E) Çeliğin Abrasif-Erozif Aşınma Davranışının İncelenmesi, **Doktora Tezi**, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[13] **Budşnski, K. G.**, 1986. Hardfacing III: The Wear Processes, *Welding Desing and Fabrication*, pp. 40-47.

[14] **ASM**, Metals Handbook, Failure Analysis and Prevention, Ninth Edition, Volume 11.

[15] **Sulh, N. P., Sın, H. C., Saka, N.**, 1978. Fundamentals Aspects of Abrasive Wear, *Proceedings of The Internatiomal Conference on The Fundamentals of Tribology*, MIT, Cambridge, Massachusetts, pp. 493-517, June.

[16] **Mindivan, H.**, 2001. Yüksek Mukavemetli Pirinçlerin Mikroyapı ve Aşınma Özelliklerine Isıl İşlemin Etkisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[17] **Oğuz, B.**, 1993. Aşınma Sorunları ve Dolgu Kaynakları Teori-Uygulama, Sayfa 154-155, İstanbul.

[18] **Psyllaki, P.P., Jeardin, M., Pantelis, D.I.**, 2001. Microstructure and Wear Mechanisms of Thermal-Sprayed Alumina Coatings, *Materials Letters*, 47, 77-82.

[19] **Schorr, B.S., Stein, K.J., Marder, A.R.**, 1999. Characterization of Thermal Spray Coatings, Department of Materials Science and Engineering, Lehigh University, Bethlehem.

[20] **Herman, H., Sampath, S.**, Thermal Spray Coatings, Department of Materials Science and Engineering, State University of New York.

[21] **Tucker, R.C.**, 1997. The Use of Thermal Spray Coatings for Protection Against Wear and Corrosion, in Protective Coatings and Thin Films, pp. 387-399, Eds. Pauleau, Y., Barna, P.B. Kluwer Academic Publications, Netherlands.

[22] **Tucker, R.C.**, 1996. Introduction to Thermal Spray Coatings, in Handbook of Thin Film Process Technology, David A. Glocker S. Ismat Shah (ed.) *Institute of Physics Publishing*, Bristol and Philadelphia, A4.O:1-A4.5:8.

[23] **Unger R.H.**, 1988. Comparison of Thermal Sprayed Bond Coats, *Proceedings of The National Thermal Spray Conference*, Ohio, USA, 365-370.

[24] **Villat, M.**, 1986. Functionally Effective Coatings Using Plasma Spraying, Plasma Technique Ltd., *Sulzer Technical Review*, pp.41-45., Wohlen, Switzerland.

[25] **Hutchings, I.M.**, 1992. Tribology: Friction and Wear Engineerings Materials, Edward Arnold, London.

[26] **Ronald, W.S., Ronald, D.F.**, 1994. The Future of Thermal Spray Technology, *Welding Journal*, pp.43-50, July

[27] **Knotek, O.**, 2001. Wear and Corrosion Resistant Hard Coatings for Non-Cutting Tool Applications, in *Hanbook of Hard Coatings*, R.F. Bunshah (ed.) Noyes Publications, New York, 77-108.

[28] **Knight, R., Smith, R.W.**, 1998. Thermal Spray Forming of Materials, *Powder Metal Technologies and Applications*, Vol 7 ASM handbook, ASM International, 408-419.

[29] **N.N.**, 1987. Thermal Spray: Advances in Coatings Technology, (Edited by Houck, D.L.), *Proceeding of The Inational Thermal Spray Conferences*, pp.367, 14-17, Orlando, USA, Sept

[30] http://www.gordonengland.co.uk/tsc.htm

[31] **Seshadri, C.S., Iyer, K.J.**, 1991. A Survey of Aspecys of Wear of Metals, *Journal of Technology*, Vol 29, pp. 179-185, April.

[32] **Zhang, H., Wang, X.Y., Zheng, L.L., Jiang, X.Y.**, 2001. Studies of Splat Morphology and Rapid Solidification During Thermal Spraying, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, pp. 4579-4592, Stony Brook, New York, March.

[33] **Kiper, G.,** 2003. Alüminyum Üzerine Isıl Püskürtme Yöntemiyle Oluşturulan Çelik Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[34] **Akın, U.**, 2003. Alüminyum Altlık Üzerine Isıl Püskürtme Yöntemiyle Kaplanan seramik ve Seramik-Polimer Kaplamaların Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[35] **Sedlacek, V.**, 1992. Metallic Surfaces, Films and Coatings, Materials Science Monographs, 77, Chech technical University, Prague, Chechoslovakia, Elsevier.

[36] **Holf, I.H.**, 1995. Thermal Spraying and Its Applications, Welding and Metal Fabrication, pp. 266-269, July.

[37] **Bhusman, B., Gupta, B.K.**, 1991. Handbook of Tribology, McGraw-Hill, New York.

[38] **Bilge, T**., 1998. Aşınmaya Karşı Plazma Püskürtme ve HVOF Püskürtme Yöntemleriyle Yüzey Hazırlama, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

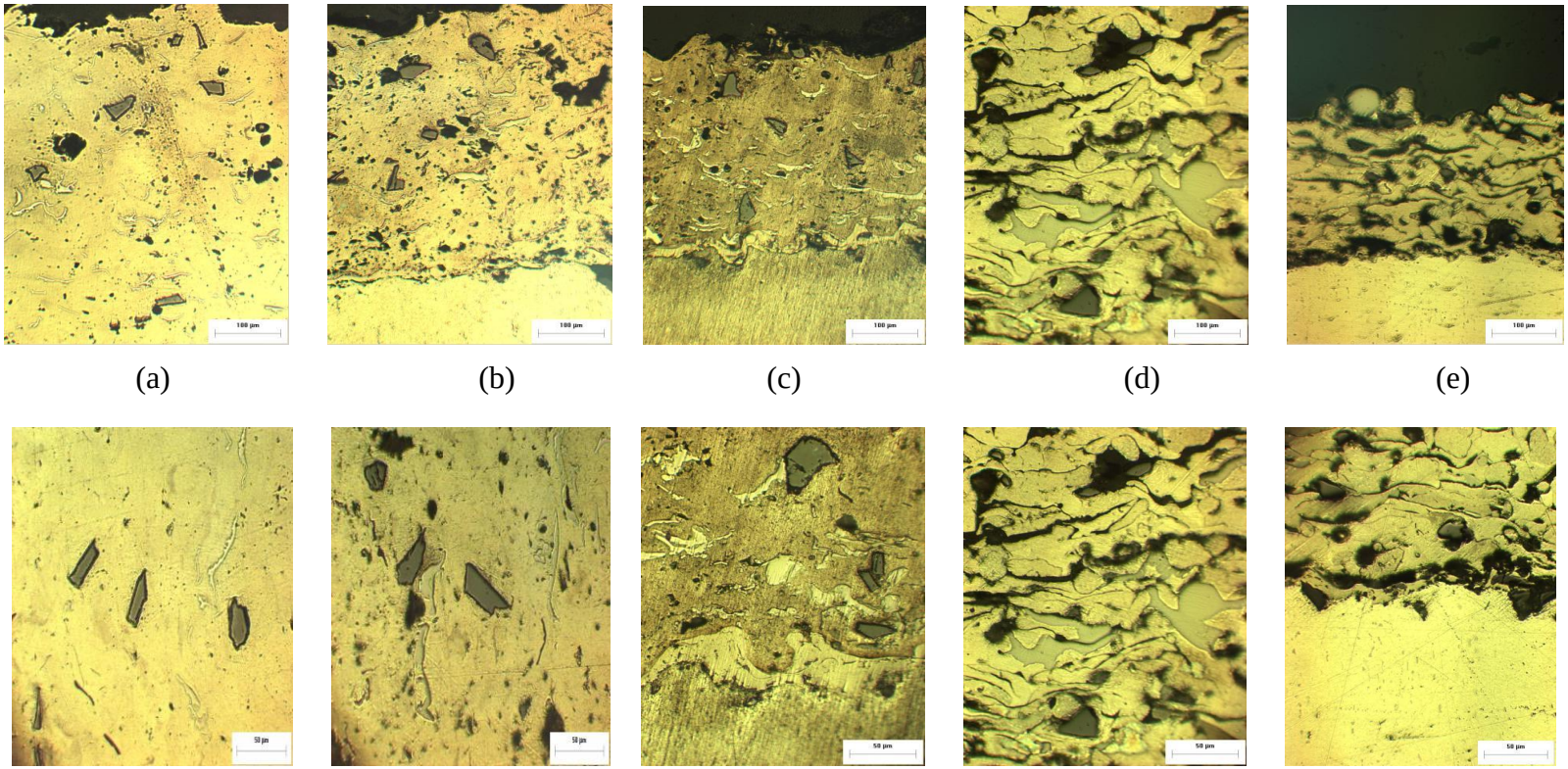
[39] **Üstel, F**., 1995. Plazma Spray Kaplama Teknolojisi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[40] **Matejka, D., Benko, B.**, 1989. Plasma Spraying of Metallic and Ceramic Materials, John Willey & Sons, Czechoslovakia ISBN 047-1918768, 246.

[41] **Parker, D.W., Kurtner, G.S.**, HVOF Spray Technology, *Advanced Materials and Processes*, V.139, n.4,4-91, pp.68-72.

EKLER

EK-A

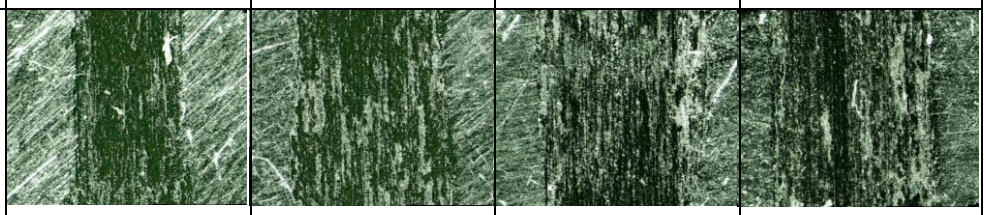
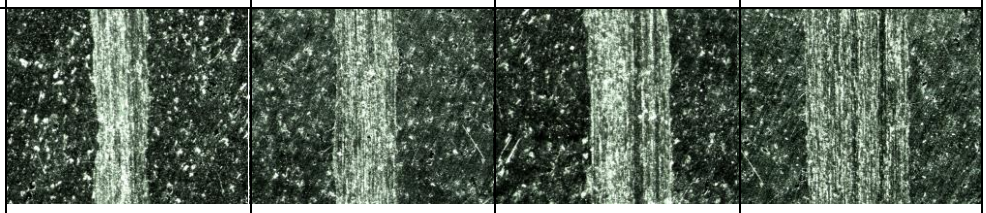
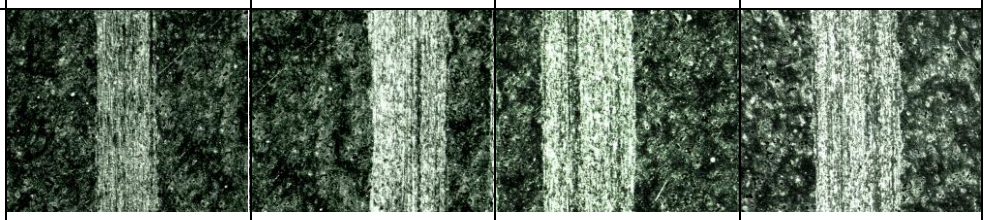
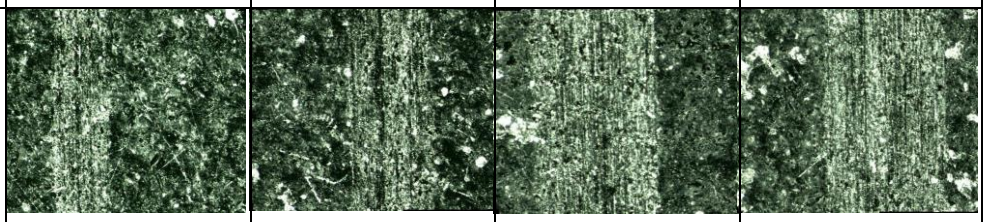
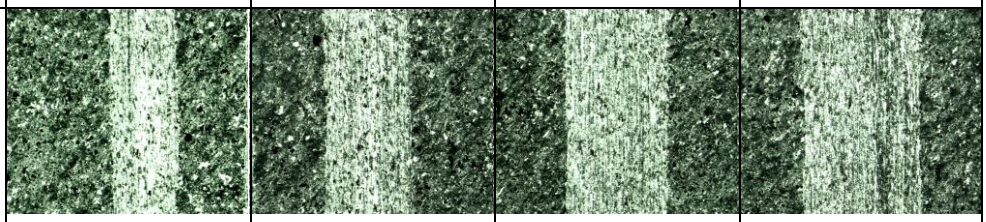
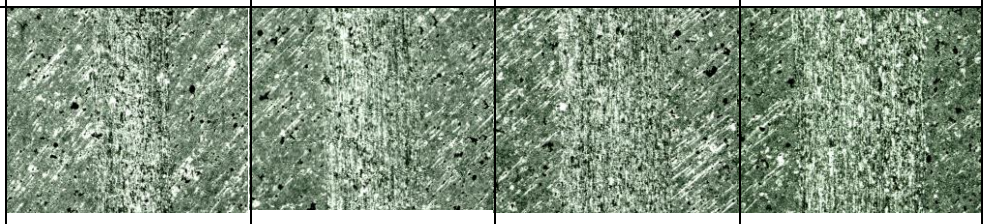


(a) (b) (c) (d) (e)

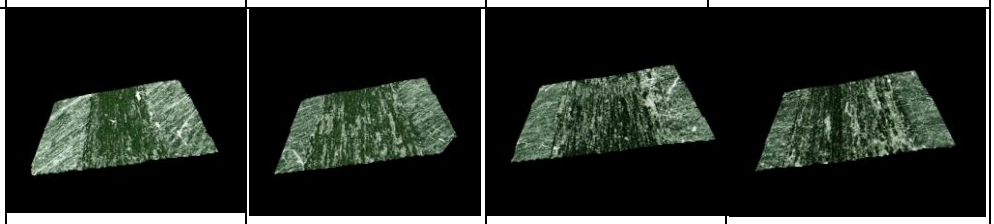
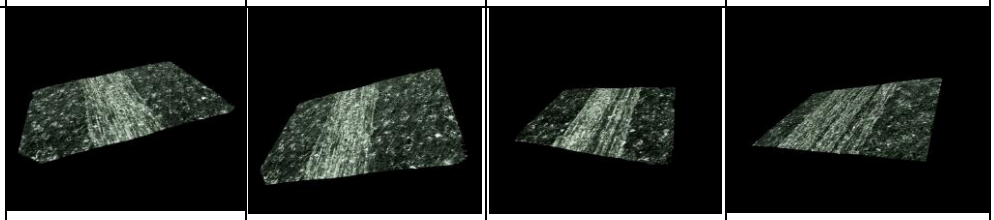
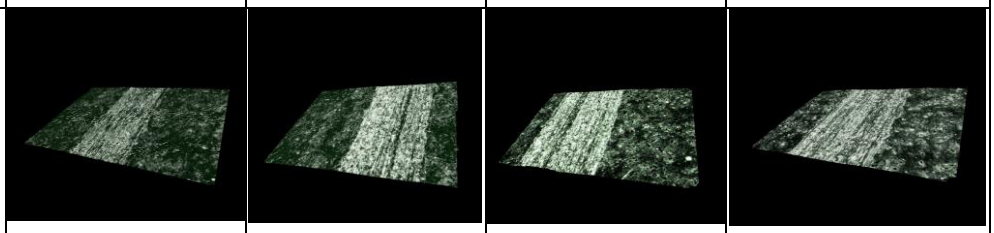
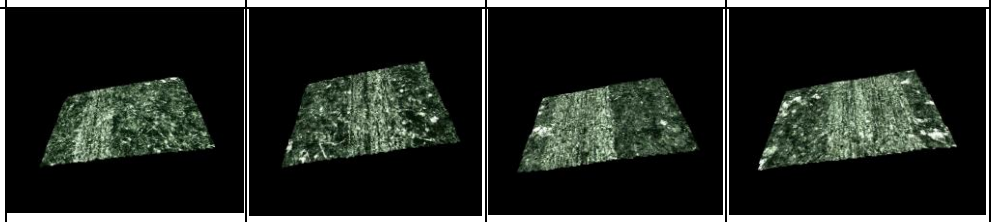
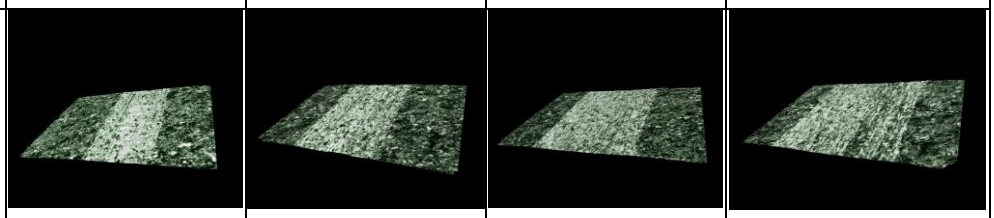
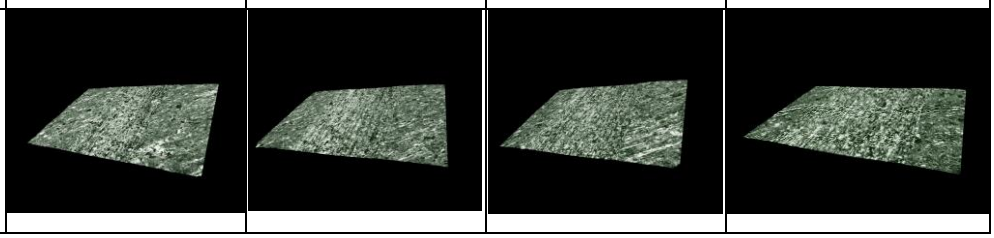
(f) (g) (h) (i) (j)

Şekil A.1. Optik mikroskop kesit görüntüleri.
Kaplama no; (a) 1 (b) 2 (c) 3 (d) 4 (e) 5 (x20) (f) 1 (g) 2 (h) 3 (i) 4 (j) 5 (x40)

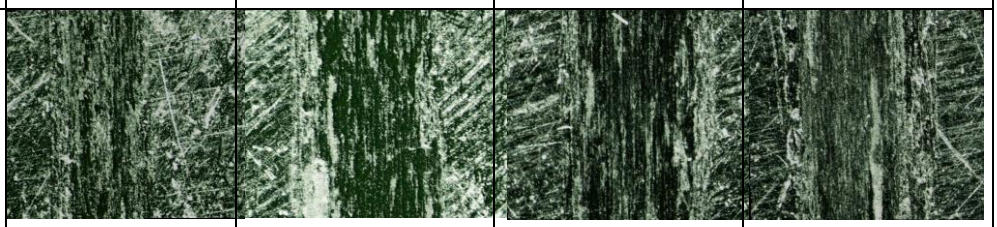
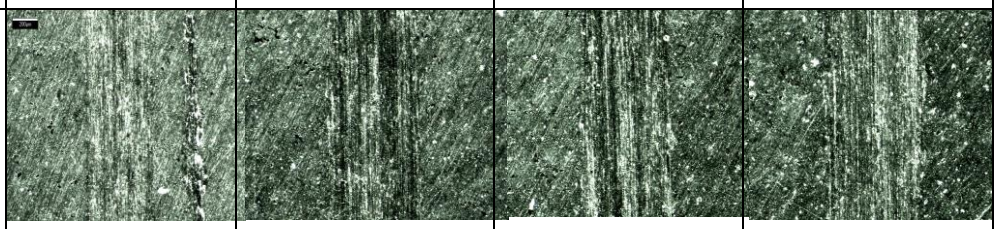
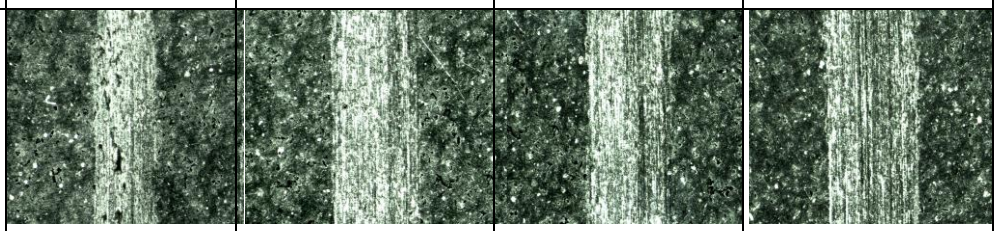
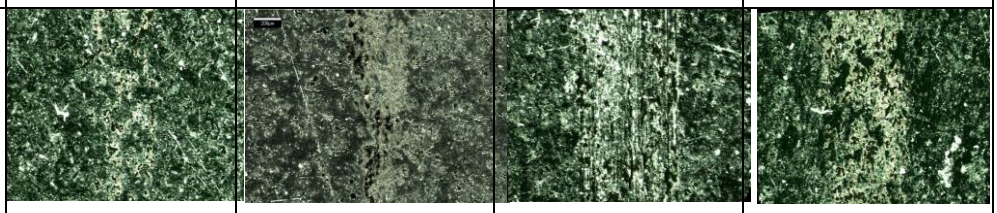
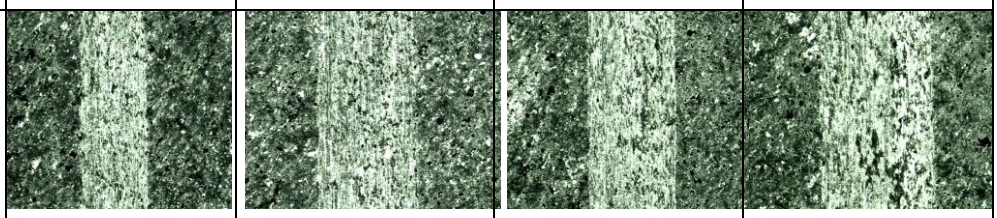
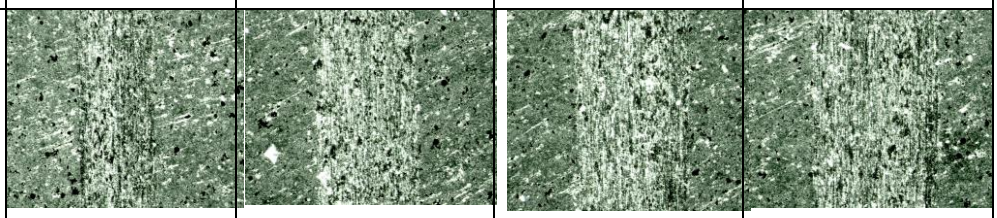
EK B

Numune	Kullanılan Yük (g)			
	50	100	150	200
2014-T6				
Kaplama 1				
Kaplama 2				
Kaplama 3				
Kaplama 4				
Kaplama 5				

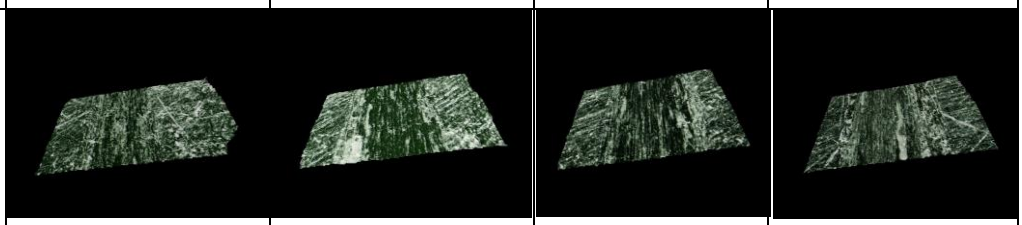
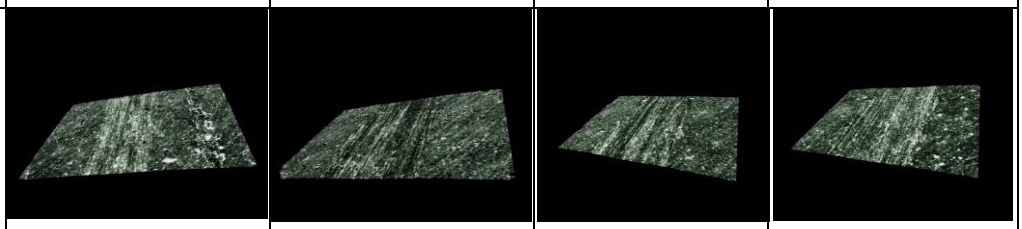
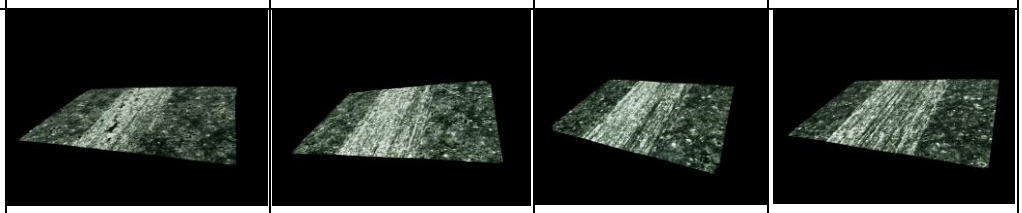
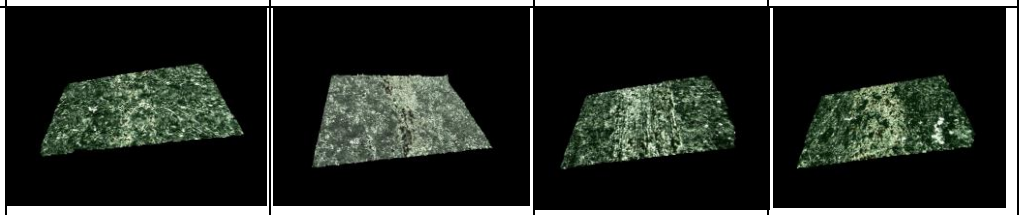
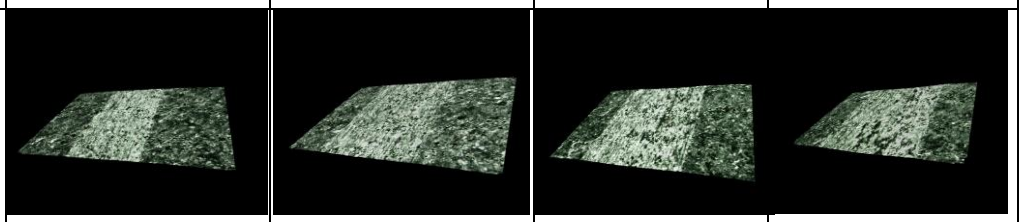
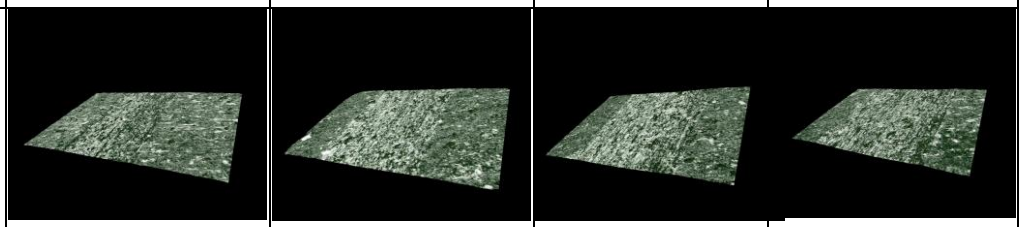
Şekil B.1. Kuru sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu görünümü. (X60)

Numune	Kullanılan Yük (g)			
	50	100	150	200
2014-T6				
Kaplama 1				
Kaplama 2				
Kaplama 3				
Kaplama 4				
Kaplama 5				

Şekil B.2. Kuru sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin üç boyutlu görünümü. (X60)

Numune	Kullanılan Yük (g)			
	50	100	150	200
2014-T6				
Kaplama 1				
Kaplama 2				
Kaplama 3				
Kaplama 4				
Kaplama 5				

Şekil B.3. Kuru sürtünme koşullarında çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu görünümü. (X60)

Numune	Kullanılan Yük (g)			
	50	100	150	200
2014-T6				
Kaplama 1				
Kaplama 2				
Kaplama 3				
Kaplama 4				
Kaplama 5				

Şekil B.4. Kuru sürtünme koşullarında çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin üç boyutlu görünümü. (X60)

EK C

Tablo C.1. Kuru sürtünme koşullarında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin ortalama boyutları ve alanları.

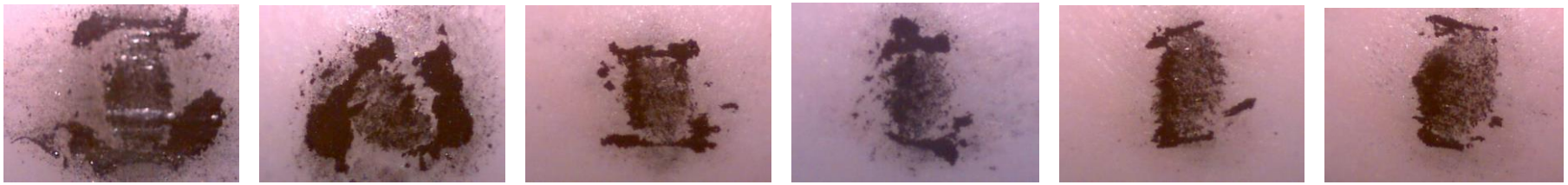
Numune	**Deney Yükü (N)**	**Ortalama İz Genişliği (mm)**	**Ortalama İz Derinliği (mm) x10^3**	**Ortalama İz Alanı (mm^2)x10^3**
2014-T6	0,5	0,89	17,5	12,2
	1	1,2	27,6	25,9
	1,5	1,27	41,57	41,47
	2	1,37	43,05	46,43
Kaplama 1	0,5	0,41	7,63	2,45
	1	0,46	10,88	3,98
	1,5	0,63	11,63	5,78
	2	0,82	11,86	7,66
Kaplama 2	0,5	0,47	4,76	1,75
	1	0,58	5,86	2,67
	1,5	0,7	7,83	4,34
	2	0,68	10,05	5,31
Kaplama 3	0,5	0,31	3,13	0,75
	1	0,52	4,23	1,75
	1,5	0,65	7,36	3,76
	2	0,71	10,06	5,66
Kaplama 4	0,5	0,53	0,52	2,18
	1	0,62	7,23	5,55
	1,5	0,82	9,26	6,05
	2	0,95	10,7	7,98
Kaplama 5	0,5	0,58	5,73	2,62
	1	0,74	11,13	6,49
	1,5	0,87	13,33	9,14
	2	1,03	15,46	12,45

Tablo C.2. Kuru sürtünme koşullarında çelik bilye ile yapılan aşınma deneylerinde numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin ortalama boyutları ve alanları.

Numune	Deney Yükü (N)	Ortalama İz Genişliği (mm)	Ortalama İz Derinliği (mm) $x10^3$	Ortalama İz Alanı (mm^2)$x10^3$
2014-T6	0,5	0,77	10,75	6,55
	1	1	24,73	19,42
	1,5	1,17	26,73	24,03
	2	1,25	32,86	32,44
Kaplama 1	0,5	0,53	5,8	2,44
	1	0,63	8,6	4,3
	1,5	0,71	9,76	5,47
	2	0,73	14,03	8,11
Kaplama 2	0,5	0,51	4,3	1,71
	1	0,61	6,02	2,91
	1,5	0,64	8,5	4,31
	2	0,72	10,4	5,88
Kaplama 3	0,5	0,64	3,25	1,65
	1	0,41	5,64	1,81
	1,5	0,69	5,05	2,73
	2	0,69	8,99	4,92
Kaplama 4	0,5	0,57	5,3	2,4
	1	0,72	6,4	3,62
	1,5	0,72	9,13	5,92
	2	0,91	10,93	7,81
Kaplama 5	0,5	0,62	7,26	3,57
	1	0,77	8,86	5,38
	1,5	0,88	12,53	8,72
	2	0,99	14,76	11,51

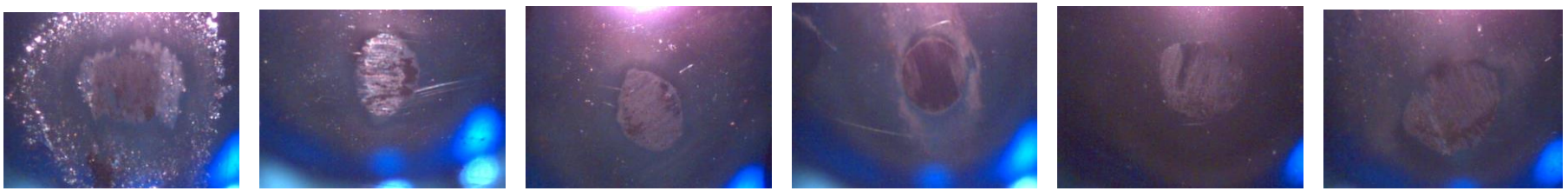
EK D

Al_2O_3 Bilye



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

Çelik Bilye



(g) (h) (i) (j) (k) (l)

Şekil D.1. Kuru ortam aşınma deneyi karşı malzeme olarak kullanılan bilyelerin aşınma yüzeyleri görüntüleri

(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5

(g) 2014-T6 (h) 1 (i) 2 (j) 3 (k) 4 (l) 5

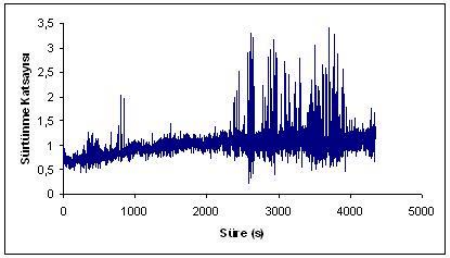
EK E

Tablo E.1. Kuru ortam aşınma deneylerinde kullanılan bilyelerde oluşan aşınma miktarı.

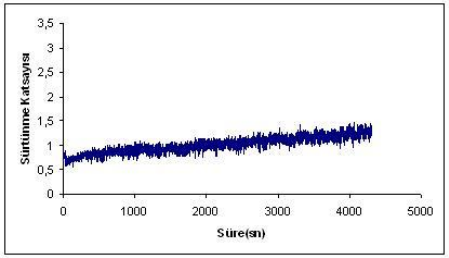
Numune	**Deney Yükü (N)**	**Al_2O_3 Bilye İz Alanı (mm^2)**	**Çelik Bilye İz Alanı (mm^2)**
2014-T6	0,5	0,71	0,46
	1	1,04	0,76
	1,5	1,12	0,93
	2	1,93	0,2
Kaplama 1	0,5	0,29	0,36
	1	0,35	0,45
	1,5	0,5	0,53
	2	0,8	0,72
Kaplama 2	0,5	0,4	0,33
	1	0,42	0,46
	1,5	0,49	0,56
	2	0,62	0,64
Kaplama 3	0,5	0,19	0,26
	1	0,35	0,43
	1,5	0,57	0,6
	2	0,58	0,57
Kaplama 4	0,5	0,4	0,41
	1	0,61	0,53
	1,5	0,72	0,71
	2	0,96	0,86
Kaplama 5	0,5	0,47	0,46
	1	0,72	0,63
	1,5	0,87	0,82
	2	1,16	1,06

EK F

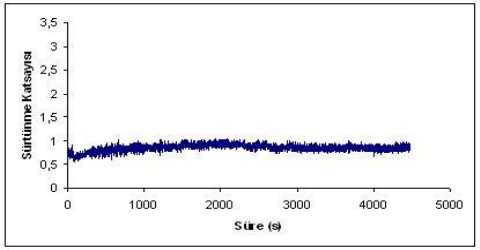
Al_2O_3 Bilye



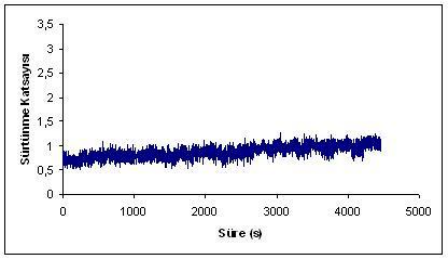
(a)



(b)

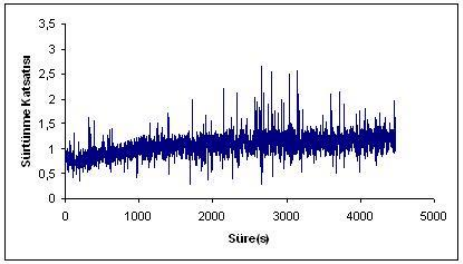


(c)

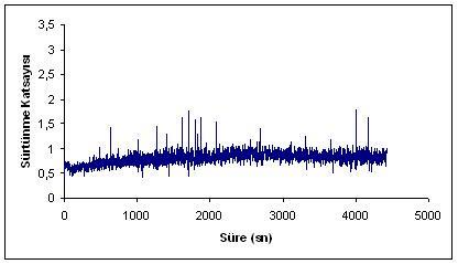


(d)

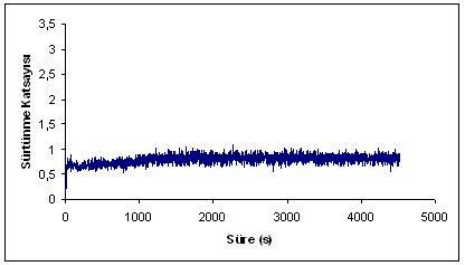
Çelik Bilye



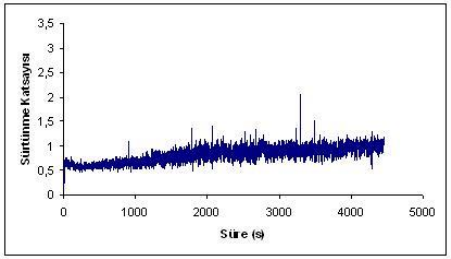
(e)



(f)



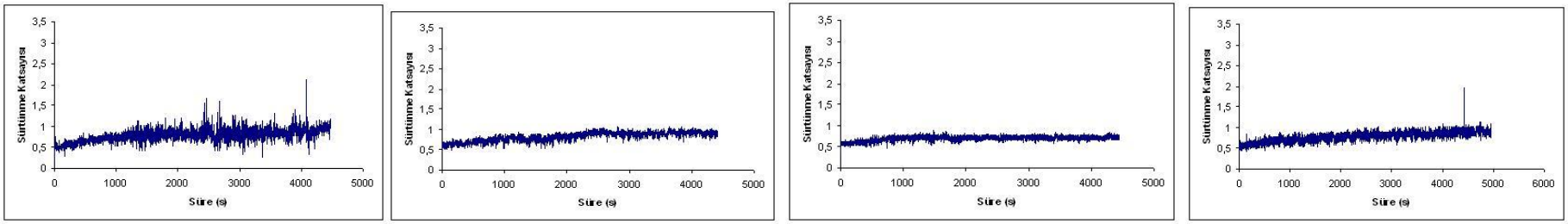
(g)



(h)

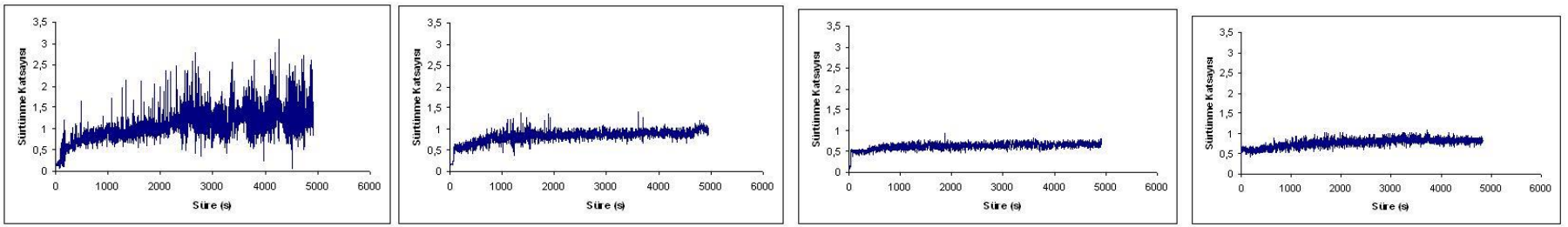
Şekil F.1. 1 nolu kaplamada sürtünme katsayısının deney süresince değişimi
(a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 0,5N (f) 1N (g) 1,5N (h) 1,5N

Al_2O_3 Bilye



(a) (b) (c) (d)

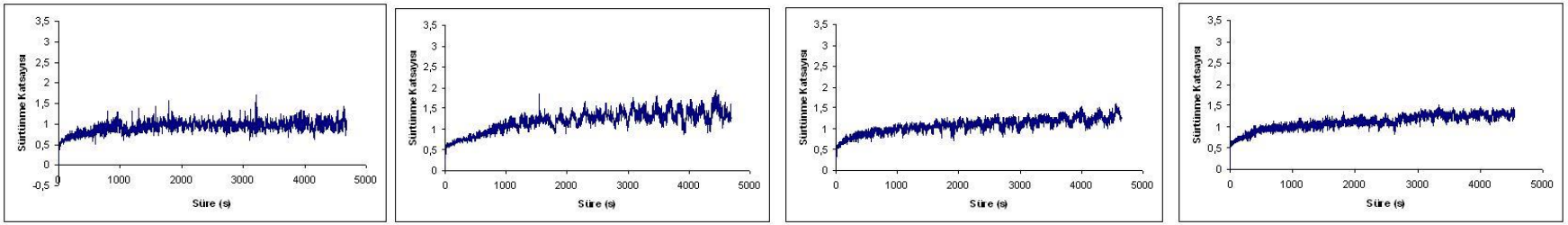
Çelik Bilye



(e) (f) (g) (h)

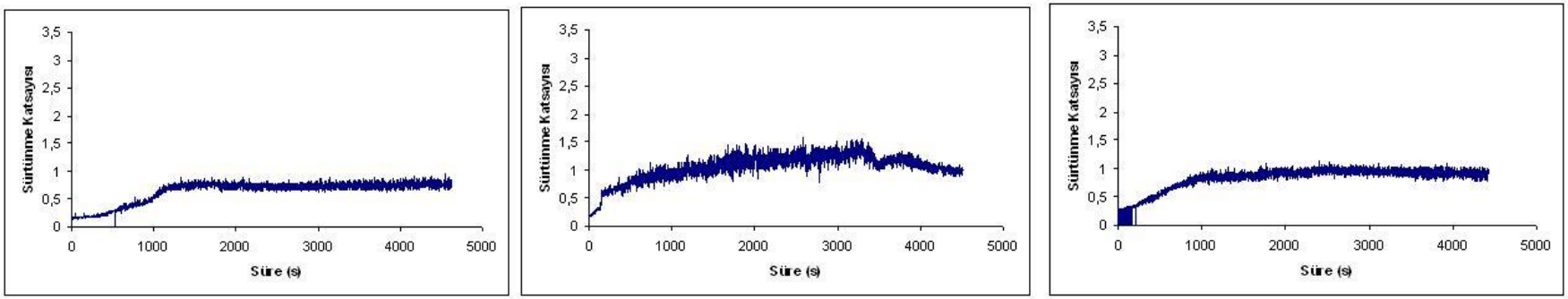
Şekil F.2. 2 nolu kaplamada sürtünme katsayısının deney süresince değişimi
(a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 0,5N (f) 1N (g) 1,5N (h) 1,5N

Al_2O_3 Bilye



(a) (b) (c) (d)

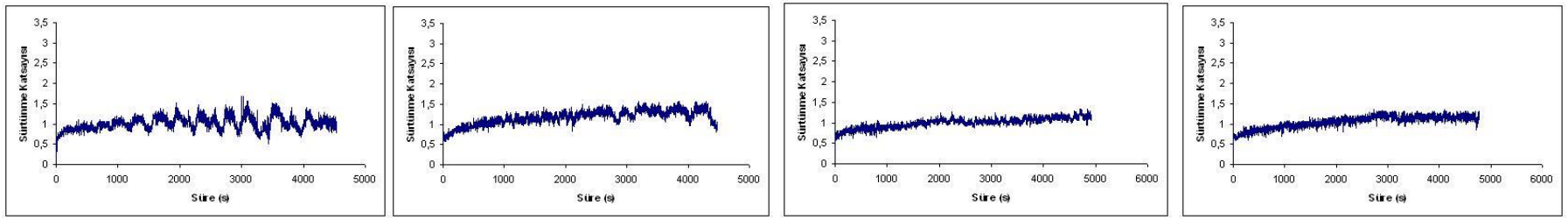
Çelik Bilye



(e) (f) (g)

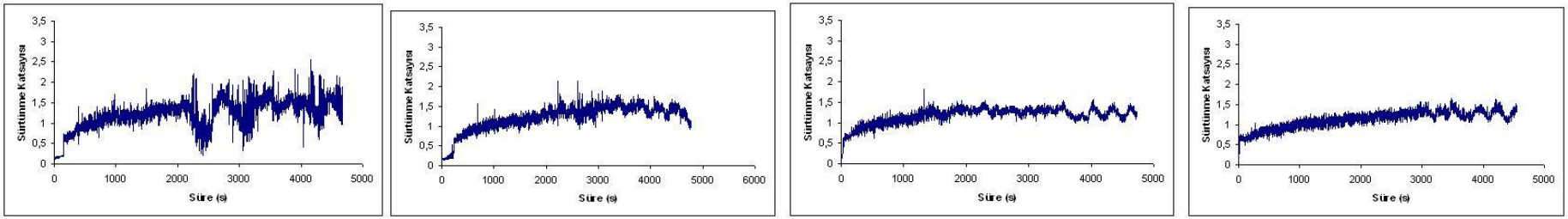
Şekil F.3. 3 nolu kaplamanın sürtünme katsayısının deney süresince değişimi
(a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 1N (f) 1,5N (g) 1,5N

Al_2O_3 Bilye



(a) (b) (c) (d)

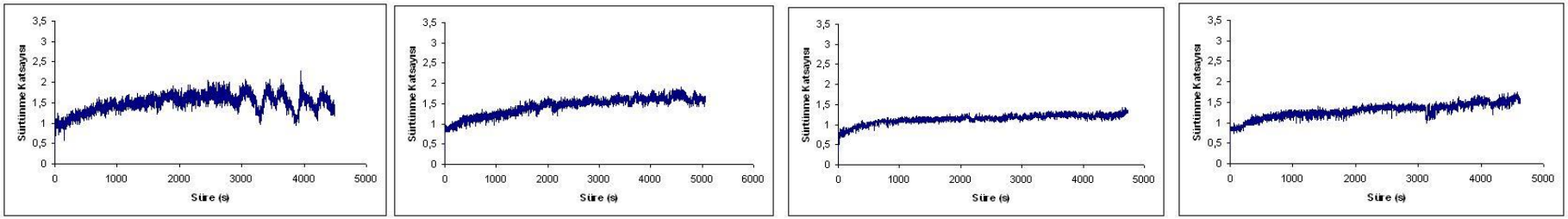
Çelik Bilye



(e) (f) (g) (h)

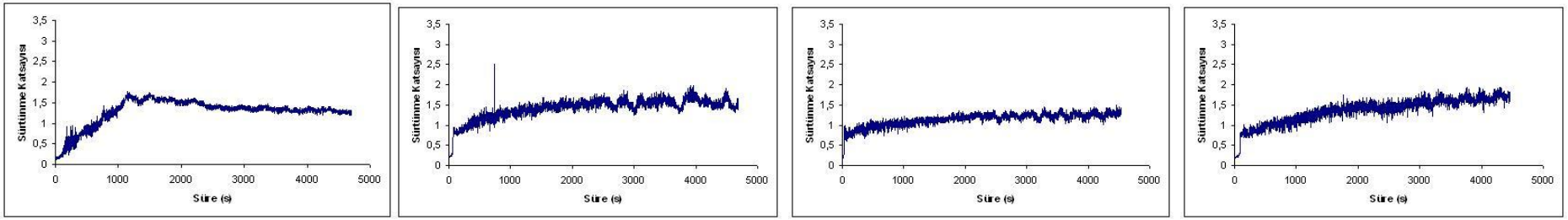
Şekil F.4. 4 nolu kaplamada sürtünme katsayısının deney süresince değişimi
(a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 0,5N (f) 1N (g) 1,5N (h) 1,5N

Al_2O_3 Bilye



(a) (b) (c) (d)

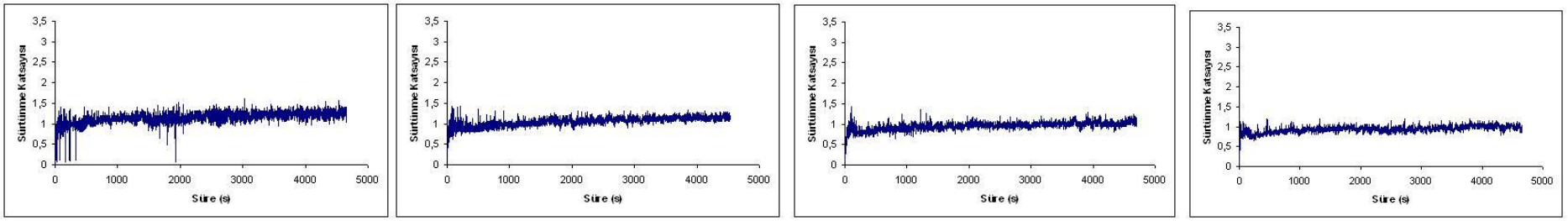
Çelik Bilye



(e) (f) (g) (h)

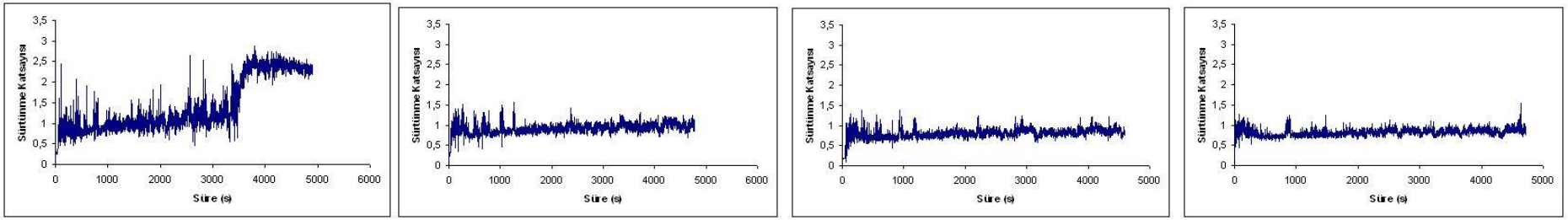
Şekil F.5. 5 nolu kaplamada sürtünme katsayısının deney süresince değişimi
(a) 0,5N (b) 1N (c) 1,5N (d) 2N (e) 0,5N (f) 1N (g) 1,5N (h) 1,5N

Al_2O_3 Bilye



(a) (b) (c) (d)

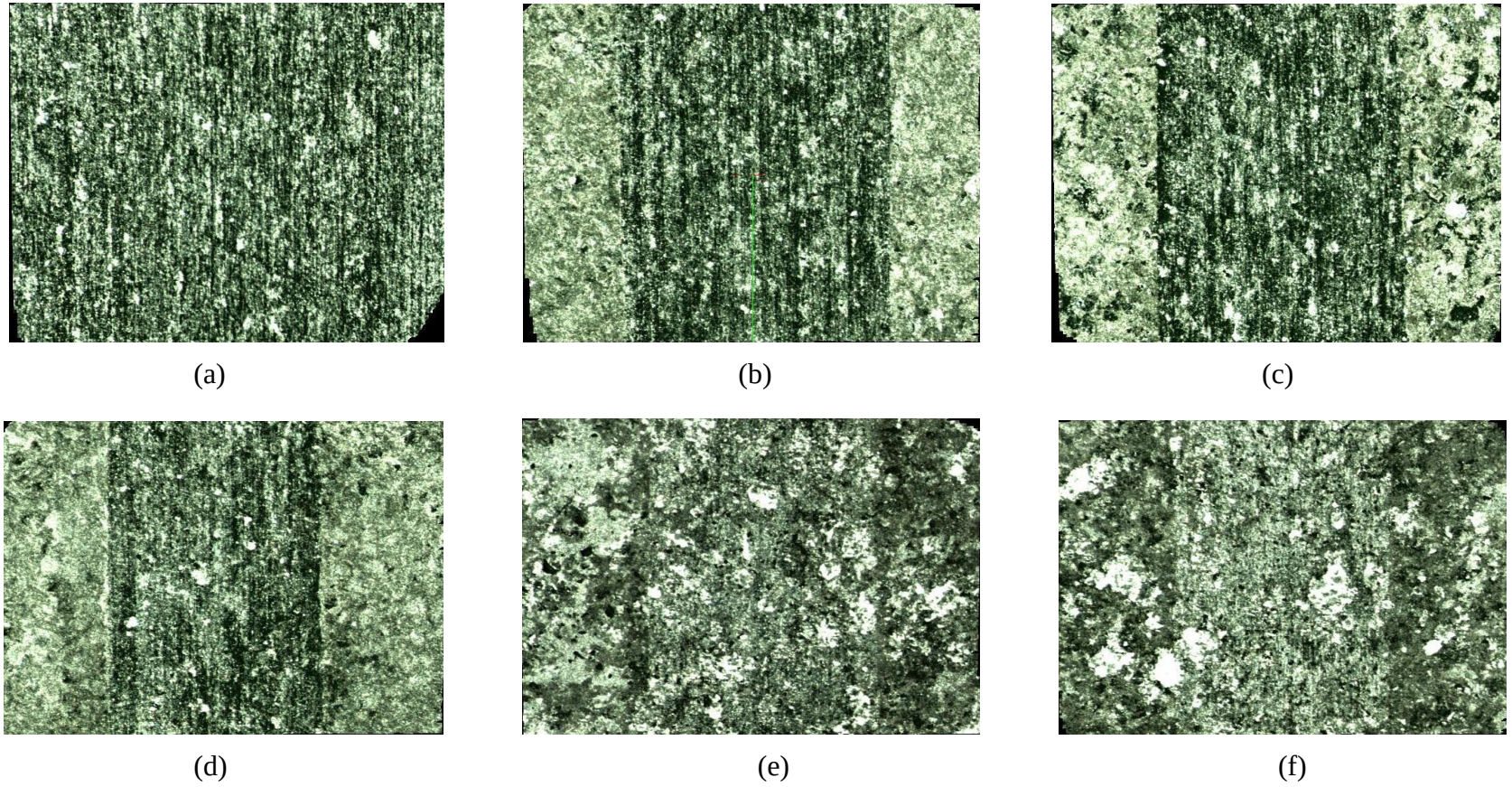
Çelik Bilye



(e) (f) (g) (h)

Şekil F.6.2014-T6 altlık malzemede sürtünme katsayısının deney süresince değişimi
(a)0,5N (b)1N (c)1,5N (d)2N (e)0,5N (f)1N (g)1,5N (h)1,5N

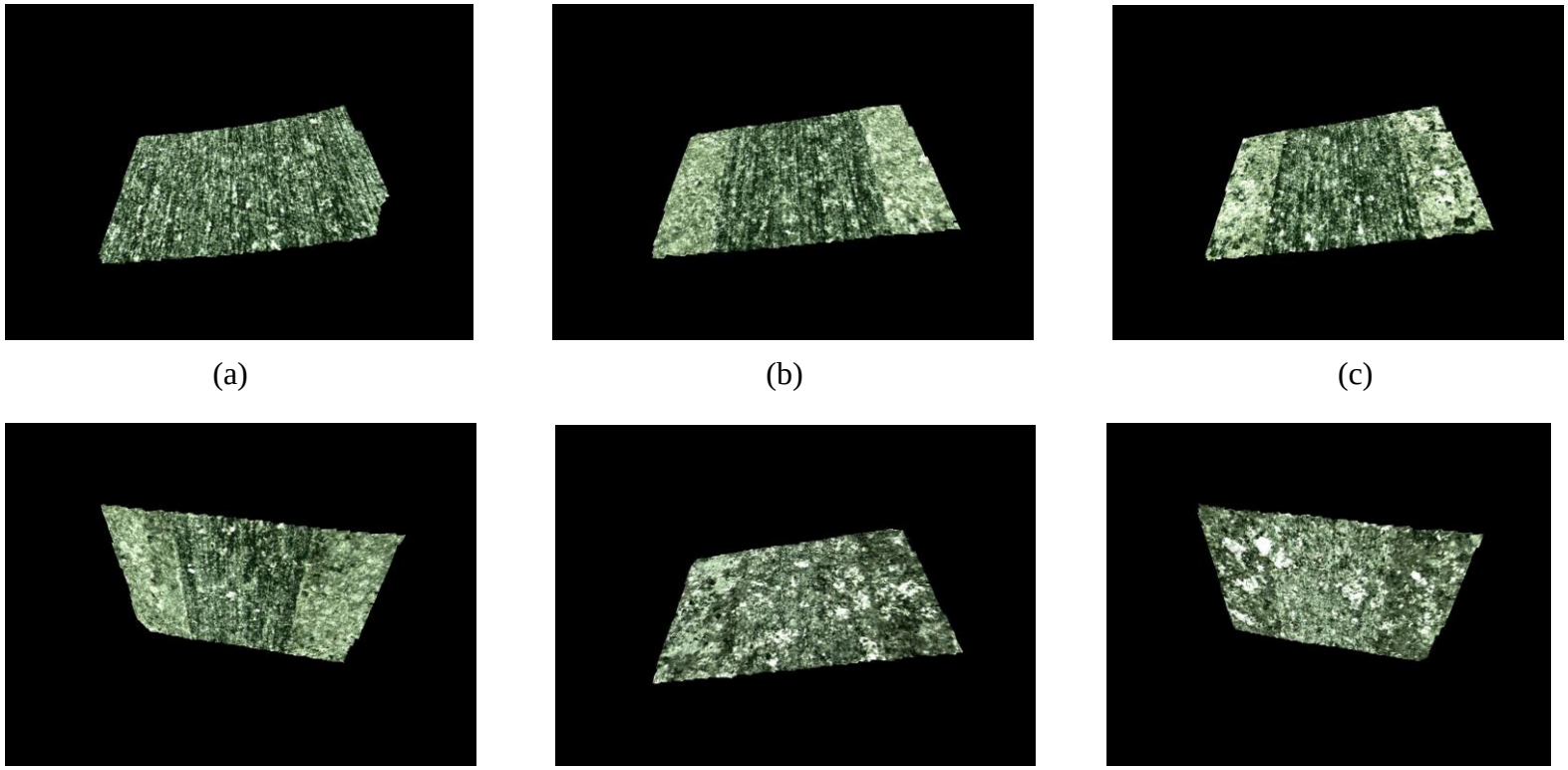
EK G



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Şekil G.1. HCl çözeltisi içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu görünümü.
(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5 (X60)

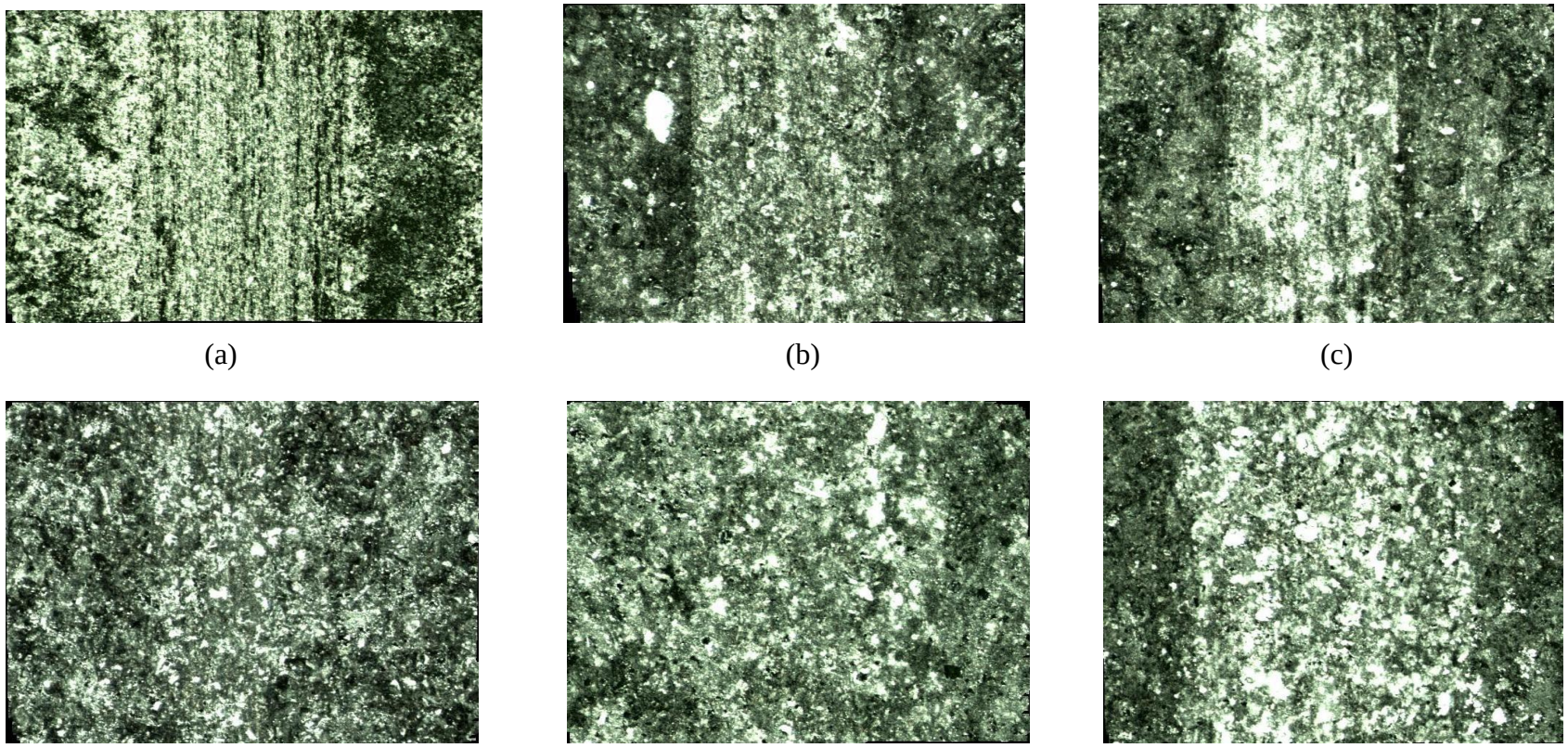


(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Şekil G.2. HCl çözeltisi içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin üç boyutlu görünümü.

(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5 (X60)

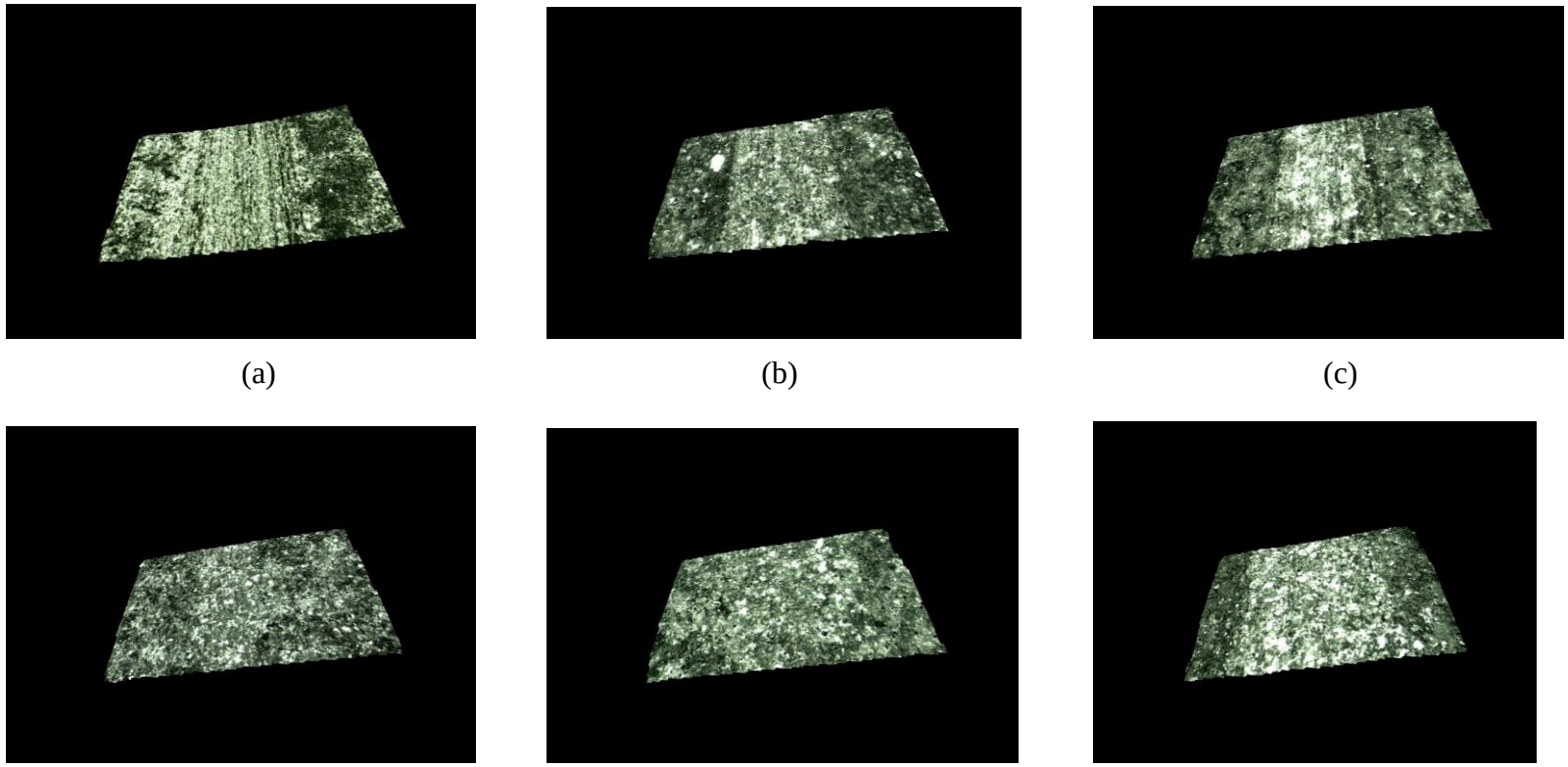


(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Şekil G.3. H_2O_2 çözeltisi içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki boyutlu görünümü

(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5 (X60)

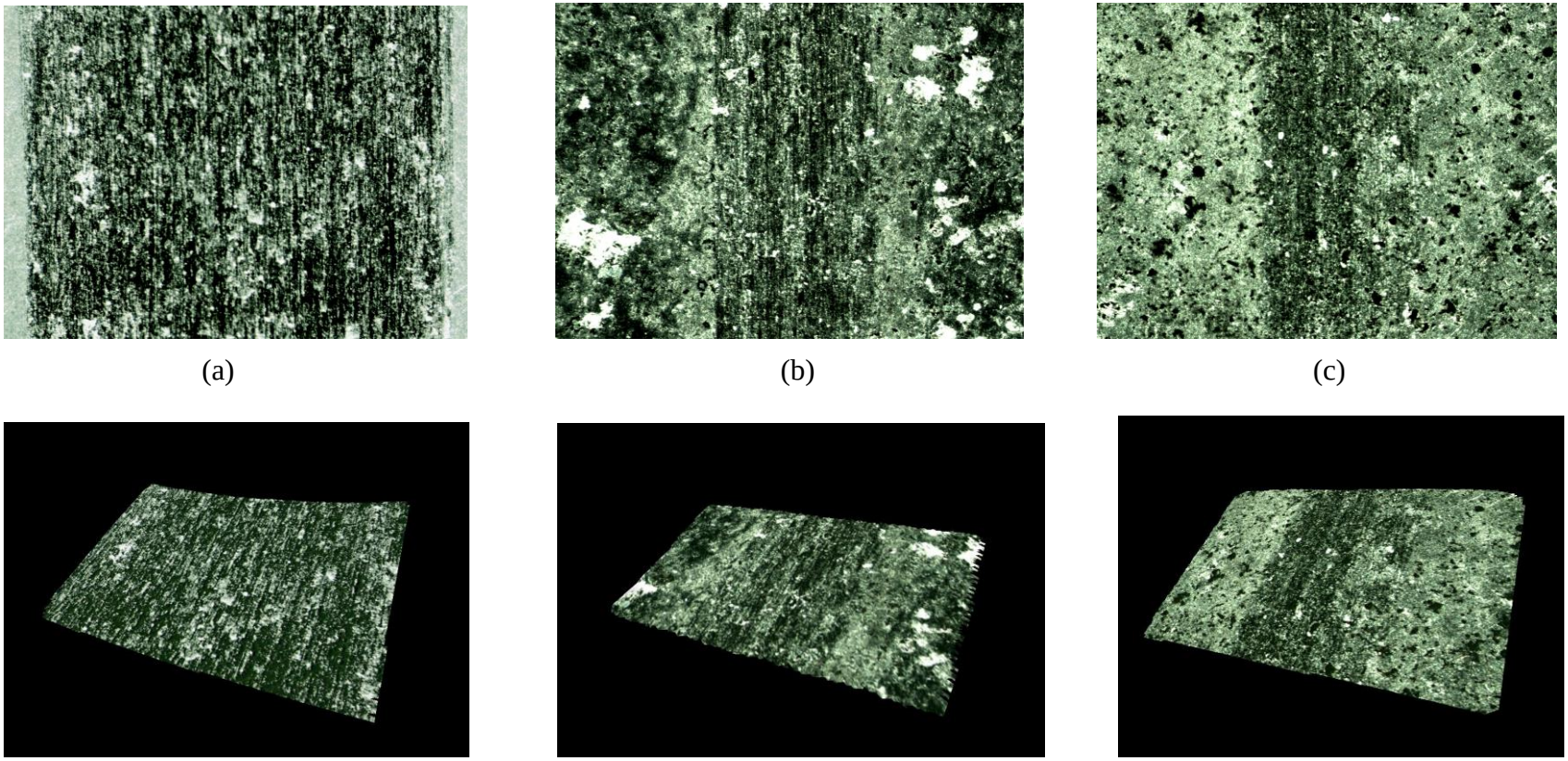


(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Şekil G.4. H_2O_2 çözeltisi içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin üç boyutlu görünümü.

(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5 (x60)



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Şekil G.5. Saf su içerisinde 200g yük altında Al_2O_3 bilye ile yapılan aşınma deneylerinde, numune yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin iki ve üç boyutlu görünümü

(a) 2014-T6 (b) 3 (c) 5 (d) 2014-T6 (e) 3 (f) 5 (X60)

EK H

HCl Çözeltisi



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

H_2O_2 Çözeltisi



(g) (h) (i) (j) (k) (l)

Saf Su



(m) (n) (o)

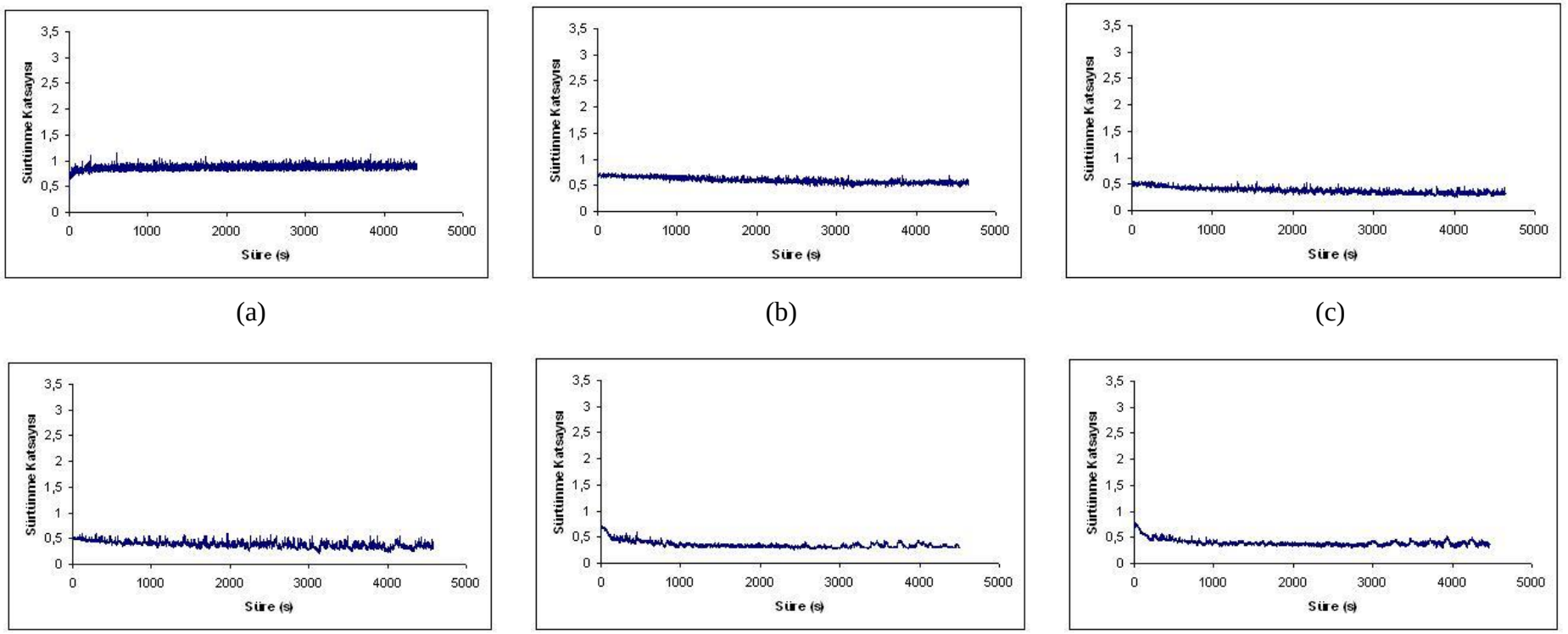
Şekil H.1. Sıvı ortam içerisinde aşınma deneyi karşı malzeme olarak kullanılan Al_2O_3 bilyelerin aşınma yüzeyleri görüntüleri

(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5

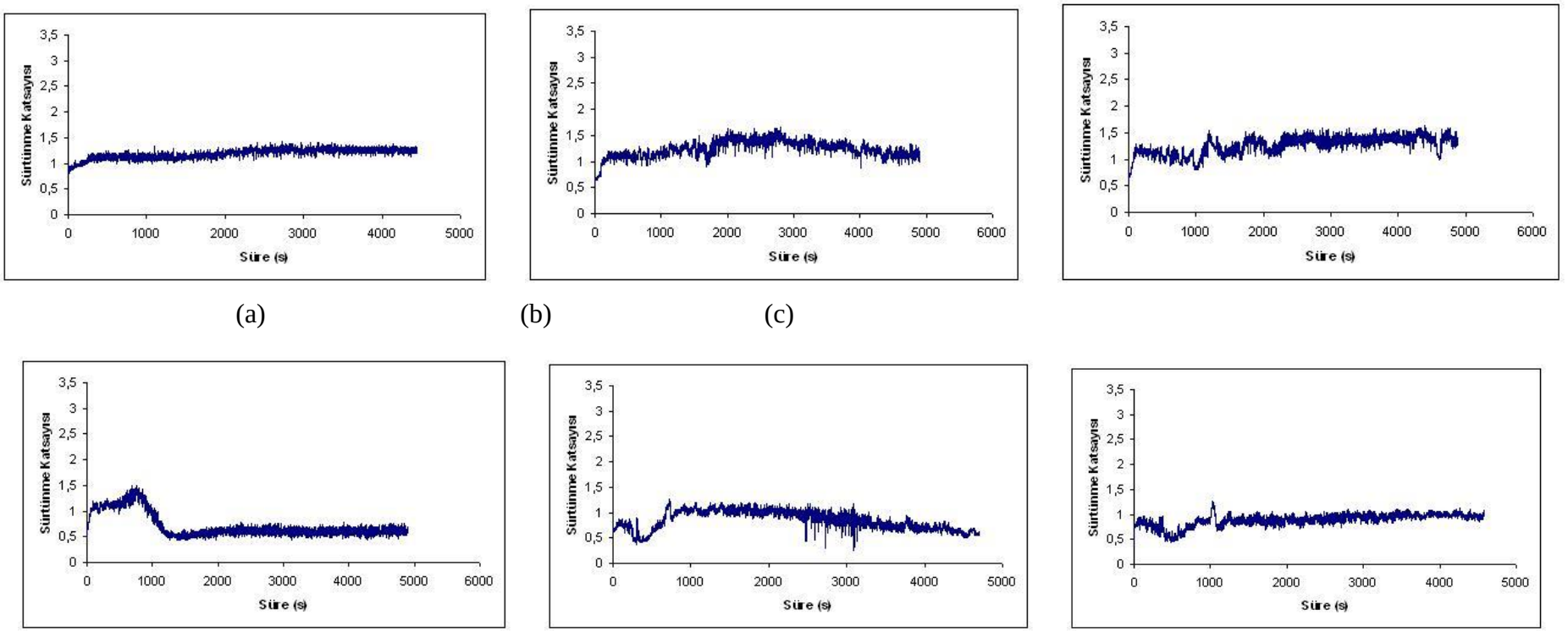
(g) 2014-T6 (h) 1 (i) 2 (j) 3 (k) 4 (l) 5

(m) 2014-T6 (n) 3 (o) 5

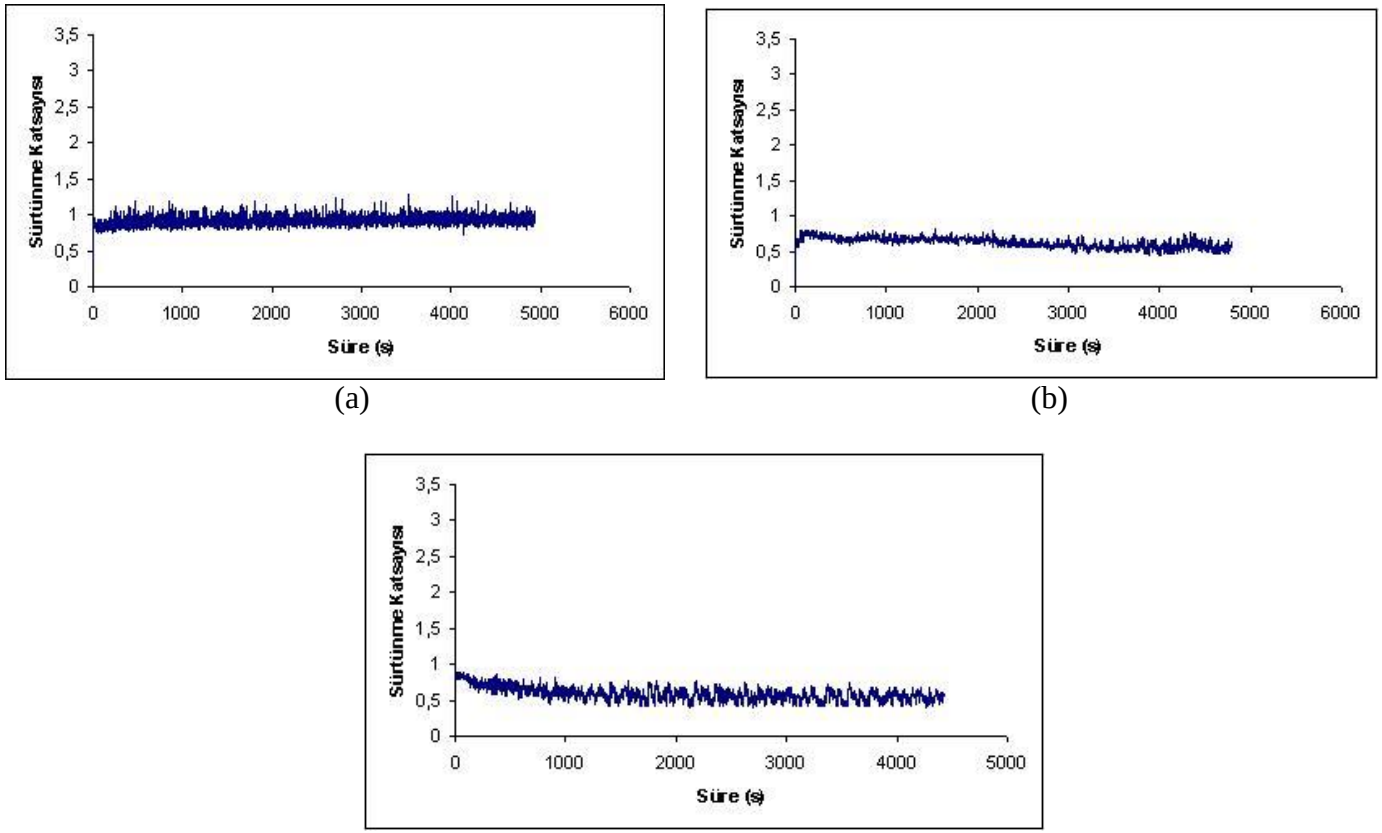
EK I



Şekil I.1. Korozif HCl çözeltisi içerisinde sürtünme katsayısının deney süresince değişimi
(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5



Şekil I.2. Korozif H_2O_2 çözeltisi içerisinde sürtünme katsayısının deney süresince değişimi
(a) 2014-T6 (b) 1 (c) 2 (d) 3 (e) 4 (f) 5



(a) (b)

(c)

Şekil I.3. Saf su içerisinde sürtünme katsayısının deney süresince değişimi
(a) 2014-T6 (b) 3 (c) 5

ÖZGEÇMİŞ

Fatih Kılıç, 1981 yılında Çorum'un Sungurlu ilçesinde doğdu. 1998 yılında Sungurlu Endüstri Meslek Lisesi'nde orta öğrenimini tamamladıktan sonra, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde yüksek öğrenimine başladı. 2002 yılında bu bölümden mezun olup aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Malzeme Mühendisliği Yüksek Lisans Programında eğitime başladı.