

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PULSE PLAZMA TEKNOLOJİSİ İLE MODİFİYE
EDİLEN 5140 ÇELİĞİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Volkan Ziya BAYHAN

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZ. MÜH.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet DURMAN

Ocak 2011

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PULSE PLAZMA TEKNOLOJİSİ İLE MODİFİYE
EDİLEN 5140 ÇELİĞİNİN YÜZEY ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Met. ve Malz. Müh. Volkan Ziya BAYHAN

Enstitü Anabilim Dalı : MET. VE MALZ. MÜH.

Bu tez 24 / 01 / 2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mehmet DURMAN
Jüri Başkanı

Doç. Dr. Ahmet TÜRK
Üye

Yrd. Doç. Dr. Uğur ÖZSARAC
Üye

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmanın yürütülmesinde ve sonuçlandırılmasında çok değerli fikirleriyle bana yardımcı olan ve desteğini esirgemeyen saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mehmet DURMAN'a,

Tez konusunun belirlenmesinde ve tezin hazırlanmasında yardımlarını ve değerli bilgilerini esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Süleyman Can KURNAZ'a,

Tüm tez çalışmam boyunca her konuda desteğini ve yardımını gördüğüm Arş. Gör. Aysun AYDAY'a,

Tüm laboratuvarlarını kullanmama izin veren Prof. Dr. Cuma BİNDAL'a, Prof. Dr. Fatih ÜSTEL'e, Yrd. Doç. Dr. Şükran DEMİRKIRAN'a,

İsim ayırt etmeksizin üzerimde emekleri olan tüm bölüm hocalarıma,

Son olarak da, üzerimdeki emeklerini hiçbir zaman ödeyemeyeceğim, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen, her zaman yanımda olduklarını bildiğim yeri doldurulamaz varlıklarımın yegane sebebi, annem Songül BAYHAN ve babam Mehmet Naci BAYHAN'a, çok sevdiğim kardeşim Utku Can BAYHAN'a ve ayrıca bu çalışmanın yürütülmesi ve sonuçlandırılmasında çalışma süresince her türlü fedakarlığı gösteren, her zaman yanımda olan, hayatım boyunca bana destek olmak isteyen ve ömrünün sonuna kadar hayatını benimle paylaşmak isteyen kız arkadaşım Gülşah ÜNVER'e ve daha adını saymadığım, okul yaşamımda, hayatın genelinde bana destek olan herkese saygı ve şükranlarımı sunar, TEŞEKKÜR ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜRLER.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xiv
SUMMARY.....	xv
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
YÜZEY VE YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ.....	4
2.1. Yüzey İşlem Prosesleri.....	4
2.2. Yüzey İşlem Seçimini Etkileyen Faktörler.....	5
2.3. Yüzey Sertleştirme İşlemleri.....	5
2.3.1. Karbürizasyon.....	5
2.3.2. Nitrürleme.....	6
2.3.2.1. Plazma (iyon) nitrürleme.....	6
2.3.3. Karbonitrürleme.....	7
2.3.4. Ferritik Nitrokarbürleme.....	8
2.3.5. Dönüşüm Sertleşmesi.....	8
2.3.5.1. Alevle yüzey sertleştirme.....	9
2.3.5.2. İndüksiyonla yüzey sertleştirme.....	10
2.3.5.3. Daldırma ile yüzey sertleştirme.....	11
2.3.5.4. Lazer ile yüzey sertleştirme.....	11

2.3.5.5. Elektron ışınıyla yüzey sertleştirme.....	13
BÖLÜM 3.	
PULSE PLAZMA TEKNOLOJİSİ VE AISI 5140 ÇELİĞİ	15
3.1. Giriş.....	15
3.2. Pulse Plazma.....	15
3.3. Pulse Plazma Teknolojisinin Çalışma Prensibi.....	20
3.3.1. İş parçası yüzeyi ile pulse plazma etkileşimi.....	23
3.3.2. Pulse plazma uygulama örnekleri.....	26
3.4. Pulse-Plazma Teknolojisinin Avantajları.....	30
3.5. AISI 5140 Çeliğinin Özellikleri.....	33
3.5.1. Kimyasal bileşim.....	33
3.5.2. Kullanıldığı yerler.....	34
BÖLÜM 4.	
SÜRTÜNME VE AŞINMA.....	35
4.1. Giriş.....	35
4.2. Sürtünme Kanunları.....	36
4.3. Sürtünme.....	37
4.3.1. Yağlama.....	42
4.3.3.1. Katı yağlayıcılar.....	43
4.4. Aşınma.....	45
4.4.1. Aşınma türleri.....	46
4.4.1.1. Adhesiv aşınma.....	49
4.4.1.2. Abrazif aşınma.....	50
4.4.1.3. Yorulma aşınması.....	53
4.4.1.1. Korozyon aşınma.....	53
BÖLÜM 5.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	55
5.1. Giriş.....	55
5.2. Pulse Plazma İşlemi Uygulamaları.....	57
5.3. Metalografik Çalışmalar.....	58

5.4. Optik Çalışmalar.....	58
5.5. Mikrosertlik Ölçümleri.....	58
5.6. X-Işını Analizleri.....	58
5.7. Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM) Ve EDS Analizleri.....	59
5.8. Aşınma Deneyleri	59
BÖLÜM 6.	
DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME.....	60
6.1. Mikroyapı Sonuçları.....	60
6.2. Mikrosertlik Sonuçları.....	67
6.3. X-Işını Difraksiyon Analizleri.....	72
6.4. Aşınma Deney Sonuçları.....	76
6.4.1. Aşınma hız değerleri.....	77
6.4.2. Sürtünme katsayıları.....	85
6.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları.....	89
6.6. Aşınma Sonrası Aşınmış Yüzeylerin SEM ve EDS Analizleri.....	89
BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	115
7.1. Sonuçlar.....	115
7.2. Öneriler.....	118
KAYNAKLAR.....	119
ÖZGEÇMİŞ.....	124

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

α	: Oksitleyici katsayısı
μ	: Sürtünme katsayısı
$\Delta h/h$: Deformasyonun derecesi
τ	: Deformasyon süresi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
C	: Pil kapasitesi
n	: Uygulanan pulse sayısı
H	: Nozul ile numune arasındaki mesafe
h	: Nozul ile elektrot arasındaki mesafe

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Yüzey mühendisliğinde kullanılan tekniklerin özeti.....	2
Şekil 2.1.	Çeliklerin lazer yüzey işleminde uygulanan güç yoğunlukları ile işlem süreleri.....	12
Şekil 2.2.	Sade karbonlu çelikler için temperlenmemiş martensit sertliğinin karbon içeriği ile değişimi.....	14
Şekil 3.1.	Pulse plazma cihazı.....	17
Şekil 3.2.	Pulse plazma cihazının çalışma düzeneği.....	17
Şekil 3.3.	a) İşlem esnasında plazmatron görüntüsü, b) plazmatron görüntüsü.....	19
Şekil 3.4.	Farklı yüzey modifikasyon yöntemlerinin karşılaştırılması.....	20
Şekil 3.5.	a) Pulse plazma ile modifikasyon oluşum mekanizması, b) Pulse plazma ile modifikasyon oluşum mekanizması.....	22
Şekil 3.6.	Pulse plazma teknolojisinin genel özeti.....	23
Şekil 3.7.	Plazma detonasyon ekipman düzeneği.....	24
Şekil 3.8.	a) Azot içeren pulse plazma ile sertleştirilen çeliğin(C 0,45 %) işlem sonrası görünümü, b) oksijen taşıyan pulse plazmayla yüzeyi sertleştirilen çeliğin optik görünümü (1 pulse yapılmış), c) azot içeren pulse plazma ile yüzeyi sertleştirilen çeliğin (C 0,45 %) optik görünümü (5 pulse yapılmış).....	27
Şekil 3.9.	Pulse plazma uygulanmış numune yüzeyinden alınmış elementel analiz.....	28
Şekil 3.10.	Pulse plazma uygulanmış farklı numune grupları.....	29
Şekil 4.1.	Statik ve kinetik sürtünmenin şematik anlatımı.....	38
Şekil 4.2.	Sürtünme ve aşınmanın istenen ya da istenmeyen özellikler olduğu ya da olmadığı bazı kullanım alanları.....	40
Şekil 4.3.	Sürtünmenin ayrıntıları; a) Üstteki cisim alttaki cisim üzerinde sağa doğru kaymaktadır, b) Yüzeysel yapışma noktaları	

	büyütülerek gösterilmiştir.....	41
Şekil 4.4.	Lameli katıların yağlayıcılık mekanizması.....	44
Şekil 4.5.	Grafit ve Mo ₂ S malzemelerinin kristal yapıları.....	45
Şekil 4.6.	Aşınmayı tanımlayıcı anahtar kelimeler ve birbirleri ile etkileşimleri.....	47
Şekil 4.7.	Dört başlıkta incelenen aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.8.	Abrazif aşınma mekanizmasının üç tipi olan a) Kesme, b) Pulluklama, c) Kızaklama aşınmalarının SEM görüntüleri.....	50
Şekil 4.9.	İki-yüzeyle ve üç-yüzeyle abrazif aşınma tipleri.....	52
Şekil 5.1.	a)Pulse plazma uygulama sistemi (plazmatron), b) kontrol paneli ve güç üniteleri.....	56
Şekil 6.1.	a)1 (60mm, 5 pulse), b)2 (60mm, 10 pulse) ve c)3 (60mm, 15 pulse) no'lu numunelerin kesitleri hazırlanarak alınmış optik görüntüleri.....	61
Şekil 6.2.	a)4 (70mm, 5 pulse), b)5 (70mm,10 pulse) ve c)6 (70mm, 15 pulse) no'lu numunelerin kesitleri hazırlanarak alınmış optik görüntüleri.....	63
Şekil 6.3.	a)7 (80mm, 5 pulse), b)8 (80mm, 10pulse) ve c)9 (80mm, 15 pulse) no'lu numunelerin kesitleri hazırlanarak alınmış optik görüntüleri.....	65
Şekil 6.4.	800µF pil kapasitesinde, 60mm, 70mm ve 80mm mesafede 15 pulse için mesafe modifikasyon tabaka kalınlık değerlerinin değişim grafiği.....	67
Şekil 6.5.	1 (5 pulse), 2 (10 pulse) ve 3 (15 pulse) no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri (H=60mm, C=800µF).....	68
Şekil 6.6.	4 (5 pulse), 5 (10 pulse) ve 6 (15 pulse) no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri (H=70mm, C=800µF).....	69
Şekil 6.7.	7 (5 pulse), 8 (10 pulse) ve 9 (15 pulse) no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri (H=80mm,	

	C=800 μ F).....	70
Şekil 6.8.	800 μ F pil kapasitesinde, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 5 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	70
Şekil 6.9.	800 μ F pil kapasitesinde, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 15 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	71
Şekil 6.10.	İşlem uygulanmamış AISI 5140 çeliğinin x-ışını analiz sonucu...	73
Şekil 6.11.	1 no'lu numunenin x ışını difraksiyon paterni.....	74
Şekil 6.12.	3 no'lu numunenin x ışını difraksiyon paterni.....	74
Şekil 6.13.	6 no'lu numunenin x ışını difraksiyon paterni.....	75
Şekil 6.14.	9 no'lu numunenin x ışını difraksiyon paterni.....	76
Şekil 6.15.	AISI 5140, 1, 2 ve 3 no'lu numunelerin yük-aşınma miktarı ilişkisi.....	79
Şekil 6.16.	AISI 5140, 4, 5 ve 6 no'lu numunelerin yük-wear rate ilişkisi.....	80
Şekil 6.17.	AISI 5140, 7, 8 ve 9 no'lu numunelerin yük-wear rate ilişkisi.....	81
Şekil 6.18.	60mm, 70mm ve 80mm numune-nozul arası mesafelerinde 5 pulse uygulanmış numunelerin (1, 4 ve 7 no'lu numuneler) yüke bağlı olarak aşınma hızları değişimleri.....	82
Şekil 6.19.	60mm, 70mm ve 80mm numune-nozul arası mesafelerinde 10 pulse uygulanmış numunelerin (2, 5 ve 8 no'lu numuneler) yüke bağlı olarak aşınma hızları değişimleri.....	82
Şekil 6.20.	60mm, 70mm ve 80mm numune-nozul arası mesafelerinde 15 pulse uygulanmış numunelerin (3, 6 ve 9 no'lu numuneler) yüke bağlı olarak aşınma hızları değişimleri.....	83
Şekil 6.21.	800 μ F pil kapasitesinde 1 (60mm, 5 pulse), 2 (60mm, 10 pulse) ve 3 (60mm, 15 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi.....	87
Şekil 6.22.	800 μ F pil kapasitesinde 4 (70mm, 5 pulse), 5 (70mm, 10 pulse) ve 6 (70mm, 15 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı	

	ilişkisi.....	88
Şekil 6.23.	800 μ F pil kapasitesinde 7 (70mm, 5 pulse), 8 (70mm, 10 pulse) ve 9 (70mm, 15 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi.....	88
Şekil 6.24.	a)1 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 2N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)1 no'lu numunenin 2N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2 no'lu noktaların EDS analizleri.....	90
Şekil 6.25.	a)1 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)1 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	91
Şekil 6.26.	a)2 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)2 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	93
Şekil 6.27.	a)2 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 2N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)2 no'lu numunenin 2N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri.....	94
Şekil 6.28.	a)2 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)2 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	95
Şekil 6.29.	a)3 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)3 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların	

	EDS analizleri.....	96
Şekil 6.30.	a)4 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)4 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	98
Şekil 6.31.	a)4 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)4 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	100
Şekil 6.32.	a)5 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)5 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	102
Şekil 6.33.	a)5 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 2N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)5 no'lu numunenin 2N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri.....	103
Şekil 6.34.	a)5 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)5 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri.....	104
Şekil 6.35.	a)6 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)6 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	105
Şekil 6.36.	a)7 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM	

	görüntüsü, b)7 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	106
Şekil 6.37.	a)7 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)7 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri.....	108
Şekil 6.38.	a)8 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)8 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	109
Şekil 6.39.	a)8 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)8 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri.....	110
Şekil 6.40.	a)9 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)9 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	112
Şekil 6.41.	a)9 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)9 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri.....	113

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1.	Farklı teknolojilerin karşılaştırılması.....	32
Tablo 3.1.	(Devam) Farklı teknolojilerin karşılaştırılması.....	33
Tablo 3.2.	Kalite ıslah çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık).....	33
Tablo 3.3.	AISI 5140 çeliğinin mekanik özellikleri.....	34
Tablo 5.1.	Pulse plazma uygulama şartları.....	57
Tablo 6.1.	Pulse plazma parametreleri ve modifikasyon tabakası kalınlık değerleri.....	66
Tablo 6.2.	Numune gruplarının aşınma hız değerleri.....	78
Tablo 6.3.	Numune gruplarının aşınma sonrası ağırlık kayıpları.....	84
Tablo 6.4.	Numune gruplarına ait sürtünme katsayı değerleri.....	86
Tablo 6.5.	Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları.....	89

ÖZET

Anahtar kelimeler: Pulse plazma, AISI 5140, yüzey modifikasyonu, çizgisel aşınma

Pulse plazma teknolojisi ve ekipmanları parçaların yüzey modifikasyonu için geliştirilmiştir. Esas olarak yoğun enerjili pulse kullanımı malzemenin işlem yüzeyinde morfolojinin değişimine yol açarak modifikasyona sebep olmaktadır. AISI 5140 çeliğinin yüzey özellikleri pulse plazma sistemi ile geliştirilerek pahalı ve zor bulunan çelik gruplarının yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Pulse plazma yöntemiyle AISI 5140 çeliklerinin yüzeyleri modifiye edilmiştir. Çalışma yüzeyleri pulse plazma teknolojisi ile C_3H_8 , basınçlı hava ve O_2 gazları kullanılarak modifiye edilmiştir. Modifiye edilen numunelerin optik fotoğrafları çekilmiş, modifikasyon tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Pulse plazma işleminin uygulandığı parametrelerin modifikasyon tabaka kalınlığını ve yapısını etkilediği belirlenmiştir.

Modifikasyon tabakasından alınan x-ışını analizlerinde Fe_3C , Fe_7C , Mo, MoC, Cr, α -Fe ve γ -Fe piklerine rastlanmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde mesafeye ve pulse plazma parametrelerine göre değişen sertlik değerleri elde edilmiştir. Modifikasyon işlemi uygulanmadan 228 $HV_{0.05}$ olan çeliğin sertlik değeri 990 $HV_{0.05}$ 'ye kadar çıkarılmıştır. Sertleştirmeden sonra parçaların kararlılığı 2-3 kat artmaktadır.

500m için 0,15 m/sn hızda 1N, 2N ve 3N yük altında CSM aşınma cihazı ile çizgisel (lineer) aşınma deneyleri yapılmıştır. Numunelere uygulana çizgisel aşınma deneyleri sonrası yük değişimiyle sürtünme katsayısının ve aşınma miktarlarının değiştiği gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayıları düşmüştür. Yüzeyleri modifiye edilen çeliklerin aşınma dayanımlarının 2 kat arttığı görülmüştür. Aşınma sonrası, modifikasyon yüzeylerinden SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır.

INVESTIGATION OF THE SURFACE PROPERTIES OF MODIFIED 5140 STEEL BY PULSE PLASMA TECHNOLOGY

SUMMARY

Key Words: Pulse plasma, AISI 5140, surface modification, linear wear

The pulse plasma technology which is a new process of surface modification have been developed for the production of materials, tools and machine parts with required surface properties, such as wear and corrosion resistance. Pulsed plasma system with improved surface properties of AISI 5140 steel is expensive and hard to find the availability of steel rather than groups studied.

The surfaces of AISI 5140 steel were modified by a newly developed pulse plasma technique. The surfaces of the samples were modified by a mixture of air, C₃H₈ and oxygen gases by using plasma pulse technique. The samples were investigated in optical microscope and modified coating layer thicknesses were measured. It was determined that pulse plasma process parameters affect the thickness of modification layer and its microstructure. In this study, the microstructure and surface properties of pulse plasma treated AISI 5140 steel was evaluated.

Fe₃C, Fe₇C, Mo, MoC, Cr, α-Fe, γ-Fe phases were detected in modification layer taken from X-ray analysis. Microstructural hardness measurements were taken from surface to core and different values were measured depending on various parameters. The hardness of steel sample was measured as 228 HV_{0.05} before pulse plasma treatment. Its value was increased to 990 HV_{0.05} after the treatment. After wear study, several analysis techniques such as X-ray diffraction and scanning electron microscope (SEM) and EDS were utilized to reveal the nature of this improvement. It is found that the hardness of the surface of the samples after treating was 2-3 times increased.

Wear test was done in CSM-linear wear test machine with 0,15m/s constant sliding speed under 1N, 2N, and 3N loads for 500m. It was observed that friction coefficient and wear value were changed in accordance with load. Friction coefficient values of modified specimens were lower than that of non-modified ones. Wear resistance was increased in modified samples.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirerek, yeni mühendislik özellikleri kazandırmak ya da dekoratif açıdan çekici kılmak insanoğlunun eski çağlardan beri süregelen amaçlarından birisi olmuştur. Günümüzde malzeme yüzeylerinin değiştirilmesine yönelik işlemler “yüzey ve altlık malzemenin tasarımını bir arada ele alan ve bu ikisinin tek başlarına sağlayamayacağı özellikleri ekonomik olarak sağlayabilen işlemler” olarak tanımlanır ve bilim olarak “Yüzey Mühendisliği” adını alır.

Yüzey mühendisliği disiplinler arası bir tanıma sahiptir. Yüzey mühendisliği teknolojileri, problem çözme kabiliyeti yanında katma değer sağlamaya da haizdir.

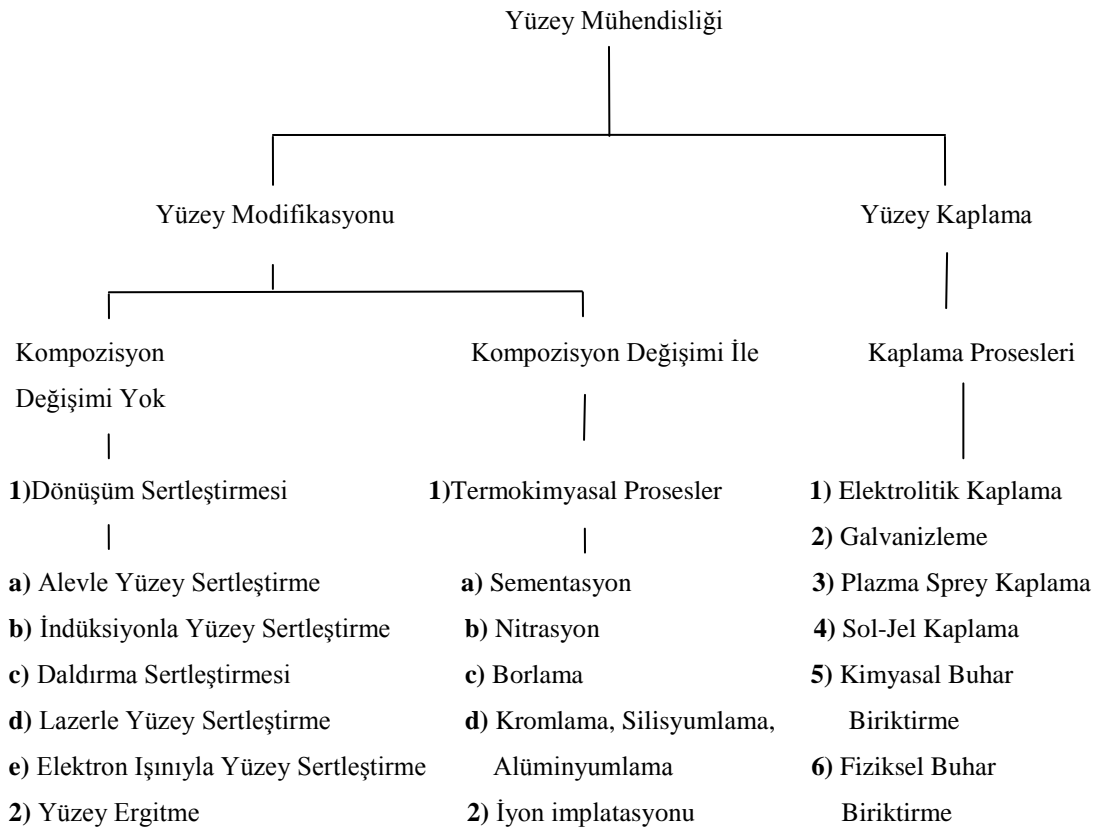
Yüzey Mühendisliği teknolojilerinin avantajları arasında [1];

- Performans artışı
- Maliyet düşüşü
- Fonksiyonellikte iyileşme
- Mühendislik problemlerine çözüm getirme
- Nadir malzeme kaynaklarının dönüşümü
- Güç tüketiminde düşüş
- Verim artışı sayılabilir.

Aşınma ve korozyondan dolayı dünyada her yıl önemli kayıplar olmaktadır. Ülkelerin korozyon nedeniyle kayıpları gayrisafı milli hasıllarının %3,5-5 arasında değişmektedir. Bu kadar yüksek kayıpların oluşu, buna paralel endüstrinin gelişimi, dayanıklı ve kararlı malzemeler büyük ilgi toplamaktadır. Fakat bunlarda, tüm mekanik özelliklere, konvansiyonel malzemeler gibi cevap verememekte, hammadde üretimi ve şekillendirmedeki zorluklar fiyatın yüksek oluşuna sebep olmaktadır. Bu

sebeple mümkün olduğu kadar ucuz ve gerekli yapısal özellikleri sağlayan, buna karşılık yüzey özellikleri gelişmiş malzemelerin üretilmesi ağırlık kazanmıştır. Gerekli yüzey özelliklerini sağlamak için günümüzde kullanılan yüzey teknikleri gittikçe önem kazanmıştır.

Yüzey teknikleri, sertlik, yorulma, aşınma, korozyon, ısıl ve darbesel şok gibi mekanik ve tribolojik özelliklerin bir veya birkaçını geliştirmek ve üretim maliyetini düşürmek amacıyla uygulanmaktadır [2]. Şekil 1.1 yüzey mühendisliğinde kullanılan teknikleri özetlemektedir. Yüzey malzemesinin mikroyapısı, kompozisyonu değiştirmeden modifiye edilebilir. Bu değişim, dönüşüm sertleştirilmesi ya da ergimeyi takiben hızlı katılaştırma ile sağlanır. Bu da genellikle, farklı kimyasal bileşenlerin malzeme yüzeyine termal olarak zenginleştirilmiş difüzyonuyla gerçekleştirilir. Ancak bu metotlar ile kompozisyon ve mikroyapıda sağlanan değişimler sınırlıdır ve birçok amaç için tamamen farklı malzemelerin kaplamaları uygulanmaktadır [3].



Şekil 1.1. Yüzey mühendisliğinde kullanılan tekniklerin özeti [3]

Pulse plazma teknolojisi ve ekipmanları parçaların yüzey modifikasyonu için geliştirilmiştir. Esas olarak yoğun enerjili pulse kullanımı malzemenin işlem yüzeyinde morfolojinin değişimine yol açarak modifikasyona sebep olmaktadır. Modifikasyondan sonra, yüzeylerin sürtünme katsayısı azalır, korozyon dayanımı kazanırlar, aşındırıcı şartlar altında aşınma dayanımı 2-5 kat artar, ısı dayanımları artar.

Alaşım elementlerinin de içinde olduğu pulse plazma işlemi iş parçası yüzey işlemleri, termal, elektromanyetik ve deformasyon olgularını içine alan kompleks bir işlemler bütünüdür. Bu durum, iş parçası yüzeyinin plazma bileşenleri ile alaşımlandırılmasını ve bu yüzeyin sertleştirilmesini mümkün kılar. Alaşım elementleri metal elektrot (çubuk) erozyon ürünleri biçiminde veya propan, azot gibi gazlar biçiminde plazmaya katılır. Soğuk ve sıcak pres parçalar, kesici ve şekil verici cihazlarında, kalıplarda, zımba ve delik açma cihazlarında, testerelede, bıçaklarda, ahşap çalışma parçalarında, öğütücülerde, tarım aletlerinin sertleştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu teknoloji aletlerin çalışma yüzeylerinin sertleştirilmesinde etkilidir. Sertleştirmeden sonra parçaların kararlılığı 3-6 kat artmaktadır.

Bu çalışmada da farklı parametreler de uygulanan pulse plazma teknolojisi ile orta karbonlu, krom (Cr) alaşımlı veya yüksek dayanımlı, düşük alaşımlı çelik olarak adlandırılan AISI 5140 ıslah çeliklerinin yüzey özelliklerinin geliştirilerek yüksek karbonlu, yüksek alaşımlı pahalı çeliklerin yerine kullanılabilirliğini araştırmak amaçlanmıştır. Bu bağlamda pulse plazma ile yüzeyi modifiye edilmiş bu çeliklerin optik mikroskopta kesit görüntüleri alınmış, tüm numunelerin XRD analizleri yapılmış, mikrosertlik değerleri alınarak numunelerin sertlik profilleri çıkarılmış ve aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayı değerleri ve aşınma hız değerleri elde edilmiş ve aşınma sonrası aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri alınıp aşınma bölgelerinin EDS analizleri yapılmıştır. Çalışmanın 1. bölümünü genel bakış oluşturmaktadır. 2., 3. ve 4. bölümde literatür çalışması gerçekleştirilecektir. Bu çalışmada deneysel işleyiş 5. bölümde tanımlanacaktır. 6. bölümde ise üretilmiş numunelerin deneysel sonuçları incelenecektir. Son bölüm olan 7. bölümde sonuçlar özetlenecektir.

BÖLÜM 2. YÜZEY VE YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ

Bir iş parçasında kitlesel halde olmayan bir veya birkaç özelliği o iş parçasının yüzeyinde oluşturmak için yapılan işlemlerin tümüdür [4].

2.1. Yüzey İşlem Prosesleri

- Mekanik İşlemler (kum püskürtme, bilya ile dövme)
- Yüzey Dönüşümü (indüksiyon ile sertleştirme, lazer ile sertleştirme)
- Yüzey bileşimi değişimi (termokimyasal işlemler)
 - a-Karbürleme, karbonitrürleme
 - b-Nitrürleme, nitrokarbürleme
 - c-Borlama
- Kimyasal işlemler (dönüşüm kaplamaları: oksitleme, fosfatlama, kromatlama)
- Kaplama (boyama, püskürtme, buhar biriktirme, elektrolitik kaplamalar)
- Yüzey aktivasyonu (dağlama) [4]

Malzemelerin çevre ile etkileşimi doğrudan malzemenin yüzeyi ile gerçekleştiği için malzemenin yüzey özellikleri üzerine çalışmalar yoğunlaşmıştır. Bu çalışmaların başında malzemelerin yüzeyinde oluşturulan kaplamalar gelmektedir. Yüzey işlemlerini kaplama ve yüzey dönüşüm işlemleri olmak üzere ikiye ayırmak mümkündür. Kaplama, metal yüzeyine bir element veya bileşimini biriktirerek bir tabaka oluşturulması işlemlerini kapsamaktadır. Yüzey dönüşüm işlemlerinde ise, yüzey iç yapısı ve/veya bileşiminin değişmesi söz konusudur [4].

Aşınmaya neden olan mekanik sürtünme, korozyon ve erozyon mekanizma elemanlarını kullanılamaz hale getirerek, pahalı ve özel malzemelerin büyük miktarda kaybına yol açmaktadır [4].

Mekanik olarak meydana gelen aşınma ve bununla beraber korozyon kayıpları hem endüstriyel hem de ekonomik zararların oluşumuna sebep olmaktadır. Bu sebeple ağır şartlar altında çalışan malzemelerin çalışma yüzeylerin bu ağır şartlara karşı gerekli yüksek yüzey özelliklerine sahip olması gerekmektedir [4].

2.2. Yüzey İşlem Seçimini Etkileyen Faktörler

Uygulanacak yüzey işleminin türü çeşitli faktörlerin etkisi altındadır.

A. Performans faktörleri;

- Aşınma direnci
- Sertlik ve mukavemet
- Korozyon direnci
- Darbe direnci
- Gerekli kaplama kalınlığı

B. İşlem faktörleri;

- Malzeme cinsi
- Biriktirme hızı
- Altlık sıcaklığı
- Parça şekli ve boyutu
- Fiyatı
- Parçanın yorulma özelliği [4]

2.3. Yüzey Sertleştirme İşlemleri

2.3.1. Karbürizasyon

Karbürleme, karbonca zenginleştirilmiş bir ortam yaratarak partikül yüzeylerine karbon atomları difüze edilerek yapılan bir işlemdir. Tabaka derinliği, üst sıcaklığa, zamana ve karbon potansiyeline bağlıdır. Karbürizasyon için çelik ostenitten meydana gelecek şekilde yüksek bir sıcaklığa yani A_{c3} sıcaklığının üstünde (yaklaşık olarak $900^{\circ}C$) ısıtılmaktadır. Bu sıcaklıkta ostenit %1'den fazla karbon

çözündürebilir. Karbon miktarına bağlı olarak, karbon atomları yüzey yapısına ve daha içlere doğru girer. Sıcaklık ne kadar yükselirse bu difüzyon olayıda o kadar çabuk vuku bulur. Karbonun yapıya nüfuz etme derinliğini tavlama süresi ve sıcaklık etkiler, yapıdaki karbon miktarını ise karbürleyici madde etkiler [5].

2.3.2. Nitrürleme

Uygun demir alaşımlarının amonyak ve azotlu tuz ortamında ısıtılmasıyla azot difüze ederek ve su vermeye gerek kalmadan sert yüzey elde edilmesine nitrürleme denir. Termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden biri olan nitrürleme, literatürde azotlama, nitrürasyon, nitrasyon gibi isimler de alabilmektedir. Nitrürleme, demir esaslı alaşımların yüzeylerine belli bir sıcaklıkta nitrojen difüze ettirilerek yüzeyde bir nitrür tabakası oluşturmaya yarayan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Nitrürleme, diğer termokimyasal yüzey sertleştirme işlemlerinden daha düşük sıcaklıklarda (500-570°C) gerçekleştirilir. Bu sıcaklıktaki bir çeliğin faz dönüşümüne uğramadığı yani ferritik bir yapıda olduğu için çeliğin distorsiyon (çarpılma) riski çok azalır [6].

Nitrürleme yüzey sertleştirme işlemi ile çeliğe kazandırılan özellikler şöyle sıralanabilir:

- 1- Yüksek bir yüzey sertliği ve aşınma mukavemeti,
- 2- Temperlenmeye karşı yüksek direnç ve yüksek sıcaklık sertliği,
- 3- Yüksek yorulma mukavemeti ve düşük yorulma çentik hassasiyeti,
- 4- Paslanmaz olmayan çelikler için iyileşmiş korozyon direnci,
- 5- Diğer yüzey sertleştirme yöntemlerine göre yüksek boyutsal kararlılık [7].

2.3.2.1. Plazma (iyon) nitrürleme

Çeliklerin yüzeylerine azot verilerek uygulanan nitrürasyon işleminde uygulama süresinin çok uzun olması, bu sürenin kısaltılması yönünde araştırmacıları sürekli meşgul etmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, 1960'lı yıllardan itibaren endüstriyel anlamda kullanım alanı bulan plazma nitrürasyon ya da diğer ismiyle

iyon nitrürleme yöntemi geliştirilmiştir. Plazma nitrürasyon yönteminde azot difüzyonu, metal yüzeyinde ve yüzeye çok yakın bölgede termokimyasal reaksiyonlarla gerçekleştirilir. Azot difüzyonuyla teşekkül eden nitrürler ve malzemenin özelliklerine etkisi, alışılmış diğer nitrürasyon yöntemlerinde olduğu gibidir. Termo-kimyasal reaksiyonların oluşması için gerekli azot, azot gazının ya da azot içeren bir gaz veya gaz karışımının yüksek gerilimli doğru akım ile iyonlara ayrıştırması ile elde edilmektedir. Bu yöntemde gaz olarak genellikle azot ya da amonyak kullanılmaktadır.

2.3.3. Karbonitrürleme

Karbonitrürleme, çeliğe ostenitik halde karbon ve azotun verildiği bir yüzey sertleştirme ısıl işlemidir. Bu işlem, ostenit bileşiminin değişmesi açısından karbürlemeye benzer ve yüksek yüzey sertliği su vermek sureti ile martenzitin teşekkülü ile elde edilir. Karbonitrürleme ile yüzeyin sertleştirilmesi martenzit teşekkülü kadar bir derece nitrür oluşumuna da bağlıdır [5]. Karbonitrürleme prosesinde, amonyak + karbonca zengin bir gaz veya karbürlemede bir tür karbon kaynağı olarak kullanılan buharlaştırılmış sıvı hidrokarbon ihtiva eden bir atmosfer kullanılır. Karbonitrürlemede, çeşitli gaz değişimi ve gaz-metal reaksiyonları meydana gelir. Çelik yüzeyinde amonyak dissosiyeye olur ve atomik azot çeliğe girer. Azot karbonun difüzyonunu engeller ve bu etki ve buna ilave olarak karbonitrürlemenin düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi (705-900°C) ve karbürlemedekinden daha kısa süreler tabaka kalınlığının nispeten ince olmasına (0,075-0,75mm) sebep olur. Daha yüksek sıcaklıklarda, amonyağın termal dekompozisyonu çok hızlıdır ve azot tedarikini sınırlar. Düşük karbonitrürleme sıcaklıkları, düşük sıcaklıklarda gevrek yapılar oluştuğu için pek kullanılmaz. Mamafih, daha düşük sıcaklıklarda uygulanan bir karbonitrürleme türü (ostenitik nitrokarbürleme) geliştirilmektedir. Bu son proses, optimal olarak 675-775°C sıcaklık aralığında uygulanmaktadır ve epsilon karbonitrür bir yüzey bileşik tabakası meydana getirecek şekilde kontrol edilmelidir [5].

Karbonitrülenmiş çeliklerdeki azot sertleşme kabiliyetini de artırır ve düşük sertleşme kabiliyetine sahip sade karbonlu ve az alaşımlı çeliklerde martenzit teşekkülünü mümkün hale getirir. Azot varlığı sebebiyle oluşan nitürler de yüksek tabaka sertliğine yardımcı olur. Azot, karbona benzer şekilde, bir ostenit stabilizatörüdür. Bu bakımdan, karbonitrülenmiş bir parçaya su vermeden sonra önemli bir miktar ostenit kalabilir. Eğer kalan ostenit miktarı sertliği ve aşınma direncini azaltacak kadar yüksekse, ostenit miktarı ya proses içerisinde ya da prosesin son kısmı sırasında karbonitrüleme gazının amonyak miktarının azaltılması ile kontrol edilebilmektedir [5].

2.3.4. Ferritik nitrokarbürleme

Çeliğe karbon ve azot verilmesini içeren bir diğer yüzey sertleştirme türü ferritik nitrokarbürlemedir. Karbonitrülemeye ters, fakat nitürleme prosesine benzer şekilde, karbon ve azot, ferrite Ac_1 sıcaklığının altında ilave edilmektedir. Ferritik nitrokarbürleme prosesi sıvı ve gaz olarak yapılmaktadır. Her iki prosesdeki ortak faydalı sonuç, 450 ve 590°C arasında oluşan çok ince bir tek fazlı epsilon karbonitrür tabakasıdır. Epsilon karbonitrür bileşik tabakası mükemmel aşınma özelliklerine sahiptir ve minimum distorsiyonla üretilmektedir. Tabaka ferritik+perlitik mikro yapıya sahip pahalı olmayan yumuşak çelikler üzerinde oluşabilmekte ve bundan dolayı, onların aşınma ve yorulma direncini önemli ölçüde iyileştirmektedir [5,8]. Difüzyon zonunda, nitürlemenin bir sonucu olarak oluşana benzer nitürler veya çökelti zonları, azot bileşik tabakasından çeliğin içerisine difüze oldukça, gelişmektedir bir kural olarak, bileşik tabakası iyi tribolojik özellikler kazandırır fakat iyi yorulma direnci için önemli bir difüzyon zonu gereklidir [8].

2.3.5. Dönüşüm sertleştirilmesi

Yumuşak bir karbon çelik parçanın yüzeyinde sert malzeme bölgesi oluşturmanın en basit metodu dönüşüm sertleştirilmesidir. Dönüşüm sertleştirilmesinde, yüzey malzemesi ısıtma ile hızlıca ostenite dönüştürülür ve bu sıcaklıktan su verme ile

martenzitik yapı oluşur, ardından da temperlenir. Metot, uygun faz dönüşümü gösteren malzemelere uygulanabilir, ancak genellikle demirli alaşımlara uygulanır. Hızlı ve nispeten basit bir işlem olduğu için dönüşüm sertleştirilmesi, dişli, kam mili, krank mili, bıçak ve çeşitli yatak (rulman) yüzeyleri gibi tribolojik parçalar için yaygın olarak kullanılmaktadır. Dönüşüm sertleştirmesinde kullanılan ısı kaynağı, malzemenin etkilendiği derinliği ve sertleştirilmiş tabakanın özelliklerini belirler. Yaygın olarak kullanılan metotlar; oksiasetlenen veya oksipropilen alevi (alevle sertleştirme) ve yüksek frekanslı elektrik indüksiyonu ile ısıtmadır. Son zamanlarda geliştirilmiş olan yeni metotlar da, bunlar lazer ya da elektron ışınlarıyla ısıtma, kullanılmaktadır. Alev ve indüksiyonla sertleştirme her ikisinde de, ostenitleme işleminden sonra iş parçasını soğutmak için bir dış su verme ortamı gereklidir [3].

2.3.5.1. Alevle yüzey sertleştirme

Bir çelik parçanın alevle sertleştirme prensibi yüzeyin ostenit sıcaklığına hızla ısıtılması ve daha sonra iş parçası yüzey katmanını üzerinde martensitik bir yapı oluşturmak için parçanın hızla soğutulmasını gerektirir. Alevle sertleştirmede çeliğin yüzeyi, örneğin oksiasetlenen veya oksihidrojen üfleci kullanılarak direkt olarak yüksek sıcaklık alevinin vurmasıyla hızlı bir şekilde ısıtılır. Yüzeyi gerekli sıcaklığa kadar ısıtılan parçaya aniden su verilir. Bu işlem, genelde parçaya su püskürtülerek gerçekleştirilir. Bazı durumlarda ise parçaya yağda su verilebilir. Su verme işleminden sonra parça 180-205°C arasındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılıp; havada soğutulmak suretiyle gerilim giderme işlemine tabi tutulur.

Orta karbonlu çeliklere uygulanan bu işlemde, parçanın yalnız yüzeyi alevle ısıtılıp ostenitlendikten sonra su verilerek sertleştirilir. Ancak bu işlem sırasında parçanın iç kısmında önemli bir sıcaklık artışı ve dolayısıyla yapısal değişmeye meydan vermemek gerekir. Yoğun ısıtma, oksijen – yanıcı gaz (asetilen, propan v.b.) alevi yardımıyla sağlanır. Bu işlemde, su verme sıcaklığı normal su verme sertleştirilmesi için gerekli tavlama sıcaklığından daha yüksektir.

Alevle sertleştirme çok geniş bir aralıktaki farklı demir esaslı iş parçalarına uygulanır. Bunlar çok büyük dişliler, kalıplar, kamaların aşınma yüzeyleri ve yüzey sertleştirme gerektiren küçük kesitlerdir [4].

2.3.5.2. İndüksiyonla yüzey sertleştirme

İndüksiyonla yüzey sertleştirmenin prensibi, iş parçasının yüzeyini hızlı bir şekilde ostenit sıcaklığına ısıtma ve sert martensitik katmana dönüşmesi için hızla su vermektir. İş parçasının kompozisyonunda değişim olmadığı için çelik, sert yüzey katmanı ve iç kısım özellikleri için seçilmelidir. Bu nedenle indüksiyonla yüzey sertleştirme çelikleri genellikle %0,4-0,75 karbon içermelidir ve iç kısım özellikleri indüksiyonla yüzey sertleştirmeden önce ısıl işleme geliştirilmelidir.

İndüksiyonla sertleştirmede; çelik parçaların indüksiyonla ısıtılması, sertleştirilecek parçaların yüksek frekanslı alternatif akımın geçtiği su soğutmalı bakır indüksiyon bobini içerisine yerleştirilmesi ile yapılır. İndüksiyon yolu ile parçanın yüzeyinde bir elektrik akımı meydana gelir ve yüzey çok çabuk ostenitleme sıcaklığına ulaşır. Bobinde üretilen hızlı alternatif manyetik alan çeliğin yüzeyinde devamlı akıma neden olur.

İndüksiyon ısıtma ile yüzey sertleştirmenin avantajı yükseltilmiş aşınma direnci ve iyileştirilmiş yorulma dayanımıdır. İndüksiyonla sertleştirilen yüzey tabakası, alevle sertleştirilen yüzey tabakasına benzerdir, daha ince sertleşme derinlikleri elde edilebilir. Alevle sertleşme yönteminde olduğu gibi, orta düzeyde karbon içeren alaşımsız çeliklerin yüzeylerinin sertleştirilmesi için uygulanabilir ve çok sayıda simetrik şekilli parçaların yüzeyini sertleştirmek için kullanılan bir usuldür. İndüksiyonla ısıtılarak yüzey sertleştirme uygulanan parçalara örnek olarak piston kolu, pompa milleri, alın dişlileri, krank milleri, kam milleri, aks milleri, dişliler, kamalar ve valfler verilebilir.

Avantajları, indüksiyon yöntemiyle sertleştirilen parçalarda çarpılma riski yoktur. Bu yöntem etrafa gaz yaymaz ve her yerde kurulabilecek küçük tesislere ihtiyaç gösterir.

Sürekli üretim için kullanılmaya elverişlidir. Üretim hattında uygulanabilir. İndüksiyonla sertleştirme işleminde otomatik cihazlar kullanıldığından kişisel beceriye fazla ihtiyaç duyulmaz.

Dezavantajları, cihazın oldukça pahalı olması, elektrik üretimi ve bakım masrafının oldukça yüksek olması, karmaşık şekilli veya az sayıdaki parçaların sertleştirilmesi için ekonomik olmaması bu yöntemin dezavantajları olarak sayılabilir [7].

2.3.5.3. Daldırma ile yüzey sertleştirme

Daldırma sertleştirmesinde ısı kaynağı olarak 1000-1300°C'deki tuz veya metal banyolarından faydalanılır. İnce parçalar için bekletme süresi saniye mertebesinde. Su verme işlemi ısıtmadan sonra ara vermeden derhal yapılmalıdır, zira her türlü bekletme sıcaklığın merkeze doğru ilerlemesine sebep olur. Yani sertleşen tabakanın kalınlığı artar.

Avantajları, basit tesislerde uygulanır. Özel üfleç veya bobinlere gerek yoktur. Enerji masrafları düşüktür. Her çeşit değişik şekilli yüzeylerin tek bir işlemle ısı alması mümkündür.

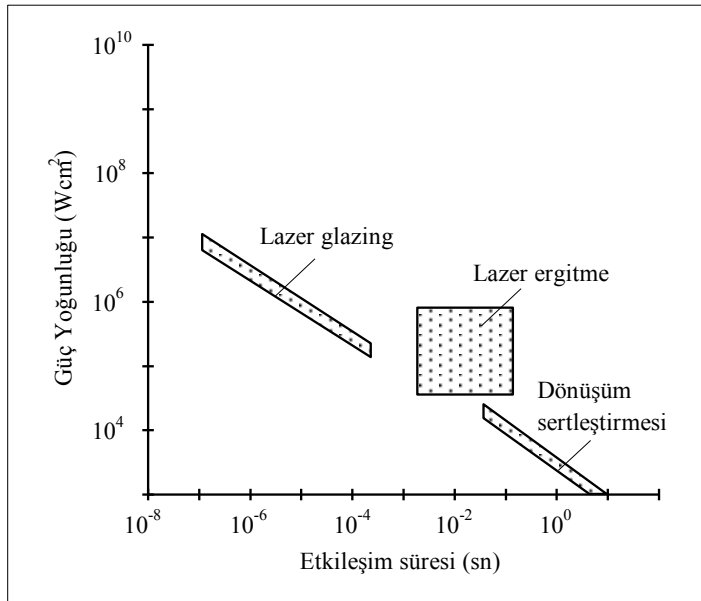
Dezavantajları, sertleşen kısmın derinliği diğer usullere oranla daha büyüktür. Parçaların üzerindeki küçük ve sınırlanmış bölgelerin sertleştirilmesi bu yöntemle mümkün değildir [9].

2.3.5.4. Lazer ile yüzey sertleştirme

Lazerle sertleştirmede, yüksek güce sahip (0,15-15 kW) karbondioksit sürekli lazerden elde edilen infra-red ışın çelik yüzeyine gönderilir. İnfra-red absorpsiyonunu arttırmak amacıyla genellikle çelik yüzeyine kaplama yapılır (örneğin; grafit, demiroksit ya da çeşitli fosfat işlemleri). Işın, 1-2 mm çapında bir nokta üretmek için fokus edilir. Nokta, aynalar yardımı ve de iş parçasının

hareketiyle, istenen bir paternde yüzey üzerinde bir uçtan diğer uca hareket ettirilebilir. Lazer ışını yüzeyde bir nokta üzerinden geçtiği için, yüzey çok hızlı bir şekilde ısınır ve ısının çevreye ve alt malzemeye kondüksiyonuyla da soğur. Kondüksiyonla soğutma hızı çok yüksektir ve dış kaynaklı bir soğutma ortamına gerek yoktur [3]. Lazer parametrelerinin değiştirilmesiyle ısının girdisi kontrol edilebilir. Bu sayede yüzeyde yaklaşık 4 mm'ye kadar kalın sert bir tabaka elde edilebilir. İşlem sonrası parçadaki çarpılmalar çok düşük düzeydedir. Karbondioksit lazer ışınının radyasyonu metal tarafından emilmediği için yüzey sertleştirme öncesi yüzey karbon esaslı bir boya ile kaplanır. İşlemin dezavantajı; maliyeti ve sadece alaşımsız ve düşük alaşımlı çelikler ile sınırlı oluşudur [10].

Şekil 3.1 dönüşüm sertleştirmesinde kullanılan güç yoğunlukları ile ısıtma sürelerini vermektedir. Güç yoğunluğunun artırılması (örneğin ışının çok daha keskin fokuslanmasıyla) veya ısıtma süresinin uzatılması ile yüzey ergimesi oluşacaktır. Lazer dönüşüm sertleştirmesinde, yüksek güç yoğunlukları ve kısa tutma sürelerinin uygulanmasıyla şekil 2.1'de gösterildiği gibi yüksek sıcaklıklar ve yüzeyel derinlikler (shallow depth) elde edilir. Daha yüksek olan sıcaklıklar, alev ya da indüksiyonla sertleştirmeye göre karbürlerin daha hızlı bir şekilde çözeltiye alınmasına neden olur [3].



Şekil 2.1. Çeliklerin lazer yüzey işleminde uygulanan güç yoğunlukları ile işlem süreleri [3].

2.3.5.5. Elektron ışınıyla yüzey sertleştirme

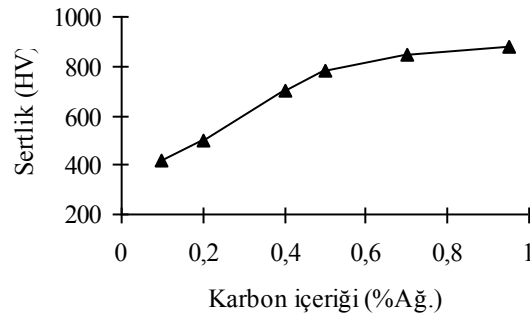
Elektronların atomu kuşatan yörüngelerde bulunduğu ve ayrı enerji seviyelerini işgal ettiği bilinmektedir. Elektronlar kristal kafesi boyunca aşağı yukarı serbestçe hareket ederler ve kafese potansiyel bir bariyer ile bağlı olduklarından kaçamazlar. Ancak, ek bir enerji ile serbest elektronların enerjisi artırılır ve potansiyel bariyeri aşarak metal yüzeyinden kaçabilirler. Bu enerjiyi sağlamanın en güvenilir yolu ise metalin sıcaklığını arttırmaktır. Isıtılan metal içindeki serbest elektronlar, verilen bu ısı enerjisini kinetik enerjilerini arttırmak için kullanırlar. Yeterli derecede kinetik enerjiye sahip olan elektronlar, içinde buldukları enerji engelini aşarak metalin dışına çıkabilirler. Bu olaya termoelektronik emisyon adı verilir.

Elektron ışını ile yüzey sertleştirme işlemi, çeliğin işlem göreceği yüzeyinin AC_1 sıcaklığının üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılıp akabinde şoklanması ile gerçekleştirilir. Alevle ve indüksiyonla sertleştirme işlemine uygun çelikler bu yöntemle de sertleştirilebilir [10].

Elektron ışınıyla sertleştirme, birçok hususta lazerle sertleştirmeye benzerdir. Enerji girişi, $1-10 \text{ kW/cm}^2$ güç yoğunluğu veren, yaklaşık 3 mm çapında fokus edilmiş elektron ışınıyla sağlanır. Işının yüzey üzerindeki hareketi, manyetik saptırıcılar ya da iş parçasının hareketi ile sağlanır. Elektron ışın prosesi vakum ortamında (1-10 Pa basınçta) gerçekleştirilir ve absorpsiyonu arttırmak için bir yüzey kaplama işlemi gerekli değildir.

Şekil 2.2 sade karbon çeliklerinde oluşturulmuş, temperlenmemiş martensitin, artan karbon içeriğiyle sertliğinin nasıl bir değişim gösterdiğini vermektedir. Ayrıca, düşük alaşımlı çeliklerde, alaşım elementleri ilavesiyle de sertlikte artış (100 HV' lik) sağlanabilir. Yüksek karbon içerikli bir çelikte ise dönüşüm sertleştirmesinden sonra istenilen maksimum sertlik elde edilebilir, ancak diğer faktörler kompozisyonu sınırlamaktadır. %0,5 üzerindeki karbon içerikleri sertleştirilmiş tabakanın düşük tokluğa sahip olmasına ve su verme çatlaklarına karşı hassasiyette artışa neden olmaktadır. Diğer taraftan, düşük karbon içeriklerinde ($<0,3 \text{ C}$) martensit oluşturmak için, alev ve indüksiyonla sertleştirmede başarısız olan çok yüksek

soğutma hızları gerekmektedir (>400 K/sn). Bu sebeplerden dolayı, bu iki proses, genellikle dar bir karbon içeriği alanındaki (%0,4-0,5C) çeliklere uygulanabilmektedir (sade karbonlu çelikler kadar alaşımlı çelikler ile dökme demirlere de uygulanabilir).



Şekil 2.2. Sade karbonlu çelikler için temperlenmemiş martensit sertliğinin karbon içeriği ile değişimi [3]

Lazer ve elektron ışınıyla sertleştirmede kendi kendine su verme ile oluşan hızlı soğutma, düşük karbon içerikli çeliklerin de, oluşturulan martensitin sertliğinin yüksek olmamasına rağmen sertleştirilebilecekleri anlamına gelmektedir. Hızlı soğutmanın bir başka özelliği, sertleştirilmiş tabakada kalıntı ostenitin mevcudiyetidir (abrasiv aşınmaya karşı dirençte olumlu etkiye sahiptir). Çeliğin artan karbon içeriğiyle kalıntı ostenit miktarı da artmaktadır.

Bütün dönüşüm sertleştirme prosesleri kısa proses süreleri ile karakterize edilir ve hepsi de yüzeyin küçük alanlarının lokalize olarak işlemine uygundur. Ayrıca ulaşılabilen maksimum sertlik ve uygulanabilecek malzeme alanları sınırlıdır. Alev ve indüksiyonla sertleştirme, iyi oturmuş metotlardır. Lazer ve elektronla sertleştirme ise daha yeni, daha özel ve daha çok ilk yatırım maliyeti gerektiren proseslerdir ve her iki yöntemle de düşük karbonlu çelikler sertleştirilebilmekte, iş parçasının tüm hacminin ısınması ve müteakiben distorsiyona uğraması söz konusu değildir [3].

BÖLÜM 3. PULSE PLAZMA TEKNOLOJİSİ VE AISI 5140 ÇELİĞİ

3.1. Giriş

Tribolojik araştırmalar yüzey mühendislik uygulamaları için çok önemlidir. Bunun en önemli sebepleri; aşınma dayanımı ve sürtünme özelliklerinin malzemelerin çalışma ömrünü etkilemesidir. Bazı durumlarda her iki özelliği sağlamak da mümkündür. Lazer, elektron, plazma gibi enerji kaynakları parçaların sertleştirilmesinde geniş miktarda kullanılmaktadır. Bu sertleştirme işlemleri yüksek sertlik, aşınma dayanımı, yorulma mukavemeti, korozyon dayanımı gibi eşsiz mekaniksel ve fiziksel özellikler sağlar [11,12]. Teknolojideki gelişmeler ile parçaların korozyon, aşınma ve yorulma dayanımlarını sürekli arttırması beklenmektedir. Bu beklentilerle beraber, geliştirilecek proseslerin hem ekonomik hem ekolojik dengeye zarar vermeyen teknolojiler olması arzu edilmektedir [13].

3.2. Pulse Plazma

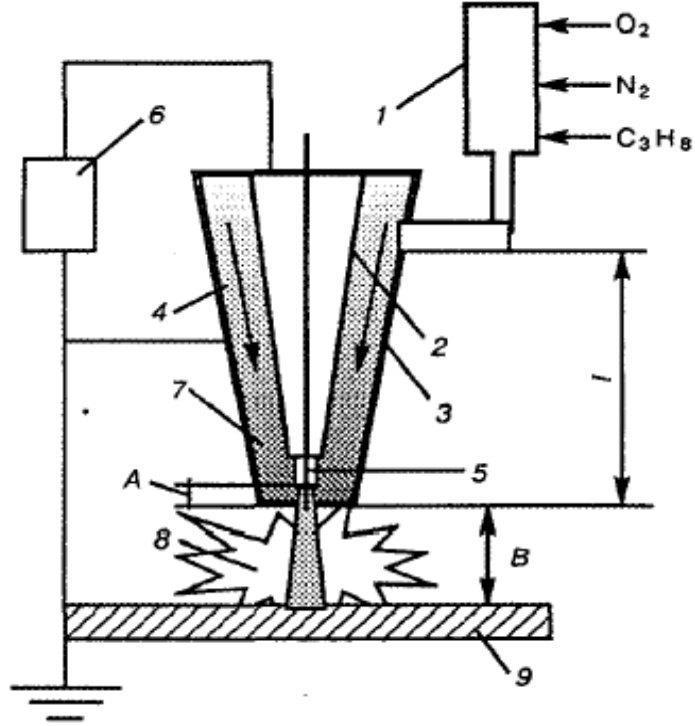
Pulse plazma teknolojisi ve ekipmanları parçaların yüzey modifikasyonu için geliştirilmiştir [14,15]. Esas olarak yoğun enerjili pulse kullanımı malzemenin işlem yüzeyinde morfolojinin değişimine yol açarak modifikasyona sebep olmaktadır [16,17]. Modifikasyondan sonra, yüzeylerin sürtünme katsayısı azalır, korozyon dayanımı kazanırlar, aşındırıcı şartlar altında aşınma dayanımı 2-5 kat artar, ısı dayanımları artar.

Alaşım elementlerinin de içinde olduğu pulse plazma tarafından iş parçası yüzey işlemleri, termal, elektromanyetik ve deformasyon olgularını içine alan kompleks bir

işlemler bütünüdür. Bu durum, iş parçası yüzeyinin plazma bileşenleri ile alaşımlandırılmasını ve bu yüzeyin sertleştirilmesini mümkün kılar. Alaşım elementleri metal elektrot (çubuk) erozyon ürünleri biçiminde veya propan, azot gibi gazlar biçiminde plazmaya katılır. Bu teknoloji ile çeşitli iş parçalarının çalışma yüzeylerinde uygulamalar yapılmaktadır; Metal çalışma parçaları: soğuk ve sıcak pres parçalar, kesici ve şekil verici cihazlarında, kalıplarda, zımba ve delik açma cihazlarında, testerelede, bıçaklarda, ahşap çalışma parçalarında, öğütücülerde, tarım aletlerinin sertleştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu teknoloji aletlerin çalışma yüzeylerinin sertleştirilmesinde etkilidir. Sertleştirmeden sonra parçaların kararlılığı 3-6 kat artmaktadır.

Tribolojik uygulamalarda yüzey mühendislik uygulamaları çok önemlidir. Bunun en önemli sebepleri; aşınma direncini artırmak ve sürtünme özelliklerini geliştirmektir. Bazı durumlarda her iki özelliği sağlamakta mümkündür [15]. Lazer, elektron, plazma gibi enerji kaynakları parçaların sertleştirilmesinde geniş miktarda kullanılmaktadır. Bu sertleştirme işlemleri yüksek sertlik, aşınma dayanımı, yorulma mukavemeti, korozyon dayanımı gibi eşsiz mekaniksel ve fiziksel özellikler sağlar [18].

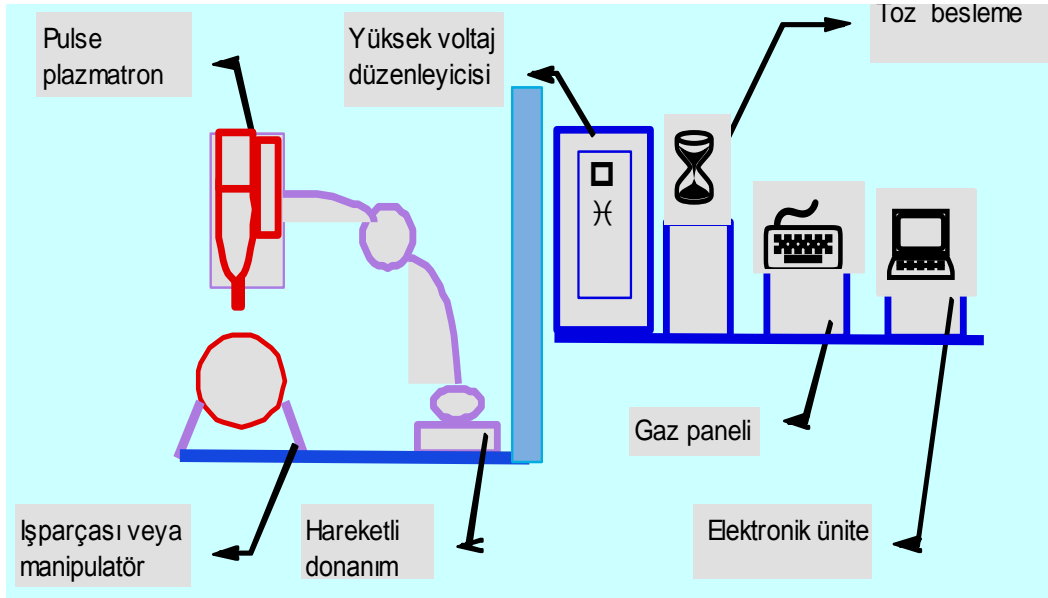
Bu teknoloji ve ekipmanları makine, metalurji ve üretim endüstrisindeki testlerden başarıyla geçmiştir. Şekil 3.1’de pulse plazma çalışma cihazı, şekil 3.2’de çalışma düzeneği görülmektedir. Pulse plazma teknolojisi için gereken ekipmanlar; plazmatron, proses kontrol panelleri, gaz kontrol panelleri, standart çalışma parçası manipulatörü ve güç destek ünitesidir. Bu ekipmanlar ses izolasyonu yapılmış bir odada saklanmaktadır.



Şekil 3.1. Pulse plazma cihazı

1-Gaz girişi 2-Merkez elektrod (anod) 3-Yan Konik Elektrotlar (Katot) 4-Anot-katot arası boşluk 5-Anot ucu (Harcanma burada gerçekleşiyor) 6-Güç ünitesi 7-Elektrotlar arası boşluk 8-Plazma alevi 9-Hareketli altlık [14].

Pulse plazma sisteminin düzenek görüntüsünün açık şekli şekil 4.2’de verilmektedir.



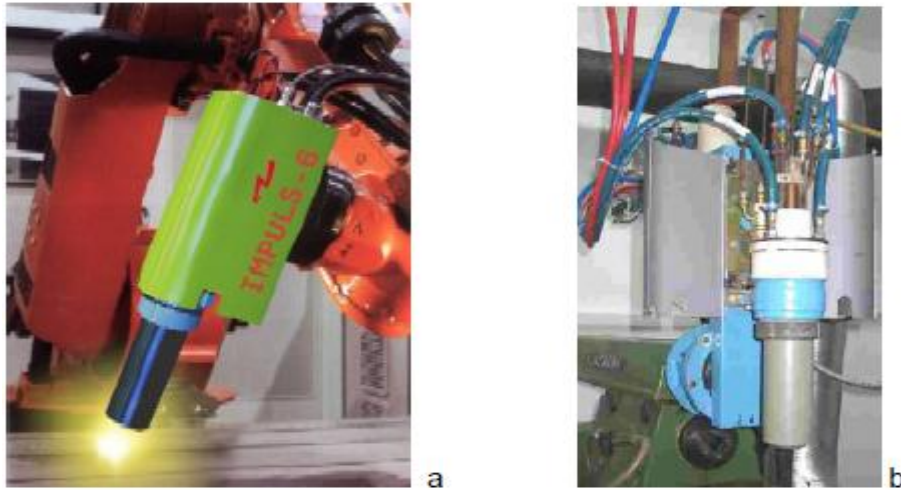
Şekil 3.2. Pulse plazma cihazının çalışma düzeni

Pulse plazma teknolojisinde yüzey modifikasyon işlemi şöyle gelişmektedir; Detonasyonunun başlangıcında, iyonize yanma ürünleri detonasyon odasından elektrodlar arası boşluklara doğru besleme yapılıır. Böylece elektrik akımı meydana gelir. Bu elektromagnetik ve gaz-dinamik güçlerin etkileri altında hızlandırılmış yanma ürünlerinin iletken tabakasının oluşumuna yol açmaktadır. Tüklenen metal elektrod merkez elektrodun eksenini boyunca sabitlenmiştir. Isınma esnasında çubuğun sonu buharlaşır ve bu plazma jetine alaşım elementlerinin girişini sağlar. Anod olan elektrod ve katod olan çalışma parçasının arasında plazma jeti akımı tamamlar. Plazma jeti boyunca geçen akım sayesinde plazma Joulean ısısı ($Q=\sigma E^2$, W/m^3) sayesinde ısınmıştır.

Araştırmaların gösterdiği üzere yüzeye pulse hareketi çok etkilidir. Bu ısınma ve soğuma hızlarının artmasına, yüzeyin elasto-plastik deformasyonuna katkıda bulunur, böylece difüzyon mekanizması yoğunlaşır.

Pulse plazma teknolojisinin temelini yüksek hızlı plazma jetleri ile çok hızlı bir biçimde yoğun toz malzeme besleme teşkil eder. Standart manipulatör kullanımı vardır. Ayrıca toz besleme, soğutma ünitesi, elektrik akım konvertörü, proses kontrol panelleri, gaz kontrol panelleri, otomasyon araçları bu prosesin makine ekipmanlarını oluşturmaktadır.

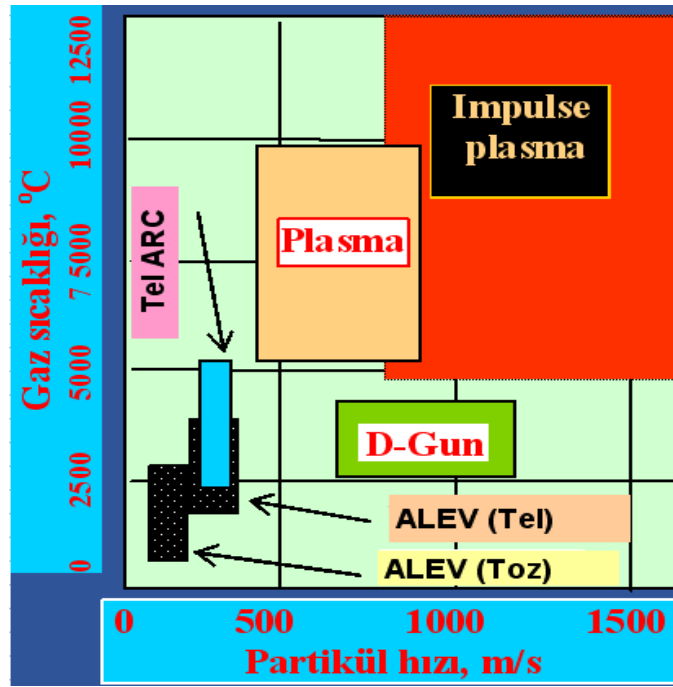
Pulse plazma sisteminde kullanılan plazmatron görüntüsü şekil 3.3 a ve b'de verilmektedir.



Şekil 3.3. a) İşlem esnasında plazmatron görüntüsü, b) plazmatron görüntüsü [19]

Pulse plazma bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Gerekli ekipmanların sisteme ilavesi ile yüzeyde kaplamada yapılabilmektedir. Bu teknoloji bilinen diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında, makine ve parçalarının yüzeylerinin hazırlanmasına gerek olmaması, yüksek verimlilik sağlaması, randımanlı proses evresi ile büyük avantaj sağlamaktadır. Makine parçalarına ön ısıtma uygulanmaz. Yalnızca kesici uçlar sertleştirilir. Önerilmekte olan bu teknoloji ile düşük elektrik tüketimi, düşük aşım elementi tüketimi sağlanarak kaynaklarımızın korunması mümkün olacaktır. Bu teknoloji yüzeyde üniform bir tabaka oluşumuna sebep olmaktadır. Pulse plazma teknolojisi ile modifiye edilmiş yüzeylerin sertliği 11-16 GPa arasında ve kalınlıkları 10-100µm arasında değişmektedir. Yapılan çalışmalarda uygulanan parçaların performanslarında 2-5 kat arttığı görülmektedir.

Malzemelerin çalışma yüzeylerine kazandırdığı üstün özellikler ile avantaj sağlayan pulse plazma teknolojisinin diğer modifikasyon yöntemleriyle karşılaştırması şekil 3.4'de verilmektedir [20].



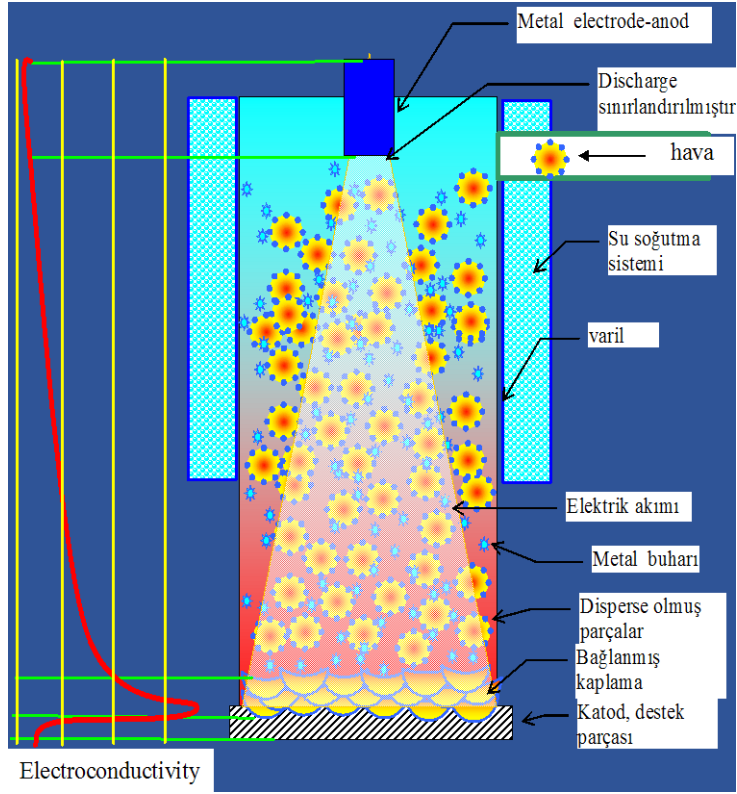
Şekil 3.4. Farklı yüzey modifikasyon yöntemlerinin karşılaştırılması [21]

3.3. Pulse Plazma Teknolojisinin Çalışma Prensibi

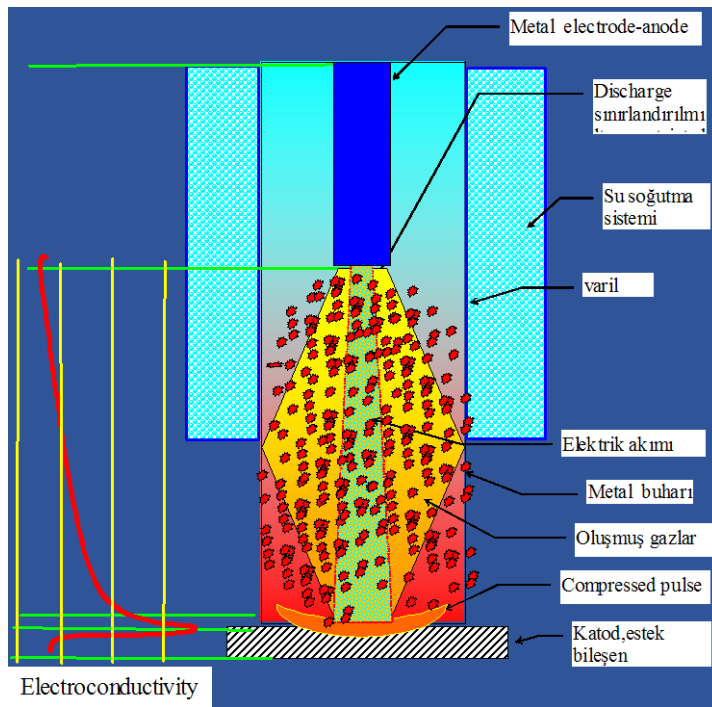
Konsantre enerji kaynaklarıyla (lazer, elektron demeti, plazma v.s gibi) yüzey işlemleri sıklıkla araç gereçlerin sertleştirilmesi için inşa edilmiş proseslerde kullanılmaktadır [22,23]. Bu, parçaların yüzeylerinin aynı mekanik ve fiziksel özellikler kazanmasına neden olmaktadır (yüksek sertlik, aşınma dayanımı, yorulma dayanımı, korozyon direnci v.s gibi) [24]. Konsantre enerji kaynakları metalin yüzey tabakasının hızlı ısıtılmasını (ısıtma süresi 1×10^{-3} - 1×10^{-6} sn.), peşinden de ısının hem yapıdan hem de çevreden atılması için yoğun soğutulmasını gerektirir. Bu yüksek oranlarda ki ısıtma ve soğutmalar metalin yüzey katmanlarında dağılmış bir kristal yapıya, yüksek dislokasyon yoğunluğuna, karbon ve azot içeriklerinde dalgalanmalara sebebiyet vermektedir [25,26]. Hızlı ısınma ve soğuma sonucunda dengede olmayan amorf nanokristalin ya da metastabil fazlar oluşmakta ve bu fazlar tribolojik özellikleri geliştirmektedir. Sertlik artmaktadır [27,28]. Hızlı ısınma ve soğuma çeliklerin yalnızca yüzey tabakalarında ostenit fazının oluşumuna imkan tanır. Ostenitin korozyon dayanımı martenzitten daha iyidir [29]. Bu sebeple korozyon dayanımının arttığı literatürde belirtilmektedir.

Uzun yıllardır malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesinde yüksek yoğunluklu pulse plazma ışını kullanılmaktadır [30,31]. Bu teknik de kütle transferi meydana geldiği için iyon implantasyonunun ve ısı transferi olduğu için lazer prosesinin bazı özelliklerine sahiptir ve bundan dolayı yüzeye yakın yerlerde ergime meydana gelir. Önce yüzey ergir, hızla difüzyon olur veya önceden depoze olmuş atomlar oluşur [32].

Pulse plazma teknolojisinde, konsantre enerji kaynaklarının uygulandığı termal etki, alaşımlama prosesleriyle birleşiktir. Parçaların yüzeyleri, önceden ısıtılan kaplamaların ergimesiyle alaşımlandırılır veya çalışan ortama (plazmanın içine) gaz halindeki azot, hidrokarbon gazları, siyanürler gibi alaşım elementleri katılarak alaşımlandırılır. Artırılan ısıtma ve soğutma hızlarıyla, yüzeylerin elasto-plastik deformasyonu sağlanır ve bundan dolayı difüzyon mekanizmaları işin içine girer. Pulse plazma sisteminde kaplama oluşum mekanizması şekil 3.5 (a) ve (b)' de gösterilmektedir.



a)

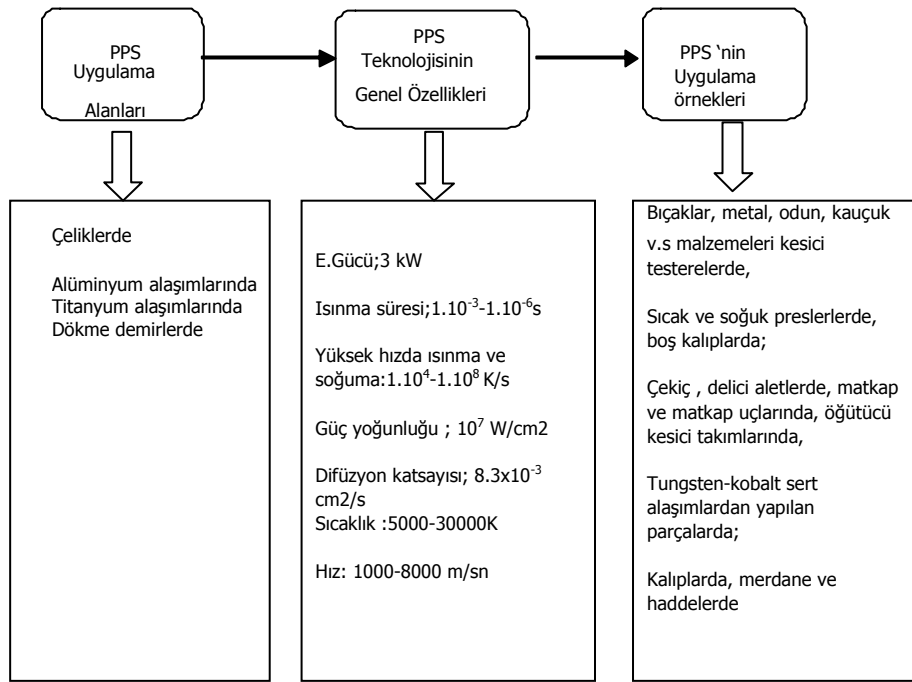


b)

Şekil 3.5. a) Pulse plazma ile modifikasyon oluşum mekanizması, b) Pulse plazma ile modifikasyon oluşum mekanizması [21]

Araştırma sonuçları göstermiştir ki; yüksek hızda ki bir plastik deformasyonda, atomların hareketi, yer değiştirmesi; elementlerin difüzyon yoluyla sıvı metale doğru hareketinden daha hızlıdır. Deformasyon süresi $\tau = 4 \times 10^{-3}$ s, def. derecesi %10 ve temas bölgesinin sıcaklığı 800°C , difüzyon sabiti $D=8.3 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$ olup sıcak metalinkinden 10^2 kat daha hızlıdır [14].

Pulse işlemi ile kütle transfer katsayısı artar ve tane boyutuyla direk alakalıdır. Pulse sayısı arttıkça tane boyutu düşer. En ilginç bulgu ise; farklı pulse işlemi metodlarının yüzey üzerinde benzer etkiyi yapması ve sinerjik bir özellik olan kütle transferinde önemli bir artışa yol açmasıdır [14,33]. Şekil 3.6'da pulse plazma teknolojisinin genel bir özeti verilmektedir.

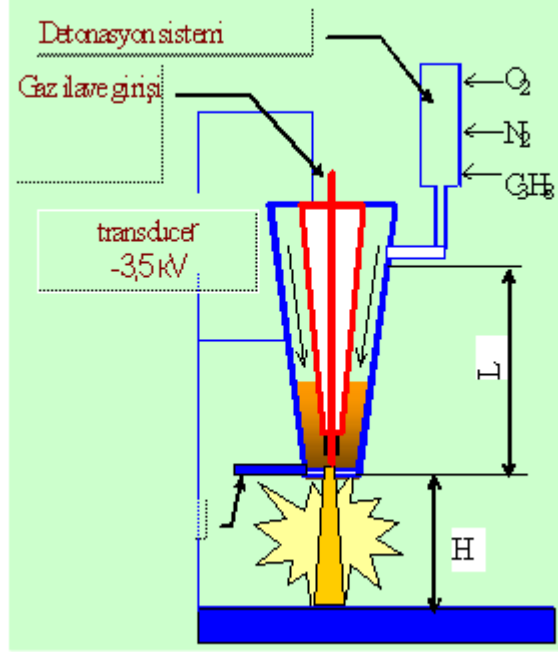


Şekil 3.6. Pulse plazma teknolojisinin genel özeti

3.3.1. İş parçası yüzeyi ile pulse plazma etkileşimi

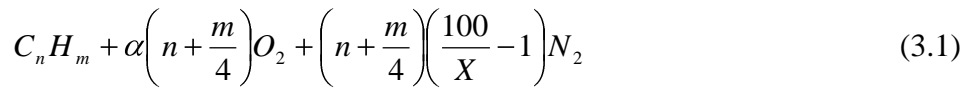
Yapılan araştırmalar sonucunda; alaşım elementlerinin de içinde olduğu pulse plazma tarafından iş parçası yüzey işlemleri, termal, elektromanyetik ve deformasyon olgularını içine alan kompleks bir işlemler bütünüdür. Bu durum, iş parçası yüzeyinin plazma bileşenleri ile alaşımlandırılmasını ve bu yüzeyin

sertleştirilmesini mümkün kılar. Alaşım elementleri metal elektrot (çubuk) erozyon ürünleri biçiminde veya propan, azot gibi gazlar biçiminde plazmaya katılır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Plazma detonasyon ekipman düzeni [14]

Demir esaslı alaşıma sahip bir iş parçasının pulse plazma işleminde mikro-kristalli bir alaşım tabakası meydana gelir. Bu tabakanın yapısı plazma kompozisyonuna ve işleminde kullanılan pulse sayısına bağlıdır. Plazmanın kompozisyonu oksitleyici/yakıt oranıyla belirlenir. Hidrokarbonların, C_nH_m azot-oksijen karışımları içinde yanması neticesinde denge reaksiyonun sol tarafı genellikle;



biçimindedir. Burada X, azot-oksijen karışımındaki oksijen içeriğidir. α , ise oksitleyici katsayısıdır. Artan oksijen içeriklerinde ($\alpha > 1$) plazmayla işleme girdikten sonra oksit inklüzyonları bu tabaka içinde sabitlenir. Bu arada $\alpha < 8$ olduğu durumlardaysa hiç böyle inklüzyon tespit edilmemiştir.

İşlem tabakası çok sayıda pulse plazma işleminden sonra daha kalın ve daha homojen hale gelmiştir. Literatüre göre pulse plazma işlemi esnasında tungsten ve

molibden elektrod kullanımı en yüksek sertlik değerlerinin eldesini sağlamaktadır [14].

Bu teknolojinin temelinde; parçaların çalışma yüzeyleri işleme için yüzeye doğru, alaşım elementlerinin yüksek enerji akışı ve aynı zamanda parçaya elektrik akımı akışının meydana geldiği bir teknolojidir.

Akımın yüksek enerji yoğunluğu (10^7 W/cm²) mukavemet ile yüksek sertlik, ısı dayanımı ve anti-sürtünme gibi özelliklere sahip olması gereken malzemeler olan demir-titanyum-alüminyum ve bakır esaslı alaşımlardan üretilmiş makine parçaları için önemlidir [34]. Metal parçalarının aşınma yüzeylerinde yüksek-alaşımli mikrokristalin tabakaların üretimi parçaların performanslarının (3-10 kat) önemli derecede artışına yol açmaktadır [35,36].

Pulse-plazma modifikasyon teknolojisinin verimliliği 0,2-0,4 mm kaplama kalınlıkta 3m²/saat'e ulaşır. Elastik ve plastik deformasyonundaki yüksek hız, difüzyon katsayılarındaki artış,

$$\varepsilon = \Delta h / h \geq 20 s^{-1} \tau \quad (3.2)$$

($\Delta h/h$ deformasyonun derecesi, τ ise deformasyon süresi)

Yukarıda ki denkleme göre yapıda fazla olan boşlukların ortalama konsantrasyonunun artmasına sebep olur [14].

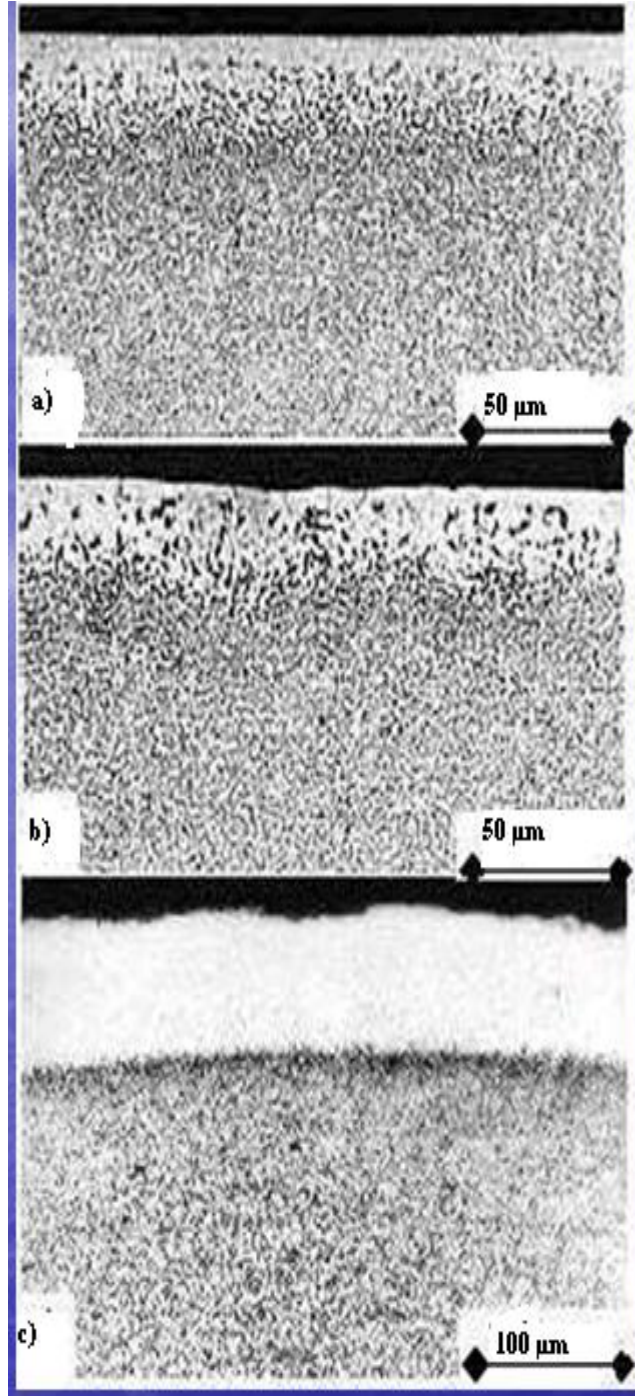
Endüstriyel alanlarda, kesici, delici ve şekil verici olarak kullanılan metal çalışma parçalarının (öğütücü parçalar, matkaplar, kalıplar, pres, haddeler v.s..) çalışma yüzeyleri ile, daha pek çok makine parçasının yüksek ısı dayanımına ve sertliğe sahip olması gerekmektedir. Bu gereksinimler mikrokristalin haldeki yüksek alaşımlarla karşılanmaktadır. Kural olarak, bütün parçaların yapısında bu hali başarmak pahalı ve karışık bir problemdir. İlaveten, bu yapıdaki malzeme parçaları yüksek çarpma dayanımına ve yüksek termal difüzyona sahip olması gerekmektedir. Genelde, bu parçalar yüzeylerinde mikrokristalin tabakaları oluşturan alaşımlarla dop edilmiş sert çeliklerden yapılmaktadır.

Yalnızca pahalılık, yetersiz sonuçlar ve yüksek üretim maliyetleri değil ayrıca, enerji, malzeme, üretim kapasitesi diğer sorun teşkil eden konulardır. Pulse plazma teknolojisi ile bahsi geçen dezavantajlar ortadan kaldırılarak malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi mümkündür.

3.3.2. Pulse plazma uygulama örnekleri

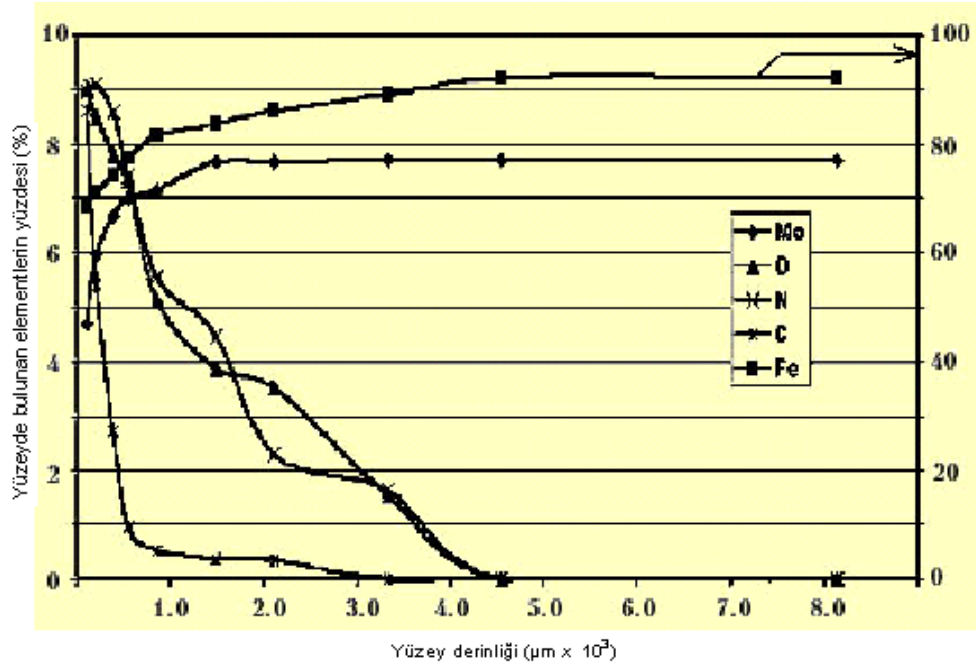
Demir esaslı bir yapıya sahip bir iş parçasının yüzeyinde pulse-plazma işleminde sonra mikro-kristalin bir tabaka meydana gelir Pulse plazma uygulanan numunelerin yüzeylerinde meydana gelen modifikasyon tabakasının genişliği yüzeyde meydana getirilen pulse sayısına bağlıdır. Ayrıca bu tabakanın yapısı pulse miktarıyla birlikte plazma kompozisyonuna da bağlıdır.

İşlem tabakası çok sayıdaki pulse plazma işleminden sonra daha kalın ve daha uniform hale gelmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. a)Azot içeren pulse plazma ile sertleştirilen çeliğin (C 0,45 %) işlem sonrası görünümü, b)oksijen taşıyan pulse plazmayla yüzeyi sertleştirilen çeliğin optik görünümü (1 pulse yapılmış), c)azot içeren pulse plazma ile yüzeyi sertleştirilen çeliğin (C 0,45 %) optik görünümü (5 pulse yapılmış).

Pulse plazma işleminin uygulandıktan sonra numune yüzeyinden alınan elementel analiz sonunda elde edilen veriler şekil 3.9'da verilmektedir. Analiz sonuçları yüzeyde yüksek N varlığını göstermektedir. Ayrıca prosesinde kullanılan molibden elektrod kullanıldığı bu analiz sonuçlarından anlaşılmaktadır.

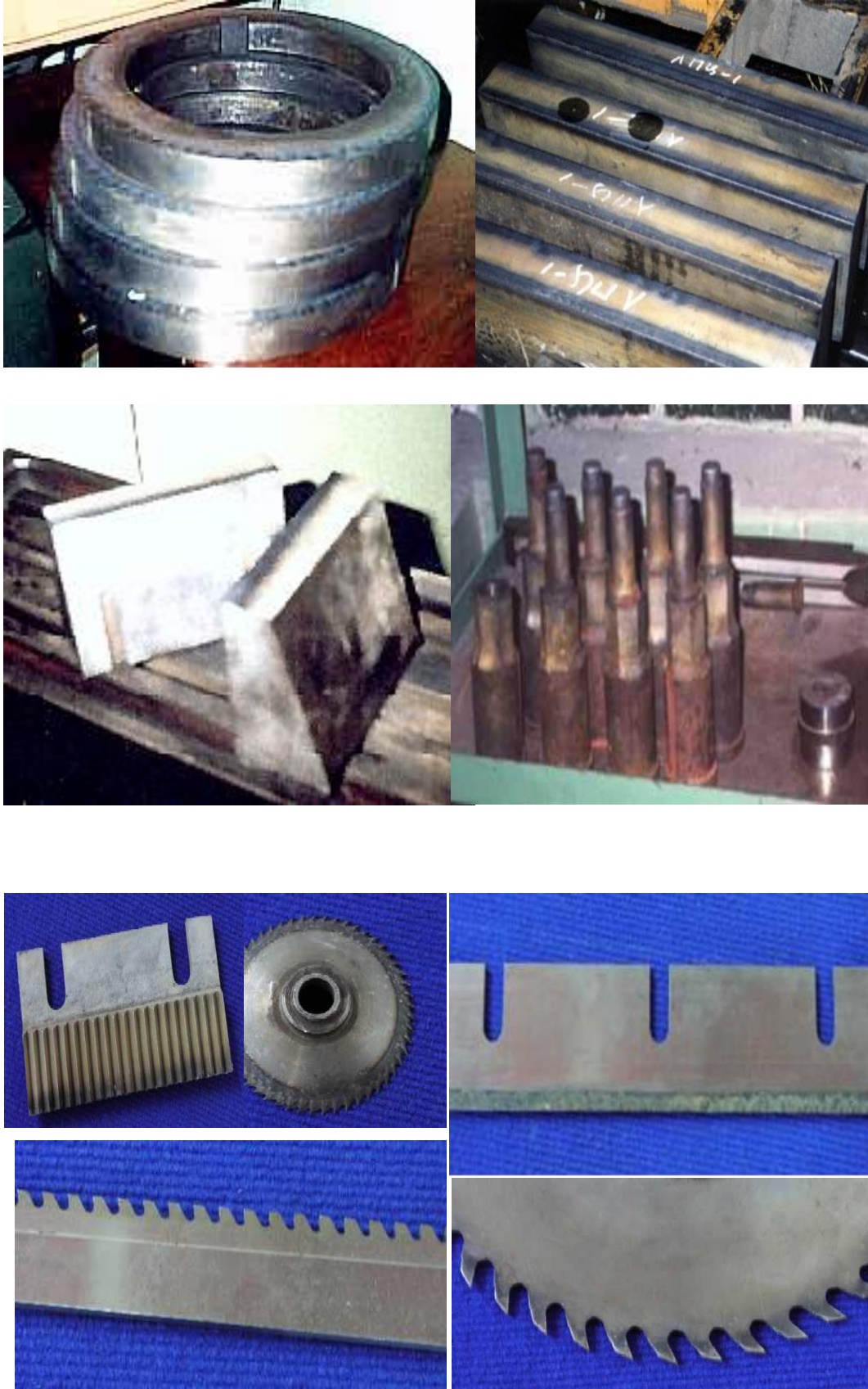


Şekil 3.9. Pulse plazma uygulanmış numune yüzeyinden alınmış elementel analiz

Bu teknoloji aletlerin çalışma yüzeylerinin sertleştirilmesinde etkilidir ve uygulamaları ise;

- Bıçaklar, metal, odun, kauçuk v.s malzemeleri kesici testereler,
- Sıcak ve soğuk preslerler, boş kalıplar,
- Çekiç, delici aletler, matkap ve matkap uçlarında, öğütücü ve kesici takımlar,
- Kalıplar, merdane ve haddeler.

Şekil 3.10'da pulse plazma uygulanmış çeşitli boyutta ve konfigürasyondaki numuneler görülmektedir. Bu teknoloji ile sadece çalışılacak yüzeylerde modifikasyonu yapılabilmektedir. Boyut ve konfigürasyonda sınırlama olmaması uygulamalarda avantaj sağlamaktadır.



Şekil 3.10. Pulse plazma uygulanmış farkı numune grupları

Milller, hadde parçaları, matkap uçları, deliciler ve kesicilerin yüzeyleri titanyum elektrod kullanımı ile 2-5 kat daha fazla sertleştirebilmektedir.

Pulse-plazma modifikasyon teknolojisinin endüstriyel ve ekonomik yararları özetle;

- Metal parçaların servis ömrünü artırır,
- Yüzey sertlik verimliliğini artırır,
- Metal parçaların maliyet fiyatlarını azaltır,
- Yüksek aşım kullanımı azaltır,
- Sertleşme prosesinin verimliliğini artırır,
- Enerji tüketim seviyesini azaltır.

3.4. Pulse Plazma Teknolojisinin Avantajları

- Makine parçalarına ön ısıtma uygulanması,
- Yalnız kesici uçlar sertleştirilir,
- Makinenin elektrik gücü 10-30 kW,
- Gaz-yakıt karışımı akış hızı $1.5\text{m}^3/\text{h}$,
- Sertleştirme verimliliği $300\text{mm}^2/\text{sec}$,
- Bu teknoloji atmosferde uygulanmaktadır.
- Makinenin konfigürasyonunda ve boyutlarında sınırlamalar yoktur.
- Sertleştirme için makine parçalarının yüzeylerinin hazırlanmasına ve temizlenmesine ihtiyaç yoktur.

Pulse plazma teknolojisi ile diğer modifikasyon yöntemlerinin çeşitli açılardan kıyaslaması tablo 3.1’de verilmektedir.

Modifikasyondan sonra, yüzeylerin sürtünme katsayısı 3–5 kat azalır, aşındırıcı şartlar altında aşınma dayanımı 2–5 kat artar ve ısı dayanımı 6 kat artar [34].

Tungsten, karbon ve nitrojen gibi elementleri içeren yüksek enerji akımlı çalışma parçaların işlemleri yüzey tabakasının mikro sertliğini 1900 HV’e kadar çıkar. Modifiye edilen tabakanın kalınlığı yaklaşık 20-80 mikrondur.

Titanyum esaslı alaşımların yüzey modifikasyonu 100 nanometre kalınlığa ve 1100 HV sertliğe sahip alaşımlı tabaka sağlar. Yüksek kuvvete sahip dökme demirlerin yüzeyinde oluşturulmuş modifiye tabak 1400HV sertliğe ve 120 nanometre kalınlığa sahiptir [37].

Yapılmış çalışmaların sonuçları göstermiştir ki; modifikasyon teknolojisi ile bıçak ve öğütücü millerin 3-4 kat, çelik testerelerin 5-6 kat, tungsten-kobalt sert alaşım testerelerin 2-3 kat, kalıp ve zımbalar 2-5 kat ve makine parçaların 3-5 kat tüketim miktarı azalmıştır. Pulse, plazma sadece düşük karbonlu çeliklere değil yüksek hız çeliklerine de uygulanarak özelliklerin geliştirilmesi üzerine birçok çalışmalar yapılmaktadır [38]. Tablo 3.1’de farklı teknolojilerin karşılaştırılması görülmektedir.

Tablo 3.1 Farklı teknolojilerin karşılaştırılması [39]

Tablo Difüzyon uygulamalarının tipik karakteristikleri

İşlem	Kaplama oluşumu	İşlem sıcaklığı °C(F)	Tipik kaplama derinliği	Kaplama sertliği HRC	Tipik esas metaller	İşlem karakteristikleri
Semantasyon						
Koruyucu banyo	Yayılmış karbon	815-1090	125 μ m - 1,5 mm	50-63	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşım çelikleri	Düşük ekipman maliyeti, kaplama kontrol zorluğu
Gaz	Yayılmış karbon	815-980	75 μ m - 1,5 mm	50-63	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşım çelikleri	Kaplama derinliğinin iyi kontrolü.
Sıvı	Yayılmış karbon ve mümkün olduğunca azot	815-980	50 μ m - 1,5 mm	50-65	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşım çelikleri	Tuz banyolarındaki tuz dışı atımlarında daha hızlı sunuş
Vakum	Yayılmış karbon	815-980	75 μ m - 1,5 mm	50-63	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşım çelikleri	Mükemmel proses kontrolü, gaz karbürlemeden daha yüksek maliyet, yüzey parlaklığı
Nitrüleme						
Gaz	Yayılmış a/O ₂ , azot bileşikler	490-590	125 μ m - 0,75 mm	50-70	Alaşımli çelikler, azotlu çelik, paslanmaz çelikler	Su verme ve tavlama istenmeyen azotlu çeliklerde fışılalı sert kaplama elde etmede yavaşlık
Tuz	Yayılmış azot, azot bileşikler	510-565	2,5 μ m - 0,75 mm	50-70	Yüksek demir oranlı, dökme demirler	Genellikle 1 milden az beyaz kaplama yüzeyi istenen patentli çeliklerde
iyon	Yayılmış azot, azot bileşikler	340-565	75 μ m - 0,75 mm	50-70	Alaşımli çelikler, azotlu çelik, paslanmaz çelikler	Yüksek ekipman maliyeti gaz azotlamadan daha hızlı
Nitrokarbürleme						
Gaz	Yayılmış karbon ve azot	760-870	75 μ m - 0,75 mm	50-65	Düşük karbonlu çelikler, düşük karbonlu alaşım çelikleri, paslanmaz çelikler	Karbonlamadan daha az sert kaplama, daha düşük işlem sıcaklığı
Sıvı (siyanürleme)	Yayılmış karbon ve azot	760-870	2,5 μ m - 125 μ m	50-65	Düşük karbonlu çelikler	Tuz geri alam problemi, kritik olmayan parçalarda iyi ince yüzey
Ferritik nitrokarbürleme	Yayılmış karbon ve azot	565-675	2,5 μ m - 25 μ m	40-60	Düşük karbonlu çelikler	Düşük karbonlu çeliklerde düşük çarpılmaları
diğerleri						
Koruyucu banyo	Yayılmış alüminyum	870-980	25 μ m	<20	Düşük karbonlu çelikler	Yüksek sıcaklıklarda oksidasyon direncini artırma

Tablo 3.1. (Devam) Farklı teknolojilerin karşılaştırılması [39]

Kimyasal buhar çözeltisi ile silikonluma	Yayılmış silikon	925-1040	25 μ m -1 mm	30-50	Düşük karbonlu çelikler	Atmosferde kritik aşınma direnç kontrolü
Kimyasal buhar çözeltisi ile krom çaplama	Yayılmış krom	980-1090	25-50 μ m	Düşük karbonlu çelikler için <30; yüksek	Yüksek-düşük karbonlu çelikler	Çeliklerde düşük krom kaplama maliyeti
Titanyumkarbür	Yayılmış karbon ve titanyum Ti,C bileşikleri	900-1010	2,5 -12,5 μ m	>70	Alaşım çelikler-takım çelikler	Yüksek sıcaklıklarda çarpılmaya sebebiiyet
Borlama	Yayılmış bor ve bor bileşikleri	400-1150	12,5-50 μ m	40-70	Alaşım çelikler, takım çelikler, kobalt ve nikel alaşımları	Aşın sertleştirilmiş takım çeliklerinde yüksek sıcaklıklarda deformasyon

3.5. AISI 5140 Çeliğinin Özellikleri

3.5.1. Kimyasal bileşim

Tablo 3.2. Kalite ıslah çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) [40]

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
%Ağırlık	0,4	0,77	0,035	0,04	0,25	0,8	-

Kalite ıslah çeliğinin kimyasal bileşimi (% ağırlık) tablo 3.2’de gösterilmektedir. 5140 ıslah çeliğinin yapısında C, Mn, P, S, Si, Cr ve Mo elementleri bulunmaktadır. Yaygın adı krom çeliğidir. AISI 5100 serisi çeliği, düşük alaşımlı yapı çelikleri, dövme kalite çelikler, orta karbonlu çelik ve alaşımlı çelik olarak sınıflandırılır.

AISI 5140 çeliğinin mekanik özellikleri ise aşağıda tablo 3.3’de verilmiştir. Çeliğin sertlik değerleri yaklaşık 240-260 HV10 veya 230-250 HB’dir. Çekme mukavemeti, 750-850 N/mm² ve % kopma uzaması 20-21’dir [40].

Tablo 3.3. AISI 5140 çeliğinin mekanik özellikleri [40]

Malzeme	Sertlik		Çekme mukavemeti (N/mm ²)	Kopma uzaması (%)
	HV10	HB		
AISI 5140	240-260	230-250	750-850	20-21

3.5.2. Kullanıldığı Yerler

Kullanım alanları, motorlu araçlarda yüksek gerilime maruz kalan parçalarda, dişliler, miller, krank milleri, pistonlar, piston rotaları, ön aks, aks kovanı, direksiyon mili, çeşitli miller, tarak pimi, burçlar, civatalar gibi parçaların imalinde olmak üzere geniş bir alanda kullanılırlar.

İnşaat ekipmanlarında (hazır beton aracı donanımında, kürek vs..) her yüzey aşınmaya maruz kaldığı için aşınmaya karşı direnci yüksek olan AISI 5140 çeliği kullanılmaktadır.

Ayrıca günümüz yarış arabalarında yüksek gerilime maruz kalan parçaları (5140 çelik bağlantı rodları, güçlendirilmiş milleri) yerine krom çeliği kullanılmaya başlanmıştır. Malzeme pahalı olduğundan otomobillerde bu sektör dışında pek az kullanılmaktadır. (Mesala Ford 302, Ford 351W 4000", Ford 460, Ferrari, Dodge 440, Pontiac 455, GM 350 6000") Günümüzde bu kimyasal bileşime sahip parçalar kamyonlarda da kullanılmaktadır [41].

BÖLÜM 4. SÜRTÜNME VE AŞINMA

4.1. Giriş

Sürtünme genel anlamda, temas halindeki ya da birbiri üzerinde hareket eden veya hareket ihtimali bulunan yüzeylerin hareketlerine karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır. Diğer adıyla triboloji cisimlerin bağıl hareketinde yüzeylerin etkileşimini inceleyen bilim dalıdır [42-46]. Triboloji kelimesi yunanca "tribos" kelimesinden çıkmıştır ve sürtünme manasındadır [42].

Sürtünmenin mühendislikle ilgili yönü oldukça eskidir. Sürtünmenin ilk pratik uygulamalarından olan ateş yakmak için sürtme ısısının kullanılışı tarih öncesi çağlara dayanır [42]. Binlerce yıl önce yaşamış insanın, günümüzün uzman tribolojistlerinde olduğu gibi sürtünme sorununa çözüm arayışları için, çalışan iki mekanik parça arasına saf su ilave etmesi parlak bir fikir olarak karşımıza çıkmaktadır [47]. Ağır yükleri taşımada, işi minimuma indirmek için kullanılan ve zaman zaman sıvı yağlarla yağlanan kızak, silindir ve tekerlek gibi uygulamaların tarihi 3000 yıldan eskidir. Bunlar sürtünme olayının ne denli erken değerlendirildiğini ve önemini göstermektedir [42]. Geçmişle günümüz arasındaki fark sadece bilgi birikimidir [47].

Sürtünmenin ve aşınmanın en iyi şekilde anlaşılması ile çok fazla miktarda enerji ve para israfının önüne geçilecektir ki bu durum ekonomik ve ekolojik açıdan oldukça önem teşkil eder [47].

Malzemenin, katı yüzeyden uzaklaşması için üç yol vardır: ergime ile, kimyasal çözünme ile ya da atomların yüzeyden fiziksel dağılımları ile. Prensip olarak tribo yüzey bir çeşit hasar göstermektedir fakat genellikle hasarın iki ya da daha fazla hasar tipinin birleşmesiyle oluştuğu gözlenmektedir [48,49].

4.2. Sürtünme Kanunları

Sürtünme kanunlarının belirlenmesinde iki temel esas vardır. Bunlar büyük oranda uyumluluk gösterirler. Birinci kanun; temas eden yüzeyler arasında oluşan sürtünme kuvveti görünen temas alanından bağımsızdır. İkinci kanun; sürtünme kuvveti cisimler arasındaki normal yük ile doğru orantılıdır. Böylece bir cisim diğeri üzerinde kayarken, eğer normal yük iki katına çıkarılırsa sürtünme kuvveti de iki katına çıkar. Bu kural daha çok "Amonton" kuralı olarak bilinir ve ilk kez 1699 yılında Fransız bilim adamı Amonton tarafından çıkarılmıştır Üçüncü kural olarak da; kinetik sürtünmenin, kayma hızından bağımsız olduğu söylenebilir. Bu kuralın ilk ikisine göre uygulanabilirliği daha düşük değerdedir. Üçüncü kural Coulomb tarafından 1785 yılında açıklanmıştır [42].

Triboloji yaklaşımlarının ilki 15.yy baslarında Leonardo da Vinci tarafından yapılmıştır. Da Vinci, düzgün yüzeyler için sürtünmenin ağırlığın dörtte birinden sorumlu olduğunu diğeri bir deyişle sürtünme katsayısının 0,25 olduğunu kabul etmiştir [45]. Daha sonra Charles Augustin Coulomb (1736–1806), Leonhard Euler (1707–1783), John Theophilus Desagulier (1683–1744), Osborne Reynolds (1842–1919), Heinrich Rudolph Hertz (1857–1894), Richard Stribeck (1861– 1950), Arnold Sommerfeld (1869–1951), Georg Vogelpohl (1900–1975), Frank Philip Bowden (1903–1968) ve diğeri birçok bilim insanı tarafından triboloji ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır [50].

Sürtünme kayan yüzeyler arasındaki enerji dağılımı ya da enerji harcanması (israfı) olarak nitelendirilir. Da Vinci ve Amonton'un sürtünme ile ilgili çalışmalarından çıkan dört esas deneysel (ampirik) yasa yüzyıllardır bilinmektedir. Bu yasalar aşağıdaki gibidir [45]:

- Statik nesne tanjantsal kuvveti arttırmaya meyilli olduğu zaman kaymadan önceki maksimum tanjant kuvveti ile normal kuvvet arasında bir orantı vardır.
- Kayma da tanjantsal sürtünme kuvveti, normal kuvvet ile orantılıdır.
- Sürtünme kuvveti görünen temas alanından bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti kayma hızına bağlı değildir.

Yine Amonton'un kanunlarına göre; kuvvet gerçek temas alanı ile orantılı ise sürtünme kuvveti de uygulanan yük ile orantılıdır [45].

Sürtünme kuvveti ile ilgili Bowden ve Tabor (1964) tarafından yapılan çeşitli çalışmalarda ise gözlenen ve dikkate alınan genel kurallar aşağıdaki gibi özetlenmiştir [46];

1. Sürtünme katsayısı görünen temas alanına bağlı değildir,
2. Sürtünme katsayısı normal yük ile orantılıdır,
3. Kinetik sürtünme katsayısı hıza bağlı değildir,
4. Statik sürtünme katsayısından daha küçüktür.

4.3. Sürtünme

Triboloji, birbiriyle temas eden iki yüzey arasındaki etkileşimleri inceleyen, Fizik ve Kimya bilimlerinden, Mekanik ve Malzeme bilimine kadar birçok farklı alan tarafından incelenen ve çalışılan ev aletlerinden uzay araçlarına kadar her alandaki teknik araç ve gerecin aşınması gibi ekonomik açıdan önem arz eden alanlarda büyük kayıplara neden olan problemleri tanımlayan ve işlevsel analizler uygulayan bir bilim alanıdır [45,46].

Birbiri üzerinde hareket eden yüzeyler arasına yağlayıcı madde konulup konulmaması bakımından temas yüzeylerinin durumuna göre, kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme olarak üç halde de incelenebilir. Bir yüzey üzerinde bulunan bir cisim itilmeye karşı, karşı yönde bir direnç kuvveti oluşturur. Bu direnç kuvveti, tutmalı (statik) direnç kuvveti olarak isimlendirilir. Bir cismi hareket ettirebilmek için tutmalı sürtünme kuvvetinden daha büyük bir itme kuvvetine gereksinim vardır. Cisim hareket halinde ise tutmalı sürtünme kuvvetinden daha küçük boyutlardaki sürtünme kuvveti oluşur. Bu kuvvete kaymalı (dinamik) sürtünme kuvveti denir ve bu kuvvet itme kuvvetine karşı yöndedir [42].

Temasta bulunan iki malzemedenden biri diğerinin üzerinde kayarken diğer malzemenin karşı yüzeyin hareketine gösterdiği direnç 'Sürtünme Kuvveti' olarak adlandırılır

[51]. Sürtünme kuvveti ve normal yük arasındaki orantılılık, ‘kinetik’ ve ‘statik’ sürtünme katsayıları ile tanımlanmaktadır [24]. Kuvvet (F_s), temas yüzeyinin normali (P ya da F_N) ile ilişkili olup,

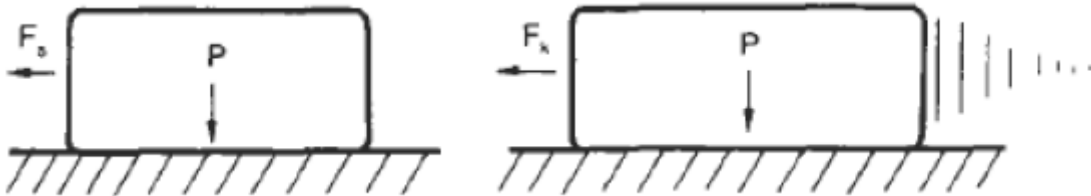
$$F_s = \mu_s \cdot P$$

olarak hesaplanır. μ_s statik sürtünme katsayısı olarak tanımlanır (Şekil 4.1) [50-51]. Kayma başladıktan sonra, kaymayı engelleyici kuvvet yavaşça azalır. Bu durumda denklem;

$$F_k = \mu_k \cdot P$$

olacaktır. μ_k kinetik sürtünme katsayısı olarak adlandırılır. Kinetik sürtünme, ısı olarak karşımıza çıkmaktadır [53,54].

Birçok kitapta sürtünme katsayısından malzeme bileşiminin bir özelliği olarak bahsedilmektedir. Bu yaklaşım sıcaklık ve kayma hızı gibi parametrelere bağlı olan sürtünme katsayılarının tanımlanması için oldukça basit kalmaktadır [45]. Sürtünme ve aşınma, malzemelerin asıl özelliklerinden olmayıp tribosistemin özelliklerindedir [50,55].



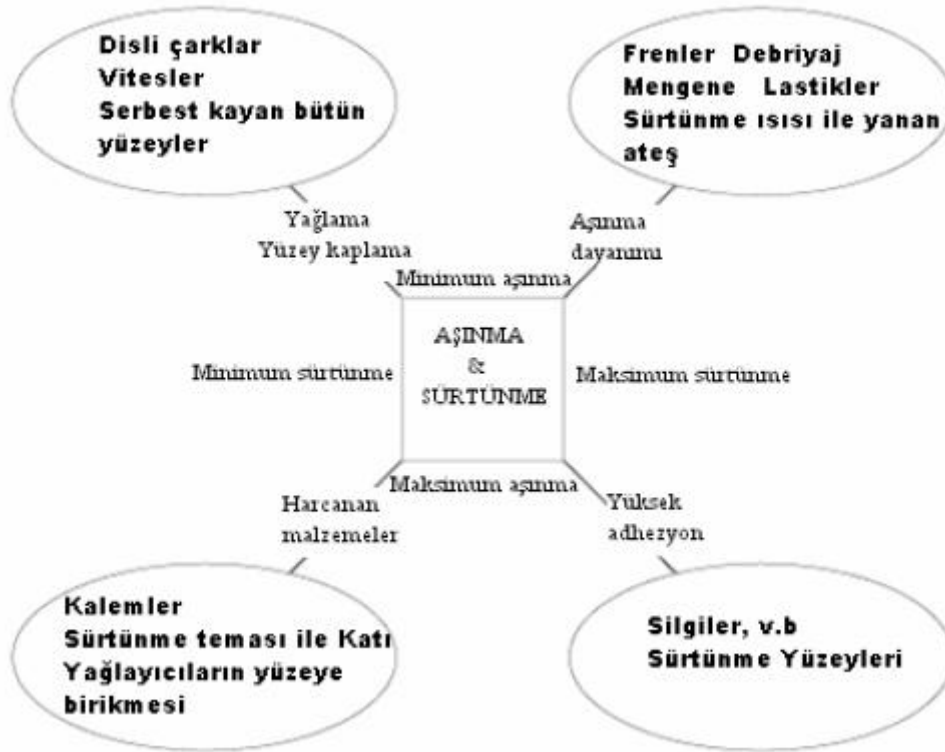
Şekil 4.1. Statik ve kinetik sürtünmenin şematik anlatımı [53]

Sürtünme çalışmalarının tümünde ki esas problem, sürtünme katsayısını belirlemektir. Aşınmaya göre (aşınma için), aşınan malzemenin hacim oranı (V) ya da değerinin belirlenmesi ve aşınmadan dolayı ağır hasarın meydana geldiği şartların saptanması gerekmektedir [52]. Sürtünme ve aşınma üzerine yapılan çalışmalara ve binlerce yıldır bu olguların varlığının bilinmesine rağmen, başlangıçları, kökenleri ve davranışları hala tam olarak anlayamamıştır [46,52].

Sürtünme daima enerji dağılımı ile ilgilidir ve enerji kaybının oluşum süreci birkaç aşama halinde tanımlanır.

1. Durum. Mekanik enerji temas bölgesinde ortaya çıkar ve gerçek temas alanının oluşumuna sebep olur.
2. Durum. Mekanik enerji elastik deformasyon, plastik deformasyon, kızaklama (ploughing) ve adhezyon şeklinde gerçek temas bölgesinin içerisine doğru ilerler.
3. Durum. Mekanik enerjinin; termal dağılım (ısı), hata, çatlak, enerji birikimi ve plastik olarak dönüşüm, akustik ve termal emilim gibi farklı şekillerde dağılımı [56].

Sürtünmenin etkileri belirlendiğinden veya fonksiyonları kontrol edildiğinden beri tasarım ve üretim sürecinde, malzemenin sürtünme özellikleri dikkate alınarak, cihazın ömrü ve verimliliği belirlenmektedir. Tekniğin her sahasında malzemelerin sürtünme özelliklerinden ve sürtünme kuvvetinden faydalanılarak çeşitli konstrüksiyonlar gerçekleştirilmiştir [42]. Birbirine karşı çalışan iki katı yüzey arasındaki sürtünme ve aşınma günlük yaşantıda sürekli karşılaşılan bir durumdur [52] ve şekil 4.2’de gösterildiği üzere, bazı durumlarda en düşük sürtünme ve en yüksek aşınma değerleri ya da en az aşınma ile birlikte en yüksek sürtünme değerleri ya da her ikisinin de en yüksek değerlerinin istendiği çalışma alanları bulunmaktadır. Örneğin otomobillerde fren ile yavaşlama-durma esnasında aşınma oranının düşük, buna karşın sürtünme değerlerinin yüksek olması istenmektedir [45,47,52], ya da ayakkabılarımızın tabanlarındaki sürtünmeden dolayı kaymanın engellenmesi yüksek sürtünmenin avantajlı olduğu durumlardır. Diğer yandan motor silindiri içinde piston hareketi esnasında düşük sürtünme ve aşınma beklenmektedir [52]. Kullandığımız kalemlerde sürtünmenin en az, aşınmanın ise yüksek değerlerde olması beklenir. Silgilerde ise hem sürtünme hem de aşınma yüksek olmalıdır (Şekil 4.2) [45].

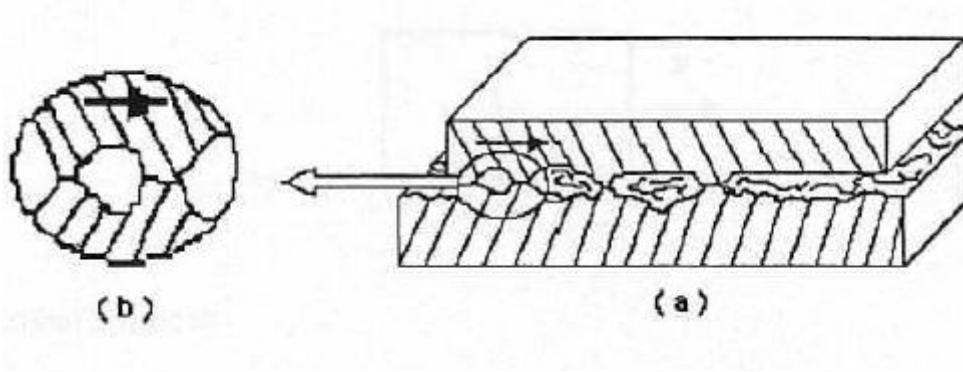


Şekil 4.2. Sürtünme ve aşınmanın istenen ya da istenmeyen özellikler olduğu ya da olmadığı bazı kullanım alanları [45]

Aşınma, malzeme sarfiyatının ve mekanik performansındaki düşüşün ana sebebi olmaktadır ve aşınmadaki herhangi bir düşüş önemli bir mali birikim sağlayacaktır. Sürtünme ise aşınmanın ve enerji dağılmasının baş nedenidir. Bununla birlikte iki yüzey arasında kayma sırasında enerji kaybı dışında sürtünme, ses oluşumuna da yol açmaktadır. Uygulamaların çoğunluğunda sürtünme dolayısıyla çıkan ses istenmemekte ve kontrol altına alınmaya çalışılmaktadır. Ses emilimi ile bağlantılı olan ve yine sürtünme ile oluşan titreşim de zararlıdır. Ses oluşumu genellikle, düzgün ve sessiz bir kayma sağlamak amacıyla, aşınma ve sürtünmeyi kontrol etmekte olduğu gibi yağlama ilavesi ile kontrol altına alınabilmektedir [45].

Sürtünme, ilgili yüzeyler arasında belirli değerler içinde olmalıdır. Taşıt frenlerinde sürtünmenin azlığı nedeniyle taşıtın istenilen mesafe ve zamanda durmaması veya fazla sürtünme nedeniyle taşıtın frenlerinin bloke olması bu duruma tipik örnektir. Şekil 4.3a'da üstteki cisim alttaki cisim üzerinde sağa doğru kaymaktadır, diyagram büyütülerek gösterilen şekil 4.3b'de ise yüzeysel yapımsa noktaları görülmektedir.

Hareketin devam etmesi için uygulanan kuvvet bu yapışma noktalarını bozacak kadar büyük olmalıdır [42].



Şekil 4.3. Sürtünmenin ayrıntıları; a) Üstteki cisim alttaki cisim üzerinde sağa doğru kaymaktadır, b) Yüzeysel yapışma noktaları büyütülerek gösterilmiştir [42]

Analiz ve görüntüleme teknolojilerindeki ilerlemeler sayesinde doğada bulunan hemen hemen tüm yüzeylerin mikroskobik seviyede pürüzlü olduğu anlaşılmıştır [45,52]. Gerçek yüzeyler, atomlardan başlayarak gözle görülebilen oyuklar ve çıkıntılara kadar değişen boyutlardaki yüzeysel oluşumlara sahip olmaktadır [47]. Pürüzlü iki yüzey arasındaki temas, farklı temas noktalarında meydana gelmektedir. Böyle iki yüzeyin kayması boyunca, bu temas noktalarında sürtünme ve aşınmaya sebep olan arayüzey gerilmeleri meydana gelir [43,52]. Boyut ve temas noktalarının dağılımları belirlenebilirse daha kapsamlı sürtünme ve aşınma teorileri geliştirilebilir [54].

İzafi hareket yapan yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması veya konulmaması bakımından sürtünme olayı kuru, sınır ve sıvı olmak üzere üç halde incelenir. Genel anlamda kuru sürtünme, birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan doğruya temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı madde konulması halinde iki durum ortaya çıkabilir. Her iki yüzey yağlayıcı madde tarafından tamamen ayrılmış olabilir ve esas sürtünme yağlayıcı maddenin tabakaları arasında oluşur; bu hale sıvı sürtünmesi denir. İkinci durumda, yani yüzeyler tamamıyla ayrılmadığı takdirde, sınır sürtünmesi hali vardır [43].

4.3.1. Yağlama

Gazların, sıvı ya da katıların düşük kayma mukavemetli ince tabakaları, karşılıklı çalışan yüzeylerin birbiri üzerindeki kayma hareketlerinin düzgünlüğünü arttırmak ve oluşabilecek hasarı engellemek amacıyla iki yüzey arasına girmekte daha doğru bir ifadeyle ilave edilmektedir. Malzemelerin bu tabakaları katı yüzeyleri birbirinden ayırmakta ve genellikle oldukça ince olmaktadır. Genel olarak bu filmlerin kalınlıkları 1–100 [μm] arasında olmakla birlikte daha ince ve daha kalın yağlayıcı film tabakaları bulunabilir. Bu filmlerin katıların teması esnasında oluşabilecek hasarı önlemelerinde, etkinlikleri genellikle “yağlama” olarak adlandırılır. Yağlayıcı filme ihtiyaç duyan malzeme tipleri için herhangi bir kısıtlama olmamasına karşın, yağlayıcının uygulanacağı malzemenin türü bu yağlayıcının etkinlik ya da verimlilik limitlerini etkilemektedir. Örneğin gaz filmler düşük temas gerilimi için uygun iken katı yağlayıcı filmler genellikle düşük kayma hızlarındaki temaslarda kullanılmaktadır [45].

Gaz ya da sıvı yağlayıcılar kullanıldığında genellikle ‘hidrodinamik yağlama’, katı yağlayıcılar kullanıldığında ise sistem ‘katı yağlama’ olarak adlandırılmaktadır. Hidrodinamik yağlamanın özel bir çeşidi olan ve temas eden yüzeyler arasında fiziksel etkileşimin olduğu sıvı yağlayıcı sistem ‘elastohidrodinamik yağlama’ olarak adlandırılır. Yağlamanın bir diğer çeşidi olan ve birbiriyle temas eden yüzeylerde kimyasal etkileşimin bulunduğu sıvı yağlayıcı sisteme ise ‘sınır ve aşırı basınç yağlaması’ denmektedir. Tribosistemde herhangi bir film bulunması, karşılıklı hareket eden yüzeylerin az da olsa birbirinden ayrılması anlamına gelmektedir [45].

Birbiri üzerinde kayan malzemelerden biri sert, diğeri yumuşak (örneğin, kalay, kursun, indiyum ve bunların alaşımları) olduğu takdirde, yumuşak malzeme diğeri malzemeyi kendi parçacıklarından oluşan ince bir tabaka ile derhal kaplar ve bu şekilde iki yumuşak malzeme birbiri üzerinde kaymış gibi olur. Yani yumuşak malzeme, bir yağlayıcı madde gibi rol oynar. Bunun sonucunda sürtünme katsayısı azalır ve bu yüzeyler arasında yenme olayı meydana gelmez. Pratikte kalay alaşımlarının çok iyi yatak malzemeleri olmalarının nedeni bu olaya bağlıdır [43].

4.3.1.1. Katı yağlayıcılar

Katı yağlayıcılar, sıvı yağlayıcılarla karşılaştırıldıklarında birçok ilgi çekici özelliğe sahiptir. Bunlardan biri yüksek temizlik özellikleridir. Katı yağlayıcılar çok yüksek sıcaklıklarda ya da vakum şartlarında hatta yüksek radyoaktivitenin bulunduğu ortamlarda bile yağlayıcılık sağlamaktadırlar. Yağlar genellikle bu şartlar altında kullanılamazlar. Katı yağlayıcı çalışmaları çok da yeni çalımsalar değildir. Örneğin grafitin yağlayıcı kullanımı geleneksel bir çalışma haline gelmiştir. Katı yağlayıcıların kullanım olanakları, yeni teknolojiler sayesinde aşınma yüzeyleri üzerine katı filmlerin biriktirilmesi ile yaygınlaşmaktadır [45].

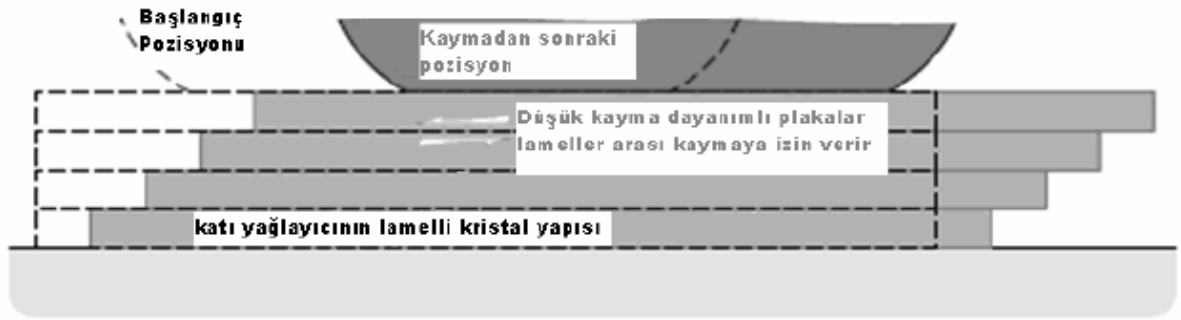
Herhangi bir yağlayıcının sistemde bulunmadığı durumlarda, birçok katı yüzeyde önemli bir seviyede adhezyon meydana gelir. Bu yüzeylerdeki yüksek adhezyon ya da yapışma kuvveti büyük çoğunlukla yüksek sürtünmelere yol açar [45].

Bazı malzemeler ise mekanik özelliklerinde anizotropik davranış gösterirler. Mekanik özelliklerin anizotropik olması lamelli katılar için karakteristik bir özelliktir. Eğer lamelli yapıdaki lameller düşük kayma gerilmelerinde birbiri üzerinde hareket ediyor yani kayıyor ise, bu yapı yağlayıcı özellik sağlar. Bahsedilen mekanizma şekil 4.4'de gösterilmektedir [36].

Lamelli katılar başlıca üç karakteristik özelliğe sahiptirler [45]

- Lamelli yapı çok düşük kayma gerilme seviyelerinde deforme olur,
- Lamelli katı aşınmış yüzeye kuvvetlice yapışır,
- Çalışma sıcaklığı ya da çalışma ortamında lamelli katıda herhangi bir ayrışma ya da kimyasal olarak bir diğer forma dönüşme görülmez.

Grafitin haricinde katı yağlayıcı olarak kullanılan diğer malzemeler ise Mo_2S , gümüş ve kurşun filmler, elmas benzeri kaplamalardır [57].

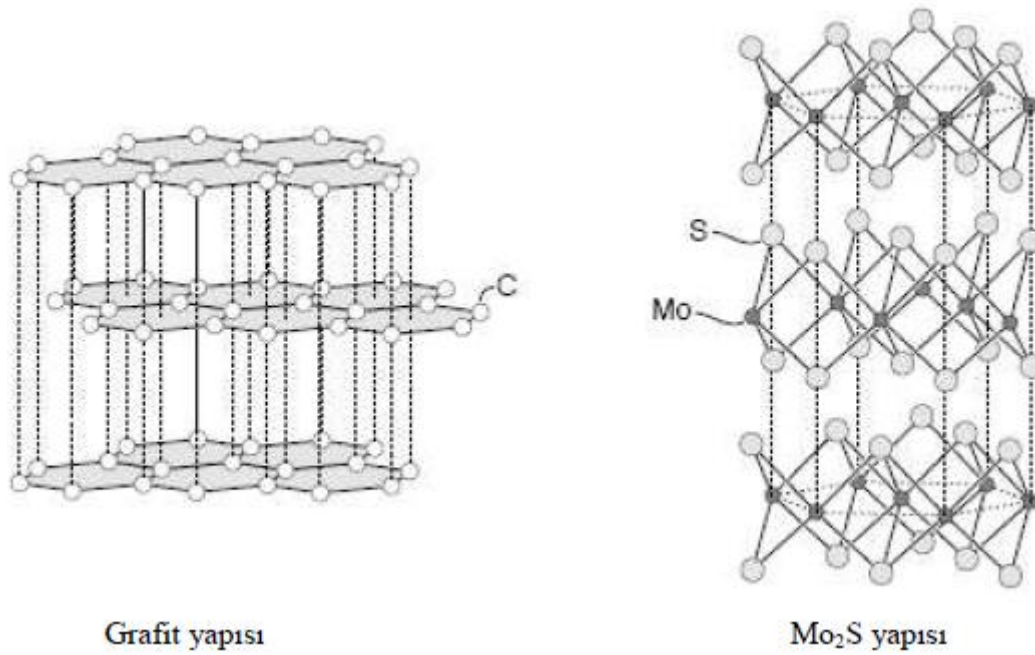


Şekil 4.4. Lameli katıların yağlayıcılık mekanizması [45]

Çeşitli çalışmalarda çok sayıda inorganik lamelli kristal yapının tribolojik özellikleri incelenmiş ve bu lamelli kristal yapılardan bazı metal dikhalkojenidlerin ve halidlere dahil birkaç malzemenin kaymada zayıf düzlemlere sahip olduğu bulunmuştur. Dikhalkojenidlerden kullanışlı tribolojik özelliklere sahip olan malzemeler molibden disülfat, tungsten disülfat ve molibden ditellürittir. Halid grubundan ise gerekli kristal yapıya sahip iki malzeme; kadmiyum iyodit ve nikel iyodittir [45].

Diğer yandan grafit, üstün ve essiz katı yağlayıcılık özelliklerine sahip bir malzeme olarak karsımıza çıkmaktadır. Henüz tam anlaşılamayan sebeplerden ötürü birçok lamelli katı arasından sadece grafit ve molibden disülfat üstün yağlayıcılık performansı sunmaktadır [45].

Grafit ve molibden disülfatın yağlayıcı filmlerinin tribolojik karakteristikleri oldukça benzerdir. Bu durum kristal yapılarının kısmen benzemesiyle alakalıdır. Molibden disülfat ve grafitin kristal yapıları şekil 4.5’de verilmektedir [45].



Şekil 4.5 Grafit ve Mo₂S malzemelerinin kristal yapıları [45]

Şekilden de gösterildiği gibi her iki malzeme de, yüksek mukavemetli lamel düzlemini oluşturan atomların arasında güçlü kimyasal bağlar görülmektedir. Bu güçlü kimyasal bağlarla birleşen atomların oluşturdukları düzlem ile bir alt düzlem arasındaki bağ yani lamellerarası bağ ise zayıftır. Bağ mukavemetindeki bu anizotropik davranış grafitte göre molibden disülfatta daha fazladır [45].

Grafitte birbirinden ayrı düzlemler boyunca yüzey enerjisi oldukça yüksektir ve bu düzlemler arasındaki kayma ortamda az miktarda su ya da oksijen bulunmasıyla kolaylaşmaktadır. Oksijenin ya da suyun grafit lamel yüzeyine absorbe olduğu ve lamellerarası bağlanmayı engellediği düşünülmektedir [45].

4.4. Aşınma

‘Karşılıklı yüzeylerin birbirleri ile etkileşimleri sonucu mekanik harekete bağlı olarak malzeme istenmeyen kopma’ şeklinde tanımlanan aşınma [42,48], sürtünme etkisinin de kaçınılmaz bir sonucudur. Aşınma sonucu birbiriyle çalışan yüzeyler arasında meydana gelen boşluklar çalışma sırasında istenilmeyen durumlara yol açarak o oranda da istenilen fonksiyonların yerine getirilmesini zorlaştırır [42].

Genel olarak hemen hemen tüm makineler dayanımlarını ve güvenilirliklerini aşınma yüzünden kaybetmektedir. Bu sebeple aşınmanın kontrol altına alınması güvenilir bir teknoloji için büyük gereklilik arz etmektedir [48].

Aşınma mekanizması, sürtünme boyunca meydana gelen karmaşık değişimler olarak tanımlanabilir. Genel olarak aşınma tek bir mekanizma olarak karşımıza çıkmaz. Bu sebeple aşınmanın her durumundaki tüm mekanizmaların anlaşılması önem kazanmaktadır. Aşınma, mikroçatlaklar sebebiyle fiziksel dağılım ya da kimyasal çözünme veya temas arayüzeyinde ergimenin bir sonucu olarak ortaya çıkabilmektedir. Genel olarak aşınma, hacim kaybı miktarı ve aşınma yüzeyinin durumu ile değerlendirilir. Aşınma değeri, aşınma hızı, spesifik aşınma hızı ya da aşınma katsayısı olarak tanımlanır [48].

Aşınma, malzemenin özelliği değil, bir sistem cevabıdır. Aşınma tribosistemdeki dinamik parametreler, çevresel parametreler ve malzeme parametrelerindeki ufak bir değişim ile oldukça şiddetli değişebilir [48].

4.4.1. Aşınma türleri

Sürtünerek çalışan malzeme çifti arasındaki karşılıklı zorlama neticesinde meydana gelen aşınmanın değişik türleri vardır ve bundan dolayı farklı sınıflandırmaları gerekmektedir [42].

En yaygın bilinen aşınma durumu kaymalı aşınmadır. Kaymalı aşınmada bir yüzey diğerinin üzerinde kayarken, tekrarlı kayma sonucu zaten malzeme yüzeyinin doğasından kaynaklanan pürüzlülükler dışında pürüzlü bir yüzey ya da malzeme yüzeyinde tepeler-çukurlar-yivler v.s gibi oluşumlar görülür. Bu pürüzlülükler kaymanın devamı halinde yerlerinden ayrılarak ya sistemden uzaklaşır ya da kayma arayüzeyine yerleşerek aşınma partikülleri olarak davranırlar [51].

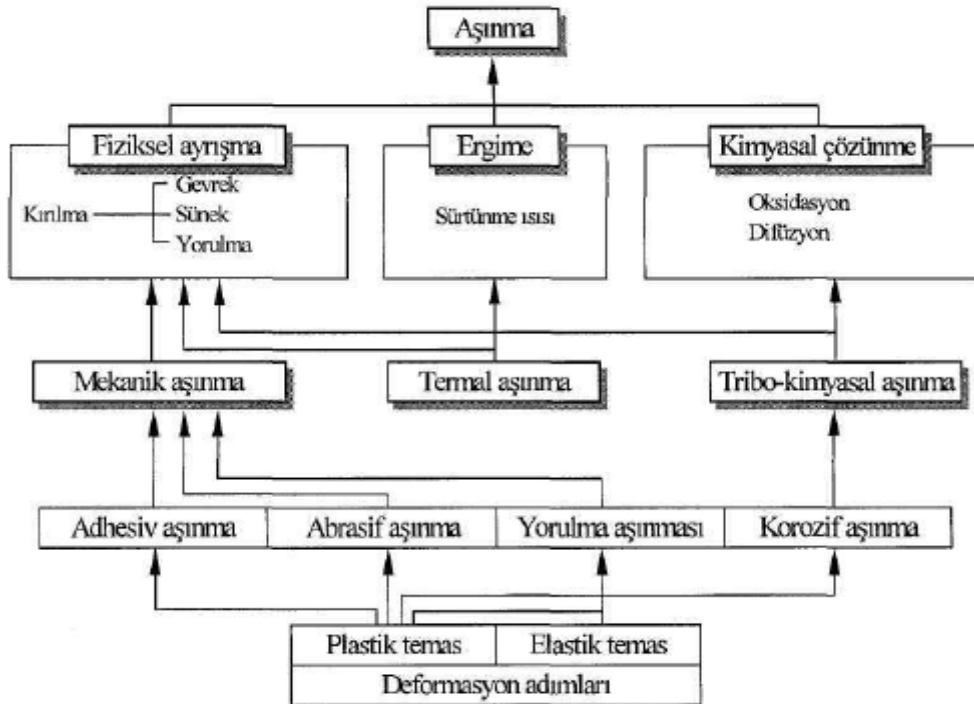
Archard'ın denklemine göre [51];

$$Q=B.W/H$$

Birim kayma mesafesindeki aşınma oranı (Q), uygulanan yük (W), malzeme sabiti (B) ile doğru, malzemenin sertliği (H) ile ters orantılı olmaktadır. Yani aşınma oranının, artan yük ile artmakta; artan sertlik ile azalması öngörülmektedir. Matriks malzemesinin sertliği, takviye edilmiş halinden daha düşük olabileceğinden; bu denklemden, sert takviye ilave edilmiş kompozit malzemelerin, artan sertliklerinden dolayı aşınma oranlarının azalacağı sonucu çıkarılabilmektedir [51].

Aşınmayı tanımlayıcı birçok terim vardır fakat bu terimler her zaman yeterince ayırt edilememektedir. Yine de bazen aşınma mekanizmalarının anlaşılması hakkındaki karışıklıkları ve zorlukları anlaşılır kılabilmektedir [48]. Aşınma; yağlayıcı tipi, sıcaklık, yük, hız, malzeme, ürünün yüzey bitirme işlemi ve sertlik gibi özelliklerinin değiştirilmesinden etkilenmektedir [42].

Şekil 4.6'da aşınmayı tanımlayıcı terimler ve birbirleri ile etkileşimleri özetlenmektedir. Şekilde aşınma, katı yüzeylerin temas tiplerini ve birbirleri ile etkileşimlerini sınıflandırmaktadır. Pratikte birçok farklı temas konfigürasyonu bulunmaktadır [48].



Şekil 4.6. Aşınmayı tanımlayıcı anahtar kelimeler ve birbirleri ile etkileşimleri [48]

Aşınma mekanizmaları genel olarak dört başlıkta incelenmektedir [43,48].

1. Adhesiv aşınma
2. Abrazif aşınma
3. Yorulma aşınması
4. Korozyon aşınması

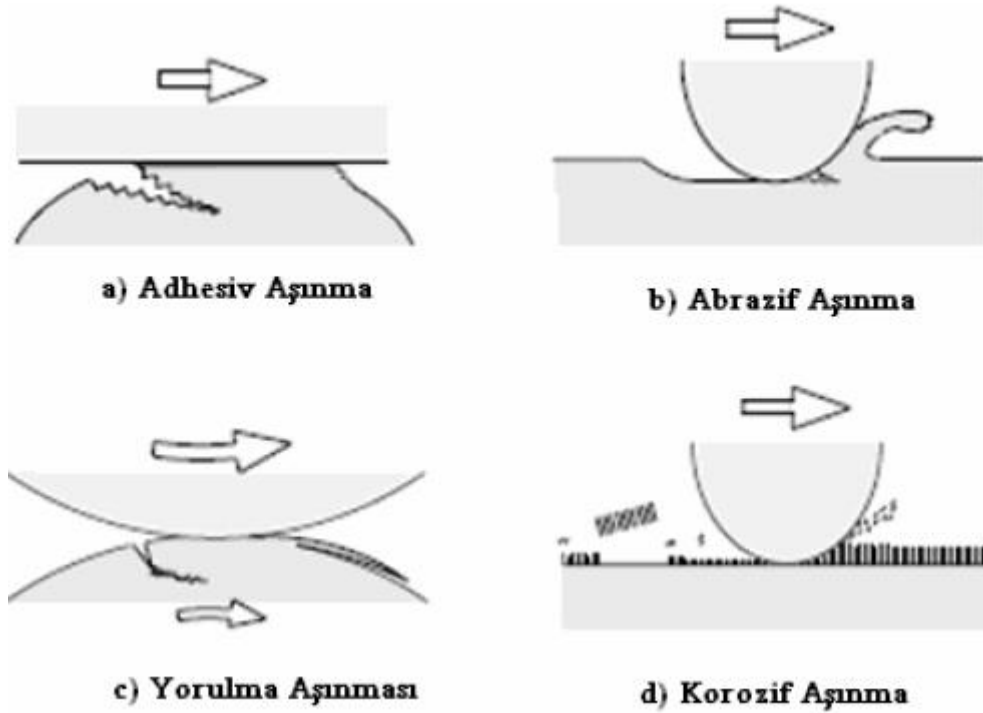
Adhesiv ve abrazif aşınma modları plastik temas altında oluşmaktadır. Benzer metaller arasında plastik temas durumunda, temas arayüzeyi adhesiv bağlanma kuvvetine sahip olacaktır. Malzemenin temas arayüzeyinde meydana gelecek hasar eğer ki güçlü adhezyon sonucu oluşuyorsa bu tür aşınma mekanizmasına adhesiv aşınma adı verilir [48].

Sert ve keskin malzeme ile ona göre daha yumuşak sayılabilecek bir malzeme arasında meydana gelen plastik temas durumunda, sert olan malzeme daha yumuşak olan malzemenin yüzeyine batacak ya da içine penetre olacaktır. Malzemede oluşacak çatlak ya da hasar iste bu sert faz partiküllerinin karşı malzeme yüzeyinde oluşturacakları mikro-yarıklar ya da mikro-çatlaklar sebebiyle oluşuyorsa bu tür aşınmaya abrazif aşınma denir [48,58].

Yorulma çatlağı oluşumu tekrarlı sürtünme çevriminde meydana gelmektedir. Aşınma yüzey hasarının yorulma mekanizması ile meydana geldiği bu aşınma türüne ise yorulma aşınması denmektedir. Korozif ortamlarda, temas arayüzeyinde tribokimyasal reaksiyonlar hızlandırılır. Korozif bir ortamda tribokimyasal reaksiyonlar sonucu yüzeyden malzeme kaybı korozif aşınma ile tanımlanmaktadır. Korozif aşınmada yüzeyden malzeme uzaklaşması, aşınma yüzeyinde kimyasal reaksiyon filminin oluşumu ile gerçekleşir ki bu filmin oluşumu, sürtünmesel deformasyon, sürtünme ısı ve oluşan mikroçatlaklar ile aktive edilip hızlandırılır [48].

Hava da baskın olan korozif madde oksijen ise böyle bir ortamda metallerde meydana gelen tribokimyasal aşınma da oksidatif aşınma olarak adlandırılır [48].

Yorulma aşınması ve korozif aşınma hem plastik hem de elastik temas şartlarında meydana gelmektedir. Şekil 4.7’de gösterilen adhesiv, abrazif ya da yorulma aşınmalarındaki malzeme kaybı, temastaki deformasyon ve kırılma ile meydana gelmektedir. Bu kırılmalar mekanik olarak meydana gelen gerilmelerle üretilir ki bu tür aşınmalar genel olarak mekanik aşınma başlığı altında toplanır [48].



Şekil 4.7. Dört başlıkta incelenen aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi [48]

4.4.1.1. Adhesiv aşınma

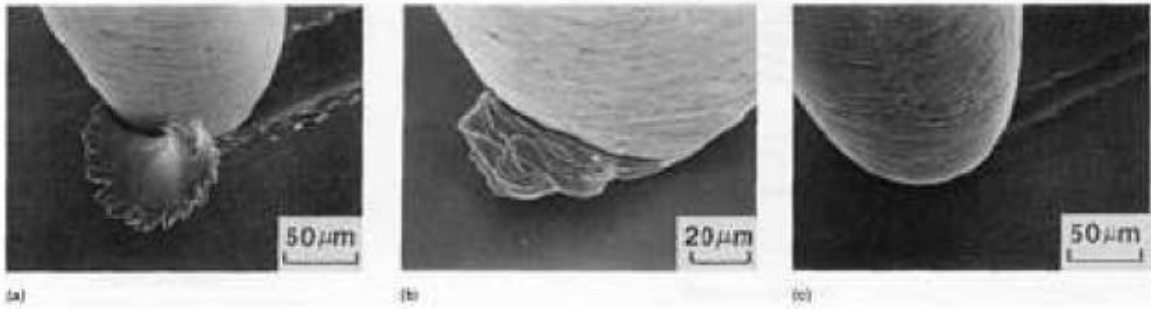
Plastik temastaki iki yüzey arasındaki temas arayüzeyi relatif kaymaya direnç gösterecek kadar adhesiv bağ mukavemetine sahiptir. Dislokasyonlardan meydana gelen plastik deformasyon, basma ve kayma gerilmeleri altında temas bölgesinde çıkar. Temas alanındaki böyle deformasyonların sonucu olarak birleştirilmiş gerilme ve kayma hasar modlarında çatlak başlangıcı ve ilerlemesi teşvik edilir. Çatlak temas arayüzeyine ulaştığı zaman aşınma partikülleri meydana gelir ve adhesiv transfer tamamlanır. Temas arayüzeyindeki adhesiv bağlanmanın oluşturduğu bu tür aşınma, adhesiv aşınma olarak adlandırılır [48]. Bazı kaynaklarda adhezyonun aşınmaya sebep olmadığı, sadece temasın bir sonucu olduğu ve adhezyon sonucu yüzeyde hiç

malzeme kaybının görülmediği durumların mevcut olduğu belirtilmektedir [59]. Adhezyon temastaki iki malzemenin sertliğinin artması ile düşmektedir [45].

4.4.1.2. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma ASTM'de de tanımlandığı üzere, katı yüzey boyunca, katı yüzeye karşı hareket eden sert partikül ya da sert yükseltelerin oluşturduğu aşınma türüdür. Aşınma genellikle temas eden yüzeyler arasındaki sert partiküllerin ya da diğerine göre sert yüzeylerin relatif hareketlerinden dolayı meydana gelen malzeme kaybını içeren katı yüzeyin hasarı olarak tanımlanır [49].

Abrazyon boyunca yüzeyden malzemenin nasıl uzaklaştığının açıklanması amacıyla birçok mekanizmanın olduğu ileri sürülmektedir. Bunlar genel olarak kırılma, yorulma ve ergimedir. Abrazif aşınmanın meydana gelmesindeki karışıklıktan dolayı sadece bir tane mekanizma tüm malzeme kaybından sorumlu tutulamaz. Şekil 4.8'de tek bir abrazif ucun malzeme yüzeyinden geçerken oluşturduğu bazı abrazif aşınma tipleri gösterilmektedir. Bu tipler kızıklama (Ploughing), pulluklama (Wedge) ve kesme (Cutting) olarak adlandırılır [49].



Şekil 4.8. Abrazif aşınma mekanizmasının üç tipi olan a) Kesme, b) Pulluklama, c) Kızıklama aşınmalarının SEM görüntüleri [49]

Kızıklama (Ploughing) türü aşınma, temastaki iki yüzeyin sertliklerinin birbirinden farklı olduğu durumlarda meydana gelir. Diğerine göre daha sert olan malzeme yüzeyindeki tepecikler daha yumuşak olan yüzeyin içine girer ve eğer ki bir hareket söz konusu ise yüzeyde yiv oluşumuna sebep olurlar. Kızıklama oluşumunun iki ana

sebebi kısaca yüzeylerdeki tepecikler ya da temas bölgesinde bulunan sert partiküllerdir [48,60].

Kızaklama mekanizmasında malzeme, yüzeyde meydana gelen yivlerin kenarlarına toplanır. Bu düşük yüklerde meydana gelir ve herhangi bir malzeme kaybına yol açmaz. Hasar, malzemenin yüzeyinde soğuk deformasyon sebebiyle gelişen ve büyüyen dislokasyonlar sonucu meydana gelir. Eğer ki bu soğuk deformasyon bölgesinde yiv oluşumu devam ederse, yüzeydeki hasara ilave olarak mikroyorulma mekanizması sonucu da hasar oluşur [49].

Pulluklama (Wedge), abrazif ucun önünde meydana gelir. Pulluklama mekanizmasında, yiv önünde toplanan malzeme miktarı, kenarlara toplanan malzeme miktarından fazladır. Yine de pulluklama oluşumu abrazif aşınmanın hafif hasar bırakan mekanizmalarından sayılmaktadır [49].

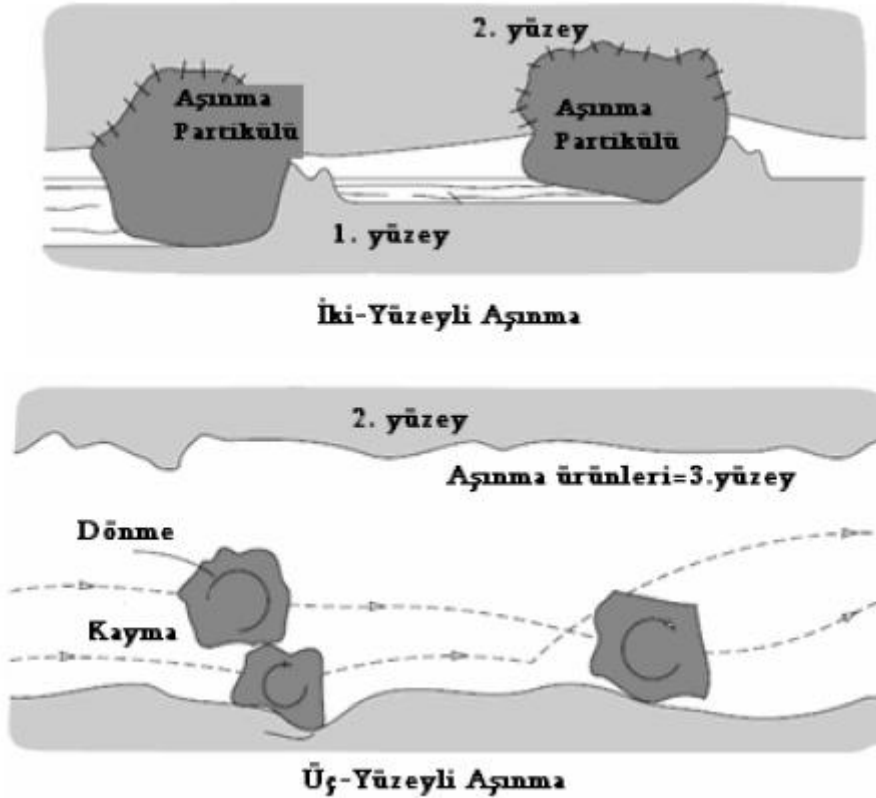
Yumuşak malzemeler için en ağır aşınma mekanizması Kesme (Cutting)'dir. Bu proses boyunca abrazif uç, malzemelerin islenmesinde olduğu gibi yüzeyden malzemeyi plaka ya da talas şeklinde kaldırır. Sert abrazif partiküller için mekanizmanın kızaklamadan kesmeye dönüşmesi için kritik bir açı (örn: bakır için 45° , alüminyum için 85°) ve penetrasyon derinliği mevcuttur [49].

Abrazyon aşınmasının maliyeti yüksek olup bir endüstri bölgesindeki toplam üretimin %1-4'ü arasında değişmektedir. Abrazyonun etkisi özellikle tarımın endüstriyel alanlarında ortaya çıkmaktadır. Madencilik v.b gibi [49].

İki yüzey birbiriyle temas ettiğinde, her iki yüzeyde de aşınma meydana gelir. Endüstriyel kuruluşlar, oluşan ekonomik kayıpları sebebiyle aşınan yüzeyin üzerine yoğunlaşarak ve diğer yüzeyin abrazif olduğunu düşünürler. Genel olarak her iki yüzey de abrazif aşınmaya meyillidir [49].

Aşınan ya da aşındıran yüzeylerde aşınma hızı, malzemenin doğasına değil, her iki yüzey karakteristiğine, yüzeyler arasındaki abrazif mevcudiyetine, temas hızına ve diğer çevresel şartlara bağlıdır [49].

Abrazyon tipik olarak temas ortamına göre olduğu gibi temas tipine göre de karakterize edilir. Temas tipleri iki-yüzeyle ve üç-yüzeyle aşınmayı kapsamaktadır. İki yüzeyle temas, abrazif malzemenin tek yüzeyle üzerindeki hareketinde, üç-yüzeyle temas ise abrazifin iki yüzeyle arasındaki hareketinde meydana gelmektedir. Şekil 4.9'da iki-yüzeyle ve üç-yüzeyle temas tipleri gösterilmektedir [49,51].



Şekil 4.9. İki-yüzeyle ve üç-yüzeyle abrazif aşınma tipleri [45]

Erozyon aşınması ise, aşınma partiküllerinin ya da gaz, sıvı gibi akışkan bir ortamda bulunan aşındırıcı parçacıkların yüzeye serbestçe çarpması sonucu malzeme yüzeyinden parçaların kopmasıyla ortaya çıkmaktadır [43,44]. Sıcaklık ve akış hızı arttıkça aşınma hızlanır [43]. Katı parçacıkların bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda aşınma abradif erozyon olarak adlandırılır. Katı parçacıkların bağıl hareketi katı yüzeye dik olduğundan ise aşınma çarpma (impact) erozyonu olarak adlandırılır. Erozif aşınmaya örnek gaz türbinlerinin nozul ve kanatçıklarının yanma ürünleri içindeki katı parçacıklar tarafından aşındırılmasıdır. Sıvı erozyonu sıvı damlacıkları içeren sıvı ve gaz jetleri ile meydana gelen bir aşınmadır ve çarpma,

karıncalanma oyulması (pitting) ve yenme yüzeyin kabalaşması şeklinde görülür [42].

4.4.1.3. Yorulma aşınması

Adhesiv ve abrazif aşınma mekanizmalarında aşınma partikülü oluşması için tekrarlı temasın olmasına gerek yoktur. Tekrarlı temasın olduğu yerlerde aşınma ürünlerinin oluşması için farklı bir aşınma mekanizması mevcuttur. Böyle tekrarlı temas halinde meydana gelen aşınma yorulma aşınması olarak adlandırılır [43,48]. Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişen mekanik gerilmeler sonucu meydana geldiklerinden yorulma aşınması birçok aşınma prosesinde görülür. Neticede malzeme yüzeyinde çatlaklar oluşur ve bu da yüzeyden parçacıkların ayrılması, çukur ve oyukların meydana gelmesine sebep olur [43].

Yuvarlanma teması söz konusu olduğunda ise hasarda yorulma mekanizması daha fazla önem taşır. Bilyeli bir yatakta yorulma periyodu basitçe yatağın dönme sayısı ile ilgilidir. Bir küre veya silindirde temas noktasındaki maksimum gerilme, yüzeyin biraz altında bir yerde meydana geldiğinden yorulma hasarı gerilmenin en yüksek olduğu yerde başlar. Yüzeyin altında yorulma çatlakları oluşur ve bunlar yuvarlanma temasıyla ilgili karakteristik karıncalanma (pitting) hasarı oluşturarak yüzeyden nispeten büyük metal parçacıkları ayrılmasına neden olur [42].

4.4.1.4. Korozif aşınma

Korozif aşınmada yüzeyden malzeme uzaklaşması, aşınma yüzeyinde kimyasal reaksiyon filminin oluşumu ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünlerinin yüzeye kuvvetli bir şekilde yapışması ve bulk malzeme gibi davranması durumunda, aşınma mekanizmasının da neredeyse bulk malzeme ile aynı olacağı öngörülmektedir. Yine de birçok durumda böyle reaksiyon ürünleri bulk malzemedeki farklı davranmaktadır ki bu durumda katı yüzeyin korozif ortam ile etkileşimleri ile reaksiyon ürünlerinin

oluşumu korozif aşınmayı meydana getirir. Korozif aşınmada oluşan reaksiyon ürünleri sürtünme ile yüzeyden kalkar. Bu durumda reaksiyon tabakalarının aşınma hızı, yüzeyde oluşan ve yüzeyden kalkan reaksiyon ürünlerinin hızı ile alakalıdır [48].

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Giriş

Pulse plazma teknolojisi ve ekipmanları parçaların yüzey modifikasyonu için geliştirilmiştir. Düşük maliyetli, bulunması kolay olan çeliklerin yüzeyleri pulse plazma teknolojisi ile modifiye edilerek yüksek maliyetli bulunması zor olan, yüzey özellikleri iyi olan çeliklerin yerine kullanılması amaçlanmıştır. Geleneksel yüzey işlemlerinde ve de yeni yüzey işlemlerinde amaç aynıdır korozyon direncini, oksidasyon, yorulma ve aşınma dayanımını arttırmaktır.

Bu çalışmada AISI 5140 çelikleri kullanılmıştır. Modifikasyon işlemi öncesi ve sonrasındaki benzerlik ve farklılıklar incelenmeye çalışılmıştır. AISI 5140 çeliklerinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi ile yüksek aşınma dayanımı ve sertliği sağlanması ile ekonomik kazançlarda sağlanacaktır.

Pulse plazma modifikasyon sistemi tüm ekipmanları ise şekil 5.1'de görülmektedir.



a)



Şekil 5.1. a)Pulse plazma uygulama sistemi (plazmatron), b) kontrol paneli ve güç üniteleri

5.2. Pulse Plazma İşlemi Uygulamaları

AISI 5140 çeliği CNC tezgahında silindirik olarak 22cm çapında 10mm yüksekliğinde tüm numuneler aynı ölçüde olacak biçimde kesilmiştir. Kesim işlemi sonrası numuneler 60, 120, 240, 400 ve 600 mesh'lik zımparalardan geçirilmiştir. Zımpara işlemi sonrası numunelerin yüzeyleri alkolle temizlenmiş ve pulse plazma işlemi için hazır hale getirilmiştir. Pulse plazma sistemi için hazırlanan numuneler tablo 5.1'de verilmekte olan deney şartlarına göre yüzeyleri modifiye edilmiştir. Pulse plazma öncesi numunelere herhangi bir ön işlem uygulanmamıştır (karbürizasyon vb. gibi). Uygulanan pulse plazma işlem şartları tablo 5.1'de verilmektedir. Bu çalışmada tükenen elektrod olarak Mo kullanılmıştır.

Tablo 5.1. Pulse plazma uygulama şartları

Numune No	Numune-nozul mesafesi (mm)	Nozul-elektrot mesafesi (mm)	Pil kapasitesi (μF)	Pulse sayısı	Elektrot
1	60	10	800	5	Mo
2	60	10	800	10	Mo
3	60	10	800	15	Mo
4	70	10	800	5	Mo
5	70	10	800	10	Mo
6	70	10	800	15	Mo
7	80	10	800	5	Mo
8	80	10	800	10	Mo
9	80	10	800	15	Mo

5.3. Metalografik Çalışmalar

Pulse plazma ile üretilen numuneler öncelikle modifiye olan yüzeylerinde meydana gelmiş spot merkezlerini ortalayacak biçimde kesme cihazı (Discotom 6) ile hassas biçimde kesilmiş ve kesit incelemesi yapılmak amacıyla bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler standart numune hazırlama yöntemlerine uygun olarak sırasıyla 120, 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 meshlik SiC zımparalar kullanılarak zımparalanmış ardından da 3 µm ve 1µm lik elmas pastalar kullanılarak parlatma işlemleri uygulanmıştır. Parlatılmış numuneler nital kullanılarak dağlanmıştır. Hazırlanan numuneler Nikon marka Eclipse L150 optik mikroskopla numunelerin kesit görüntülerinden farklı büyütmelede fotoğrafları çekilmiştir.

5.4. Optik Çalışmalar

Metalografik olarak hazırlanan numuneler %3'lük nital dağlayıcısı ile dağlanmış ve Nikon marka optik mikroskopla numunelerin değişik büyütmelede fotoğrafları çekilmiştir.

5.5. Mikrosertlik Ölçümleri

Modifikasyon tabakasının yüzey sertliği Leican mikro-sertlik cihazı kullanılarak alınmıştır. Yüzey sertlikleri 50 gr yük 10 saniye uygulanarak, hem yüzey sertlikleri hemde sıra sertlikleri alınmış ve sertlik profilleri çıkarılmıştır.

5.6. X-Işınları Analizleri

Analizler Rigaku X-Ray Diffraction D/MAX/2200 marka X-ışınları difraktometresi kullanılarak yapılmıştır.

5.7. Tarayıcı Elektron Mikroskobu (SEM) ve EDS Analizleri

AISI 5140 çeliğinin ve farklı parametrelerde modifiye edilmiş AISI 5140 çeliklerinde meydana gelen yüzeysel değişimler Joel marka JSM 6060-LU model elektron mikroskobu ile analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca numune yüzeylerinden Joel marka JSM 6060-LU cihazı ile EDS analizleri yapılmıştır.

5.8. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri CSM marka aşınma cihazı ile yapılmıştır. Çizgisel (lineer) aşınma yöntemi uygulanmıştır. Aşınma deneyinden önce numune ve kullanılacak bilyalar alkolle temizlenmiştir. Aşınma deneyleri 6mm çapında alümina bilya ile yapılmıştır. Deney esnasında uygulanan hız 0,15m/sn'dir. Yük olarak 1N, 2N ve 3N olmak üzere 3 farklı yük seçilmiştir. Deney mesafesi 500m'dir. Deney esnasında aşındırıcı bilyanın yönü her deney için çevrilmiştir. Deneyler ortalama sıcaklığın 24°C, nem oranının ise %35 aralığında olan ortamda yapılmıştır. Deney esnasında yük uygulama kolunun modifiye edilen yüzeye temasında hassas davranılmış yüzeyden doğru veriler alınması sağlanmıştır. Uygulanan deney esnasında elde edilen veriler yine CSM firmasına ait programa aktarılmaktadır.

Her bir numune aşınma deneyi sonrası ağzı kapalı poşette tutulmuş, tüm deneyler tamamlandıktan sonra SEM ve EDS çalışmaları yapılmıştır.

Hem aşınma yüzeylerinin hem aşınma ürünlerinin SEM (farklı büyütme oranlarında) ve EDS analiz çalışması yapılmıştır.

BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. Mikroyapı Sonuçları

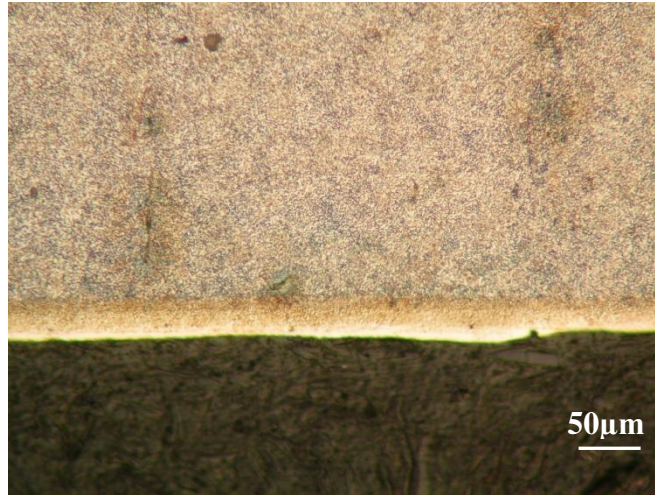
AISI 5140 çeliklerine uygulanan deneysel çalışmalar verilmektedir (Bkz. Tablo 5.1). Modifiye edilmiş olan bu çelikler optik mikroskopta incelenmiştir. Şekillerde 20X büyütmede numunelerin kesit görüntülerindeki optik mikroyapıları görülmektedir.

Şekil 6.1, şekil 6.2 ve şekil 6.3'de optik yapılardaki kontrast farklılığından modifikasyon tabakasını, onun üstündeki difüzyon tabakasını (ısı tesiri altında kalan bölge) ve en sonunda ana malzemeyi (altlık) açıkça görülmektedir.

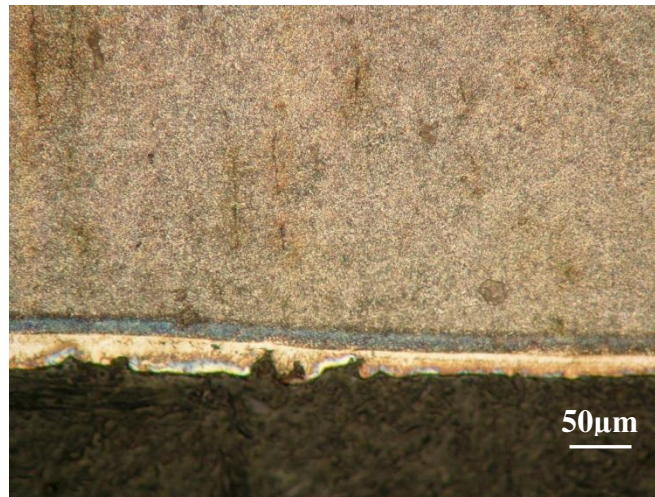
Şekil 6.1'de 1 (60mm, 5 pulse), 2 (60mm, 10 pulse) ve 3 (60mm, 15 pulse) no'lu numunelerin kesitleri hazırlanarak alınmış optik görüntüler görülmektedir. Modifikasyon tabakası kontrast farklılığından dolayı hemen fark edilebilmektedir. Optik görüntülerden de anlaşılacağı üzere modifikasyon tabaka kalınlıkları birbirinden farklıdır. 1 no'lu numunenin modifikasyon tabaka kalınlığı 25 μ m iken, 2 no'lu numunenin 31 μ m, 3 no'lu numunenin ise 38 μ m'dir.



a)



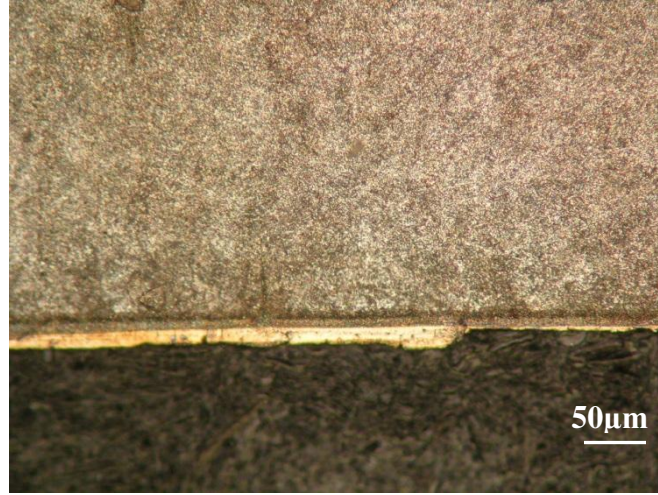
b)



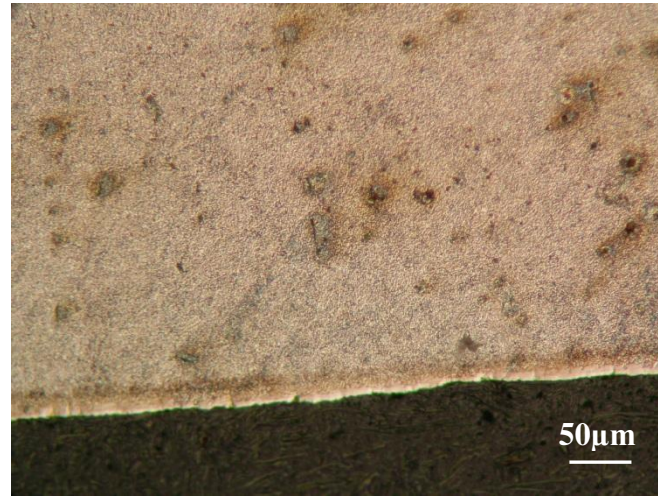
c)

Şekil 6.1. a)1 (60mm, 5 pulse), b)2 (60mm, 10 pulse) ve c)3 (60mm, 15 pulse) no'lu numunelerin kesitleri hazırlanarak alınmış optik görüntüleri

Şekil 6.2’de ise 4 (70mm, 5 pulse), 5 (70mm, 10 pulse) ve 6 (70mm, 15 pulse) no’lu numunelerin kesit optik görüntüleri görülmektedir. Modifikasyon tabakası kontrast farklılığından dolayı hemen fark edilebilmektedir. 4 no’lu numunenin modifikasyon tabaka kalınlığı 19 μ m, 5 no’lu numunenin 20 μ m ve 6 no’lu numunenin modifikasyon tabaka kalınlığı 22 μ m’dir. 1 no’lu numune ile 4 no’lu numune arasında işlem parametreleri açısından tek fark nozul ile numune arası mesafedir. 1 no’lu numunede 60mm olan mesafe, 4 no’lu numunede 70mm’ye çıkarılmıştır. Mesafenin artması sonuçlardan da görüleceği üzere modifikasyon tabaka kalınlıklarının düşmesine sebebiyet vermiştir. Bu düşüşün nedeni nozul ile numune arasındaki mesafenin artmasıyla pulse plazma etkisinin azalmasıdır. Ayrıca pulse sayısının artması yine 4 ve 6 no’lu numuneler arasında modifikasyon tabaka kalınlıklarında farklılık oluşumuna sebebiyet vermiştir. Buna göre pulse miktarı arttıkça modifikasyon tabaka kalınlığı artmıştır.



a)



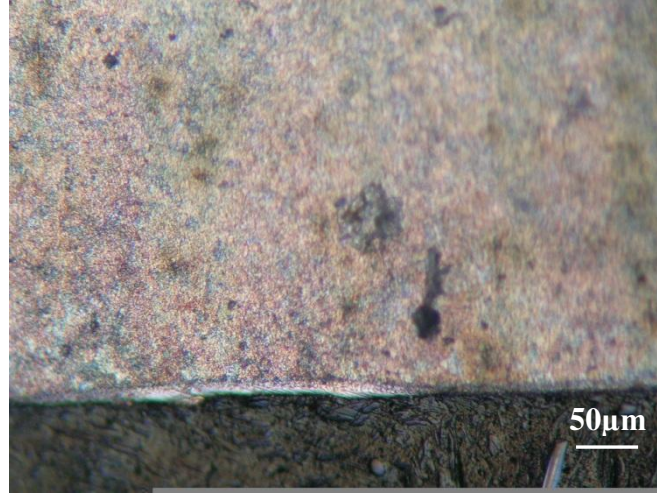
b)



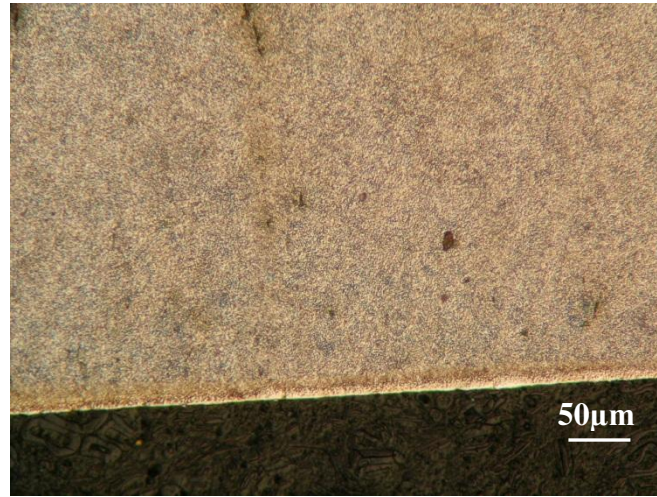
c)

Şekil 6.2. a)4 (70mm, 5 pulse), b)5 (70mm,10 pulse) ve c)6 (70mm, 15 pulse) no'lu numunelerin kesitleri hazırlanarak alınmış optik görüntüleri

7 (80mm, 5 pulse), 8 (80mm, 10 pulse) ve 9 (80mm, 15 pulse) no'lu numunelerin kesit optik görüntüleri şekil 6.3'de görülmektedir. 7 no'lu numunede modifikasyon tabaka kalınlığı 13µm iken 8 no'lu numunede 16µm ve 9 no'lu numunede 19µm'dir. Pulse sayısı arttıkça işlem süresi de arttığı için modifikasyon tabakasının kalınlığı artmaktadır. Mesafenin artması itibariyle nozul ve numunenin etkileşiminin azalmasından ileri geldiği düşünülen düşük tabaka kalınlığı, düzgün olmayan ve homojensiz yapı dikkat çekicidir. Hem pulse sayısının azalması hem mesafenin artışı 7 no'lu numune grubunda modifikasyon tabakasının düzgün oluşmamasına sebebiyet vermiştir.



a)



b)



c)

Şekil 6.3. a)7 (80mm, 5 pulse), b)8 (80mm, 10 pulse) ve c)9 (80mm, 15 pulse) no'lu numunelerin kesitleri hazırlanarak alınmış optik görüntüleri

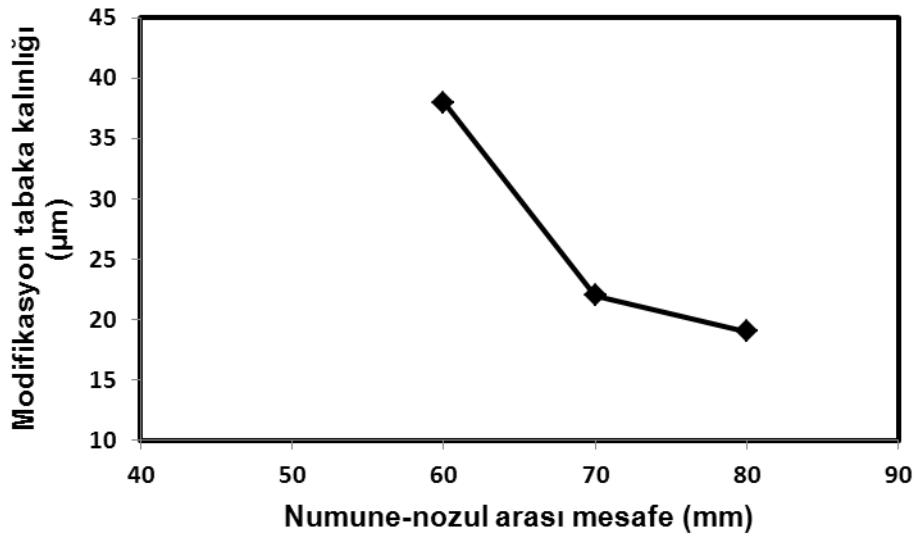
Tablo 6.1. Pulse plazma parametreleri ve modifikasyon tabakası kalınlık değerleri

Numune No	Numune-nozul mesafesi (mm)	Nozul-elektrot mesafesi (mm)	Pil kapasitesi (μ F)	Pulse sayısı	Modifikasyon Tabaka Kalınlığı (μ m)
1	60	10	800	5	25
2	60	10	800	10	31
3	60	10	800	15	38
4	70	10	800	5	19
5	70	10	800	10	20
6	70	10	800	15	22
7	80	10	800	5	13
8	80	10	800	10	16
9	80	10	800	15	19

Metalografik incelemeler sonucunda, kaplama kalınlığının artan pulse sayısına ve nozul ile numune arasındaki mesafeye bağlı olarak 15-40 μ m arasında değiştiği tespit edilmiştir. Literatür çalışmalarında da genellikle pulse sayısının artışıyla, modifikasyon tabaka kalınlığının arttığı görülmektedir [14,15].

İşlem süresi çok kısa olduğundan dolayı kompozisyonun her yerde tamamen homojen olmaması durumu söz konusudur. Bu özellikle, az sayıda pulse yapıldığında doğru olmaktadır. Bundan dolayı ergimiş tabakanın kompozisyonu tamamen aynı olmayabilir. Pulse sayısı arttığı zaman kompozisyon çok daha homojen olmaktadır.

Kaplama kalınlıklarının işlem parametreleriyle olan ilişkileri grafiklere aktarılmıştır. Şekil 6.4’de pil kapasitesi 800 μ F olan 15 pulse uygulanmış numunelerin (3, 6 ve 9 no’lu numuneler) mesafeye bağlı olarak modifikasyon tabaka kalınlık değerlerinin değişim grafiği görülmektedir. Mesafenin artması (80mm) tabaka kalınlık değerlerinde azalmaya, mesafenin azalmasının (60mm) da tabaka kalınlık değerlerinde artışa neden olduğu görülmüştür.



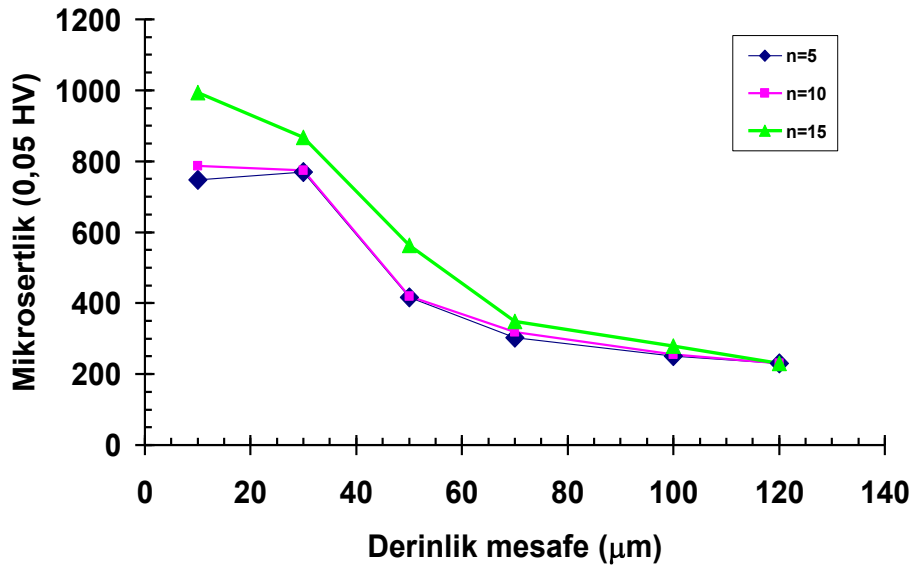
Şekil 6.4. 800μF pil kapasitesinde 60mm, 70mm ve 80mm numune-nozul arası mesafede 15 pulse için modifikasyon tabaka kalınlık değerlerinin değişim grafiği

Pulse sayısı arttıkça modifikasyon tabakasının artacağı ve homojen hale geleceği görülmüştür. Pulse sayısı arttıkça yüzeye girecek iyonize ürün miktarı (özellikle molibden miktarı) artacaktır. Böylece daha kalın ve daha homojen yapıların eldesi mümkün olabilecektir.

6.2. Mikrosertlik Sonuçları

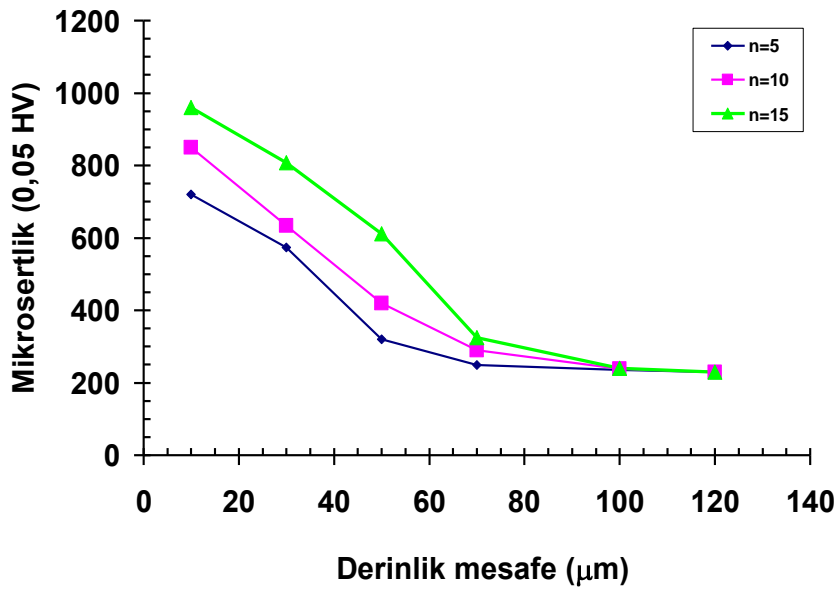
Numunelerden artan pulse sayısına bağlı olarak mikrosertlik verileri alınmış ve meydana gelen değişim gözlemlenmiştir. Pulse plazma işlemi ile yüzeyleri modifiye edilmiş AISI 5140 çelik numuneler modifiye olmuş bölgelerinden tam olarak merkezlenerek kesilmiş ve metalografik olarak hazırlanmıştır. Her bir numune için sıra sertlik profilleri çıkarılmıştır. Numune gruplarının 50 gr yük altında 10 sn süre ile mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Tüm numune gruplarında modifikasyon yüzeyinden içeriye doğru 6 farklı bölgeye sertlik deneyi uygulanmış, elde edilen değerlerle numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. İzlerin modifikasyon alanında daha küçük olduğu dolayısıyla sertlik değerlerinin daha yüksek olduğu, modifikasyon tabakasından çelik içerisine doğru ilerledikçe iz çapının büyüdüğü gözlemlenmiştir. Pulse plazma işlemi uygulanmamış yani işlem görmemiş AISI 5140 çeliklerinin mikrosertlik değerinin 228 HV_{0,05} olduğu söylenebilir.

Şekil 6.5’de 1 (60mm, 5 pulse, 800 μ F), 2 (60mm, 10 pulse, 800 μ F) ve 3 (60mm, 15 pulse, 800 μ F) no’lu modifiye edilen çelik numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye göre sertlik değişimleri görülmektedir. Bu üç grup çelik için elde edilmiş en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 755 HV_{0,05}, 790 HV_{0,05} ve 990 HV_{0,05}’dir. Her üç numune grubu içinde pulse sayısı farklılığı sertlik değerlerini etkilemiştir. Pulse sayısı arttıkça sertlik değerlerinde artış görülmüştür.



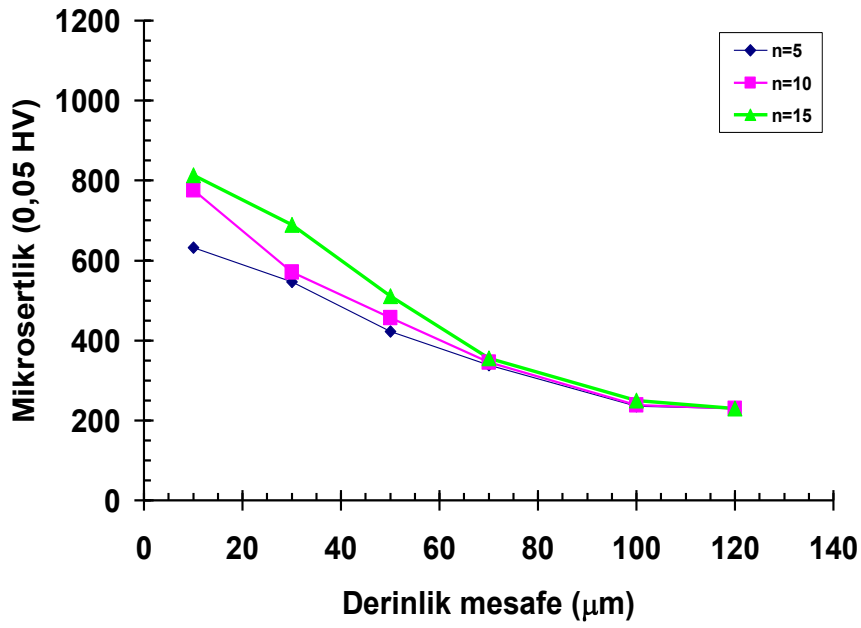
Şekil 6.5. 1 (5 pulse), 2 (10 pulse) ve 3 (15 pulse) no’lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri (H=60mm, C=800 μ F)

Şekil 6.6’da 4 (70mm, 5 pulse, 800 μ F), 5 (70mm, 10 pulse, 800 μ F) ve 6 (70mm, 15 pulse, 800 μ F) no’lu numunelerin sıra sertlik profilleri görülmektedir. En yüksek sertlik değerleri sırasıyla 725 HV_{0,05}, 780 HV_{0,05}, 975 HV_{0,05}’dir. Numune grupları arasındaki pulse sayısı farkı bu sertlik değişikliklerinin sebebi olup ayrıca numune-nozul mesafesi (H) de sertliği etkileyen diğer bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.



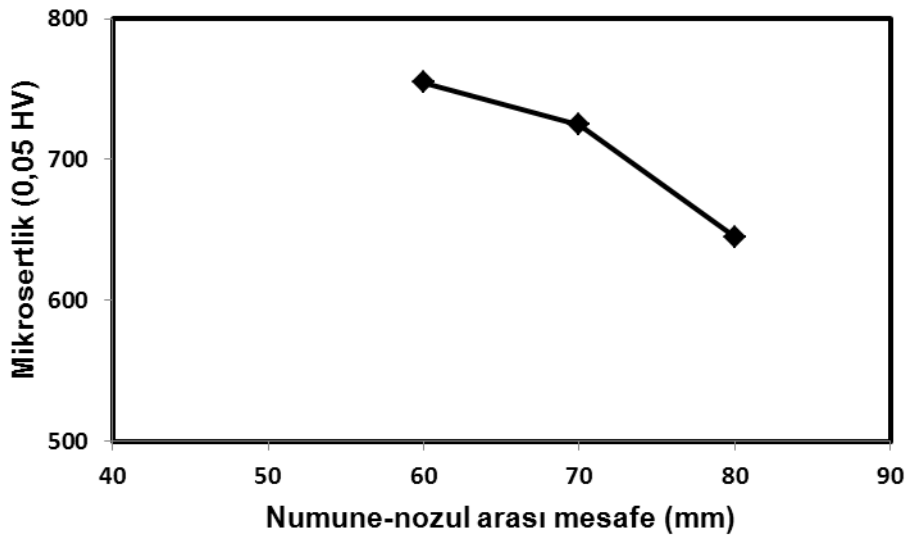
Şekil 6.6. 4 (5 pulse), 5 (10 pulse) ve 6 (15 pulse) no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri (H=70mm, C=800μF)

Şekil 6.7'de 7 (80mm, 5 pulse, 800μF), 8 (80mm, 10 pulse, 800μF) ve 9 (80mm, 15 pulse, 800μF) no'lu numunelerden elde edilmiş en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 645 HV_{0,05}, 775 HV_{0,05} ve 815 HV_{0,05}'dir. Diğer grafiklerde de olduğu gibi burada da pulse sayısı arttıkça sertlik değerleri artmakta ve numune-nozul mesafesinin en yüksek değeri olan 80mm'de yapılmış bu modifikasyon işleminin sonunda sertlik değerleri diğer numunelerin sertlik değerlerine göre azalma göstermiştir. Yani 3 no'lu numunede (H=60mm) en yüksek sertlik 990 HV_{0,05}, 6 no'lu numunede (H=70mm) en yüksek sertlik 975 HV_{0,05} ve 9 no'lu numunede (H=80mm) en yüksek sertlik değeri 815 HV_{0,05} elde edilmiştir. Buna göre numune-nozul arasındaki mesafe (H) arttıkça sertlik değerleri düşüş göstermiştir.



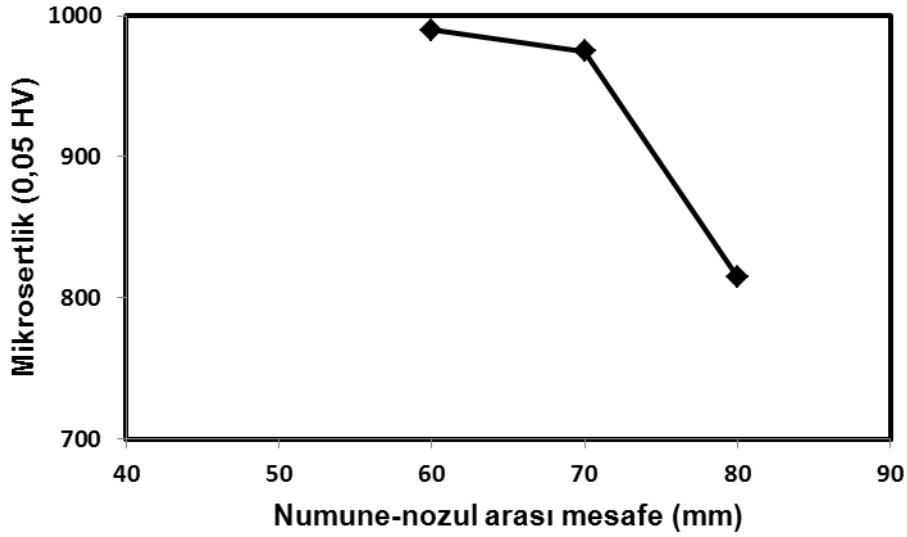
Şekil 6.7. 7 (5 pulse), 8 (10 pulse) ve 9 (15 pulse) no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri (H=80mm, C=800 μF)

Şekil 6.8'de 5 pulse uygulanmış numuneler (1, 4 ve 7 no'lu numuneler) için numune-nozul arası mesafe ile mikrosertlik ilişkisini anlatan diyagram verilmektedir. Artan nozul ile numune arası mesafesinin mikrosertlik değerleri üzerinde etkili olduğu görülmüş olup mesafe arttıkça sertlik değerleri düşüş göstermiştir.



Şekil 6.8. 800 μF pil kapasitesinde 60mm, 70mm ve 80mm numune-nozul arası mesafelerinde 5 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri

Şekil 6.9'da da mesafeye bağlı olarak en yüksek pulse sayısı olan 15 pulse uygulanmış numunelerinin (3, 6 ve 9 no'lu numuneler) mikrosertlik değerlerinin mesafeye göre değişimi verilmektedir. Bu diyagram ise en düşük sertliğin mesafenin en yüksek değeri olduğu 80mm mesafesinde olduğunu açıkça göstermektedir.



Şekil 6.9. 800µF pil kapasitesinde 60mm, 70mm ve 80mm numune-nozul arası mesafelerinde 15 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri

Yapılan pulse plazma işlemleri sonucunda modifikasyon tabakasının mikrosertlik değerleri artan pulse sayısı ile artmaktadır. Yüzeyde oluşan modifikasyon sertlikleri ortalama 600-1000 HV_{0,05} değerleri aralığındadır. Maksimum sertliğe 990 HV_{0,05} ile 3 no'lu (15 pulse sayısı, 800µF pil kapasitesi, 60mm numune-nozul mesafesi) parametreye sahip deney numunesinde ulaşılmıştır. Pulse sayısı arttıkça elastik deformasyon artar, bu deformasyondan dolayı tane boyutu azalır, tane boyutu azaldıkça, sertlik değerlerinin artmasına neden olur [12-23-61]. Ayrıca, pulse plazma esnasındaki yüksek ve yoğun iyon akışı sertliği ve tribolojik özellikleri geliştirmektedir. Numune-nozul arası mesafe azalınca yüzeyde meydana gelen ısınmadan dolayı tavlama görülmekte buna bağlı olarak tane boyutunda büyümelere neden olmuş olabilir. Bir diğer sertlikteki artış mekanizması ise dislokasyon yoğunluğunun artışı olarak ifade edilebilir. Bir başka deyişle plazma sıcaklığı yüksektir. Numune-nozul mesafesi (H) değerinin artması nozul ile malzeme yüzeyinin etkileşimini azalttığı, yüzeye giren iyonize ürünlerin miktarının her iki mesafede de aynı oranda olmadığı düşünüldüğü için sertlik numune-nozul mesafesi

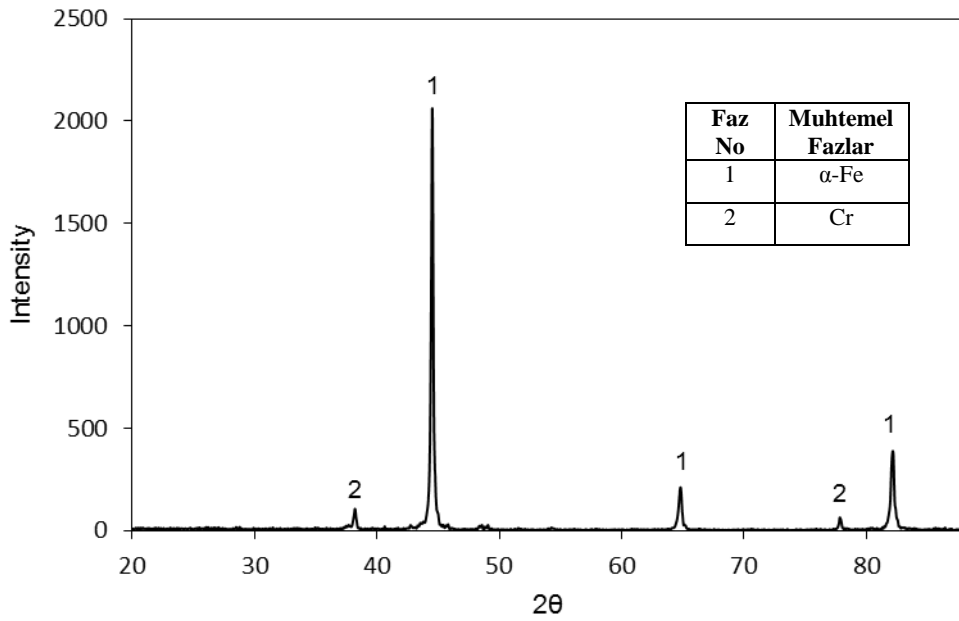
arttıkça azalmaktadır. Numune ve nozul arası mesafenin kısılması nedeniyle nozul ucundan çıkan iyonize ürünler numune yüzeyine tam ve yeterince difüze olmaktadır. Odaklanma probleminin ortadan kalkması sertlik değerlerini yükseltmektedir. Yine aynı yargı üzerinden gidildiğinde mesafenin en yüksek değer olduğu (80mm) 7, 8 ve 9 no'lu numunelerde diğer gruplara göre düşük sertlik değerleri elde edilmiştir.

Yukarıda bahsi geçen birçok mekanizmanın bir araya gelmesi ile modifikasyon işlemine maruz kalmadan sertlik değerleri 228 HV_{0,05} olan AISI 5140 çeliğinin sertlik değerleri pulse plazma uygulama parametrelerine bağlı olarak 990 HV_{0,05} gibi oldukça yüksek bir değere çıkmıştır. Mevcut birçok yüzey geliştirme prosesine göre oldukça yüksek denebilecek bu sertlik değerlerini 1-2 dakika içinde elde edebilmek prosesin ekonomikliği ve kolaylığını anlamamızda yardımcı olacaktır.

Örneğin 800 HV_{0,05} bir sertlik değeri için plazma nitrürleme veya diğer denk proseslerle 25-30 saat aralığında çalışmak gereklidir [62]. Bu kadar sürede bir prosesle çalışmak hem enerji, hem gaz, hem de diğer sarf malzemelerin tüketiminde büyük artışlara sebebiyet verecektir. Oysa bu sertlik değerleri için pulse plazma ile 1-2 dakikalık bir çalışma yapmak yeterlidir. Kısa sürede yapılacak yüzey geliştirme işlemi, hem iş gücü, hem de ekonomik kazanım sağlayacaktır.

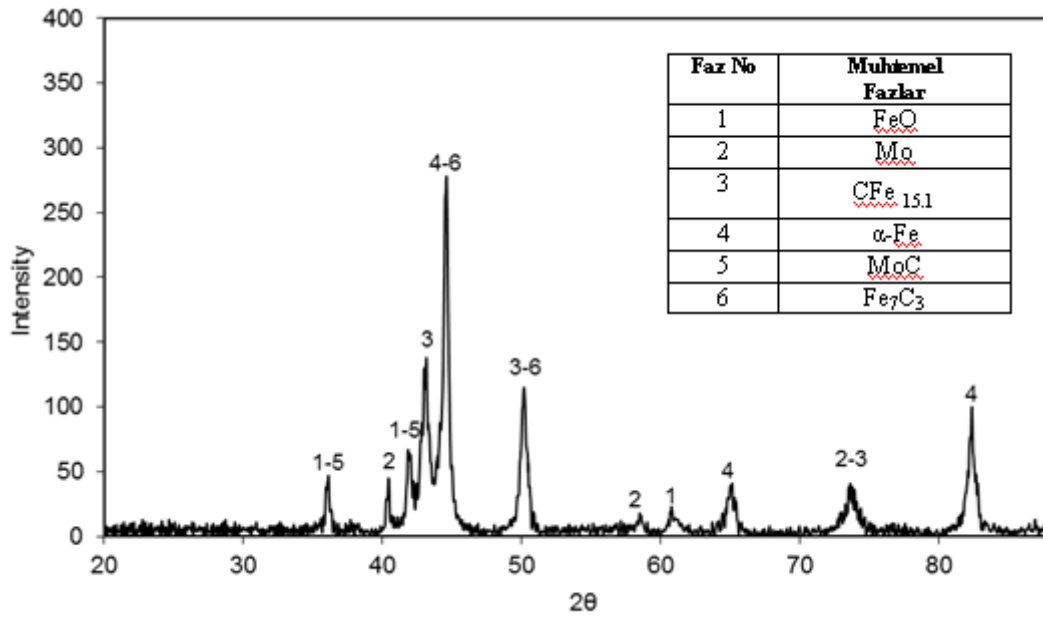
6.3. X-Işınları Difraksiyon Analizleri

Pulse plazma uygulanmadan önce AISI 5140 çeliklerinin x-ışını analizleri yapılmıştır. İşlem öncesi ana yapıdaki fazlar belirlenmiştir (Şekil 6.10).



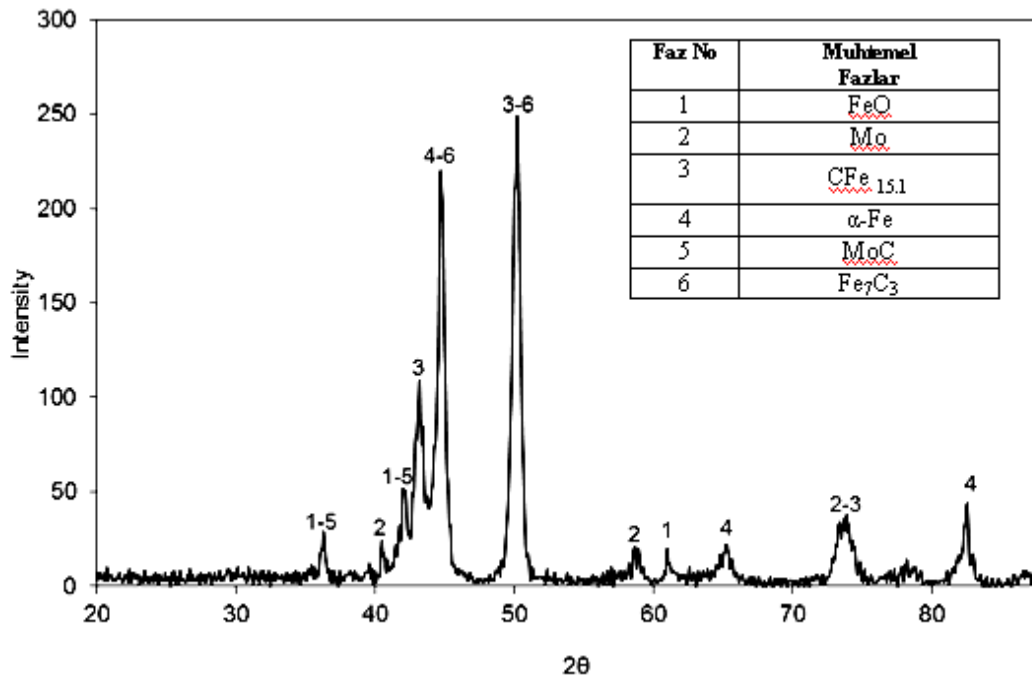
Şekil 6.10. İşlem uygulanmamış AISI 5140 çeliğinin x-ışını analiz sonucu

Şekil 6.10'da x-ışını analizi verilen işlem görmemiş AISI 5140 çeliğinin, işlem sonrası meydana gelen yeni faz oluşumları 1 no'lu (60mm, 5 pulse) numune için Şekil 6.11'de görülmektedir. İşlem görmemiş AISI 5140 çeliğinde sadece α -Fe ve Cr fazı bulunurken, işlem sonrası modifikasyon tabakasında Mo, MoC, Fe_7C_3 bileşiklerinin mevcut olduğu görülmüştür. Yapı içerisinde yüzey özelliklerine katkı sağladığı düşünülen bu fazların miktarsal değişimi mekanik özellikler bakımından önemlidir. Özellikle Fe_7C_3 , Mo esaslı fazların varlığı ve miktarı bu sebeple önem arz etmektedir.



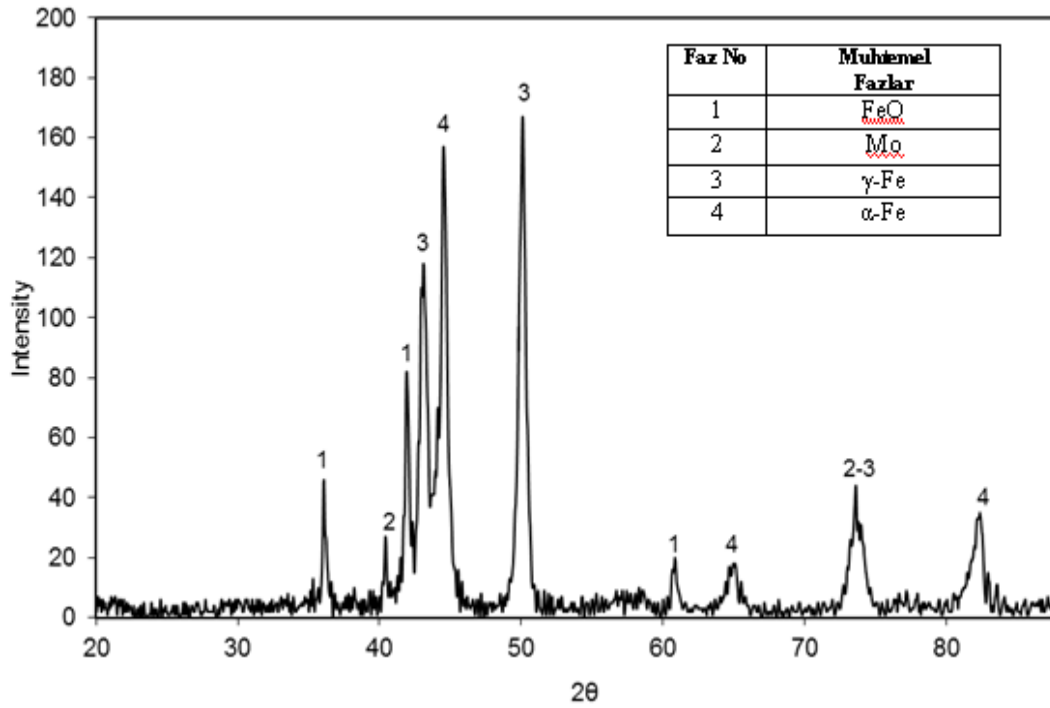
Şekil 6.11. 1 no'lu numunenin x ışını difraksiyon paterni

Şekil 6.12'de 3 no'lu (60mm, 15 pulse) numune x-ışını analiz sonuçları görülmektedir. 1 no'lu numuneden tek farkı artan pulse sayısıdır. Pik şiddetlerine bakıldığında bu farklılığın pik şiddetlerini de etkilediği görülmektedir. Pulse sayısının artmasıyla, işlem süresi uzamakta ve bu sebeple yüzeye giren iyonize ürün miktarı artmakta olup pik şiddetlerinde artış söz konusu olmaktadır.

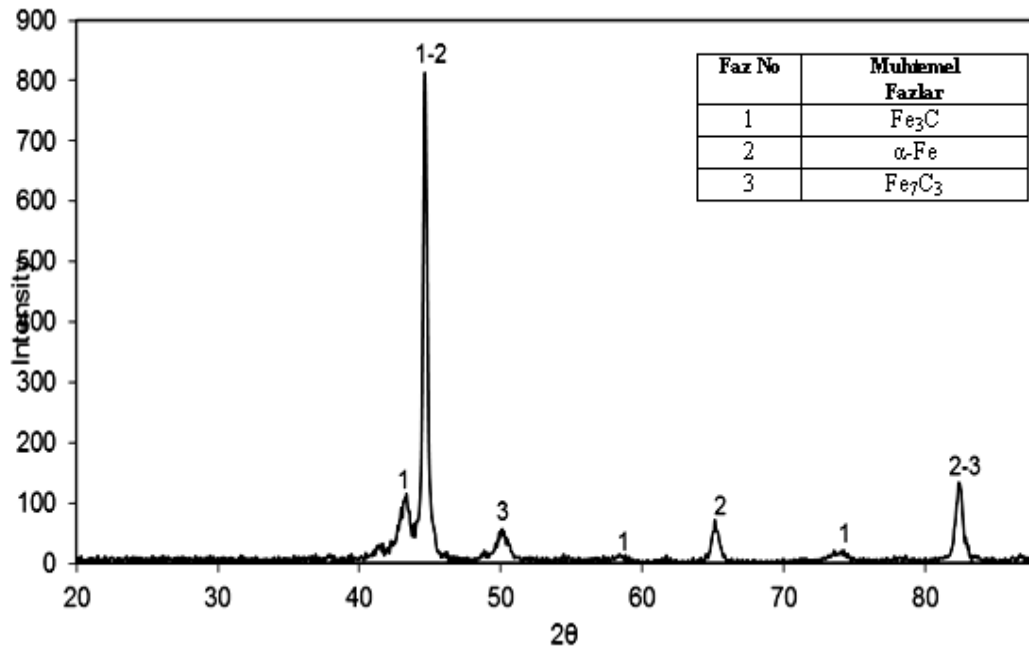


Şekil 6.12. 3 no'lu numunenin x ışını difraksiyon paterni

Şekil 6.13'de 6 no'lu (70mm, 15 pulse) numunenin x-ışını analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 6.14'de 9 no'lu (80mm, 15 pulse) numune x-ışını analiz sonuçları görülmektedir. Artan nozul ile numune arasındaki mesafeye bağlı olarak pik şiddetlerinde farklılık görülmüştür. Numune-nozul mesafesinin artmasının pik şiddetlerini azalttığı belirlenmiştir. Pulse sayısının yüksek olmasına rağmen modifikasyon yüzeylerinde molibdenin yoğunluğu azalmış olup, 9 no'lu numunede Mo konsantrasyonuna rastlanmamıştır.



Şekil 6.13. 6 no'lu numunenin x ışını difraksiyon paterni



Şekil 6.14. 9 no'lu numunenin x ışını difraksiyon paterni

X-ışınları analiz sonuçlarında; kaplama kalınlık değerlerinin değişimlerinde etken olduğunu açıkladığımız numune-nozul arası mesafe ve pulse sayısının pik şiddetleri değerlerinde değişikliğe yol açmış olduğu görülmüştür. Yine modifikasyon işlemi sonrası yapıda yeni fazlar oluştuğu görülmüştür. Yapıda görülen Mo, MoC, Fe₇C₃, γ-Fe fazları malzeme yüzey özellikleri etkileyen önemli fazlardır. Oluşan bu yeni fazlar mekanik özellikleri ve aşınma dayanımını olumlu yönde etkileyecektir.

6.4. Aşınma Deney Sonuçları

Pulse plazma yöntemiyle yüzeyleri modifiye edilen numunelere CSM lineer aşınma cihazı ile 500m yol için 0,15m/sn hızda 1N, 2N ve 3N yükler için aşınma deneyi uygulanmıştır. Deneyler esnasında hava sıcaklığı ortalama 24 °C'dir. Nem oranı %35 civarındadır.

Deneyler sonrası aşınma hız değerlerini veya aşınma miktarlarını hesaplamak için öncelikle aşınma izlerinden hacimsel aşınma miktarı belirlenip, daha sonra bu ölçümler yardımıyla, aşınma bölgelerinin alanları hesaplanmış ve elde edilen bu alan

değerleri CSM yazılımındaki formülde yerine konularak aşınma hızları hesaplanmıştır.

Aşınma deneyleri sonrası aşınma cihazı yazılımı sürtünme katsayılarını ve iz derinlik değerlerini de vermektedir.

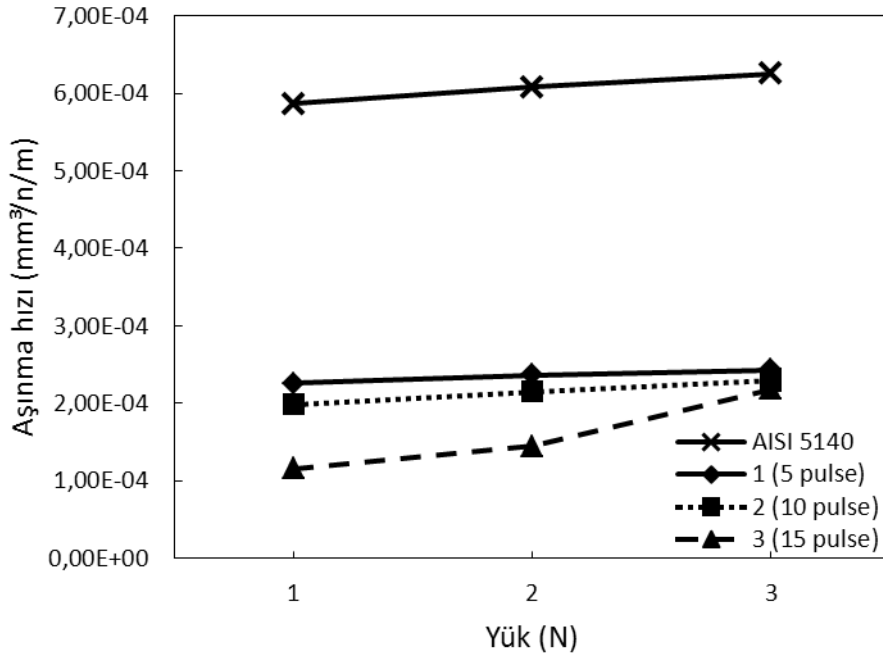
6.4.1. Aşınma hız değerleri

Aşınma deneyleri sonrası elde edilmiş aşınma hız değerleri (wear rate) tablo 6.2'de verilmektedir.

Tablo 6.2. Numune gruplarının aşınma hız değerleri

Numune No	Hız (m/sn)	Yol (m)	Yük (N)	Aşınma Miktarı (mm ³ /n/m)
• 5140	0,15	500	1 N	5,868E-4
	0,15	500	2 N	6,080E-4
	0,15	500	3 N	6,250E-4
• 1	0,15	500	1 N	2,258E-4
	0,15	500	2 N	2,366E-4
	0,15	500	3 N	2,429E-4
• 2	0,15	500	1 N	1,985E-4
	0,15	500	2 N	2,152E-4
	0,15	500	3 N	2,289E-4
• 3	0,15	500	1 N	1,154E-4
	0,15	500	2 N	1,449E-4
	0,15	500	3 N	2,185E-4
• 4	0,15	500	1 N	3,734E-4
	0,15	500	2 N	3,954E-4
	0,15	500	3 N	4,662E-4
• 5	0,15	500	1 N	2,747E-4
	0,15	500	2 N	3,650E-4
	0,15	500	3 N	3,994E-4
• 6	0,15	500	1 N	2,366E-4
	0,15	500	2 N	2,566E-4
	0,15	500	3 N	3,848E-4
• 7	0,15	500	1 N	3,908E-4
	0,15	500	2 N	4,392E-4
	0,15	500	3 N	4,932E-4
• 8	0,15	500	1 N	2,762E-4
	0,15	500	2 N	3,917E-4
	0,15	500	3 N	4,706E-4
• 9	0,15	500	1 N	2,412E-4
	0,15	500	2 N	3,842E-4
	0,15	500	3 N	4,383E-4

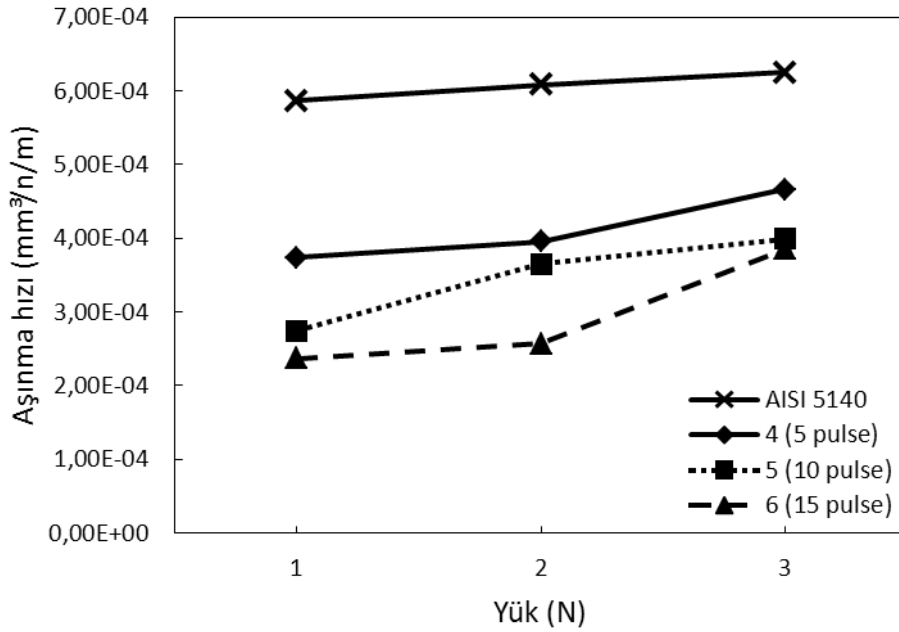
Şekil 6.15’de AISI 5140 çeliği ile 1 (60mm, 5 pulse, 800µF), 2 (60mm, 10 pulse, 800µF), 3 (60mm, 15 pulse, 800µF) no’lu numunelerin yüke bağlı olarak aşınma hız miktarı grafikleri verilmektedir. Bu grafiğe göre; en fazla aşınma değerinin işlem görmemiş AISI 5140 çeliğinde olması beklenen bir sonuç olup, 1-3 no’lu numuneler arasında yüksek aşınma hız miktarı 1 no’lu numunede, düşük aşınma hız miktarı değeri ise 3 no’lu numunede görülmektedir. Buradan anlaşılacağı üzere üç numune grubu arasındaki fark olan pulse sayısı aşınma miktarlarını da etkilemiştir. Pulse sayısının artmasıyla modifikasyon tabaka kalınlıkları artmış, buna paralel sertlik miktarları da artmış olup aşınma hızı miktarlarında azalmalar olmaktadır. Aynı zamanda yükün artmasıyla aşınma hızı miktarlarında artış görülmüştür.



Şekil 6.15. AISI 5140, 1, 2 ve 3 no’lu numunelerin yük-aşınma hız miktarı ilişkisi

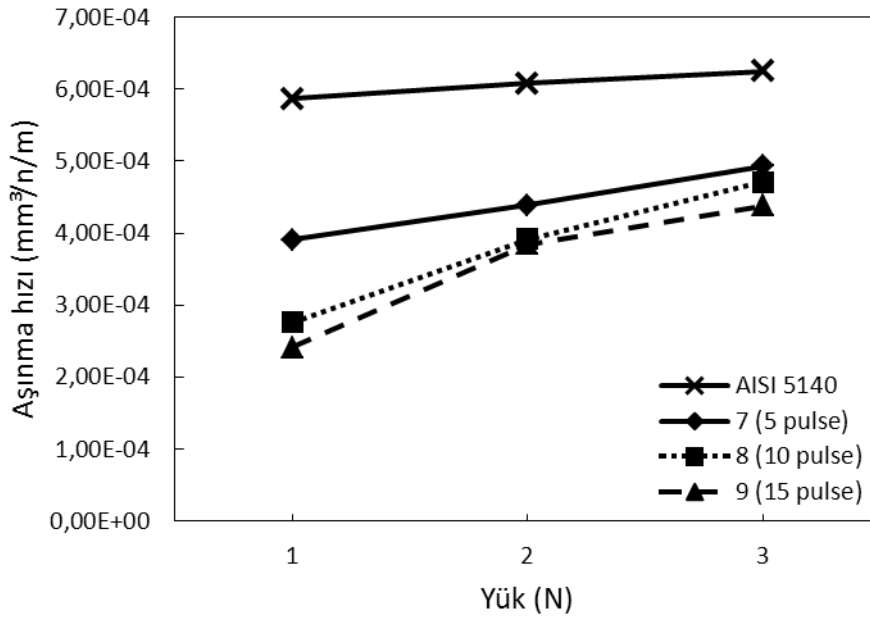
Şekil 6.16’da verilmekte olan AISI 5140 çeliği ile 4 (70mm, 5 pulse, 800µF), 5 (70mm, 10 pulse, 800µF) ve 6 (70mm, 15 pulse, 800µF) no’lu numunelerin yüke bağlı olarak aşınma hız miktarları yine uygulanan pulse sayısına bağlı olarak paralel bir eğilim göstermiştir. Pulse sayısı arttıkça aşınma hız miktarları azalmış, yükün artmasıyla da aşınma hız miktarları artmıştır. Buna göre bu grafikte en düşük aşınma hız miktarı 1N yük altında 6 no’lu numunede görülmüştür. Ancak aşınma hız miktarlarını bir önceki numune grubunda olan 1, 2, 3 no’lu numunelere göre

kıyasladığımızda daha yüksek aşınma hız miktarı değerlerinin elde edildiği görülmektedir. Çünkü numune-nozul mesafesinin artmasıyla hem modifikasyon tabaka kalınlığı hem de sertlik bakımından daha düşük değerlere sahip olmaları sebebiyle bu grup numunelerin aşınma hızları daha yüksektir.



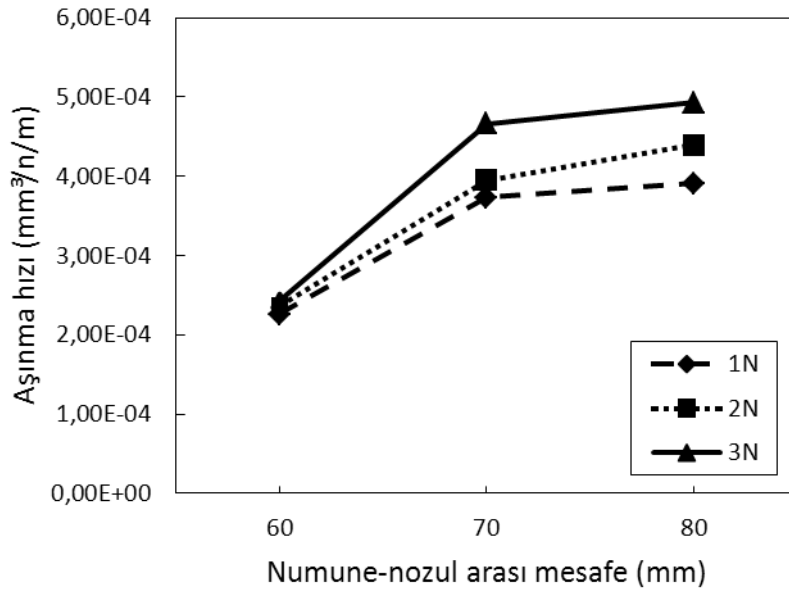
Şekil 6.16. AISI 5140, 4, 5 ve 6 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktarı ilişkisi

Şekil 6.17'de AISI 5140 çeliği, 7 (80mm, 5 pulse, 800µF), 8 (80mm, 10 pulse, 800µF) ve 9 (80mm, 15 pulse, 800µF) no'lu numunelerin yüke bağlı olarak aşınma hızları grafikleri verilmektedir. Bu grafiğe göre en fazla aşınma hız değeri 3N yük altında 7 no'lu numunede, en az aşınma hız değeri ise 1N yük altında 9 no'lu numunede görülmektedir. Grafikten de görüleceği üzere bu grup numunelerinin aşınma hız miktarları, işlem görmemiş AISI 5140 çeliğinin aşınma hız miktarlarına diğer numune gruplarına göre daha çok yaklaşmış olup, numune-nozul mesafesi arttıkça aşınma hız miktarlarının artması sonucunu doğrulamaktadır.

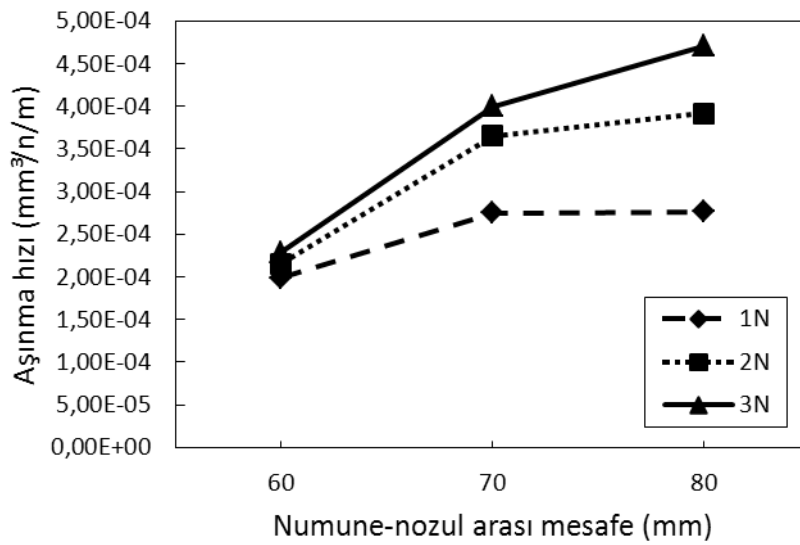


Şekil 6.17. AISI 5140, 7, 8 ve 9 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktarı ilişkisi

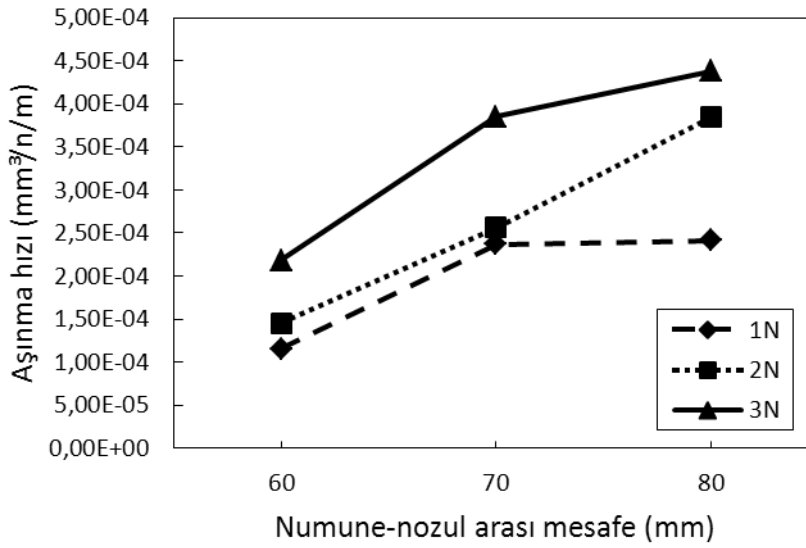
Şekil 6.18, şekil 6.19 ve şekil 6.20'de ise numune-nozul arası mesafeye bağlı olarak sırasıyla 5 pulse (1, 4 ve 7 no'lu numuneler), 10 pulse (2, 5 ve 8 no'lu numuneler), 15 pulse (3, 6 ve 9 no'lu numuneler) uygulanmış numunelerde aşınma hız değişimleri verilmektedir. Her üç grafikde de numune-nozul arası mesafe arttıkça aşınma hızları da artmaktadır. Genel olarak elde edilen verilere dayanarak numune-nozul arası mesafenin artmasıyla modifikasyon tabaka kalınlıkları azalmış, buna paralel sertlik miktarları da azalmış olup aşınma hızı değerleride artış olmaktadır. Ayrıca yapılan bu çalışmalardaki uygulanan en yüksek yük miktarı olan 3N yüke maruz kalan numunelerde aşınma hızları daha yüksektir. Bu da yük arttıkça aşınma hızı değerlerinin de arttığını doğrulamaktadır.



Şekil 6.18. 60mm, 70mm ve 80mm numune-nozul arası mesafelerinde 5 pulse uygulanmış numunelerin (1, 4 ve 7 no'lu numuneler) yüke bağlı olarak aşınma hızları değişimleri



Şekil 6.19. 60mm, 70mm ve 80mm numune-nozul arası mesafelerinde 10 pulse uygulanmış numunelerin (2, 5 ve 8 no'lu numuneler) yüke bağlı olarak aşınma hızları değişimleri



Şekil 6.20. 60mm, 70mm ve 80mm numune-nozul arası mesafelerinde 15 pulse uygulanmış numunelerin (3, 6 ve 9 no'lu numuneler) yüke bağlı olarak aşınma hızları değişimleri

Yük-aşınma hızı, numune nozul arası mesafe-aşınma hızı grafiklerinden ve tablodan da (Bkz. Tablo 6.2) görüleceği üzere en düşük aşınma hızı; numune-nozul mesafesinin en az olduğu 60mm'de, pulse sayısının en çok olduğu 15 pulse işleminde ve uygulanan en düşük yük olan 1N yük altında 3 no'lu numunede, en yüksek aşınma hızı ise; numune-nozul mesafesinin en çok olduğu 80mm'de, pulse sayısının en düşük olduğu 5 pulse işleminde ve uygulanan en yüksek yük olan 3N yük altında 7 no'lu numunede olduğu görülmektedir. Genel olarak; aşınma miktarlarının artış ve azalışlarında pulse sayısı ve numune-nozul arası mesafesinin önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir.

Pulse plazma uygulanma şartlarının değişmesiyle numune yapılarında meydana gelen değişimler aşınma miktarlarını da etkilemiş olduğu düşünülmektedir. Molibden fazlarının varlığı aşınma dayanımını artırır [14]. Modifiye olmuş numune yüzeyinde oluşmuş MoC, Fe₇C₃ içeren tabakalar oldukça yüksek sertliğe ve oldukça iyi tribolojik özelliklere sahiptir [63].

Pulse plazma parametrelerine bağlı olarak AISI 5140 çeliğinin aşınma dayanımında önemli artışlar elde edilmiştir. En yüksek aşınma direnci, yüzey sertliği en yüksek olan numunelerde görülmüştür.

Numune gruplarının aşınma sonrası ağırlık kayıpları tablo 6.3’de gösterilmektedir. İşlem görmüş numunelerde ağırlık kaybının daha az olduğu, en fazla ağırlık kaybının işlem görmemiş numunelerde olduğu görülmektedir. Her numunenin kendi içinde yük miktarı arttıkça numunelerdeki ağırlık kayıpları da artmaktadır.

Tablo 6.3. Numune gruplarının aşınma sonrası ağırlık kayıpları

Numune No	Hız (m/sn)	Yol (m)	Yük (N)	Ağırlık Kaybı (gr)
• 5140	0,15	500	1 N	0,0104
	0,15	500	2 N	0,0294
	0,15	500	3 N	0,0305
• 1	0,15	500	1 N	0,0003
	0,15	500	2 N	0,0005
	0,15	500	3 N	0,0005
• 2	0,15	500	1 N	0,0002
	0,15	500	2 N	0,0002
	0,15	500	3 N	0,0003
• 3	0,15	500	1 N	0,0001
	0,15	500	2 N	0,0002
	0,15	500	3 N	0,0003
• 4	0,15	500	1 N	0,0010
	0,15	500	2 N	0,0014
	0,15	500	3 N	0,0018
• 5	0,15	500	1 N	0,0007
	0,15	500	2 N	0,0008
	0,15	500	3 N	0,0009
• 6	0,15	500	1 N	0,0005
	0,15	500	2 N	0,0006
	0,15	500	3 N	0,0007
• 7	0,15	500	1 N	0,0038
	0,15	500	2 N	0,0043
	0,15	500	3 N	0,0096
• 8	0,15	500	1 N	0,0029
	0,15	500	2 N	0,0033
	0,15	500	3 N	0,0035
• 9	0,15	500	1 N	0,0018
	0,15	500	2 N	0,0023
	0,15	500	3 N	0,0027

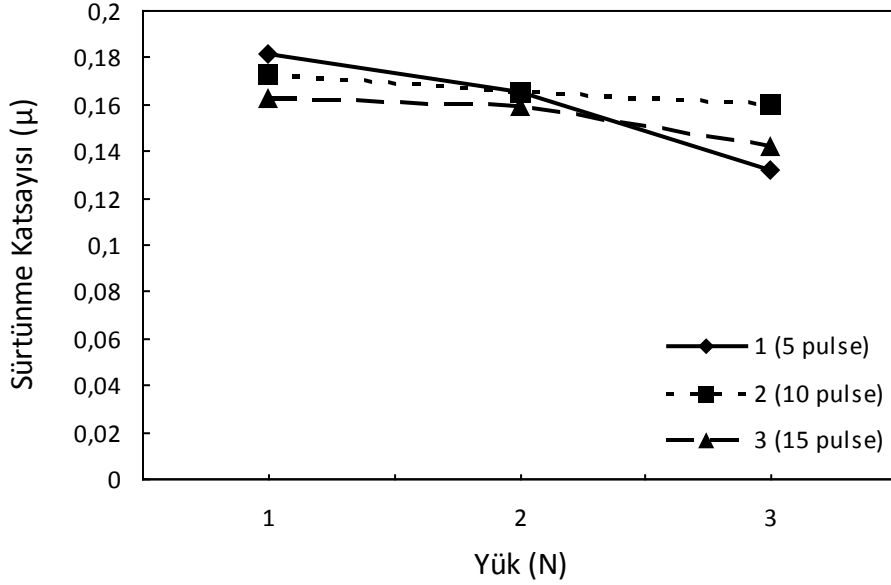
6.4.2. Sürtünme katsayıları

Aşınma deneyleri sırasında CSM aşınma cihazındaki veriler neticesinde ortalama sürtünme katsayı değerleri elde edilmiştir. Tablo 6.4’de tüm sürtünme katsayı değerleri görülmektedir.

Tablo 6.4. Numune gruplarına ait sürtünme katsayı değerleri

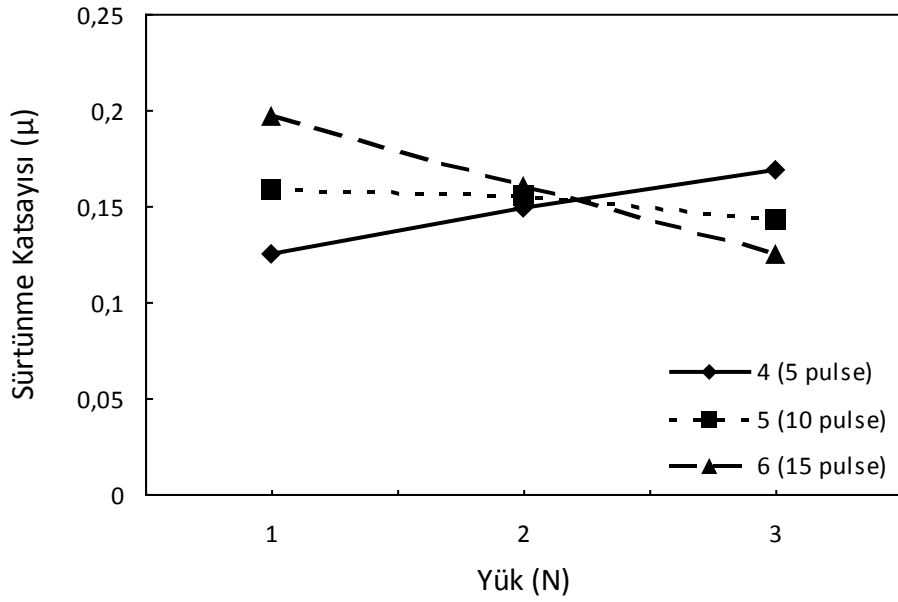
Numune No	Hız (m/sn)	Yol (m)	Yük (N)	Sürtünme Katsayıları (μ)
• 5140	0,15	500	1 N	0,546
	0,15	500	2 N	0,516
	0,15	500	3 N	0,452
• 1	0,15	500	1 N	0,181
	0,15	500	2 N	0,165
	0,15	500	3 N	0,132
• 2	0,15	500	1 N	0,173
	0,15	500	2 N	0,165
	0,15	500	3 N	0,160
• 3	0,15	500	1 N	0,162
	0,15	500	2 N	0,159
	0,15	500	3 N	0,142
• 4	0,15	500	1 N	0,125
	0,15	500	2 N	0,149
	0,15	500	3 N	0,165
• 5	0,15	500	1 N	0,158
	0,15	500	2 N	0,155
	0,15	500	3 N	0,143
• 6	0,15	500	1 N	0,197
	0,15	500	2 N	0,160
	0,15	500	3 N	0,125
• 7	0,15	500	1 N	0,154
	0,15	500	2 N	0,168
	0,15	500	3 N	0,171
• 8	0,15	500	1 N	0,170
	0,15	500	2 N	0,166
	0,15	500	3 N	0,156
• 9	0,15	500	1 N	0,163
	0,15	500	2 N	0,159
	0,15	500	3 N	0,153

1, 2 ve 3 no'lu numunelerin sürtünme katsayı değerleri yüke bağlı olarak sürekli azalma eğilimi göstermiştir (Şekil 6.21).



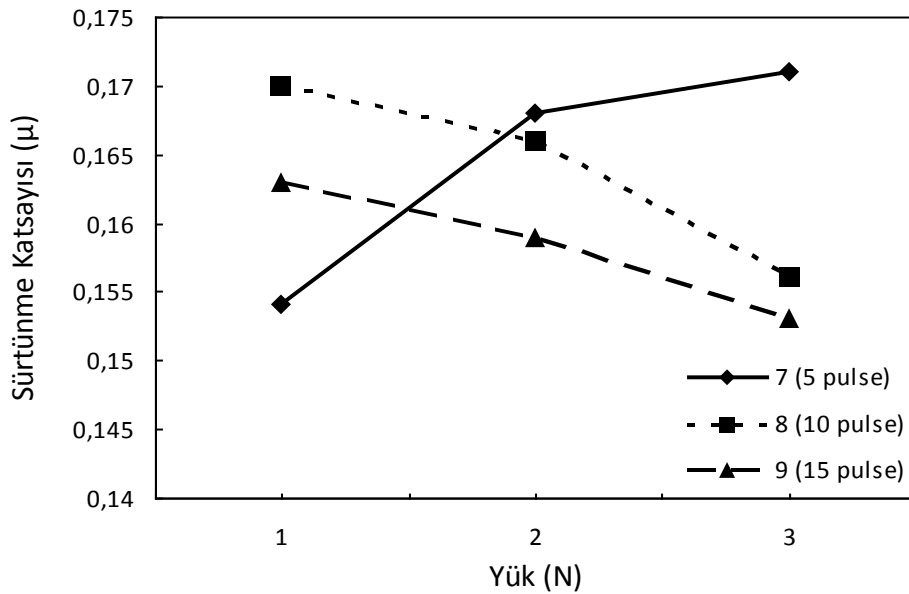
Şekil 6.21. 800 μ F pil kapasitesinde 1 (60mm, 5 pulse), 2 (60mm, 10 pulse) ve 3 (60mm, 15 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi

4, 5 ve 6 no'lu numunelerin yüke bağlı olarak elde edilmiş sürtünme katsayı değerleri şekil 8.22'de verilmektedir. 5 ve 6 no'lu numunelerin sürtünme katsayı değerleri yüke bağlı olarak azalma eğilimi gösterirken 4 no'lu numunenin değerleri yük arttıkça artma eğilimi göstermiştir. 5 ve 6 no'lu numunelerde yük arttıkça yüzey üzerinde oluşmuş olabilecek oksit tabaka sürtünme katsayılarının düşüşüne sebebiyet vermiş olabilir. 4 no'lu numunede pulse sayısının az, modifikasyon tabakasının ince oluşu sürtünme katsayı değerlerinin artışına neden olmuş olabilir.



Şekil 6.22. 800µF pil kapasitesinde 4 (70mm, 5 pulse), 5 (70mm, 10 pulse) ve 6 (70mm, 15 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayısı ilişkisi

7, 8 ve 9 no'lu numunelerden 7 no'lu numunenin sürtünme katsayısı yüklerle artarken diğerlerinin katsayılarının azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür (Şekil 6.23). 7 no'lu numunedeki sürtünme katsayısındaki artışın sebebi azalan modifikasyon tabakası kalınlığı olabilir. Tabaka kalınlığının ince oluşu yüzeyin yüklerden daha fazla etkilenmesine neden olmuş olabilir.



Şekil 6.23. 800µF pil kapasitesinde 7 (70mm, 5 pulse), 8 (70mm, 10 pulse) ve 9 (70mm, 15 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayısı ilişkisi

6.5. Yüzey Pürüzlülük Ölçüm Sonuçları

Tablo 6.5’de yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları görülmektedir. Pulse plazma işlemi öncesi numune yüzeyinden alınan yüzey pürüzlük değeri 0.023 μm iken, 1 (60mm, 5 pulse, 800 μF) no’lu numunede alınan R_a değeri 0.541 μm , 3 (60mm, 15 pulse, 800 μF) no’lu numunede 0.788 μm , 6 (70mm, 15 pulse, 800 μF) no’lu numunede 3.837 μm , 9 (80mm, 15 pulse, 800 μF) no’lu numunede de 2.836 μm ’dir. Modifikasyon sonrası tüm numunelerde ortalama R_a değeri 0,550 ile 0,750 aralığında elde edilmiştir.

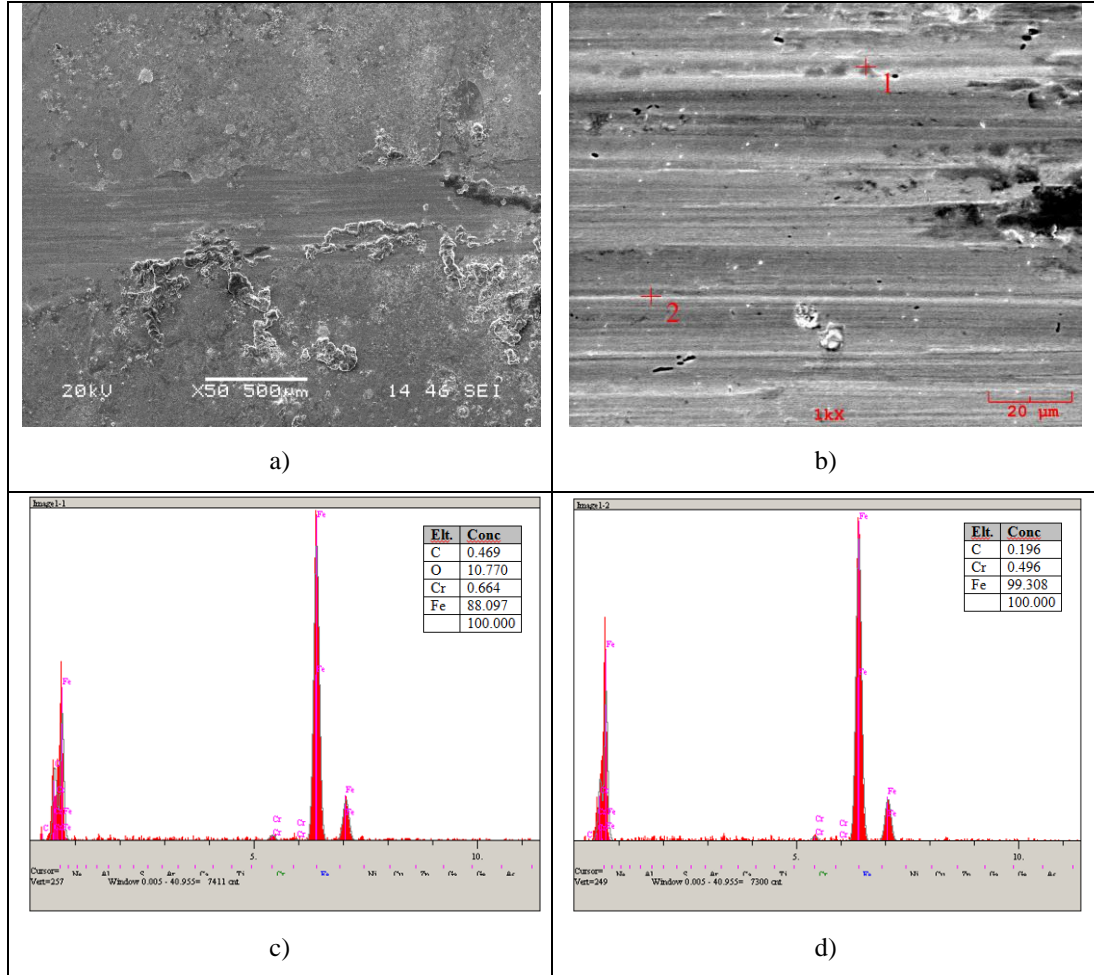
Tablo 6.5. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları

Numune No	R_a (μm)
5140	0,023
1	0,541
3	0,788
4	0,753
6	3,837
7	0,790
9	2,836

6.6. Aşınma Sonrası Aşınmış Yüzeylerin SEM ve EDS Analizleri

Aşınma deneyi sonrası tüm numune gruplarının aşınma yüzeylerinde SEM ve EDS çalışması yapılmıştır. Şekil 6.24’de 1 (60mm, 5 pulse, 800 μF) no’lu numunenin 0,15m/sn hızda 2N yük altında 500m’de elde edilmiş aşınma yüzeylerinin SEM ve EDS analizleri verilmektedir. Şekil 6.24.a’da verilmekte olan SEM görüntüsünde çok az miktarda plastik deformasyon ve abrazyon bir aşınma meydana geldiği görülmektedir. Abrazyon temas türüne kategorize ettiğimizde iki malzemenin birbiri üzerinde çalışması sonucu oluşan iki gövdeli aşınma da denilenebilir. Yani aşındırıcı bir yüzey boyunca kaymaktadır. Yine görüntüde aşınma izinin alt kısımlarında malzemenin kendisi plastik deformasyona uğrayarak malzeme yüzeyine yayıldığı

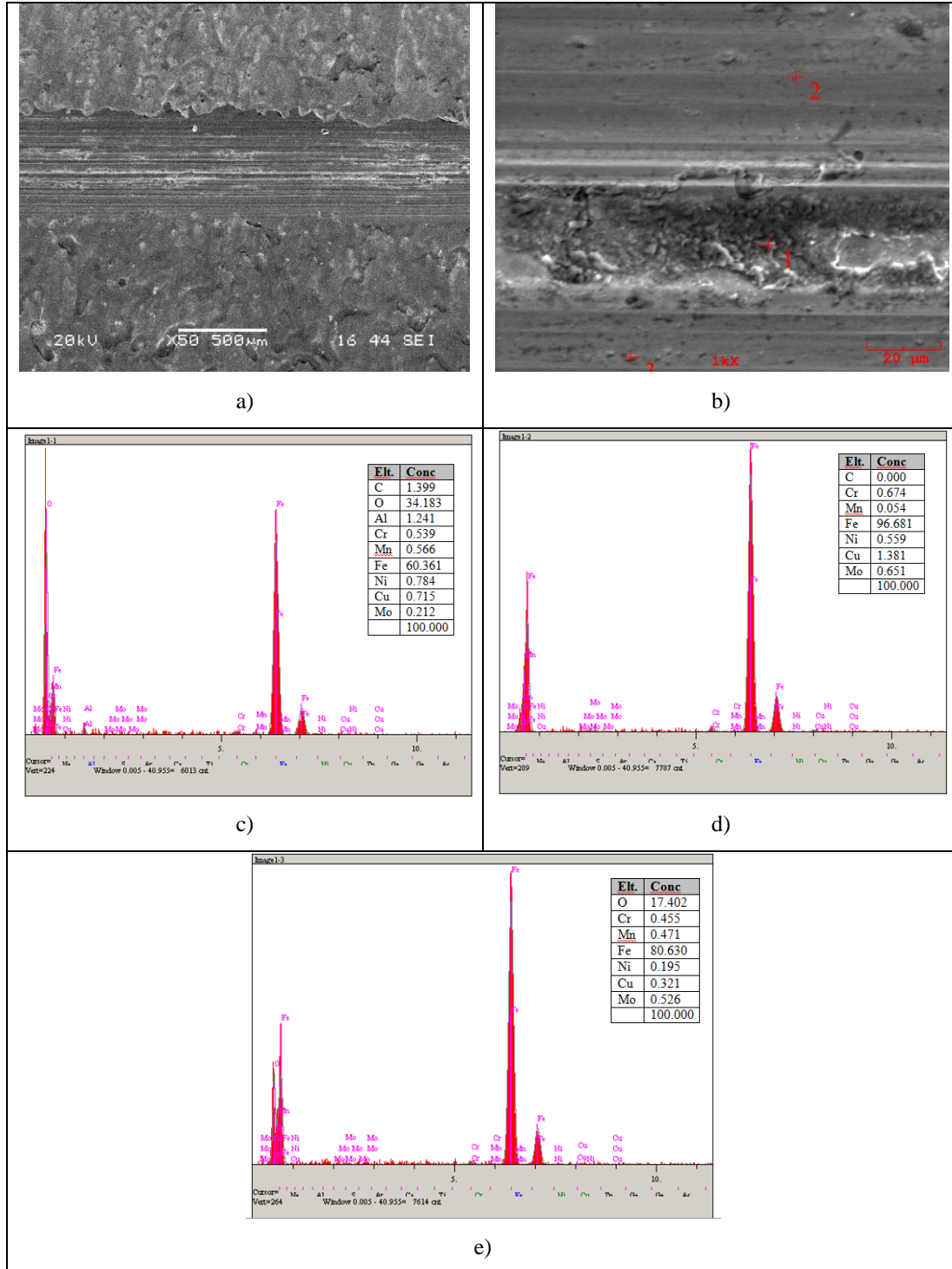
görülmektedir. Abrazif aşınma hakim ancak çok az miktarda adhezif aşınma mevcuttur diyebiliriz. Malzeme üzerinde ve aşınma izi üzerinde görülen diğer kısımlarında oksit tabakası oldukları gözlemlenmiştir. EDS analizlerine bakıldığında 1 no'lu bölgede oksijenin varlığı söz konusudur.



Şekil 6.24. a)1 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 2N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)1 no'lu numunenin 2N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2 no'lu noktaların EDS analizleri

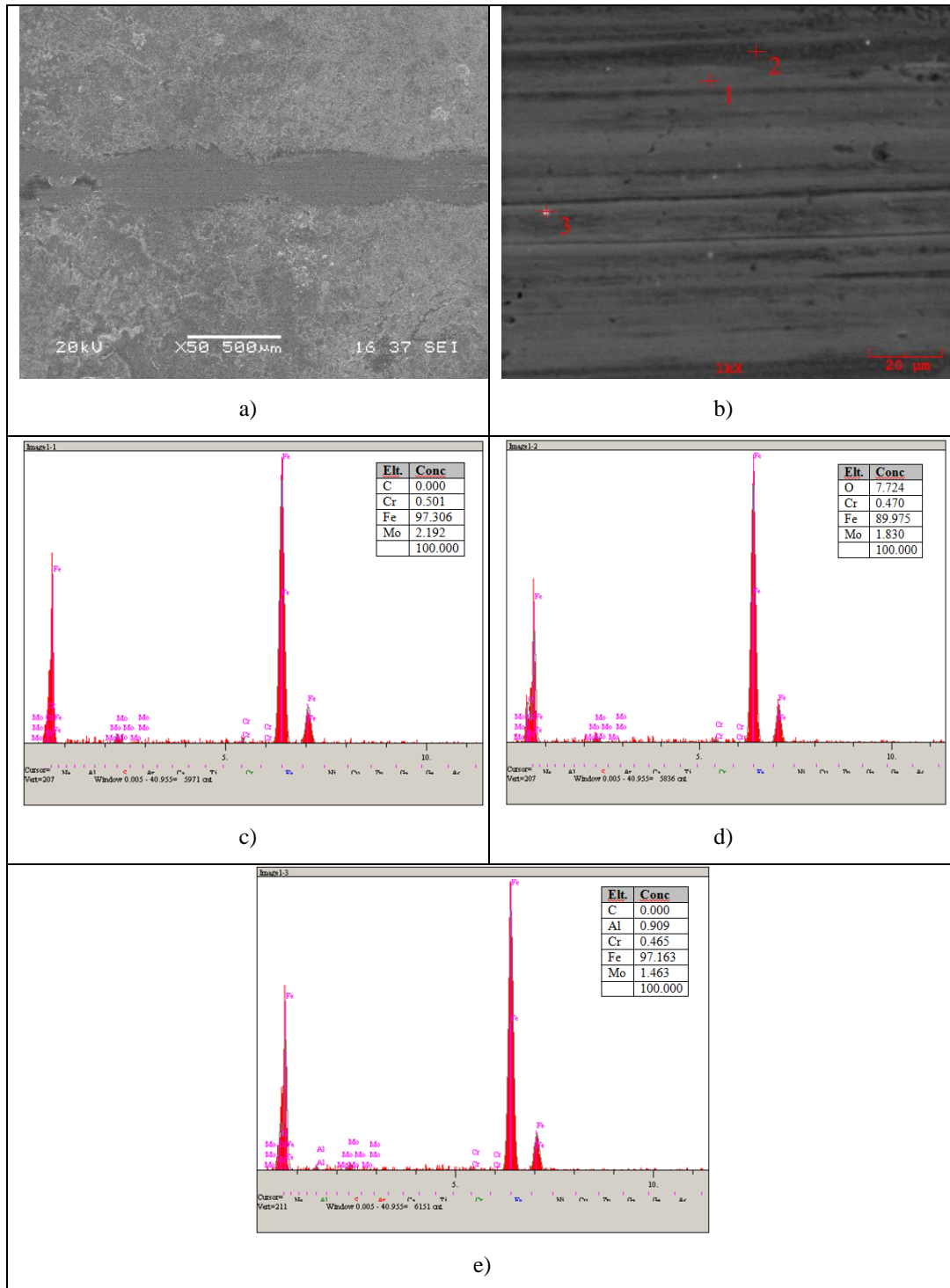
Şekil 6.25'de 1 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de elde edilmiş aşınma yüzeylerinin SEM ve EDS analizleri verilmektedir. 1 no'lu numunenin aynı şartlar altında fakat 3N yük altında yapılmış deneyler sonrası alınmış SEM görüntülerinde plastik deformasyon oluşumu ve bir abrazif aşınma mekanizması olan pulluklama aşınmanın meydana geldiği düşünülmektedir. İnce ve fazla derin olmayan yivler mevcuttur. EDS analiz çalışmasında da deneyde kullanılan alümina bilyanın aşınması sonucu meydana gelen aşınma ürünleri görülmüştür. SEM görüntülerinde beyaz renkte görülmekte olan parçaların alümina

bilyadan koptuğu düşünülmektedir. EDS analizinde de 1 no'lu bölgede ki EDS analiz sonucu bu fikri desteklemektedir.

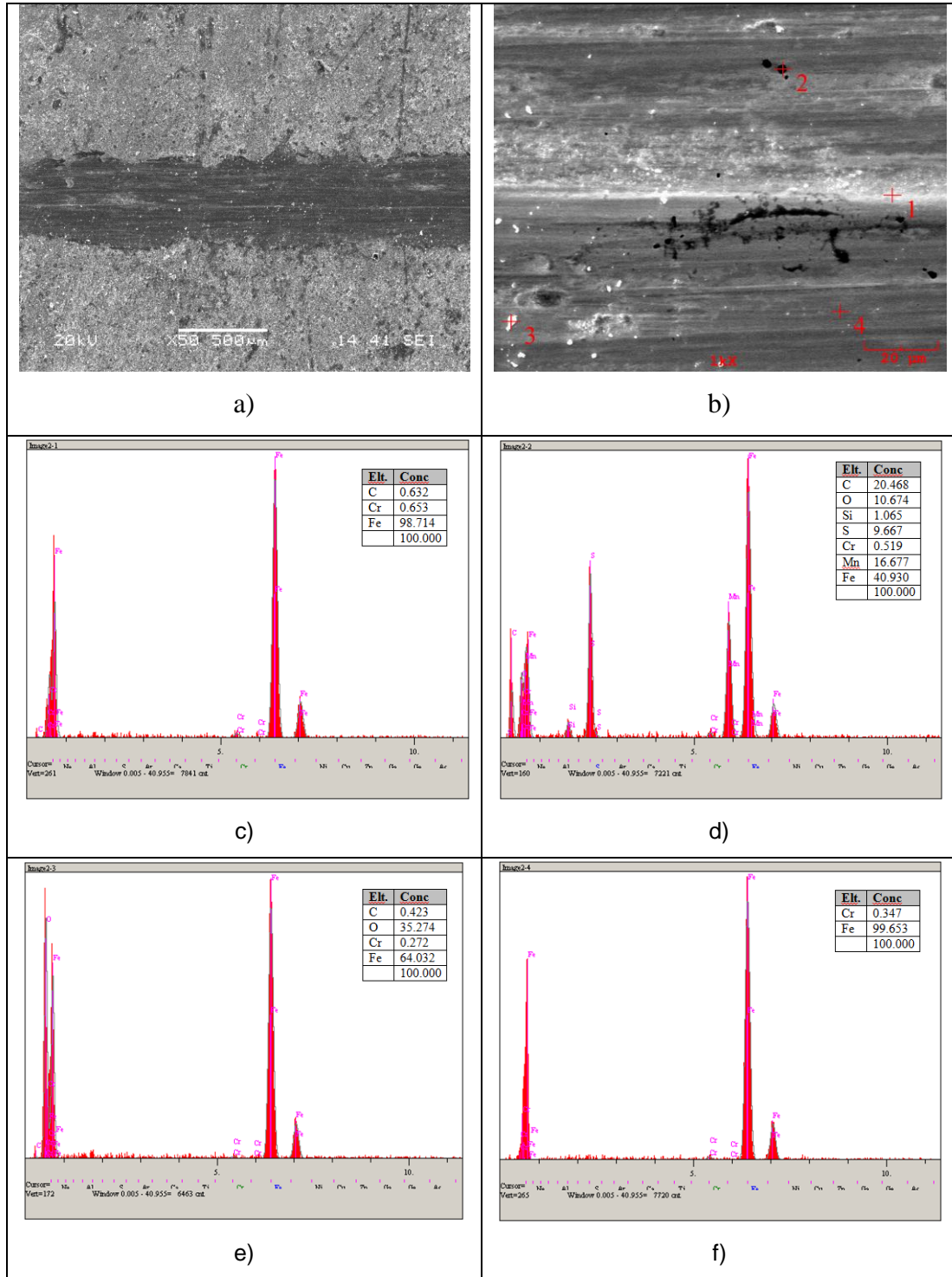


Şekil 6.25. a)1 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)1 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri

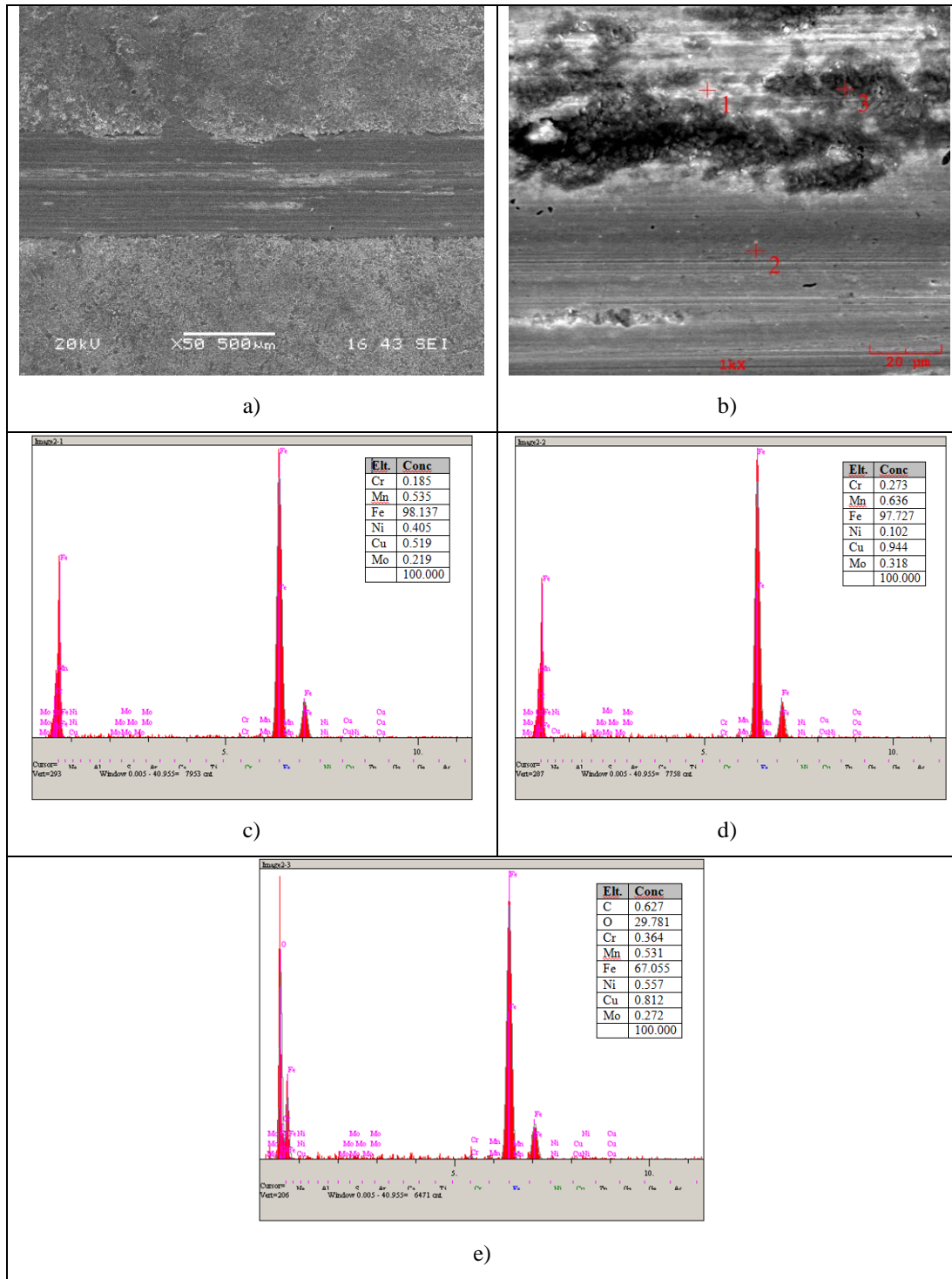
Şekil 6.26, şekil 6.27 ve şekil 6.28’de 2 (60mm, 10 pulse, 800µF) no’lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N, 2N ve 3N yük altında 500m’de elde edilmiş aşınma yüzeylerinin SEM ve EDS analizleri verilmektedir. Şekil 6.26’da 2 no’lu numunenin 1N gibi çok düşük bir yük altında meydana gelen aşınma yüzeyi dümdüz görünmektedir. Nedeni malzeme yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelmiş ve aslında yüzey altında da önemli miktarda derinliklere kadar bir plastik deformasyon meydana gelmiştir. Çok az saf abrazif aşınma hakimdir. Şekil 6.27’de 2N yük altında yapılmış aşınma deneyleri sonucunda yüzeyde derin olmayan yiv oluşumları ve kızaklama türü aşınma mekanizmaları görülmektedir. Şekil 6.28’de ise yük artmasıyla yivler genişlemiş ve derinleşmiştir. Yükün artmasıyla artan aşınma ürünleri hem adhezif hem abrazif aşınmaya neden olmuştur. Özellikle bu numunedeki aşınma yüzeyinden alınmış EDS resminde yüzeyde plastik deformasyon, aşınma ürünlerinin sıvanması ve malzeme kopmalarının olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.26. a)2 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)2 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri



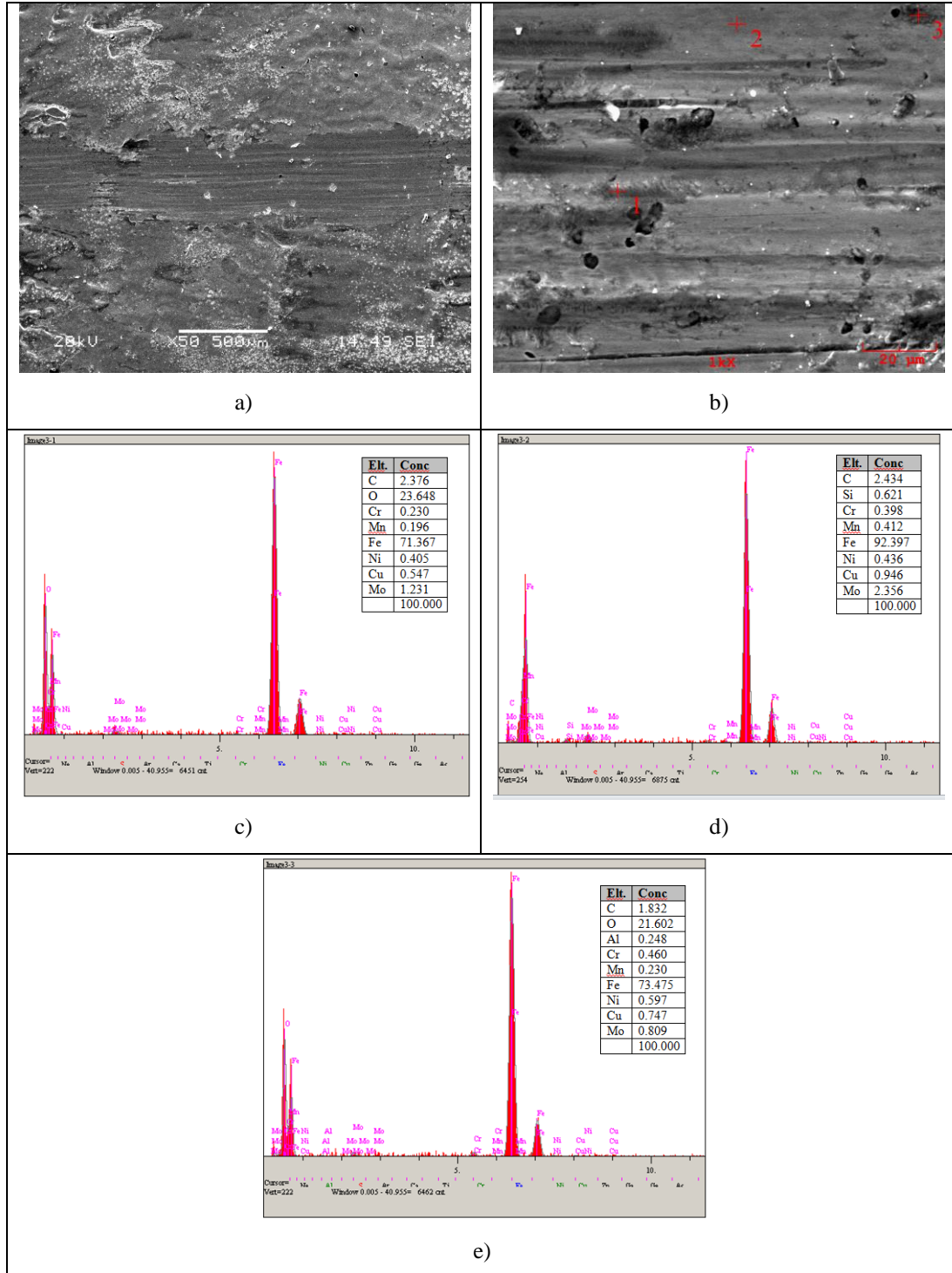
Şekil 6.27. a)2 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 2N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)2 no'lu numunenin 2N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri



Şekil 6.28. a)2 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)2 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri

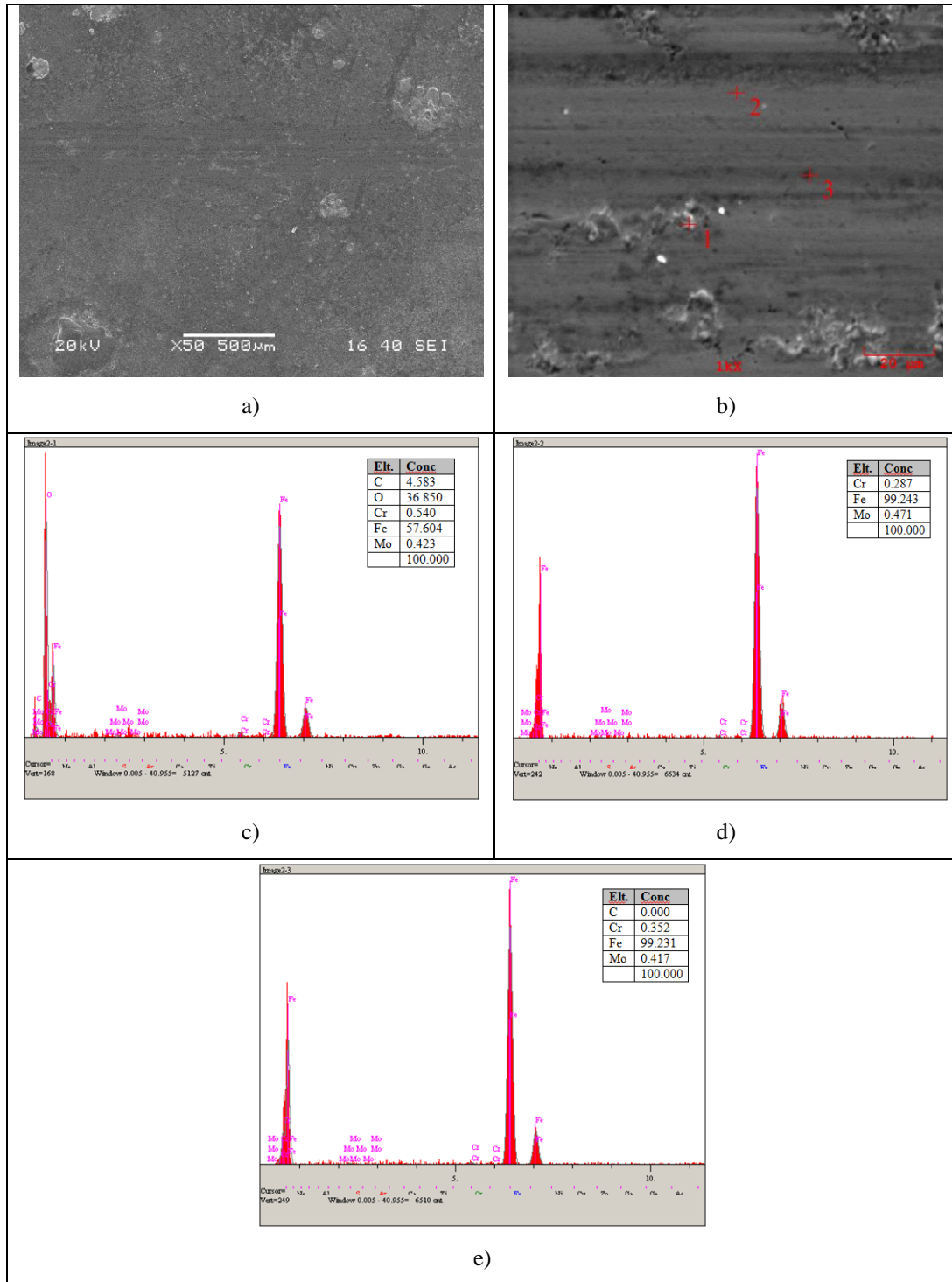
Şekil 6.29'da 3 (60mm, 15 pulse, 800 μF) no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de elde edilmiş aşınma yüzeylerinin SEM görüntülerinde pulluklama aşınmanın izleri görülmektedir. Aynı zamanda bu yük altında yüzeyde bozulmalar

artmış ve yüzeyde meydana gelmiş olduğu düşünülen abrazyif aşınma gereği az miktarda malzeme kopmaları meydana gelmiştir.



Şekil 6.29. a)3 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)3 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri

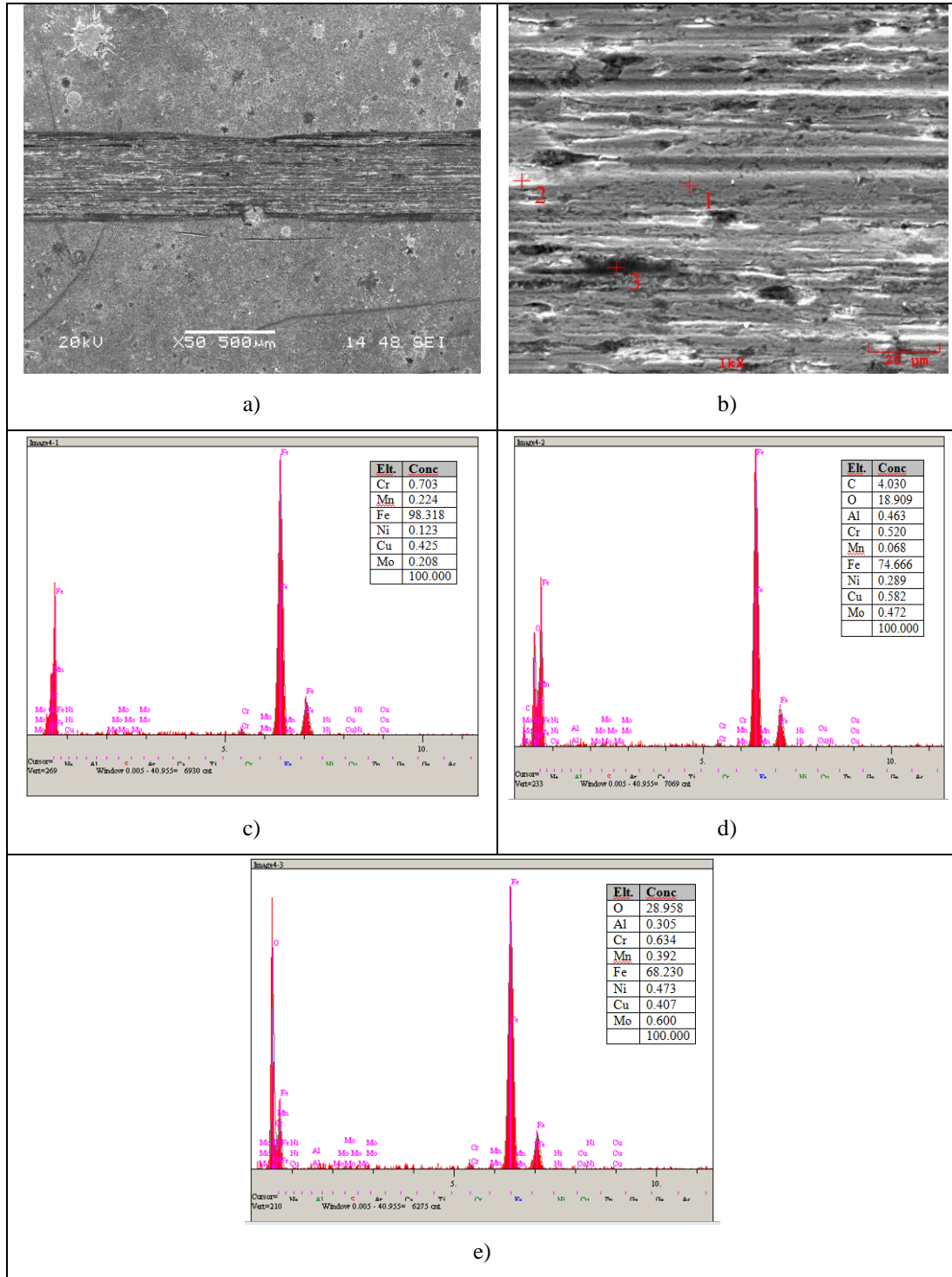
Şekil 6.30'da 4 (70mm, 5 pulse, 800µF) no'lu numunenin 1N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonrası yüzeyden elde edilmiş SEM görüntüleri ve EDS analizleri görülmektedir. SEM görüntülerine bakıldığında yüzeyde meydana gelmiş olduğu düşünülen abrazif aşınma gereği az miktarda malzeme kopmaları meydana gelmiştir. EDS görüntüsünde de ince kazımalı aşınma oluşumları ve yine az oranda plastik deformasyon izleri mevcuttur.



Şekil 6.30. a)4 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)4 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri

Şekil 6.31'de 4 (70mm, 5 pulse, 800µF) no'lu numunenin 3N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonrası yüzeyden elde edilmiş SEM görüntüleri ve EDS analizleri görülmektedir. SEM görüntülerinde beyaz renkte görülmekte olan parçaların alümina

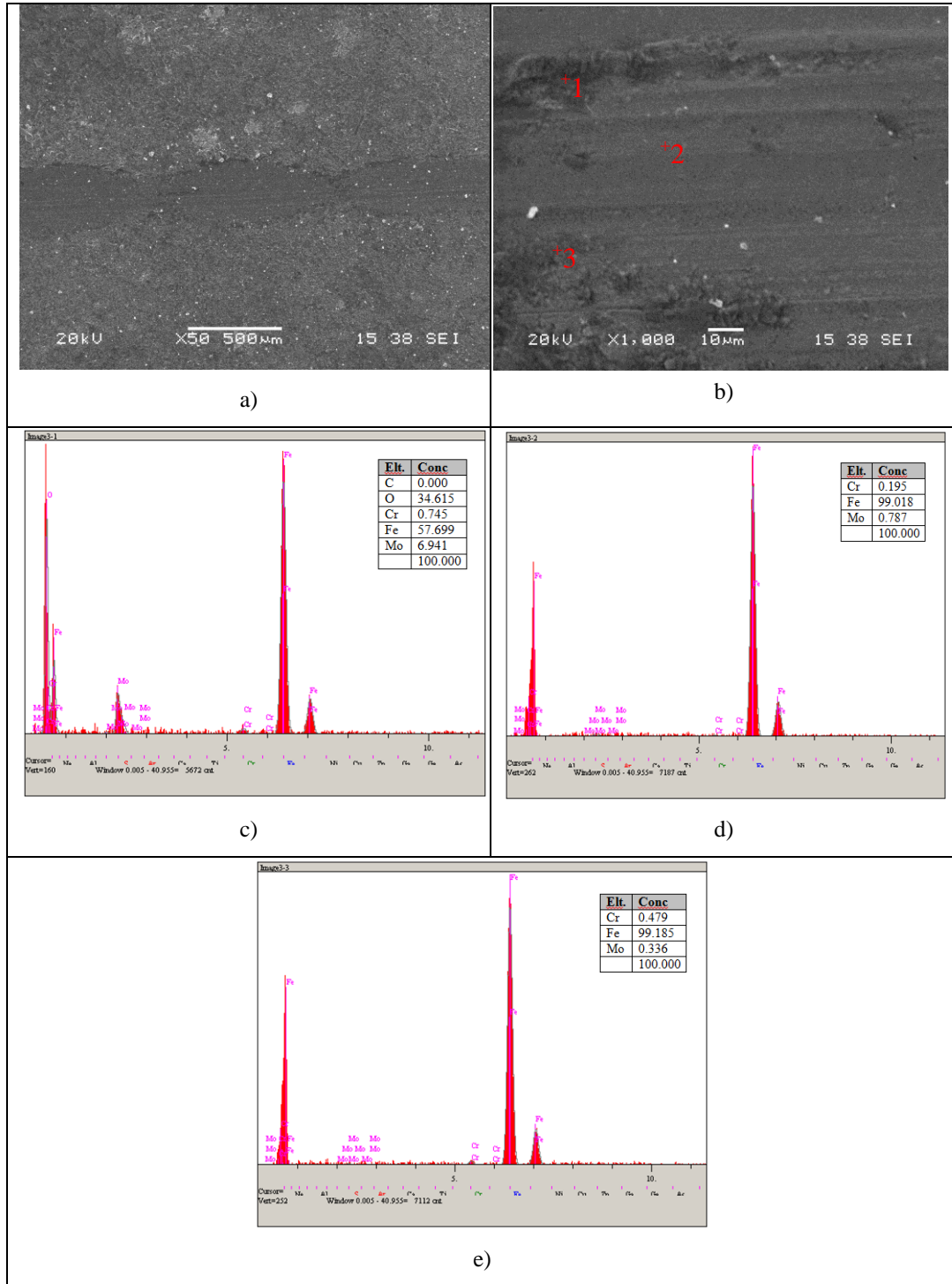
bilyadan koptuğu düşünölmektedir. EDS analizlerinde de beyaz olarak görölen tanelerdeki bu parçacıkların aşındırıcı bilya olarak kullanılan alüminaya ait olduğu görölmüştür. 2 ve 3 no'lu noktalardan alınan EDS analizlerinde bu kanıtlanmıştır. 3N yük altında yüzeyde plastik deformasyon ve kazımalı aşınma sonucu oluşın aşınma ürünleri görölmektedir. Yük arttıkça yüzeydeki deformasyon süreci artmıştır. Yivler derinleşmiştir. Bu numunedeki sertliğin az oluşu aşınma ürünlerinin artışına ve aşınmanın daha derin yivler oluşturmasına sebebiyet vermiştir. Yüzeyde bulunan küçük aşınma artıkları bile kızak etkisi yaratarak pulluklama tipi aşınma oluşturmuştur. Aşınma ürünleri yiv kenarlarında toplanmıştır.



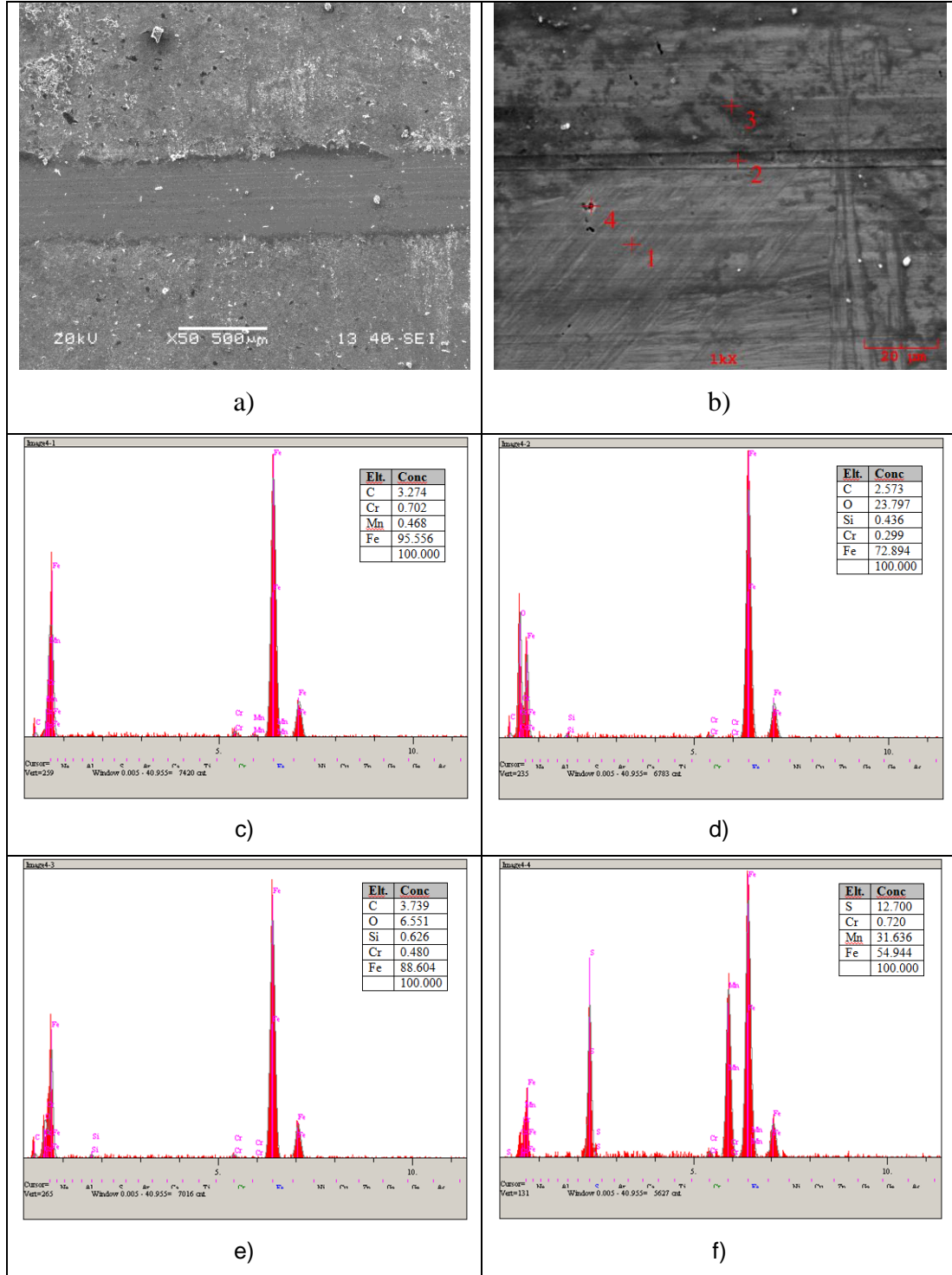
Şekil 6.31. a)4 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)4 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri

Şekil 6.32, şekil 6.33 ve şekil 6.34'de 5 (70mm, 10 pulse, 800µF) no'lu numunenin 1N, 2N ve 3N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonrası yüzeyden elde edilmiş SEM görüntüleri ve EDS analizleri görülmektedir. Şekil 6.32'de 1N yük altında

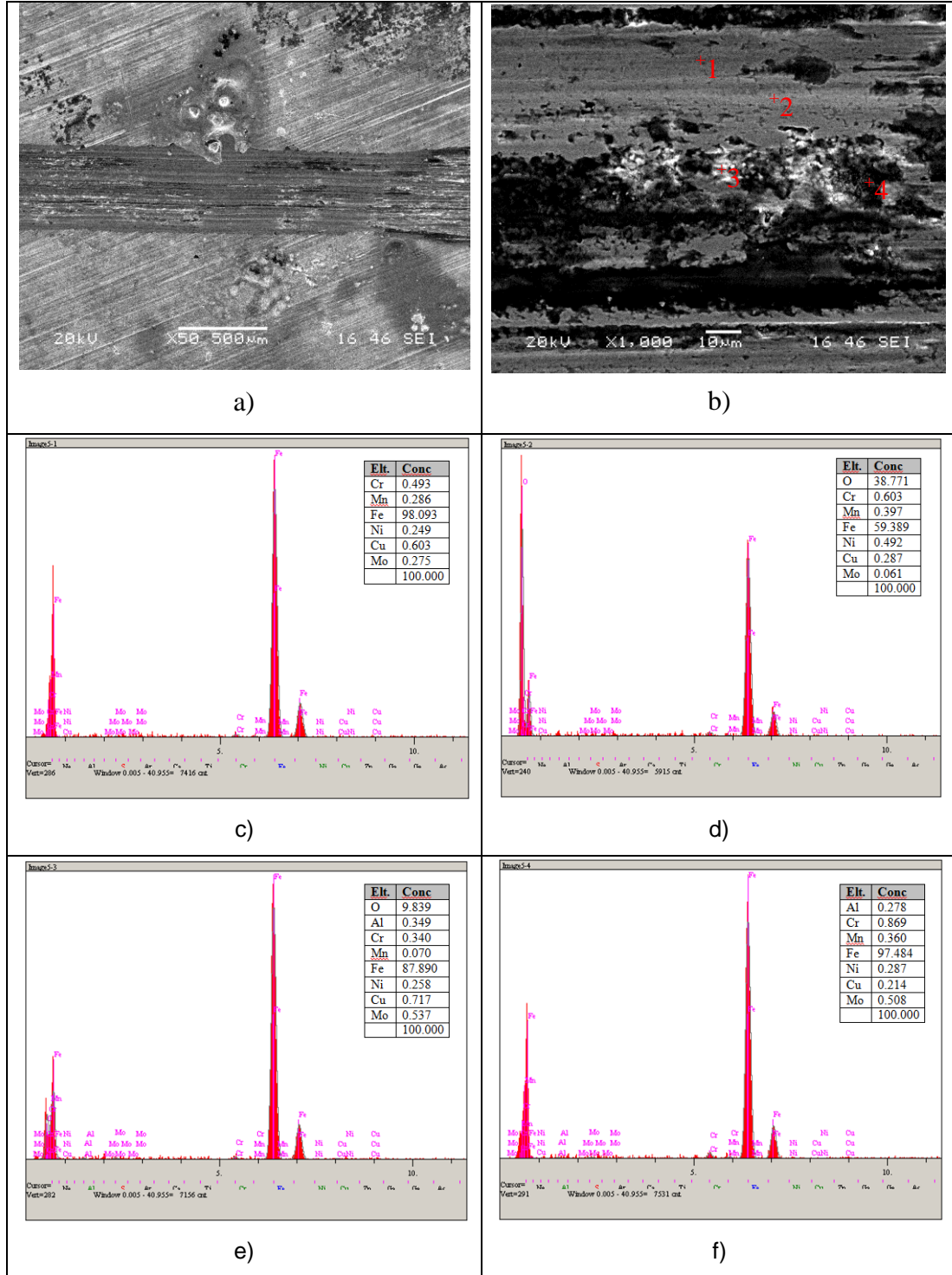
yüzeyde oluşan mekanizmalar çok ince yivlerdir. Şekil 6.33 ve şekil 6.34'de yükün artması ile yivler belirginleşmiş ve aşınma ürünleri yüzeyde oranını artırmıştır. 3N yük altında plastik deformasyon kuvvetli etkiler göstermiş, yüzeydeki yivler derinleşmiş, yüzeyde yer yer tane kopmaları ve çatlaklar görülmüştür. Şekil 6.34.b'de EDS analizinde beyaz olarak görülen tanelerden alınan EDS analizlerinde oksijen ile alüminyumun aşındırıcı bilya olarak kullanılan alüminaya ait olduğu görülmüştür.



Şekil 6.32. a)5 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)5 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri



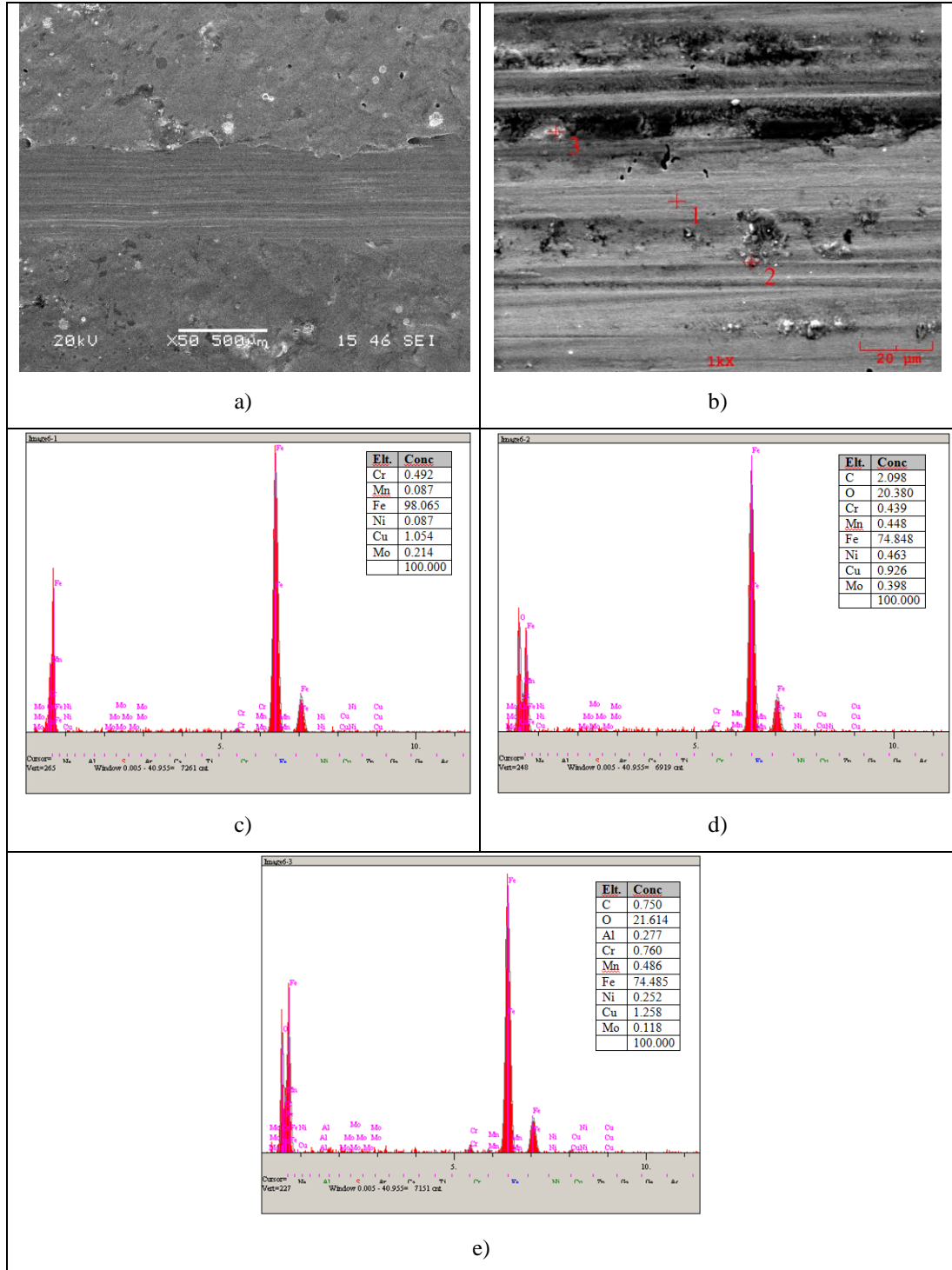
Şekil 6.33. a)5 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 2N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)5 no'lu numunenin 2N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri



Şekil 6.34. a)5 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)5 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri

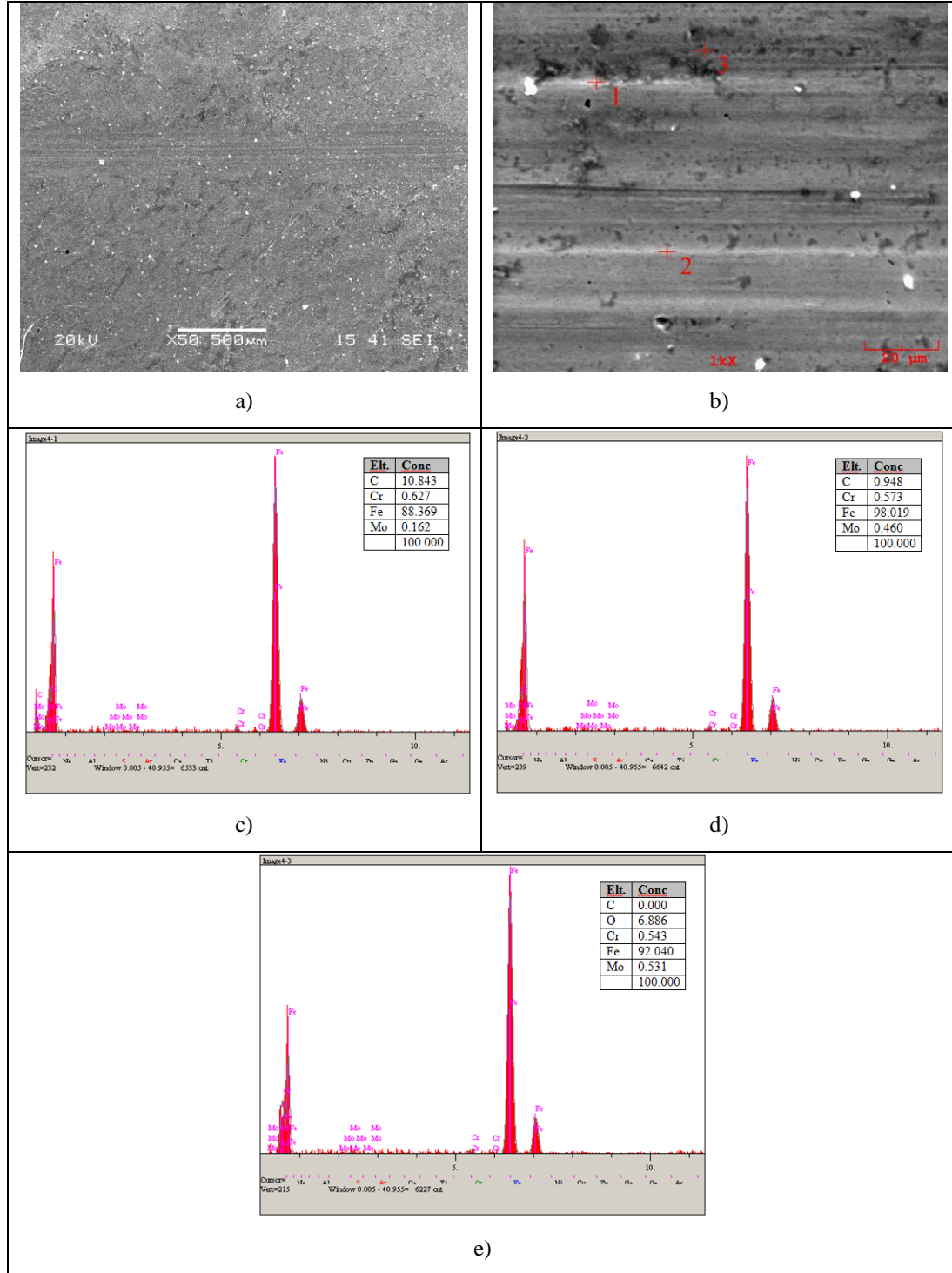
Şekil 6.35'de 6 (70mm, 15 pulse, 800µF) no'lu numunenin 3N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonrası yüzeyden elde edilmiş SEM görüntüleri ve EDS analizleri görülmektedir. Diğer numune gruplarında da olduğu gibi yükün artmasının

yüzeydeki kazımalı aşınma izlerinin artmasına, yüzey süreksizliklerine ve plastik deformasyona sebep olduğu düşünülmektedir.



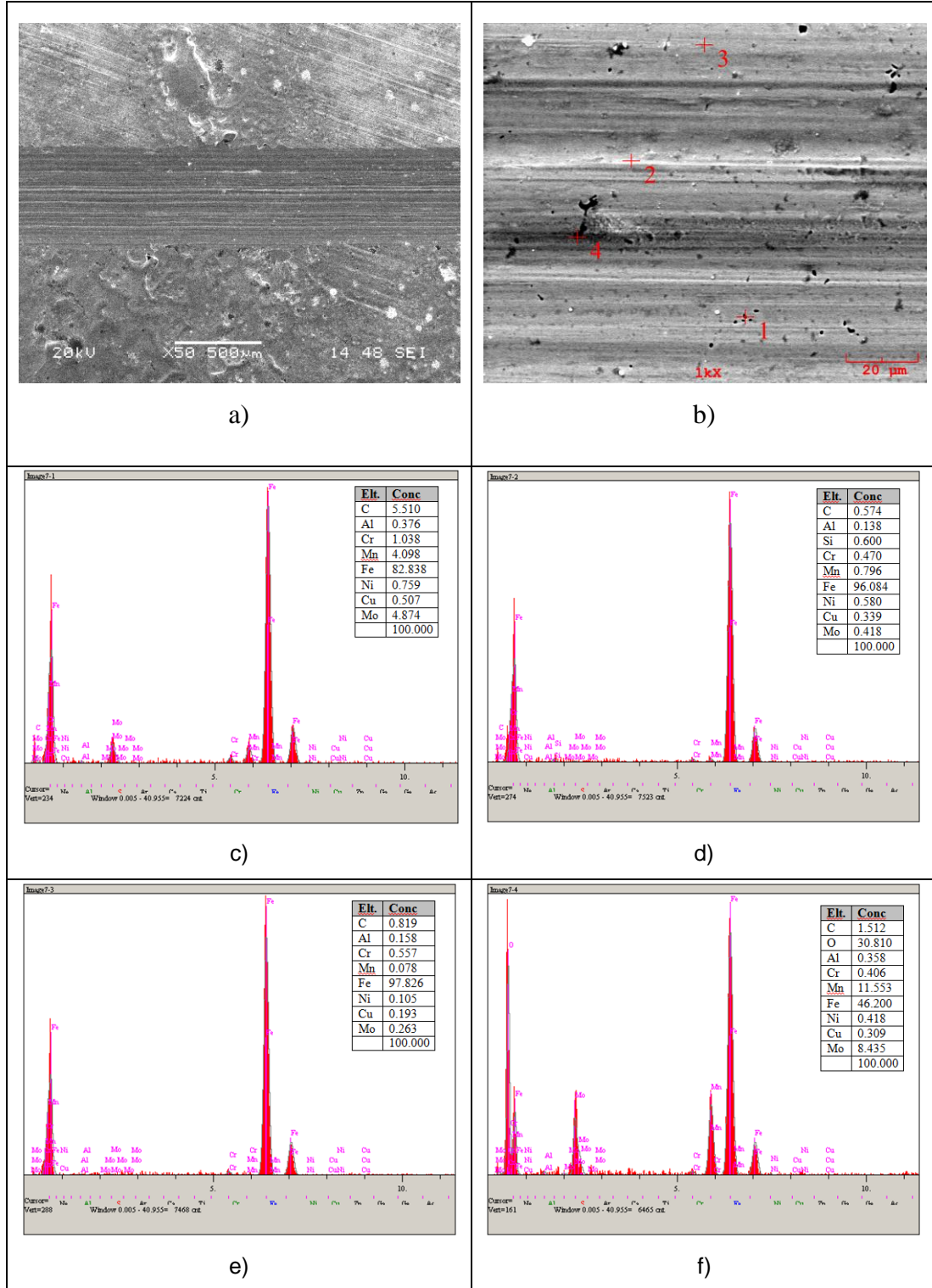
Şekil 6.35. a)6 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)6 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri

Şekil 6.36'de 7 (80mm, 5 pulse, 800 μ F) no'lu numunenin 1N yük altında yapılmış aşınma deneyi sonrası aşınma yüzey görüntülerinde yiv oluşumlarına, ince kazımalı aşınma izlerine ve yine az oranda plastik deformasyon izlerine rastlanmıştır.



Şekil 6.36. a)7 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)7 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri

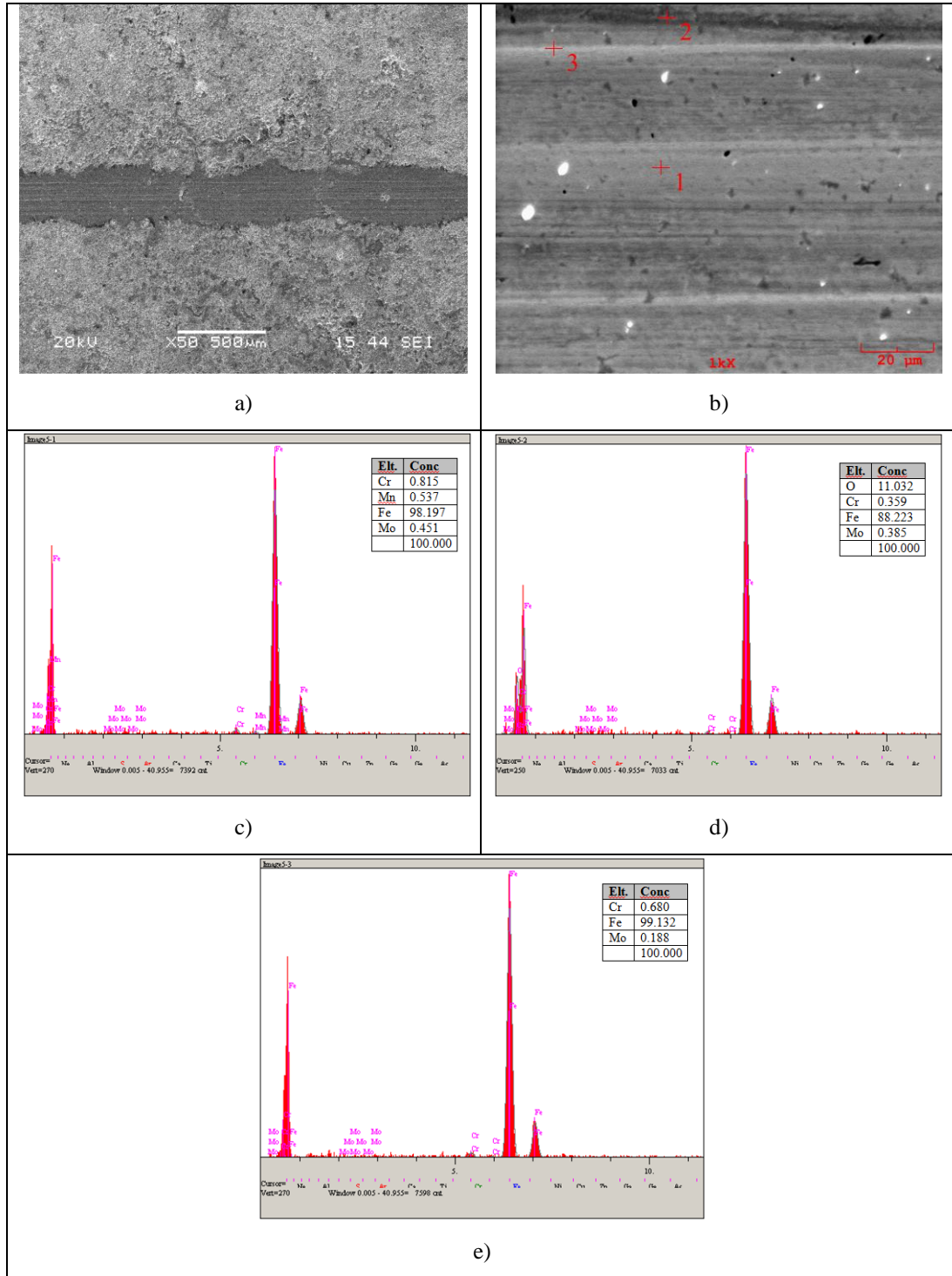
Şekil 6.37’de 7 (80mm, 5 pulse, 800µF) no’lu numunenin 3N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonrası yüzeyden elde edilmiş SEM görüntüleri ve EDS analizleri görülmektedir. Yüzeyde pulluklama aşınma meydana gelmiş olup abrazif aşınma izleri daha belirginleşmiştir. Bu numunedeki sertliğin az oluşu aşınma ürünlerinin artışına ve aşınmanın daha derin yivler oluşturmasına sebebiyet vermiştir. Yüzeyde bulunan küçük aşınma artıkları bile kızak etkisi yaratarak pulluklama tipi aşınma oluşturmuştur. Aşınma ürünleri yiv kenarlarında toplanmıştır.



Şekil 6.37. a)7 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)7 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri

Şekil 6.38'de 8 (80mm, 10 pulse, 800µF) no'lu numunenin 1N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonrası yüzeyden alınmış SEM görüntülerine göre aşınan

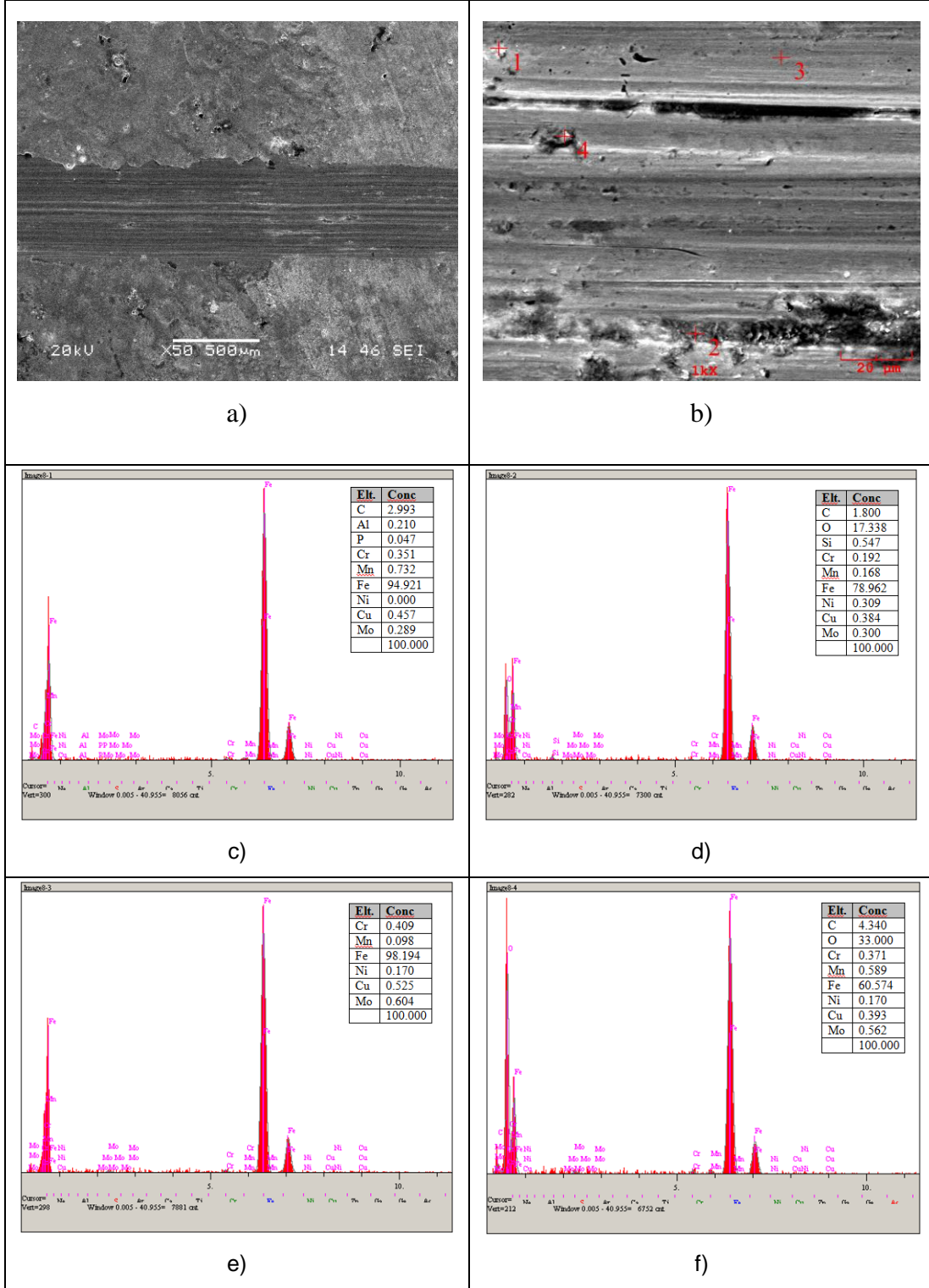
bölge net bir şekilde görülmekte olup az bir oranda yiv görülmektedir.



Şekil 6.38. a)8 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)8 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri

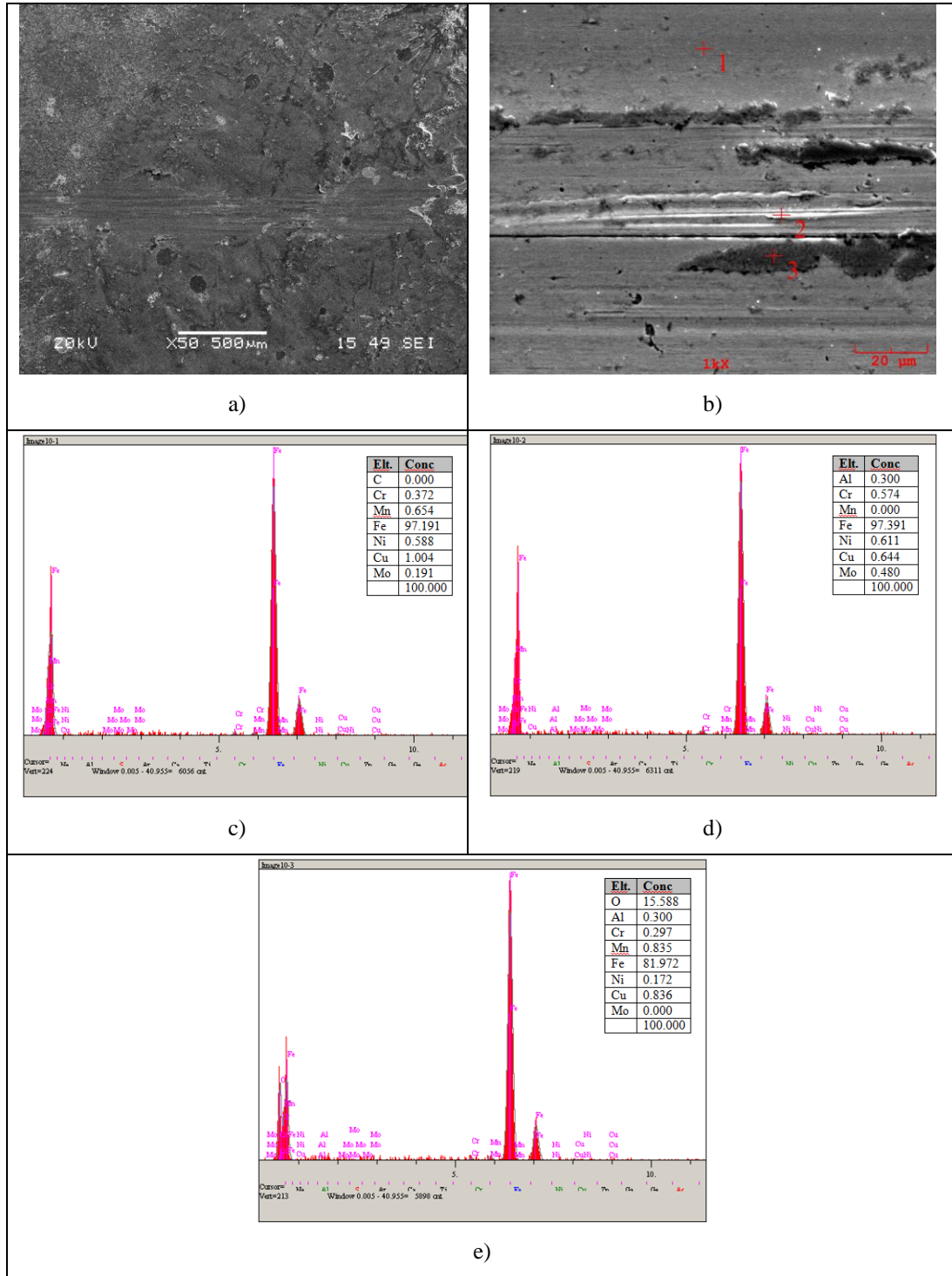
Şekil 6.39'da 8 (80mm, 10 pulse, 800μF) no'lu numunenin 3N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonrası yüzeyden elde edilmiş SEM görüntüleri ve EDS

analizlerine göre yüzeyde derin yarıklar oluşmuş, sert abrasif karakterli aşınmaların meydana geldiği görülmüştür. Yüzeyde kızaklama aşınma ve plastik deformasyon meydana gelmiştir.

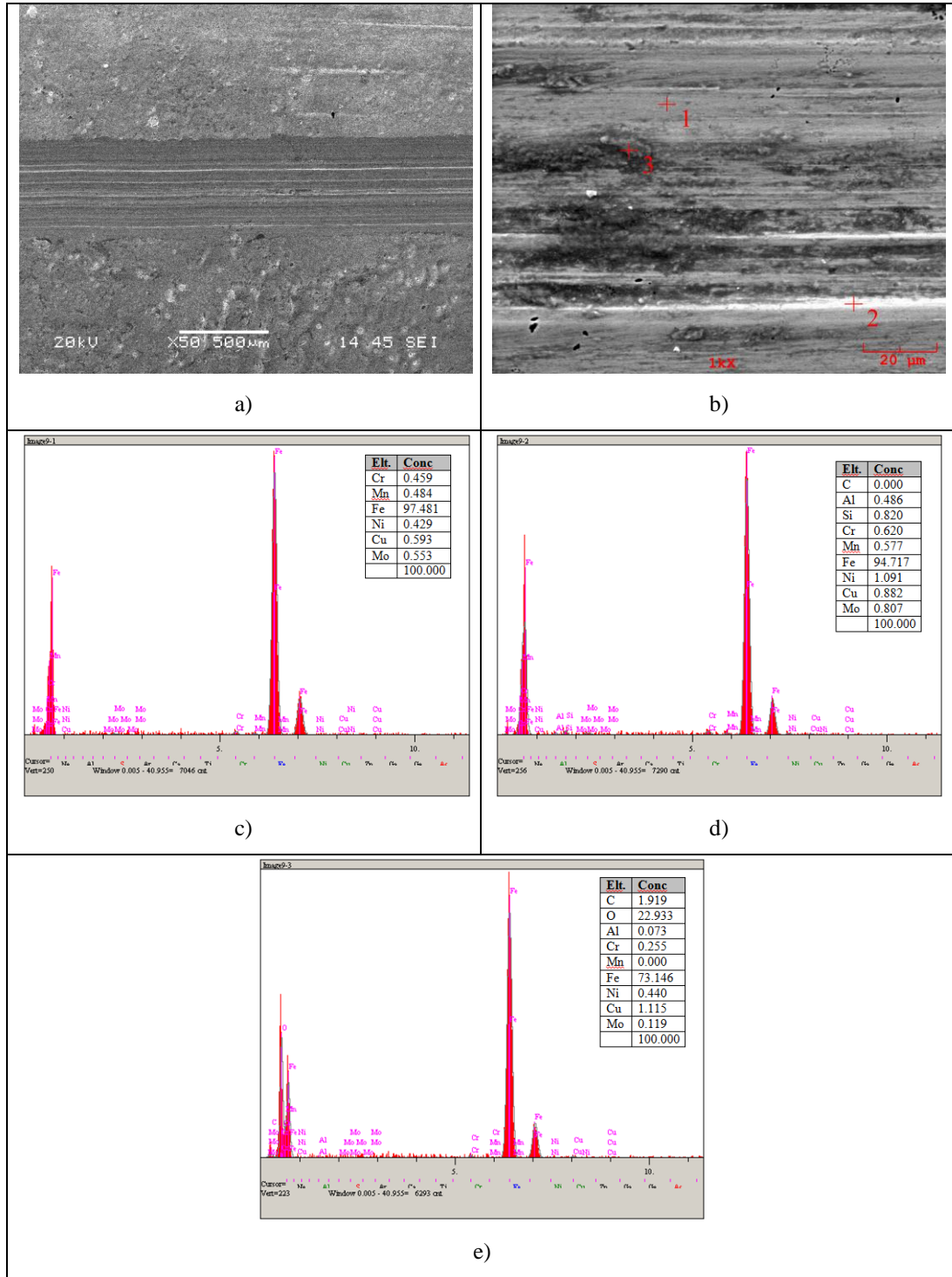


Şekil 6.39. a)8 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)8 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3, f)4 no'lu noktaların EDS analizleri

Şekil 6.40 ve şekil 6.41’de 9 (80mm, 15 pulse, 800 μ F) no’lu numunenin 1N ve 3N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonrası yüzeyden elde edilmiş SEM görüntüleri ve EDS analizleri sonrası yüzeylerde plastik deformasyon meydana gelmiştir. Yüzeyde derin olmayan yiv oluşumları ve pulluklama aşınma türü aşınma mekanizmaları meydana gelmiştir. Yük artmasıyla yivler genişlemiş, derinleşmiş, aşınma izleri daha belirgin bir hale gelmiş ve aşınma ürünleri yivler etrafında toplanmıştır. Yer yer malzeme kopmaları, şiddetli abrazif aşınma olduğunun göstergesidir. Özetle yükün artması yüzeylerde aşınmanın daha fazla meydana geldiğini gözlemlememize neden olmuştur.



Şekil 6.40. a)9 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 1N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)9 no'lu numunenin 1N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri



Şekil 6.41. a)9 no'lu numunenin 0,15m/sn hızda 3N yük altında 500m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü, b)9 no'lu numunenin 3N yük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, c)1, d)2, e)3 no'lu noktaların EDS analizleri

Yüzey özellikleri pulse plazma ile geliştirilen numunelerde x-ışınları analizleri ile varlıkları belirlenen γ -Fe fazı özellikle Fe_7C_3 , molibden ve molibden karbür esaslı fazların varlığı aşınma dayanımının artmasına sebebiyet vermiştir [14]. Pulse plazma

yöntemi ile numune yüzeylerinde abrazyonun en hafif şekli olan pulluklama ve kazımalı aşınma görülmüştür.

Sonuç olarak; pulse plazma yöntemi ile yüzeyleri modifiye edilen çelikler işlem uygulanmayan numunelere nazaran daha fazla dayanım göstermişlerdir. Yüzeylerde meydana gelen bozulmalar, işlem uygulanmış tüm numunelerde az miktarda meydana gelmiştir. İşlem gören yüzeylerin aşınma dayanımının artmasıyla, kullanım ömürleri artmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bu malzemelerin ağır çalışma şartları altında uzun süre hasara uğramadan kullanılabilmesi düşünülmektedir.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, orta karbonlu krom (Cr) alaşımlı veya yüksek dayanımlı düşük alaşımlı çelik olarak da adlandırılan, ucuz ve kolay bulunabilen AISI 5140 ıslah çeliklerinin yüzeyleri pulse plazma tekniği ile modifiye edilerek, pahalı ve zor bulunan çeliklerin yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Pulse plazma işleminde modifikasyon tabaka kalınlığında yüksek değer için genellikle yüksek pulse sayısı, ortalama numune-nozul mesafesinin seçilmesi ve pil kapasitesinin yüksek olarak işlemin uygulanması gerekmektedir. Bu çalışmada 800 μ F'lık pil kapasitesi, üç farklı numune-nozul arası mesafe (60-70-80mm) ve üç farklı pulse sayısı (5-10-15 pulse) değişken parametreler olarak seçilmiştir. Yapılan optik mikroskop görüntüleri, XRD analizleri, mikrosertlik verileri, aşınma sonuçları, yüzey pürüzlülükleri ve aşınma sonrasında yapılan SEM, EDS analizleri sonrasında pulse plazma ile modifiye edilmiş AISI 5140 çeliklerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi çalışmalarında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Pulse sayısı arttıkça modifikasyon tabaka kalınlığı artmakta, daha homojen ve düzgün bir hal almaktadır. Modifikasyon işlemi verimli şekilde uygulandığında, en yüksek tabaka kalınlığına 15 pulse etkisi altında ulaşıldığını, 5 pulse ile yapılan çalışmalarda da genellikle daha ince, daha az homojen yapıların eldesi görülmüştür. Pulse sayısı hem modifikasyon tabaka kalınlığını, hem de mekanik özellikleri etkileyen önemli bir faktördür. Tabaka kalınlık değerleri aşınma dayanımında ayrıca önem arz etmektedir.
- Metalografik incelemeler sonucunda, kaplama kalınlığının artan pulse sayısına ve nozul ile numune arasındaki mesafeye bağlı olarak değiştiği tespit

edilmiştir. Nozul ile numune arasındaki mesafelerin içinde en uzak mesafe olan 80mm'de en ince tabaka kalınlığı (13 μ m) elde edilmiştir. En yüksek kalınlık değeri ise 60mm mesafede (38 μ m) elde edilmiştir. Bu çalışmada nozul ile numune arasındaki mesafe için en düşük değer olan 60mm kullanılmıştır. Bu değer altında 50mm ve 40mm gibi daha düşük mesafelerde yüksek enerjiden dolayı yüzeyde ergime ve birtakım bozulmalar gözlemlenmiştir. Nozulun yüzeyle etkileşimini ve odaklanmasını mesafenin azalması kolaylaştırmaktadır. Mesafenin azalmasıyla iyonize ürünler tam ve verimli şekilde istenilen bölgeye girmişlerdir. Dolayısıyla, modifikasyon tabaka kalınlıklarının arttığı görülmektedir.

- Modifiye edilmiş numunelerden çıkarılan sertlik profillerinin modifikasyon öncesi numunelerinden daha yüksek sertlik değerleri verdiği görülmüştür. Kesit yüzeyinden numune içerisine doğru alınan mikrosertlik değerlerinde elde edilen en yüksek değer 990 HV_{0,05} (3 no'lu numunede, 60mm mesafe, 15 pulse), en düşük değer 645 HV_{0,05} (7 no'lu numunede, 80mm mesafe, 5 pulse). Nozul-numune arası mesafenin yüksek, pulse sayısının az oluşu sertlik değerlerini düşürmüştür. Numune gruplarında elde edilmiş sertlik değerleri sonucunda pulse plazma uygulanma şartlarının önemli olduğu görülmüştür.
- XRD paternleri modifikasyon tabakasında α -Fe, γ -Fe, Fe₃C, Fe₇C₃, Mo, MoC, bileşiklerinin oluştuğunu göstermiştir. Bu fazların varlığı aşınma dayanımını ve sertlik değerlerini artırmaktadır. Ayrıca numune-nozul arası mesafe ve pulse sayısının pik şiddetleri değerlerinde değişikliğe yol açmış olduğu görülmüştür. Artan pulse sayısı ile birlikte pik şiddetlerinde önemli bir artış tespit edilmiş olup, artan numune-nozul mesafesine göre ise pik şiddetlerinin azaldığı belirlenmiştir. Numune-nozul mesafesi arttığında iyonize ürünlerin iş parçasının yüzeyine tam ve homojen bir biçimde odaklanarak girmesi zorlaşmaktadır. Bu sebeple yüzeye giren iyonize ürünlerin miktarsal olarak diğer mesafelere göre az olması durumu oluşmaktadır, bu sebeplerden ötürü sertlik değerleri de değişerek düşmektedir.

- 500m için 0,15m/sn hızda 1N, 2N ve 3N yük altında uygulanan aşınma deneyleri sonucunda aşınma miktarı en düşük olarak 3 (60mm numune-nozul mesafesi, 15 pulse sayısı, 800 μ F pil kapasitesi) no'lu numunede, en yüksek aşınma miktarı olarak da 7 (80mm numune-nozul mesafesi, 5 pulse sayısı, 800 μ F pil kapasitesi) no'lu numunede görülmüştür. Ayrıca aşınma miktarlarında yükün artmasıyla artış görülmüştür.
- Modifikasyon sonrası numune gruplarının aşınma dayanımları artmıştır. Pulse plazma uygulanma şartlarının değişmesiyle numune yapılarında meydana gelen değişimler aşınma miktarlarını da etkilemiş olduğu düşünülmektedir. Modifiye olmuş numune yüzeyinde oluşmuş Mo, MoC, Fe₇C₃ içeren fazların varlığı aşınma dayanımını ve sertlik değerlerini arttırmaktadır.
- Pulse plazma ile yüzey işlemi uygulanmış çeliklerde, işlem uygulanmamış AISI 5140 çeliklerine göre yaklaşık 3 kat daha düşük sürtünme katsayı değerleri elde edilmiştir. Farklı sertlik ve faz yapısına sahip numune grupları beklenildiği üzere farklı sürtünme katsayı değerleri vermiştir. Yük artmasıyla sürtünme katsayı değerleri bazı grup numunelerde artmış, bazılarında azalmıştır. Yükün artmasıyla sürtünme katsayısının azalması yüzeyde oluşan oksit tabaka varlığından dolayı olabilir. Oksitli bileşikler ve kirler sürtünme katsayısını düşürmektedirler. Ayrıca yüzeyden kopan aşınma ürünleride yüzeye sıvanarak aşınmanın azalmasında bir faktör oluşturmuş olabilirler.
- Aşınma sonrası aşınmış yüzeylerin SEM ve EDS analizlerine göre aşınma yüzeyleri incelendiğinde; genellikle pulluklama, kızaklama aşınma türü abrazif karakterli aşınma izleri gözlemlenmiştir. Yükün artmasıyla ince ve fazla derin olmayan yivler derinleşmiş ve genişlemiştir.

Sonuç olarak; pulse plazma ile yüzeyleri modifiye edilmiş ucuz ve kolay bulunabilen AISI 5140 çeliklerine uygulanmış tüm deneysel çalışmalar neticesinde mekanik ve aşınma dayanımı gibi özelliklerin geliştirilmesi adına çok önemli ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Yüzey sertleştirme yöntemlerinden nitrasyon işleminin yeni ve özel bir uygulaması olan plazma (iyon) nitrürleme prosesinde de süre, sıcaklık, ortamın azot yüzdesi gibi parametrelere bağlı olarak AISI 5140 çeliklerine uygulamalar

yapılmıştır. Pulse plazmada elde edilen yüksek sertlik, aşınma dayanımı gibi özellikler plazma (iyon) nitrüleme prosesi ile de elde edilmiştir. Ancak plazma (iyon) nitrüleme işleminin uygulama süresi çok uzundur. Buna karşılık, pulse plazma uygulamaları hem kolay, hem çok kısa sürede yapılabilmekte (1-2 dk.) dolayısıyla da ekonomik olmaktadır. Uzun proses süreleri hem enerji, hem gaz hem de diğer sarf malzemelerinin tüketiminin artışına sebep olarak maliyetleri artırmaktadır. Bu işlemde de sürenin çok kısa olması nedeniyle enerji ve gaz sarfıyatı pulse plazma yönteminde oldukça düşüktür. Ön ısıl işlem uygulamadan, birkaç dakikada yüksek sertlik değerleri elde etmek prosesin verimliliğini ve ekonomikliğini açıkça göstermektedir. Bütün bunların sonucunda iş ve iş gücü kaybı da bu yöntemle en aza indirilebilir.

Pulse plazma konusunda yapılmış çalışmalar göstermiştir ki; bu teknoloji günümüzün yüzey modifikasyon alanında büyük gelişmeler sağlayacaktır. Bu teknolojinin, düşük maliyet özelliği ile yüzey modifikasyon problemlerinin çözümünde son derece yararlı olacağı, ekonominin ve hammaddenin özellikle zamanın son derece önemli olduğu günümüzde pulse plazma prosesinin endüstriyel alanlarda her anlamda büyük kazançlar sağlayacağı düşünülmektedir.

7.2. Öneriler

- Pulse plazma esnasında kullanılan elektrot değiştirilerek modifikasyon tabakasına ve mekanik özelliklere elektrodun etkisi incelenebilir.
- Pulse plazma esnasında kullanılan pil kapasitesi 900 μ F ve daha üstü değerlere çıkarılarak yüksek enerji kullanımının etkisi incelenebilir.
- Pulse plazma uygulanmış numunelerde uygun bir elektrot ve çelik türü ile korozyon dayanımı araştırılabilir.
- Diğer yüzey modifikasyon yöntemleri ile çeliklerin yüzeyleri modifiye edilerek, pulse plazma ile yüzeyleri modifiye edilmiş çeliklerin kazandırdığı özellikler kendi aralarında kıyaslanabilir.

KAYNAKLAR

- [1] KARAKAŞ, Y., Çelik Yüzeylerin Kaplanması, syf. 11-15, 2006.
- [2] DALDAL, S., Niobyum Karbür Kaplamaların Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, syf. 15-20, 2002.
- [3] HUTCHING, M., Tribology, Cambridge, syf. 19-25, 1992.
- [4] ZEYTİN, S., Yüzey İşlemleri Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, syf. 18-23, 1999.
- [5] ZEYTİN, S., Isıl İşlem Ders Notları, Sakarya Üniversitesi, syf. 11-15, 2003.
- [6] ŞAHİN, S., Katı Borlama Yöntemi İle Ferrobör Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Manisa, syf. 18-23, 1999.
- [7] YILMAZ, C., Soğuk İş Takım Çeliklerinin Pulse Plazma Yöntemiyle Geliştirilmesi, Bitirme Tezi, Sakarya Üniversitesi, syf. 31-35, 2007.
- [8] ERDEMİR, Çelik Yüzeylerinin Kaplanması, Erdemir Bilin ve Teknoloji, syf. 95-115, 2006.
- [9] <http://www.cemilsenocak.com/bitirmem/bolum4.htm>, Aralık 2009.
- [10] SARIKAYA, Ö., Aşınmaya Kaşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri, SAKARYA, syf. 21-25, 2007.
- [11] HEITKEMPER, M., FISCHER, A., BOHNE, C., H., PYZALLA, A., Wear Mechanisms Of Laser-Hardened Martensitic High-Nitrogen-Steels Under Sliding Wear, Wear Vol.250, syf. 477–484, 2001.
- [12] UGLOV, V., ANISHCHIK, M., ASTASHYNSKI, V., STALMOSHENOK, K., RUSALSKY, D.P., CHERENDA, N., RUMYANCEV, I. N., ASKERKO, V., KUZ'MİTSKİ, A.M., Structure-Phase Transformation Of High Speed Steel By Various High Intensity Ion-Plasma Treatments, Surface and Coatings Technology Vol.180 –181, syf. 108–112, 2004.
- [13] WEN, F., LO, Y. L., LİN, C.H., MOU, S. C., A Pulse DC Plasma

- Deposited Resistor Process, Materials Science Forum, Vol.505-507, syf. 865-870, 2006.
- [14] TYURIN, Y., ZGADKEVICH, M., KOLINICHENKO, O., Development Of Pulsed –Plasma Technologies For Producing Micro And Nanstructured Intermetallic Compounds In Surface Layers, Advances In Surface Technology 2007, Indian welding society, Chennai, June, syf. 311-315, 2007.
- [15] TYURIN, N., Y., KOLISNICENHKO, O. V. ve TSYGANKOV, N. G., Pulse Plasma Hardening of Tolls, Autowelding, Vol., syf. 13-18, 2001.
- [16] POGREBNJAK., A. D, TYURIN Y., Modification of material properties and coating deposition using plasma jets, Physics ± Uspekhi 48 (5), syf. 487-514, 2005.
- [17] POPOVIC, I., ZLATANOVIÇ, M., Electrical and Optical Signal Analysis of Pulse Powered Glow Discharge System, Materials Science Forum, Vol.518, syf. 337-342, 2006.
- [18] PEIKOSZEWSKI, J., WERNER, Z., LANGER, J., WALIS, L., Modification of the surface Properties of Materials by Pulsed Plasma Beams, Surface and Coating Technology, Vol. 106, syf.228-233, 1998.
- [19] Paton Enstitüsü, Teknik Yayınları, syf. 11-15, 2001.
- [20] AWAZU, K., SAKUDO, N., YASUI, H., SAJI, E., OKAZAKI, K., HASEGAWA, Y., IKENAGA, N., KANDA, K., NAMBOSAITOH, K., DLC Films Formed by Hybrid Pulse Plasma Coating (HPPC) System, Surface and Coatings Tech. 136, syf. 172-175, 2001.
- [21] TYURIN, N., KOLISNICENHK, O. V., Surface Modification by Pulse Plasma, Scientific and Technical, The Paton Welding Journal, syf. 1-6, 2001.
- [22] LANGNER, J., PIEKOSZEWSKI, J., STANISAWSKI, J., WERNER, Z., Present Status And Prospects Of Research In SINS On The Modification Of Surface Properties By Pulsed Plasma Streams, Nukleonika Vol. 45(3), syf. 193–197, 2000.
- [23] PIEKOSZEWSKI, J., WALIS, L., LANGNER, J., Surface Morphology Of Nitrogen-Alloyed Steels Using High Intensity Pulsed Plasma Beams, Materials Letters Vol.32, syf. 49-53, 1997.
- [24] PANTELIS, D. I., BOUYIOURI, E., KOULOUMBI, N., VASSILIOU, P., KOUTSOMICHALI, A., Wear And Corrosion Resistance Of Laser Surface Hardened Structural Steel, Surface and Coatings Technology, Volume 161, syf. 125-134, 2002.

- [25] SONG, R. G., ZHANG, K., CHEN, G. N., Electron Beam Surface Treatment. Part II: Microstructure Evolution Of Stainless Steel And Aluminum Alloy During Electron Beam Rapid Solidification Vacuum, Vol. 69, syf. 517–520, 2003.
- [26] SONG, R., ZHANG, G., CHEN, K., Electron Beam Surface Treatment. Part I: Surface Hardening Of AISI D3 Tool Steel, Vacuum Vol. 69, syf. 513–516, 2003.
- [27] BECKER, T. L., CANNON, R. M., RITCHIE, R. O., An Approximate Method For Residual Stress Calculation In Functionally Graded Materials, Mechanics of Materials, Vol.32, syf. 85-97, 2000.
- [28] MEI, X. X., SUN, W. F., HAO, S. Z., MA, T. C., DONG, C., Surface Modification Of High-Speed Steel By Intense Pulsed Ion Beam Irradiation, Surface & Coatings Technology Vol.201, syf. 5072–5076, 2007.
- [29] PIĘKOSZEWSKI J., GRIOTZSCHEL, R., WIESER, E., STANISLAWSKI, J., WERNER, Z., SZYMCZYK, W., LANGNER, J., Kinetics Of The Pulsed Erosion Deposition Process Induced By High Intensity Plasma Beams, Surface and Coatings Technology Vol. 128-129, syf. 394-399, 2000.
- [30] YU, Z., WANG, Z. G., YAMAZAKI, K., SANO, S., Surface finishing of die and tool steels via plasma-based electron beam irradiation, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 180, syf. 246–252, 2006.
- [31] NOVAKOVA, A., SIZOV, I. G., GOLUBOK, D. S, KISELEVA, T. YU., REVOKATOV, P. O., Electron-beam boriding of low-carbon steel, Journal of Alloys and Compounds Vol.383, syf. 108–112, 2004.
- [32] KWOK, C. T., CHENG, F. T., MAN, H. C., Laser Surface Modification Of UNS S31603 Stainless Steel. Part I:Microstructures And Corrosion Characteristics, Materials Science and Engineering, Vol. A290, syf. 55–73, 2000.
- [33] POGREBNJAK, A., TYURIN, Y., Modification Of Material Properties And Coating Deposition Using Plasma Jets, Uspekhi Fizicheskikh Nauk, Russian Academy of Sciences, Vol.48 (5) , syf. 487-512, 2005.
- [34] TONG, X., ZHANG, Z., DU, X., LIU, D., 5th World Seminar on Heat Treatment and Surface Engineering, IFHT'95, Isfahan, Iran, syf. 599, 1995.
- [35] WERNER, Z., STANISAWSKI, J., PIĘKOSZEWSKY, J., LEVASHOV, E. A., SZYMCZYK, W., New Types Of Multi Component Hard Coatings Deposited By ARC PVD On Steel Pre-Treated By Pulse Plasma Beams Vacuum. Vol.70, syf. 263-267, 2003.

- [36] MICHALSKI, A., Nanokristalline Iron Layers Produced By Pulse Plasma Method, *Nanostructured Materials*, Vol.8, syf. 725-730, 1997.
- [37] Pulse Plasma Technology and Corresponding Equipment for Formation of Highly Alloyed Micro-Crystalline Layers on a Surface of Metal Tools and Machine Parts, *Paton Tech.*, syf. 10-13, 2001.
- [38] NAYAL, G., LEWIS, D. B., LEMBKE, M., MÜNZ, W. D., COCKREM, J.E., Influence of Sample Geometry on The Effect of Pulse Plasma Nitriding of M2Steels, *Surface and Coatings Tech.* 111, syf. 148-157, 1999.
- [39] TYURIN, N., Yu., KOLISNICHEHKO, ve TSYGANKOV, N. G., Pulse Plasma Hardening of Tolls The *Paton Welding Journal*, Vol.1, syf. 38-43, 2001.
- [40] www.cemtas.com.tr, Ekim-2007.
- [41] <http://www.cemilsenocak.com/bitirmem/5140.htm>, Aralık-2010.
- [42] MUTLU, D., Seramik katkılı asbetsiz otomotiv fren balatası üretimi ve frenleme karakteristiğinin deneysel incelenmesi, *Doktora Tezi, SA.Ü*, syf. 21-25, 2002.
- [43] ASLAN, S., SiC ve grafit takviyeli çinko alüminyum hibrid kompozit malzemelerin aşınma davranışının incelenmesi. *Doktora Tezi, SAÜ*, syf. 31-35, 2005.
- [44] CLYNE, T.W., *Introduction to MMC*. Elsevier, syf. 41-45, 2001.
- [45] STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W., *Engineering tribology*. TEAM LRN, Butterworth-Heinemann, syf. 11-15, 1999.
- [46] FERRANTE, J., ABEL, P. B., *Surface physics in tribology*. Chapter 3, *Handbook of Micro/Nanotribology*, 2nd ed, syf. 21-26, 1999.
- [47] JAIME COLCHERO, J., MEYER, E., MARTI, O., *Friction on an atomic scale*. handbook of micro/nanotribology, Chapter 6, syf. 11-15, 1999.
- [48] BHUSHAN, B., *Principles of tribology Modern Tribology Handbook*, Volume I, CRC Press, syf. 6, 2001.
- [49] LUDEMA, K. C., *Introduction to wear*. University of Michigan, in *ASM Handbook*, Vol 18 syf. 311-315,.
- [50] ZUMGAHR, K.H., *Microstructure and wear of materials*, *Tribology Series* 10, Elsevier, syf. 21-25, 1987.
- [51] STAAB, G. H., *Laminar composites*. Butterworth-Heinemann, Chapter 1,

syf. 41-45, 1999.

- [52] MAJUMDAR, A., BHUSHAN, B., Characterization and modeling of surface roughness and contact mechanics. Handbook of Micro/Nanotribology, Chapter 4, syf. 61-65, 1999.
- [53] ASHBY, F., JONES, D. R. H., Engineering materials 1, an introduction to their properties and applications. Second Edition Butterworth-Heinemann, Elsevier Science, syf. 10-15, 1996.
- [54] BLAU, P., The significance and use of the friction coefficient, Tribology International 34, syf. 585–591, 2001.
- [55] UYYURU, R. K., SURAPPA, M. K., BRUSETHAUG, S., Tribological behavior of Al–Si–SiCp composites/automobile brake pad system under dry sliding conditions, Tribology International 40, syf. 365–373, 2007.
- [56] STOLARSKI, T. A., Tribology in machine design. Chapter 2, Butterworth-Heinemann, syf. 11-15, 1990.
- [57] MIYOSHI, K., Solid lubrication fundamentals and applications friction and wear properties of selected solid lubricating films: case studies. NASA/TM-107249, Chapter 6, syf. 51-55, 2000.
- [58] BAYER, R. G., Mechanical wear fundamentals an testing. Second edition, Marcel Dekker, syf. 8-15, 2004.
- [59] LUDEMA, K. C., Sliding and Adhesive Wear, ASM Handbook, Vol 18 syf. 11-15, 1998.
- [60] MOSLEH, M., BLAU, P. J., DUMDTRESCU, D., Characteristics and morphology of wear particles from laboratory testing of disk brake materials. Wear 256, syf. 1128–1134, 2004.
- [61] PROSKUROVSKY, D. I., ROTSHTEIN, V. P., OZUR, G. E., IVANOV, YU. F., MARKOV, A. B., Physical Foundations For Surface Treatment Of Materials With Low Energy, High Current Electron Beams, Surface and Coatings Technology Vol.125, syf. 49–56, 2000.
- [62] PODGORNIK, B., VIZINTIN, J., LESKOVSEK, V., Tribological Properties of Plasma and Pulse Plasma Nitrided AISI 4140 Steel, Surface and Coatings Tech., Vol.108-109, syf. 454-460, 1998.
- [63] SVAHN, F., RUDOLPHI, A. K., WALLEN, E., The Influence Of Surface Roughness On Friction And Wear Of Machine Element Coatings, Wear, Vol., 254, syf. 1092–1098, 2003.

ÖZGEÇMİŞ

Volkan Ziya BAYHAN, 1984 yılında İstanbul / Şişli ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğretimini Zeynep Bedia Kılıçlıoğlu İlköğretim Okulu, lise öğrenimini Orhan Cemal Fersoy lisesinde tamamladı. 2003 yılında Sakarya Üniversitesinde Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde Lisans öğrenimine başladı. 2008 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır ve halen devam etmektedir.