

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

**PULSE PLAZMA TEKNOLOJİSİ İLE ÇELİK YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Met. ve Malz.Yük.Müh. Yıldız YARALI ÖZBEK

Enstitü Anabilim Dalı : MET.ve MALZ. MÜH.

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet DURMAN

Eylül 2008

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


PULSE PLAZMA YÖNTEMİ İLE ÇELİK YÜZEY
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

Met. ve Malz.Yük. Müh. Yıldız YARALI ÖZBEK

Enstitü Anabilim Dalı : MET.ve MALZ. MÜHENDİSLİĞİ

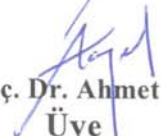
Bu tez 26/ 9 / 2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.


Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK
Jüri Başkanı


Prof. Dr. Mehmet DURMAN
Üye


Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN
Üye


Prof. Dr. Abdullah MİMAROĞLU
Üye


Yrd. Doç. Dr. Ahmet ÖZEL
Üye

ÖNSÖZ

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

Tüm tez çalışmam boyunca her konuda desteğini ve yardımını gördüğüm Sayın hocam Yrd.Doç.Dr. Ahmet ÖZEL'e sonsuz teşekkürler. Çalışmalarında fikir ve öneriyle bana destek olan Prof.Dr. Hatem Akbulut'a, kalıntı gerilim ölçümlerinde değerli bilgilerini benimle paylaşan hocam Doç.Dr. Cevat Sarıoğlu'na ve ölçümlerde yardımcı olan uzman Fuat Kayış'a çok teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarım esnasında her türlü imkanlarından yararlandığım SAÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve tüm bölüm öğretim üyelerine ayrıca numunelerimin üretilmesinde yardımlarını gördüğüm Teknisyen Ebubekir Cebeci'ye teşekkür ederim.

Yoğun ve yorucu doktora çalışmam boyunca her zaman desteklerini aldığım ve yardımlarını gördüğüm Doç.Dr. S.Can KURNAZ'a Arş.Gör. Nuray Karakuş'a, Yrd.Doç.Dr. Uğur Özseraç'a, Arş.Gör. Alparslan Serhat Demir'e teşekkürler.

EPMA analizlerinde yardımcı olan İ.T.Ü. Adnan Tekin Araştırma Enstitüsü'ne, kalıntı gerilim ölçümlerinde laboratuvar imkanlarından yararlandığım Marmara Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, AFM ölçümlerinde yardımcı olan Yrd.Doç.Dr. Şükran Demirkıran'a ve Doç.Dr.Uğur Şen'e, ayrıca Teknisyen Ersan Demir'e teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak her zaman desteklerini ve yardımlarını gördüğüm, daima yanımda olan sevgili anneme, babama, Ahmet Özbek ve Zeynep Cemre Özbek'e sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xxix
ÖZET.....	xxx
SUMMARY.....	xxxi

BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
------------	---

BÖLÜM 2.

YÜZEY TEKNOLOJİLERİ.....	4
2.1. Yüzey İşlem Teknikleri.....	5
2.1.1. Yüzey kaplamalar.....	5
2.1.2. Yüzey sertleştirme.....	7
2.1.2.1. Difüzyonla kaplama prensibi.....	8
2.1.3. İş parçasının yüzey bileşiminde değişiklik gerektirmeyen prosesler.....	9
2.1.3.1. Alev ile yüzey sertleştirme.....	9
2.1.3.2. İndüksiyon ile sertleştirme.....	10
2.1.3.3. İyon aşılama yöntemi.....	10
2.1.3.4. Lazer yöntemi ile yüzey modifikasyonu.....	11
2.1.4. Malzeme yüzeyinde termo-kimyasal işlemler.....	12
2.1.4.1. Karbürleme.....	12
2.1.4.2. Katı ortamda karbürleme.....	12

2.1.4.3. Gaz karbürleme.....	12
2.1.4.4. Sıvı karbürleme.....	13
2.1.4.5. Plazma karbürleme.....	13
2.1.4.6. Nitrürleme.....	13
2.1.4.6.1. Nitrürleme amacı ve uygulama alanları.....	15
BÖLÜM 3.	
PULSE PLAZMA TEKNOLOJİSİ.....	16
3.1. Giriş.....	16
3.2. Pulse Plazma.....	16
3.3. Pulse Plazma Teknolojisinin Çalışma Prensipleri.....	19
3.3.1. İş parçası yüzeyi ile pulse plazma etkileşimi.....	22
3.3.2. Pulse plazma uygulama örnekleri.....	25
3.4. Pulse Plazma Teknolojisinin Avantajları.....	29
3.5. Pulse Plazma Teknolojisinin Uygulama Alanları.....	29
3.6. Pulse Plazma Teknolojisinin Endüstriyel, Ekonomik ve Sosyal Yönleri.....	29
BÖLÜM 4.	
KROM MOLİBDEN ÇELİKLERİ.....	31
4.1. Çelikler.....	31
4.2. Alaşımli Çeliklerin Sınıflandırılması.....	32
4.3. Krom Molibden Çelikleri.....	33
4.4. Mikroyapı.....	33
4.5. AISI 4140 Çeliğinin Özellikleri.....	33
4.6. Kullanım Yerleri.....	34
BÖLÜM 5.	
AŞINMA.....	35
5.1. Sürtünme ve Sürtünme Teorileri.....	35
5.1.1. Kuru sürtünme.....	37
5.1.2. Sınır sürtünmesi.....	41
5.2. Aşınma.....	42

5.2.1. Adhesiv aşınma.....	45
5.2.2. Abrasiv aşınma.....	47
5.2.3. Yorulma aşınması.....	49
5.2.4. Korozyon aşınması.....	50
5.3. Yüzey Pürüzlülüğü.....	51
BÖLÜM 6.	
KALINTI GERİLİM.....	52
6.1. Kalıntı Gerilim.....	52
6.1.1. Parçaların toplam gerilmesi.....	53
6.1.2. Kalıntı gerilimin üretimi.....	54
6.2. Gerilimin Oluşumu.....	55
6.3. Kalıntı Gerilimin Çalışma Performansına Etkisi.....	57
6.4. Kalıntı Gerilim Ölçüm Yöntemleri.....	58
6.4.1. X-ışınları yöntemi ile gerilme ölçümü.....	58
BÖLÜM 7.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	60
7.1. Giriş.....	60
7.2. Çalışma Programı.....	61
7.3. Metalografik Çalışmalar.....	63
7.4. Optik Çalışmalar.....	64
7.5. Sertlik Ölçümleri.....	64
7.6. X-Işını Analizleri.....	64
7.7. Kırık Yüzey Deneyleri.....	64
7.8. SEM Analizleri.....	65
7.9. EPMA Analizleri.....	65
7.10. Kalıntı Gerilim Ölçümleri.....	65
7.11. Aşınma Deneyleri.....	67
7.12. AFM (Atomik Güç Mikroskobu).....	68
BÖLÜM 8.	
DENEYSEL SONUÇLAR.....	69

8.1. Optik Görüntüler.....	69
8.2. EPMA Analiz Sonuçları.....	92
8.3. X-Işını Analiz Sonuçları.....	104
8.4. Kalıntı Gerilim Sonuçları	115
8.4.1. Kalıntı gerilim ölçümleri	115
8.5. Mikrosertlik Sonuçları.....	128
8.6. Kırık Yüzey Analizleri	140
8.7. Aşınma Deney Sonuçları.....	169
8.7.1. Aşınma hız değerleri.....	169
8.7.2. Sürtünme katsayıları.....	177
8.8. Sürtünme Katsayı Grafikleri.....	184
8.9. Aşınma Sonrası Yüzeylerin SEM ve EDS Analizleri.....	194
8.10. AFM (Atomic Force Microscope) Görüntüleri.....	268
BÖLÜM 9.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	278
9.1. Sonuçlar.....	278
9.2. Öneriler.....	285
KAYNAKLAR.....	286
ÖZGEÇMİŞ.....	299

KISALTMALAR VE SİMGELER

X	: Azot-oksijen karışımındaki oksijen içeriği
α	: Oksitleyici katsayısı
μ	: Sürtünme katsayısı
F	: Teğetsel kuvvet
T	: Sıcaklık (°K)
E	: Elastik modül
ν	: Poisson's sabiti
ψ	: Tilt açısı
d_{iher}	: Her bir tilt açısında ölçülmüş "d" boşluğu
W	: Normal kuvvet
FWHM	: Pik yüksekliğinin yarısı (full weight high maximum)
$\Delta h/h$: Deformasyonun derecesi
τ	: Deformasyon süresi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
AFM	: Atomik Güç Mikroskobu
MPA	: Çok amaçlı eklenti parçası

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1	Yüzey mühendisliği teknolojileri ve endüstriyel sektörler arasındaki karşılıklı etkileşimi.....	5
Şekil 2.2	Nitrülenmiş malzeme mikroyapısı.....	15
Şekil 3.1	Pulse-plazma cihazı şematik görünümü.....	17
Şekil 3.2	a)İşlem esnasında plazmatron görüntüsü, b) plazmatron görüntüsü.....	18
Şekil 3.3	Farklı yöntemlerin kıyaslama diyagramı.....	19
Şekil 3.4	a)Pulse plazma ile modifikasyon oluşum mekanizması, b)Pulse plazma ile modifikasyon oluşum mekanizması.....	21
Şekil 3.5	Pulse plazma teknolojinin genel özeti.....	22
Şekil 3.6	Plazma detonasyon ekipman düzeneği.....	23
Şekil 3.7	a)1 Pulse uygulanmış yüzey tabakası görünümü, b) 5 Pulse uygulanmış yüzey tabakasının görünümü.....	25
Şekil 3.8	Pulse plazma sonrası modifikasyon tabakasından alınan SEM görüntüsü.....	26
Şekil 3.9	Farklı elektrod ve pulse sayısının mikrosertlik üzerine etkisi..	27
Şekil 3.10	Pulse plazma sonrası modifikasyon tabaka görüntüleri.....	27
Şekil 3.11	Pulse plazma uygulama örnekleri.....	30
Şekil 5.1	Sürtünme teorileri	36
Şekil 5.2	Kuru Sürtünme Modeli	37
Şekil 5.3	Bir malzemenin yüzey pürüzlülüğünün büyütülerek temsili gösterimi.....	39
Şekil 5.4	Sürtünen yüzeylerin görünen ve gerçek temas alanlarının temsili sunumu.....	40
Şekil 5.5	Sürtünme ve aşınmanın istenen ya da istenmeyen özellikler olduğu ya da olmadığı bazı kullanım alanları.....	40

Şekil 5.6	Aşındırıcı deney yöntemlerinden birkaçının temsili gösterimi	42
Şekil 5.7	Tribolojik sistemi meydana getiren unsurların şematik gösterimi ve mikro kaynak oluşum noktaları.....	43
Şekil 5.8	Aşınmayı Tanımlayıcı Anahtar Kelimeler ve Birbirleri ile Etkileşimleri	44
Şekil 5.9	Dört başlıkta incelenen aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi	45
Şekil 5.10	Adhesiv aşınma mekanizması sonucunda aşınma partiküllerinin oluşumunu şematik gösterimi.....	46
Şekil 5.11	Abrazif aşınma mekanizmasının üç tipi olan a) Kesme, b) Pulluklama, c) Kızaklama aşınmalarının SEM görüntüleri....	47
Şekil 5.12	a) İki-yüzeyle ve b)üç-yüzeyle abrazif aşınma tipleri	49
Şekil 6.1	Malzeme içindeki gerilme bileşenleri.....	53
Şekil 6.2	Gerilme türleri ve oluşum sebepleri.....	56
Şekil 6.3	Çekme ve basma kalıntı gerilmelerinin malzeme üzerindeki etkisi.....	57
Şekil 6.4	Gerilme alanları değişimi.....	57
Şekil 6.5	X-ışını kullanarak farklı açılarda kalıntı gerilim ölçümü.....	59
Şekil 7.1	a)Pulse plazma uygulama sistemi (nozul), b) kontrol paneli ve güç üniteleri.....	62
Şekil 8.1	1, 2, ve 3 nolu numunelerin kesit optik görüntüleri	72
Şekil 8.2	4,5 ve 6 no'lu numunelerin kesit optik görüntüleri.....	73
Şekil 8.3	7, 8 ve 9 no'lu numunenin optik görüntüleri.....	76
Şekil 8.4	10,11, ve 12 no'lu numunlerin optik görüntüleri.....	77
Şekil 8.5	13, 14 ve 15 no'lu numunenin optik görüntüsü.....	78
Şekil 8.6	16, 17 ve 18 no'lu numunlerin optik görüntüsü.....	79
Şekil 8.7	19, 20 ve 21 no'lu numunelerin optik görüntüleri.....	80
Şekil 8.8	22, 23 ve 24 no'lu numunenin optik görüntüleri	81
Şekil 8.9	800 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm, 80mm mesafede 15 pulse için mesafe-modifikasyon tabaka kalınlık değerlerinin değişim grafiği.....	84
Şekil 8.10	900 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm, 80mm mesafede 15 pulse için mesafe-modifikasyon tabaka kalınlık	85

	değerlerinin değişim grafiği.....	
Şekil 8.11	7 no'lu numunenin SEM görüntüsü b,c,d,e,f EDS element dağılım haritası.....	87
Şekil 8.12	7 no'lu numunenin farklı bir bölgesinden alınan EDS element analiz sonuçları.....	89
Şekil 8.13	17 no'lu numunenin SEM görüntüsü b,c,d,e,f EDS element harita analiz sonucu.....	90
Şekil 8.14	a)20 no'lu numunenin EDS görüntüsü, b)W, c) N, d) O, e) Mn, element dağılım haritaları.....	92
Şekil 8.15	4 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının EPMA elementel analiz sonuçları, a)Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b)C, c) N, d) W elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı.....	94
Şekil 8.16	4 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının başka bir bölgesinden EPMA elementel analiz sonuçları, a)Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b)W, c) N, d) O, e)C elementlerinin dağılım haritaları.....	95
Şekil 8.17	5 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının EPMA elementel analiz sonuçları, a)Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b)W, c) N, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı	97
Şekil 8.18	6 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının EPMA elementel analiz sonuçları a)Modifikasyon uğramış yapının EPMA görüntüsü b)W, c) N, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı	98
Şekil 8.19	13 no'lu numunenin a)Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b)W, c) N, d)C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı.....	100

Şekil 8.20	15 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının EPMA elementel analiz sonuçları, a)Modifikasyon uğramış yapının EPMA görüntüsü b)N, c) W, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı	101
Şekil 8.21	19 no'lu numunenin a)Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b)N, c) W, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı	102
Şekil 8.22	19 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının EPMA elementel analiz sonuçları, a)Modifikasyon uğramış yapının EPMA görüntüsü b)N, c) W, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı	106
Şekil 8.23	İşlem uygulanmamış AISI 4140 çeliğinin x-ışını analizi.....	104
Şekil 8.24	1,2 ve 3 no'lu numunelerin x-ışını analizi.....	105
Şekil 8.25	4,5 ve 6 no'lu numunelerin x-ışını analizleri.....	107
Şekil 8.26	7,8 ve 9 no'lu numunelerin x-ışını analizleri.....	108
Şekil 8.27	10,11, ve 12 no'lu numunelerin x-ışını analizleri.....	108
Şekil 8.28	13,14, 15 no'lu numunelerin x-ışını analizi.....	110
Şekil 8.29	16,17,18 no'lu numunelerin x-ışını analizleri	111
Şekil 8.30	19,20,21 no'lu numunelerin x-ışını analiz sonuçları.....	112
Şekil 8.31	22,23 ve 24 no'lu numunelerin x-ışını analiz sonuçları.....	113
Şekil 8.32	Rocking ve Tilting Tekniklerinin şematik gösterimi.....	115
Şekil 8.33	Referans numunesi silikon için d ve $\sin^2\psi$ değerleri.....	117
Şekil 8.34	a) 1 ve b) 2 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\sin^2\psi$ değerleri.....	118
Şekil 8.35	3 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\sin^2\psi$ değerleri.....	119
Şekil 8.36	5 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\sin^2\psi$ değerleri.....	119
Şekil 8.37	7 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\sin^2\psi$ değerleri.....	120

Şekil 8.38	8 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	120
Şekil 8.39	9 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	121
Şekil 8.40	10 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	122
Şekil 8.41	13 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	122
Şekil 8.42	15 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	123
Şekil 8.43	17 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	123
Şekil 8.44	18 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	124
Şekil 8.45	19 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	124
Şekil 8.46	20 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	125
Şekil 8.47	22 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psı değerleri.....	125
Şekil 8.48	1,2 ve 3 nolu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri.....	129
Şekil 8.49	4, 5 ve 6 nolu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri.....	130
Şekil 8.50	7, 8 ve 9 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri.....	130
Şekil 8.51	10, 11 ve 12 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri.....	131
Şekil 8.52	800 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 5 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	132
Şekil 8.53	800mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 5 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye	133

	bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	
Şekil 8.54	13,14,15 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri.....	134
Şekil.8.55	16,17 ve 18 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri.....	135
Şekil 8.56	19,20 ve 21 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri.....	136
Şekil 8.57	22, 23 ve 24 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri.....	136
Şekil 8.58	900 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 15 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	137
Şekil 8.59	900 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 5 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	137
Şekil 8.60	1 no'lu numunenin a ve b) kırık yüzey SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) 1no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) 1.noktanın EDS element sonuçları, e) noktasal olarak W element miktarı.....	141
Şekil 8.61	2 no'lu numunenin a)kırık yüzey SEM görüntüsü, b) EDS resmi, c) 1no'lu noktanın EDS analiz grafiği, d) noktasal olarak W element miktarı.....	143
Şekil 8. 62	3 no'lu numunenin a)kırık yüzey SEM görüntüsü, b) EDS resmi, c) noktasal olarak W element miktarı.....	143
Şekil 8.63	a) 3 no'lu numunenin EDS resmi, b) noktasal olarak W element miktarı.....	144
Şekil 8.64	4 no'lu numunenin a)kırık yüzey SEM görüntüsü, b) EDS resmi, c) 1no'lu noktanın EDS analiz grafiği, d) noktasal olarak W element miktarı.....	144
Şekil 8.65	5 no'lu numunenin a)kırık yüzey SEM görüntüsü, b) EDS resmi, c) 1no'lu noktanın EDS analiz grafiği, d) noktasal olarak W element miktarı.....	146

Şekil 8.66	6 no'lu numunenin a)kırık yüzey SEM görüntüsü, b) yüksek büyütmede modifikasyon tabaka SEM görüntüsü, d) EDS resmi, d) noktasal olarak W element miktarı.....	147
Şekil 8.67	7 no'lu numunenin a ve b)kırık yüzey SEM görüntüsü, b) EDS resmi, d) noktasal olarak W element miktarı.....	148
Şekil 8.68	8 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) ana malzemedeki kırık SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı.....	149
Şekil 8.69	9 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) EDS resmi, c)1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, d) noktasal olarak % W element miktarı	150
Şekil 8.70	10 no'lu numunenin 8 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) başka bir bölgeden kırık SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı.....	151
Şekil 8.71	11 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b)başka bir bölgeden kırık SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı.....	152
Şekil 8.72	12 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b)yüksek büyütmede SEM görüntüsü, c) farklı bölgeden yüksek büyütme SEM görüntüsü, d) farklı bölgeden SEM görüntüsü , e)EDS resmi, f) noktasal olarak % W element miktarı.....	154
Şekil 8.73	13 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b)modifikasyon tabakasından yüksek büyütme SEM,c)ana malzemenin kırık SEM görüntüsü, d) modifikasyon EDS resmi, e) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, f) noktasal olarak % W element miktarı.....	155
Şekil 8.74	14 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) yüksek büyütmede modifikasyon	156

	tabakasından wolfram oksit taneciği, c) ana malzemeden kırık yüzey SEM görüntüsü, d) modifikasyon EDS resmi, e) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, f) noktasal olarak % W element miktarı.....	
Şekil 8.75	15 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) modifikasyon tabakasından yüksek büyütme SEM, c) modifikasyon EDS resmi, d) 1no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı.....	157
Şekil 8.76	16 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b)modifikasyon tabakasından yüksek büyütme SEM, c)ana malzemeden yüksek büyütmede SEM görüntüsü, d) modifikasyon EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı.....	158
Şekil 8.77	17 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü,b)modifikasyon tabakasından farklı bölgede SEM, c) modifikasyon tabakasından bölgesel EDS resmi e)1.bölgenin EDS sonuç grafiği, e)bölgesel %W EDS sonuçları, f) aynı bölgeden noktasal EDS analiz resmi, g) 1 no'lu noktanın EDS sonuç grafiği, h) noktasal olarak % W element miktarı.....	159
Şekil 8.78	18 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b)başka bir bölgeden SEM, c) modifikasyon EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı, f) farklı bir bölgeden EDS analiz g) bölgesel % W miktar değişimi....	161
Şekil 8.79	19 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) modifikasyon EDS resmi, d) bölgesel EDS analiz sonuçları, d) başka bir bölgeden EDS analiz resmi, e)1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı.....	162
Şekil 8.80	20 no'lu numunenin 19 no'lu numunenin a) modifikasyon	163

	tabakasından kırık yüzey SEM resmi , b)başka bir bölgeden SEM c) yüksek büyütmede modifikasyon tabakasından SEM , d)EDS analiz resmi, e)1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı.....	
Şekil 8.81	21no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM resmi , b)başka bir bölgeden SEM c) yüksek büyütmede modifikasyon tabakasından SEM , d)EDS analiz resmi, e)1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, f) noktasal olarak % W element miktarı.....	164
Şekil 8.82	22no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM resmi , b)başka bir bölgeden SEM c) yüksek büyütmede modifikasyon tabakasından SEM , d)EDS analiz resmi, e)1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği,e) noktasal olarak % W element miktarı.....	165
Şekil 8.83	23 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM resmi , b)başka bir bölgeden SEM c)EDS analiz resmi, e)1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı.....	166
Şekil 8.84	24 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM resmi , b)EDS analiz resmi, e)1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı.....	167
Şekil 8.85	1,2,3 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi.....	172
Şekil 8.86	4,5,6 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi.....	173
Şekil 8.87	7,8,9 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi.....	173
Şekil 8.88	10, 11, 12 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi.	173
Şekil 8.89	13,14,15 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi...	175
Şekil 8.90	16,17,18 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi...	175
Şekil 8.91	19, 20, 21 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi.	176
Şekil 8.92	22,23,24 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi...	176
Şekil 8.93	800mf pil kapasitesinde, 1(70mm, 15 pulse), 2(70mm, 10 pulse) ve 3(70mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi	

Şekil 8.95	800mf pil kapasitesinde, 7(60mm, 15 pulse), 8(60mm, 10 pulse) ve 9(60mm, 5 pulse)no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi.....	181
Şekil 8.96	800mf pil kapasitesinde, 10(50mm, 15 pulse), 11(50mm, 10 pulse) ve 12(50mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi.....	181
Şekil 8.97	Şekil 8.97 900mf pil kapasitesinde, 13(50mm, 15 pulse), 14(50mm, 10 pulse) ve 15(50mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi.....	182
Şekil 8.98	900mf pil kapasitesinde, 16(60mm, 15 pulse), 17(60mm, 10 pulse) ve 18(60mm, 5pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi.....	182
Şekil 8.99	900mf pil kapasitesinde, 19(70mm, 15 pulse), 20(70mm, 10 pulse) ve 21(70mm, 5pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi	183
Şekil 8.100	900mf pil kapasitesinde, 22(80mm, 15 pulse), 23(80mm, 10 pulse) ve 24(80mm, 5pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi.....	183
Şekil 8.101	1,2,3 no'lu numune gruplarının a) 1, b) 2, c)3 9N yük altında elde edilmiş sürtünme katsayı grafikleri.....	184
Şekil 8.102	a) 4, b) 5, c) 6 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri.....	186
Şekil 8.103	a) 7, b) 8, c) 9 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri.....	187
Şekil 8.104	a) 10, b) 11, c) 12 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri.....	188
Şekil 8.105	a) 13, b) 14, c) 15 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri.....	188
Şekil 8.106	a) 16, b) 17, c) 18 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri.....	191
Şekil 8.107	a) 19, b) 20, c) 21 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri.....	192

Şekil 8.108	a)22, b) 23, c) 24 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri.....	193
Şekil 8.109	Saf AISI 4140 çeliğinin 9N yük altında sürtünme grafiği.....	193
Şekil 8.110	1 no'lu numunelerin 1,5m/sn hızda 5 N yük altında 200 m'de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyden alınmış SEM görüntüleri.....	194
Şekil 8.111	1 no'lu numunenin 5Nyük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	196
Şekil 8.112	1no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) yüksek büyütmede aşınma ürünleri	196
Şekil 8.113	1 no'lu numunenin 7Nyük altında a)2, b)3, c)4, d)5, e)6, f)7, h)8 aşınma yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	198
Şekil 8.114	1 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden yüksek büyütme, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri	298
Şekil 8.115	1 no'lu numunenin 9Nyük altında a)2, b)3, c)4, d)5, e)6, f)7, h)8 aşınma yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	199
Şekil 8.116	2 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden yüksek büyütme, d)farklı bir bölge.....	200
Şekil 8.117	2 no'lu numunenin 5Nyük altında a)2, b)3, c)4, d)5, e)6, f)7, h)8 aşınma yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	201
Şekil 8.118	2 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü, b) farklı bölgeden.....	202
Şekil 8.119	3 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri,	202

	d) farklı bölgedeki aşınma ürünleri.....	
Şekil 8.120	3 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü.....	203
Şekil 8.121	3 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri..	204
Şekil 8.122	3 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS görüntüsü, b)1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5 aşınma yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	205
Şekil 8.123	4 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) daha yüksek büyümede aşınma ürünleri.....	206
Şekil 8.124	4 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) daha yüksek büyümede aşınma ürünleri.....	207
Şekil 8.125	4 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) daha yüksek büyümede aşınma ürünleri.....	208
Şekil 8.126	5 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) daha yüksek büyümede aşınma ürünleri.....	209
Şekil 8.127	5 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) daha yüksek büyümede aşınma ürünleri.....	210
Şekil 8.128	5 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri,	211

	d) daha yüksek büyümede aşınma ürünleri.....	
Şekil 8.129	6 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) daha yüksek büyümede aşınma ürünleri.....	211
Şekil 8.130	6 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resim görüntüsü, b)1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, ı)7, i)8, j) 9, k)10 aşınma yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	213
Şekil 8.131	6 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri.....	213
Şekil 8.132	6 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri..	213
Şekil 8.133	7 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri, a)aşınma yüzey görüntüsü, b)yüksek büyütmede aşınma ürünleri	214
Şekil 8.134	8 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri	215
Şekil 8.135	8 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü, b)yüksek büyütmede aşınma ürünleri	215
Şekil 8.136	8 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü, b)yüksek büyütmede aşınma ürünleri	216
Şekil 8.137	9 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri	217

	a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri	
Şekil 8.138	9 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri	217
Şekil 8.139	9 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri	218
Şekil 8.140	9 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1.nolu noktanın grafiksel görünümü,c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, ı)7,i)8 aşınma yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	219
Şekil 8.141	10 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5 Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	220
Şekil 8.142	10 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5 Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	221
Şekil 8.143	10 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	222
Şekil 8.144	10 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1.nolu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, ı)7,i)8, j)9, k)10, l)11 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri.....	223
Şekil 8.145	11 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	224

Şekil 8.146	11 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	225
Şekil 8.147	11 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	226
Şekil 8.148	12 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	227
Şekil 8.149	12 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	228
Şekil 8.150	12 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	230
Şekil 8.151	12 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, ı)7 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri.....	231
Şekil 8.152	13 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü b)farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	231
Şekil 8.153	13 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü b)farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	232

Şekil 8.154	13 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü b)farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	232
Şekil 8.155	13 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri.....	233
Şekil 8.156	14 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	234
Şekil 8.157	14 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	235
Şekil 8.158	14 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	235
Şekil 8.159	15 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	236
Şekil 8.160	15 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	237
Şekil 8.161	15 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	237
Şekil 8.162	15 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1.nolu	239

	noktanın grafiksel görünümü,c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, i)7,i)8, j)9 aşınma yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	
Şekil 8.163	16 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	239
Şekil 8.164	15 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	240
Şekil 8.165	16 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d) yüksek büyütmede aşınma ürünleri.....	241
Şekil 8.166	16 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1.nolu noktanın grafiksel görünümü,c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, aşınma yüzeyinden alınmış EDS analizleri.....	242
Şekil 8.167	17 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü.....	242
Şekil 8.168	17 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü.....	242
Şekil 8.169	17 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü.....	243
Şekil 8.170	18 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)farklı bölgeden aşınma ürünleri.....	243
Şekil 8.171	18 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir	244

	bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	
Şekil 8.172	18 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü.....	245
Şekil 8.173	18 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri.....	246
Şekil 8.174	19 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	246
Şekil 8.175	19 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü, b)farklı aşınma yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri d) farklı bir bölgeden aşınma.....	247
Şekil 8.176	19 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	248
Şekil 8.177	19 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri.....	249
Şekil 8.178	20 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	250
Şekil 8.179	20 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	251
Şekil 8.180	20 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir	252

	bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	
Şekil 8.181	21 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	252
Şekil 8.182	21 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	253
Şekil 8.183	21 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	253
Şekil 8.184	21 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri.....	254
Şekil 8.185	22 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	255
Şekil 8.186	22 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	256
Şekil 8.187	22 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	256
Şekil 8.188	23 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	257
Şekil 8.189	23 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m	258

	mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	
Şekil 8.190	23 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	257
Şekil 8.191	23 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h) no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri.....	260
Şekil 8.192	24 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	261
Şekil 8.193	23 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	262
Şekil 8.194	24 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	262
Şekil 8.195	24 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h) no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri.....	263
Şekil 8.196	Saf 4140 numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	264
Şekil 8.197	Saf 4140 numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	265

Şekil 8.198	Saf 4140 numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma, d) aşınma ürünleri.....	265
Şekil 8.199	Aşındırıcı alüminin bilyanın 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma.....	266
Şekil 8.200	22no'lu numunenin yüzeyinden elde edilmiş AFM görüntüsü	269
Şekil 8.201	22no'lu numunenin yüzeyinden yandan çekilmiş AFM görüntüsü.....	269
Şekil 8.202	22no'lu numunenin yüzeyinden tane yapısından elde edilmiş AFM görüntüsü.....	270
Şekil 8.203	3 no'lu numunenin 7N yük altında aşınma deneyi sonrası aşınma içi AFM görüntüsü, b) AFM ile pürüzlülük ölçümleri	271
Şekil 8.204	a)3 no'lu numunenin 7N yük altında aşınma deneyi sonrası aşınma içi AFM görüntüsü b) AFM ile pürüzlülük ölçümleri.	272
Şekil 8.205	a) ve b) ve c)3 no'lu numunenin 7N yük altında aşınma deneyi sonrası aşınma içi farklı aşınma bölgelerinden çekilmiş AFM görüntüleri.....	273
Şekil 8.206	16 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında aşınma içi AFM görüntüsü.....	274
Şekil 8.207	16 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında aşınma içinden başka bir bölge AFM görüntüsü.....	275
Şekil 8.208	16 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında aşınma içinden başka bir bölge AFM görüntüsü	275
Şekil 8.209	17 no'lu numunenin normal yüzeyden AFM görüntüsü	276
Şekil 8.210	17 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında aşınma içinden başka bir bölge AFM görüntüsü.....	277

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması.....	6
Tablo 2.2.	Çeliklerin yüzey sertleştirilmesi için temel yöntemler.....	8
Tablo 2.3	Nitrüleme yöntemleri.....	14
Tablo 3.1.	Farklı teknolojilerin karşılaştırılması	31
Tablo 4.1	AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu	33
Tablo 4.2	AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri	34
Tablo 4.3	AISI 4140 çeliğinin termal özellikleri	34
Tablo 4.4	AISI 4140 çeliğinin elektriksel özellikleri.....	34
Tablo 5.1	Çeşitli aşınma türlerinde aşınmayı azaltmak için bazı öneriler....	51
Tablo 7.1	AISI 4140 çeliğinin kimyasal içeriği.....	62
Tablo 7.2	Pulse plazma uygulama şartları.....	63
Tablo 8.1	Pulse plazma parametreleri ve modifikasyon tabakası kalınlık değerleri.....	70
Tablo 8.2	X-ışını çözümünde kullanılan kart numaraları ve bulunan fazlar.....	105
Tablo 8.3	Pulse plazma ile modifiye edilen bazı numunelerin kalıntı gerilim değerleri.....	116
Tablo 8.4	Numune gruplarının aşınma hız değerleri.....	169
Tablo 8.5	Numune gruplarına ait sürtünme katsayı değerleri.....	178

ÖZET

Anahtar Kelimeler: Pulse plazma, yüzey modifikasyonu, kalıntı gerilim, çizgisel aşınma

Bu çalışmada, ucuz ve endüstri de yoğun şekilde kullanılan AISI 4140 çeliğinin yüzey özellikleri pulse plazma sistemi ile geliştirilerek pahalı ve zor bulunan çelik gruplarının yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Pulse plazma yöntemiyle AISI 4140 çeliklerinin yüzeyleri modifiye edilmiştir. Modifiye edilen numunelerin optik fotoğrafları çekilmiş, modifikasyon tabaka kalınlıkları ölçülmüştür. Pulse plazma işleminin uygulandığı parametrelerin modifikasyon tabaka kalınlığını ve yapısını etkilediği belirlenmiştir.

Kırık yüzeylerden alınan SEM ve EDS analizlerinde modifikasyon tabakasındaki tane incelmeleri ve küçük beyaz taneler halinde wolfram elektrodan gelen wolfram görülmektedir. Kolonsal büyüme yönlenmeleri görülmüştür. EPMA ve SEM ile modifikasyon tabakasındaki element dağılım haritaları çıkartılmıştır. Yüzeyde azot ve wolfram elementlerinin homojen bir biçimde dağıldığı gözlemlenmiştir.

Modifikasyon tabakasından alınan x-ışını analizlerinde Fe_3N , W, W_3O ve α -Fe, γ -Fe piklerine rastlanmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde mesafeye ve pulse plazma parametrelerine göre değişen sertlik değerleri elde edilmiştir. Modifikasyon işlemi uygulanmadan 170-180 HV olan çeliğin sertlik değeri 1050HV'ye kadar çıkarılmıştır.

Numune gruplarının kalıntı gerilim ölçümleri XRD yöntemiyle yapılmıştır. Yüzeyde basma gerilmeleri görülmüştür. 200m için 0.15 m/sn hızda 5N, 7N, 9N yük altında CSM aşınma cihazı ile çizgisel (liner) aşınma deneyi yapılmıştır. Numunelere uygulana çizgisel aşınma deneyi sonrası yük değişimiyle sürtünme katsayısının ve aşınma miktarlarının değiştiği gözlemlenmiştir. Sürtünme katsayıları düşmüştür. Yüzeyleri modifiye edilen çeliklerin aşınma dayanımlarının 2 kat arttığı görülmüştür.

ENHANCEMENT OF STEEL SURFACE PROPERTIES THROUGH PULSE PLASMA TECHNIQUE

SUMMARY

Keywords: Pulse plasma, Surface modification, Linear wear, Friction coefficient, Retained stress

The surfaces of AISI 4140 steel were modified by a newly developed pulse plasma 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. It was seen that number of pulse, battery capacity and nozzle distance are the important factors affecting layer thickness and microstructure.

Samples were held in liquid nitrogen and then exposed to SEM and EDS investigations. As a result, thin grains and small white wolfram oxide grains coming from wolfram electrode were detected. Other elements were calculated by EPMA and SEM analyses.

Fe_3N , W, W_3O_8 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 180 HV before pulse plasma treatment. Its value was increased to 1050 HV after the treatment.

Retained stress values of some specimens were measured by means of X-rays by tilting. The compression stresses were calculated in coating layers.

Wear test was done in CSM-linear wear test machine with 0.15 m/s constant sliding speed under 5N, 7N, and 9N loads for 200 m. 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.

Worn surfaces of specimens were studied by SEM, AFM and EDS analyses techniques.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde, ağırlaşan çalışma koşullarında kullanılan makine yapı elemanları ve malzemeleri özellikle aşınma, erozyon, korozyon, yorulma, oksidasyon, ve yüksek sıcaklığa dayanım konularında ki talepleri tam olarak karşılayamamaktadırlar[1-2]. Metal ve alaşımların üretiminde kullanılan hammadde rezervlerinin gün geçtikçe azalması ve artan maliyetler ile aşınma ve korozyonun neden olduğu büyük kayıplar, alternatif malzeme arayışlarını hızlandırmıştır.

Metallerin aşınma, yorulma ve korozyona karşı yüksek dayanımı çeşitli tekniklerle başarılabilir[1]. Fakat, ortam çeşitliliği arttığında, karmaşık yüklere karşı metallerin dayanımı yeterince yüksek değildir[3-6]. Pek çok pratik uygulamada malzemeler (iş ortamında görülen) mekanik ve/veya kimyasal etkilerle bozulmalara maruz kalmaktadırlar[4].

Yapılan bu çalışmada, düşük maliyetli, yaygın olarak kullanılan bir çelik grubu seçilerek yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yüzey özellikleri geliştirilen ucuz, kolay bulunabilen ve yaygın olarak kullanılan bu çeliklerin daha sonra yüksek karbonlu, yüksek alaşımlı pahalı çeliklerin yerine kullanılabilirliğini araştırmak amaçlanmıştır.

Bu amaç doğrultusunda; 10x20 ebatlarında silindirik olarak hazırlanan AISI 4140 çeliklerinin yüzeylerine uygulanacak pulse plazma işleminde: pulse sayısı 5, 10, 15, numune nozul mesafe aralığı 50mm, 60mm, 70mm, 80mm, pil kapasitesi ise 800mf ve 900mf olarak seçilmiştir. Pulse plazma esnasında tükenen elektrot olarak “W” (wolfram) kullanılmıştır.

Parametre seçiminden sonra uygulanan pulse plazma işlemi sonrası, numuneler hassas biçimde kesilmiş, metalografik olarak hazırlanmış, optik ve SEM, EPMA

analizleri yapılmıştır. Bu analizler yardımıyla modifikasyon tabakasının element dağılım haritaları çıkarılmış, yüzeyden içeriye doğru modifikasyon tabaka yapısı incelenmiştir.

Silindirik biçimde olan çelik numunelerin arka yüzeyinden kesme cihazı ile çentik atılmış daha sonra el testeresi ile inceltirilmiştir. Çentikli bu numuneler sıvı azotun içinde yaklaşık 1 dk. tutularak çıkartılmış ve çekiç yardımıyla çentikli bölgelerinden kırılmışlardır. Kırılma sonrası yüzeylerin SEM görüntüleri alınmış ve EDS analizleri yapılmıştır. Kırık yüzeylerin SEM görüntülerinde özellikle modifikasyon tabakasında gevrek kırılma izleri gözlemlenmiştir. Modifikasyon tabakası açıkça fark edilebilmektedir. Taneler oldukça incelmıştır. Wolfram ve/veya wolframoksit tanelerinin varlığı belirlenmiştir.

X-ışınları analiz çalışmaları sonucunda; pulse plazma öncesi numune yapısında sadece α -Fe piki bulunurken, işlem sonrası yapılan analizlerde mekanik özellikler açısından önem arz eden γ -Fe, Fe_3N , W_3O , W piklerine rastlanmıştır.

Modifikasyona uğrayan numunelerin uğradığı yoğun deformasyon sonucu yüzeyde oluşmuş olacağı düşünülen kalıntı gerilimler x-ışınları yöntemiyle (tilting yöntemi ile) ölçülmüştür. Ölçümler α -Fe pikinin $2\theta=116,727^\circ$ de (310) düzleminde yapılmıştır. 6 (altı) farklı açıdan ölçüm alınmıştır. Ölçümler sonucu modifikasyon tabakasında mekanik özellikleri olumlu yönde etkileyen basma gerilmeleri tespit edilmiştir.

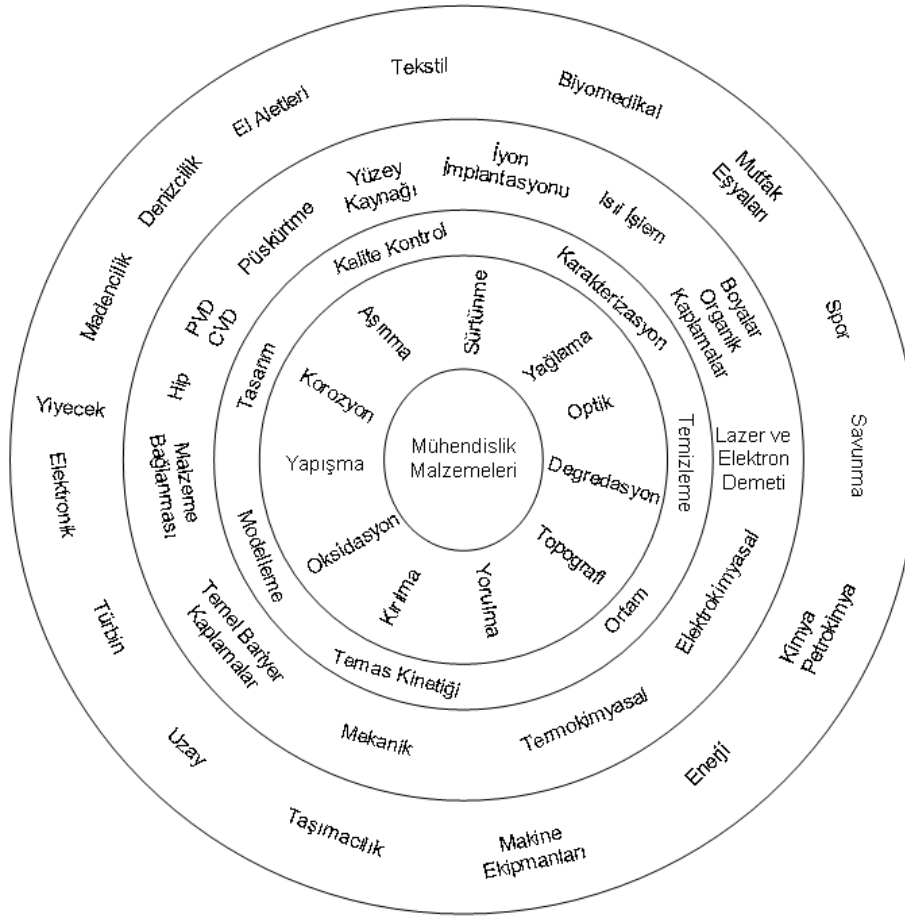
Numunelerin yüzeyinden içeriye doğru 5gr yük altında 15 sn süre mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Deneyler sonrası işlem uygulanmadan sertliği 170-180HV olan AISI 4140 çeliğinin sertliği en üst değer olarak 1050HV bulunmuştur. Numune grupları içinde sertlik değerleri pulse plazma uygulanma parametrelerine bağlı olarak 700HV-1050HV arasında değişmektedir.

CSM-çizgisel (liner) aşınma cihazı ile 0.15m/sn hızda, 200m mesafede, 5N, 7N ve 9N yük altında çizgisel aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşındırıcı bilya olarak 6mm. çapında alümina bilya seçilmiştir. Aşınma deneyi sonucunda sürtünme katsayı

değerleri ve aşınma hız değerleri elde edilmiştir. Yüke bağlı olarak sürtünme katsayı ve aşınma miktarlarında değişimler görülmüştür. Aşınma sonrası aşınma yüzeylerinin SEM ve AFM görüntüleri alınmıştır. AFM ile aşınma yüzeylerinden resimler alınmış ve pürüzlülük değerlerine incelenmiştir. Aşınma ürünlerinin ve bazı aşınma bölgelerinin EDS analizleri yapılmıştır. Aşınma deneyleri sonunda pulse plazma ile yüzeyleri modifiye edilmiş çelik gruplarının aşınma dayanımlarının işlem uygulanmamış numunelere göre 2 kat arttığı gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 2. YÜZEY TEKNOLOJİLERİ

Yüzey mühendisliği ve yüzey işlem teknolojileri son yıllarda çok önemli bir duruma gelmiştir [7]. Yüzey işlemleri ile malzemenin sertlik, yorulma, sürtünme, aşınma ve korozyon özellikleri geliştirilmektedir. Bunlardan tribolojik özelliklerin geliştirilmesi önem açısından ilk sırayı teşkil etmektedir. Yüzey işlemleri, daha ucuz ve daha kolay elde edilmesi mümkün olan altlık malzemesinin yüzeyini, çeşitli işlemlerle değiştirerek, istenilen özellikte malzeme elde edilmesi ve bunu çok amaçlı kullanarak ekonomik fayda kazanılmasını sağlamaktadır. Bu işlemlerin en önemli avantajı, ucuz bir altlık malzeme yüzeyine yapılacak işlemlerle yüzey-ortam etkileşimine dayanan optik, manyetik, elektriksel, termal, kimyasal, korozyon, oksidasyon ve tribolojik gibi özellikleri istenilen şekilde değiştirilebilmesidir [5]. Malzeme tasarımı, özellikleri, yüzey mühendisliği teknolojileri ve endüstriyel sektörler arasındaki karşılıklı etkileşim Şekil 2.1'de verilmektedir. Şekilde de görüleceği üzere malzemelerin öncelikle karşılaşılabilecek problemler, daha sonra bu problemlerin karakterizasyonu ve nasıl çözümlenebilecekleri, bu amaçla malzeme yüzeylerine uygulanabilecek yüzey geliştirme prosesleri ile malzemelerin tüm sektörlerle olan ilişkilerini açıklamaktadır.



Şekil 2.1 Yüzey mühendisliği teknolojileri ve endüstriyel sektörler arasındaki karşılıklı etkileşimi

2.1. Yüzey İşlem Teknikleri

Yüzey işlemleri iki temel gruba ayrılabilir:

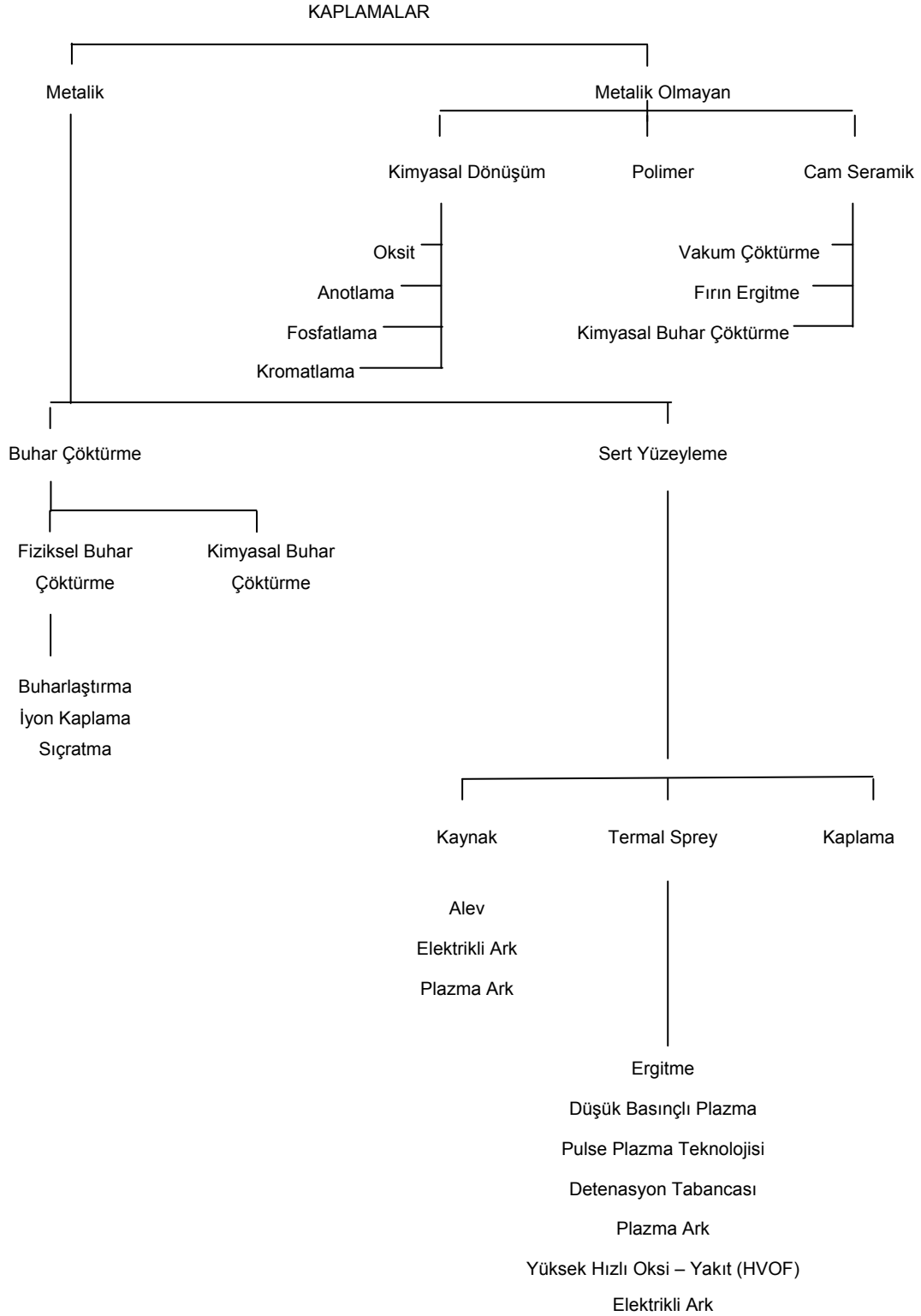
2.1.1. Yüzey kaplamalar

Bir malzeme yüzeyine başka bir malzemenin katılması ya da çöktürülmesi kaplama olarak adlandırılmaktadır. Yüzey kaplamaları altlık malzemesinin termodinamiği ile ilgili olmadığından geniş bir uygulama olanağı sunmaktadır.

Yüzey kaplamaları temel olarak malzemeyi kullanıldığı ortam etkilerinden korumak ve görünümünü iyileştirmek amacıyla uygulanır. Bu amaçla Tablo 2.1’de sınıflandırılmış çok sayıda kaplama yöntemi verilmiştir. Tabloda verilen

sınıflandırmada, kaplama yöntemleri metalik ve metalik olmayan şeklinde iki temel gruba ayrılmıştır.

Tablo 2.1. Kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması



Kaplamalar malzemelerin korunması, parça performansının artırılmasında, kullanılan en önemli yollardan biridir [4-10].

2.1.2. Yüzey sertleştirme

Günümüzde kullanılan yüzey işlemleri geleneksel (ısıl işlem esaslı) yüzey işlemlerinin mantıki bir uzantısı sayılabilir. Hem geleneksel hem de yeni yüzey işlem teknolojilerinde amaç aynıdır; aşınma direncini, korozyon direncini, yorulma ve oksidasyon dayanımını arttırmaktır. Bir yüzey işlemi bu amaçlardan bir yada bir kaçını gerçekleştirmek için uygulanmaktadır. Yüksek enerjili ışınlar, plazma yada buhar biriktirme teknikleri gibi yeni teknikler vakum ortamında ve çok kontrollü koşullar altında gerçekleştirildikleri için geleneksel tekniklere nazaran çok daha ileri teknoloji gerektirir ve buna bağlı olarak elde edilen kaplamanın yüzey kalitesi de çok yüksektir. Üstelik gelişen koşullar neredeyse sınırsız sayıda ve bileşimde yüzey kalitesini (çeşitliliğini) ortaya koymaktadır.

Metal malzemelerin yüzeylerine uygulanan yüzey sertleştirme işlemleri genel olarak, ana metalin aşınma ve sürtünmeye karşı özelliklerini geliştirerek sertlik ve tokluğu tek bir parçada birleştirmek, korozyona karşı direnci arttırmak ve üretim maliyetlerini düşürmek amacı ile yapılır [2].

Çeliklerin deformasyon ve çatlak problemi olmadan yüzeylerinin sertleştirilmesi için değişik yüzey sertleştirme yöntemleri kullanılmaktadır (Tablo 2.2).

Yüzey sertleştirme işlemleri, malzeme yüzeyinin içyapısı ile birlikte kimyasının da değiştirilmesiyle yapılan ve difüzyon(yayınma) ile yüzey özelliklerinin değiştirilmesi esasına dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemle malzeme yüzeyine azot, karbon, bor vb. sertleştirme elemanları yayınma ile ihtiva edilerek sert, aşınma, sürtünme ve korozyona karşı dirençli bir yüzey elde etmek mümkün olur. Yönteme göre sertleştirme elemanlarının parça yüzeyine ihtiva edilmesi gaz, sıvı veya iyon şeklinde olabilir. Bu yöntem farklılıkları da doğal olarak birbirinden farklı tabaka kalınlıkları ve sertlikleri oluşturur.

Tablo 2.2 Çeliklerin yüzey sertleştirilmesi için temel yöntemler[2].

İkincil Uygulamalar	Temel Uygulamalar
Kaplama Metotları Kaynaklı kaplama metotları Püskürtme metotları	Difüzyon(yayınma) Metotları Nitrürleme Karbürleme Karbonitrürleme Borlama Toyota difüzyonu Titanyum – karbon difüzyonu
Buhar Metotları Kimyasal buhar ile sertleştirme (elektroliz) Fiziksel buhar ile sertleştirme (iyon püskürtme)	Lokal Sertleştirme Metotları Alevle sertleştirme İndüksiyon ile sertleştirme Lazer ile sertleştirme Elektron ışını ile sertleştirme İyon aşılama /implantation Seçici karbürleme ile nitrürleme Ark lambası ile sertleştirme

2.1.2.1. Difüzyonla kaplama prensibi

Difüzyon; malzeme içerisindeki atomların ve diğer sertleştirme elamanlarının sıcaklığa bağlı olarak hareket ettirilmesi ile yer değiştirilmesi difüzyon (yayınma) olarak adlandırılır. Difüzyon terimi özellikle katı malzeme içerisinde kütle taşınımını sağlayacak oranda gelişen atom hareketlerini tanımlar. Difüzyon yönteminde malzeme yüzeyinin içyapısı, yüzeye nüfuz ettirilen yabancı atomlar ve ısı sayesinde gerçekleştirilir.

Difüzyonlu kaplama, difüzyon işlemlerinin geliştirilmesiyle başarılı bir yöntemdir. Metal veya metalik olmayan kaplama malzemesiyle altlık malzemesi arasında kimyasal etkileşim söz konusudur. Kaplama malzemesi alt yüzeyine difüze olur ve bu arada altlık malzemesinin boyutlarında ya hiç değişiklik olmaz ya da çok küçük oranlarda olur. Alaşım ve metallerde difüzyonun olabilmesi için atomların yeterli ısıl hareketine sahip olması gerekir.

Difüzyonla kaplamalar, ısı etkisi altında altlık ve kaplama malzemesi arasında kuvvetli alaşım oluşumu ile gerçekleşir. Kaplamanın özellikleri altlık kompozisyonuna bağlıdır. Difüzyonla kaplamalar bakır, molibden, nikel, niobyum, tantalyum, titanyum ve tungsten içeren alaşımın altlık malzemesine uygulanmasıyla elde edilir. Bu kaplamalarda en yaygın kullanılan alaşımlar ferro malzemeler şeklindedir. Difüzyonal kaplamalarda, karbon ve azot yüzeyin mekanik özelliklerini geliştiren klasik örneklerdendir.

Difüzyonla yüzey sertleştirme prosesleri; metalik (V, Ti, Nb) veya metalik olmayan (N, C, B) sertleştirme elemanlarını ve bu elemanların parça yüzeyine nakledilmesi için kullanılan kimyasal yöntemleri ihtiva eder. Böylece difüzyonla yüzey sertleştirme işleminde, iş parçası ile malzeme yüzeyinde oluşturulan tabaka arasında elementel bir alışveriş gerçekleşir. Bunun sonucunda da altlıkla tabaka arasında kuvvetli bağlar oluşur.

Metal malzemelerdeki difüzyon işlemi, homojen ve homojen olmayan malzemelerde farklılıklar gösterir. Öyle ki, homojen malzemelerde tamamıyla eşit dağılmış ve birbirinin aynı olan atomların yer değiştirmesi kendi kendine gerçekleşir ki, bu yer değiştirme işlemine kendi kendine difüzyon denir. Kendi kendine difüzyon da genellikle kütle taşınması görülmez. Homojen olmayan malzemelerdeki difüzyon işlemi ise teknik açıdan farklılıklar gösterir. Homojen olmayan malzemelerdeki konsantrasyon farklılıkları, atomların belirli yönde hareket etmelerine neden olur. Bu tür difüzyon olayları, ısı işlemlerin çoğunda büyük önem arz eder.

2.1.3. İş parçasının yüzey bileşiminde değişiklik gerektirmeyen prosesler

2.1.3.1. Alev ile yüzey sertleştirme

Oksi-asetilen yada oksii-hidrojen alevi kullanılır. Nispeten kalın bir bölge γ faz alanına ısınır. İç kısım ısınmaz iç kısım yumuşak (tok) dış kısım sert olur. Eğer ısıtma hızlı olursa sertleşebilen kabuk ince olur. Alevle sertleştirme yöntemi indüksiyon ile sertleştirmeye göre daha kaba bir işlemdir. Hassasiyet düşük ve daha kalın bir tabaka elde edilir.

2.1.3.2. İndüksiyon ile sertleştirme

Yüksek frekanslı elektrik akımı ile malzemenin sadece yüzey bölgesi γ faz alanına hızla ısıtılır. Frekans yüksek olursa ince bir tabaka ısıtılma sıcaklığına çıkar. Yüzeyde oluşacak basma gerilmeleri yorulma dayanımını artırır. Bu işlem manyetik özellik gösteren malzemelere uygulanabilir.

2.1.3.3. İyon aşılama yöntemi

Bir yüzey modifikasyon yöntemi olan iyon aşılama esaslı plazma 1980' li yılların ortalarında geliştirilmiş ve önerilmeye başlanılmıştır. Yüzey gaz halindeki plazmaya daldırılır ve ard arda gelen negatif yüksek voltajlı pulse uygulanır. Her pulse esnasında, pozitif iyonlar altlığa doğru aşılansın ve altlığa bitişik form edilmiş elektrik kılıf boyunca hızlandırılmıştır. İyon implantasyon esaslı plazma yönteminde bu çabalar yüzey özelliklerini geliştirmek, aşınma, sertlik ve korozyon dayanımı gibi üstün özellikler üzerine yönelmiştir. İyon implantasyon cihazları, özel olarak dizayn edilmiş kaynaklarca çok yüksek enerjilerde (10-500keV) üretilen iyonları hızlandırır. Buna karşılık, plazma nitrürlemede ki iyon ve atomların enerjisi çok düşüktür. İyon implantasyonu, çökeltilerin difüzyon kontrollü teşekkülü ve yüzey altı mikroyapısının kabalaşmasını en aza indirecek şekilde oda sıcaklığı civarındaki altlıklara uygulanır. Düşük uygulama sıcaklığı ve prosesin çok iyi vakumlu hızlandırıcılarda yapılması temiz yüzey sağlar ve oksidasyon gibi arzu edilmeyen yüzey kimyasal reaksiyonlarını azaltır. İyon implantasyonu sadece ışının çevresindeki bölgeleri etkileyen bir prosestir.

Plazma kaynaklı iyon implantasyonu malzemelerin yüzey modifikasyonunda kullanılan etkili fiyat politikasına sahip bir prosestir [14-15]. Çok daha iyi adhezyon sonuçları elde edilebilir. İyon implantasyonu çelik parçaların kaplamalarında çok kullanılan bir metoddur [16].

Yüzeyle iyon çarpışmasının yüksek enerjisi onu ısıtır ve arayüzey difüzyonu kimyasal difüzyon ilerler.

Takım çelikleri nitrojen implantasyonu için mükemmel bir adaydır. Çünkü bu çelikler nitrat oluşturuca alaşım elementleri bakımından oldukça zengindir [17]. Sadece takım çelikleri değil titanyumunda iyon implantasyonu kullanılarak tribolojik özellikleri geliştirilmiştir [18].

2.1.3.4. Lazer yöntemi ile yüzey modifikasyonu

Lazer çok kısa sürede malzemelerin ısı veren, yüzeylerinde yüksek sıcaklık üretebilen yüksek enerji ışın türüdür.

Yüzey işlemleri için lazerlerin üç farklı türü ticari olarak kullanılabilir (CO₂, Nd, YAG, ve excimer lazer gibi). İlk ikisi birkaç yıldır endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Excimer lazer, bununla beraber, endüstride hala etkili bir yöntemdir. Yüzey işlemleri için diğer lazer yöntemlerden farklı olarak bir mikron yüzey derinliğine sahiptir. Bu sebeple excimer lazer elektronik cihazların modifikasyonunda ilk endüstriyel uygulamadır. Ayrıca excimer lazer modifiye tabakanın kalınlığını daima sınırlandırır.

Excimer lazer ayrıca; yüzey yumuşatmada (yeniden kristalleşme), temizlenmesinde, yüzey ergitmede, sırlamada, pürüzsüz yüzey modifikasyonunda (optik parlatmada), kuvvetli buharlaşmada kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan çalışmalar göstermektedir ki; yüzey özelliklerinin modifikasyonu konusunda en fazla elektronik, otomobil, iş parçalarının yapım alanında çalışmalar yapılmaktadır.

Diğer teknikler nazaran daha pahalı bir teknik olmasında rağmen, lokal işlemlerin yapımında kabul görmektedir. Bu sebeple lazer işlemleri asla bütün bir yapı için kullanılan bir yöntem değildir. Lazer yüzey işlemlerinin farklı türleri termal ve termo-kimyasal işlemler olarak iki gruba ayrılmaktadır.

Çeşitli araştırmalar sonunda görülmüştür ki; excimer lazer yüksek güç yoğunluğunu kolayca başarabilen bir yüzey modifikasyon yöntemidir. Teknik uygulamalarda yalnızca birkaç mikronluk maksimum modifikasyon derinliğinden dolayı korozyon önleme ve aşınma dayanımı gibi özellikler kazandırır. Bununla birlikte, dekorasyon,

işaretleme, temizleme benzeri teknikler eğer çok küçük veya hassas bir yüzeyle ilgileniyorsa avantajlıdır [17-22]. Ayrıca lazer teknolojisi katı-eriyik ince filmlerin gelişmesi için de kullanılmaktadır [23].

2.1.4. Malzeme yüzeyinde termo-kimyasal işlemler

2.1.4.1. Karbürleme

Sementasyon, kutu karbürleme yada katı ortamda karbürleme, yüzeye karbon emdirme veya yüzeyin karbonca doyurulması demektir. Karbürleme işlemi iş parçası yüzeyine karbon emdirmek sureti ile gerçekleştirilen bir işlemdir. Ortam karbonca zengin iş parçası yüzeyi de karbonca fakir olacaktır ve iş parçasının karbon içeriği $C < 0.25$ olmalıdır.

Karbürleme, ostenit (γ) faz alanında yapılır (900-930 °C). Yüksek sıcaklıklarda tane büyümesi olabilir. İşlem yüzeyde elde edilmesi istenen tabaka kalınlığına göre 8-12 saat sürebilir. İş parçasının yüzeyinde karbon miktarı %0.7-1 civarında olabilir. Bu işlem için altlığın alaşımsız yada az alaşımlı çelik olması gerekir [24].

2.1.4.2. Katı ortamda karbürleme

İş parçaları, karbon verici herhangi bir (genelde kömür tozu+dökme demir talaşı) kapalı ortamda ısıtılır. Genelde katı ortamda yapılan işlem uzun süreli ve büyük parçalara uygulanır. Yüzey tabakası kalınlığı homojen olmayabilir.

2.1.4.3. Gaz karbürleme

Doğrudan CO_2 gazı karbon kaynağı ile olarak kullanılır ve gazın (CO_2) redüksiyonu ile açığa çıkan karbon (C) çelik bünyesine girer. Katı ortamda yapılan karbürleme de karşılaşılan uzun işlem zamanları ve ısı işlem uygulama güçlüğü gaz karbürleme de oluşmamaktadır.

2.1.4.4. Sıvı karbürleme

Özel tuz banyolarında gerçekleştirilir. Kullanılan banyolar zehirli siyanür (CN) esaslıdır.

2.1.4.5. Plazma karbürleme

Karbürleme işlemi, düşük karbonlu çeliklerde 850-925°C arasında gerçekleştirilir. Karbürleme işleminde kullanılan karbürleme gazı, hidrokarbonludur (C_xH_y). Sistemin gaz basıncı 1-20 torr, anot ile katod arasındaki gerilim 1000 voltdur. Karbürlenmiş parçalarda herhangi bir deformasyon söz konusu değildir, soğutma işlemi vakum ortamında yapılır. Kompleks geometrili parçalara kolaylıkla uygulanabilir, homojen kalınlığa sahip hassasiyeti yüksek, endüstriyel olarak yaygın kullanılan bir prosesdir.

2.1.4.6. Nitrürleme

Aşınma direncinin artırılması için uygulanan en yaygın yüzey işlemlerinden biri de nitrürlemedir. Nitrürleme, iş parçası yüzeyinin azot ile zenginleştirildiği bir termokimyasal prosesdir [9].

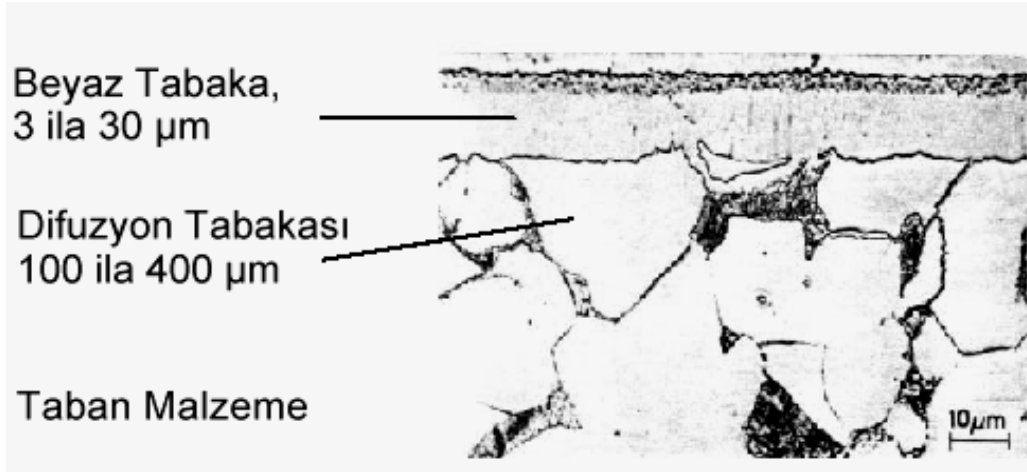
Nitrürleme, çelik malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirmek ve çalışma ömürlerini artırmak (aşınma, yorulma ve korozyon) amacıyla uygulanan en eski termokimyasal proseslerden biridir.

Nitrürleme yöntemleri; gaz, sıvı, toz nitrürleme, plazma nitrürleme şeklinde alt gruplara ayrılmıştır. Ayrıca nitrokarbürleme, sulfonitrürleme, sulfonitrokarbürleme, oksinitrürleme gibi detay alt gruplara da ayrılabilir (Tablo 2.3) [1,2].

Tablo 2.3 Nitrürleme yöntemleri [2]

İşlem	Tanımlama	İşlem Durumu	Örnek
Nitrürleme	Termokimyasal işlemlerle iş parçasının yüzeyinin azotla zenginleştirilmesi (Nitrürleme şartlarına bağlı olarak difüzyon zonu veya difüzyon+bileşik (beyaz), tabakası elde edilir).	Gaz Plazma	NH ₃ , NH ₃ +N ₂ (H ₂) N ₂ +H ₂
Nitrokarbürleme	Termokimyasal işlemlerle iş parçasının yüzey tabakasının azot ve karbonla ve bu elementleri içeren bileşik tabakasının altında zenginleşmesi. Bunun altında bulunan difüzyon zonu azotla zenginleşmiştir.	Tuz Banyosu Gaz Plazma Toz	Siyanür/siyanür içeren eriyik NH ₃ +CO/CO ₂ - içerikli ek gazlar N ₂ +H ₂ +CH ₄ Kalsiyumsiyanamid +Aktivatör
Sulfonitrürleme	Termokimyasal işlemlerle bir iş parçasının yüzey zonu azot ve kükürt ile zenginleşmiştir.	Gaz (Plazma)	
Sulfonitrokarbürleme	Termokimyasal işlemlerle bir iş parçasının yüzey tabakasının azot, karbon ve kükürt ile bunları içeren bileşik tabakasının altında zenginleşmesi	Tuz Banyosu (Plazma)	Siyanür/Siyanür içerikli eriyik+kükürt
Oksinitrürleme	Termokimyasal işlemler sonucu yüzey tabakasının azot ve oksijenle zenginleşmesi.	Gaz	NH ₃ +Su (buhar)

Nitrürlemede, genelde bir bileşik tabaka (beyaz tabaka) ve bunun altında bulunan difüzyon zonundan oluşan bir yapı meydana gelir (Şekil 2.2). Nitrür tabakası, difüze olan element (veya elementler) ile ana malzemenin bir veya daha fazla elementinin oluşturduğu bir veya birden fazla kimyasal bileşikten meydana gelir. Bu tabakanın altında, azotun demir kafesindeki boşluklarda çözünmesiyle demirnitürden oluşan difüzyon tabakası bulunur. Çelik içindeki alaşım elementleri ve oranlarına göre, beyaz tabaka altında M_xN_y türü sert nitürler oluşmaktadır. Difüzyon tabakası, özellikle Ti, Al, V, Cr, Mo ve W gibi nitür yapıcı alaşım elementlerinin, değişik sıcaklık aralıklarında metal nitürler halinde çökeldiği zondur.



Şekil 2.2 Nitrülenmiş malzeme mikroyapısı [9].

2.1.4.6.1. Nitrülmenin amacı ve uygulama alanları

Nitrülmenin uygulanma amacı; malzeme yüzeylerinin aşınma direncinin artırılması, korozyon dayanımının artırılması, yorulma dayanımının yükseltilmesi, yüksek hız çeliğinden imal edilmiş kesme takımlarında, soğuk ve sıcak iş çeliklerinde kullanım (servis) ömrünün uzatılmasıdır.

Aşınma ve korozyon davranışı bileşik/beyaz tabaka ile belirlenir. Mekanik özelliklerin yükseltilmesinde difüzyon zonu da uygun katkıyı yapar. İyi korozyon dayanımı, kural olarak, bileşik tabakasının porozitesiz olması şartına bağlıdır. Nitrüleme veya nitrokarbürleme ile çeliklerin yorulma mukavemetinin arttığı kesin olarak bilinmektedir.

Otomobillerde dişli kutuları, takım elemanlarında (kesme kalıp takımları, kalıplar), basınçlı döküm parçaları, pres parçaları, hidrolik parçalar, plastik üreten ve işleyen parçalar, kamera ve projektör parçaları gibi küçük parçaların aşınmaya korunmasında kullanılmaktadır [9].

BÖLÜM 3. PULSE PLAZMA TEKNOLOJİSİ

3.1. Giriş

Son yıllarda malzemelerin yüzey özelliklerini geliştirebilen endüstriyel yüzey işlemleri için talep artmaktadır [30]. 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 [31-33]. 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 [34].

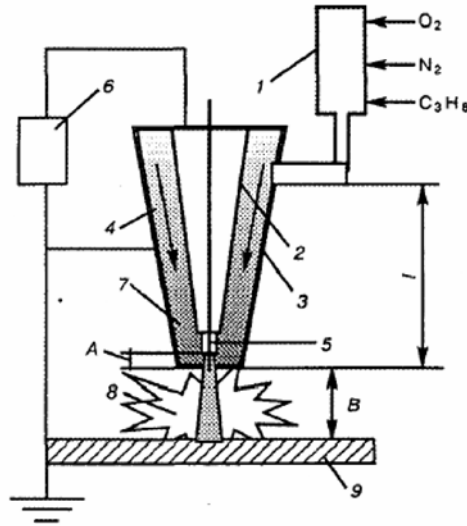
3.2. Pulse Plazma

Yüksek akımlı elektronlar çok kısa zaman içinde metalik alaşımların yüzeyinde metastabil fazların oluşumuna neden olmaktadır [35-37]. Yüzey malzemesinin mikroyapısı, kompozisyonu değiştirilmeden modifiye edilebilmektedir. Bu değişim, dönüşüm sertleşmesi ya da ergimeyi takiben hızlı katılaşma ile sağlanır. Hızlı katılaşmanın pek çok yararı vardır [38-39]. Bu yararlar düşünülerek geliştirilen bir prosestir pulse plazma.

Pulse plazma teknolojisi ve ekipmanları parçaların yüzey modifikasyonu için geliştirilmiştir [44-47]. Esas olarak yoğun enerjili pulse kullanımı malzemenin işlem yüzeyinde morfolojinin değişimine yol açarak modifikasyona sebep olmaktadır [46-49].

Enerjik ışınlar, iyon elektron gibi ışınlar ve plazma çok önemli yüzey modifikasyon teknikleridir. Bu teknikler, kısa sürede metal yüzeyinden sınırlı derinliğe kadar enerji depozisyonuna imkan tanıyan yüksek yoğunluklu enerjinin oluşumuna imkan tanır [40-43].

Pulse, yoğun elektron ışını malzemelerin mikroyapısının ve faz kompozisyonunu değiştirerek yüzey özelliklerini geliştirmektedir [50-52]. Bu teknoloji yüzeyde homojen bir tabaka oluşumuna sebep olmaktadır [17]. Şekil 3.1'de pulse-plazma cihazı şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Pulse-plazma cihazı şematik görünümü; 1-elektrodlar arası boşluk, 2-merkez elektrod-anod, 3-detonasyon odasının plazmatron birleşimi, (gaz girişi), 4-yan konik elektrodlar, 5-nozul ucu, 6)güç ünitesi, 7-elektrodlar arası boşluk, 8- pulse plazma oluşumu, 9- iş parçası [44].

Detonasyonunun başlangıcında;

1) İyonize yanma ürünleri detonasyon odasından (3) elektrodlar arası boşluklara (1) doğru besleme yapılı.

2) Böylece elektrik akımı meydana gelir. Bu elektromagnetik ve gaz-dinamik güçlerin etkileri altında hızlandırılmış yanma ürünlerinin iletken tabakasının (7) oluşumuna yol açmaktadır.

3) Tüklenen metal elektrod(2), merkez elektrodun(1)ekseni boyunca sabitlenmiştir. Isınma esnasında çubuğun sonu buharlaşır ve bu plazma jetine alaşım elementlerinin girişini sağlar.

4)Anod olan elektrod ve katod olan çalışma parçasının arasında plazma jeti akımı tamamlar.

Pulse plazma sisteminde kullanılan plazmatron görüntüsü Şekil 3.2 (a) ve (b)'de verilmektedir.

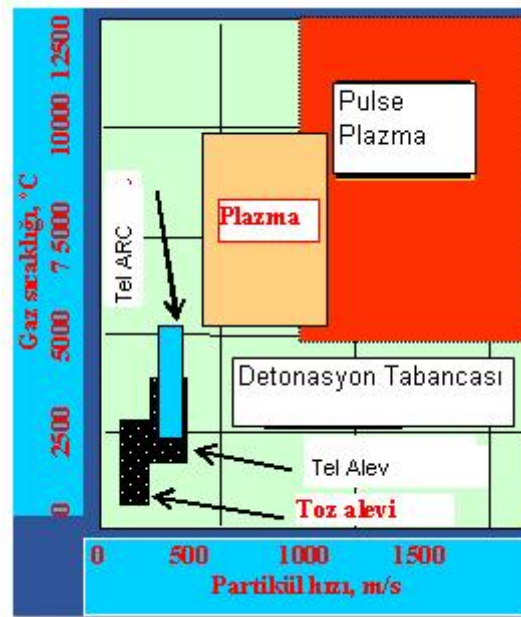


a)

b)

Şekil 3.2 a) İşlem esnasında plazmatron görüntüsü, b) plazmatron görüntüsü

Pulse plazma teknolojisi ile oksit ve karbürlerden yapılan yüksek performanslı kaplamaların deposizyonu, araç ve makine parçalarının yüzeylerinin sertleştirilmesine sağlar [53]. Özellikle bu kaplamalar çeliklerin korozyon dayanımlarını son derece iyi bir biçimde geliştirmektedir [51]. Bu gelişmeler, endüstriyel açıdan birçok sorun teşkil eden problem için umut verici olabilir. Bu teknoloji bilinen diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında, makine ve parçalarının yüzeylerinin hazırlanmasına gerek olmaması, yüksek verimlilik sağlaması, randımanlı proses evresi ile büyük avantaj sağlamaktadır. Ayrıca uygulanma koşulları kıyaslandığında Pulse Plazma şartlarının üstünlüğü dikkat çekicidir. Şekil 3.3'de çeşitli yöntemlerin kıyaslanması görülmektedir.



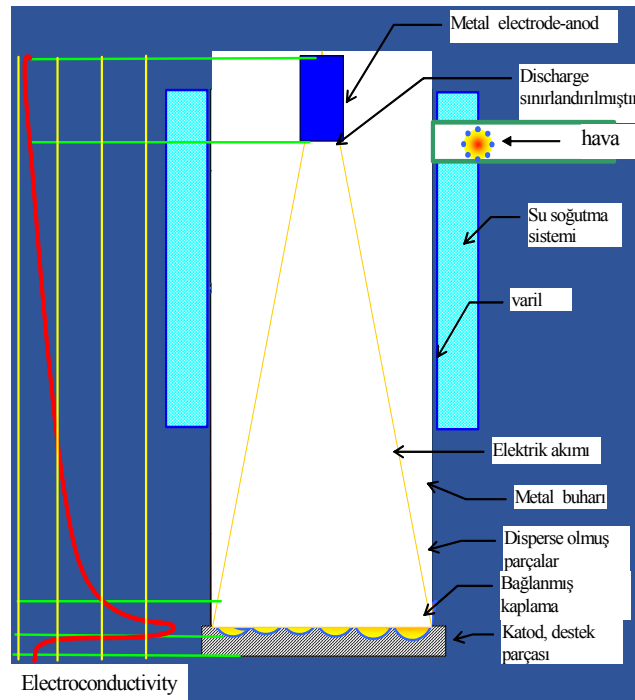
Şekil 3.3 Farklı yöntemlerin kıyaslama diyagramı [43]

3.3. Pulse Plazma Teknolojisinin Çalışma Prensibi

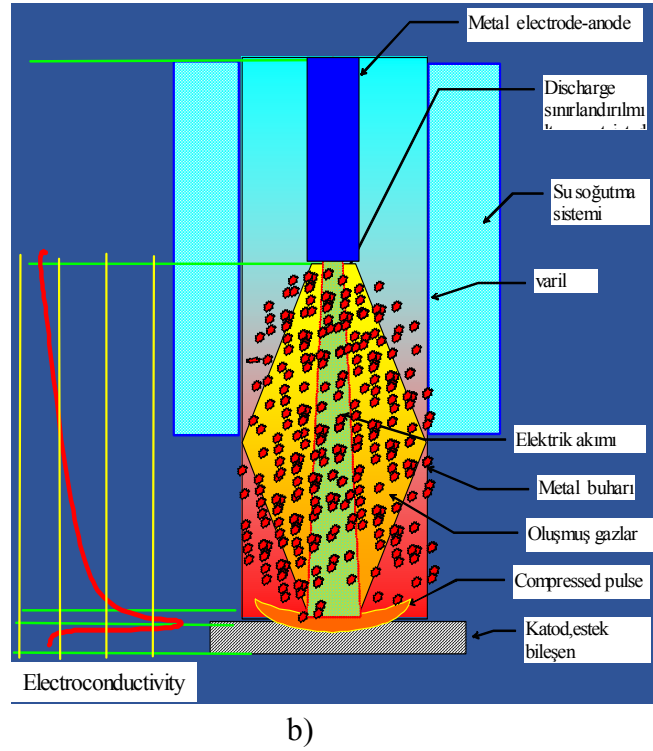
Konsantre enerji kaynaklarıyla (lazer, elektron demeti, plazma v.s gibi) yüzey işlemleri sıklıkla araç gereçlerin sertleştirilmesi için inşa edilmiş proseslerde kullanılmaktadır [54-56]. Bu, parçaların yüzeylerinin aynı mekanik ve fiziksel özellikler kazanmasına neden olmaktadır (yüksek sertlik, aşınma dayanımı, yorulma dayanımı, korozyon direnci v.s gibi) [57]. 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 [58-60]. Hızlı ısınma ve soğuma sonucunda dengede olmayan amorf nanokristalin yada metastabil fazlar oluşmakta ve bu fazlar tribolojik özellikleri geliştirmektedir. Sertlik artmaktadır [61-63]. Hızlı ısınma ve soğuma çeliklerin yalnızca yüzey tabakalarında ostenit fazının oluşumuna imkan tanır. Ostenitin korozyon dayanımı martenzitten daha iyidir [64]. Bu sebeple korozyon dayanımının arttığı literatürde belirtilmektedir.

Uzun yıllardır malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesinde yüksek yoğunluklu pulse plazma ışını kullanılmaktadır [65-66]. 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 ve yada önceden depoze olmuş atomlar oluşur [62].

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 3.4 (a) ve (b)' de gösterilmektedir.



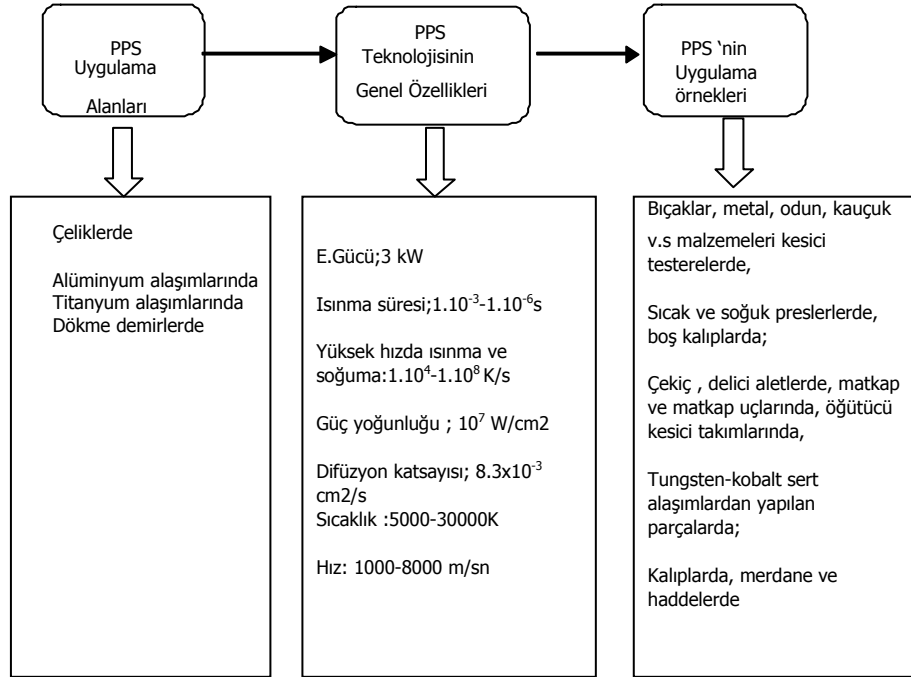
a)



Şekil 3.4 a) Pulse plazma ile modifikasyon oluşum mekanizması (1)
b) Pulse plazma ile modifikasyon oluşum mekanizması (2) [43]

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 [44].

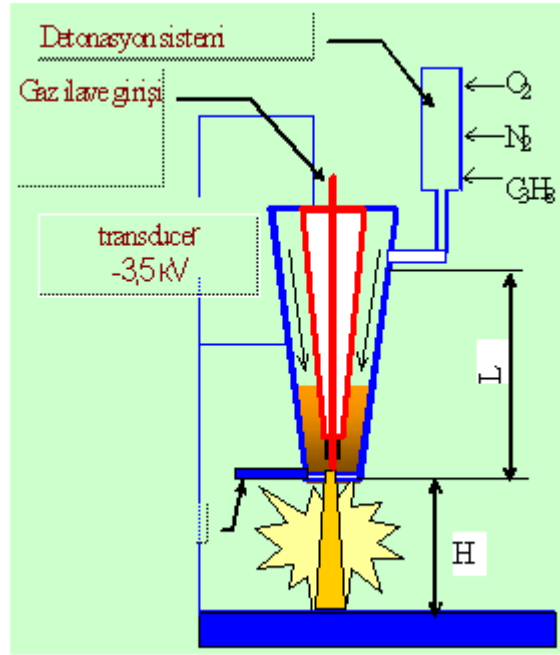
Pulse işlemi ile kütle transfer katsayısı artar ve tane boyutuyla direkt alakalıdır. Pulse sayısı arttıkça tane boyutu düşer. En ilginç bulgu ise; farklı pulse işlemi metodlarının yüzey üzerinde benzer etkiyi yapması ve sinerjik bir özellik olan kütle transferinde önemli bir artışa yol açmasıdır [44-45]. Şekil 2.5’de pulse plazma teknolojisinin genel bir özeti verilmektedir.



Şekil 3.5 Pulse plazma teknolojinin genel özeti

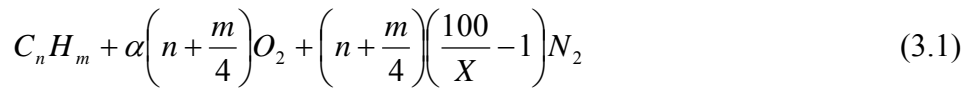
3.3.1. İş parçası yüzeyi ile pulse plazma etkileşimi

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 3.6).



Şekil 3.6 Plazma detonasyon ekipman düzeni [44]

Demir esaslı alaşıma sahip bir iş parçasının pulse plazma işleminde mikro-kristalli bir alaşım tabakası meydana gelir. Bu tabakanın yapısı plazma kompozisyonuna ve işlemde kullanılan pulse sayısına bağlıdır. Şekil 3.7 (a) ve (b)'de işlem sonrası pulse sayısına bağlı olarak değişen tabakalar görülmektedir. 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 sayıdaki 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.[44].

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 [68]. Metal parçalarının aşınma yüzeylerinde yüksek-alaşımli mikrokristalin tabakaların üretimi parçaların performanslarının (3-10 kat) önemli derecede artışına yol açmaktadır [69-70].

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,

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

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

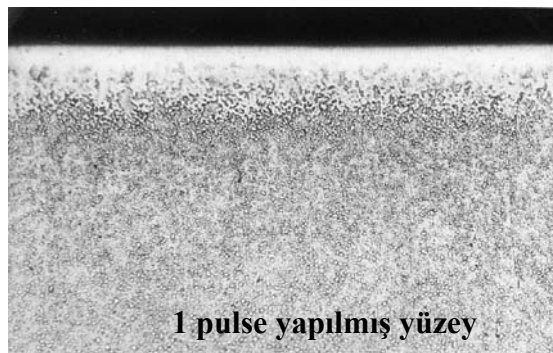
Yukarıda ki denkleme göre yapıda fazla olan boşlukların ortalama konsantrasyonunun artmasına sebep olur [44].

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.

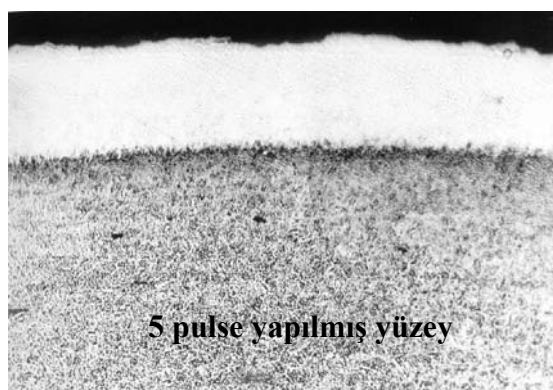
Yalnızca pahalılık, yetersiz sonuçlar ve yüksek üretim maliyetleri değil ayrıca, enerji, malzeme, üretim kapasitesi diğer sorun teşkil eden konulardır. Pulse plazma teknolojisi ile bahsi geçen dezavantajlar ortadan kaldırılarak malzemelerin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi mümkündür.

3.3.2. Pulse plazma uygulama örnekleri

Pulse plazma çok yeni bir teknolojidir, bu konuda ki araştırma çalışmaları devam etmektedir. Bu konuda çalışan araştırmacılardan Kolisnichenko'nun yaptığı bir çalışmada; %0.8 C ihtiva eden (U8-Ukrayna'da kullanılan çelik türü) bir çelik türünün yüzeyi pulse plazma ile modifiye edilmiştir. Çelik numuneye yapılan modifikasyon işlemi sonrası kesitten alınan fotoğraflar Şekil 3.7'de görülmektedir.



a)

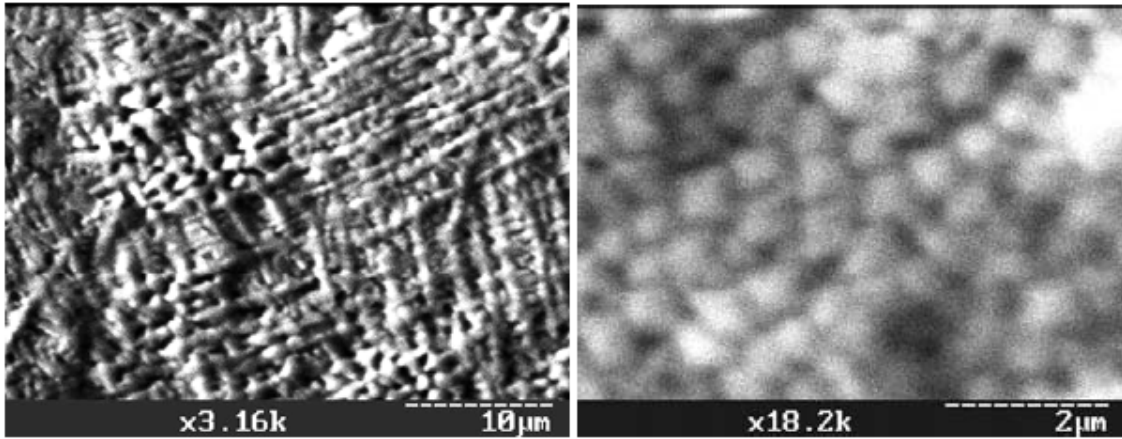


b)

Şekil 3.7 a) 1 Pulse uygulanmış modifikasyon tabakası görünümü, b) 5 Pulse uygulanmış modifikasyon tabakasının görünümü [44].

Çalışmada farklı sayıda pulse uygulanmış ve bu sayı farklılıklarının modifikasyon tabakasına etkisi incelenmiştir. Şekil 3.7a'da 1 pulse, Şekil 3.7b'de 5 pulse etkisi görülmektedir. Yapılan bu çalışma sonunda pulse sayısının modifikasyon tabaka kalınlık değerlerini etkilediği belirlenmiştir.

Yine aynı çelik grubuna uygulanan pulse plazma sonrası yapılan deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür ki; 5 pulse sonrası tane boyutu 1mm iken (Şekil 3.8a), pulse sayısı 15'e çıktığında tane boyutları 300nm'ye (Şekil 3.8b) kadar düşmüştür. Tane boyutunun bu kadar azalması mekanik özellikleri çok olumlu biçimde etkileyecek bir gelişmedir.

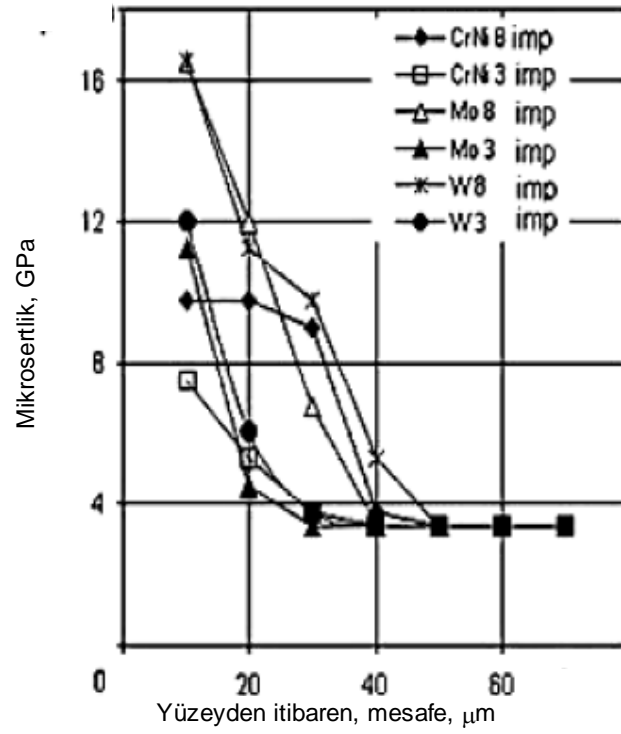


a)

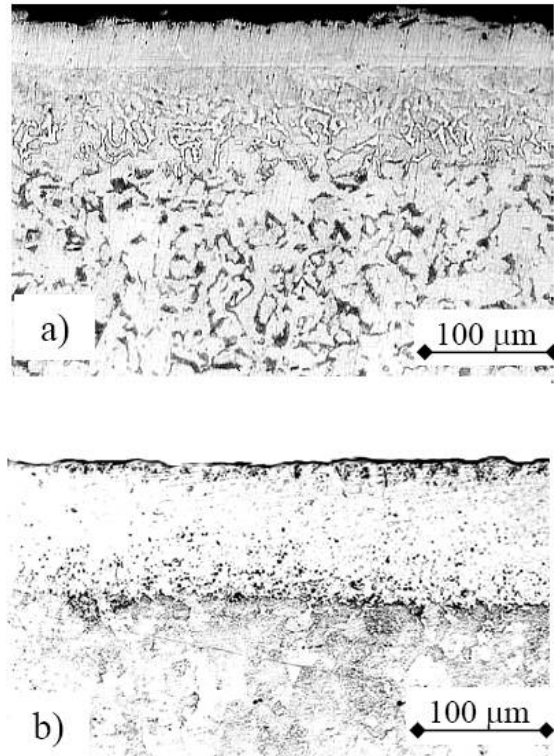
b)

Şekil 3.8 Pulse plazma sonrası modifikasyon tabakasından alınan SEM görüntüsü, a) 5 pulse, b)10 pulse[44]

Pulse sayısı gibi pulse plazma sisteminde kullanılan tükenen elektrodun da son derece önemli olduğu belirtilmektedir. Tyurin ve arkadaşlarının %0.74 C, % 0.85 Mn, % 0.2-0.4; Si , % 0.15 - 0.35; Cr ihtiva eden bir çelik grubuna farklı elektrodlar uygulayarak yaptıkları çalışma sonucunda, en yüksek sertlik değerlerinin wolfram ve molibden elektrod kullanarak elde edileceğini ve yine sertlik artışında diğer bir etkeninde pulse sayısının artması olduğu belirtilmiştir. Şekil3.9'da bu çalışma sonucu görülmektedir.



Şekil 3.9 Farklı elektrod ve pulse sayısının mikrosertlik üzerine etkisi[44]



Şekil 3.10 Pulse plazma sonrası modifikasyon tabaka görüntüleri, a)wolfram, b)titanyum[44]

Şekil 3.10’da wolfram ve titanyum elektrod kullanılarak yapılan çalışmalar sonrası yüzeylerden alınmış optik fotoğraflar görülmektedir. Wolfram elektrod kullanılarak modifiye edilen numunelerden alınan x-ışınları çalışmaları sonucunda, yapıda wolfram, α -Fe, γ -Fe fazları belirlenmiştir. Yüzeye uygulanan pulse sayısına bağlı olarak yüzeydeki wolfram miktarının değiştiği, ayrıca yüzeyden numune içine doğru yine wolfram miktarının azaldığı gözlemlenmiştir.

Kolisnichenko diğer bir çalışmasında, %0.35 C ve % 0.30 C ihtiva eden çelikler üzerine de pulse plazma uygulamış bu çalışmalar sonucunda da sertlik değerlerinde 3-4 kat artış olduğunu belirtmiştir. Yüksek hız takım çeliklerinde de başarılı uygulamalar yapabildiklerini açıklamışlardır.

Pulse plazma sadece karbon çeliklerine değil diğer demirdışı malzemelere de uygulanmıştır. Örneğin; Ti-6%Al-4%V (VT6) alaşımlarına pulse plazma uygulanarak yapılmış çalışmalar sonucunda ilk sertliği 3.696GPa olan numunelerin sertliği, 1 pulse’den sonra 5.031GPa, 5 pulse’den sonra 6.288GPa, 6 pulse’den sonra 7.688GPa ve 15 pulse’den sonra ise 8.199 GPa olmuştur. Çalışmalar sonucunda sertlik değerlerinin 3kat arttığı gözlemlenmiştir[44].

Modifikasyondan sonra, yüzeylerin sürtünme katsayısı 2-4 kat azalmakta, aşındırıcı şartlar altında aşınma dayanımı 2-3 kat ve ısı dayanımı 6 kat arttığı Tyurin’in tarafından ifade edilmiştir[43-44]. Yüksek karbon ve alaşım içeren çelik yüzeylerde modifikasyon tabakasının mikro sertliğini 1900 HV’e kadar çıkarabilmek başarılmıştır. Modifiye edilen tabakanın kalınlığı yaklaşık 20- 80 mikron olarak elde edilebilmektedir [43].

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 zimbaların 2-5 kat ve makine parçaların 3-5 kat tüketim miktarı azalmıştır [71-72]. Pulse plazma sadece düşük karbonlu çeliklere değil yüksek hız çeliklerine de uygulanarak özelliklerin geliştirmesi üzerine çalışmalar yapılmaktadır [45].

Pulse plazma uygulama örnekleri; yukarıda bahsedildiği üzere oldukça geniş kullanım alanına sahiptir. Pulse plazma teknolojisi ile yüzey modifikasyonuna uğrayan numune örnekleri Şekil 3.11’de verilmektedir.



a)



b)



c)



d)



e)



f)



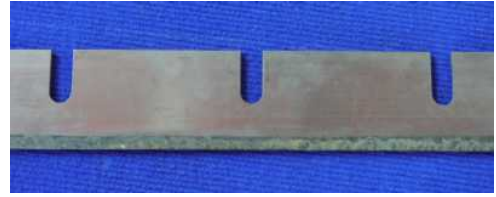
g)



h)



i)



i)

Şekil 3.11 Pulse plazma uygulama örnekleri a) Kesici bıçak, b) metal kesici bıçaklar, c)odun kesici bıçaklar, d)keskin oyucular, e)makine parçası, f)şeker kamışı kesici bıçaklar, g)kesici parçalar, h)testere bıçakları, ı) tahta kesici testereler, i)tahta kesici bıçaklar

BÖLÜM 4. KROM MOLİBDEN ÇELİKLERİ

4.1. Çelikler

Demir metallerin en ucuzudur ve alüminyumun yanında en çok bulunanıdır. Saf demir özel uygulamalar dışında kullanılamaz. Demir karbon alaşımına çelik, demir karbon ve çok az miktarda diğer elementlerin alaşımına ise sade karbonlu çelik adı verilmektedir. Sade karbonlu çeliklerin önemli olmasının nedeni sağlam, sünek, tok ve ucuz oluşlarıdır. Fakat bu çeliklerin korozyon dirençleri düşüktür. Karbon demirin en önemli alaşım elementidir. Karbon miktarındaki en ufak değişiklik bile özelliklere etki eder. Artan C oranıyla dayanım yükselir, süneklik çok şiddetli olmamak üzere düşer. Isıl işlem uygulanarak özellikleri iyileştirilebilir [74-77]. Çeliğe değişik oranlarda alaşım elementleri katılabileceği gibi, çeşitli işlemler (ıslah, normalizasyon vs.) ile iç yapı da kontrol edilerek kullanım amacına göre değişik özelliklerde çelik elde edilir.

Manganez (Mn), fosfor (P), kükürt (S) ve silisyum (Si) üretim sırasında hammaddeden kaynaklanan elementler olup, çelik bünyesinde belirli oranlarda bulunur. Diğer elementler ise (Cr, Ni vs.) ferro-alyajlar halinde istenilen miktarlarda çelik bünyesine ilave edilir [78-80].

Düşük alaşımlı çeliklerin iyileştirilmiş sıcakta dayanım karakteristikleri, özel karbür teşekkül ettiren Cr, Mo ve V gibi elementlerle alaşımlanmasından dolayıdır. Kuvvetli karbür teşekkül ettirici olarak molibden özel bir öneme sahiptir (Bu durum, yalnızca düşük alaşımlı çelikler için geçerli değildir)[79].

Endüstriyel malzemelerde yüzey mukavemeti son yıllarda dikkat çeken konu olmuştur [81]. Malzemelerin yüzeylerinde geleneksel olarak adlandırdığımız ısıl işlem yöntemleriyle sertlik ve tribolojik özellikleri artmaktadır [82]. Özellikle iyi

dayanım, tokluk, süneklik ve nispeten düşük maliyetli olmak çeliklerden beklenen özelliklerdir [74].

Çeliklerin büyük bir bölümü çeşitli yöntemler ile metal ile kaplanmaya, emaye yapılmaya, boyanmaya ve plastik maddeler ile kaplanmaya elverişlidir [78].

4.2. Alaşımli Çeliklerin Sınıflandırılması

Geniş aralıklarla üretilen alaşımli çeliklerin en verimli şekilde sınıflandırılması; çeliklerin önce uygulama alanlarına göre, daha sonra ise alaşım elementlerinin özelliklerine göre alt gruplara ayrılması ile sağlanır.

A. Yapı Çelikleri

- Manganez çelikleri
- Nikel çelikleri
- Nikel-Kromlu çelikler
- Nikel-Krom-Molibden çelikleri
- Nikel-Krom-Vanadyum çelikleri
- Molibden çelikleri
- Krom-Molibden çelikleri
- Krom çelikleri
- Silikon çelikleri

B. Aşınmaya Dirençli Çelikler

- Nikel çelikleri
- Krom-Molibden çelikleri
- Paslanmaz çelikler

C. Isıya Dirençli Çelikler

D. Mıknatıs çelikleri

E. Kalıp çelikleri [80].

4.3. Krom-Molibden Çelikleri

41XX alaşım serini oluşturmak için küçük miktarda molibdenin yanı sıra %0.5-0.95 oranında krom ilave edilir. Krom ilavesi aynı karbon miktarına sahip karbonlu çeliklerin sertleşebilirlik, dayanım ve aşınma direncini daha da artırır. Buna karşın düşük alaşımlı yapı çeliklerine kromun ilave edilmesi bu çeliklerin aynı şartlar altında temper kırılma eğilimini artırır.

Krom ve molibdenli düşük alaşımlı çelikler iyileştirilmiş sertleşebilirliklerinden dolayı martenzit oluşturmak için suda soğutmanın yerine yağda soğutulabilirler.

4.4. Mikroyapı

Tablo 4.1 AISI 4140 çeliğinin kimyasal kompozisyonu

Alaşım elemanları yüzdesi %	C	Si	Mn	P<	S<	Cr	Mo	Ni
AISI 4140	0.40	0.15 0.40	0.50 0.80	0.035	0.035	0.90 1.20	0.15 0.30	

4140 çeliğine ait kimyasal kompozisyonu Tablo 4.1'de verilmektedir. AISI 4140 alaşımının mikro yapısı blok ferrit ve kaba perliti sınırlayan ferritten oluşmuştur. Temperleme ile ince temperlenmiş martenzitik yapı oluşturur.

4.5. AISI 4140 Çeliğinin Özellikleri

Aşağıdaki tablolarda AISI 4140 çeliğinin genel özellikleri özet biçiminde verilmektedir.

Tablo 4.2. AISI 4140 çeliğinin mekanik özellikleri [84]

Mekanik Özellikler		İşlem	
	T°C	T°C	
Yoğunluk	7.7-8.03	25	
Poisson's oranı	0.27-0.30	25	
Elastik modül	190-210 (GPA)	25	
Çekme mukavemeti	655	25	815°C tavllanmış
Akma mukavemeti	417	25	
Uzama %	25.7	25	
Bölgesel daralma%	56.9	25	
Sertlik HB	197	25	815°C tavllanmış
Çarpma dayanımı	54.5	25	815°C tavllanmış

Tablo 4.3 AISI 4140 çeliğinin termal özellikleri [84]

Termal Özellikler		İşlem	
	T °	T°	
Termal genişleme (10 ⁻⁶ /C°)	12.3	20-100	Yağda sertleştirilmiş, 600 °C temperlenmiş
Termal iletkenlik (W/m-K)	42.7	100	
Spesifik ısı(J/kg-K)	473	150-200	

Tablo 4.4 AISI 4140 çeliğinin elektriksel özellikleri[84].

Elektriksel Özellikler		Şartlar	
		T (°C)	İşlem
Elektrik direnci (10 ⁻⁹ Ω-m)	222	20	

4.6. Kullanım Yerleri

Yüksek özlülük isteyen otomobil inşaat ve ziraat makinaları, takım tezgahları, uçak parçaları, akslar, krank kolları, krank milleri, dişliler, bandajlar, 12K şartlarına uygun civata, somun, saplama vb. parçalar. Bu çelikler mukavemet çarpma dayanımının gerekli olduğu yerlerde kullanılmaktadır [83]. Aynı zamanda alev veya endüksiyonla yüzeyden sertleşebilirler [85].

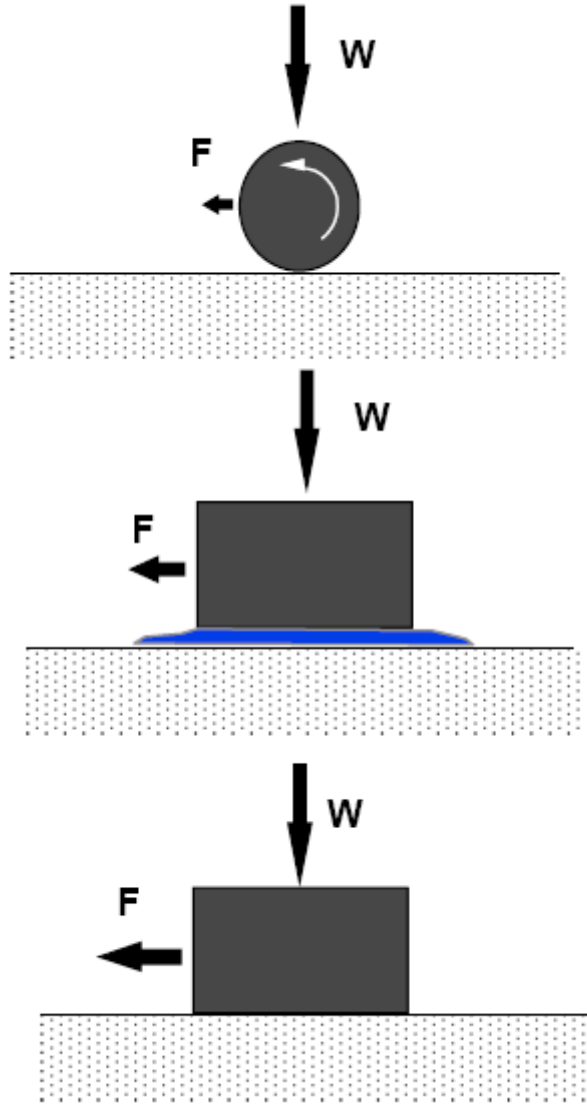
BÖLÜM 5. AŞINMA

5.1. Sürtünme ve Sürtünme Teorileri

Sürtünme, temasta olan ve izafi hareket eden iki cismin temas yüzeylerinin harekete karşı gösterdiği dirençtir. Genelde tanımlanan sürtünme her türlü yabancı maddeden arındırılmış yüzeylerin mutlak vakumdaki hareketlerini ifade eder. Fakat mevcut sistemlerin çoğunluğu normal atmosfer şartlarında çalışmaktadır [86-91].

Malzemeler arasındaki sürtünme olaylarını izah ve formüle etmek için tarihsel gelişim içerisinde birçok teori ileri sürülmüştür. İlk zamanlar, sürtünme katsayısının pürüzlerin eğim açısının tanjantı ile ilişkili olduğu düşünülmüş, daha sonraları sürtünmede, iki katı arasındaki moleküler çekim kuvvetinin de etkili olduğu açıklanmıştır. Bunlar arasında Amontos ve Coulomb'un teorileri önemlidir. Colulomb, sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu gözlemlemiş ve statik sürütünme katsayısını kaymaya başlama kuvveti ile, kinetik sürtünme katsayısını da hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir. Bu teorilere göre:

- 1) Sürtünme kuvveti, normal yükü orantılıdır.
- 2) Sürtünme kuvveti, geometrik temas alanına bağlı değildir.
- 3) Sürtünme kuvveti , kayma hızına bağlı değildir.
- 4) Statik sürtünme katsayısı, dinamik sürtünme katsayısından daha büyüktür [90].



Şekil 5.1 Sürtünme teorileri [94]

Bunun sonucunda aşağıdaki ifade çıkarılmıştır:

$$\mu = F/W \quad (4.1)$$

μ = sürtünme katsayısı

F = Sürtünme Kuvveti

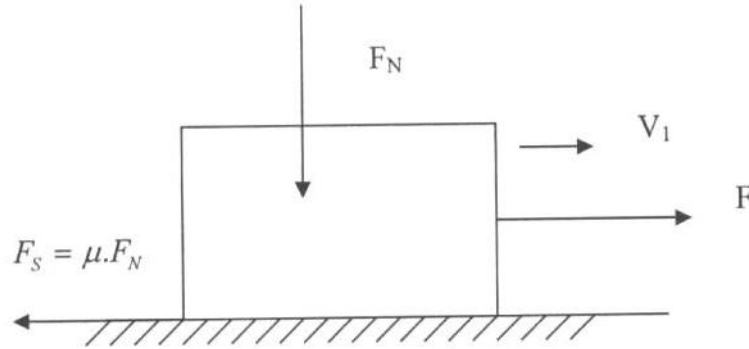
W = normal kuvvet

Sürtünme olayı kuru, sıvı, sınır olmak üzere üç halde incelenir. Genel anlamda kuru sürtünme, birbirine göre izafi harekette bulunan ve doğrudan temasta olan iki yüzey arasında oluşan sürtünmedir. Yüzeyler arasında bir yağlayıcı 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 (Şekil 5.1).

5.1.1. Kuru sürtünme

Şekil 5.2’de gösterilen şekilde; izafi hareket yapan ve normal bir kuvvetin F_N etkisi altında bulunan iki cismin temas yüzeyleri arasında harekete karşı $F_s = \mu \cdot F_N$ değerinde bir sürtünme kuvveti oluşur. Burada μ sürtünme katsayısıdır. Genel ifadeye göre sürtünme izafi hareket yapan veya hareket yapabilme olanağına sahip yüzeylerde oluşur. Şekil 5.2’deki gibi cisme teğetsel bir F kuvveti tatbik edilirse iki durum ortaya çıkabilir. Birinci durumda $F_s > F$ yani sürtünme kuvveti F kuvvetinden büyük olabilir. Kavrama, fren gibi sürtünme esasına göre çalışan elemanlarda bu sürtünme hali vardır ve bu elemanların hesabı bu denkleme dayanır. İkinci durumda $F_s \leq F$ yani sürtünme kuvveti F kuvvetinden daha küçük olabilir. Kinematik sürtünme denilen bu halde, F kuvvetin etkisi altında yüzeyler birbirleri üzerinde kayarlar. Teknikte sürtünme hem istenilen hem de istenilmeyen bir olay olarak ortaya çıkar.



Şekil 5.2 Kuru Sürtünme Modeli [87].

Coulomb- Amontons kanunu olarak tanınan bağıntısına göre sürtünme katsayısı,

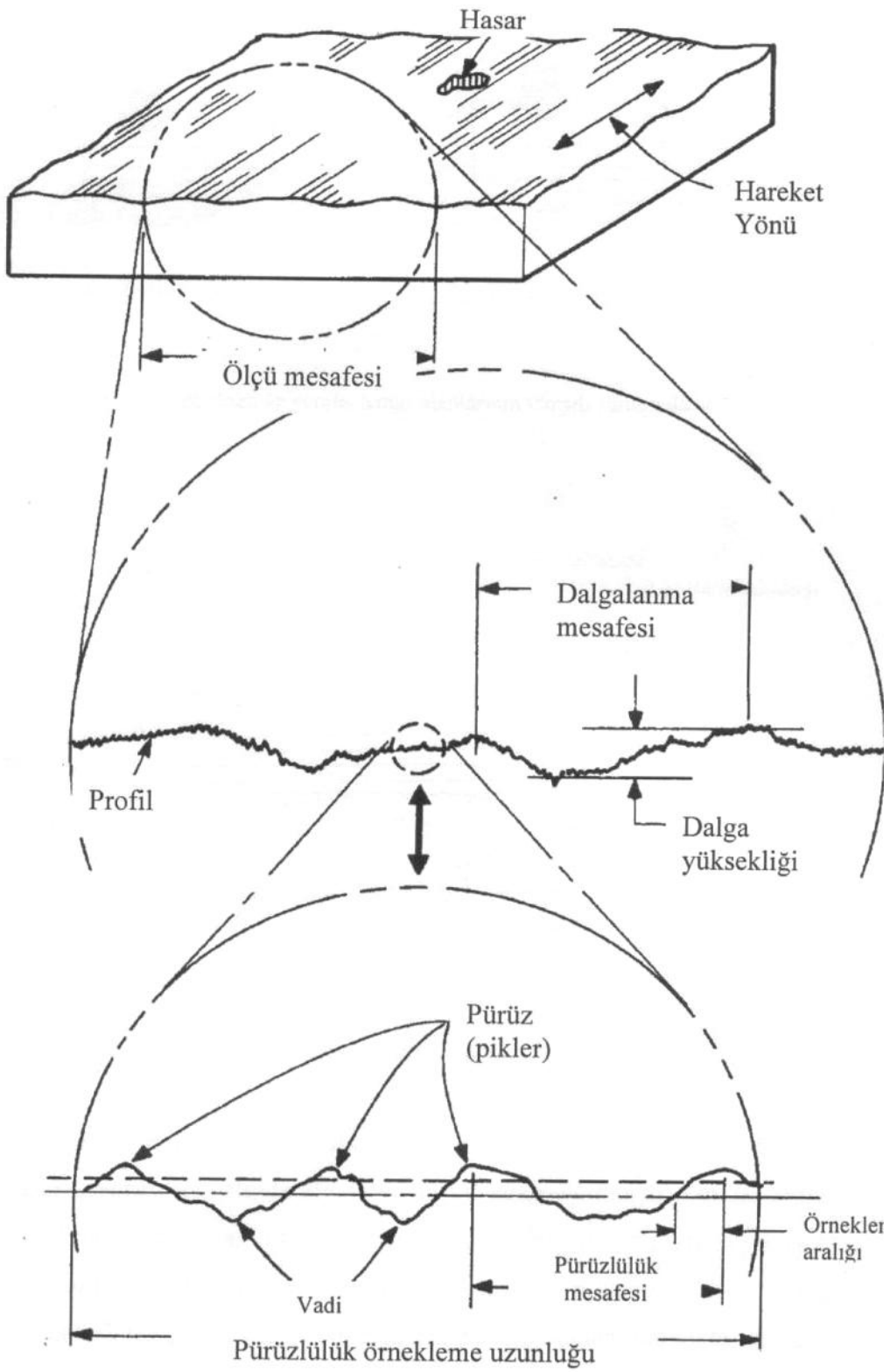
$$\mu = \frac{F_s}{F_N} \quad (4.2)$$

şeklinde ifade edilir. Sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcındadır. Sürtünme olayları incelenirken temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve tam temiz olmadıkları gibi hususlar göz önünde tutulmalıdır. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de görüldüğü gibi yüzeyler birbiri ile pürüzlerinin tepelerinde temas etmektedirler. Bu küçük temas alanlarının toplamı A gerçek temas alanını oluşturmaktadır. Bu alan temas yüzeyinin sınırlarını tayin eden A geometrik alandan daha küçüktür.

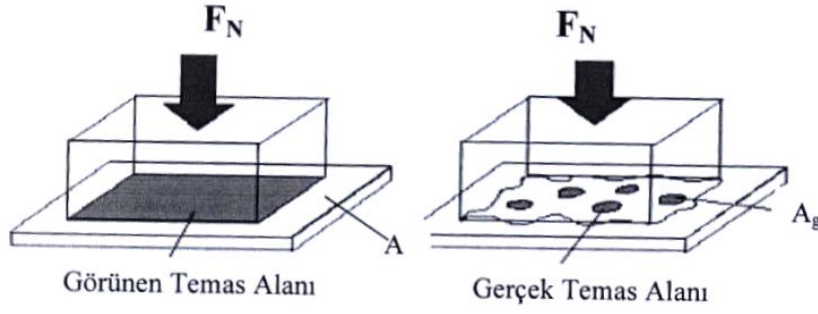
Sürtünme ve aşınma üzerine yapılan çalışmalara ve binlerce yıldır bu olguların varlığının bilinmesine rağmen, başlangıçları, kökenleri ve davranışları hala tam olarak anlaşılammıştır.

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.



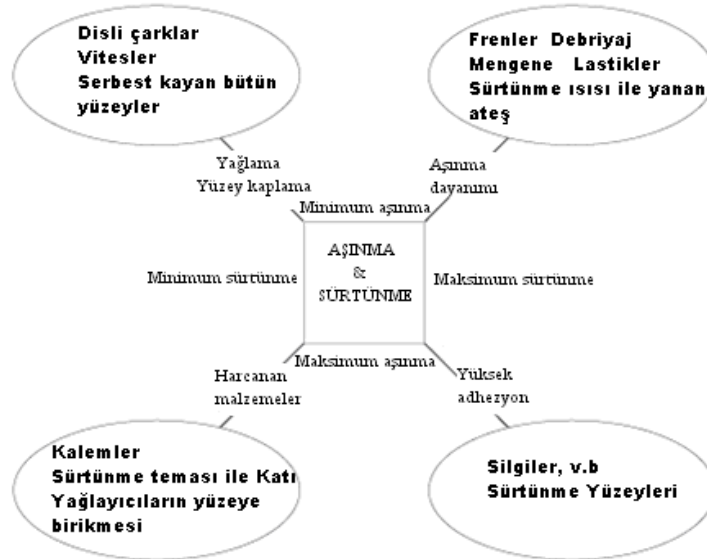
Şekil 5.3 Bir malzemenin yüzey pürüzlülüğünün büyütülerek temsili gösterimi[87].



Şekil 5.4 Sürtünme yüzeylerinin görünür ve gerçek temas alanlarının temsili sunumu [87].

Sürtünmenin etkileri belirlendiğinden veya fonksiyonları kontrol edildiğinden beri tasarım ve üretim sürecinde, malzemenin sürtünme özellikleri dikkate alınarak, cihazın ömrü ve verimliliği belirlenmektedir.

Örneğin otomobillerde fren ile yavaşlama-durma esnasında aşınma oranının düşük, buna karşın sürtünme değerlerinin yüksek olması istenmektedir 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. Kullandığımız kalemlerde sürtünmenin en az, aşınmanın ise yüksek değerlerde olması beklenir. Silgilerde ise hem sürtünme hem de aşınma yüksek olmalıdır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 Sürtünme ve aşınmanın istenen ya da istenmeyen özellikler olduğu ya da olmadığı bazı kullanım alanları.

5.1.2. Sınır sürtünmesi

Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulmadığı durumda sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0.02 ile 0.1 arasında değişir.

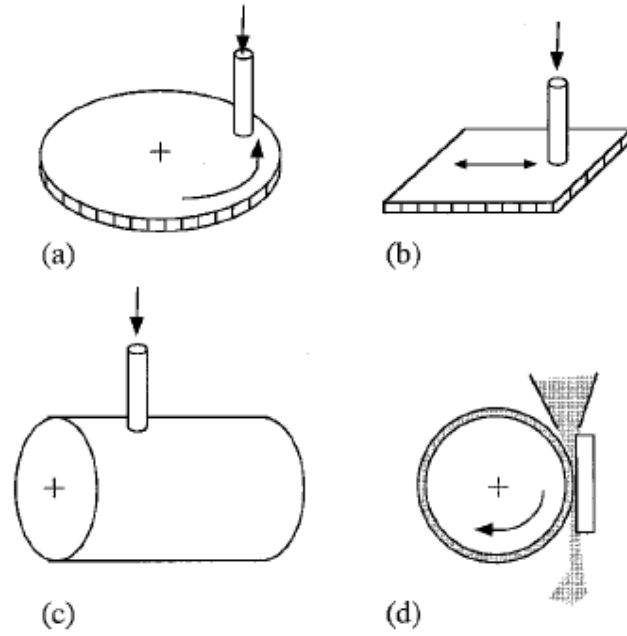
Yüzeyler arasına bir yağlayıcı madde konulması halinde yağlayıcı maddenin molekülleri adsorbsiyon olayının sonucu olarak madensel yüzeylere düzgün ve muntazam bir şekilde yapışırlar. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda görülmüştür ki, polar karbonlu hidrojenlerin molekülleri aktif karboksil grupları ile madensel yüzeylere bağlanmaktadır. Böylece yüzeyler üzerinde birkaç molekül tabakası kalınlığında adsorbsiyon tabakaları oluşmaktadır. Yağın bu özelliklerine yapışma kabiliyeti denir. Oluşan bu tabaka, tabii tabakada olduğu gibi, metalik yüzeylerin doğrudan temasa geçmesini önler. İyi bir yağlama sisteminde α çok küçük olduğundan sürtünme katsayısı,

$$\mu = \frac{\tau_{kf}}{\sigma_{kf}} \quad (5.3)$$

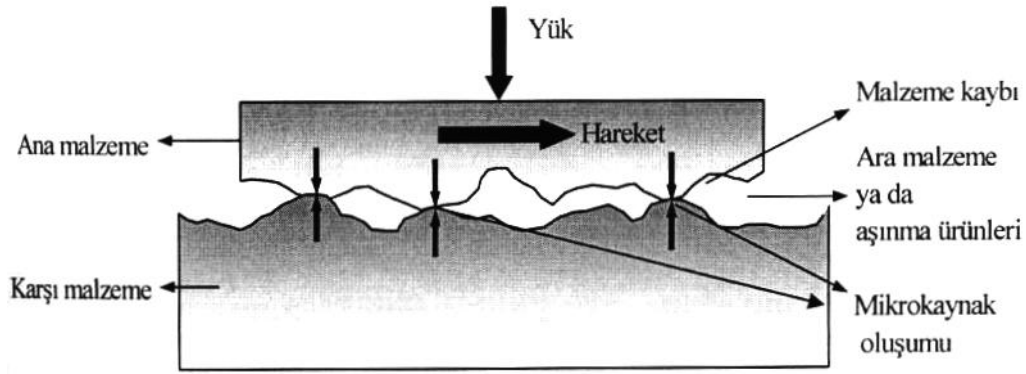
olarak bulunur. Burada önemli olan yağ tabakasının kopma ve kayma mukavemetleridir. Ucuz yağların oluşturduğu yağ tabakasının kopma mukavemetini büyütmek ve kayma mukavemetini azaltmak için yağlara katık denilen bir takım ek maddeler konulur. Genellikle organik yağlardan oluşan katık maddeleri yağ içerisinde çok az miktarda konulur. Bu maddeler metalsel yüzeylerle kimyasal reaksiyona girerler ve yüzeyler arasında, kopma mukavemeti yüksek olan yarı sıvı halinde madeni sabunlar meydana getirirler. Böylece sınır sürtünme, sırf adsorpsiyon tabakalarından oluşan fiziksel veya kimyasal reaksiyon sonucu meydana gelen tabakalarda oluşan kimyasal esasına dayanır [95].

5.2. Aşınma

Aşınma; bir malzemenin yüzeyinden katı, sıvı yada gaz bir başka malzemenin mekanik etkileşimi sonucu sürekli çok küçük parçaların kopması olarak tanımlanabilir [96-97-98]. Aşınmanın olabilmesi için iki yüzey arasında sürtünmenin gerçekleşmesi gerekmektedir. Katı yüzeyler oksit filmleri ile sınır tabaka yağlayıcıları ile korunsa bile, oksit filmlerinin mekanik yük altında parçalandığı yerlerde ve aktif sınır tabaka yağlayıcısının zayıf olduğu yerlerde, yer yer katı ile katı arasında temaslar oluşur. Bu temaslar aşınmaya neden olur (Şekil 5.6)



Şekil 5.6 Aşındırıcı deney yöntemlerinden birkaçının temsili gösterimi[87].



Şekil 5.7 Tribolojik sistemi meydana getiren unsurların şematik gösterimi ve mikro kaynak oluşum Noktaları[87].

Bir aşınma sistemi,

- a) Ana malzeme (aşınan)
- b) Karşı malzeme(aşındırıcı)
- c) Ara malzeme
- d) Yük
- e) Hareket

olarak beş ana unsurda incelenebilir. Bu sistemlerin tümü teknikte tribolojik sistemi meydana getirir ve Şekil 5.7’de gösterilmektedir. Aşınma ve bağlı nedenleri, sonuçları özet bir biçimde Şekil 5.8’de gösterilmektedir.

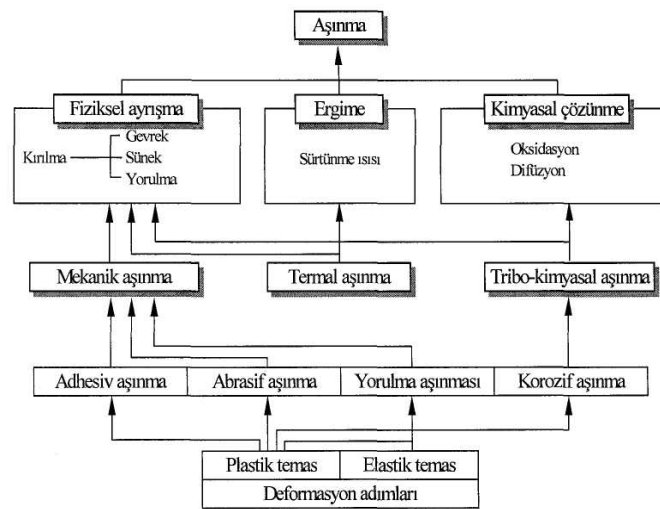
Uluslararası alanda kabul gören belli bir aşınma standardı olmamasına karşın DIN ve ASTM normları ile sınıflandırılmış birkaç aşınma deneyi mevcuttur. Bunlar:

- a) Hareketli çember üstünde blok (çember: aşındırıcı, blok: numune) ASTM G77
- b) Birbirine çapraz dönen silindir (aşındırıcı, silindir: numune)ASTM G83
- c) Disk üstünde pin (disk aşındırıcı, pin: numune)DIN 50320
- d) Yatay plaka üstünde pin (plaka: aşındırıcı, pin: numune) ASTM G98

Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıda dört grup halinde verilmektedir

- 1) Ana malzemeye bağlı faktörler

- a) Malzemenin kristal yapısı
 - b) Malzemenin sertliği
 - c) Elastisite modülü
 - d) Deformasyon davranışı
 - e) Yüzey pürüzlülüğü
 - f) Malzemenin boyutu
- 2) Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcı etkisi
- 3) Ortamın etkisi
- a) Sıcaklık
 - b) Nem
 - c) Atmosfer
- 4) Servis koşulları
- a) Basınç
 - b) Hız
 - c) Kayma yolu
- Aşınma;
- 1) Adhesiv aşınma
 - 2) Abrasiv aşınma
 - 3) Yorulma aşınması
 - 4) Koroziif aşınma olarak sınıflandırılmaktadır.

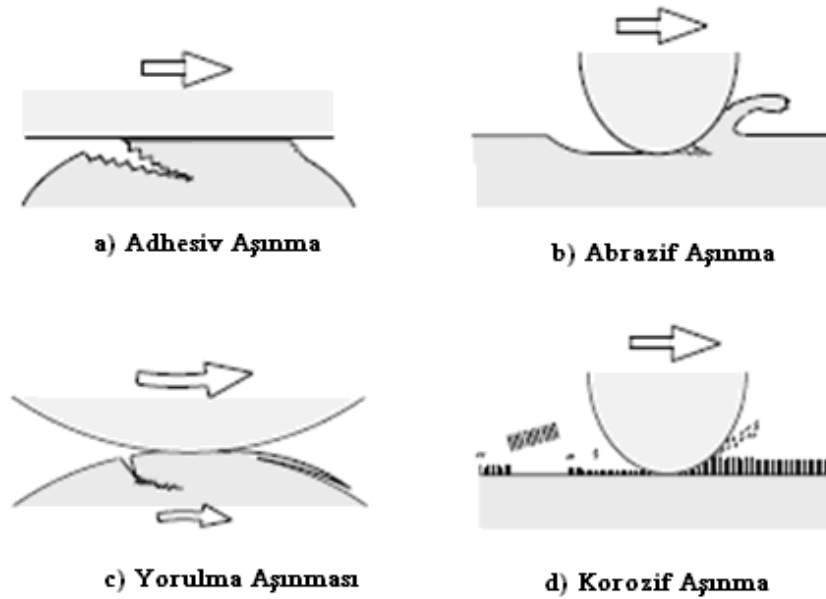


Şekil 5.8 Aşınmayı Tanımlayıcı Anahtar Kelimeler ve Birbirleri ile Etkileşimleri [90].

Malzemede oluşacak çatlak ya da hasar işte bu sert faz partiküllerinin karşı malzeme yüzeyinde oluşturacakları mikro-yarıklar ya da mikro-çatlaklar sebebiyle oluşuyorsa bu tür aşınmaya abrazif aşınma denir.

Malzemenin temas arayüzeyinde meydana gelecek hasar eğer ki güçlü adhezyon sonucu oluşuyorsa bu tür aşınma mekanizmasına adhesiv aşınma adı verilir. Yorulma çatlakları oluşumu tekrarlı sürtünme çevriminde meydana gelmektedir. Aşınma yüzey hasarının yorulma mekanizması ile meydana geldiği bu aşınma türüne ise yorulma aşınması denmektedir.

Hava da baskın olan korozif madde oksijen ise böyle bir ortamda metallerde meydana gelen tribokimyasal aşınma da oksidatif aşınma olarak adlandırılır. Yukarıda bahsedilen bu dört aşınmanın temsili gösterimi Şekil 5.9'da verilmektedir.



Şekil 5.9 Dört başlıkta incelenen aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi [99].

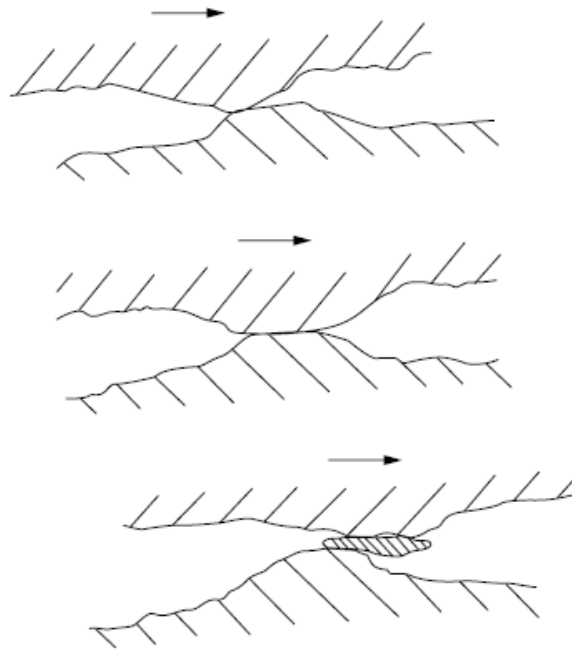
5.2.1. Adhesiv aşınma

Adhesiv aşınma, bir malzeme yüzeyinin bir başka malzeme yüzeyindeki bağlı hareketi sırasında birbirine kaynaşmış veya yapışmış yüzeydeki pürüzlerin kırılması sonucu ortaya çıkar. Adhesiv aşınma en yaygın aşınma türü olmasına karşılık aşınma

hasarlarını hızlandırıcı etkisi abrasiv aşınmaya kıyasla daha azdır. Malzeme yüzeyinde bulunan pürüzlülükler uygulanan yüke bağlı olarak bir çok noktadan birbirine temas eder. İki malzeme yüzeyi birbirine temas ettiği takdirde, yüzeylerde bulunan izler, düzensizlikler, malzemede bölgesel yüksek basınçlar oluştururlar ve yüzeydeki filmlerin kırılmasına neden olurlar.

Adhesiv aşınmanın etkisini azaltmak için yapılan bazı uygulamaların faydalı olduğu görülmüştür [97].

- Malzeme çiftleri düşük katı çözünürlüğe sahip olmalıdır.
- Aşınma hızını en düşük seviyeye indirmek için kopan metal parçalarının her birinin boyutu mümkün olduğu kadar küçük olmalıdır. Bunun sağlanması için temas alanının küçük olması gerekmektedir. Yük azaltılarak ta aşınma azaltılabilir. Sertlikte artırılarak temas alanını azalması sağlanarak aşınma azaltılabilir. Adhesiv aşınmanın şematik görünümü Şekil 5.10'de verilmektedir.

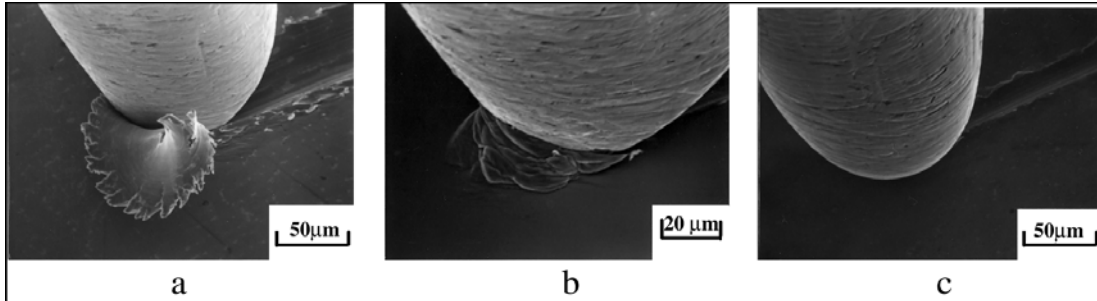


Şekil 5.10 Adhesiv aşınma mekanizması sonucunda aşınma partiküllerinin oluşumunu şematik gösterimi [99].

5.2.2. Abrasiv aşınma

Abrasiv aşınma biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbirleriyle temas halindeyken kayması sırasında meydana gelir. Yırtilan veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrasiv aşınma, sistemden hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Sert parçacıkların yumuşak metale batması abrasiv aşınmaya neden olabilmektedir. Sert partiküller sisteme ya dışarıdan girmekte yada aşınma ürünleri olarak sistem tarafından üretilmektedir [94].

Abrazyon boyunca yüzeyden malzemenin nasıl uzaklaştığının açıklanması amacıyla birçok mekanizmanın olduğu ileri sürülmektedir. Bunlar genel olarak kırılma, yorulma ve ergimedir. Abrasif aşınmanın meydana gelmesindeki karışıklıktan dolayı sadece bir tane mekanizma tüm malzeme kaybından sorumlu tutulamaz. Şekil 5.11’de tek bir abrasif ucun malzeme yüzeyinden geçerken oluşturduğu bazı abrasif aşınma tipleri gösterilmektedir. Bu tipler Kızaklama (Ploughing), Pulluklama (Wedge) ve Kesme (Cutting) olarak adlandırılır [98].



Şekil 5.11 Abrasif aşınma mekanizmasının üç tipi olan a) Kesme, b) Pulluklama, c) Kızaklama aşınmalarının SEM görüntüleri [98].

Kızaklama (Ploughing) türü aşınma, temastaki iki yüzeyin sertliklerinin birbirinden farklı olduğu durumlarda meydana gelir. Diğerine göre daha sert olan malzeme yüzeyindeki tepcikler daha yumuşak olan yüzeyin içine girer ve eğer ki bir hareket söz konusu ise yüzeyde yiv oluşumuna sebep olurlar. Kızaklama oluşumunun iki ana sebebi kısaca yüzeylerdeki tepcikler ya da temas bölgesinde bulunan sert partiküllerdir.

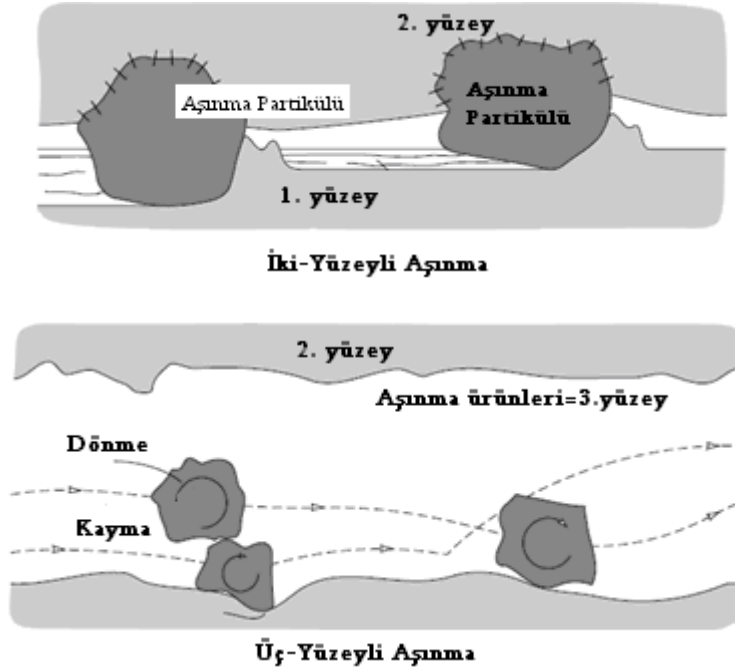
Kızaklama mekanizmasında malzeme, yüzeyde meydana gelen yivlerin kenarlarına toplanır. Bu düşük yüklerde meydana gelir ve herhangi bir malzeme kaybına yol açmaz. Hasar, malzemenin yüzeyinde soğuk deformasyon sebebiyle gelişen ve büyüyen dislokasyonlar sonucu meydana gelir. Eğer ki bu soğuk deformasyon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

Pulluklama, 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. Yumuşak malzemeler için en ağır aşınma mekanizması Kesme'dir.

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.

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.

Abrazyon tipik olarak temas ortamına göre olduğu gibi temas tipine göre de karakterize edilir. Temas tipleri iki-yüzey ve üç-yüzeyli aşınmayı kapsamaktadır. İki-yüzeyli temas, abrazif malzemenin tek yüzey üzerindeki hareketinde, üç-yüzeyli temas ise abrazifin iki yüzey arasındaki hareketinde meydana gelmektedir. Şekil 5.12 (a)ve (b)'de iki-yüzeyli ve üç-yüzeyli temas tipleri gösterilmektedir.



Şekil 5.12 a) İki-yüzeyle ve b)üç-yüzeyle abrazif aşınma tipleri [98]

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. Sıcaklık ve akış hızı arttıkça aşınma hızlanır. Katı parçacıkların bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda aşınma abrazif erozyon olarak adlandırılır. Katı parçacıkların bağıl hareketi katı yüzeye dik olduğundan ise aşınma çarpma (impact) erozyonu olarak adlandırılır. Erozyon 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.

5.2.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması değişken, tekrarlı yükler sonucu ortaya çıkar. Tribolojik zorlamalar genel olarak yüzeyde görülen, büyüklüğü zamana ve konuma göre değişken 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 neden olur.

Maksimum kayma gerilmelerinin bulunduğu yerlerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarınına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelir. Bu boşlukların zamanla yüzeye doğru ilerleyerek büyümesi yüzeyde küçük çukurların ortaya çıkmasına sebep olur. Bu tür aşınma çoğunlukla dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve yuvarlanma hareketi yapan mekanizmaların yüzeylerinde görülür [85].

5.2.4. Korozyon aşınması

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 malzemeden farklı davranmaktadır ki bu durumda katı yüzeyin korozif ortam ile etkileşimleri ile reaksiyon ürünlerinin oluşumu korozif aşınmayı meydana getirir [98].

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 [98].

Aşağıdaki tabloda aşınma türleri için aşınmanın azaltılmasında tavsiye edilen bazı bilgiler verilmektedir [99].

Tablo 5.1 Çeşitli aşınma türlerinde aşınmayı azaltmak için bazı öneriler[91].

<p><u>Kazımalı Aşınma</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Hareket kontrolü <ul style="list-style-type: none"> * Yükü azalt * Yağla • Gerilme kontrolü <ul style="list-style-type: none"> * Yükü artır * Bileşenleri bir arada tutmak için aparat kullan veya yapıştır. • Oksijeni at • Al veya Ti yerine Çelik kullan 	<p><u>Abrazif Aşınma</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Yükü azalt • Aşındırıcı parçacıkları uzak tut • Küçük aşındırıcı parçacıkları filtreden geçir • Sünekliğinden ödün vermeden küçük ama sert malzemeleri kullan
<p><u>Erozyon Aşınma</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Gaz hızını azalt • Mümkünse aşındırıcıyı uzaklaştır • Küçük aşındırıcı partikülleri filtre et • Sünekliğinden ödün vermeden küçük ama sert malzemeleri kullan • Düşük-erozyonlu vuruş açısı sağlamak için akışkan sıvıyı iyi dizayn et 	<p><u>Adhezif Aşınma</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • Hidrodinamik, elasto-hidrodinamik veya BL tipi yağlayıcı kullanmak • Yükü azalt • Yüzeyi düzleştir • HD yağlama mümkün değilse, katı polimerleri, yumuşak metalleri kullan • Düşük adhezyonlu malzemeleri seç • Değiştirilebilir malzeme kullan

5.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Katı yüzeylerin özellikleri temas alanı, sürtünme, aşınma ve sürtünme yüzey özelliklerini etkilediğinden yüzey etkileşimi son derece önemlidir. Ayrıca, tribolojik fonksiyonlar; yüzey özellikleri, optik, elektriksel ve termal performans, boyama, görüntü gibi diğer uygulamalar için önemlidir.

Yüzey tabakanın deformasyon derinliği ve miktarından mekanik davranışlarından etkilenmektedir. Teknolojik uygulamalar için, yüzeylerin makro ve mikro nanotopografisi önemlidir. Yüzeydeki sapsmalara ilaveten, katı yüzeyler ana yapıdan mahsus fiziksel-kimyasal özelliklere sahip çeşitli zonlardan oluşmaktadır. Metal ve alaşımların oluşum proseslerin sonucunda, Beilby tabakası olarak adlandırılan amorf ve mikrokristalin tabaka bölgesinin üstünde deforme olmuş malzeme veya sertleşmiş çalışma tabakası vardır. Bu tabakalar özelliklerinden dolayı son derece önemlidir [98].

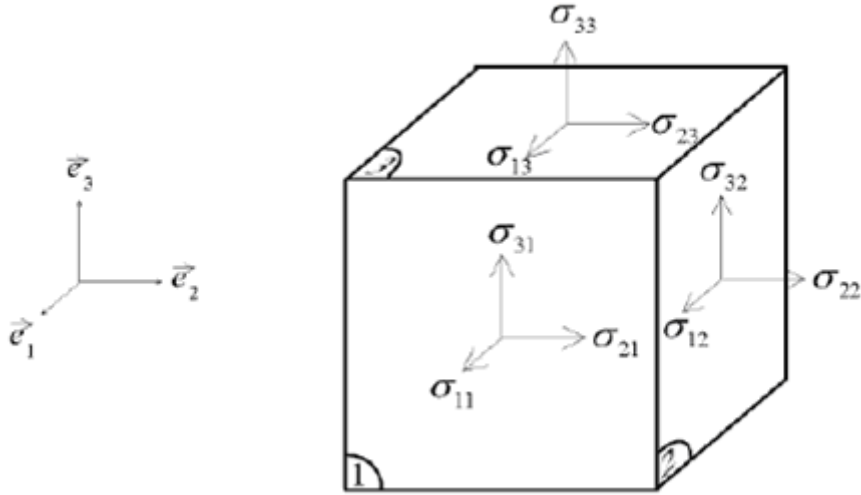
BÖLÜM 6. KALINTI GERİLİM

6.1. Kalıntı Gerilim

Malzeme yada bileşenlerinin yapısındaki kalıntı gerilim, servis şartlarında yada diğer dış yük uygulamaksızın yapıda var olan gerilmedir. Üretim yöntemleri çoğunlukla kalıntı gerilime sebep olur. Hemen hemen bütün üretim ve yapım yöntemleri (döküm, ergitme, kalıplama, ısıl işlem vb. gibi) üretilmiş yapılara kalıntı gerilim girmesine neden olmaktadır. Kalıntı gerilimin diğer nedenleri kullanım esnasında onarım ya da modifikasyondur.

Kalıntı gerilimin etkisi büyüklüğüne ve türüne bağlı olarak yararlı olabilir. Genellikle, kalıntı gerilim zararlıdır ve yorulma ve yapısal hasar olaylarında çok katkısı olduğunu belirten pek çok çalışma bulunmaktadır. Bilhassa kalıntı gerilimin gizli zararı hasarlar meydana geldikten sonraya kadar belirlenmeden yapıdaki varlığıdır [100].

Çekme kalıntı gerilimi malzeme parçasını çekerken, basma kalıntı gerilimi malzemeyle birlikte itilmesiyle etkilenir. Gerilme ayrıca malzeme yüzeyine dik etkiler ve normal gerilme olarak karakterize edilir. Toplam 6 bağımsız gerilme vardır (3 normal ve 3 kayma gerilmesi). Şekil 6.1'de bağımsız bu altı bileşen görülmektedir.



Şekil 6.1 Malzeme içindeki gerilme bileşenleri[101].

Kalıntı gerilim, uygulanan mekanik yüklerin sebep olduğu plastik deformasyondan dolayı malzemenin dengesi üzerinde ortaya çıkar. Servis esnasında parçaya uygulanmış mekanik ve termal prosesler kalıntı gerilim durumlarını değiştirebilir.

6.1.1. Parçaların toplam gerilmesi

Parça içinde verilen bölgede toplam gerilme kalıntı gerilme ve artı uygulanan gerilmeye denktir.

$$\text{Toplam gerilme} = \text{kalıntı gerilim} + \text{uygulanmış gerilme}$$

Genellikle basma gerilmesi çatlak ilerlemesini yavaşlattığı için yorulma dayanımını ve yorulma ömrünü artırır, dayanımın artması gerilme korozyonunu ve hidrojen etkili çatlakların ilerlemesini durdurur. Çekme gerilmesi çatlak ilerlemesini artırdığı için yorulma dayanımını azaltır.

Kalıntı gerilimin farklı türleri olduğu belirtilmektedir. Kalıntı gerilimin genellikle tarif edilen 3 farklı türü vardır: makro gerilme, birkaç tanenin üzeri, ikinci tür gerilim, belirli bir tanenin üzerindeki ve üçüncü tür; alt-mikroskopik alan boyunca. Birinci ve üçüncü gerilmeler mikrogерilme olarak adlandırılmaktadır.

6.1.2. Kalıntı gerilimin üretimi

Kalıntı gerilim heterojen plastik deformasyonla, termal küçülmelerle ve üretim yönteminin etkilediği faz dönüşümleriyle oluşmaktadır.

Pek çok üretim prosesi ve yüzey işlemi kalıntı gerilim üretir.

Başlıca üretim: Döküm, haddeleme, çekme, ekstrüzyon, eğme, bükme vb.

Yüzey kaldırma: Elektro-erozyon, makine üretimi,

Birleştirme: Eğriltme,

Mekanik yüzey işlemleri: iyon implantasyonu, lazer, vb.,

Isıl işlem, kimyasal ve termokimyasal işlemler: Su verme, karbürleme, nitrüleme, karbonitrüleme, PVD, CVD kaplamalar, elektrodpozisyon [100].

Kalıntı gerilim kaplamaların davranışını etkileyerek, kaplamaların kararlılığında önemli rol oynar. Örneğin çekme kalıntı gerilim artınca bağların ayrılması ve çatlaklara karşı dayanıksızlık artar [102].

Mühendislik parçalarının dizaynında daha az dikkat gösterildiğinde, kalıntı gerilimin mekanik özellikleri nasıl etkilediğine ilgi artmıştır. Dikkate alınmadan yapılan üretimler sonucu oluşmuş kalıntı gerilim yapısal hasarlara neden olabilir. Pratikte, proses esnasında ortaya çıkmış kalıntı gerilimden tamamen yoksun parçalar olabilir. Ayrıca doğal yada yapay çok fazlı malzemelerde, kalıntı gerilim termal genişlemedeki farklılıklardan, akma gerilmesinden yada bükülmelerden dolayı ortaya çıkabilir. Kalıntı gerilim farklı bölgelerde, farklı parçalarda, farklı fazlarda ortaya çıkabilir [102].

Kaplamalarda yorulma hasarlarına dayanımını artırması sebebiyle genellikle basma gerilmesi çekme gerilmesine tercih edilir. Bununla beraber, yüksek basma gerilmesi kaplamanın ana metalden ayrılmasına neden olabilir. Genellikle eğer çekme gerilmesi kırılğan tabakanın elastik limitini aşarsa genlemeye neden olur. O zaman gerilmeye dik yönde kaplamada çatlak meydana gelecektir.

Ayrıca, kalıntı gerilim kaplamaların fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin önemli derecede etkiler, bilhassa elektriksel dayanımı, optik geçirgenliği, yorulmayı ve korozyon özelliklerini [104].

Kalıntı gerilimin, havacılık sanayinde kullanılan yapıların yorulma ömrünü önemli derecede etkilediği geniş ölçüde kabul görmektedir [105].

İş parçalarının üretimi veya kullanımı sırasında deformasyon artarsa kalıntı gerilim artar, yüzey pürüzlülüğü artar ve böylece yorulma ömrü artar [106-108]. Dizaynda uygun kalıntı gerilim yokluğunda, yüzey geliştirme prosesleri çok az yada çok küçük istenmeyen yorulma mukavemetleri, yüksek çekme gerilmeleri ve/veya istenmeyen çarpılmalar üretebilir [109-110].

Kalıntı gerilim malzemenin kullanım esnasında deformasyonunu ve hasar davranışlarını etkilemektedir [111-112].

Kalıntı gerilim yapıdaki gerilimin kendi dengesidir. Böylece yapının her bir yüzeyinde dik güç bileşenleri yüzeyde kaybolmak zorundadır. Yapıda tamamen sıfır olmayan her kalıntı gerilim bileşeni daima eğime sahiptir. Bundan dolayı, bileşenlerin kalıntı gerilim hali tek değer değildir, fakat kalıntı gerilim dağılımı sırayla genleme dağılımıyla karakterize edilmek zorundadır. Çok fazlı malzemelerde proses parametrelerinin seçimi yada takviye içerikleri gibi mikroyapısal parametreler değiştiğinden kalıntı gerilim de değişir [113]. Kalıntı gerilim malzemenin mikroyapısından etkilenir.

Kalıntı gerilimin iki önemli oluşum mekanizmasından; birincisi, dönüşüm gerilmesi diğeri de termal gerilmedir [114].

6.2. Gerilimin Oluşumu

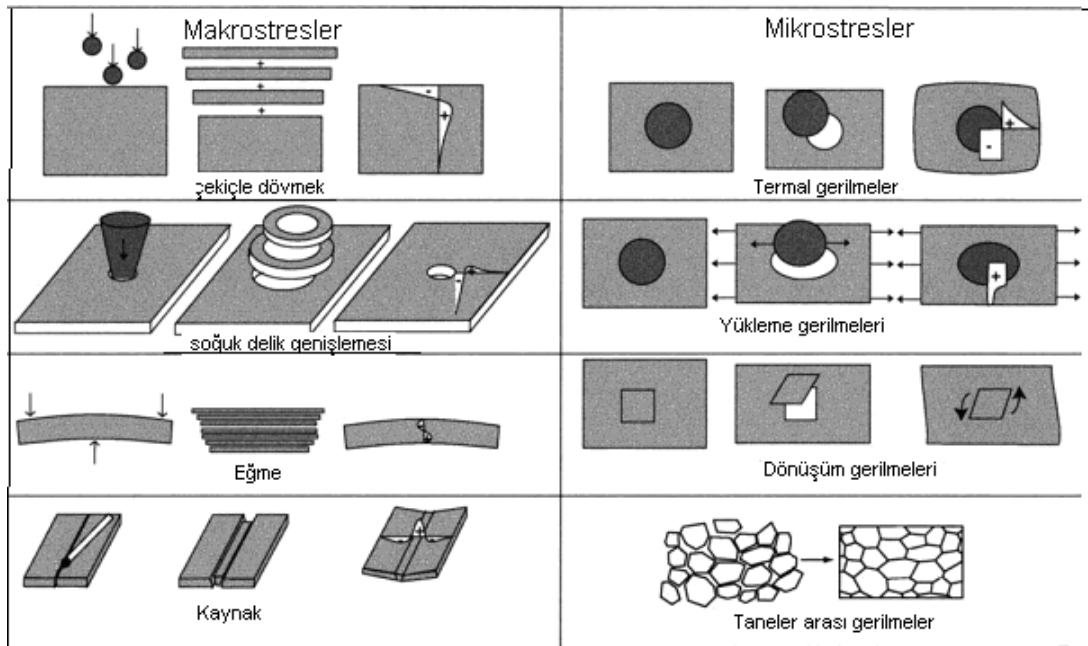
Yapıdaki kalıntı gerilim yapı ve çevre arasındaki dengeyi sürdürmek için gerekli değildir. Kalıntı gerilim çeşitli şekillerde kategorize edilebilir. Şekil 6.1'de farklı

bölgeler arasındaki uyumsuzluklardan ortaya çıkan kalıntı gerilmelerin resimleri görülmektedir.

Pek çok durumda, bu uyumsuzluklar mesafeler arasındaki uzaklıklardır. Bunlar çubukların homojen olmayan plastik deformasyonuna sebep olur. Keskin köşelerin termal gradyanından ortaya çıkabilirler.

Makrogerilmeler tip 1 olarak tarif edilir, çünkü büyük mesafeler üzerinde sürekli değişmektedir (Şekil 6.2). Bu atomik skalanın (tip 3) ya da (tip 2 yada taneler arası gerilim) taneler üzerinde değişen kalıntı gerilimin tam tersidir. Bu durumlarda, uyumsuzluk bölgeleri arasındaki mesafe mikroskopik yada mikroskopik altı boyutlardadır. Düşük seviyeli tip 2 gerilimi, neredeyse bütün polikristalin malzemelerde vardır.

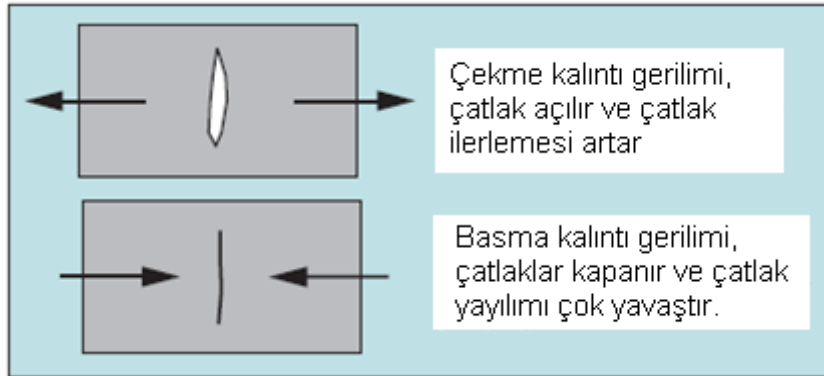
Pek çok tane gerilim derecesi, mikroyapı pek çok faz veya faz dönüşümleri içerdiğinde meydana gelir. Tip 3 kategorisi arayüzey ve dislokasyon gerilim alanlarındaki uyumdan dolayı gerilim içerir.



Şekil 6.2 Gerilme türleri ve oluşum sebepleri[115]

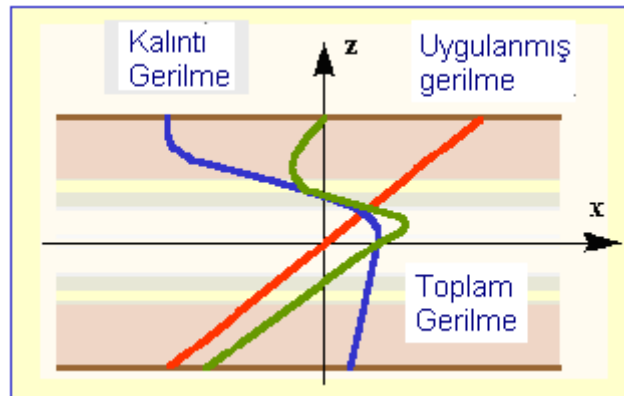
6.3. Kalıntı Gerilimin Çalışma Performansına Etkisi

Genellikle, basma kalıntı gerilimi yorulma ömrüne ve gerilme korozyonuna karşı çok faydalıdır ve çatlak başlamasını ve yayılımını geciktirir. Tam tersi çekme gerilmesi malzemenin mekanik performansını azaltır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3 Çekme ve basma kalıntı gerilmelerinin malzeme üzerindeki etkisi[116].

Toplam gerilme akma mukavemetini aştığında malzeme plastik olarak deforme olur. Bu kalıntı gerilim alanının değişmesine yol açar (Şekil 6.4).



Şekil 6.4 Gerilme alanları değişimi[113]

Tekrarlı yüklerde, çatlak başlayabilir ve akma mukavemetinin çok altında gerilme seviyesi için yayılır. Bu kalıntı gerilimin yeniden dağılmasına yol açar. Uygulanan yükün yapıya yerleşmesi burada meydana gelir.

Ayrıca belirtildiği üzere, kalıntı gerilimin gevşemesi, yorulma yada tavlama olmadan dolaydır ve yüzey tabakasının yerinden oynaması endüstriyel parçalarda boyutsal değişim oluşturur.

6.4. Kalıntı Gerilim Ölçüm Yöntemleri

Kalıntı gerilim ölçmede en yaygın şekilde kullanılan yöntemler şunlardır:

- i. Çentik (delik) Açma
- ii. Akustik yöntemler
- iii. Eğme sapma metodu
- iv. Parça metodu
- v. X ışınları difraksiyon metodu; bu metot genleme ölçüsü olarak latis boşluğunun ölçülmesi esasına dayanır.

Ultrasonik teknikler; bu teknikler ultrasonik dalgaların hızlarının değişmesi esasına dayanır.

Magnetik metotlar; ferromagnetik malzemelerde magnetizasyon ve elastik genleme arasında meydana gelir. Farklı magnetik özellikler çalışılabilir. Bu magnetik ve ultrasonik metodlar kalıntı gerilimin üç türünü ölçmek için çok hassastır, fakat aralarında ayırım yapamaz.

6.4.1. X-ışınları yöntemi ile gerilme ölçümü

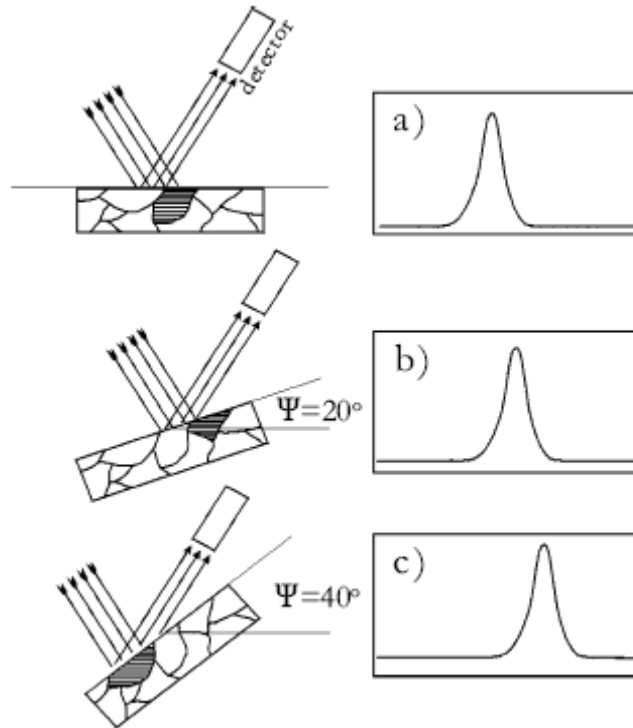
X-ışınları ile kalıntı gerilim ölçümü; belirli bir latis düzleminin “d” boşluklarının ölçülmesiyle kalıntı gerilim değerlerinin belirlenmesi ile yapılmaktadır.

X ışınları kullanılarak yapılan kalıntı gerilim ölçümlerinde genellikle Tilting ve Rocking yöntemleri kullanılmaktadır. $\sin^2 \psi$ metodu hassastır ve ince taneli poli kristalin malzemelerde kalıntı gerilimi ölçmek için kullanılan doğru bir yöntemdir. Değişimin büyüklüğü kalıntı gerilimin büyüklüğüyle alakalıdır. Böylece, eğer

kalıntı gerilim yoksa değişim sıfır olacaktır. Pik değişimi ve kalıntı gerilim arasındaki ilişki (6.1)

$$\varepsilon_r = \frac{d_r - d_0}{d_0} = \frac{1 + \nu}{E} \sigma_r \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (6.1)$$

denkliği ile verilmektedir. Burada, E young modülü, ν poisson's sabiti, ψ tilt açısı, ve d_{iher} her bir tilt açısında ölçülmüş "d" boşluğudur. Eğer numunede kayma genleme kesiği görüntüsü yoksa, "d" mesafesi $\sin^2 \psi$ ile liner olarak değişebilir ve eğri için uygun olan en küçük kareler " σ " verir. Bununla beraber, kayma genlemesi varsa işaretler keskin olacaktır ve analizler daha karmaşık olacaktır. Sonuç olarak; eğer numune düzlemde dönüyorsa onların yönünü ve başlıca gerilimini belirlemek mümkündür[117].



Şekil 6.5 X-ışını kullanarak farklı açılarda kalıntı gerilim ölçümü [117].

BÖLÜM 7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

7.1. Giriş

Bu çalışmada; endüstride geniş bir kullanım alanına sahip AISI 4140 çeliğinin yüzeylerinin pulse plazma teknolojisi ile modifiye edilerek yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. AISI 4140 çeliği otomobil ve uçak yapımında, krank mili, aks mili ve kovanı, yivli mil ve benzeri sünekliği yüksek parçalarda, ayrıca dişli çark ve bandaj vb. parçalar, soğuk çekme mil ve çubukları, makine çelikleri, yaylar, türbin motorları, turbo jeneratörlerin fren halka ve kolları, gemi zincir ve demirleri yapımında, demir yol tekerlekleri ve millerinde, starter dişlilerinde gibi yerlerde geniş oranda kullanılmaktadır [102-103]. Yaygın olarak kullanılan bu çelik türünün yüzey özelliklerin uzun, zahmetli ayrıca maliyetli olan ısı işlem yapmadan geliştirebilmek hedef olarak seçilmiştir. Literatürde bu çelik kullanılarak yüzey işlemi yapılmış pek çok çalışma mevcuttur [104-111]. Yapılmış tüm çalışmalarda çok yaygın olarak kullanılan 4140 çeliğinin yüzey özellikleri geliştirilmiştir. Birbirinden farklı pek çok yöntem kullanılmıştır. Kullanılmış diğer yöntemlere göre hem zaman bakımından, hem ekonomik açıdan, hem de mekanik özelliklerin üstünlüğü bakımından avantaj sağlayacağı düşünülen pulse plazma bu çalışmada yöntem olarak seçilmiştir. Çalışmada amaç; geniş kullanım alanına sahip, fiyat olarak uygun olan pek çok yüzey çalışmasına konu olan AISI 4140 çeliğini diğer yöntemlerden farklı olarak yeni bir teknoloji olan Pulse plazma yöntemi ile yüzeyleri modifiye etmektir. Pulse plazma teknolojisinde mekanik özelliklerin gelişimini çok kısa sürede ve düşük maliyetle sağlamak başlıca amaçtır. Pulse plazma modifikasyon sistemi tüm ekipmanları işe Şekil 7.1’de görülmektedir.

7.2. Çalışma Programı

Kimyasal içeriği Tablo 7.1’de verilen çubuk halinde alınan AISI 4140 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 7.2’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 7.2’de verilmektedir. Bu çalışmada tükenen elektrod olarak W kullanılmıştır.



a)



b)

Şekil 7.1 a) Pulse plazma uygulama sistemi (plazmatron), b) kontrol paneli ve güç üniteleri

Tablo 7.1 AISI 4140 çeliğinin kimyasal içeriği

Alaşım elemanları yüzdesi %	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
AISI 4140	0.40	0.30	0.70	0.035	0.035	0.98	0.27

Tablo 7.2 Pulse plazma uygulama şartları

Numune No	h (mm)	Numune- nozul mesafesi(mm)	Pulse sayısı	Pil Kapasitesi, (mf)	Elektrod
1	10	70	15	800	W
2	10	70	10	800	W
3	10	70	5	800	W
4	10	80	15	800	W
5	10	80	10	800	W
6	10	80	5	800	W
7	10	60	15	800	W
8	10	60	10	800	W
9	10	60	5	800	W
10	10	50	15	800	W
11	10	50	10	800	W
12	10	50	5	800	W
13	10	50	15	900	W
14	10	50	10	900	W
15	10	50	5	900	W
16	10	60	15	900	W
17	10	60	10	900	W
18	10	60	5	900	W
19	10	70	15	900	W
20	10	70	10	900	W
21	10	70	5	900	W
22	10	80	15	900	W
23	10	80	10	900	W
24	10	80	5	900	W

7.3. 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, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 2400, 4000 meshlik zımparalama kademelerinden geçirilmiştir. İyice yıkanarak zımparalama kademesinden gelecek aşındırıcılardan temizlenen numuneler, 3 μ 'luk elmas pasta ile parlatılmışlardır.

7.4. Optik Çalışmalar

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

7.5. Sertlik Ölçümleri

Metalografik olarak hazırlanan numunelerin Future Tech marka mikrosertlik cihazında 5 gr yük altında 15 sn. süre ile sertlik değerleri alınmıştır. Sertlik değerleri sıra sertlik biçiminde olup, modifikasyon tabakasında 5-10 mikron aralığında, modifikasyon tabakası dışında 20 mikron aralıklarla alınmıştır. Sertlik değerleri, numune üzerinde 3 farklı bölgede sertlik deneyi uygulanarak elde edilmiş üç değerlerin ortalaması alınarak bulunmuştur.

7.6. X-ışını Analizleri

Üretilen numuneler kesme işlemine tabi tutulmadan önce X-ışını analiz çalışmaları yapılmıştır. Rigaku 6600 model X-ışını cihazı ile 2° açıyla ölçümler alınmıştır.

7.7. Kırık Yüzey Deneyleri

Pulse plazma yöntemi ile üretilen numuneler hassas kesme cihazı ile işlem görmemiş yüzeylerinden modifiye edilen yüzeylerine doğru 1mm kalacak biçimde kesilmişlerdir. Tam olarak kesilmeyen numunelerin kesme derinliği el testeresiyle iyice arttırılarak kırma işleminde kolaylık amaçlanmıştır. Kesme derinliği el testeresiyle arttırılan numuneler sıvı azotun içine daldırılarak yaklaşık olarak 1 dk. tutulmuştur.

Sıvı azotun içinden çıkarılan numuneler hızlı bir biçimde çekiçle kesik bölgelerine darbe uygulanarak kırılma işlemi gerçekleştirilmiştir. Kırılan numunelerin kırık yüzeylerine SEM ve EDS çalışmaları yapılmıştır.

7.8. SEM Analizleri

Kesit görüntü için hazırlanan numunelerden bazıları iletken bakalıte alınarak SEM analizleri için hazırlanmıştır. SEM çalışmaları Jeol-6600 marka cihazla yapılmıştır. Kırılma deneyleri ve aşınma deneyleri sonrası SEM ve EDS analizleri yapılmıştır.

7.9. EPMA Analizleri

Pulse plazma sistemiyle yüzeyleri modifiye edilen AISI 4140 çelik numunelerinin işlem sonrası kesilerek metalografik olarak hazırlanmış ve dağlanmış kesitlerinden Cameca SX 100 model EPMA analiz cihazı ile görüntüleri alınmıştır. Numune grupları içinden seçilen bazı numunelerin element dağılım haritaları çıkarılmış ve kesit yüzeylerinin incelenmesi yapılmıştır.

7.10. Kalıntı Gerilim Ölçümleri

Pulse plazma ile yüzeyleri modifiye edilen AISI 4140 çeliklerin yüzeylerinde meydana gelen kalıntı gerilim ölçümleri yapılmıştır. Bu amaçla Rigaku marka X-ışını cihazına MPA (multi purpose attachment) takılarak kalıntı gerilim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tilting modeli kullanılarak (310) düzleminde 0° , -18° , -27° , -33° , -39° , -45° olmak üzere 6 farklı açı için ölçümler yapılmıştır. Rigaku x-ışınları cihazı (-) yönde en yüksek olarak 75° 'kadar çıkabilmektedir. Fakat (+) yönde en yüksek 35° kadar çıkabilmektedir. Bu sebeple açılar (-) seçilmiştir. Yüksek derecelerde pik alımı çok hassas şekilde olmadığından en yüksek olarak da 45° uygun görülmüştür.

Elde edilen kalıntı gerilim değerleri öncesi uzun bir ön araştırma çalışması yapılmıştır. Bu ön hazırlık aşamasında pulse plazma ile 6mm'lik çapta (yuvarlak şekilde) çelik numune yüzeylerinde oluşturulan modifikasyon bölgesinden 1.5mm^2 'lik bir bölgeden ölçüm alınmıştır. Bu bölgenin ayarlanması için doğru parametrelerin seçimi uzun ve zahmetli bir çalışma gerektirmiştir. Bölgenin küçüklüğü (6mm) hassas bir çalışma yapmak zorunda bırakmıştır.

Ölçümler öncesi sapma aralığı için genellikle 1mm, sapma yüksek aralığı için ise modifikasyon tabaka kalınlığına göre 1.2mm ve 2mm'lik aparatlar seçilmiştir. Bu parametrelerin en doğru biçimde seçimi için mevcut tüm ölçülerdeki parçalar (1,2mm-2mm-5mm-10mm) denenmiştir. Ölçme hızı, ölçümler esnasında dikkat edilmesi gereken diğer bir faktördür. Hız seçiminde yüksekten düşüğe doğru birçok olasılıklı hız denemesi yapılmıştır. Hız değerini düşük seçimi ve ölçüm süresinin bu sebeple hayli uzaması elde edeceğimiz değerlerin hassasiyeti açısından önem taşımaktadır. Açılarının seçiminde 50 derecenin altında olmasına ve aralıklarının fazla olmamasına dikkat edilmiştir. Ölçümler 40kV, 36mA enerji ile yapılmıştır. Pulse plazma ile modifiye edilmiş numunelerin kalıntı gerilim ölçüm için başlangıç açısı 112° , bitiş açısı 122° dir.

Ölçümler esnasında önemle üzerinde durulan noktaların ilki; numune yüzeyinde yaklaşık olarak daire veya elips biçimde oluşmuş modifikasyon bölgesinin merkezini ayarlamaktır. Numune modifikasyon merkezinin odaklanması; numune tutucunun merkezine uygun ölçülerde asetat şablonlarla yapılmıştır. Odaklamaları doğru yapmak için hazırladığımız bu şablon modifikasyon bölgesinin tam merkezinden ölçüm yapabilmemizi sağlamıştır. Numuneleri tam odakladıktan sonra cihaza yerleştirme işlemi yapılmıştır. Ölçümlere etken tüm parametreler defalarca denendikten sonra uygun parametrelerin seçimine karar verilmiştir. Ölçümlerin doğru yapılıp yapılmadığını anlamak amacıyla kullanılan referans numunesi silisyumdur (SiO_2). Toz halde silisyum numunenin kalıntı gerilim ölçümü yapılıp elde edilen değerlerin doğruluğu kesinleştikten sonra, cihazın ölçüm için güvenilirliğine karar verilerek, pulse plazma ile modifikasyona uğramış numunelerin kalıntı gerilim ölçümlerine başlanmıştır. Normal şekilde x-ışınları cihazı ile ölçümü alınan numunelerin piklerinden en yüksek düzlem (310) seçilmiştir. Bu düzlemin seçimi ölçümlerin kolay ve doğru, düzgün biçimde yapılması içindir.

Ölçümlerden sonra programdan gerekli düzeltmeler neticesinde elde edilmiş verilerden $K\alpha_1$ değerleri bulunur. Bu değerler kullanarak Bragg bağıntısından “d” değerleri elde edilir. Bu değerler yardımıyla, $\text{Sin}2\psi$ ve d arasında çizilen diyagramdan elde edilen eğim aşağıda verilen denklikte (7.1) kullanılarak kalıntı gerilim değerleri bulunmuştur.

$$\varepsilon_{\phi\psi} = \frac{d_{\phi\psi} - d_0}{d_0} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_{\phi} \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} - \sigma_{22}) \quad (7.1)$$

7.11. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri CSM marka aşınma cihazı ile yapılmıştır. Çizgisel (liner) 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 5N, 7N ve 9N olmak üzere 3 farklı yük seçilmiştir. Deney mesafesi 200m'dir. Deney esnasında aşındırıcı bilyanın yönü her deney için çevrilmiştir. Deneyler ortalama sıcaklığın 30-35°C, nem oranının ise %50-60 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 ağız kapalı poşette desikatörde tutulmuş, tüm deneyler tamamlandıktan sonra SEM ve EDS çalışmaları yapılmıştır.

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

Daha sonra aşınma hesaplamalarına ve yorumlarına yardımcı olması amacıyla MAHR Perthometer 1 ile numunelerin aşınma sonrası yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür.

7.12. AFM (Atomik Güç Mikroskobu)

Aşınma deneyleri sonrasında bazı numunelerin AFM cihazı ile aşınma görüntüleri ve normal yüzey görüntüleri alınmış ve bu görüntüler yardımıyla aşınma mekanizmaları incelenmiştir. Yüzeylerdeki yükselti farklılıkları aşınma yapısı hakkında bize yardımcı olmaktadır. AFM ile aşınma bölgelerini tam olarak yakalamak amacıyla hassas çalışma yapmaya oldukça dikkat edilmiştir.

BÖLÜM 8. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

8.1. Optik Görüntüler

Pulse plazma sonrası modifikasyon tabakasında meydana gelen değişimleri görebilmek için numunelerin kesiti incelenmiştir.

Tablo 8.1’de tüm numune gruplarının pulse plazma parametrelerine bağlı olarak elde edilmiş modifikasyon tabaka kalınlıkları verilmektedir.

Şekil 8.1’de 1(70mm,15 pulse), 2(70mm,10 pulse) ve 3(70mm, 5 pulse) no’lu numunelerin kesitleri hazırlanarak alınmış optik görüntüler görülmektedir. Optik görüntülerden de anlaşılacağı üzere modifikasyon tabaka kalınlıkları birbirinden farklıdır. 1 no’lu numunenin modifikasyon tabaka kalınlığı 20 μm iken, 2 no’lu numunenin 18 μm , 3 no’lu numunenin ise 21 μm ’dir.

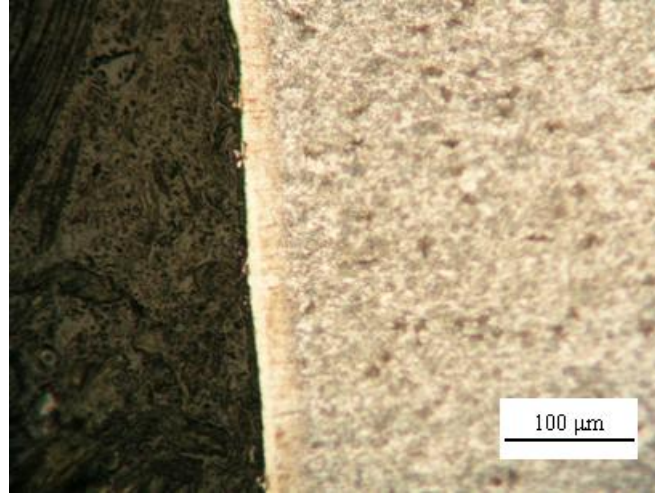
Şekil 8.1’de optik yapılarda kontrast farklılığından modifikasyon tabakasını ve onun altındaki difüzyon tabakasını ve en sonunda ana malzemeyi (alt malzemeyi) açıkça görmemiz mümkündür.

Tablo 8.1 Pulse plazama parametreleri ve modifikasyon tabakası kalınlık değerleri

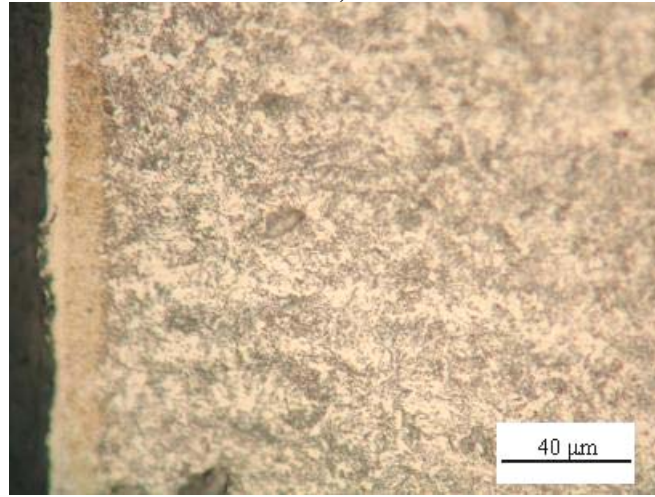
Numune No	Numune nozul mesafesi(mm)	Pulse sayısı	Pil kapasitesi (mf)	Modifikasyon Tabaka Kalınlığı (μm)
1	70	15	800	20
2	70	10	800	18
3	70	5	800	21
4	80	15	800	16
5	80	10	800	19
6	80	5	800	12
7	60	15	800	20
8	60	10	800	24
9	60	5	800	10
10	50	15	800	41
11	50	10	800	21
12	50	5	800	20
13	50	15	900	57
14	50	10	900	23
15	50	5	900	40
16	60	15	900	45
17	60	10	900	28
18	60	5	900	20
19	70	15	900	22
20	70	10	900	29
21	70	5	900	13
22	80	15	900	20
23	80	10	900	13
24	80	5	900	10

Şekil 8.2’de ise 4(80mm, 15 pulse), 5(80mm,10 pulse) ve 6(80mm, 5 pulse) no’lu numunelerin kesit optik görüntüleri görülmektedir. Modifikasyon tabakası kontrast farklılığından dolayı hemen fark edilebilmektedir. 4 no’lu numunenin modifikasyon tabaka kalınlığı $16\mu\text{m}$, 5 no’lu numunenin $19\mu\text{m}$ ve 6 no’lu numunenin modifikasyon tabaka kalınlığı $12\mu\text{m}$ ’dir. 1 no’lu numune ile 4 no’lu numuneler arasında işlem parametreleri açısından tek fark numune ve nozul arası mesafedir. 1 no’lu numunde 70mm olan mesafe 4 no’lu numunede 80 mm’ye çıkarılmıştır. Mesafenin artması sonuçlardan da görüleceği üzere modifikasyon tabaka kalınlıklarının düşmesine sebebiyet vermiştir. Bu düşüşün nedeni nozul ve numune mesafesi arttığında pulse plazma etkisinin azalmasıdır. İyonize ürünlerin numune yüzeyine düzgün ve doğru şekilde gelememesi yani nozuldan yüksek hızda çıkan

iyonlaşmış gazların yüzeye erişmemiş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca yukarıda da belirtildiği üzere pulse sayısının artması yine 4 no'lu ve 6 no'lu numuneler arasında modifikasyon tabaka kalınlıklarında farklılık oluşumuna sebebiyet vermiştir. 4 no'lu numunede açıkça görülen modifikasyon tabakası 6 no'lu numunede bu kadar belirgin görülmeyebilir (Şekil 8.2c). Mesafenin artması nedeniyle işlem etkisi bu numune yüzeyinde azalmıştır.



a)

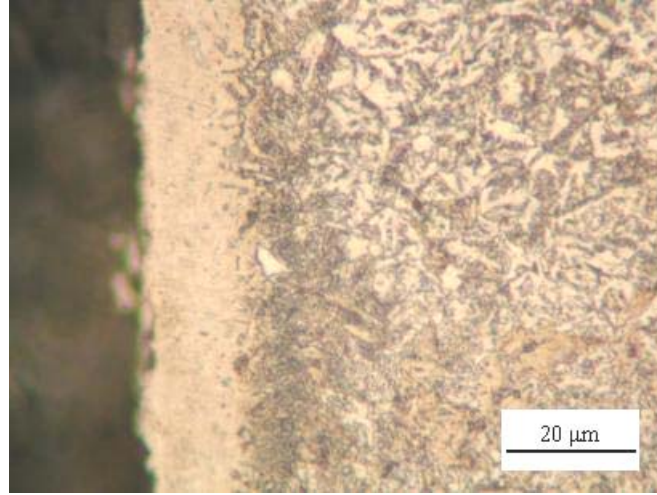


b)

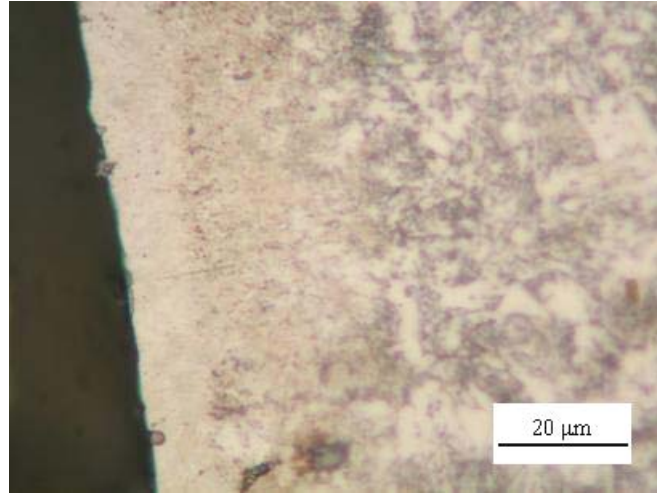


c)

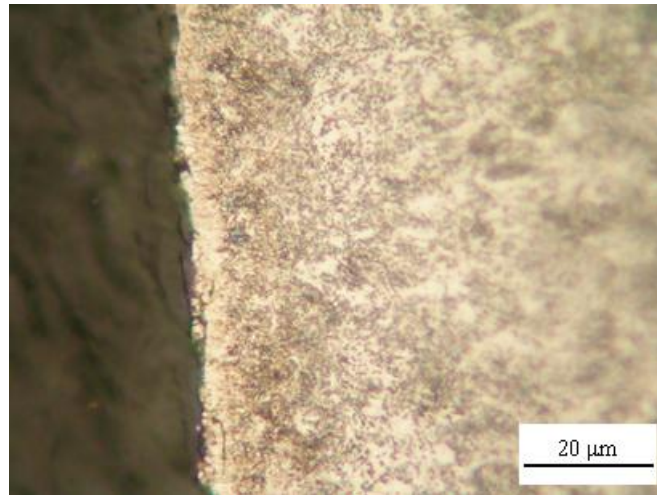
Şekil 8.1 a)1 (15pulse), b)2(10pulse), ve c)3(5pulse) no'lu numunelerin optik görüntüleri .



a)



b)



c)

Şekil 8.2 a)4 (15 pulse), b)5(10 pulse) ve c)6 (5pulse) no'lu numunelerin optik görüntüleri.

7(60mm, 15 pul.), 8(60mm, 10pulse) ve 9 (60mm, 5 pulse) no'lu numunelerin kesit optik görüntüleri Şekil 8.3'de görülmektedir. 7 no'lu numunede modifikasyon tabaka kalınlığı 20µm iken 8 no'lu numunede 24µm ve 9 no'lu numunede 10µm'dir.

10(50mm, 15 pulse), 11(50mm, 10 pulse) ve 12(50mm, 5pulse) no'lu numunelerin optik görüntüleri Şekil 8.4'de verilmektedir. Yapılara bakıldığında ince taneler göze çarpmaktadır. Mesafenin en düşük şartlarda (50mm) olduğu bu grup numunelerde tabaka kalınlık değerleri; 10 no'lu numunenin 41µm, 11 no'lu numunenin 21µm ve 12 no'lu numunenin ise 20 µm dir. Mesafenin diğer numune gruplarına göre azalması ve pulse sayısının en yüksek değeri ile tane boyutları küçülmüştür. Modifikasyon tabaka kalınlık değeri 800 mf pil kapasitesi şartlarında elde edilen en yüksek değer olmuştur. Pulse sayısının artması ile optik görüntülerden de anlaşılacağı üzere daha homojen ve düzgün yapıda bir tabakanın oluşumu gözlenmiştir.

Şekil 8.5'de ise görülmekte olan 13(50mm,15 pulse), 14(50mm, 10 pulse) ve 15(50mm, 5 pulse) no'lu numune gruplarında, daha önceki gruplarından farklı olarak pil kapasitesi 900 mf'a yükseltilmiştir. 13 no'lu numunede nozul numune arası mesafe 50mm ve pulse sayısının 15 olması itibariyle modifikasyon tabaka kalınlığı 57 µm elde edilmiştir. Numune grupları içindeki bu en yüksek değerde pil kapasitesinin artmasının etkisi yüksektir. Optik yapılardan da görüleceği üzere taneler daha ince hale gelmiştir. Tabaka daha homojen ve daha düzgündür. 14 no'lu numunede ise tabaka kalınlığı 23µm ve 15 no'lu numunede ise 40 µm'dir. 15 no'lu numune ile 12 no'lu numunenin işlem parametreleri arasındaki tek fark pil kapasitesinin artmasıdır. Bu artış modifikasyon tabaka kalınlığını 12 no'lu numunede 20µm iken 15 no'lu numunede 40µm'a çıkarmıştır. Görüleceği üzere sadece mesafenin azalması ve pulse sayısının artışı değil enerjinin artışının (pil kapasitesinin artışı) da modifikasyon tabaka kalınlığında etkisi mevcuttur.

16(60mm, 15 pulse), 17(60mm, 10 pulse) ve 18(60mm, 5pulse) no'lu numunelerin kesit optik görüntülerindeki görüleceği üzere kaplama kalınlıkları sırasıyla 45µm, 28µm, 20µm'dir. Burada da açıkça görüleceği üzere tek farkı pil kapasitesi olan 7 ve

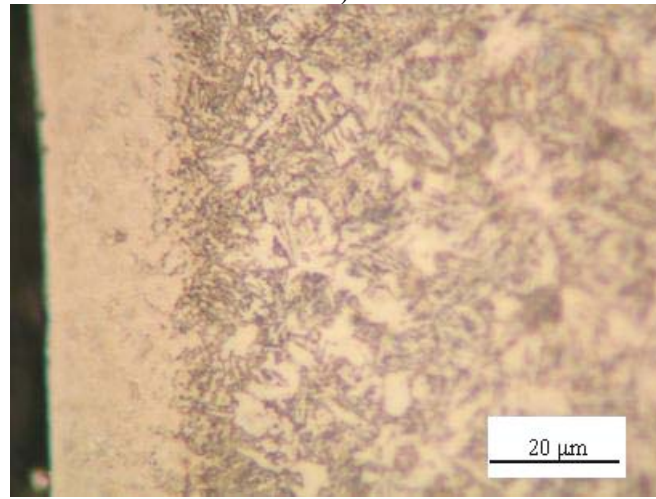
16 no'lu numunelerin modifikasyon tabaka kalınlıkları kıyaslandığında (sırasıyla 20 μ m ve 45 μ m) pil kapasitesinin etkisi daha iyi anlaşılmaktadır ki bu da beklenen bir sonuçtur. Enerji artışının etkisi ile yapıdaki ince taneleri görmek mümkündür (Şek.8.6).

Şekil 8.7'de 19(70mm, 15 pulse), 20(70mm, 10pulse) ve 21(70mm, 5pulse) no'lu numunelerin kesitleri görülmektedir. Modifikasyon tabaka kalınlıkları sırasıyla 22 μ m, 29 μ m ve 13 μ m'dir.

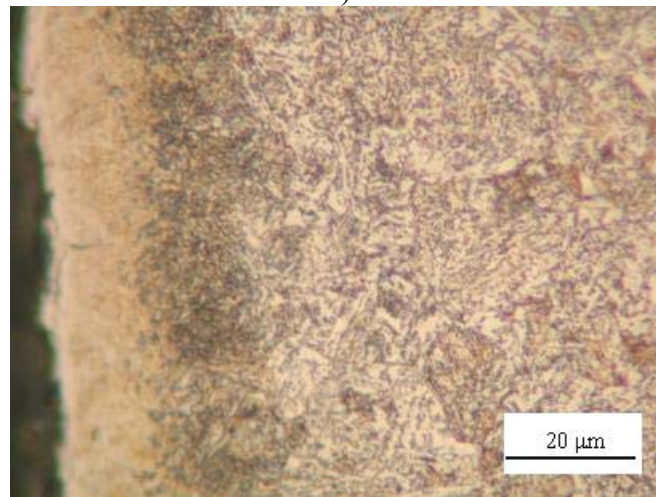
Şekil 8.8 'de ise 22(80mm, 15pulse), 23(80mm, 10pulse), ve 24(80mm, 5pulse) no'lu numunelerin optik yapıları görülmektedir. Bu grup numunede nozul numune arası mesafenin en yüksek değerde olması itibariyle kaplama tabaka kalınlıkları azalmıştır. Taneler daha kabadır. Mesafenin artması itibariyle nozul ve numunenin etkileşimin azalmasından ileri geldiği düşünülen düşük tabaka kalınlığı ve düzgün olmayan ve homojensiz yapı dikkat çekicidir. Hem pulse sayısının azalması hem mesafenin artışı 24 no'lu numune grubunda modifikasyon tabakasının düzgün oluşmamasına sebebiyet vermiştir.



a)

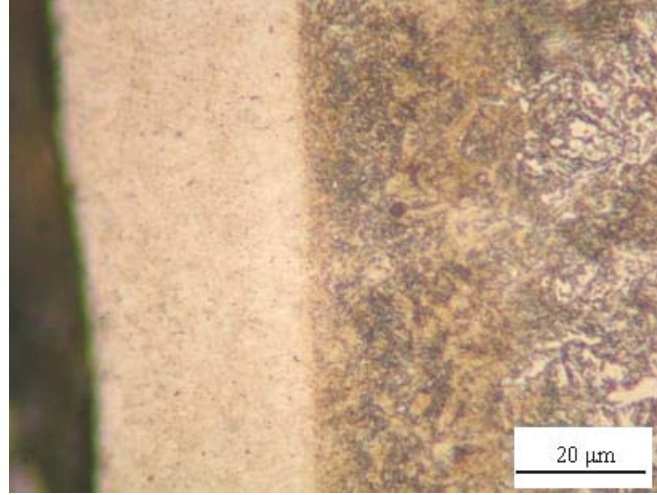


b)

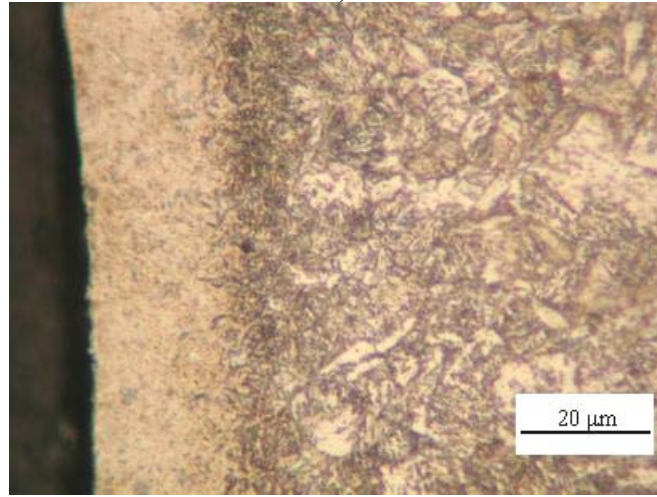


c)

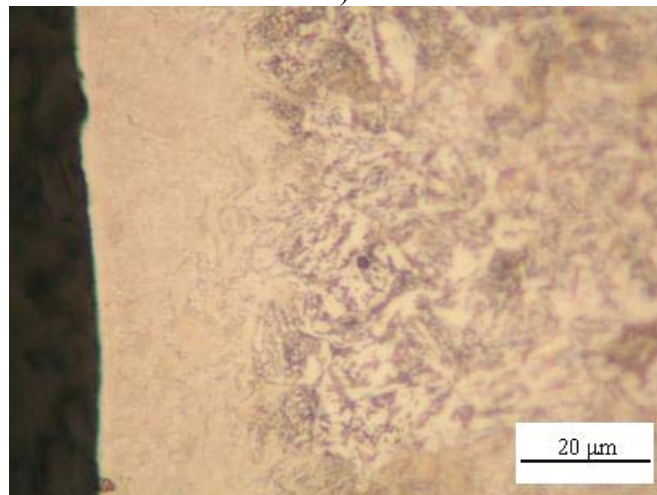
Şekil 8.3 a)7(15pulse), b)8(10 pulse) ve c) 9 (5 pulse) no'lu numunelerin optik görüntüleri.



a)

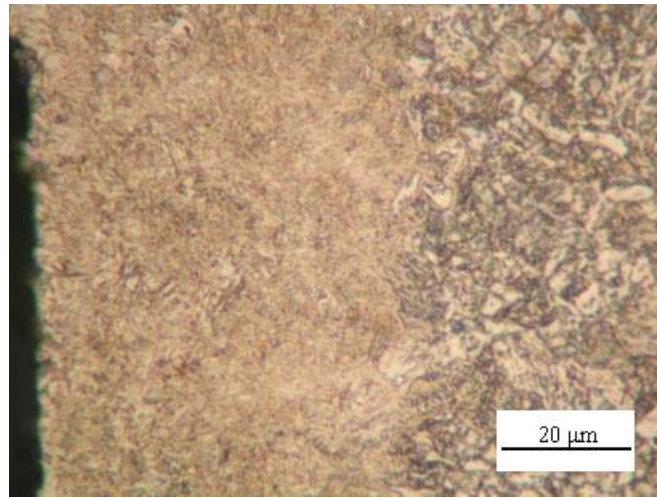


b)

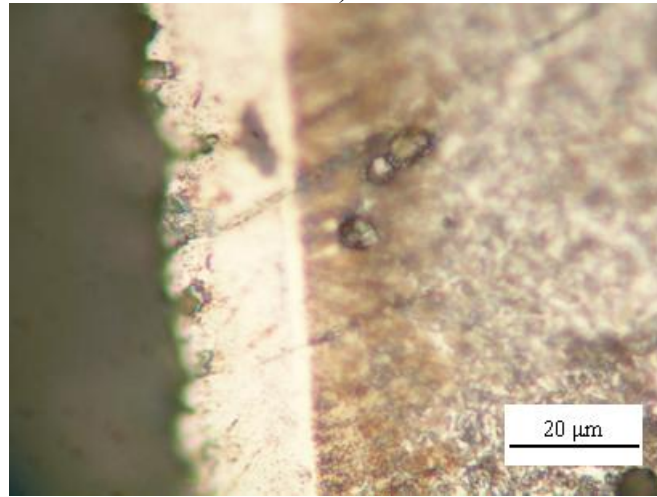


c)

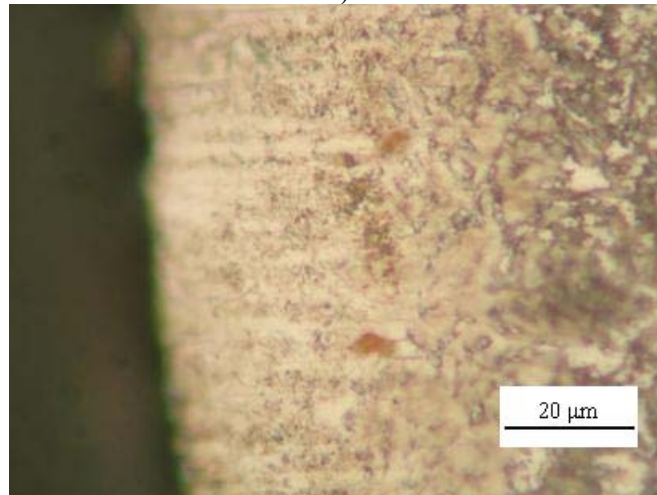
Şekil 8.4 a)10(15 pulse), b)11(10 pulse), ve c)12 (5 pulse) no'lu numunelerin optik görüntüleri.



a)

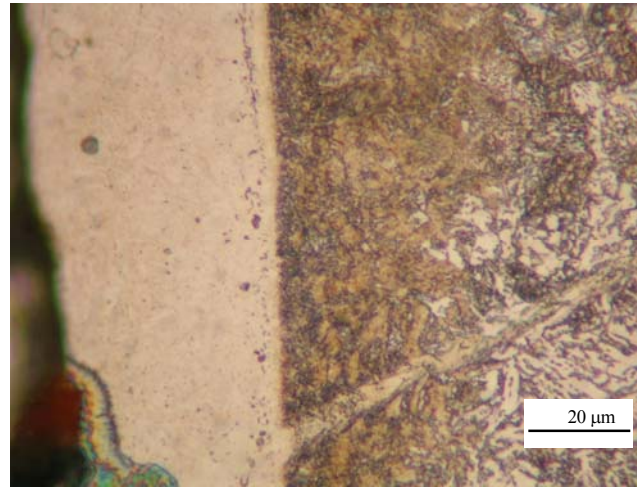


b)

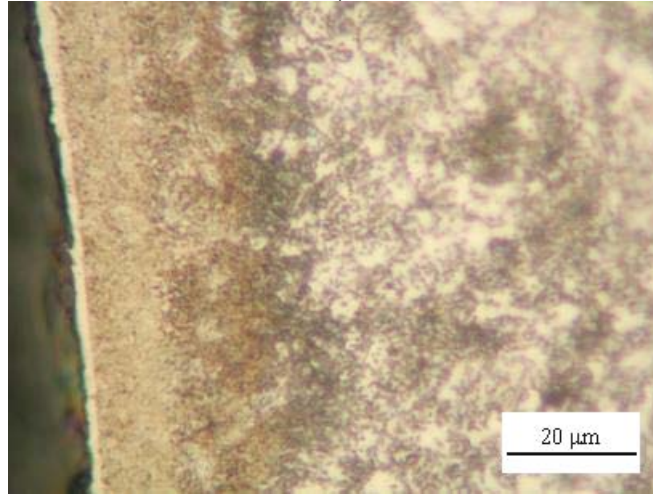


c)

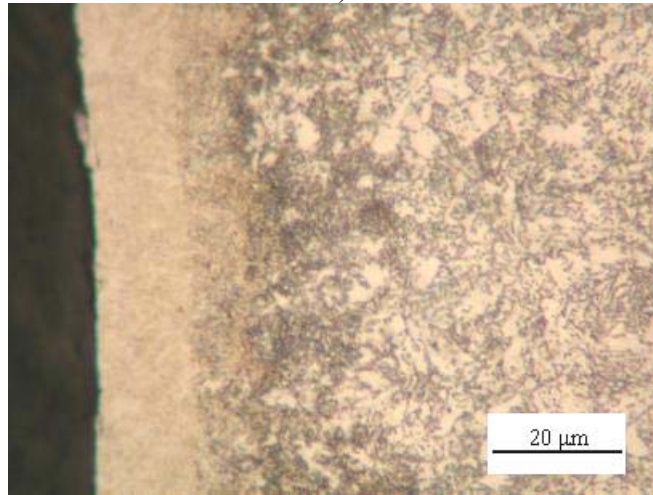
Şekil 8.5 a)13 (15pulse), b)14 (10pulse) ve c)15 (5pulse) no'lu numunelerin optik görüntüleri



a)

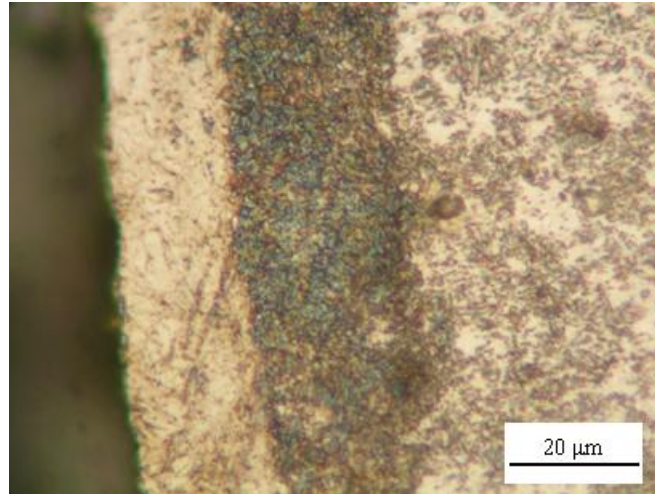


b)

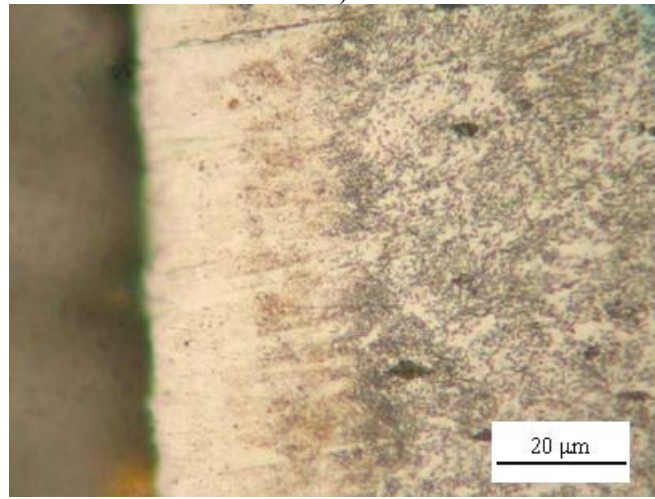


c)

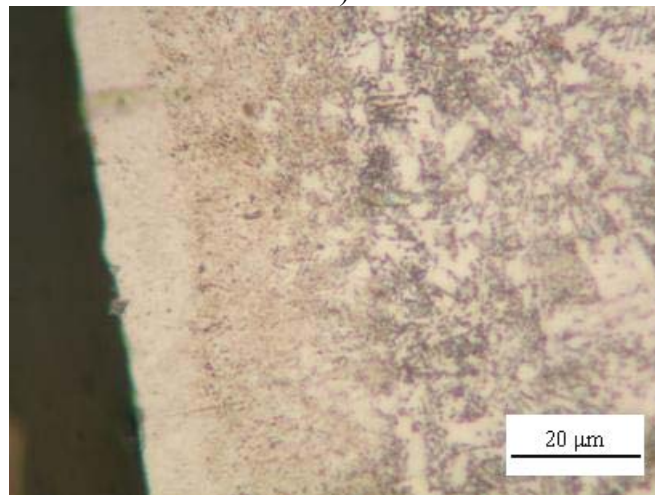
Şekil 8.6 a)16 (15pulse), b)17 (10pulse) ve c)18(5pulse) no'lu numunelerin optik görüntüleri



a)

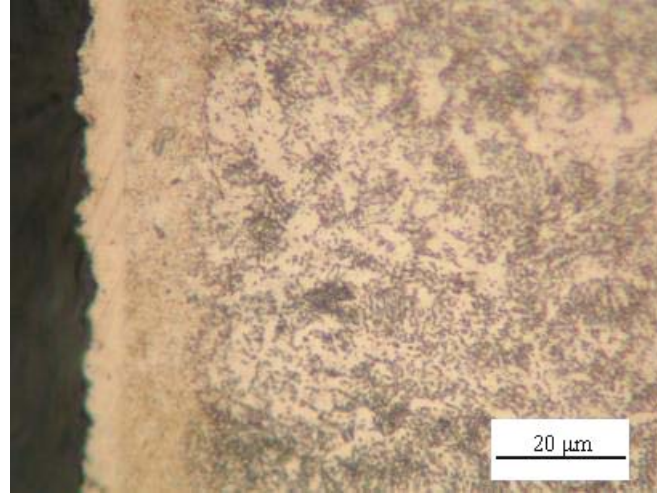


b)

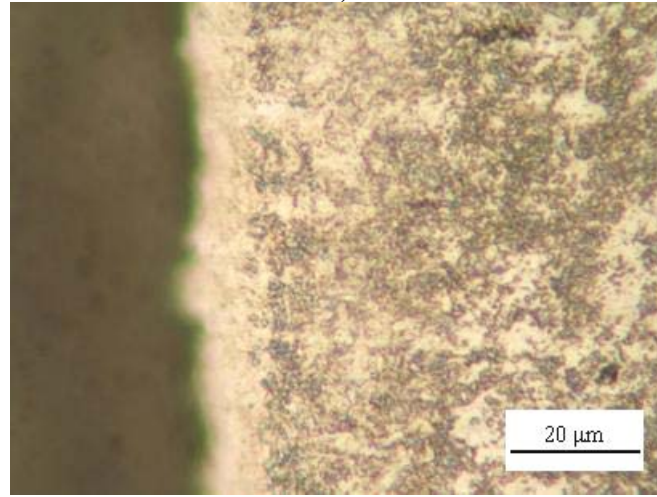


c)

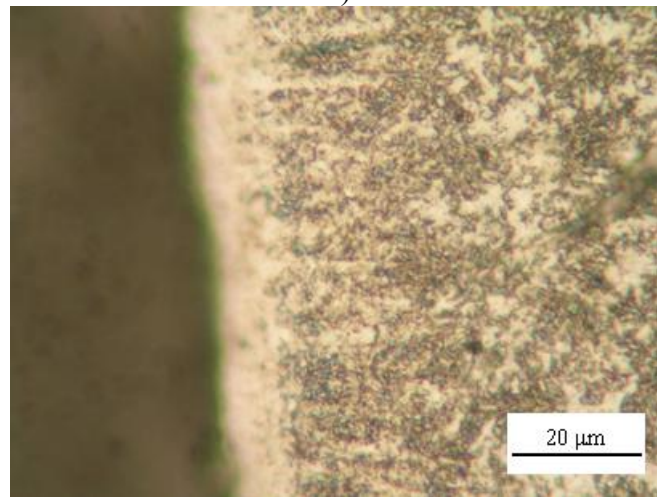
Şekil 8.7 a)19 (15 pulse), b)20 (10pulse) ve c)21 (5pulse) no'lu numunelerin optik görüntüleri.



a)



b)



c)

Şekil 8.8 a)22 (15 pulse), b)23 (10 pulse) ve c)24 (5 pulse) no'lu numunelerin optik görüntüleri.

Literatürsel çalışmalara göre, genellikle pulse sayısının artışıyla, artması beklenen modifikasyon tabaka kalınlığı 1 ve 3 no'lu numunelerde gelenekselliğin dışında bir oluşumunun meydana geldiğini görülmektedir. 1 no'lu numunenin modifikasyon tabaka kalınlığı 20 μm iken, 2 no'lu numunenin 18 μm , 3 no'lu numunenin ise 21 μm . Bu durumun sebepleri ise; ilk olarak, elektrik arkının yüzeyde hareket etmesidir ki bu genellikle normal olarak değerlendirilir. İkincisi kondansör pillerinin boşalımı (discharge) her zaman elektrik ölçümlerinde görüldüğü gibi aynı olmayabilir. Üçüncüsü ise, ısı iletim şartları birbirlerinden farklı olabilir Modifikasyon bölgesinde merkez bölgedeki soğuma hızı ile kenar bölgede ki soğuma hızı birbirinden farklıdır. Bölgesel soğuma hızı farklılıkları modifikasyon tabakasında, tabaka kalınlık değerlerinin değişiminde etki sahibi olabilir [116].

İşlem süre 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. Pulse sayısı artınca, yüzeyde hızlı katılaşmadan dolayı metastabil ultra ince taneler oluşur [112, 117-119,].

Optik mikro yapılar incelendiğinde ise; pulse plazma işleminin yapıda önemli miktarda boşluklar meydana getirdiği gözlemlenmiştir. Bu boşluklar difüzyonun kolay olmasına katkı sağlar. Dahası, gerilme dalgaları da difüzyonun artmasına katkı sağlar. Bundan dolayı tamamen doymuş $\alpha\text{-Fe}$ katı çözeltisi kenar yüzey bölgelerde kararlıdır.

İşlemden sonra α fazı içerisinde dislokasyon hücreleri ve sementiti fazları görülür. Bu hızlı ısınma ve soğumanın sebep olduğu plastik deformasyonun ve sert gerilmelerin bir işaretidir. Nanotaneli ostenit ve sementiti ferrit matriksinde katılaşır. Az miktarda nanotaneli sementitin oluşumu hızlı katılaşmaya katkıda bulunur. Perlitin çözülmesinden sonra karbonca aşırı doymuş $\alpha\text{-Fe}$ 'den hızlı soğutma prosenine katkı sağlamaktadır. Bu soğuma geçişi sementitin büyümesini engeller. Hızlı soğumalardan sonra kalıntı ostenit genellikle elde edilir. Stahli ve Sturzeneger pulse plazma kullanılan çeliklerde oluşan çok ince bir tabaka olan nano-ostenit yapısı

(yaklaşık 0.3 μ m) incelenmişlerdir. Çalışmalarında; nanoostenit fazın varlığı başlangıçta karbür parçalarının çözülmesine katkı sağlamış olduğunu ve γ fazının sonradan ortaya çıkan stabilizasyonundan dolayı karbon konsantrasyonu artırdığını fark etmişlerdir.

Dahası, ostenite termal streslerle katkı sağlanabilir. Süper hızlı ısınmadan dolayı ortaya çıkmış nanotaneli ostenit katılaşması, ostenit tanelerinin büyümesini engeller. Diğer yandan son derece yüksek soğuma hızı oda sıcaklığında ostenitin nano tanede kalmasını sağlar,

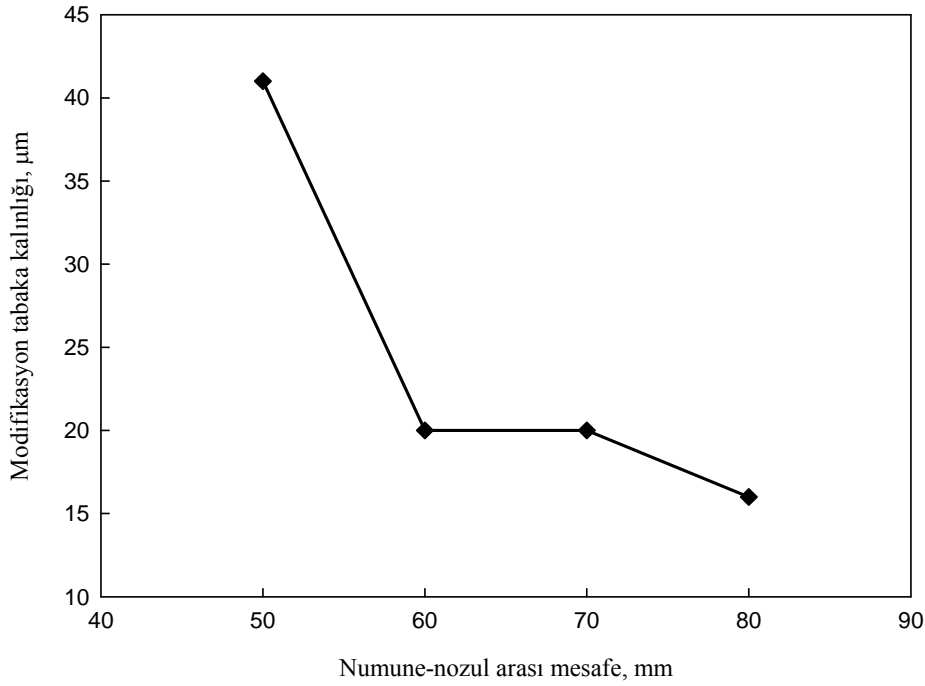
Hızlı katılaşmadan dolayı yüzeyde amorf faz oluşmaktadır. Amorf yapı tamamen nanoyapıyla alakalıdır. Amorf yapının oluşumu kritik kristal boyutların altındaki lokal bölgelerde bazı nanoyapıdaki parçaların boyutlarına katkı sağlamış olabilir. Pulse plazma sisteminde kullanılan yüksek enerji difüzyonu artırmıştır. Hızlı ısınma ve katılaşma plastik deformasyona, dislokasyon hücrelerine artmasına sebep olarak, yüzey özelliklerinin gelişimine yol açmıştır [119-120]. Yüksek akımlı elektronlar çok kısa zaman içinde metalik alaşımların yüzeyinde metastabil fazların oluşumuna neden olarak iş parçalarının yüzey özelliklerini geliştirmektedir.

Pulse plazma uygulama şartlarının değişimi yüzeye enerji transferini de değiştireceğinden homojen olmayan oluşumlar görülebilir. Bunun nedeni, ısınma/soğuma proseslerinin difüzyon homojenizasyonundan çok daha hızlı olmasındandır. Bundan dolayı, yalnızca difüzyonun artırılması pulse işleminin eşsiz bir özelliğidir [121].

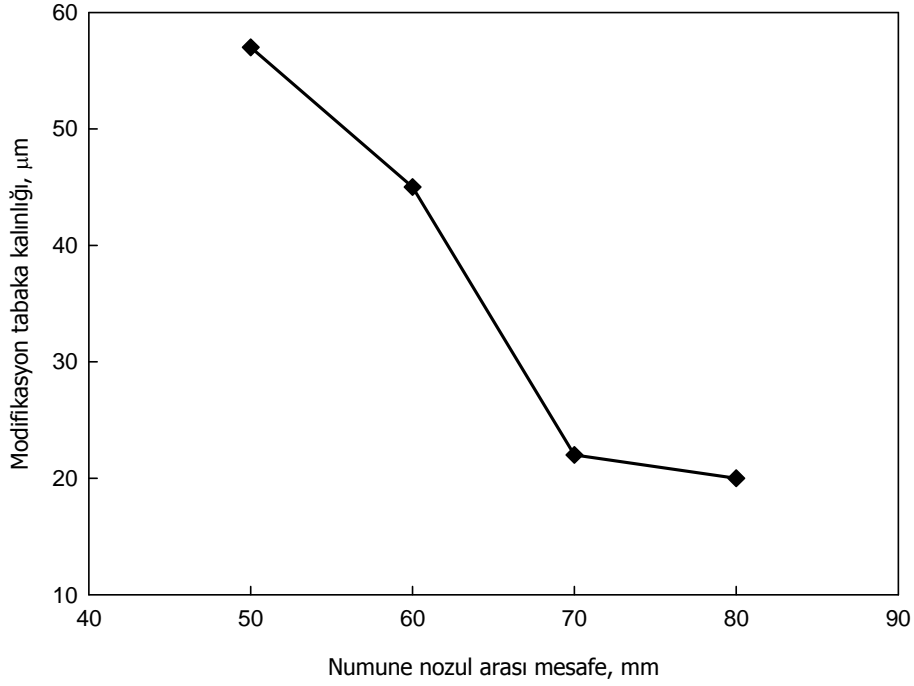
Dönüşüm zonu poroz ve düzensizdir. Bu aşama malzeme içinde gaz molekülerinin oluşumuyla açıklanabilir [122].

Isınma ve soğuma hızının artması sertleşmiş malzemenin boyutunu ve sertleşme derinliğini azaltır. Çok hızlı ısınmadan dolayı, ostenit oluşumu ve karbonun difüzyonu sınırlıdır. Isınma ve soğumanın yüksek hızı genellikle ostenitin büyümesini engeller [123].

Kaplama kalınlıklarının işlem parametreleriyle olan ilişkileri grafiklere aktarılmıştır. Şekil 8.9'da pil kapasitesi 800 mf olan 15 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak modifikasyon tabaka kalınlık değerlerin değişim grafiği görülmektedir. Mesafenin artması (80mm) tabaka kalınlık değerlerinde azalmaya, mesafenin azalmasının (50mm) da tabaka kalınlık değerlerinde artışa neden olduğu görülmüştür. Şekil 8.10'da ise pil kapasitesi 900 mf olduğunda mesafeye bağlı olarak 15 pulse için modifikasyon tabak kalınlık değişim grafiği verilmiştir. Grafiklerden de anlaşılacağı üzere numune nozul mesafesinin kısalması ve pulse sayısının artması genellikle işlem esnasında bir olumsuzluk olmadığı sürece modifikasyon tabaka kalınlığının artmasına sebebiyet vermektedir.



Şekil 8.9 800 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm, 80mm mesafede 15 pulse için mesafe-modifikasyon tabaka kalınlık değerlerinin değişim grafiği

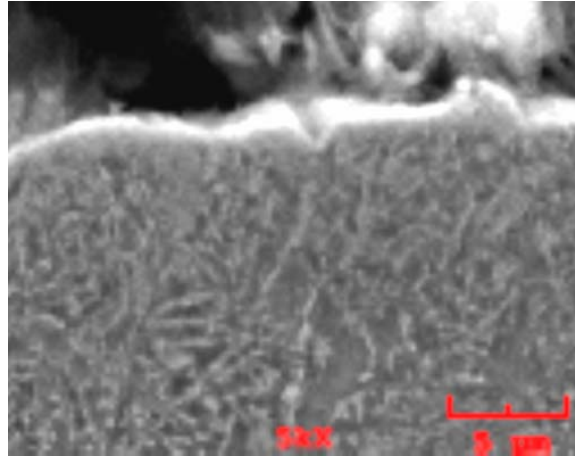


Şekil 8.10 900 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm, 80mm mesafede 15 pulse için mesafe-modifikasyon tabaka kalınlık değerlerinin değişim grafiği

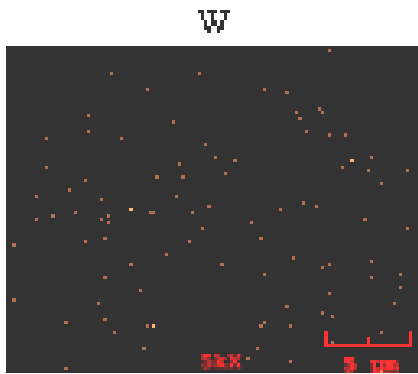
Nozul numune arası mesafenin çok azalmaması (40mm altı) dikkat edilmesi gereken diğer bir husustur. Ön çalışmalar esnasında yapılan denemelerde çok düşük mesafelerde yüzeyde ısınma ve bozulma etkileri görülmüştür.

Pulse sayısı arttıkça modifikasyon tabakasının artacağı ve homojen hale geleceği Kolisnichenko ve çalışma grubu tarafında da yapılan çalışmalarda görülmüştür [43-44]. Pulse sayısı arttıkça yüzeye girecek iyonize ürün miktarı (özellikle wolfram miktarı) artacaktır. Böylece daha kalın ve daha homojen yapıların eldesi mümkün olabilecektir.

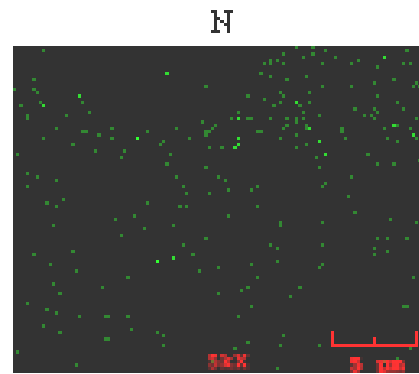
Pulse plazma uygulanmış numunelerde tabaka kalınlıkları ölçülmüş bu modifikasyon tabakalarının bazılarında SEM ve EDS çalışmaları yapılmıştır. Şekil 8.11'de 7(60mm mesafe, 15 pulse, 800mf pil kapasitesi) no'lu numunenin SEM ve EDS analizleri görülmektedir. 7 no'lu numunenin modifikasyon tabakasında element dağılım haritalaması yapılmıştır. Yapılan bu analiz çalışmasında SEM ile yine modifikasyon tabakası rahatlıkla görülmektedir. Bölgeden alınan element dağılım haritalarına bakıldığında ise pulse plazma işlemi esnasında tükenen elektrod olan W elementine rastlanmıştır. Pulse plazma uygulanan AISI 4140 çeliğinin içeriğinde hiç W olmamasına rağmen, W elementi yüzeyden biraz daha aşağı bölgede daha çok gözlemlenmiştir. İşlem sonucu olarak yapıda görülmesi beklenen N elementi ise yoğun oranda Şekil 8.11c'de görülmektedir. Oksijen element analizi sonucunda, yapıda oksijen varlığı belirlenmiştir, açık atmosferde yapılan bir proses olduğundan bu beklenen bir sonuçtur.



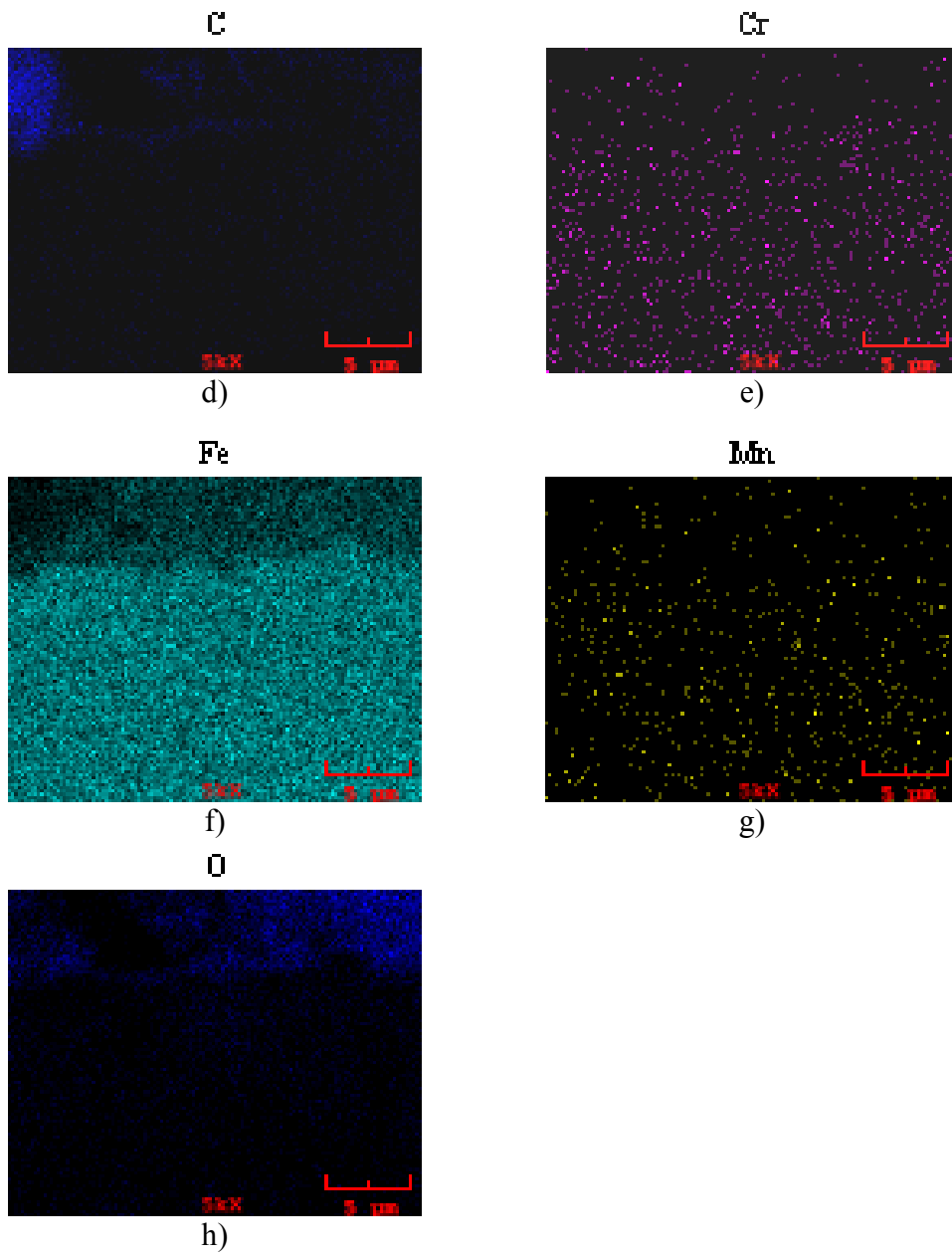
a)



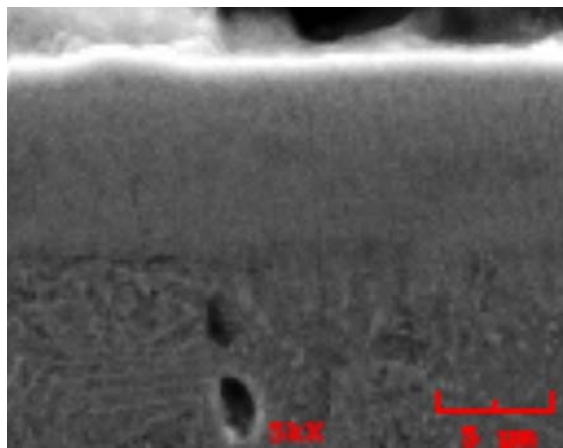
b)



c)

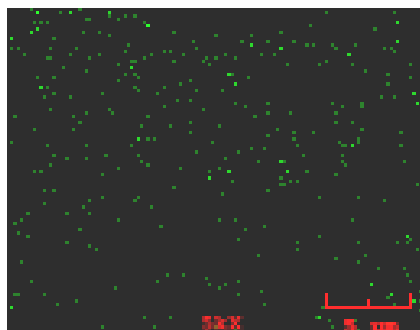


Şekil 8.11 7 no'lu numunenin kesit bölgesinden alınan SEM görüntüsü, b)W, c) N, d) C, e) Cr, f)Fe, g) Mn, h) O için EDS analiz ile element dağılım haritaları



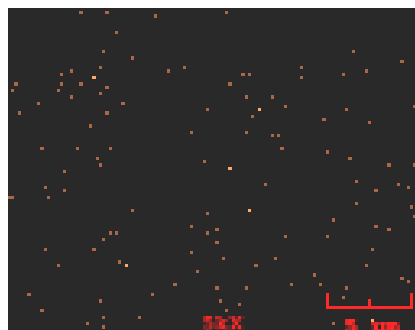
a)

N



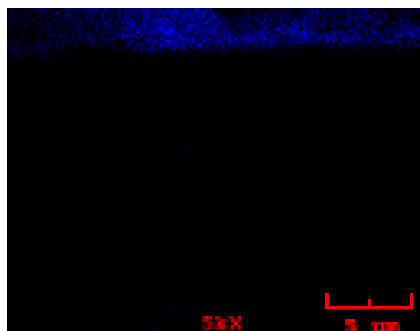
b)

W



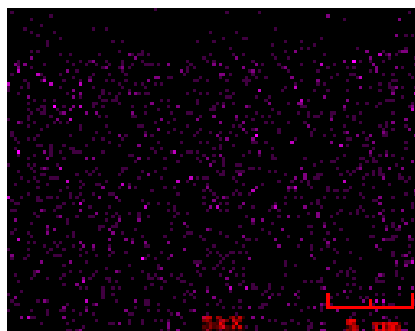
c)

C



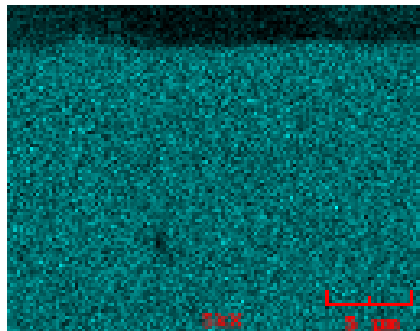
d)

Cr



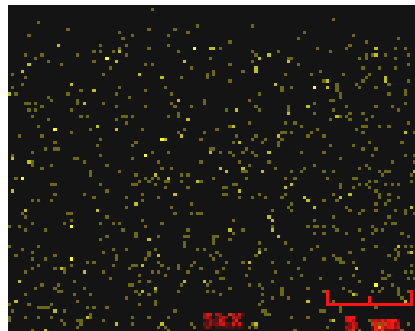
e)

Fe

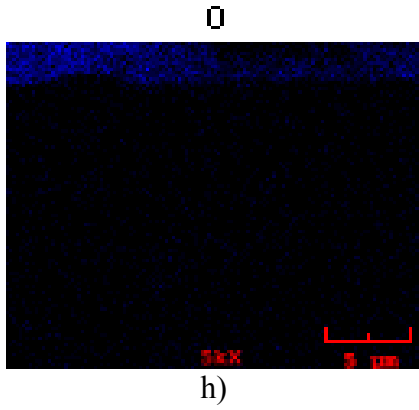


f)

Mn

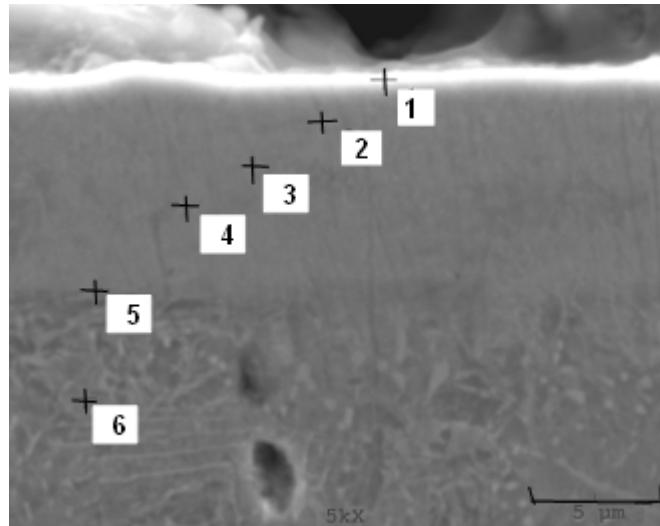


g)



Şekil 8.12 a)17 no'lu numunenin SEM görüntüsü b)N,c)W, d)C, e)Cr, f)Fe, g)Mn, h)O elementlerinin EDS analizi ile element dağılım haritaları

Şekil 8.12'de görülen 17 (60mm mesafe, 10 pulse, 900mf pil kapasitesi) no'lu numunenin EDS ile yapılmış element analiz haritaları incelendiğinde 7 no'lu numuneye göre 17 no'lu numunede W ve N element miktarı artmıştır. W elementi modifikasyon tabakasında daha homojen dağılmıştır. N elementi ise yüzeye yakın bölgelerde daha yoğun varlık göstermiştir. Bu numune grubuna ayrıca noktasal EDS analiz çalışması yapılmıştır.



a)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça %)
C	0.122
N	0.000
O	14.870
Cr	0.316
Mn	0.183
Fe	91.474
W	2.035

b)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça %)
C	0.000
N	2.335
O	0.089
Cr	0.514
Mn	0.310
Fe	95.126
W	2.625

c)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça %)
C	1.431
N	1.523
O	2.190
Cr	0.762
Mn	0.729
Fe	92.273
W	1.291

d)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça %)
C	4.690
N	1.414
O	0.324
Cr	0.434
Mn	0.283
Fe	91.103
W	1.753

e)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça %)
C	5.755
N	1.372
O	0.656
Cr	0.536
Mn	0.748
Fe	88.703
W	2.229

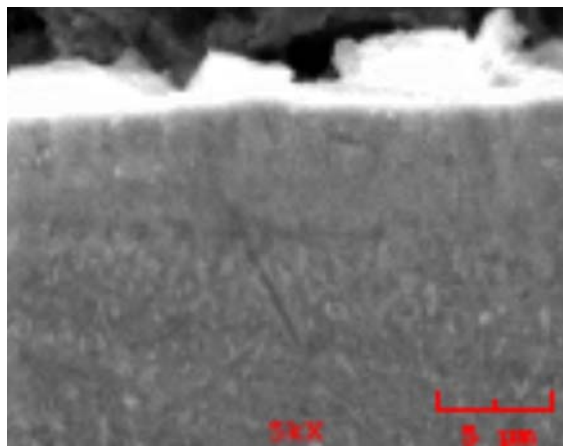
f)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça %)
C	3.604
N	0.423
O	0.786
Cr	0.618
Mn	0.457
Fe	91.112
W	0.229

g)

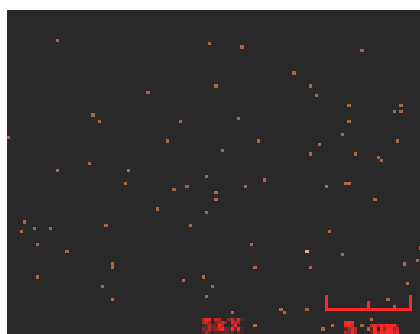
Şekil 8.13 17 no'lu numunenin modifikasyon tabakasında yüzeyden içeriye doğru noktasal element Analizi a) EDS analiz resmi, b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 no'lu noktalardan alınan EDS analiz sonuçları.

Alaşım harita analiz sonuçlarına göre (Şekil 8.13) 1.bölgede miktar olarak yüksek olan W yüzeyden içeriye doğru ilerlendiğinde miktar olarak önce düşmüş sonra yükselen bir eğilimi gösterirken, N elementi yüzeyden numune içerisinde doğru düzenli bir azalma eğilimi göstermiştir. 6no'lu noktada ise modifikasyon tabakası dışına çıkılması itibariyle çeliğin ana yapısında hiç bulunmayan W elementine hiç rastlanmaz iken N elementine çok az rastlanmıştır.



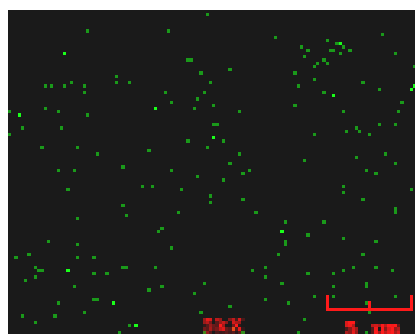
a)

W



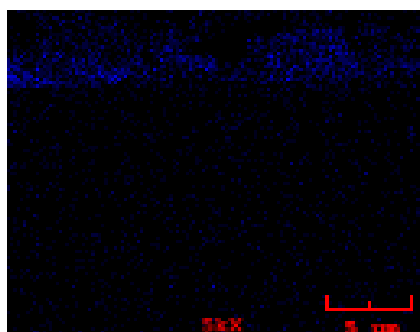
b)

N



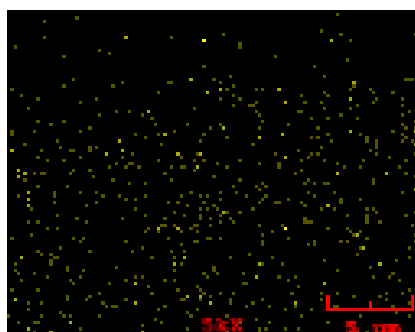
c)

O

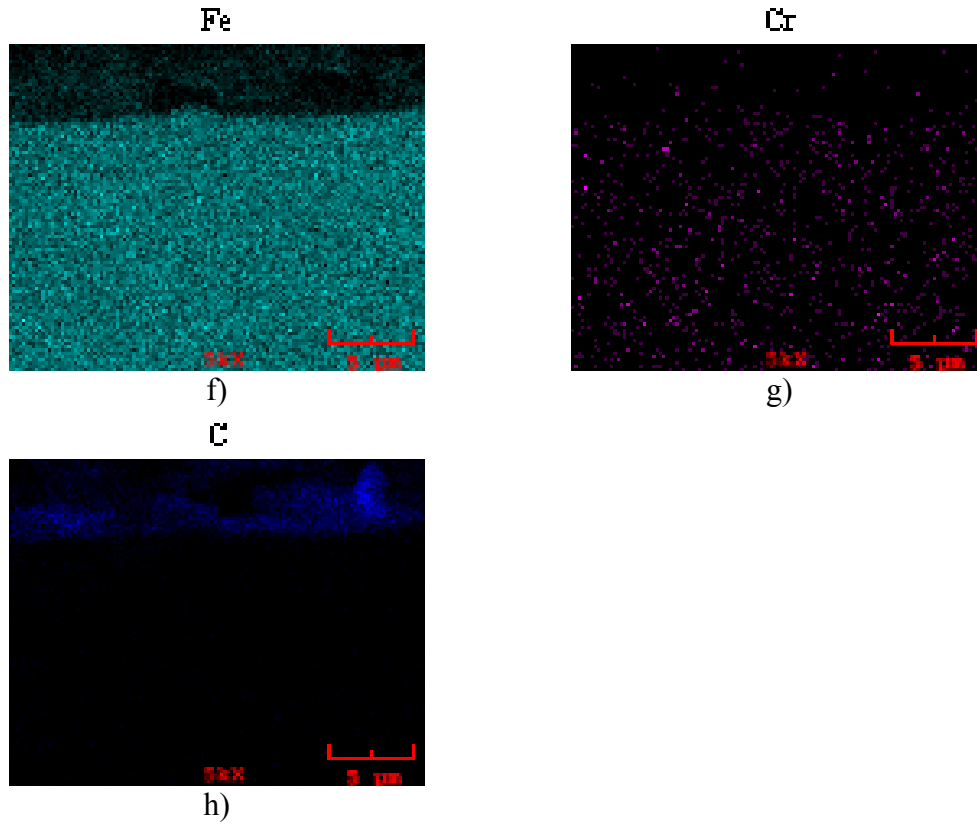


d)

Mn



e)



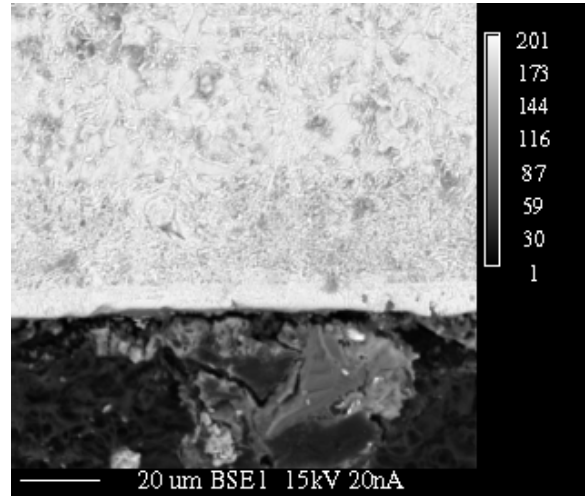
Şekil 8.14 a)20 no'lu numunenin EDS görüntüsü, b)W, c) N, d) O, e) Mn, için EDS element dağılım haritaları

20(70mm mesafe, 10 pulse, 900mf pil kapasitesi) no'lu numuneden alınmış EDS element analiz haritalarına bakıldığında (Şekil 8.14), 17 no'lu numune ile arasındaki tek fark olan numune nozul arası mesafenin (60mm'den 70 mm'ye çıkmış) etkisiyle W miktarı modifikasyon tabakasında azalmıştır. W elementi daha az bir şekilde tabakada yayılmıştır. Aynı eğilim N elementi için geçerlidir.

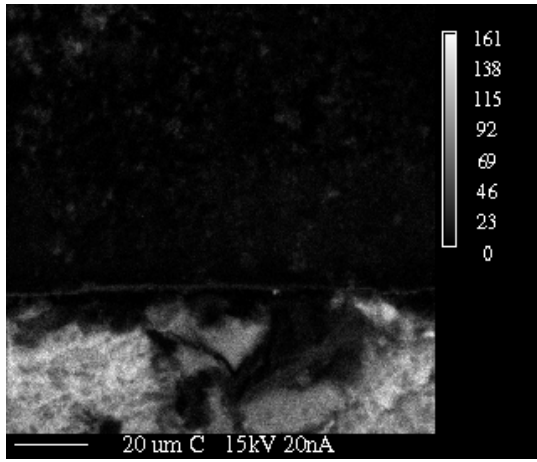
8.2. EPMA Analiz Sonuçları

Pulse plazma işlemi sonrası metalografik olarak hazırlanmış numunelerden bazılarında EPMA cihazı ile elementel analiz yapılmıştır. Şekil 8.15 ve 8.16'de 4 (80mm mesafe, 15 pulse, 800mf pil kapasitesi)no'lu numunenin farklı bölgelerinden alınan EPMA analiz sonuçları görülmektedir. Şekil 8.16b'de C elementinin, c'de N elementinin, d'de ise W elementinin analiz sonuçları görülmektedir. Azot elementi Şekil 8.16a'da fotoğrafta görülen yapıda yoğun ve homojen biçimde yayılmıştır. Aynı şekilde Wolfram elementi de modifikasyon tabakasında yayılmıştır. Şekil 8.15e'de ise yüzeyden içeriye doğru wolfram ve azot element miktarı gösteren grafik

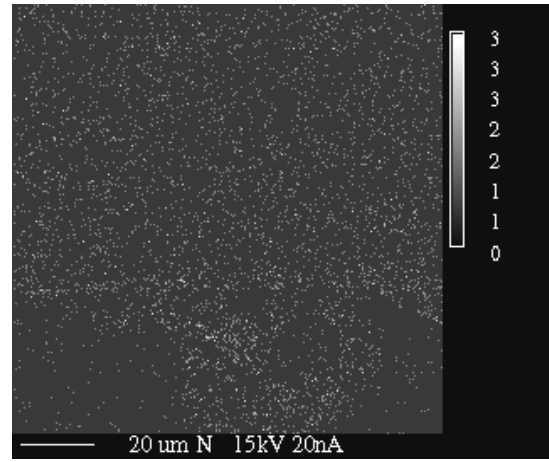
bulunmaktadır. Bu grafikte kırmızı renk azot elementini yeşil renkli çizgiler ise wolfram elementini temsil etmektedir. Grafikte de anlaşılacağı üzere yüzeyden içeriye doğru bölgesel olarak kimyasal içerik farklılıkları meydana gelmiştir.



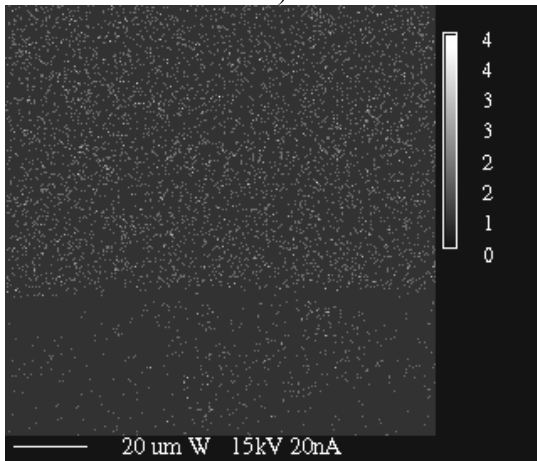
a)



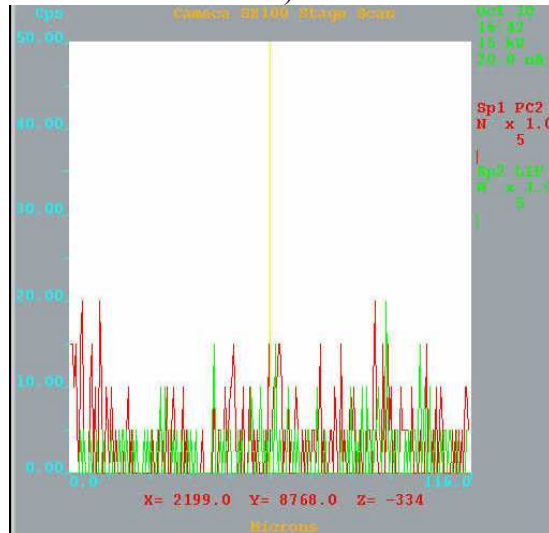
b)



c)

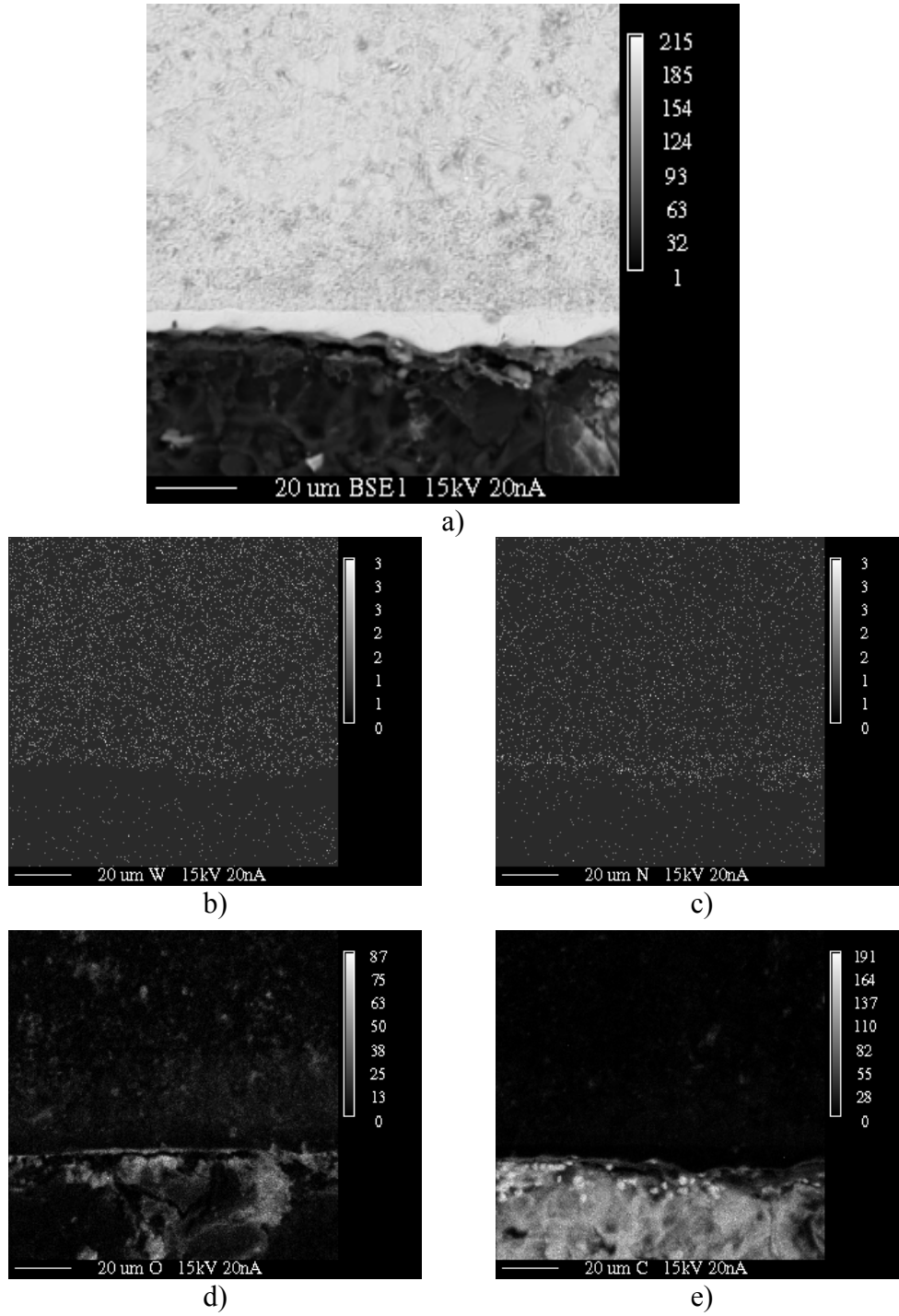


d)



e)

Şekil 8.15 4 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının EPMA elementel analiz sonuçları, a)Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b)C, c) N, d) W elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı.

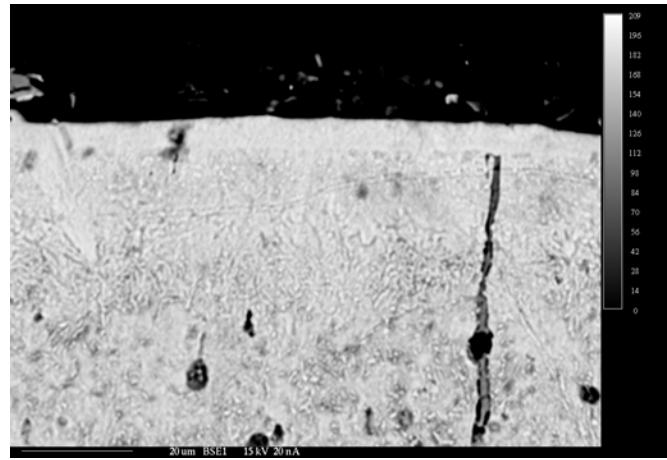


Şekil 8.16 4 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının başka bir bölgesinden EPMA elementel analiz sonuçları, a)Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b)W, c) N, d) O, e)C elementlerinin dağılım haritaları

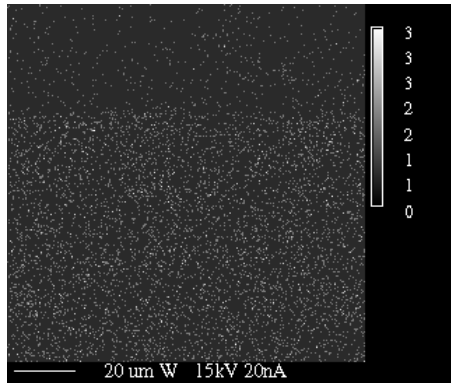
Yine 4 no'lu numune üzerinde yapılan başka bir analiz çalışmasında ayrıca oksijen elementi de incelenmiş (Şekil 8.16), yapıda az da olsa yer yer oksijen elementi varlığına rastlanmıştır. SEM çalışmaları ile görülmüş olan bu elementin varlığı yüzey

özellikleri açısından önem arz etmektedir. Oksijen elementinin varlığı aşınma ortamlarında çalışma parçalarının kullanım ömrünü etkileyebilmektedir.

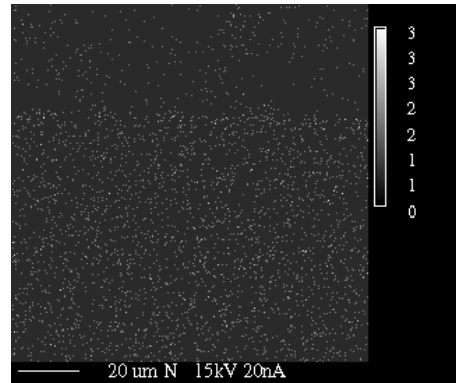
Şekil 8.17’de görülen 5(10 pulse) no’lu numunenin 4 (15 pulse) no’lu numuneden farkı pulse sayısıdır. Daha az sayıda pulse uygulanan 5 no’lu numunenin modifikasyon tabaka kalınlık çalışmalarından elde edilmiş bazı veriler yardımıyla değerlendirmeler yapılabilir. 5 no’lu numunenin kaplama kalınlığı 4 no’lu numunden daha fazla olduğu daha önce belirtilmişti. Fakat analiz sonuçlarından görüldüğü üzere hem wolfram hem azot element miktarı 4 no’lu numuneye göre daha azdır. Şekil 8.17’de wolfram kırmızı, azot yeşil renkli çizgiler ile temsil edilmektedir. Yüzeyden itibaren elementel değişimlerine bakıldığında pulse sayısı farkının elementel dağılımını nasıl etkilediğini görmemiz mümkündür. Pulse sayısının azalımı yüzeye pulse plazma yöntemiyle difüze olacak element miktarlarında azalım meydana getirmiştir. Pulse sayısı arttıkça yüzeydeki wolfram miktarı artacaktır [44].



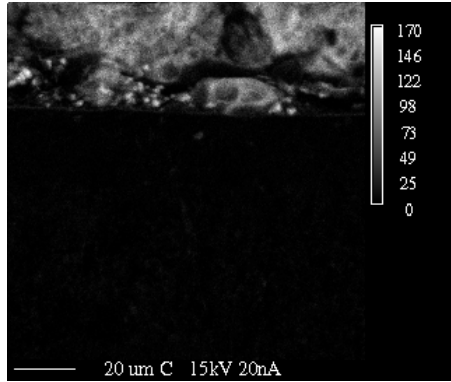
a)



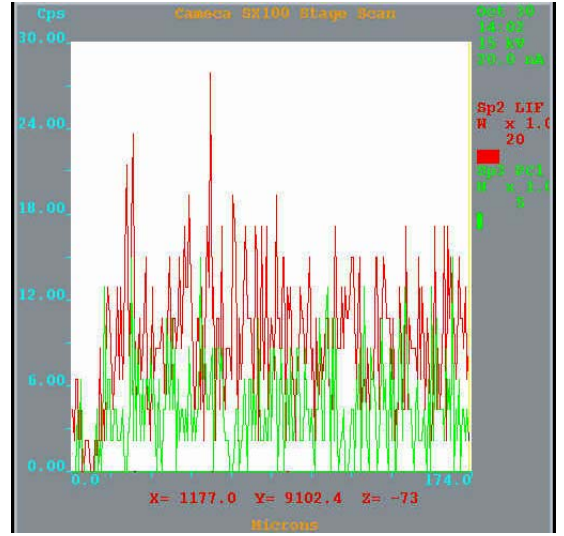
b)



c)

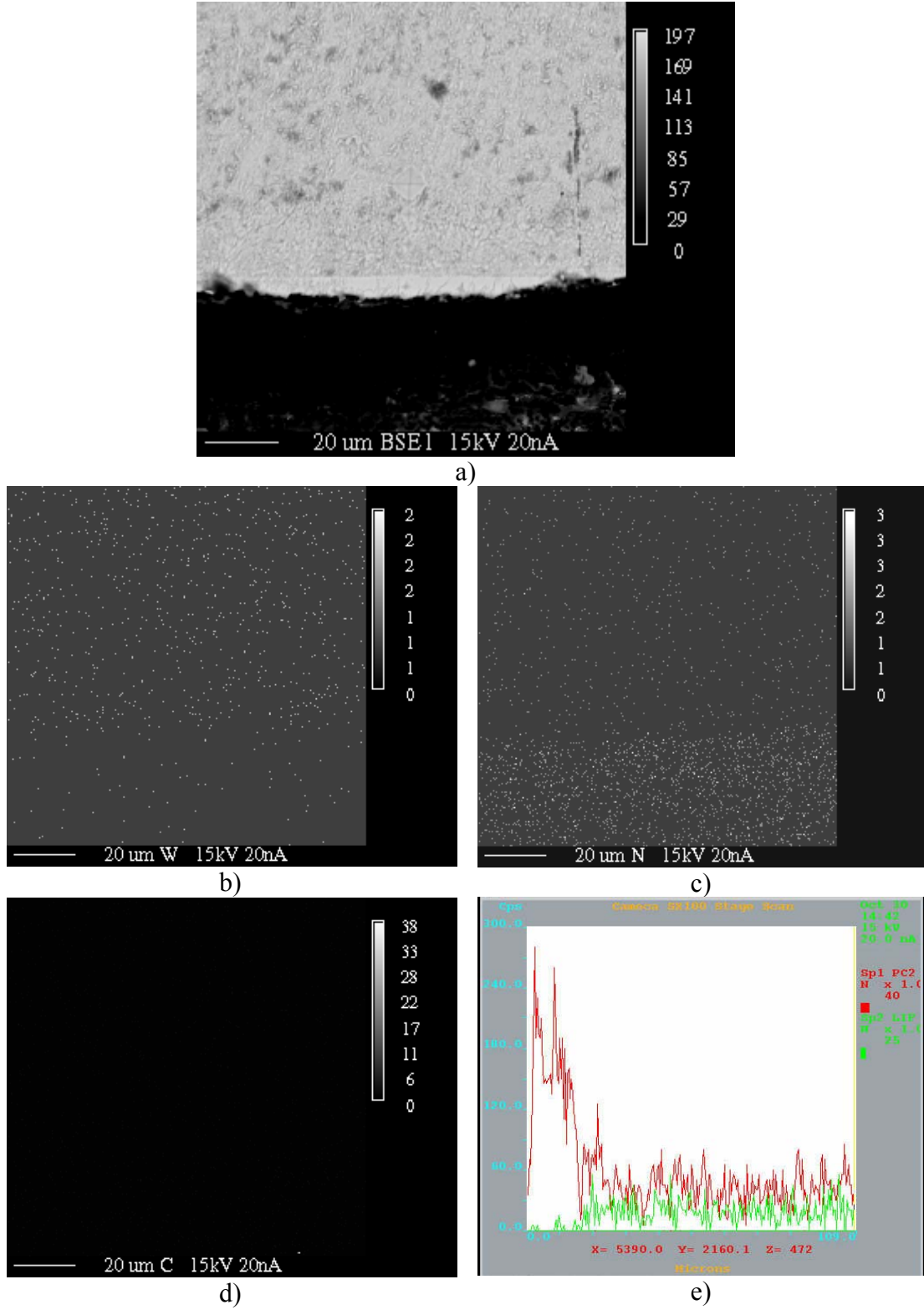


d)



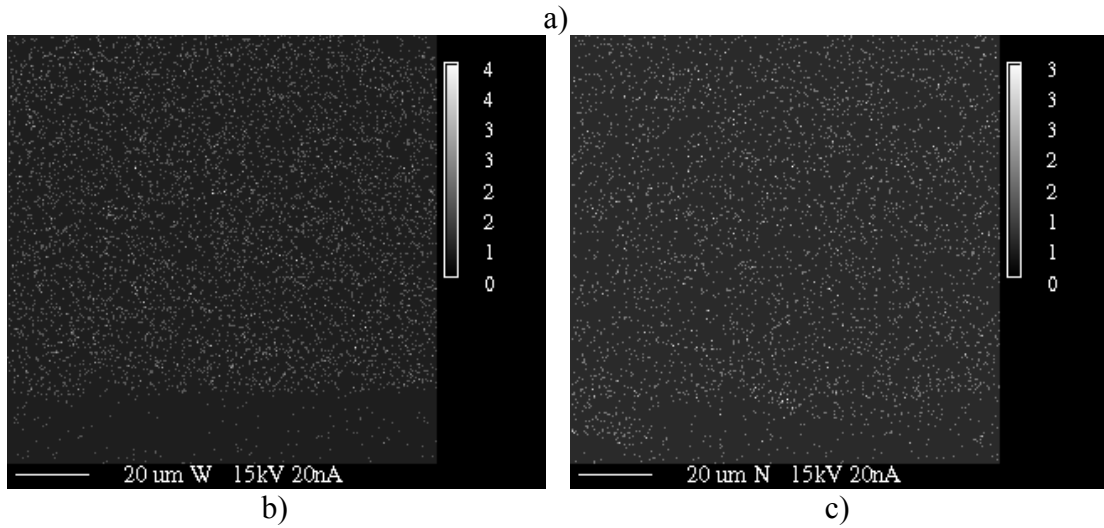
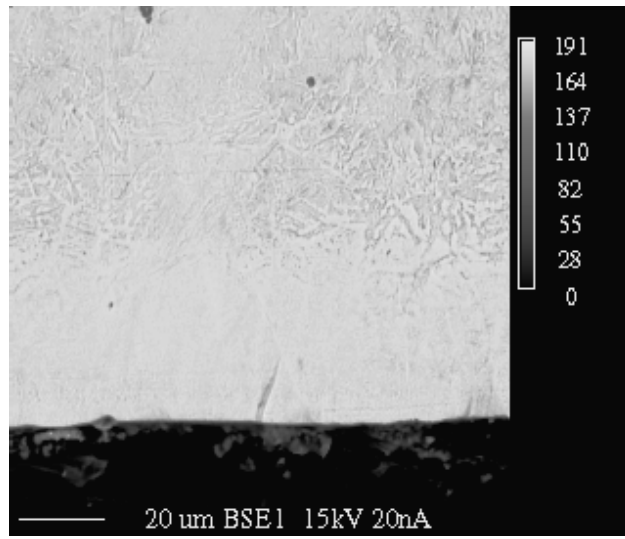
e)

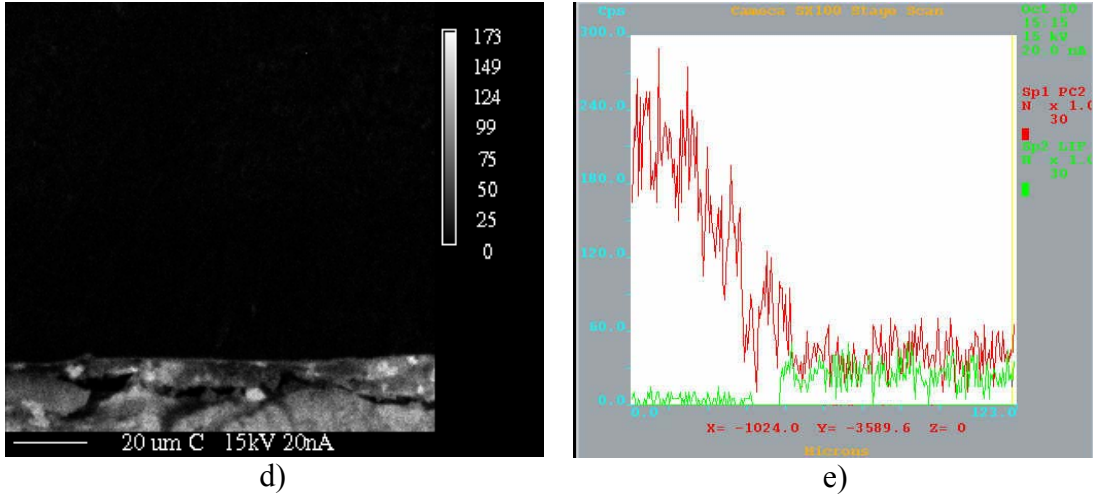
Şekil 8.17 5 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının EPMA elementel analiz sonuçları, a)Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b)W, c) N, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı .



Şekil 8.18 6 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının EPMA elementel analiz sonuçları
a) Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b) W, c) N, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı.

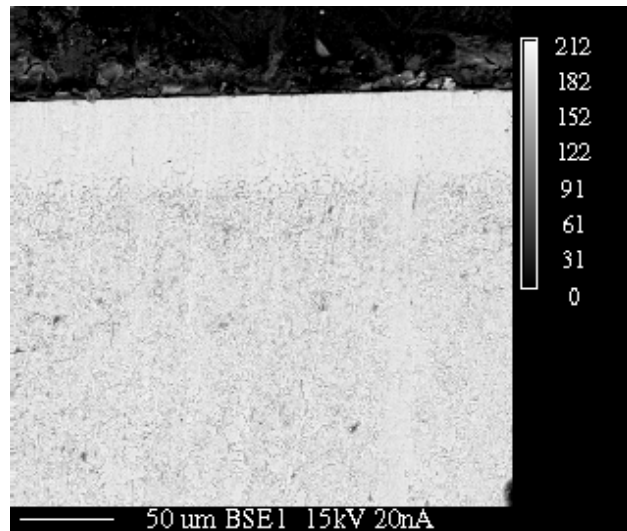
Şekil 8.18’da görülen 6 (80 mesafe, 5 pulse, 800mf pil kapasitesi) no’lu numunenin EPMA analizlerinden görüleceği üzere hem wolfram hem de azot miktarı düşmüştür. Azot miktarı ilk başta yükselse de hemen azalmış ve düşük seviyelere inmiştir. Wolfram ise oldukça düşük bir seyir göstermiştir. Bu düşüşün pulse sayısının azalmasından dolayı olduğu düşünülmektedir. 4 (15 pulse), 5(10 pulse) ve 6 (5 pulse) no’lu numuneler arasındaki tüm pulse plazma işlem şartlarının aynı, sadece pulse sayılarının farklı olduğu düşünüldüğünde elementlerin miktarlarının değişkenlik gösterme sebebi anlaşılmaktadır.



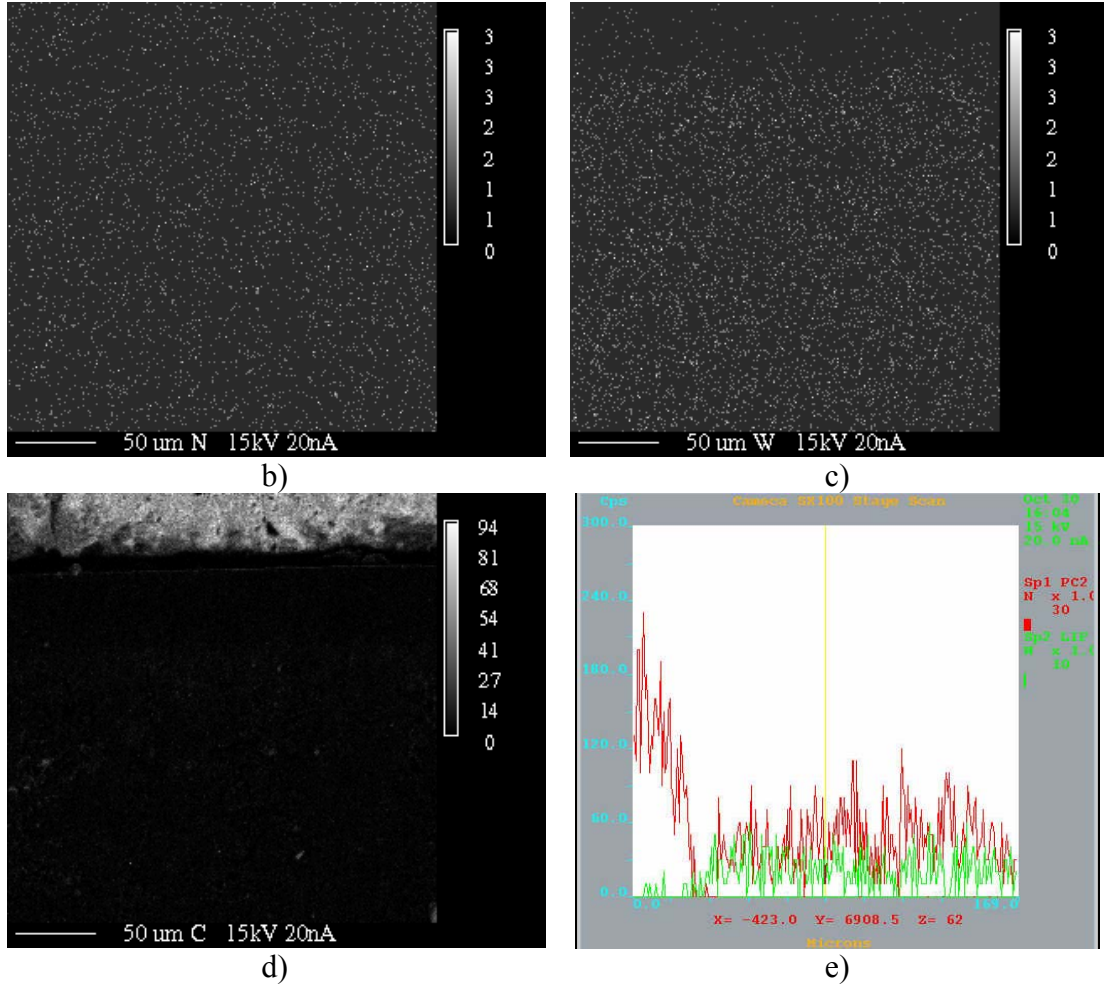


Şekil 8.19 13 no'lu numunenin a) Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b) W, c) N, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı.

Şekil 8.19'da 13 (50mm mesafe, 15 pulse, 900mf pil kapasitesi) no'lu numunenin analizleri sonucunda wolfram ve azot element miktarı yüksek ve homojen şekilde olduğu görülmektedir. Şekil 8.19e'de azot ve wolfram değişim grafiğinde kırmızı renk azotu, yeşil renk wolframı göstermektedir. Burada azot miktarının yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

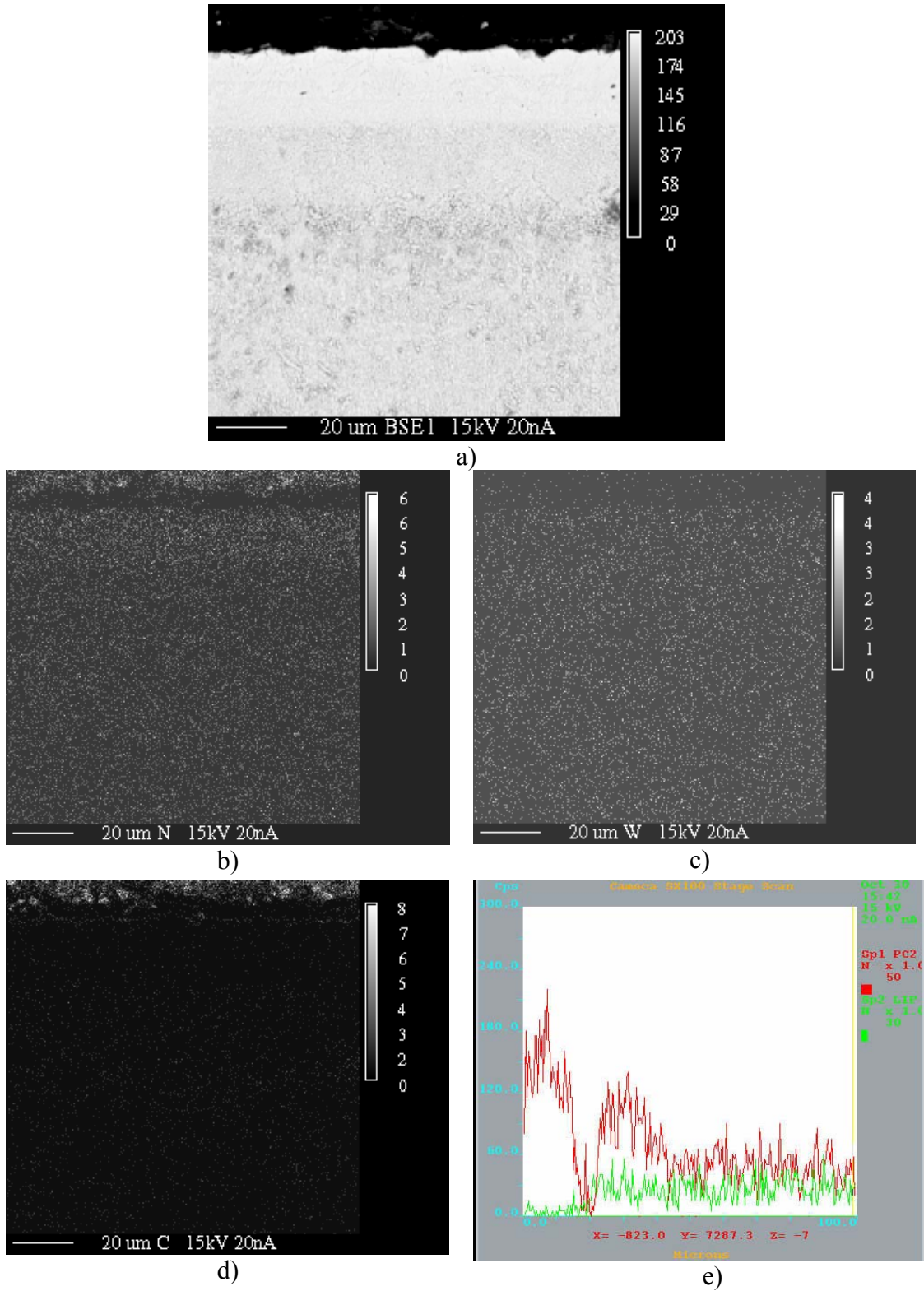


a)



Şekil 8.20 15 no'lu numunenin modifikasyon tabakasının EPMA elementel analiz sonuçları, a)Modifikasyon uğramış yapının EPMA görüntüsü b)N, c) W, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı .

15 (50mm mesafe, 5 pulse, 900mf pil kapasitesi) no'lu numuneden alınan EPMA analizleri sonucunda özellikle azotta ve woframda da bir azalma gözlemlenmiştir. Pulse sayısının az olduğu (5pulse) bu numune grubunda bu element dağılımında ki azalma beklenen bir sonuçtur (Şekil 8.20). 13 no'lu numune ile arasındaki fark olan pulse sayısı yine belirgin bir şekilde element miktarlarının değişimine neden olmuştur.



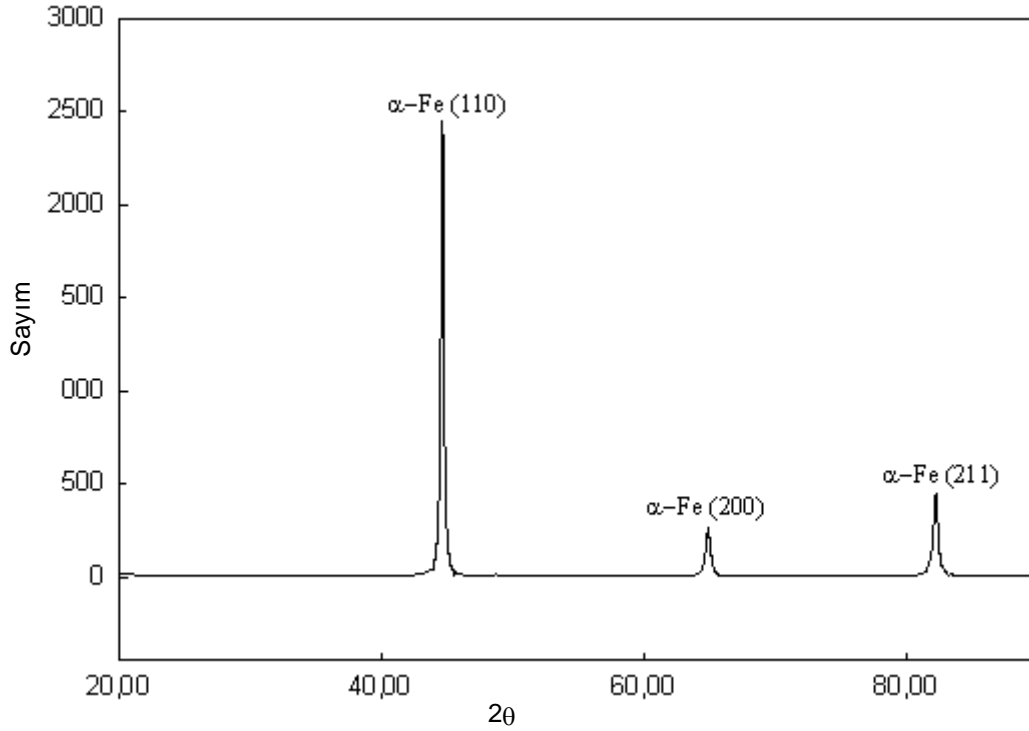
Şekil 8.21 19 no'lu numunenin a)Modifikasyona uğramış yapının EPMA görüntüsü b)N, c) W, d) C elementlerinin dağılım haritaları, e) W ve N elementlerinin yüzeyden içeriye doğru oransal dağılımı.

Pulse sayısının yüksek olduğu fakat mesafenin artması sebebiyle elementel değişimde azalmalar gözlenen 19 (70mm mesafe, 15 pulse, 900mf pil kapasitesi) no'lu numune grubunun EPMA analiz sonucu Şekil 8.21'de verilmektedir. Yüzeyde wolfram ve azot elementi dağılımları görölmektedir Mesafenin artmasıyla işlem ve yüzeyin etkileşiminin azalması, odaklanmanın zorlaştıracığından yüzeyde modifikasyon etkileri daha az, yani element miktarı daha az olabilir.

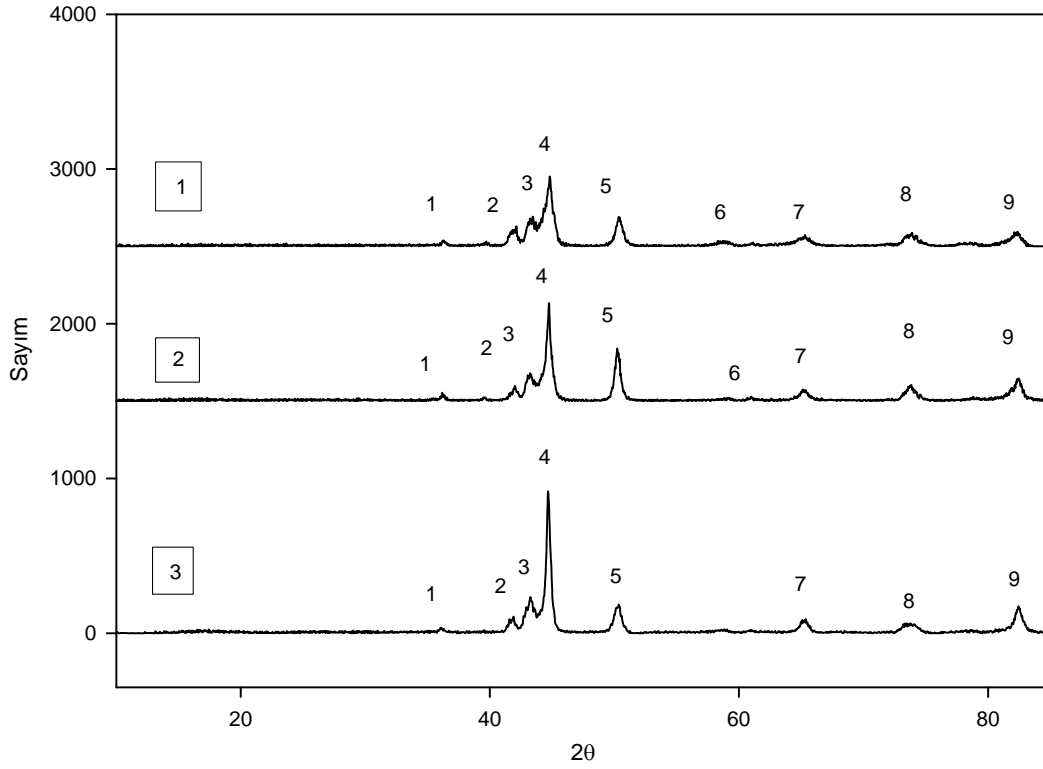
8.3. X-Işını Analiz Sonuçları

Pulse plazma uygulanmadan önce AISI 4140 çeliklerinin x-ışını analizleri yapılmıştır. İşlem öncesi ana yapıdaki fazlar belirlenmiştir. Pulse plazma yöntemi ile modifikasyon işleminden sonra 24 grup olan tüm deney numunelerine uygulanan x-ışını analizleri ile oluşan yeni fazlar bulunmuştur.

Şekil 8.23'de x-ışını analizi verilen işlem görmemiş AISI 4140 çeliği, işlem sonrası meydana gelen yeni faz oluşumları 1, 2 ve 3 no'lu numuneler için Şekil 7.24'de görülmektedir. $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu yardımı ile gerçekleştirilen x-ışını sonucu elde edilen fazlar kullanılan kart numaraları Tablo 8.2'de verilmektedir.



Şekil 8.23 İşlem uygulanmamış AISI 4140 çeliğinin x-ışını analiz sonucu



Şekil 8.24 1 (70mm, 15 pulse, 800mf), 2 (70mm, 10pulse, 800mf) ve 3 (70mm, 5 pulse, 800mf) no'lu numunelerin x-ışını analiz sonuçları

Tablo 8.2 X-ışını çözümünde kullanılan kart numaraları ve bulunan fazlar

Kart No	Faz No	Muhtemel Fazlar
01-083-0879	1	W_3O
00-052-0513	2	γ -Fe
01-081-2262	3	Fe_3N, W_3O, W
00-041-1230	4	α -Fe, W
00-047-1319	5	W_3O_8
01-087-0721	6	Fe_3N, W
01-089-3659	7	α -Fe, W_3O, W
	8	γ -Fe, Fe_3N
	9	α -Fe, Fe_3N

İşlem görmemiş AISI 4140 çeliğinde sadece α -Fe fazı bulunurken, işlem sonrası yeni fazların oluştuğu görülmüştür. Modifikasyon tabakasında Fe_3N , γ -Fe, wolfram (W) ve wolframın oksit bileşiklerinin mevcut olduğu görülmüştür.

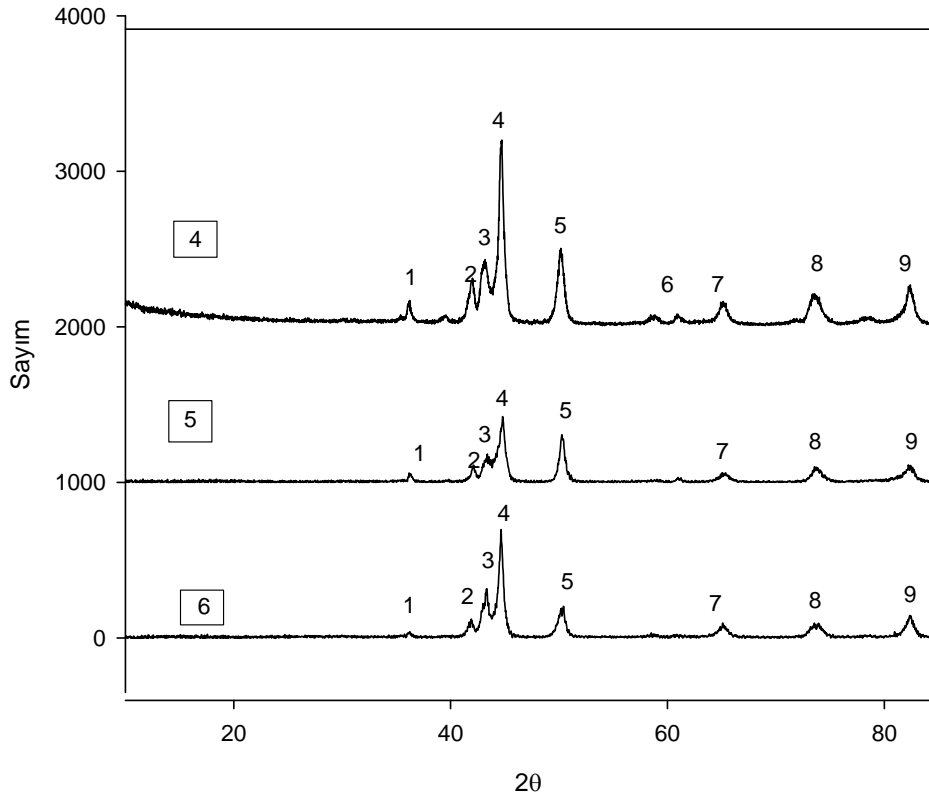
Şekil 8.24'de görüleceği üzere pulse sayıları aralarındaki tek fark olan bu üç grup numunelerden 1 no'lu numunedeki pulse sayısının fazla olması itibariyle pik

genişlikleri artmıştır (FWHM değerleri büyümüştür). Bunun nedeninin pulse sayısının artışıyla işlem süresinin artması olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla, pulse miktarı artmasıyla yüzeye giren iyonize ürün miktarı da artacaktır. İşlem süresi artmasıyla kristalin fazların oluşumu kolaylaşır [126].

Analizlerde, ayrıca pulse plazma işlemi esnasında tükenen elektrod olan wolfram elektrodan geldiği düşünülen wolframın oksit bileşiği de görülmektedir. 1 ve 2 no'lu numunelerde bu fazın miktarı 3 no'lu numunedekinden daha yüksektir. Bu farklılığının nedenin de yine pulse sayısından ileri geldiği düşünülmektedir

Ayrıca Scherrer bağlantısından da bilineceği üzere FWHM (pik genişliklerinin) değerlerinin artması tane boyutunun azaldığı anlamına gelmektedir. 1, 2, 3 no'lu numune gruplarında görülen pik genişlemeleri tane boyutlarının da küçüldüğünü anlamamızda yardımcı olmaktadır.

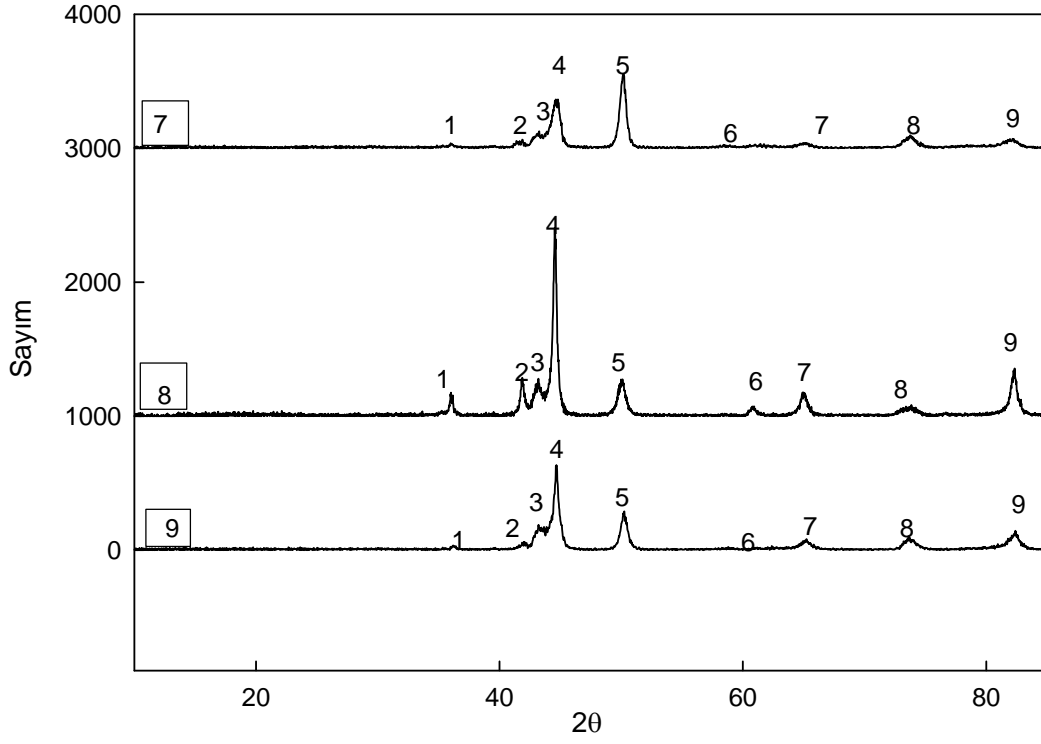
Şekil 8.25'de 4, 5 ve 6 no'lu numunelerinin x-ışını analiz sonuçları görülmektedir. 4 no'lu numunenin pulse sayısı (15pulse) 6 no'lu (5 pulse) numuneninkinden fazladır. Pik şiddetlerine bakıldığında bu farklılığın pik şiddetlerini de etkilemektedir. 4 no'lu numunede wolfram esaslı fazların piki 5 ve 6 no'lu numune gruplarına göre daha şiddetlidir. Bu durum mevcut diğer fazlar için de geçerlidir. Bu grup numunelerin yapılarında yine Fe_3N , γ -Fe, wolfram ve/veya wolframoksit fazları mevcuttur.



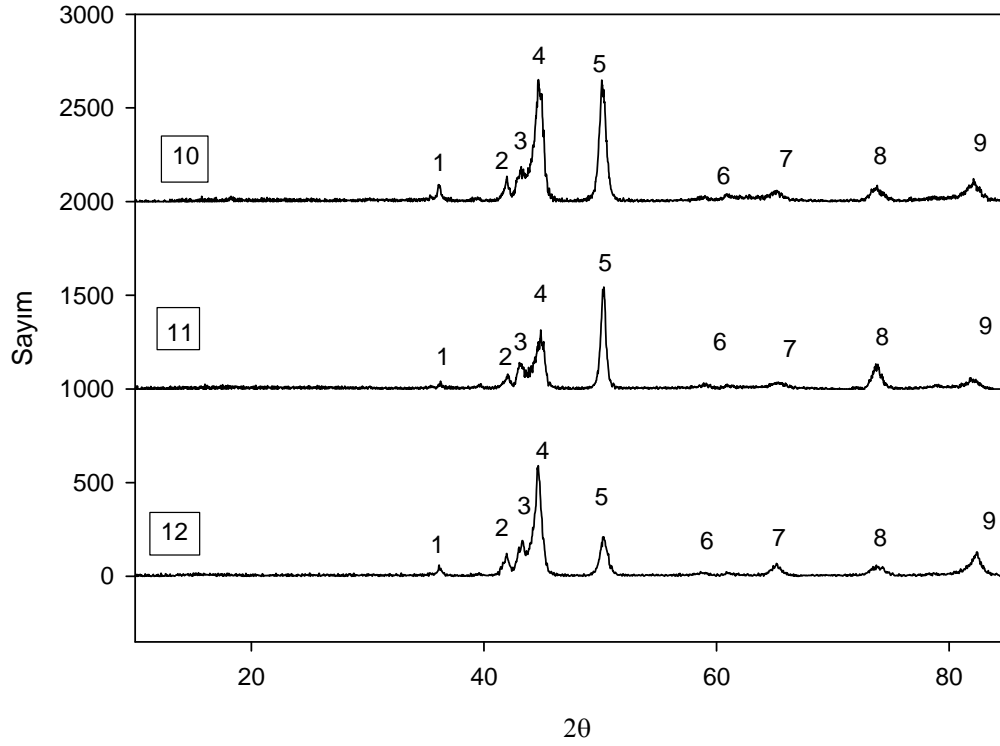
Şekil 8.25 4 (80mm, 15 pulse, 800mf), 5(80mm, 10 pulse, 800mf) ve 6(80mm, 5 pulse, 800mf) no'lu numunelerin x-ışını analiz sonuçları

Faz No	Muhtemel Fazlar
1	W_3O
2	γ -Fe
3	Fe_3N, W_3O, W
4	α -Fe, W
5	W_3O_8
6	Fe_3N, W
7	α -Fe, W_3O, W
8	γ -Fe, Fe_3N
9	α -Fe, Fe_3N

Şekil 8.26'da 7, 8 ve 9 no'lu numune gruplarının analiz sonuçları görülmektedir. Bu analiz sonucuna göre yine pulse sayısının artmasıyla pik genişlikleri ve pik şiddetleri artmıştır. Yapı içerisinde yüzey özelliklerine katkı sağladığı düşünülen bazı fazların miktarsal değişimi mekanik özellikler bakımından önemlidir. Özellikle Fe_3N , W esaslı fazlarının varlığı ve miktarı bu sebeple önem arz etmektedir[120-122].



Şekil 8.26 7 (60mm, 15 pulse, 800mf), 8(60mm, 10 pulse, 800mf) ve 9(60mm, 5 pulse, 800mf) no'lu numunelerin x-ışını analizleri

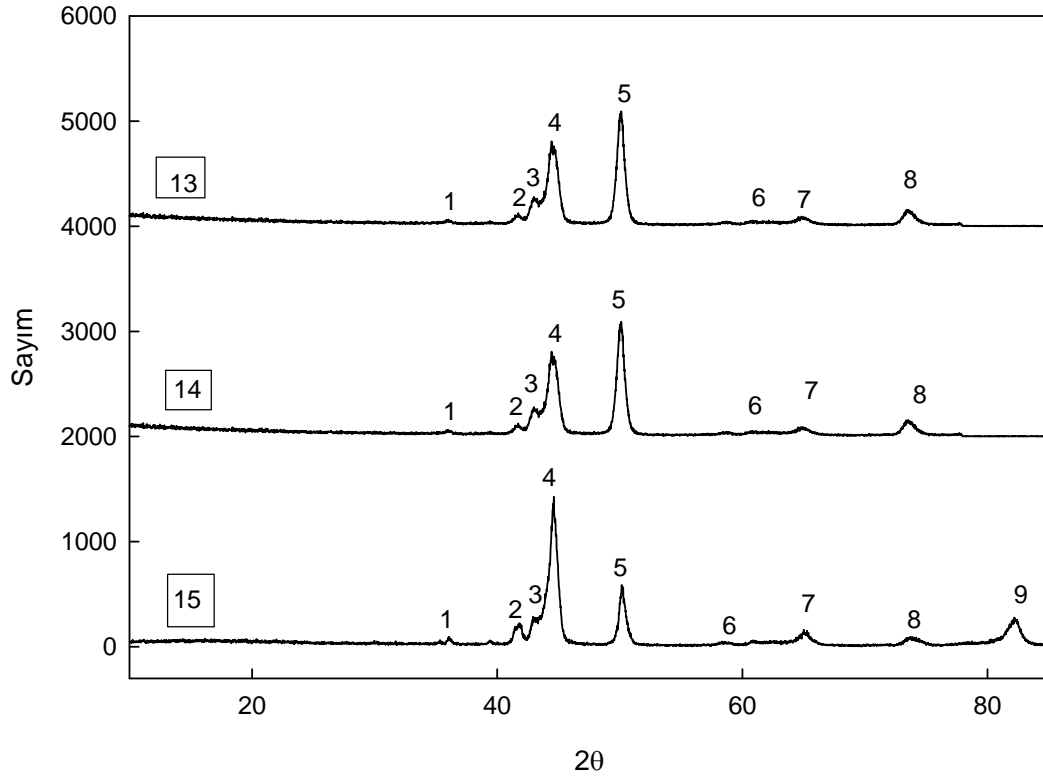


Şekil 8.27 10(50mm, 15 pulse, 800mf), 11(50mm, 10 pulse, 800mf), ve 12(50mm, 5pulse, 800mf) no'lu numunelerin x-ışını analiz sonuçları

Faz No	Muhtemel Fazlar
1	W ₃ O
2	γ -Fe
3	Fe ₃ N, W ₃ O, W
4	α -Fe, W
5	W ₃ O ₈
6	Fe ₃ N, W
7	α -Fe, W ₃ O, W
8	γ -Fe, Fe ₃ N
9	α -Fe, Fe ₃ N

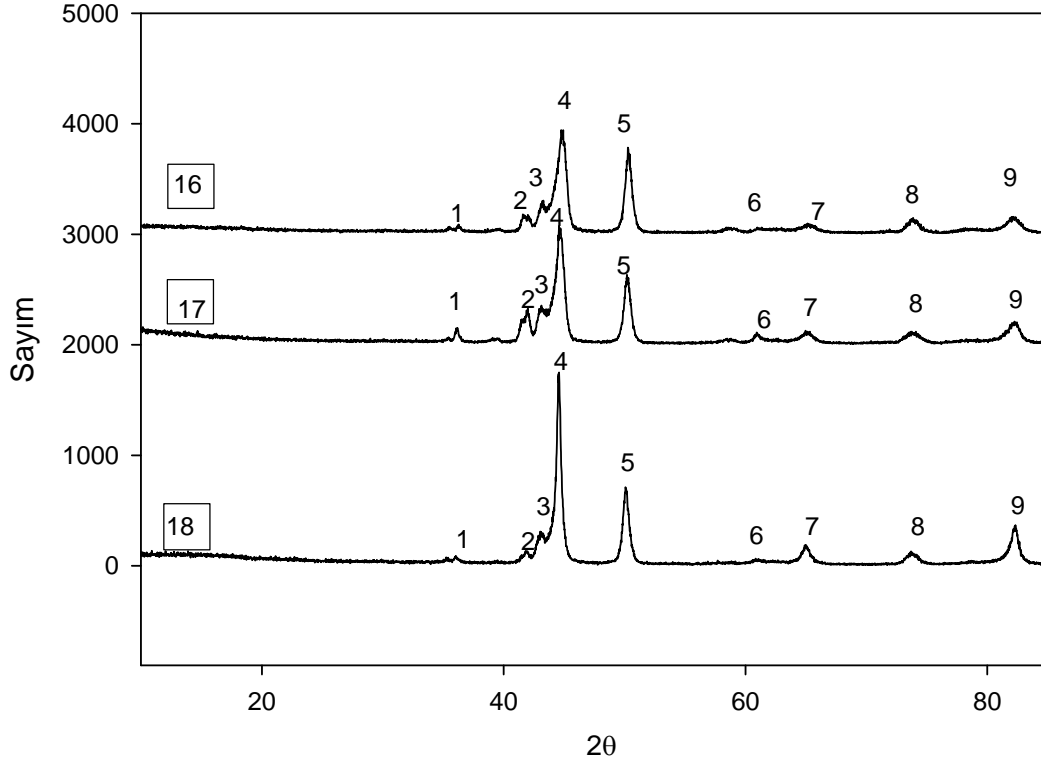
Şekil 8.27’de verilmekte olan 10, 11 ve 12 no’lu numunelerin x-ışını analiz sonuçlarından numune nozul mesafesinin azalmasının (50mm) pik şiddetlerini ve genişliklerini artırdığı belirlenmiştir. Yapıda nitrür esaslı ve wolfram esaslı fazlar, ve γ -Fe fazları görülmüştür. Özellikler 10 no’lu numunede pulse sayısının fazla olması, numune nozul mesafesinin de düşük olması sebebiyle yüzeyde wolfram ve wolframoksit bileşiklerinin faz miktarlarını artırmıştır. Özellikle pulse sayısının artmasıyla, işlem süresini uzamakta ve bu sebeple yüzeye giren iyonize ürün miktarı artmaktadır.

Pil kapasitesinin 900mf’ a çıktığı numune gruplarından olan 13, 14 ve 15 no’lu numunelerin x-ışını analiz sonuçlarına göre yine pulse sayısına bağlı olarak pik şiddetleri değişmiştir (Şekil 8.28).



Şekil 8.28 13 (50mm, 15 pulse, 900mf), 14(50mm, 10 pulse, 900mf), 15(50mm, 5 pulse, 900mf) no'lu numunelerin x-ışını analiz sonuçları

Faz No	Muhtemel Fazlar
1	W_3O
2	γ -Fe
3	Fe_3N, W_3O, W
4	α -Fe, W
5	W_3O_8
6	Fe_3N, W
7	α -Fe, W_3O, W
8	γ -Fe, Fe_3N
9	α -Fe, Fe_3N

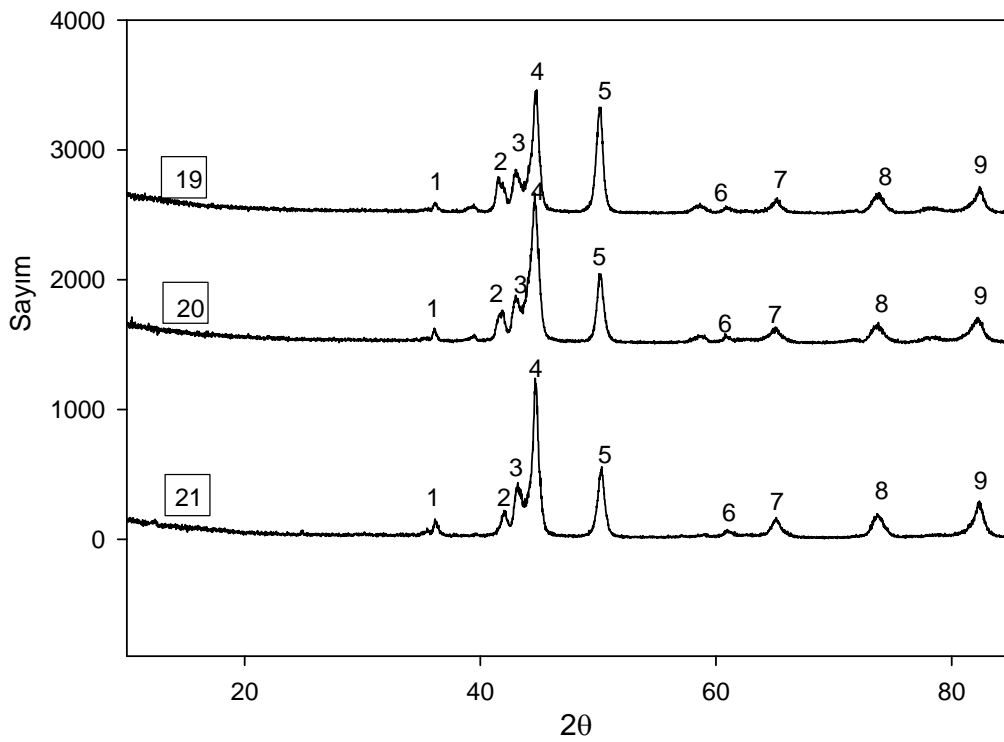


Şekil 8.29 16 (60mm, 15 pulse, 900mf), 17(60mm, 10 pulse, 900mf), 18(60mm, 5 pulse, 900mf) no'lu numunelerin x-ışını analiz sonuçları

Faz No	Muhtemel Fazlar
1	W_3O
2	γ -Fe
3	Fe_3N, W_3O_8, W
4	α -Fe, W
5	W_3O_8
6	Fe_3N, W
7	α -Fe, W_3O_8, W
8	γ -Fe, Fe_3N
9	α -Fe, Fe_3N

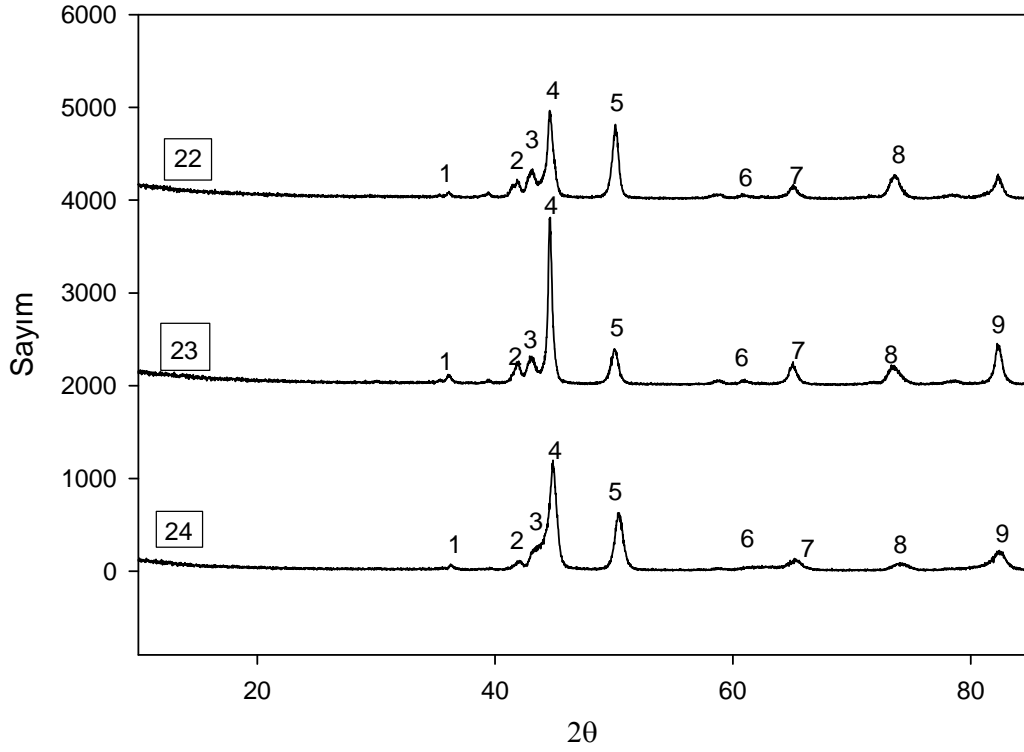
16, 17 ve 18 no'lu numunelerin x-ışını sonuçlarına göre pulse sayısına bağlı olarak, pik şiddetlerinde değişim diğer numune gruplarında görüldüğü gibidir (Şekil 8.29). Pulse sayısının artışı modifikasyon yüzeylerinde wolframın yoğunluğunu artırmıştır [44].

Şekil 8.30'da 19, 20 ve 21 no'lu ve Şekil 8.31'de ki 22, 23, ve 24 no'lu numunelerin x-ışını analizlerinde diğer numuneler için açıklamaya çalıştığımız eğilimler ve sonuçlar aynı şekilde görülmektedir.



Şekil 8.30 19 (70mm, 15 pulse, 900mf), 20(70mm, 10 pulse, 900mf), 21(70mm, 5 pulse, 900mf) no'lu numunelerin x-ışını analiz sonuçları

Faz No	Muhtemel Fazlar
1	W ₃ O
2	γ-Fe
3	Fe ₃ N, W ₃ O, W
4	α-Fe, W
5	W ₃ O ₈
6	Fe ₃ N, W
7	α-Fe, W ₃ O, W
8	γ-Fe, Fe ₃ N
9	α-Fe, Fe ₃ N



Şekil 8.31 22(80mm, 15 pulse, 900mf), 23(80mm, 10 pulse, 900mf), ve 24(80mm, 5 pulse, 900mf) no'lu numunelerin x-ışını analiz sonuçları

Faz No	Muhtemel Fazlar
1	W_3O
2	γ -Fe
3	Fe_3N, W_3O, W
4	α -Fe, W
5	W_3O_8
6	Fe_3N, W
7	α -Fe, W_3O, W
8	γ -Fe, Fe_3N
9	α -Fe, Fe_3N

X-ışınları sonuçlarında görülmüştür ki; modifikasyon işlemi sonrası yapıda yeni fazlar oluşmuştur. Pulse plazma uygulanmadan önce sadece α -Fe fazının bulunduğu numunelerde, işlem sonrası farklı faz oluşumları gözlemlenmiştir. Bu fazlar γ -Fe, nitrür esaslı fazlar (Fe_3N), wolfram ve wolfram oksit bileşikleridir. Ayrıca difraksiyon çizgilerinde genişlemeler meydana gelmiştir. FWHM değerleri yardımıyla tane küçülmelerini anlamız mümkün olabilir. Oluşan bu yeni fazlar ve genişleyen difraksiyon çizgileri mekanik özellikleri ve aşınma dayanımına etkileyecektir [122].

Analiz sonuçlarına göre, işlemin şiddetlenmesiyle artan bir kaplama kalınlığı tespit edilmiştir. Bu kaplama tabakası içinde östenit hatları mevcuttur. Bunun nedeni, sıcaklık farklılıkları yüzünden soğuma sırasında alaşımda meydana gelen “yeniden kristalleşme” olayıdır, bu da kristalografik bir tekstür yapısının gelişmesine yol açmaktadır. Sıcaklık gradyanı boyunca yönelme meydana gelir; kübik kristal yapı içinde bu şartlarda (200) düzlemine doğru büyüme görülür. Plazma işleminden sonra, X-ışınları difraksiyon piklerinin genişliği, hem α -Fe hem de γ -Fe nin genişlikleriyle birlikte ele alındığında tg Q ile doğru orantılıdır. Bu, kafesin heterojen elastik deformasyonunun bir belirticidir. Bu bozulmalar diskolasyonların ve/veya farklı faz tanelerinin uyumlu bağlarının sebep olduğu elastik şekil değiştirmeleriyle ilgili olabilir [43-44].

Ayrıca yüzeyde oluşmuş basma gerilmelerinin de (deformasyondan dolayı oluşan) pik genişlemelerine sebep olduğu belirtilmektedir [112].

X-ışını analiz sonuçlarında; kaplama kalınlık değerlerinin değişimlerinde etken olduğunu açıkladığımız numune nozul arası mesafenin, pulse sayısı ve pil kapasitesinin pik genişlemelerinde ve pik şiddetlerinde değerlerinde değişikliğe yol açmış olduğu görülmüştür. Yapıda görülen Fe_3N , W, W_3O , W_3O_8 , γ -Fe fazları malzeme yüzey özellikleri etkilenen önemli fazlardır. Özellikle nitrür esaslı fazlar, wolfram ve wolframoksit bileşikler sertlik ve aşınma dayanımlarının artmasında etkilidirler [120].

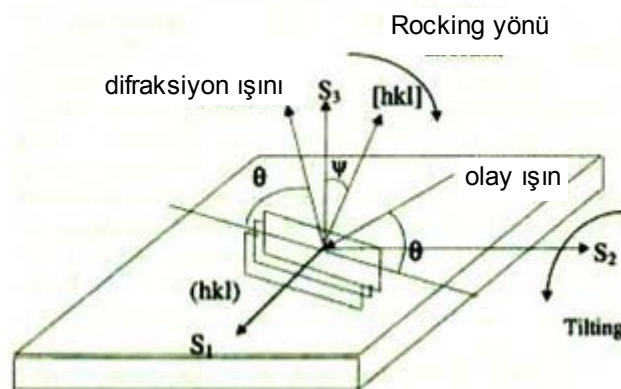
8.4. Kalıntı Gerilim Sonuçları

8.4.1. Kalıntı gerilim ölçümleri

Numunelerin kalıntı gerilimleri izotropik bir yöntem olan tilting yöntemine göre ölçülmüştür. İzotropik yöntemlerde; elastik sabiti kristal düzlemlerine göre değişmemektedir [111].

$\sin^2\psi$ tekniği olarak adlandırılan bu teknikte, genleme $\sin^2\psi$ işaretlerine karşı d ölçülerinin bulunmasıyla ölçüm yapılmaktadır.

$\sin^2\psi$ işaret değerlerine karşı $\varepsilon_{33}^{XL}(hkl)(\varphi\phi)$ yada $d_{(hkl)}(\psi\phi)$ 'nin belirlenmesi için klasik olarak iki yöntem kullanılmaktadır (Şekil 8.32). Bunlar rocking ve tilting yöntemleridir. Bu tekniklerde yapılan ölçümlerde yalnızca bir düzlem seçilir. Bu çalışmada ölçüm tekniği olarak seçilen tilting yönteminde; tilt eksenini difraksiyon düzlemi ve numune yüzeyi arasındaki kesişmedir. Difraksiyon düzlemi sabittir. Difraksiyon düzlemi içinde numune yüzeyi normal olduğunda ψ açısı sıfırdır. Tilt yapıldığında ψ artar ve onun yüzey normali difraksiyon düzleminin dışında döner [128-129].



Şekil 8.32 Rocking ve Tilting Tekniklerinin şematik gösterimi[128].

Yapılan bu çalışmada $\text{CuK}\alpha$ dalga kaynağı kullanılmıştır. $\alpha\text{-Fe}$ 'in x-ışını analizlerine göre en yüksek düzlemin (310) olduğu belirlenmiştir. Düzlem olarak (310) düzlemi uygun görülmüştür (en yüksek düzlem olması sebebiyle, en hassas ölçüm alınabilecek düzlem olduğu için). Ölçüm alınacak açılar olarak; 0° , -18° , -27° , -33° , -39° , -45° seçilmiştir. Referans numunesi silisyumdur.

Pulse plazma ile yüzeyleri modifiye edilen numune gruplarından bazıları seçilerek kalıntı gerilim ölçüm çalışmaları yapılmıştır. Uygun parametrelerin seçimini takiben tilting yöntemi ile ölçülmüş “d” değerleri ve diğer değerler literatür kısmında verilen 6.1 denkliğinde yerine konularak kalıntı gerilim elde edilmiştir. Bazı numune gruplarının kalıntı gerilim değerleri Tablo 8.3’de verilmektedir.

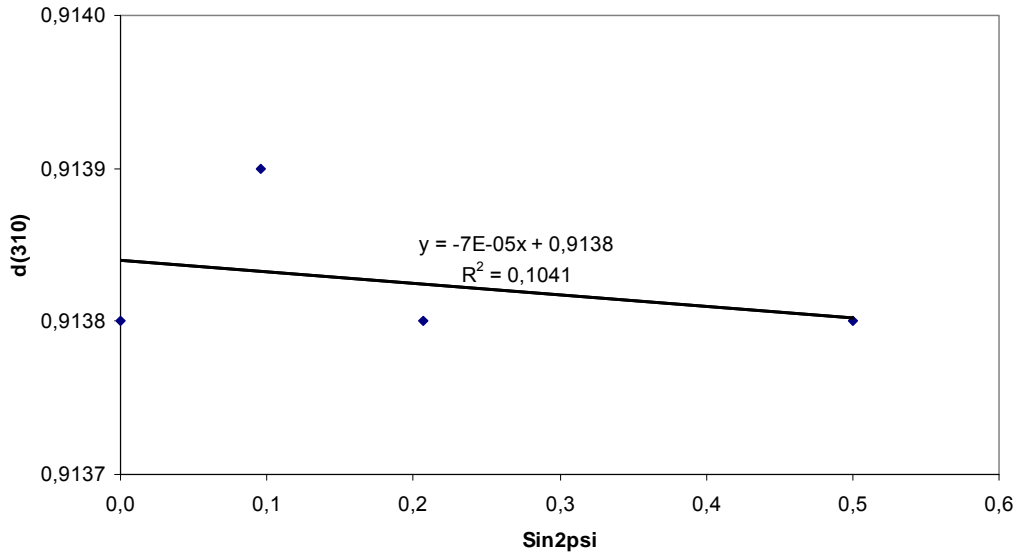
Kalıntı gerilim değerlerinin bulunmasında kullanılan regresyon analizi metodu ile ayrıca liner eğrinin standart sapması da her bir numune için hesaplanmıştır. Tabloda “ \pm ”, şeklinde standart sapma miktarları da verilmektedir. %85 doğruluk oranıyla hesaplamalar yapılmıştır. En düşük ve en yüksek değerler kullanılarak sapma değerleri elde edilmiştir.

Tablo 8.3 Pulse plazma ile modifiye edilen bazı numunelerin kalıntı gerilim değerleri

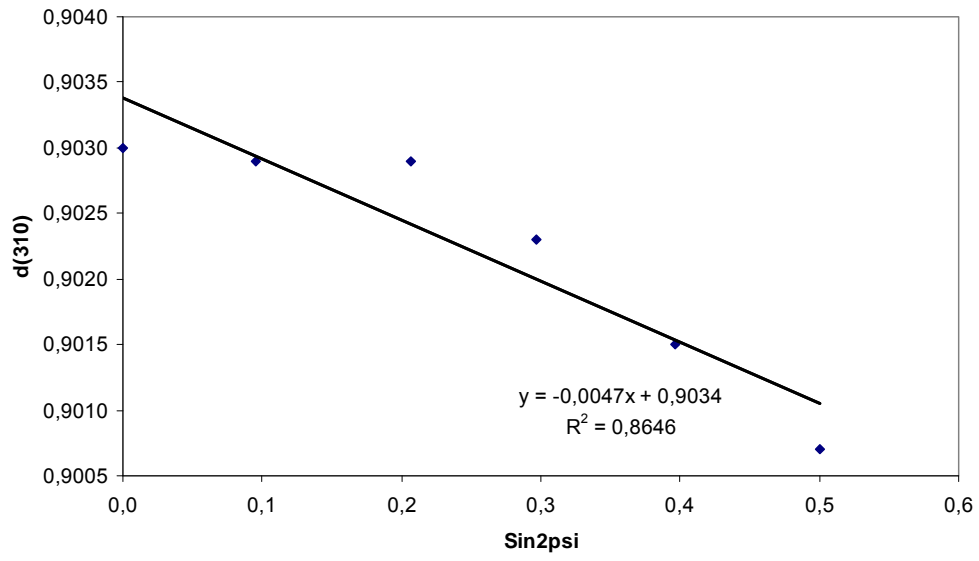
Numune Nozul Mesafesi (mm)	PİL KAPASİTESİ (mf)					
	800			900		
	Pulse Sayısı					
	5	10	15	5	10	15
50			-218 \pm 59	-327 \pm 56		-436 \pm 67
60	-926 \pm 186	-399 \pm 192	-327 \pm 75	-291 \pm 68	-836 \pm 144	
70	-200 \pm 41	-400 \pm 159	-854 \pm 289		-509 \pm 63	-454 \pm 20
80		-508 \pm 41			-254 \pm 54	
Kalıntı Gerilim Değerleri (MPa)						

Deneysel çalışmalar öncesi düzenlemelerin yapıldığı referans numunesi silisyumun d ve $\sin 2\psi$ değerleri Şekil 8.33'de görülmektedir. Referans numunenin $R^2=0.1041$ olması çalışmanın güvenilirliği ve doğruluğu açısından önem taşımaktadır. Bu değer elde edilmesinden sonra analizlere başlanmıştır. Şekil 8.34a ve b'de 1, 2no'lu ve Şekil 8.35'de 3 no'lu numunelerin d ve $\sin 2\psi$ değerleri arasındaki grafikler görülmektedir.

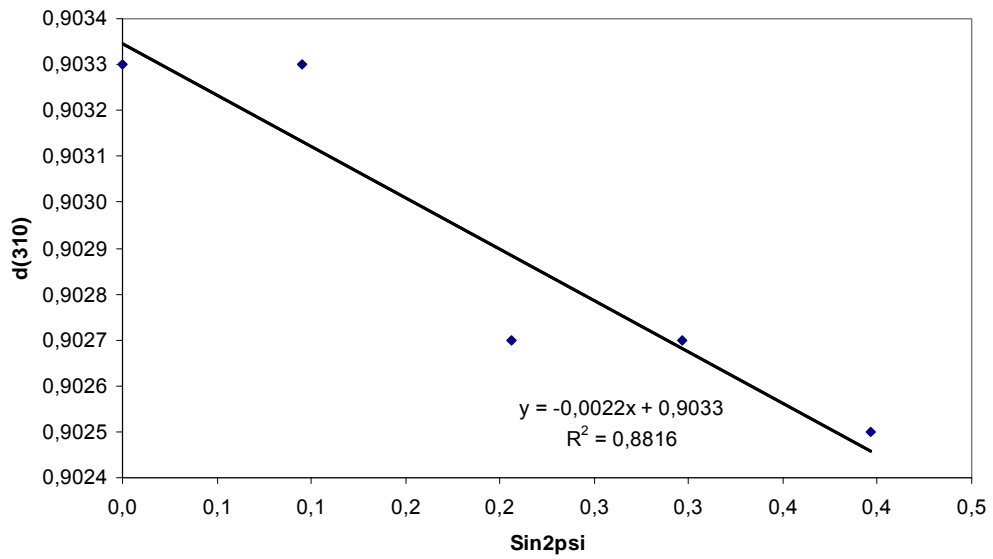
1 (70mm,15 pulse, 800mf), 2(70mm,10 pulse, 800mf) ve 3(70mm,5 pulse, 800mf) no'lu numunelerin gerilim değerlerinde pulse sayısının etkisi açıkça görülmektedir. 15 pulse uygulanan 1 no'lu numune yüksek gerilim değeri gösterirken 5 pulse uygulanan 3 no'lu numune düşük gerilim değeri göstermiştir. 1, 2 ve 3 no'lu numunelerin kalıntı gerilim değerleri arasında pulse sayına paralellik gösteren bir değişim olmuştur.



Şekil 8.33 Referans numunesi silikon için d ve $\sin 2\psi$ değerleri

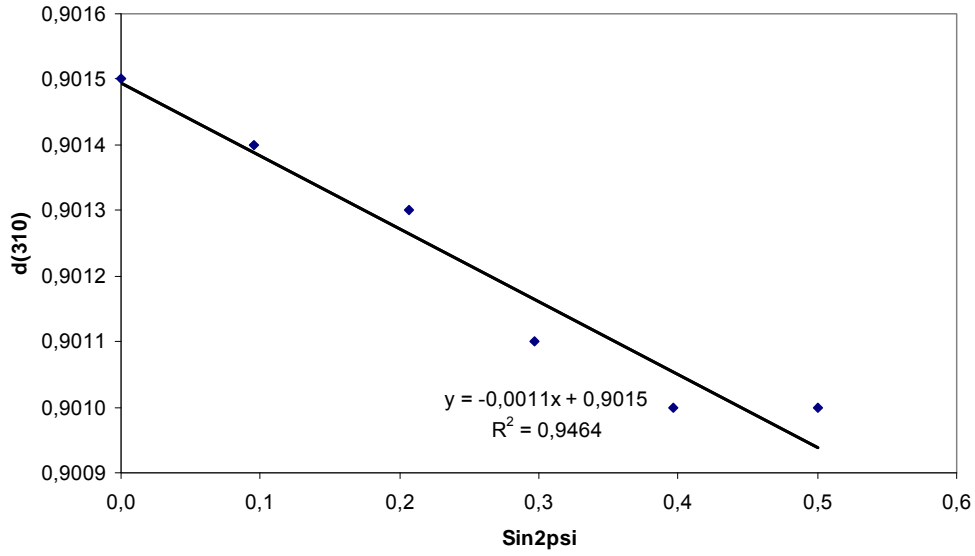


a)



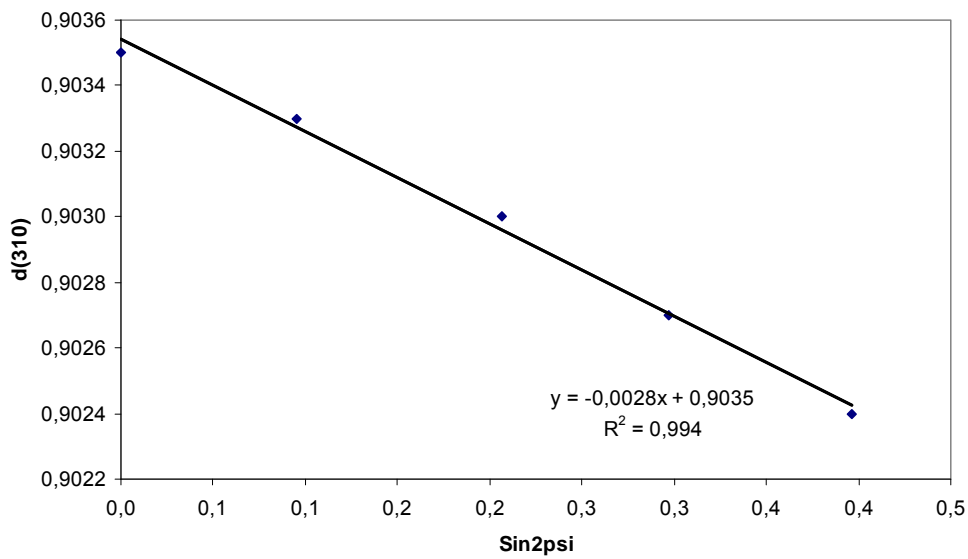
b)

Şekil 8.34 a) 1 ve b) 2 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\text{Sin} 2\psi$ değerleri

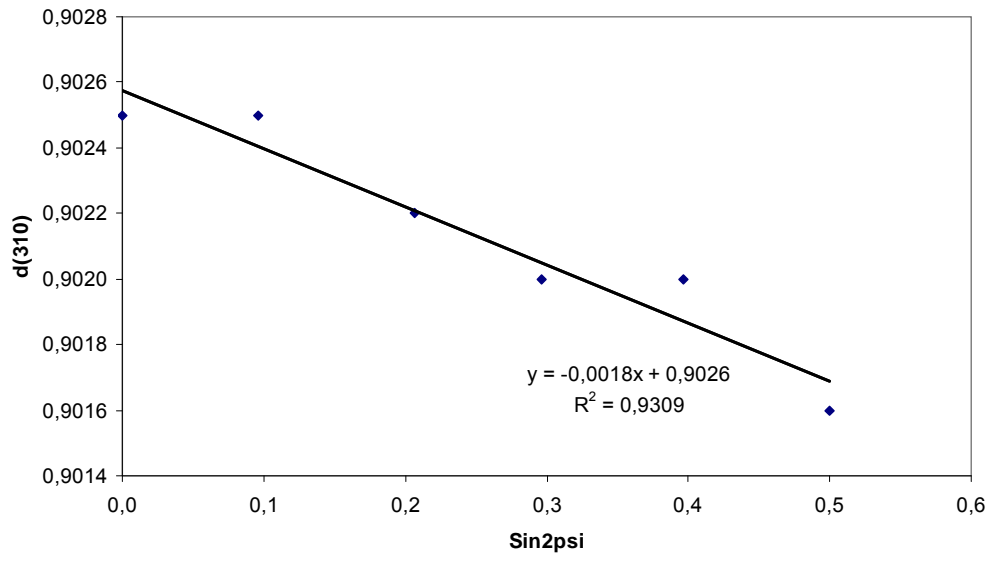


Şekil 8.35 3 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psi değerleri

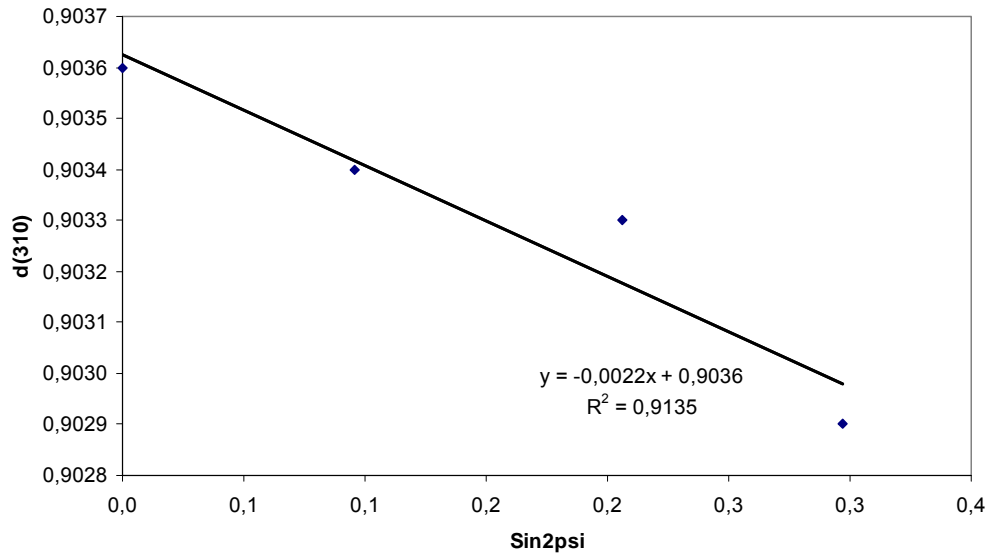
Şekil 8.36'de 5(80mm, 10 pulse, 800mf) no'lu Şekil 8.37'da 7(60mm, 15pulse,800 mf) no'lu numunenin, Şekil 8.38'de 8(60mm, 10pulse, 800 mf) ve Şekil 8.39'da 9(60mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunenin d ve Sin2psi grafikleri görülmektedir. 5 no'lu numunenin -508MPa, iken 7 no'lu numunenin -327MPa'dır. 8 ve 9 no'lu numunelerin ise sırasıyla -399MPa, ve -926MPa'dır. 7, 8, ve 9 no'lu numunelerde kalıntı gerilim değerleri pulse sayısı ile orantılı değildir.



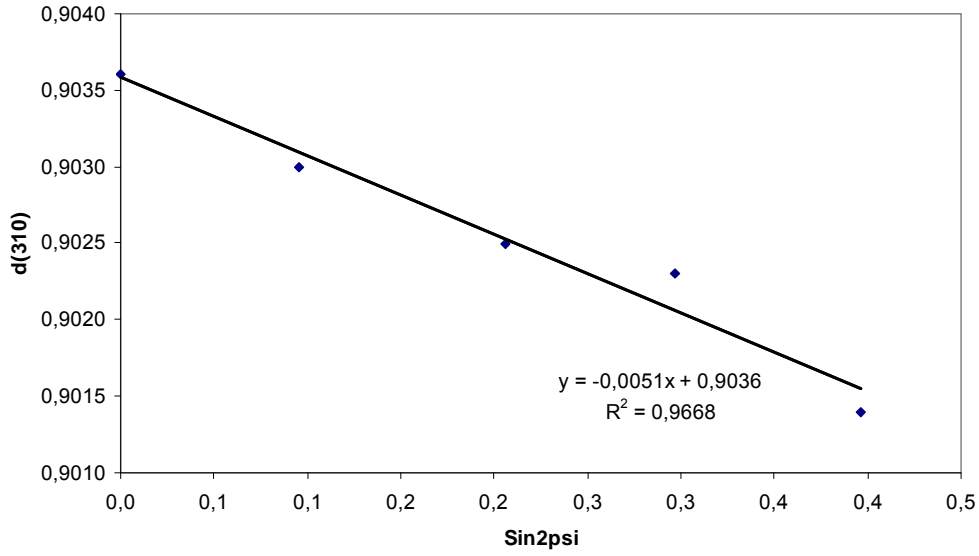
Şekil 8.36 5 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psi değerleri



Şekil 8.37 7 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\text{Sin}2\psi$ değerleri



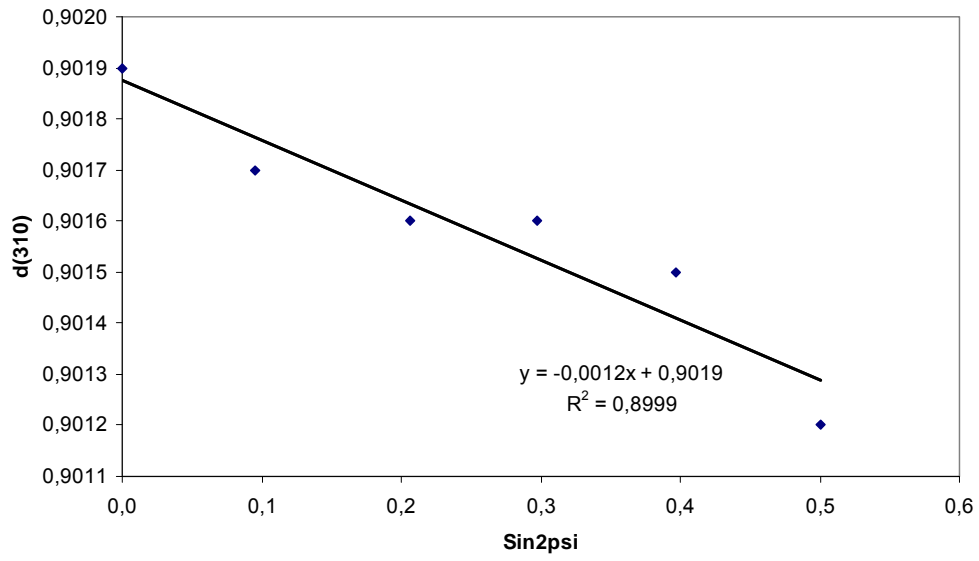
Şekil 8.38 8 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\text{Sin}2\psi$ değerleri



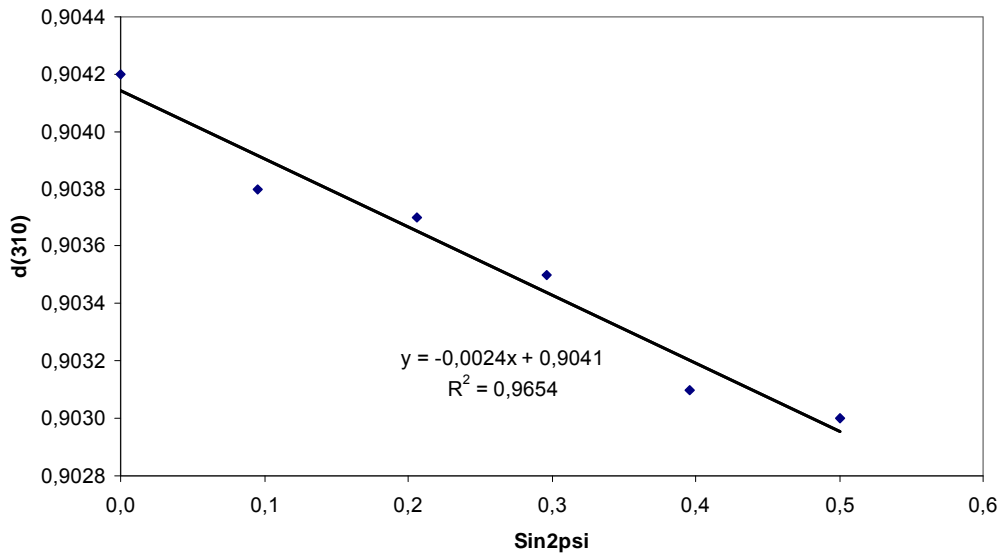
Şekil 8.39 9 no'lu numunenin Tiling yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psi değerleri

10 (50mm, 15pulse, 800 mf), 13(50mm, 15pulse, 800 mf) ve 15(50mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunelerin d ve Sin2psi değerleri arasındaki grafikler Şekil 8.40, 8.41 ve 8.42'de görülmektedir.

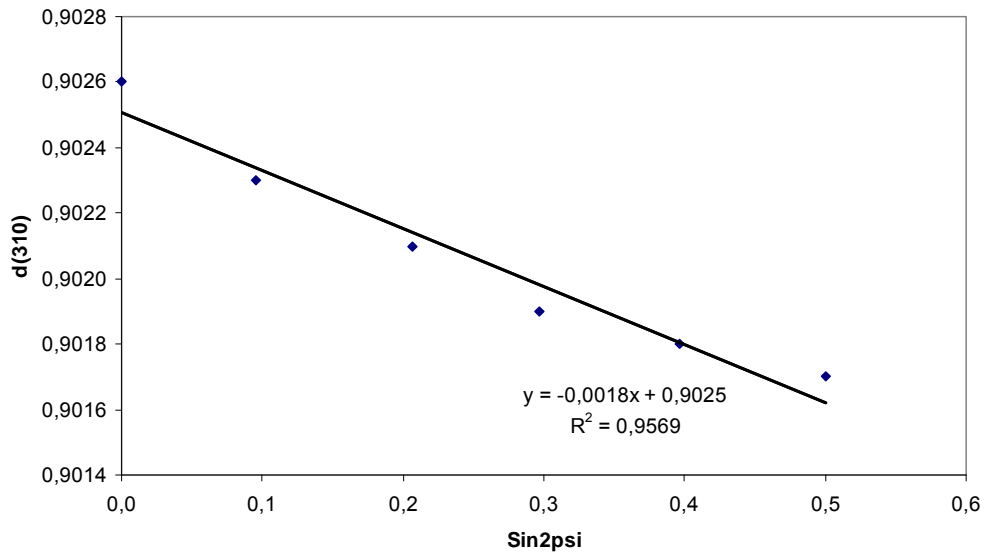
10 no'lu numunenin -218MPa, 13 no'lu numunenin -436MPa, 15 no'lu numunenin ise -327 MPa'dır. 17(60mm, 10pulse, 900 mf), 18(60mm, 5pulse, 900 mf), 19(70mm, 15pulse, 900 mf), 20(70mm, 10pulse, 900 mf) ve 22(80mm, 15pulse, 800 mf) no'lu numunelerin grafikleri ise sırasıyla Şekil 8.43, 8.44, 8.45, 8.46 ve 8.47'de görülmektedir. Kalıntı gerilim değerleri sırasıyla -836MPa, -291MPa, -454MPa, -509MPa, -254MPa'dır.



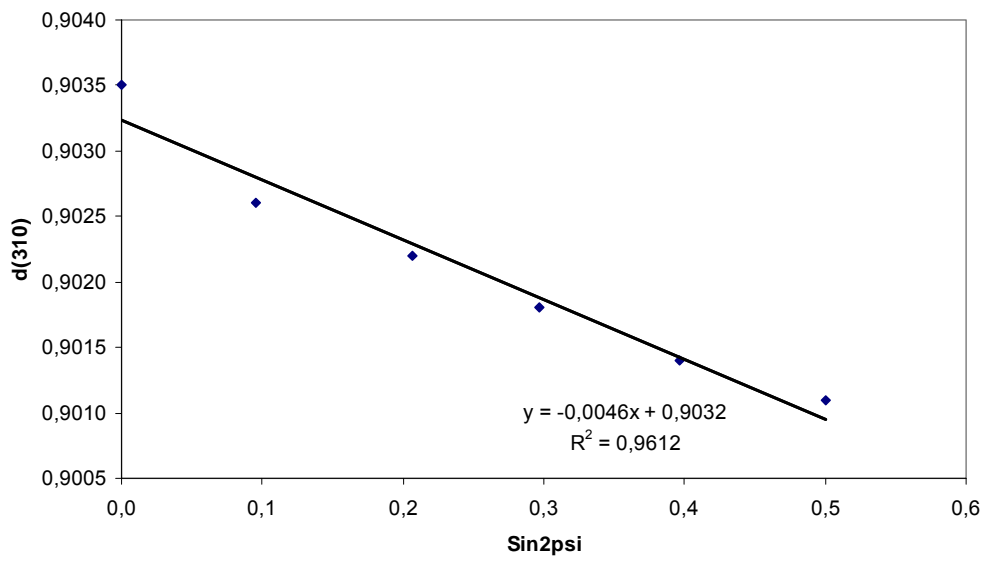
Şekil 8.40 10 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\text{Sin}2\psi$ değerleri



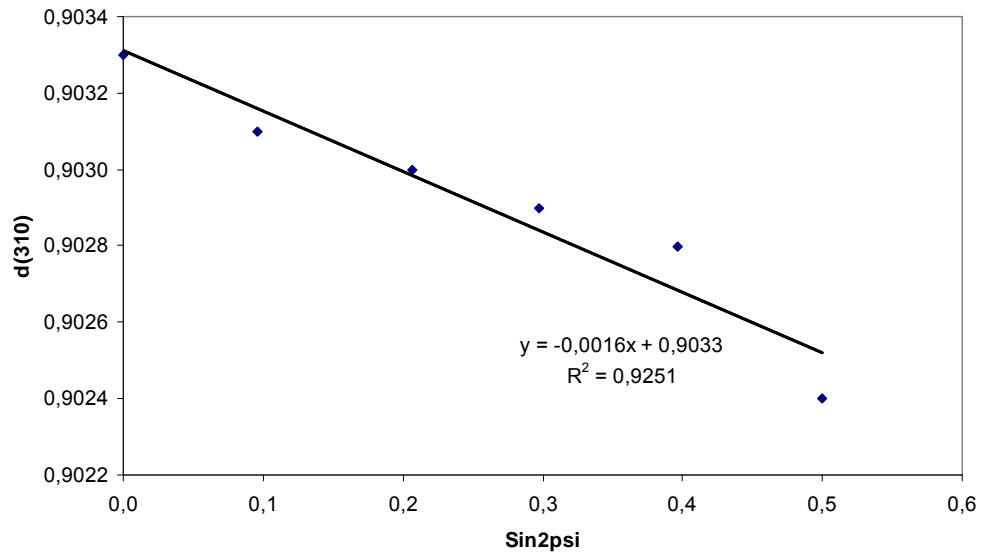
Şekil 8.41 13 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\text{Sin}2\psi$ değerleri



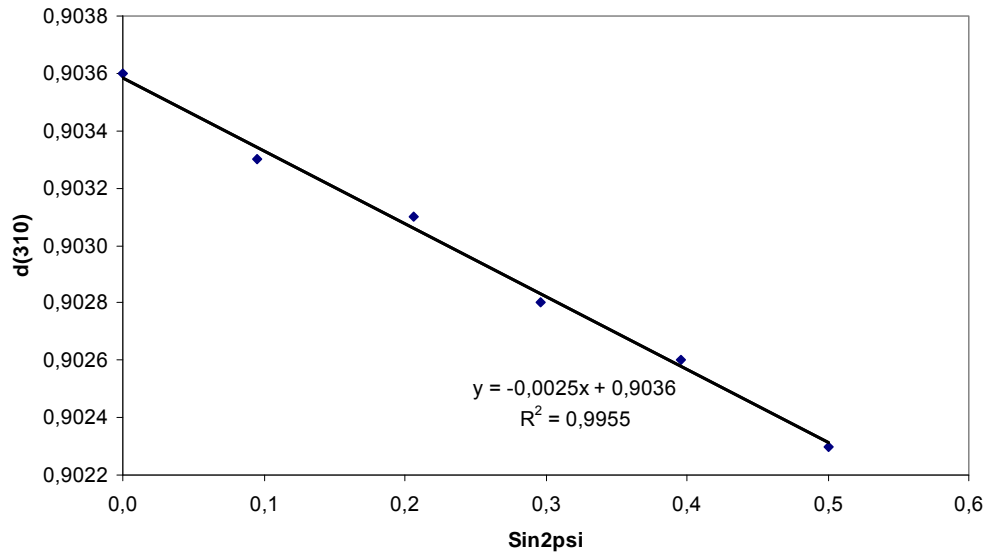
Şekil 8.42 15 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\text{Sin}2\psi$ değerleri



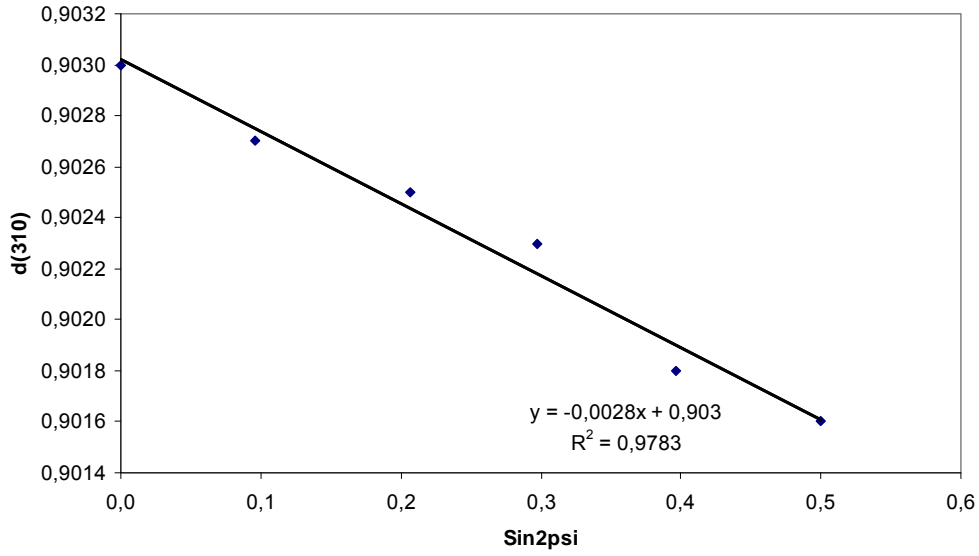
Şekil 8.43 17 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\text{Sin}2\psi$ değerleri



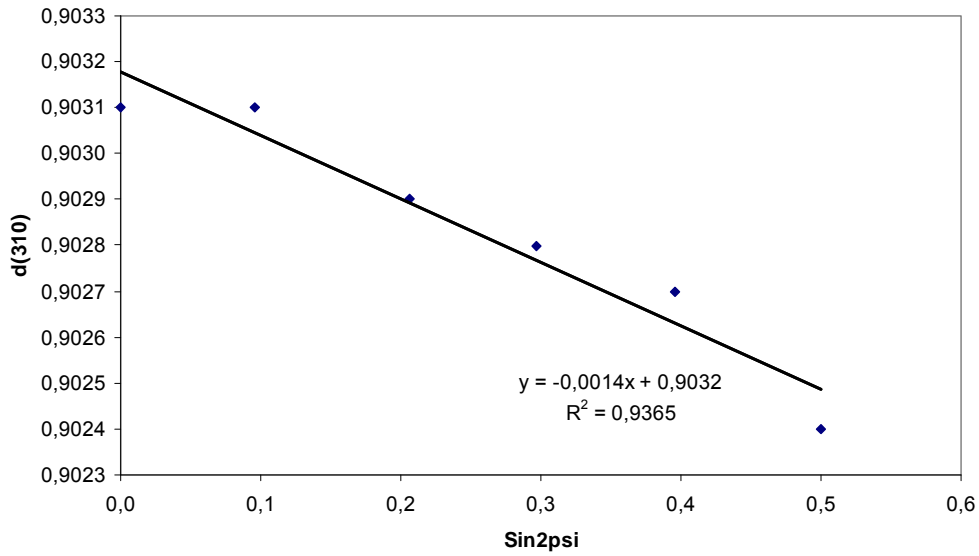
Şekil 8.44 18 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\text{Sin}2\psi$ değerleri



Şekil 8.45 19 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve $\text{Sin}2\psi$ değerleri



Şekil 8.46 20 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psi değerleri



Şekil 8.47 22 no'lu numunenin Tilting yöntemi ile elde edilmiş d ve Sin2psi değerleri

Kalıntı gerilim değerleri diğer modifikasyon yöntemlerine göre yüksek olmasına rağmen numune gruplarının kendi aralarında pulse plazma parametreleriyle direkt olarak orantılı değildir. Kalıntı gerilim ölçümleri 1.5mm^2 'lik bir alanda yapılmıştır. Ölçümler yapılırken tutucu içinde numunenin modifikasyon bölgesinin tam ortası odaklamaya çalışılmıştır. Fakat mikron seviyesinde bile yapılacak farklı bölge ayarlamaları ölçümlerin farklı bölgelerden alınmasına sebebiyet vermiş olabilir. Bu

sebeplere pulse plazma parametreleriyle çok da orantılı olmayan sonuçlar elde edilmesini mümkün kılmış olabilir.

Literatürde farklı teknolojilerle söz konusu çelik üzerine uygulanan modifikasyon işlemi sonrası kalıntı gerilim değerleri yaklaşık 200-800MPa değerleri arasında değiştiği görülmüştür [129-133, 112, 145]. Özellikle plazma nitrürleme ile yapılmış yüzey işlem çalışmaları sonrası kalıntı gerilim değerlerinin en fazla 450-600MPa'ya ulaşabilmesi, bu çalışmada elde edilen 800-900MPa gibi kalıntı gerilim değerlerinin yüzey özelliklerinin kıyaslanması ve mekanik özelliklerde gelişimi daha iyi anlamamızı sağlayabilir.

Kalıntı gerilim değerleri uygulanan prosesin verimliliği açısından son derece önem taşımaktadır. Kalıntı gerilim kaplamaların veya modifikasyon tabakalarının tüm mekanik davranışlarını etkiler [103]. Kalıntı gerilim, yüzey modifikasyonu veya yüzey kaplaması yapılmış iş parçalarının çalışma ortamlarında yorulma hasarlarına karşı dayanımlarını artırır. Kaplamalarda basma gerilmesi çekme gerilmesine tercih edilir [135,104, 106,107]. Kalıntı gerilim kaplamaların kararlılığında önemli rol oynar. Örneğin çekme kalıntı gerilim artınca bağların ayrılması ve çatlaklara karşı dayanımsızlık artar. Yüzeydeki kalıntı gerilim sertliği artırır [112-147].

Oldukça hızlı şekilde meydana gelen ısınma ve soğuma olayı yüzeyde baskın ve yüksek değerlerde basma gerilmelerinin eldesini sağlamıştır. Pulse plazma esnasında basma kalıntı gerilimlerinden dolayı latis genişlemesi meydana gelmiştir. Modifikasyon işlemi esnasında meydana gelen yüksek orandaki plastik deformasyon yüzeyde basma gerilmelerinin oluşumuna sebebiyet vermiştir. Özellikle bu basma gerilmeleri yorulma ömrünü artmasında ve mekanik özelliklerinin gelişmesinde çok yararlı etkilere sahiptir [106]. Ayrıca aşınma dayanımı da yüzeyde dağılmış basma gerilme dağılımı ve büyüklüğüyle ilişkilidir [147]. Numune gruplarının mikrosertlik değerleri ile kalıntı gerilim değerleri daima paralellik göstermez [134], sertlik mekanizmasında ayrıca mikroyapı da etkindir. Pulse plazma prosesi ile yüzeye giren wolfram element miktarı sertlik değerlerini etkileyen diğer bir faktördür.

Sertlik değerleri yüzeyden bir miktar içeriye girilerek sıra sertlik biçiminde alınmaktadır. Sertlik deneyi esnasında yüzeyde dağılmış wolfram taneciklerine denk gelinerek alınan sertlik değerleri yüksek çıkmaktadır. Oysa kalıntı gerilim ölçümü tamamen farklı bir mekanizmayla yapılmaktadır. Sadece 1.5mm²'lik bir alanda üst yüzeyden hemen hemen 5-6 mikron kadar içeri girilerek yapılan bir deneydir. Uygulama koşulları sebebiyle farklılık gösteren bu deney sonuçlarının bazen paralellik göstermemesinin normal bir sonuç olduğu düşünülmektedir.

Pulse plazma yöntemi ile hem termal hem elastik deformasyona uğrayan bu sebeple yüzeyinde gerilmeler oluşan numunelerin mekanik özelliklerinin gelişiminde, kalıntı gerilmeler büyük etkiye sahiptir. Literatürde görülen pek çok çalışmada da ifade edildiği üzere kalıntı gerilmeler (elastik sınırlar içinde) hem sertlik değerlerini hem yorulma dayanımını artırmaktadır. Pulse plazma ile yüzeyleri geliştirilen numunelerin sertlik değerlerinin artışında etki sahibi olması nedeniyle kalıntı gerilmelerin llmesine ihtiyaç duyulmuştur. Görülmüştür ki; modifikasyon tabakasında literatüre uygun şekilde basma gerilmeleri mevcuttur. Mekanik özelliklerini geliştirdiğini ifade ettiğimiz numune gruplarında bu sonuçlar önem arz etmektedir.

8.5. Mikrosertlik Sonuçları

Pulse plazma işlemleri ile yüzeyleri modifiye edilmiş AISI 4140 çelik numuneler modifiye olmuş bölgelerinden tam olarak merkezlenerek kesilmiş ve metalografik olarak hazırlanmıştır. Numune gruplarının 5 gr yük altında 15 sn süre ile mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Tüm numune gruplarında, 3 farklı bölgeye sertlik deneyi uygulanmış elde edilen değerlerin ortalaması alınarak numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir. Şekil 8.48'de 1 (70mm, 15pulse, 800 mf), 2 (70mm, 10pulse, 800 mf) ve 3 (70mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunelerin karşılaştırmalı sertlik değerleri görülmektedir, bu üç grup çelik için elde edilmiş en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 910HV, 900HV ve 820HV'dir.

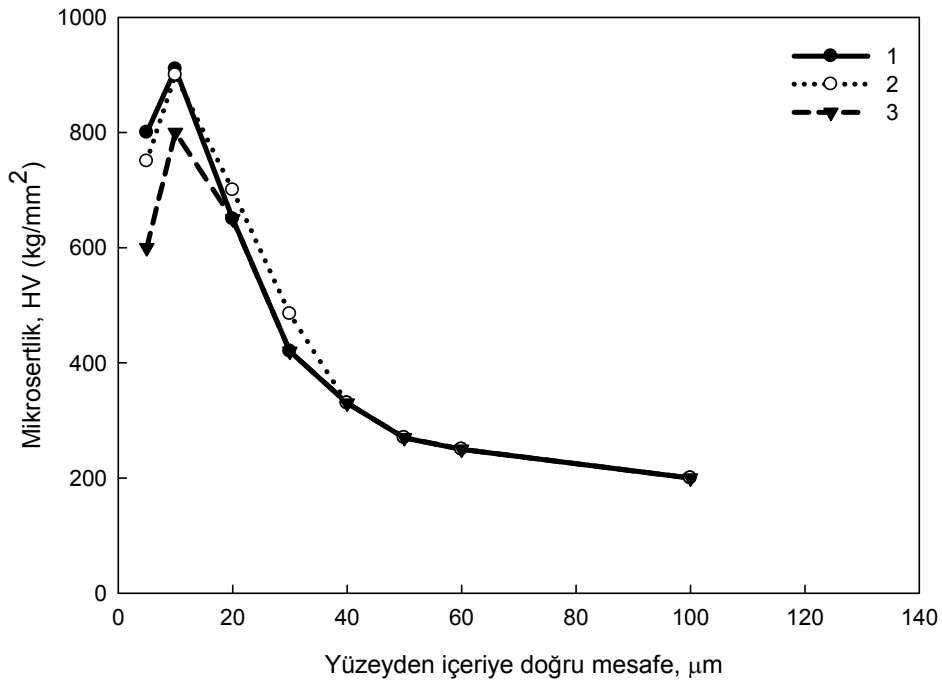
Her üç numune grubunun sertlik değerleri önce düşmüş sonra yükselmiş ve sonra tekrar düşen bir eğilim göstermiştir. 1, 2 ve 3 no'lu numune grupları arasında pulse sayısı farklılığı sertlik değerlerini de etkilemiştir. Sertlik değerlerindeki bu yükseliş (x-ışını analizleri ile tespit edilmiş) modifikasyon işlemi ile oluşmuş Fe₃N ile wolfram esaslı fazların varlığından ileri gelmiştir.

Plazma sıcaklığı yüksektir. Pulse sayısı arttıkça elastik deformasyon artar, bu deformasyondan dolayı tane boyutu azalır, tane boyutu azaldıkça, sertlik değerlerinin artmasına neden olur [53-60-119]. Anlık enerji depozisyonu, hızlı katılaşma, soğuma, termal gerilmeye, şok dalgalarına ve artırılmış difüzyona neden olmaktadır. Ayrıca, pulse plazma esnasındaki yüksek ve yoğun iyon akışı sertliği ve takibinde tribolojik özellikleri geliştirmektedir [140-142].

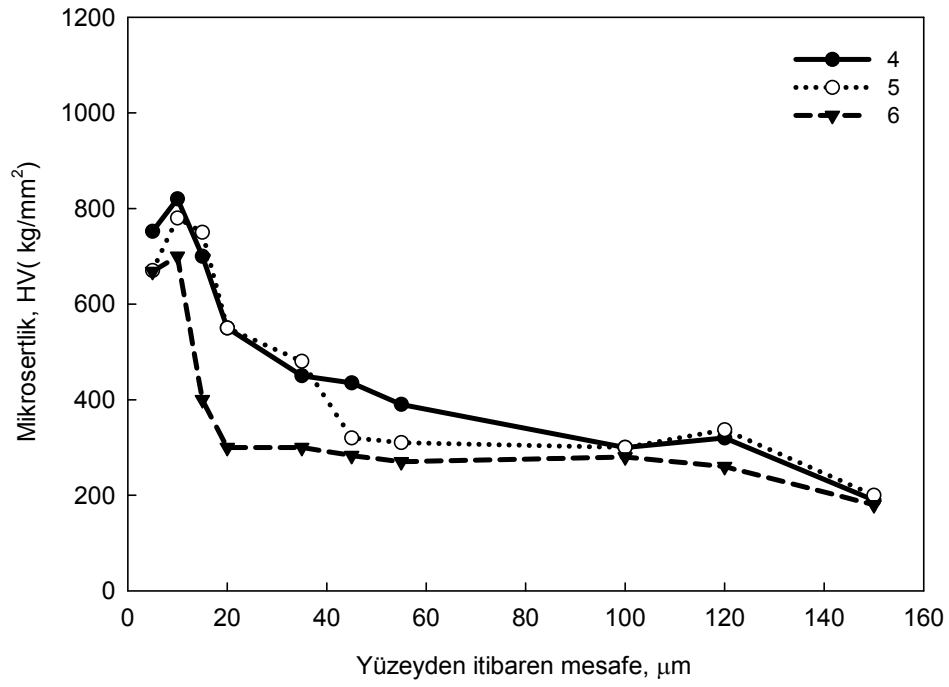
Şekil 8.49'da 4, 5 ve 6 no'lu numunelerin mikrosertlik değerlerinin karşılaştırması görülmektedir. Mesafenin en yüksek değeri olan 80mm'de yapılmış modifikasyon işlemi sonunda 4(15 pulse), 5(10 pulse) ve 6(5 pulse) no'lu numunelerin en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 820HV, 780HV, 700HV'dir. Numune grupları arasındaki pulse sayısı farkı bu sertlik değişikliklerinin sebebidir. Ayrıca 1(70mm) ve 4(80mm) no'lu numunelerin aralarındaki fark olan numune nozulu mesafesi de sertliği etkileyen diğer bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. 1 no'lu numunede en yüksek sertlik 910 HV elde edilirken, 4 no'lu numunede 820 HV elde edilmiştir. Mesafenin artması

nozül ile malzeme yüzeyinin etkileşimini azalttığı, yüzeye giren iyonize ürünlerin miktarının her iki mesafede de aynı oranda olmadığı düşünüldüğü için bu sertlik düşüşü beklenen bir sonuçtur.

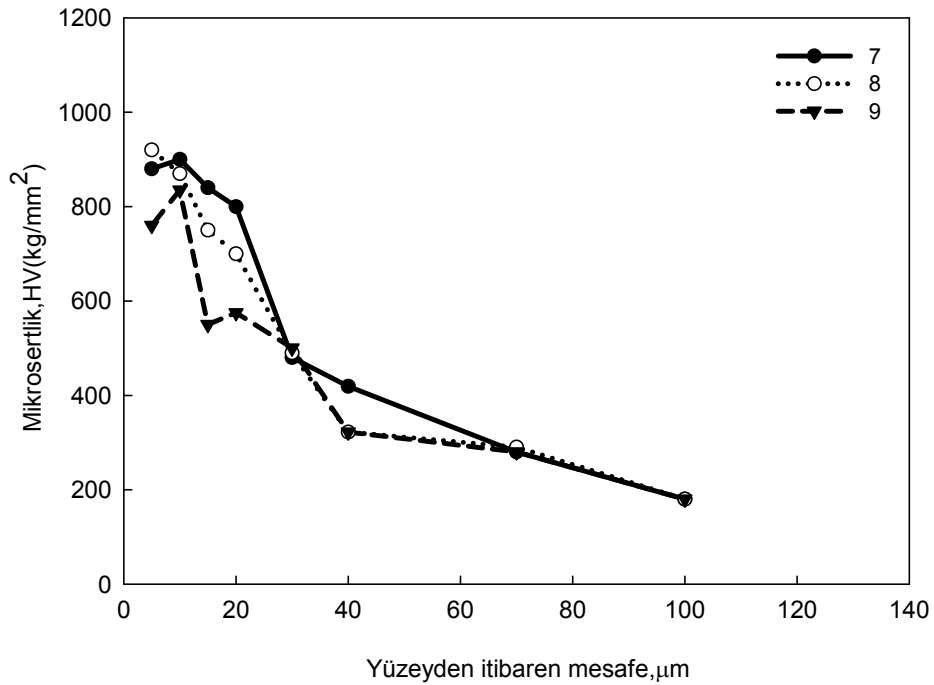
7 (60mm, 15pulse, 800 mf), 8(60mm, 10pulse, 800 mf) ve 9 (60mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunelerin mikrosertlik değerlerini gördüğümüz Şekil 8.50'de sırasıyla elde edilmiş en yüksek sertlik değerleri 900HV, 920HV, 835HV'dir.



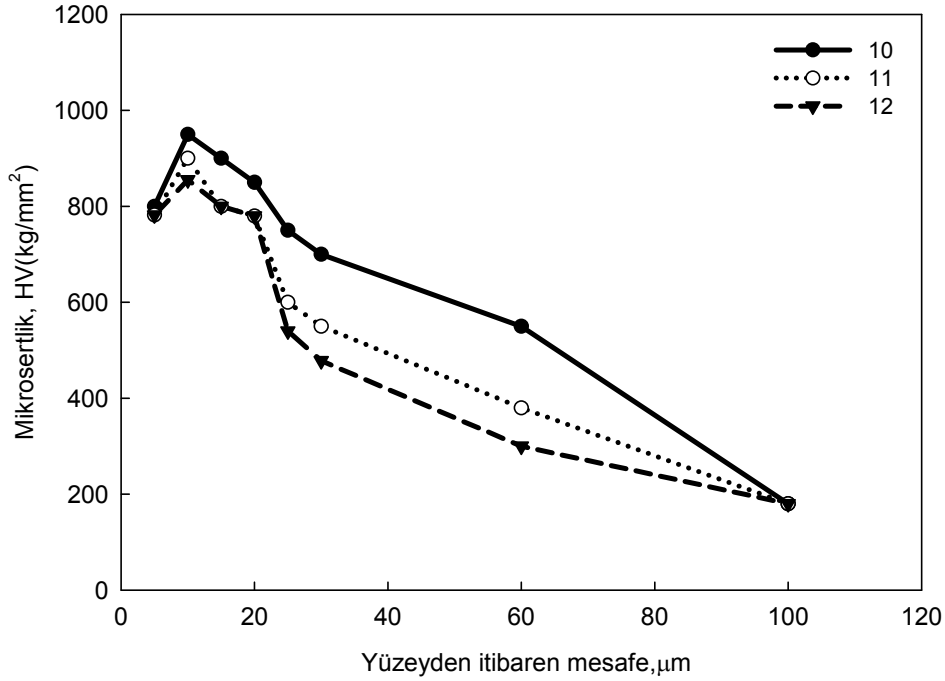
Şekil 8.48 1,2 ve 3 nolu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri



Şekil 8.49 4, 5 ve 6 nolu numunelerin yüzeiden içeriye doğru mikrosertlik değerleri



Şekil 8.50 7, 8 ve 9 no'lu numunelerin yüzeiden içeriye doğru mikrosertlik değerleri



Şekil 8.51 10, 11 ve 12 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değerleri

Şekil 8.51'de mikrosertlik karşılaştırmaları görülen 10(50mm, 15pulse, 800 mf), 11(50mm, 10pulse, 800 mf) ve 12(60mm, 5pulse, 800mf) no'lu numunelerin sırasıyla en yüksek sertlik değerleri 950HV, 900HV ve 835 HV'dir.

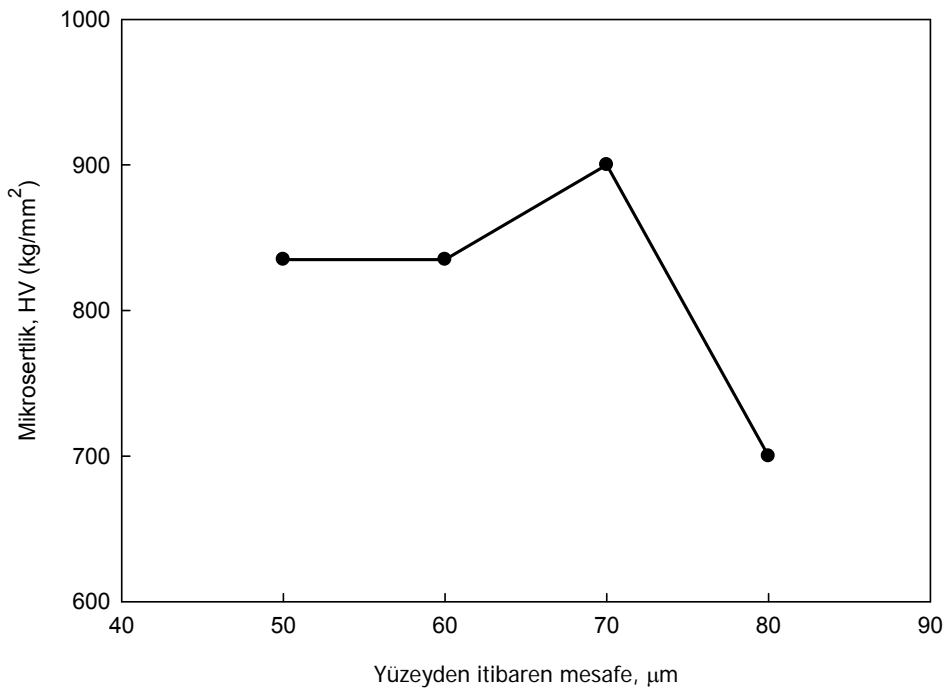
Pulse sayısının fazla olması sebebiyle yine 10 no'lu numunenin sertliği en yüksek değerdir.

800 pil kapasitesi kullanılarak üretilmiş 1'den 12'ye kadar olan numune grupları içinde en yüksek sertlik değerini 10 no'lu numunede görmekteyiz. Pulse plazma şartları; numune nozul arası mesafe 50 mm ve pulse sayısı en yüksek değer olan 15'dir. Elde edilen sertlik değeri 950 HV.

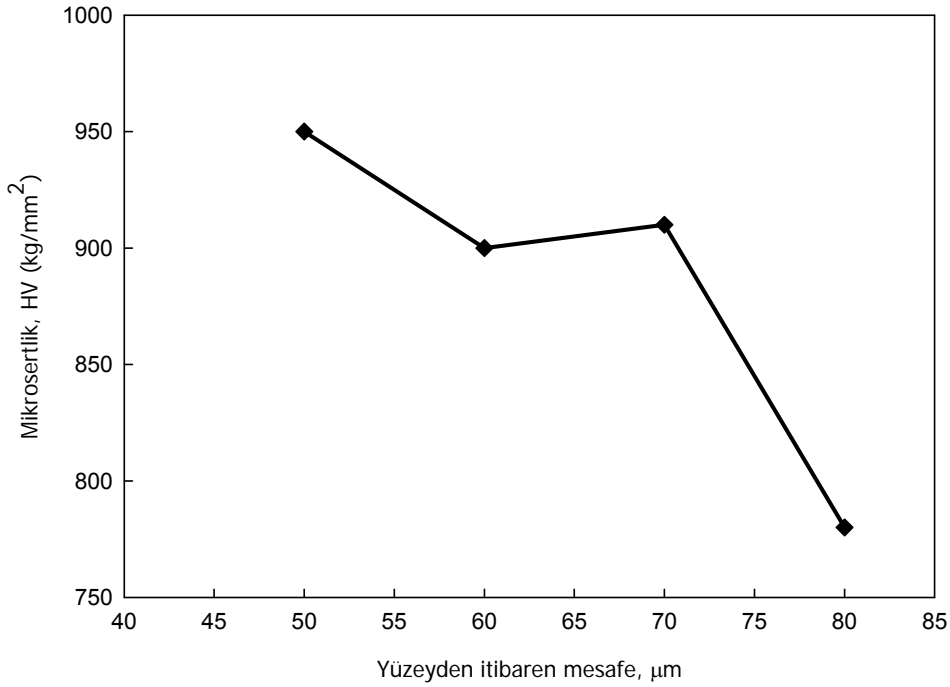
Numune ve nozul arası mesafenin kısalması nedeniyle nozul ucundan çıkan iyonize ürünler numune yüzeyine tam ve yeterince difüze olmaktadır. Odaklanma probleminin ortadan kalkması sertlik değerlerinin yükseltmektedir. Yine aynı yargı üzerinden gidildiğinde mesafenin en yüksek değer olduğu (80mm) 4, 5 ve 6 no'lu

numunelerde diğ er gruplara göre düşük sertlik değerleri elde edilmiştir. Şekil 8.52’de mesafeye bağlı olarak en y u ksek pulse sayısı olan 15 pulse uygulanmış numunelerinin mikrosertlik değerlerinin mesafeye g ore değişimi verilmektedir. Bu diyagramda en d uşuk sertliğin, mesafenin en y u ksek değer olduğu 80mm mesafesinde olduğu a cıkça g or ulebilmektedir. Şekil 8.53’de ise 5 pulse sayısı i c in mesafe-mikrosertlik ilişkisini anlatan diyagram verilmektedir. Bu diyagram da yine mesafenin ve pulse sayısının mikrosertlik değerleri u zerinde etkili olduğunu anlamamıza yardımcı olmaktadır.

Pulse plazma prosesinin o n emli bir o zelliği de gerilme dalgalarıdır. Bu gerilim dalgalarının iki kaynağı vardır. İlkin e, y u zey tabakasında sıcak alan adımı nda i c eride termal genleşme farklılıkları neden olmaktadır. İkincisine; c ukur benzeri y u zey morfolojisinin buharlaşma ısısının u zerine c ıkmasından sonra y u zey malzemenin p u skurmesi neden olur [15]. Işınlanmış y u zeyde ortaya c ık mış bu elastik-plastik şok dalgalarının sonucunda mekanik gerilim oluşmaktadır. B o ylece b o lgesel gerilmeler sertliğin artmasın ın sağlamaktadır [143].



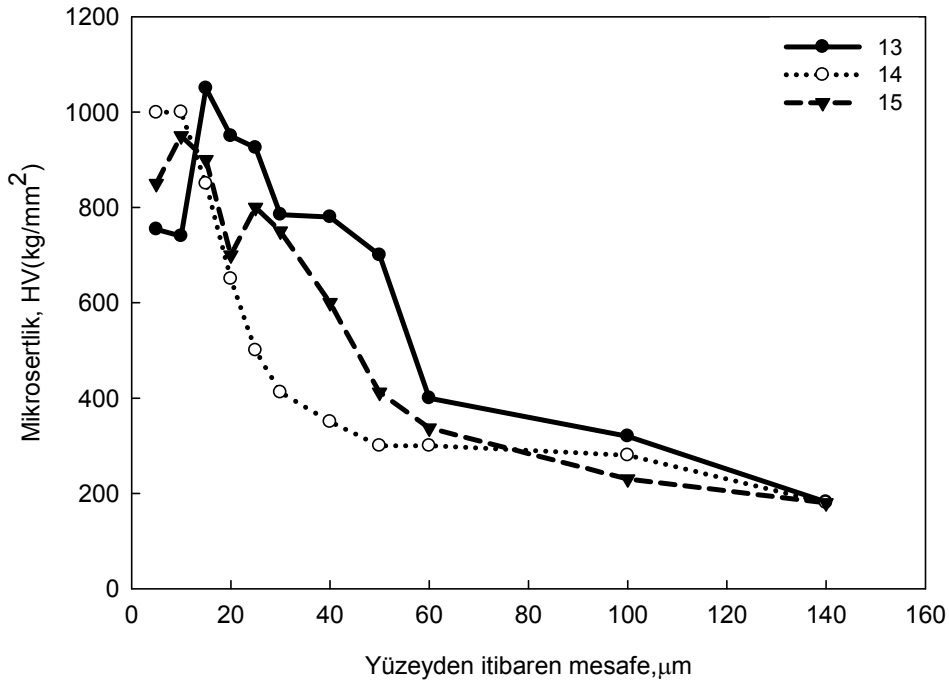
Şekil 8.52 800 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 5 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri



Şekil 8.53 800mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 15 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri

Pulse plazma parametrelerinden pil kapasitesini 900mf'a çıkararak modifikasyon işlemi uygulanan grup no 12'den 24'e kadar olan numunelerin mikrosertlik değişimleri incelenmiştir.

Şekil 8.54'de 13(50mm, 15pulse, 900 mf), 14(50mm, 10pulse, 900 mf ve 15(50mm, 5pulse, 900 mf) no'lu numunelerin mikrosertlik değişimleri görülmektedir. Pil kapasitesinin arttığı, mesafenin düşük, ayrıca pulse sayısının da yüksek olduğu 13 no'lu numune grubunda en yüksek sertlik değerine rastlanılmıştır. Elde edilen sertlik değerleri sırasıyla 1050HV, 1000HV, 950HV'dir. Parametrelerin etkisi bu grup numunelerde daha açıkça görülmüştür.



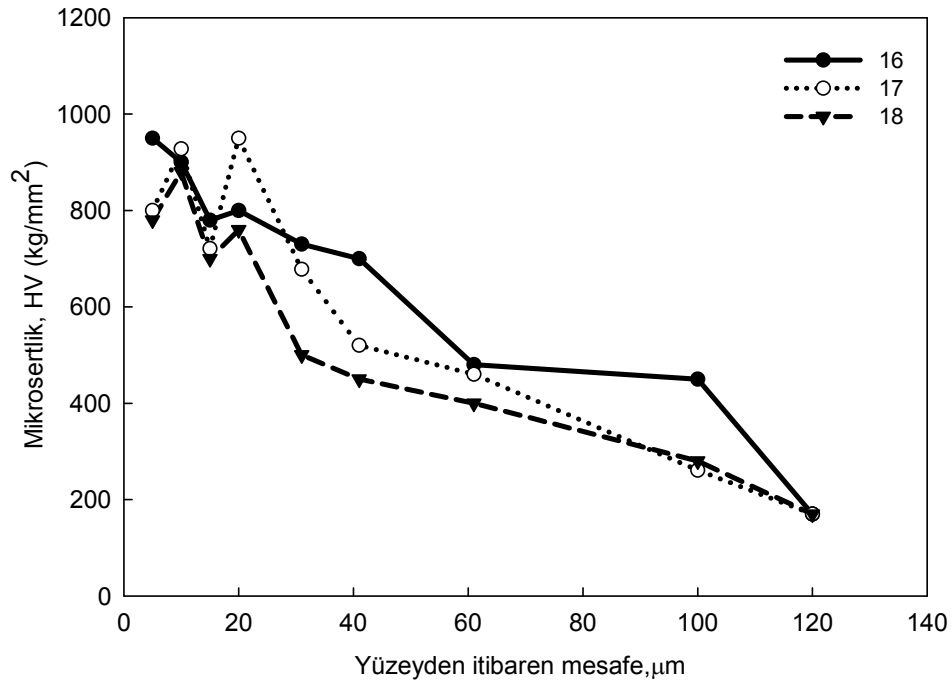
Şekil 8.54 13, 14 ve 15 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değişimleri

16(60mm, 15pulse, 900 mf), 17(60mm, 10pulse, 900 mf ve 18(60mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunelerin ise sırasıyla en yüksek mikrosertlik değerleri 950HV, 928HV, 880HV'dir. Yine pulse sayısı fazla olan 16 no'lu numunenin sertlik değeri diğerlerine göre yüksektir. Ayrıca parametreleri aynı, tek farklılığı pil kapasitesinin 800mf olduğu 7 no'lu numuneye göre de sertlik artış göstermiştir. Bu artışın sebebinin de yine pil kapasitesinin artması olduğu düşünülmektedir (Şekil 8.55).

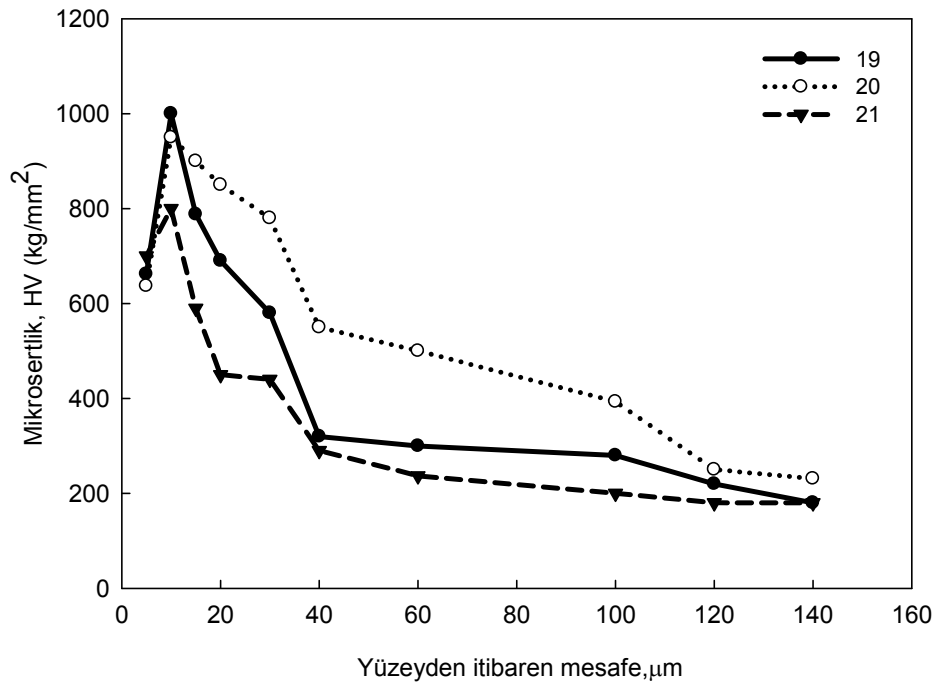
Şekil 8.56'de 19(70mm, 15pulse, 900 mf), 20(70mm, 10pulse, 900 mf) ve 21(70mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunelerin mikrosertlik değişimleri görülmektedir. Sırasıyla elde edilmiş en yüksek sertlik değerleri 1000HV, 900HV, 800HV'dir.

22(80mm, 15pulse, 900 mf), 23(80mm, 10pulse, 900 mf) ve 24(80mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunelerin ise sırasıyla en yüksek mikrosertlik değerleri 870HV, 850HV ve 780HV'dir. Diğer numuneler için açıklamaya çalıştığımız sertlik yükseliş ve düşüşlerde ki eğilimler bu numune gruplarında da görülmüştür (Şekil 8.57).

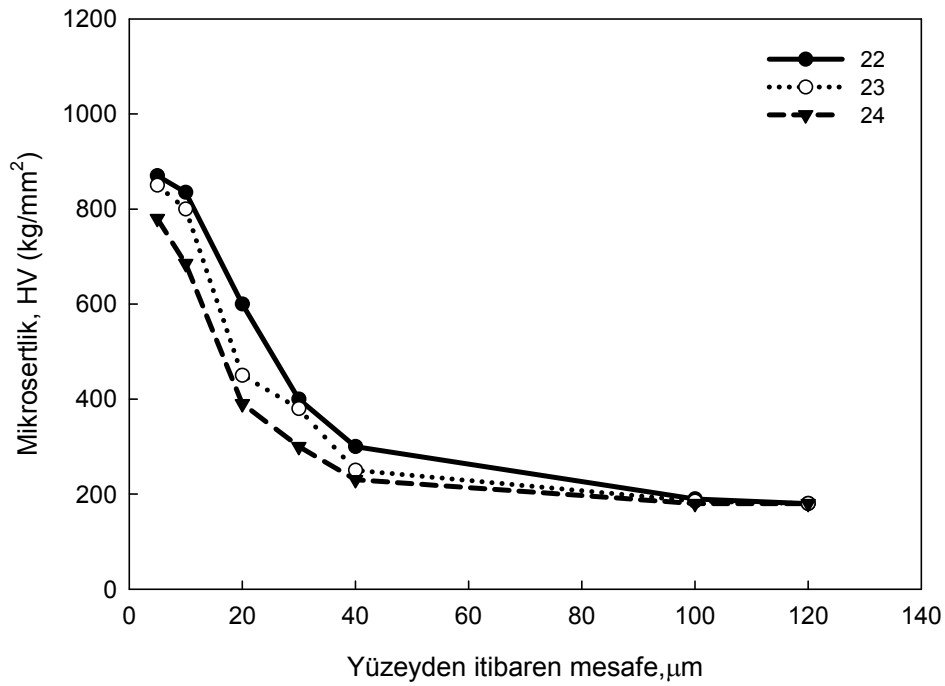
900mf pil kapasitesi altında yapılmış olan pulse plazma işleminin mesafeye ve pulse sayısına bağlı olarak mikrosertlik değerlerini nasıl değiştirdiğini 15 pulse için Şekil 8.58'de ve 5 pulse içinde 8.59'da verilmekte olan diyagramlar da görmemiz mümkündür.



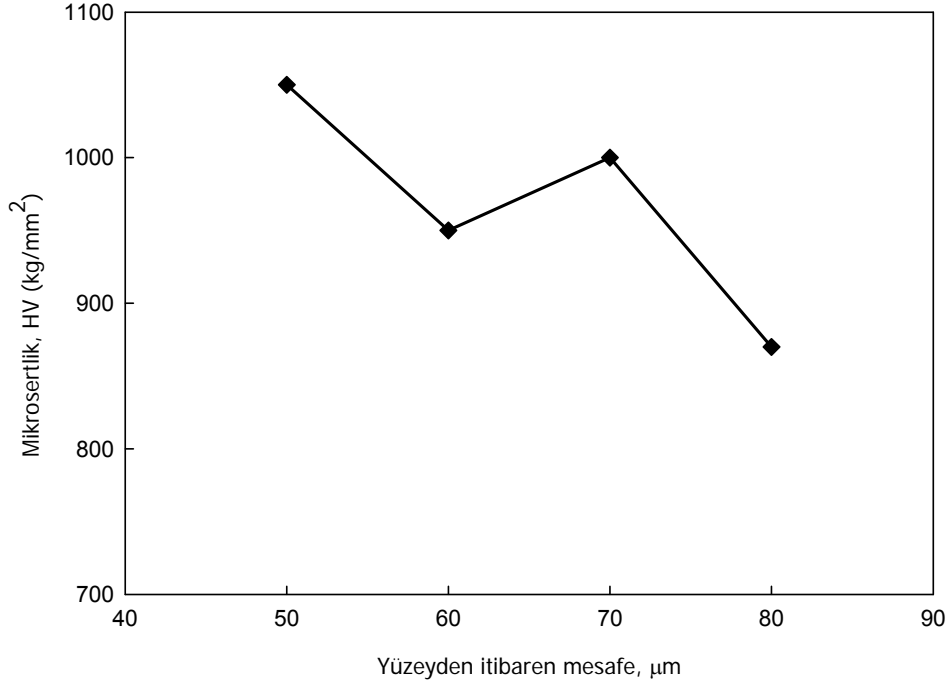
Şekil.8.55 16, 17 ve 18 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değişimleri



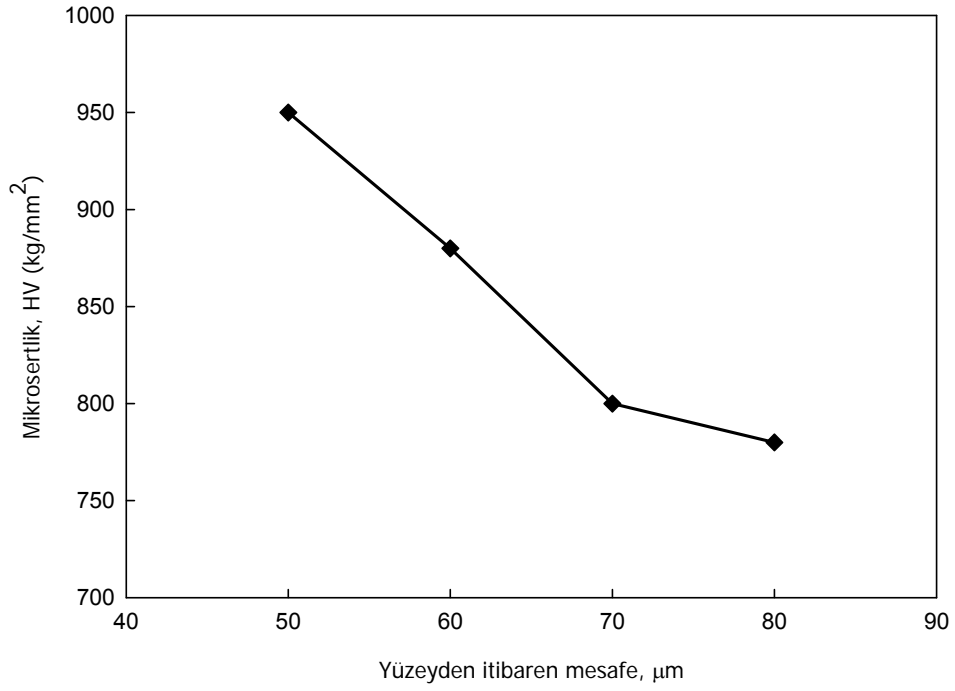
Şekil 8.56 19, 20 ve 21 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değişimleri



Şekil 8.57 22, 23 ve 24 no'lu numunelerin yüzeyden içeriye doğru mikrosertlik değişimleri



Şekil 8.58 900 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 15 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri



Şekil 8.59 900 mf pil kapasitesinde, 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm mesafelerinde 5 pulse uygulanmış numunelerin mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri

Sistemde mevcut olan yüksek enerji difüzyonu artırmaktadır. Hızlı ısınma ve soğuma (10^8K/sn) plastik deformasyona ve dolayısıyla dislokasyon hücrelerine sebep olmaktadır [35].

Pulse plazma işlemi ile meydana gelen hızlı soğuma metastabil yapının oluşumuna sebebiyet vermekle birlikte, x-ışını analizlerinden görüleceği üzere fazların FWHM (pik genişlikleri) değerleri genişlemiştir [136-137]. Bu latiste heterojen elastik bir bozulmanın (distorsiyonun) göstergesidir. Bu bozulmalar (distorsiyonlar) farklı fazların parçalarını tutan uygun bağların ve/veya dislokasyonların sebep olduğu elastik gerilme ile açıklanabilir[44]. Ayrıca oluşan kristalin yapı da yüksek sertliğe sebebiyet vermektedir [138-139].

Mikrosertlik çalışmaları sonucunda: x-ışınları analizleri ile modifikasyona uğramış tabakada varlıkları belirlenen nitrür esaslı ve wolfram esaslı fazların sertliğe artırıcı yönde bir etkiye sahip oldukları görülmüştür[140]. Özellikle yapıdaki Fe_3N mekanik özelliklerin gelişmesinde olumlu katkı sağlamıştır. Wolfram ve oksit bileşiğinin de sertlik artış mekanizmasında oldukça önemli bir etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Pulse plazma metastabil ultra ince tanelerin oluşumuna sebebiyet vermektedir [117-118]. Pulse plazma prosesi ile meydana gelen hızlı ısınma ve soğumadan dolayı meydana gelen deformasyon ve sonucunda tane boyutlarının nanometre seviyesine kadar inmesi sertlik değerlerinin artışı açıklamaktadır.

Deformasyon ile yapıda oluşmuş dislokasyonlar deformasyon sertleşmesine sebebiyet vermiş olduğu düşünülmektedir. Ayrıca modifikasyon işlemi ile yapıda meydana gelmiş olan kalıntı gerilmeler (basma kalıntı gerilmeleri) yine sertlik değerlerinin artmasında önemli faktördür [120].

Yukarıda bahsi geçen birçok mekanizmanın bir araya gelmesi ile modifikasyon işlemine maruz kalmadan sertlik değerleri 170-180HV olan AISI 4140 çeliğinin sertlik değerleri pulse plazma uygulama parametrelerine bağlı olarak 1050 HV gibi oldukça yüksek bir değere çıkmıştır. Mevcut birçok yüzey geliştirme prosesine göre oldukça yüksek denebilecek bu sertlik değerlerini 1-2dk. içinde elde edebilmek prosesin ekonomikliği ve kolaylığını anlamamızda yardımcı olacaktır.

Örneğin, 800 HV bir sertlik değeri için plazma nitrüleme veya diğer denk proseslerle 20-30 saat aralığında çalışmak gereklidir[67]. 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 dk.'lık bir çalışma yapmak yeterlidir. Kısa sürede yapılacak yüzey geliştirme işlemleri, hem iş gücü, hem de ekonomik kazanım sağlayacaktır.

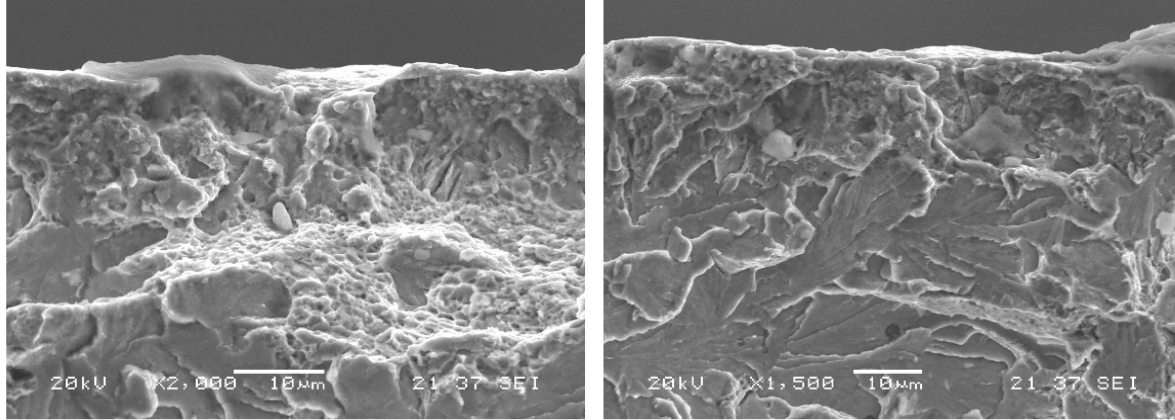
8.6. Kırık Yüzey Analizleri

Pulse plazma yöntemi ile yüzeyleri modifiye edilen AISI 4140 çeliklerinin işlem görmemiş yüzeylerinden (arka yüzeylerinden) kesme cihazı ile çentik açılmış, daha sonra el testeresiyle bu çentik iyice derinleştirilmiştir. Tüm numune grupları bu şekilde hazırlandıktan sonra sıvı azotun içine atılarak bir dakika civarında bekletilerek çıkartılmış ve çekiç yardımıyla çentikli bölgelerinden kırılmışlardır.

Kırılmış bölgelerin SEM ve EDS çalışmaları yapılmıştır. Kırılmış bölgelerden modifikasyon tabakasını daha açık ve oluşumları net bir biçimde görmemiz mümkün olabilmektedir. Ayrıca kırılmış modifikasyon tabakalarından alınan EDS analizleri ile tükenen elektrod olarak kullanılan W elementinin miktarına bakılmıştır. Ana yapıda hiç bulunmayan ancak W elektrotundan gelmiş olabilecek W elementinin varlığı, pulse plazma işleminin başarıyla gerçekleşip gerçekleşmediğini göstermesi açısından büyük önem taşımaktadır.

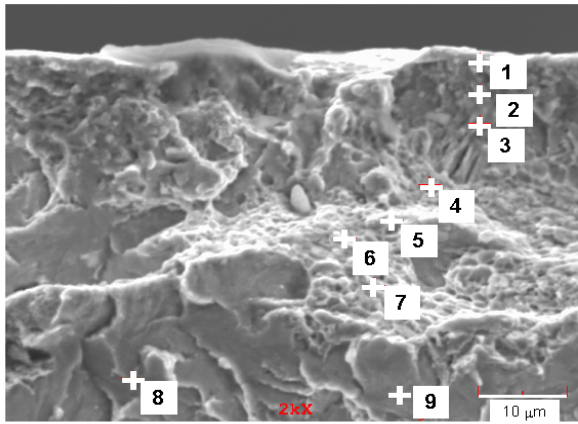
Şekil 8.60 a ve b'de 1(70mm, 15pulse, 800 mf) no'lu numunenin SEM görüntüleri modifikasyon tabakasını ve ana yapıyı göstermektedir. Modifikasyon tabakasında taneler oldukça incelmıştır. Yapı gevrek kırılma göstermiştir. Daha sonra bu yapıdan alınan EDS analizlerinde wolfram (W) elementinin noktasal analizi yapılmıştır. Wolfram elementi ilk olarak yüksek değer vermiş sonra azalmış ve takibinde değersel olarak dalgalanmalar gözlemlenmiş ve tabaka dışına çıkınca miktarsal olarak hiç rastlanmamıştır. Burada dikkat çeken önemli nokta, tükenen elektrod olarak kullanılan wolframın yapıda gözüküp gözükmemesidir. X ışınları ile varlığı belirlenen wolfram ve wolfram oksit tanelerin belirlenmesi bu anlamda önem taşımaktadır. Modifikasyon tabakaları incelendiğinde yüksek büyütmelelerde daha rahat gördüğümüz küçük beyaz tanecikler göze çarpmaktadır. Bu taneciklerden alınan EDS analizleri sonucu bu yapıların wolfram ve/veya wolfram oksit olduğu belirlenmiştir. Daha önce SEM ve EPMA analizlerinin de gösterdiği üzere tabaka da oksijen elementine rastlanmıştır. Çok miktarda oksijen olmamasına rağmen yine de prosesin açık atmosferde olması sebebiyle oksijenin tam anlamıyla yok olması mümkün olmamıştır. Wolfram elementinin oksijene ilgisi yüksektir. Pulse plazma

prosesiyle yüzeye gönderilen wolfram oksijenle birleşerek wolfram oksit bileşikleri yapması muhtemeldir.

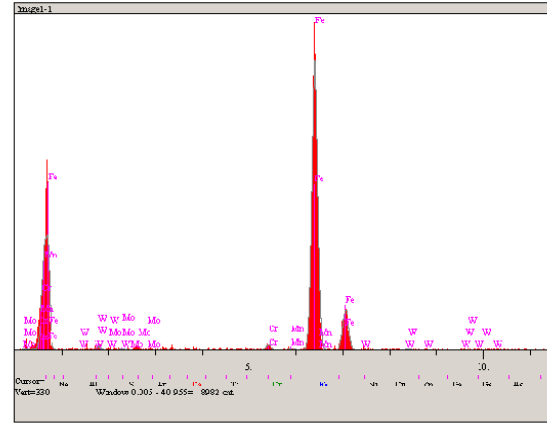


a)

b)



c)



d)

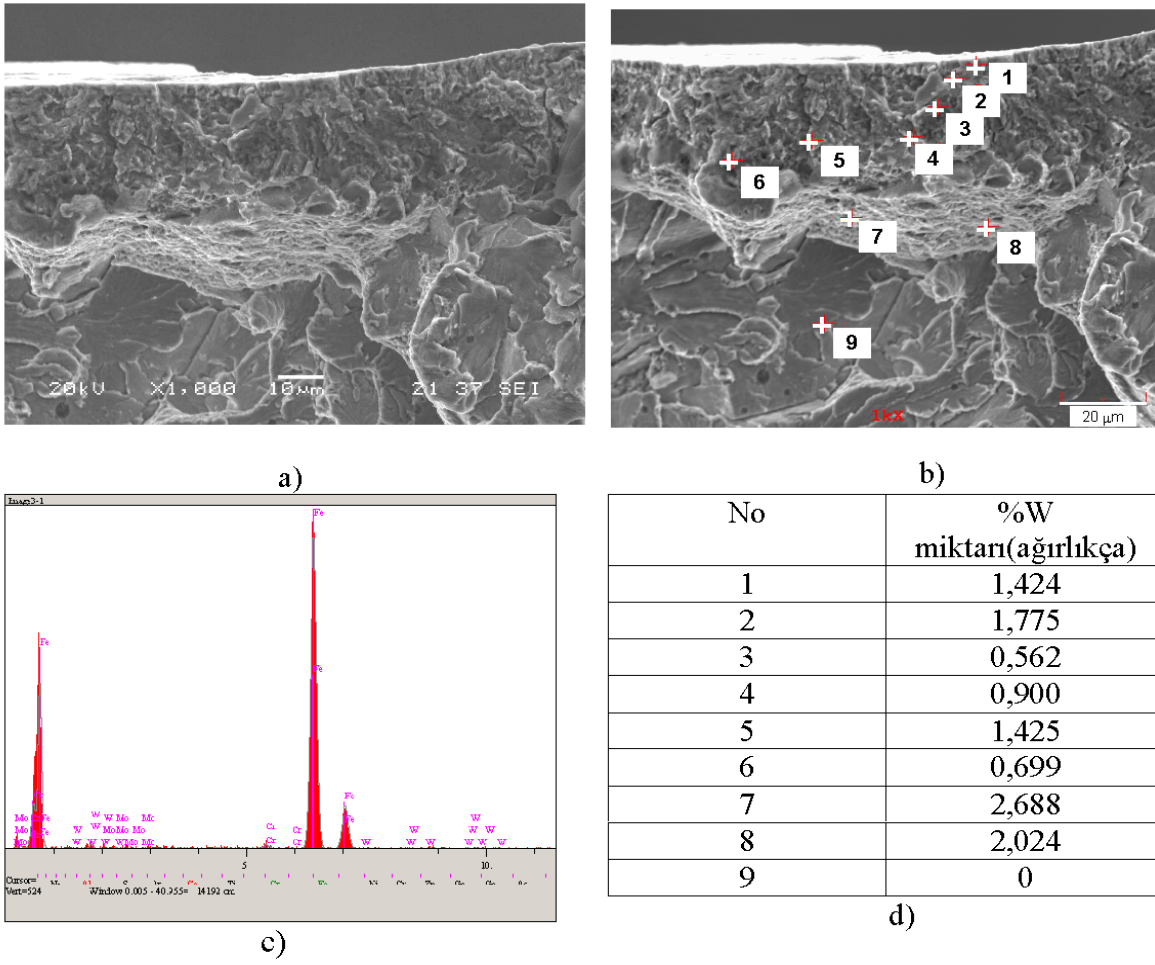
Noktalar	%W oranı(ağırlıkça)
1	2,172
2	1,176
3	1,660
4	1,688
5	1,619
6	1,750
7	1,654
8	Yok
9	Yok

e)

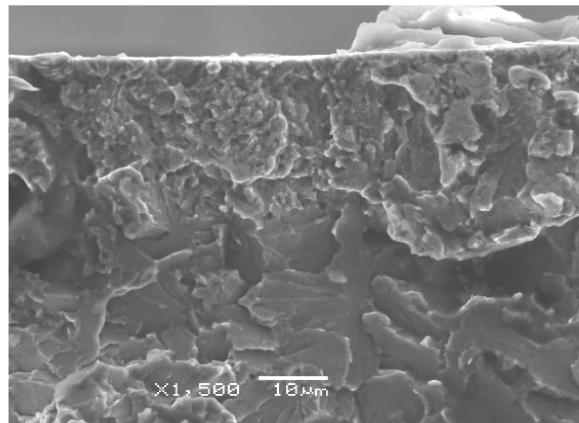
Şekil 8.60 1no'lu numunenin a ve b) kırık yüzey SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) 1no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak W element miktarı

Şekil 8.61 a'da 2(70mm, 10pulse, 800 mf) no'lu numunenin SEM, 8.61 b, c ve d'de de EDS analizleri görülmektedir. Görüntülere bakıldığında modifikasyon

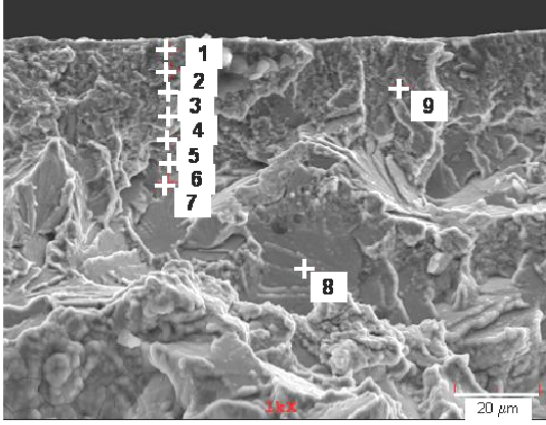
tabakaları görülmektedir. Tanelerin inceliği belirgin bir biçimde ortadadır. W elementinin noktasal analiz değerlerine göre 7.noktada en yüksek değerini vermiştir. Yüzeyden daha içerde bu yüksek değer in eldesine sebep olarak analizin direk bir wolfram ve/veya wolframoksit taneciği üzerinden almamız düşünülebilir. Modifikasyon tabakası içinde yüksek büyütme lerde daha iyi görülebilen küçük beyaz tanecikler mevcuttur. Bu taneler wolfram ve/veya wolfram oksit tanecikleridir. EDS analizleri esnasında direk bu taneler üzerinden alınan analiz değerlerinde W miktarı yüksek çıkmaktadır. Modifikasyona uğramış tüm numune gruplarında yüzeyden içeriye doğru wolfram miktar değerlerinin dalgalanma sebebinin bu olduğu düşünülmektedir. 3 no'lu numunenin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde ise yine modifikasyon tabakasında açıkça görülen bir gevrek kırılma karşımıza çıkmaktadır. Tane sınırları boyunca kırılmaların meydana geldiği düşünülmektedir. 3(70mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunede azalan pulse sayısı tabaka kalınlığındaki incelmenin sebebidir(Şekil 8.62 - 8.63).



Şekil 8.61 2 no'lu numunenin a) kırık yüzey SEM görüntüsü, b) EDS resmi, c) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, d) noktasal olarak W element miktarı



Şekil 8.62 3 no'lu numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü



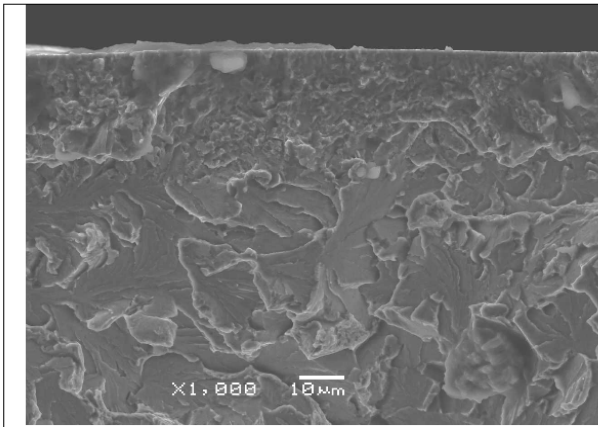
No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	2,610
2	3,200
3	1,198
4	2,067
5	1,154
6	1,190
7	2,091
8	1,889
9	1,054
10	1,190

b)

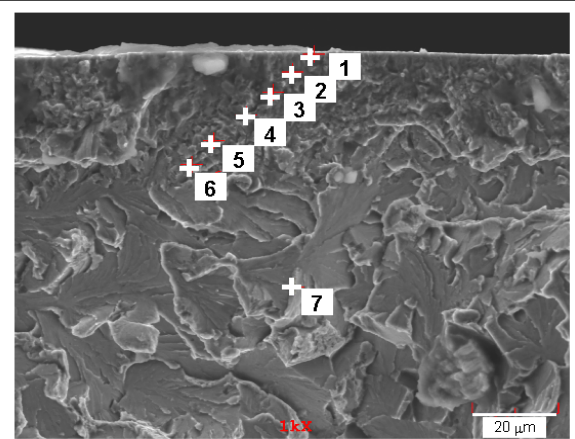
a)

Şekil 8.63 a) 3 no'lu numunenin EDS resmi, b) noktasal olarak W element miktarı

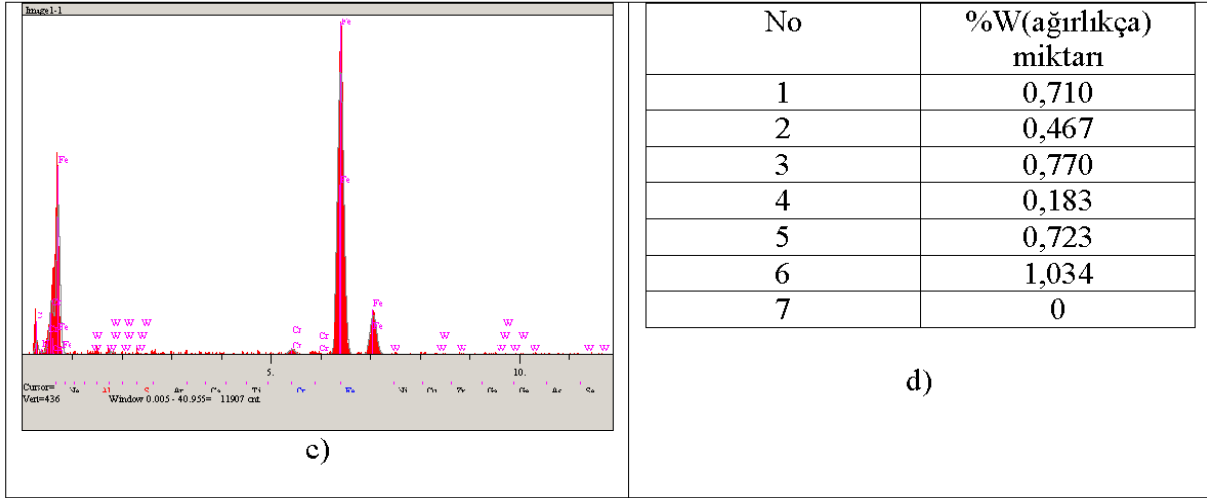
Şekil 8.64a'da 4 (80mm, 15pulse, 800 mf) no'lu numunenin SEM, 8.64b, c ve d'de de EDS analizleri verilmektedir. Bu numune grubunda pulse sayısının azalmasından dolayı W elementine az rastlanmıştır[44].



a)



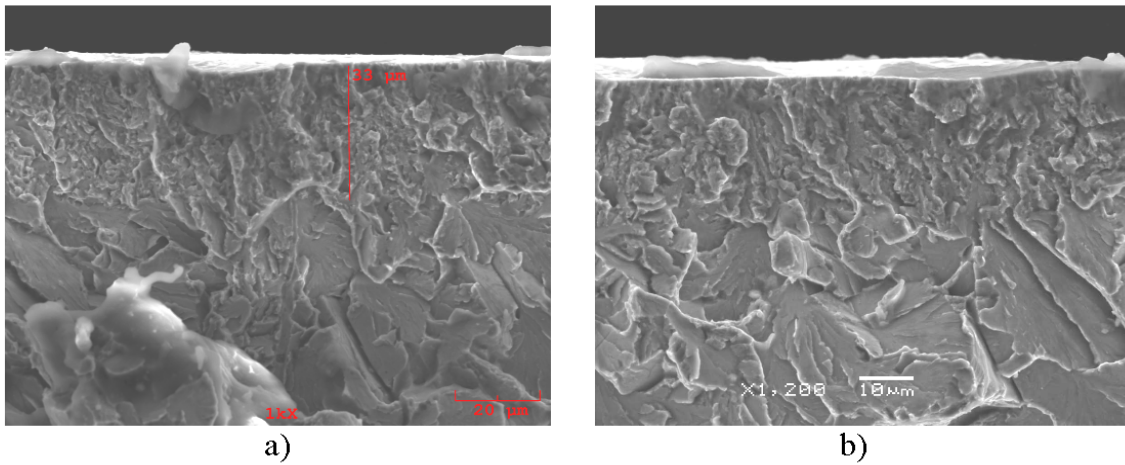
b)

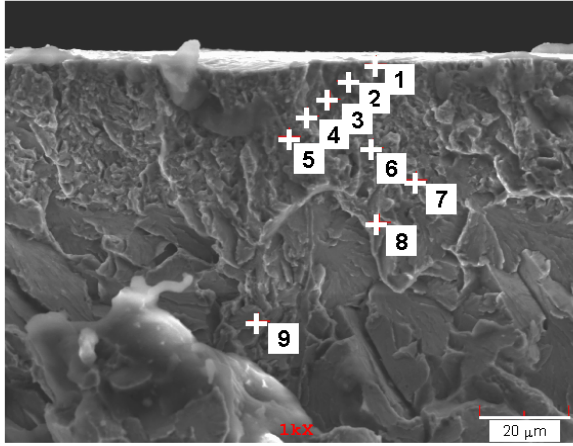


Şekil 8.64 4 no'lu numunenin a) kırık yüzey SEM görüntüsü, b) EDS resmi, c) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, d) noktasal olarak W element miktarı

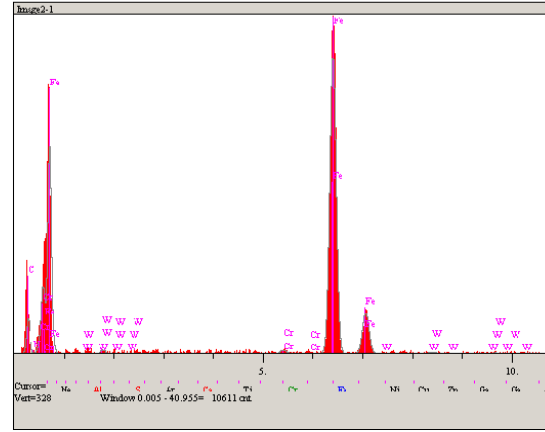
5 (80mm, 10pulse, 800 mf) no'lu numunenin kırık yüzey görüntülerinde kırılmanın tane sınırlarında olduğu ve gevrek bir kırılma meydana geldiği görülmektedir (Şekil 8.65). Modifikasyon tabakası tane yapısıyla hemen fark edilmektedir. Modifikasyon tabakasındaki taneler ana malzemedekine göre çok değişmiştir. Boyutları çok küçülmüştür.

Şekil 8.66a'da 6(80mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunenin SEM, 8.66b, c, d ve e'de de EDS analiz görüntüleri verilmektedir. Kaplama tabakasından küçük bir bölgede yüksek büyütmede alınan EDS analizlerinde yüksek oranda W elementi bulunmuştur. Yüksek büyütmede tanelerin ince yapısı rahatlıkla görülebilmektedir.





c)

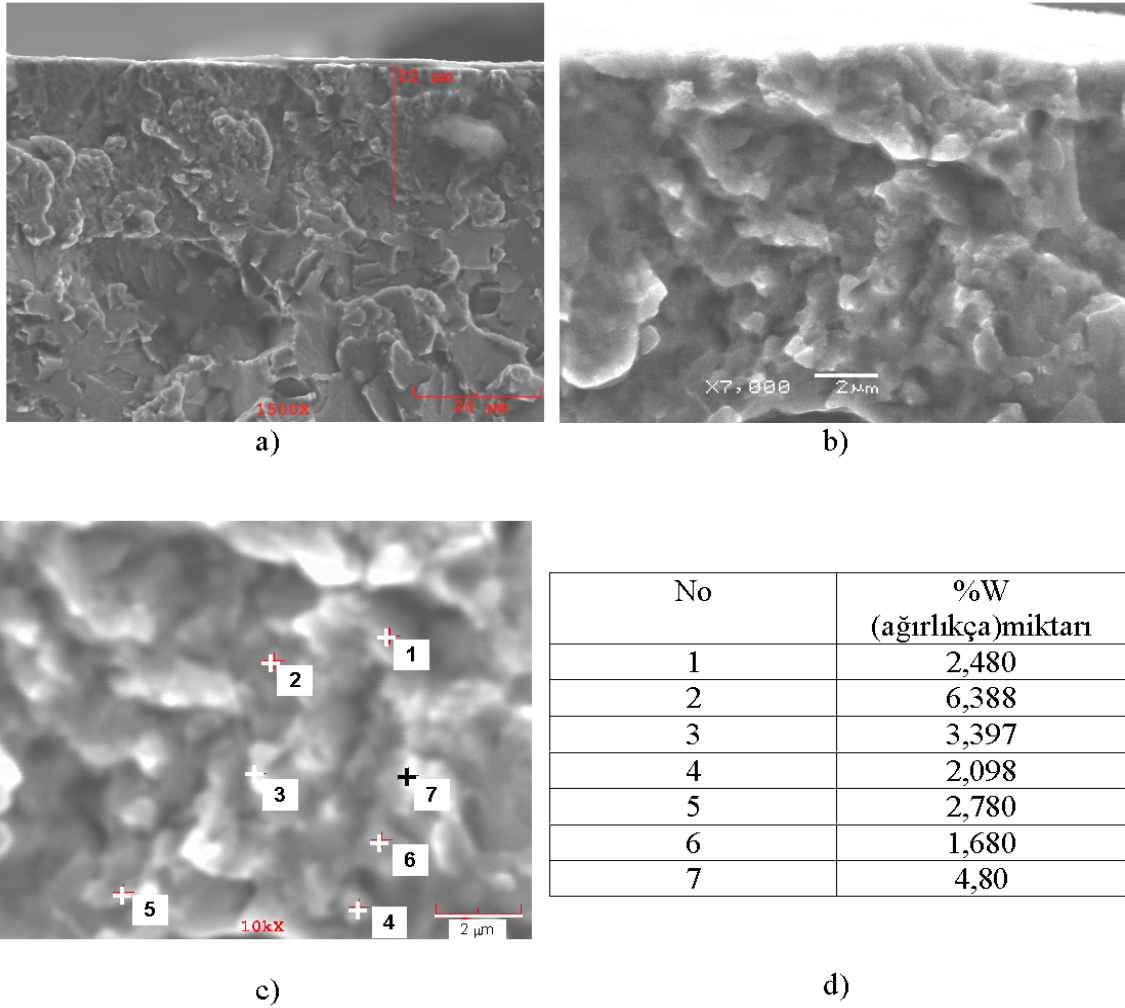


d)

No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	1,650
2	1,424
3	1,322
4	0,984
5	1,430
6	2,66
7	1,720
8	1,600
9	0 (yok)

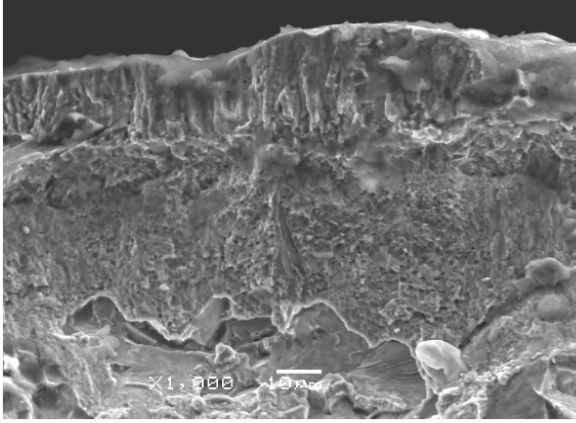
e)

Şekil 8.65 5 no'lu numunenin a) kırık yüzey SEM görüntüsü, b) farklı bir bölgeden SEM resmi c)EDS resmi,d) 1no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak W element miktarı

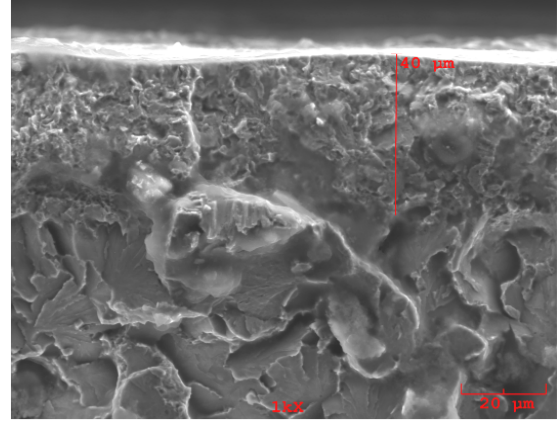


Şekil 8.66 6 no'lu numunenin a) kırık yüzey SEM görüntüsü, b) yüksek büyütmede modifikasyon tabaka SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) % W element miktarı

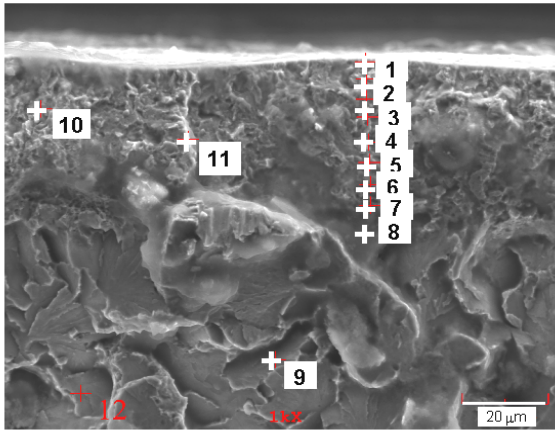
Şekil 8.67'de 7 (60mm, 15pulse, 800 mf) no'lu numunenin SEM ve EDS analizleri verilmektedir. Yapıda boşluklar ve yine tane incilmesi görülmektedir. Tabaka poroz bir yapıya sahiptir. Dış yüzeydeki porlar oldukça büyüktür ve yüzeyi açıktır. Poroz bu yapının sebebi; moleküler nitrojenin oluşumudur. Nitrojen atomları tane sınırlarına yığılır, mikroporoz yapıyı geliştirir [125]. Yapıda kolonsal büyüme yönlenmeleri görülmektedir. Büyüme yukarıdan aşağıya doğru meydana gelmiştir. Üst tabakanın altında belirgin bir difüzyon tabakası görülmektedir. Difüzyon tabakasının altında ise ara tabaka mevcuttur. Kırılma yüzeylerinden görebildiğimiz büyüme yönü mekanik özellikler açısından önem arz etmektedir.



a)



b)

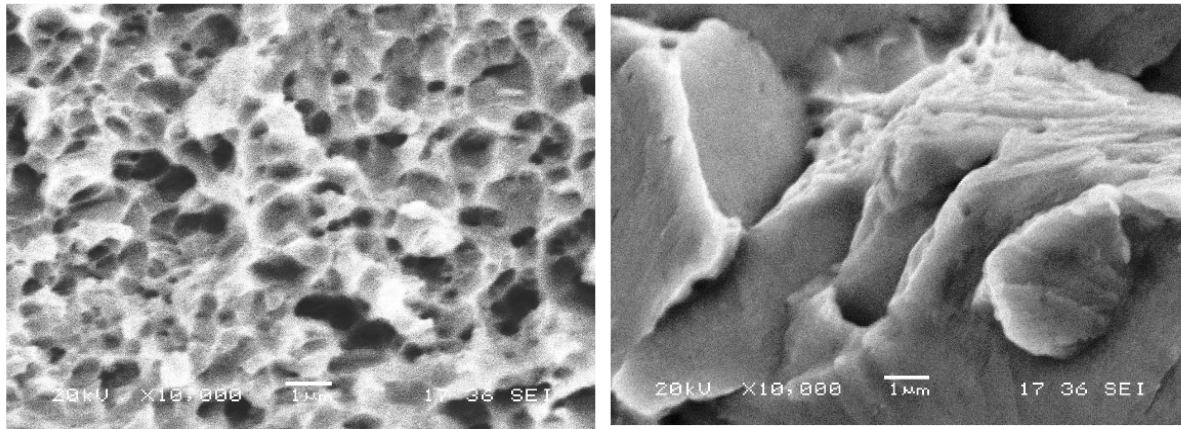


c)

No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	2,13
2	2,331
3	2,487
4	1,720
5	2,011
6	1,091
7	2,528
8	1,866
9	0
10	1,6

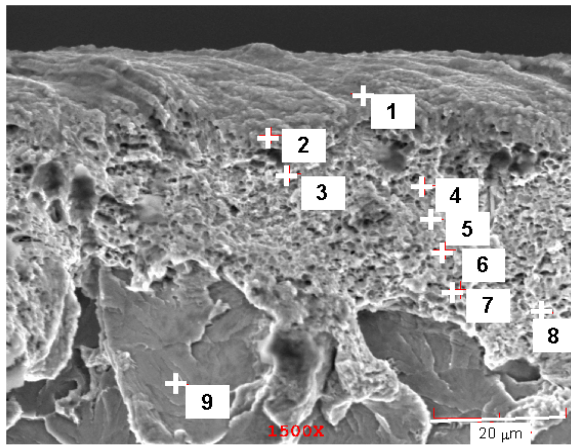
d)

Şekil 8.67 7 no'lu numunenin a) ve b) kırık yüzey SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) noktasal olarak %W element miktarı

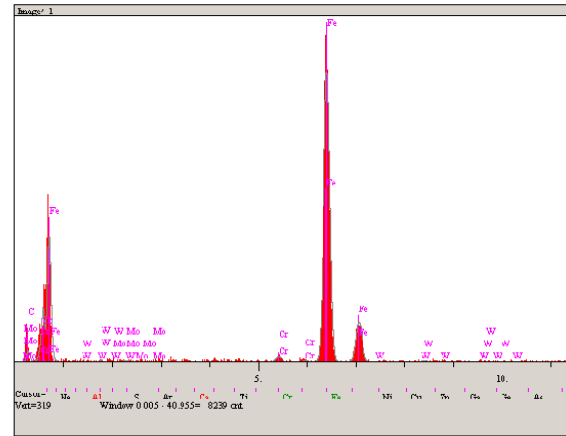


a)

b)



c)



d)

No	W(ağırlıkça) miktarı
1	1,644
2	1,730
3	2,354
4	1,582
5	0,491
6	1,045
7	2,434
8	2,304
9	0

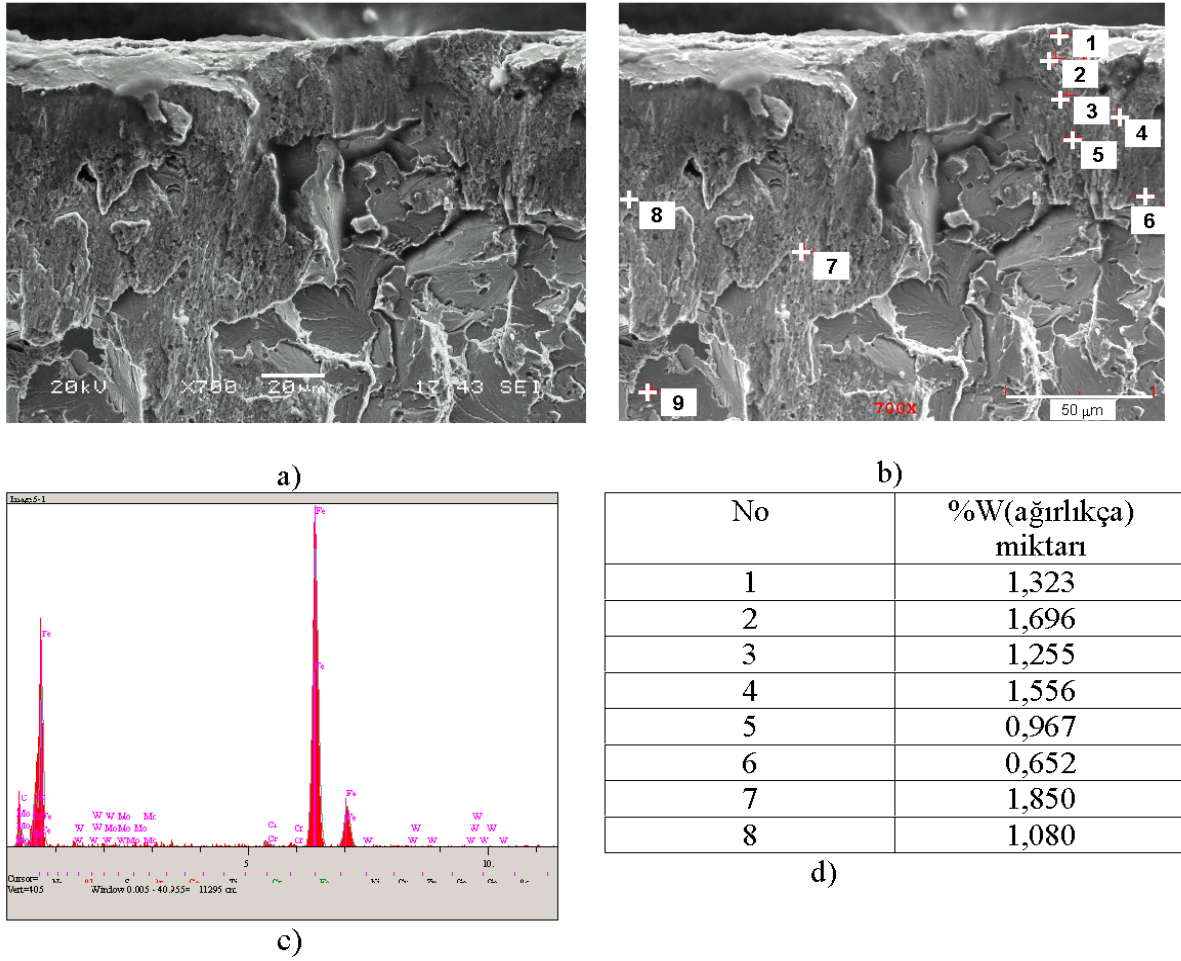
e)

Şekil 8.68 8 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) ana malzemeden kırık SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı

Şekil 8.68a'da 8(60mm, 10pulse, 800 mf) no'lu numunenin modifikasyon tabakasından, Şekil 8.68b'de ise numunenin ana yapısından alınmış SEM görüntüsü mevcuttur. Modifikasyon tabakasından ki ince taneler net bir şekilde görülmektedir.

Yüzeyden içeriye doğru W elementi önce artmış sonra azalmış ve sonunda tekrar artan bir eğilim göstermiştir.

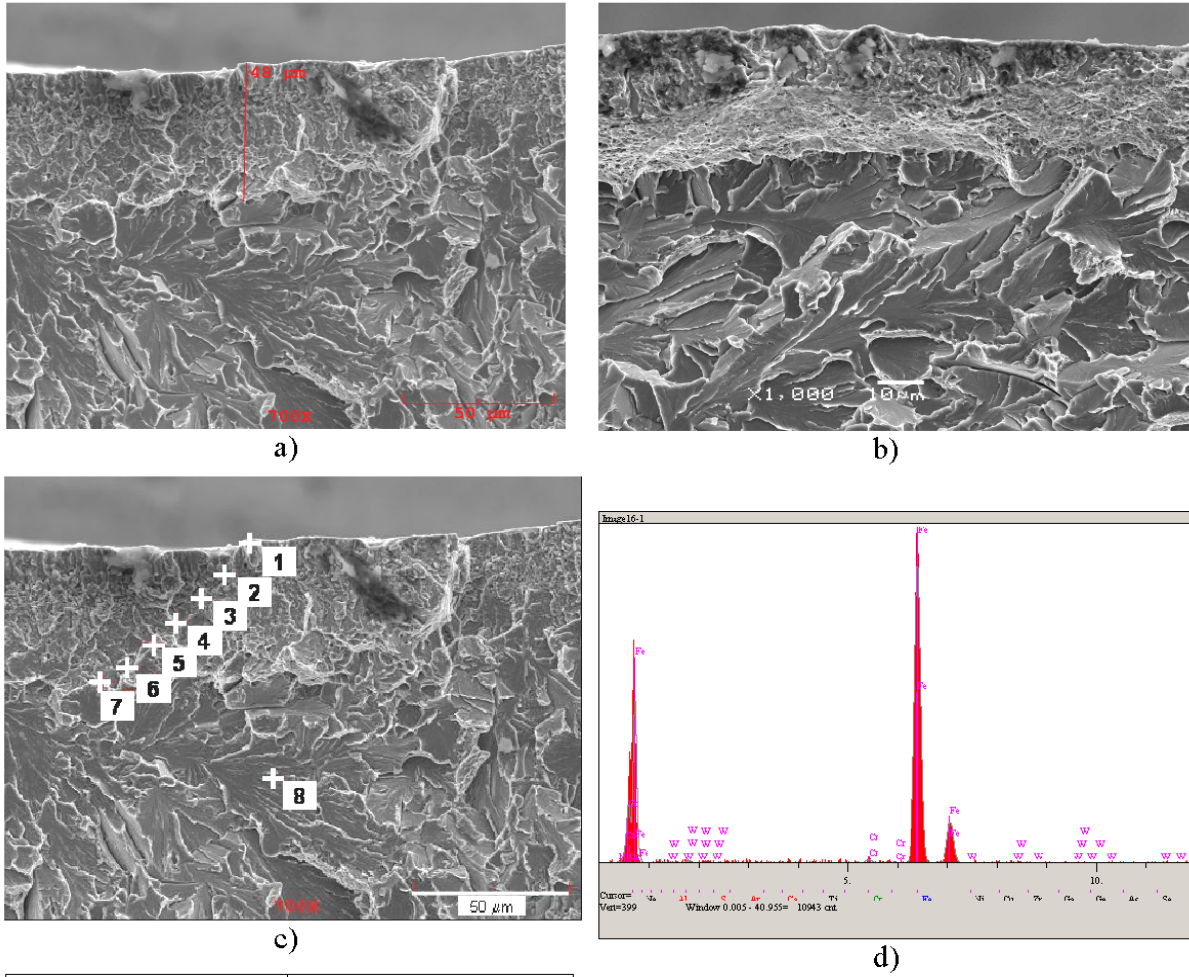
Şekil 8.69a'da 9 (60mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunenin SEM, b, c ve d'de ise EDS analizleri verilmektedir. Yapısal olarak gevrek kırılmış numunedeki modifikasyon tabakasında W elementi 7 ve 8 no'lu numuneye göre miktarsal olarak daha azdır. Bunun sebebinin yine pulse sayısı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 8.69 9 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) EDS resmi, c) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, d) noktasal olarak % W element miktarı

Şekil 8.70a'da 10(50mm, 15pulse, 800 mf) no'lu numunenin SEM, 8.70b, c, d ve e'de ise EDS analizleri görülmektedir. Yine modifikasyon tabakası açıkça görülen bu yapıda, pulse sayısının fazlalığından W miktarının yüksek olmuş olduğu düşünülmektedir.

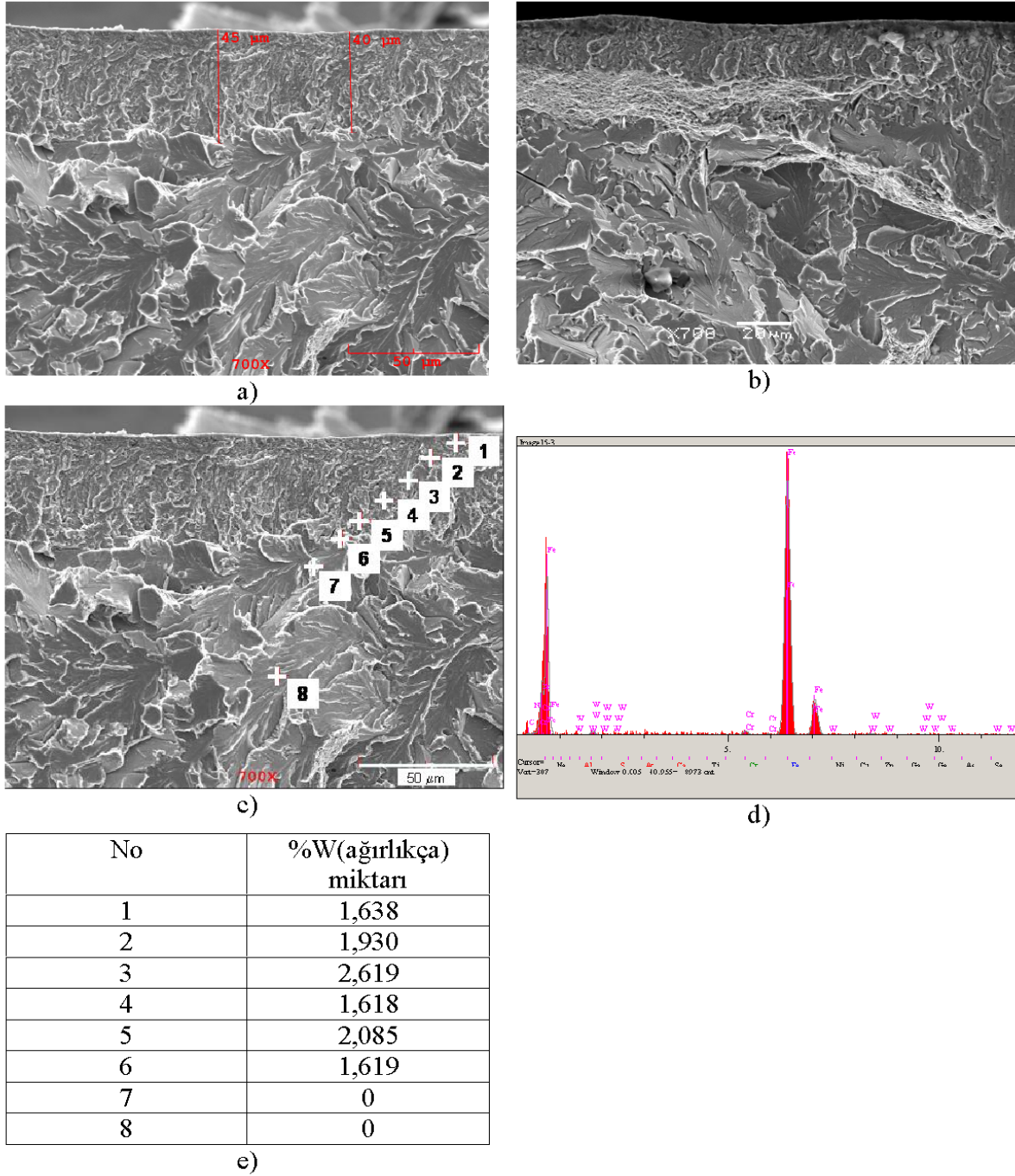
Şekil 8.71a ve b'de 11 (50mm, 10pulse, 800 mf) no'lu numunenin SEM, 8.71 c, d ve e'de EDS analizleri verilmektedir. 12 (50mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunenin kırık yüzeylerinden alınan SEM görüntülerinde beyaz wolfram oksit taneleri yüksek büyütmelelerde yakalanmıştır. Modifikasyon tabakasında dağınık biçimde olan tanelerden alınan %W değerleri yüksek çıkmaktadır. Yapıdaki tane incelmeleri dikkat çekicidir. İncelen taneler sınırları boyunca kırılarak gevrek kırılma örnekleri göstermişlerdir. Bu beyaz tanelerin varlığı tükenen elektrod wolframın yapıya başarılı bir biçimde girdiğini göstermesi açısından önem arz etmektedir.



No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	1,706
2	3,006
3	1,052
4	1,893
5	0,864
6	2,829
7	1,742
8	0

e)

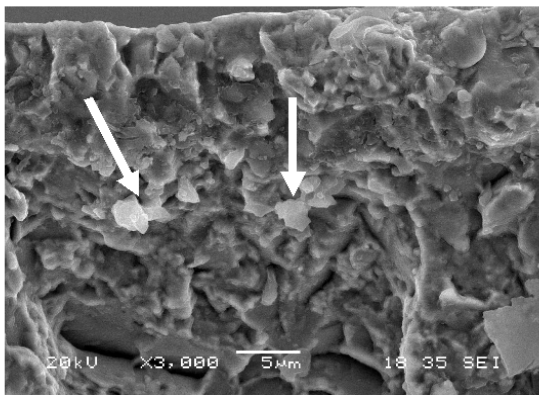
Şekil 8.70 10 no'lu numunenin 8 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) başka bir bölgeden kırık SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı



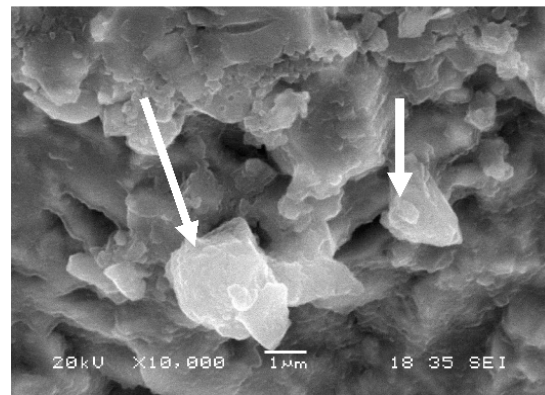
Şekil 8.71 11 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) başka bir bölgeden kırık SEM görüntüsü, c) EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak % W element miktarı

Şekil 8.72'de 12 (50mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numunenin kırık yüzey SEM ve EDS analizleri verilmektedir. Şekil 8.72a ve 8.72b'de ok ile gösterilmekte olan küçük beyaz taneler görülmektedir. Bu beyaz taneler daha öncede belirtildiği üzere wolfram ve/veya wolfram oksit taneleridir. Tanelerin boyutları görüntülerden de anlaşılacağı üzere birbirinden biraz farklıdır. Görünen taneler içinde en büyük

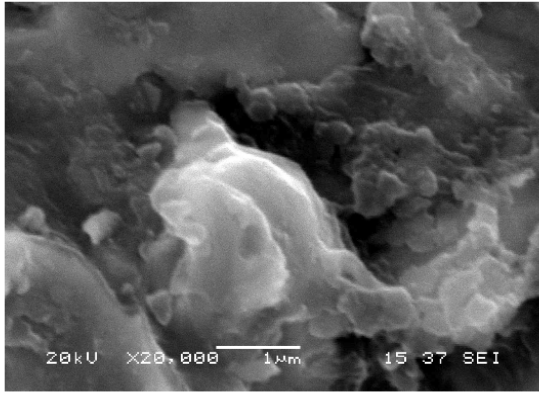
wolfram tane yaklaşık olarak 3 μm 'dir. Bu kadar büyük wolfram ve/veya wolframoksit tanelerin oluşumu mekanik özelliklerin gelişimi açısından çok büyük yararlar sağlayacağı düşünülmektedir. Bu taneciklerin varlığı ve boyutları sertliği artırmada etkili olmaktadır[44]. Taneler modifikasyon tabakasında dağınık biçimde bulunmaktadır. 13 (50mm, 15pulse, 900 mf) no'lu numune de ise kırık yüzey görüntüsünden sonra 8.73b'de verilmekte yüksek büyütmede modifikasyon tabakasından, 8.73c'de ise işlem görmemiş çelik yapısından görüntüler alınmıştır. Modifikasyon tabakasındaki ve işlem görmemiş tabakadaki tanelerin farklılıkları dikkat çekicidir. Yine modifikasyon tabakasından alınan EDS'lerde W miktarı farklılık göstermiştir. Yukarıdan aşağı doğru kolonsal büyüme yönlenmeleri olduğu görülmüştür. Büyüme yönlerinde çatlak ilerlemesi zor olmaktadır, bu sebeple bu oluşumları görmek mekanik özellikleri gelişimini anlamada yardımcı olmaktadır. 14(50mm, 10pulse, 900 mf) no'lu numune grubu için, Şekil 8.74a'da modifikasyon tabakası, 8.74b'de yüksek büyütmede tek bir wolfram oksit taneciği, 8.74c'de ise modifikasyon tabakasının altından (ana malzemeden) alınan yüzey görüntüleri verilmektedir. Özellikle wolfram ve/veya wolfram oksit tanesini açık bir şekilde, boyutlarını tam olarak görebildiğimiz bu görüntüler, oluşan modifikasyon tabakası yapısı hakkında daha fazla bilgi edinmemize yardım etmiştir. 15 (50mm, 5pulse, 900 mf) no'lu numuneden elde edilmiş kırık yüzey görüntüleri ise modifikasyon tabakasının net bir biçimde görülmesi açısından güzel bir örnektir. Yapıdaki tanelerin işlem sonrası nasıl küçüldüğü görebilmemiz mümkündür. Yapıda yine gevrek kırılma görülmüştür. EDS'lerde %4 kadar oranda W elementi bulunmuştur.



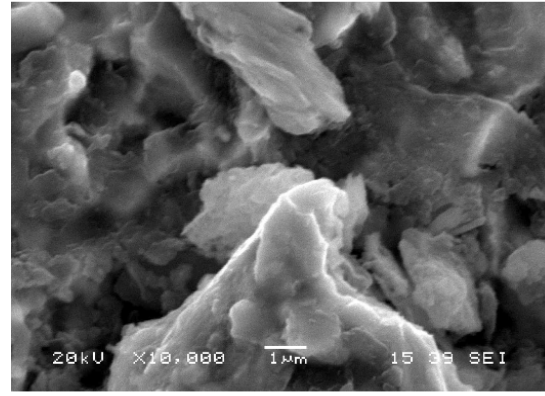
a)



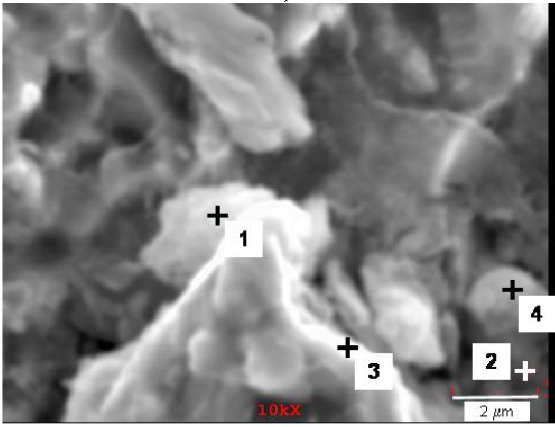
b)



c)



d)

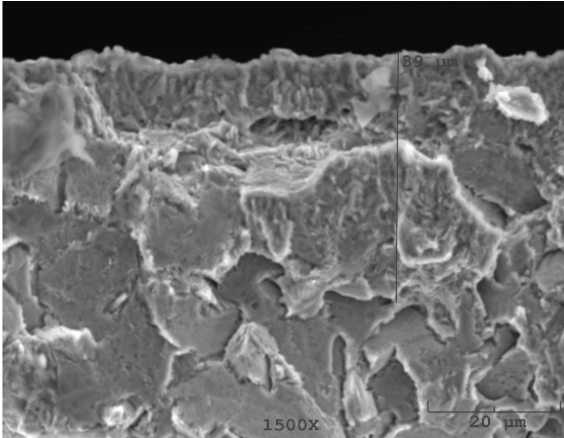


e)

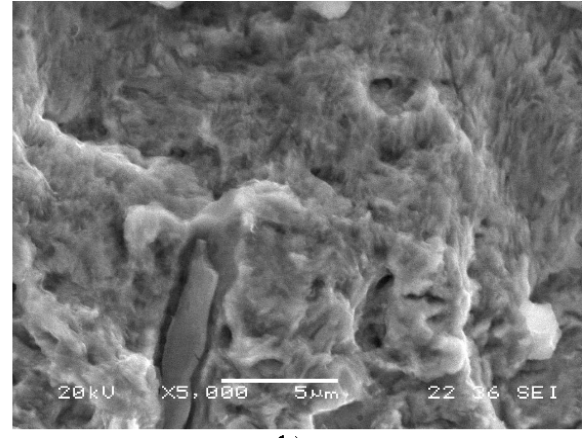
No	%W (ağırlıkça)miktarı
1	1,212
3	4,498
4	1,623

f)

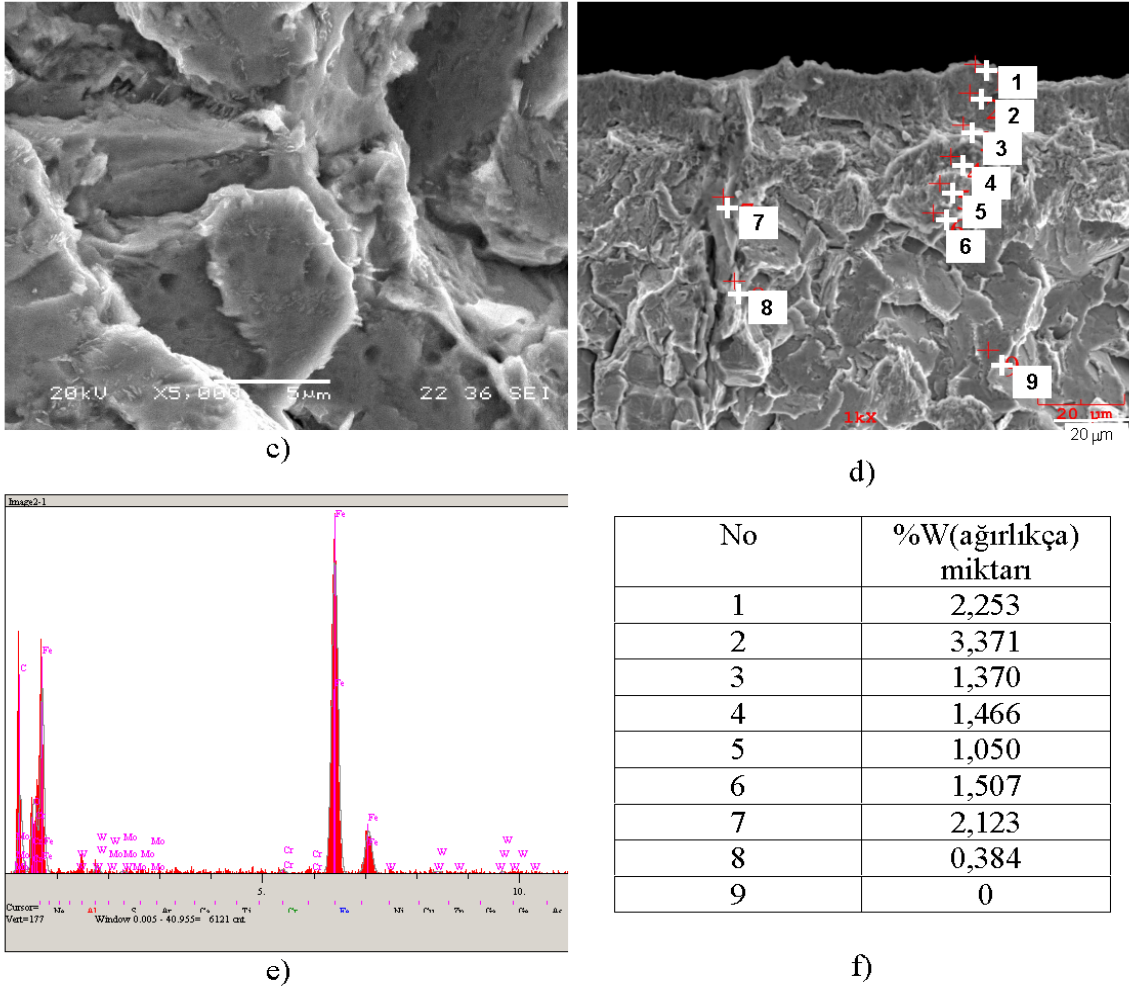
Şekil 8.72 12 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) yüksek büyütmede SEM görüntüsü, c) farklı bölgeden yüksek büyütme SEM görüntüsü, d) farklı bölgeden SEM görüntüsü, e) EDS resmi, f) noktasal olarak %W element miktarı



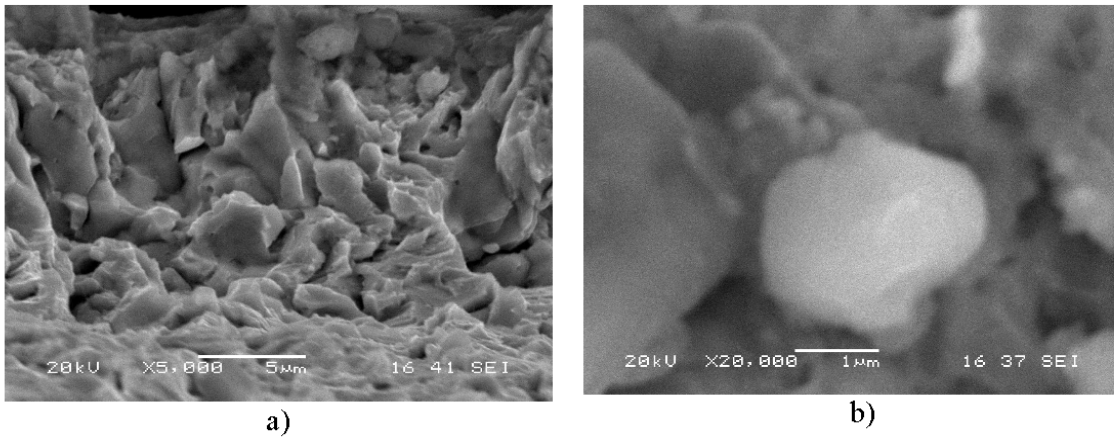
a)

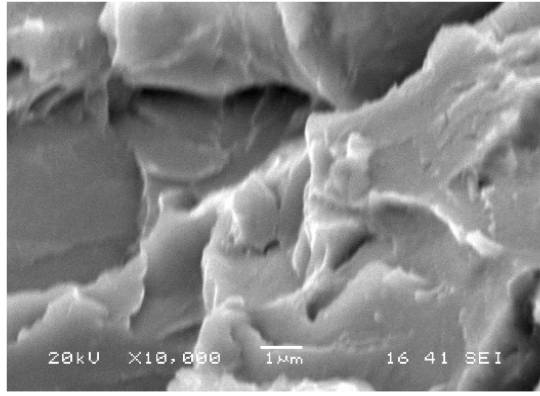


b)

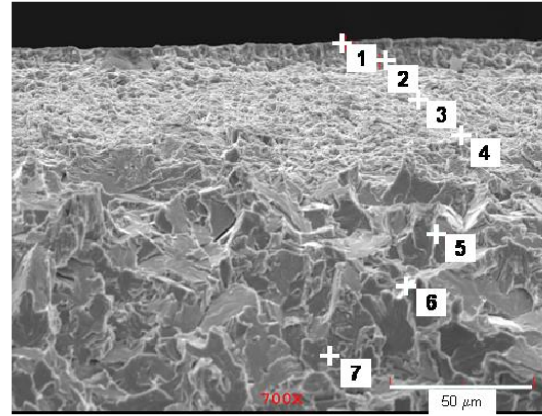


Şekil 8.73 13 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) modifikasyon tabakasından yüksek büyütme SEM, c) ana malzemenin kırık SEM görüntüsü, d) modifikasyon tabakası EDS resmi, e) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, f) noktasal olarak %W element miktarı

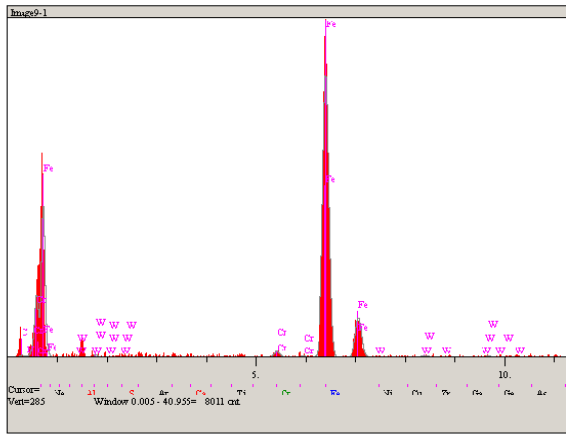




c)



d)

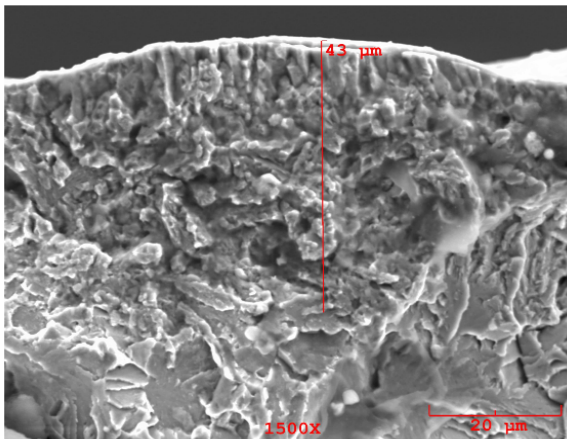


e)

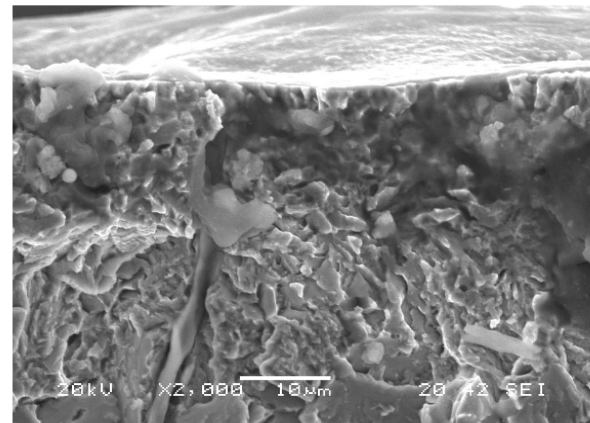
No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	3,395
2	2,118
3	1,373
4	1,462
5	0
6	0
7	0

f)

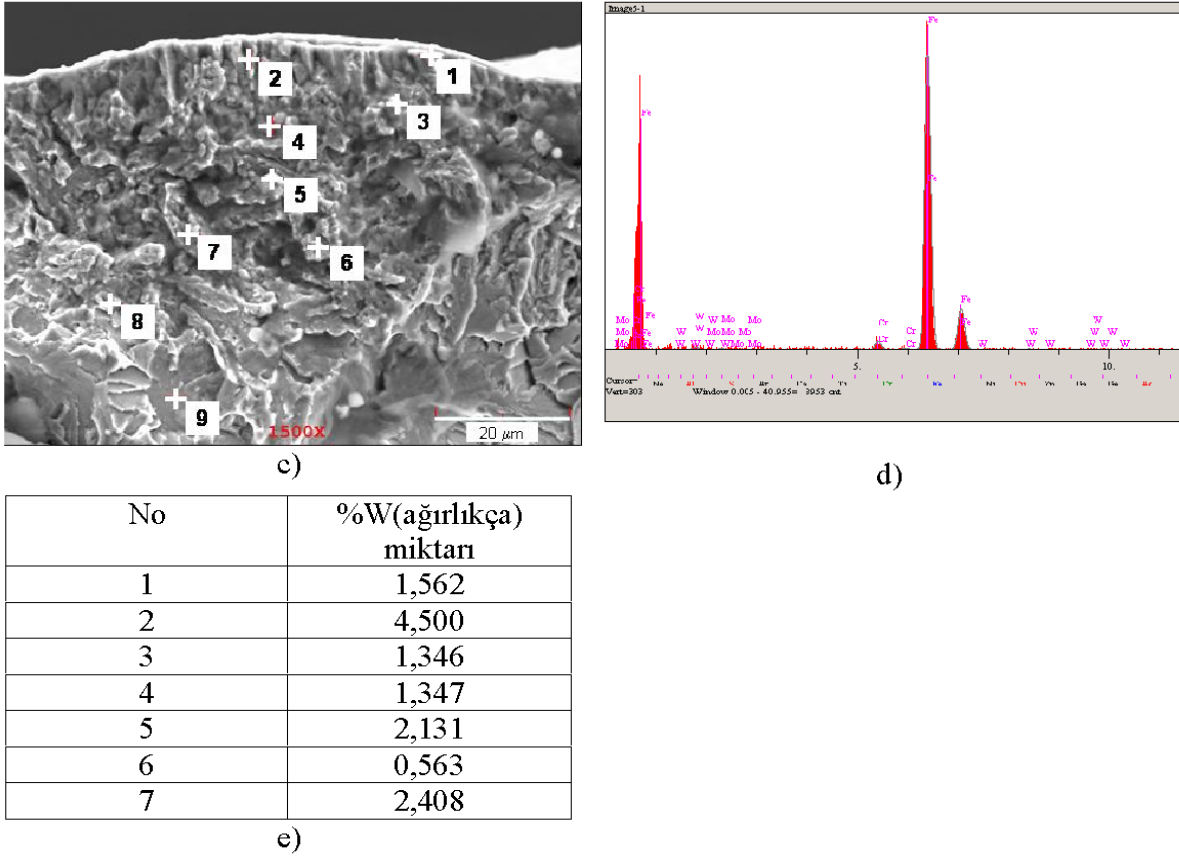
Şekil 8.74 14 no'lu numunenin; a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) yüksek büyütmede modifikasyon tabakasından wolfram oksit taneciği, c) ana malzemeden kırık yüzey SEM görüntüsü, d) modifikasyon EDS resmi, e) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, f) noktasal olarak %W element miktarı



a)

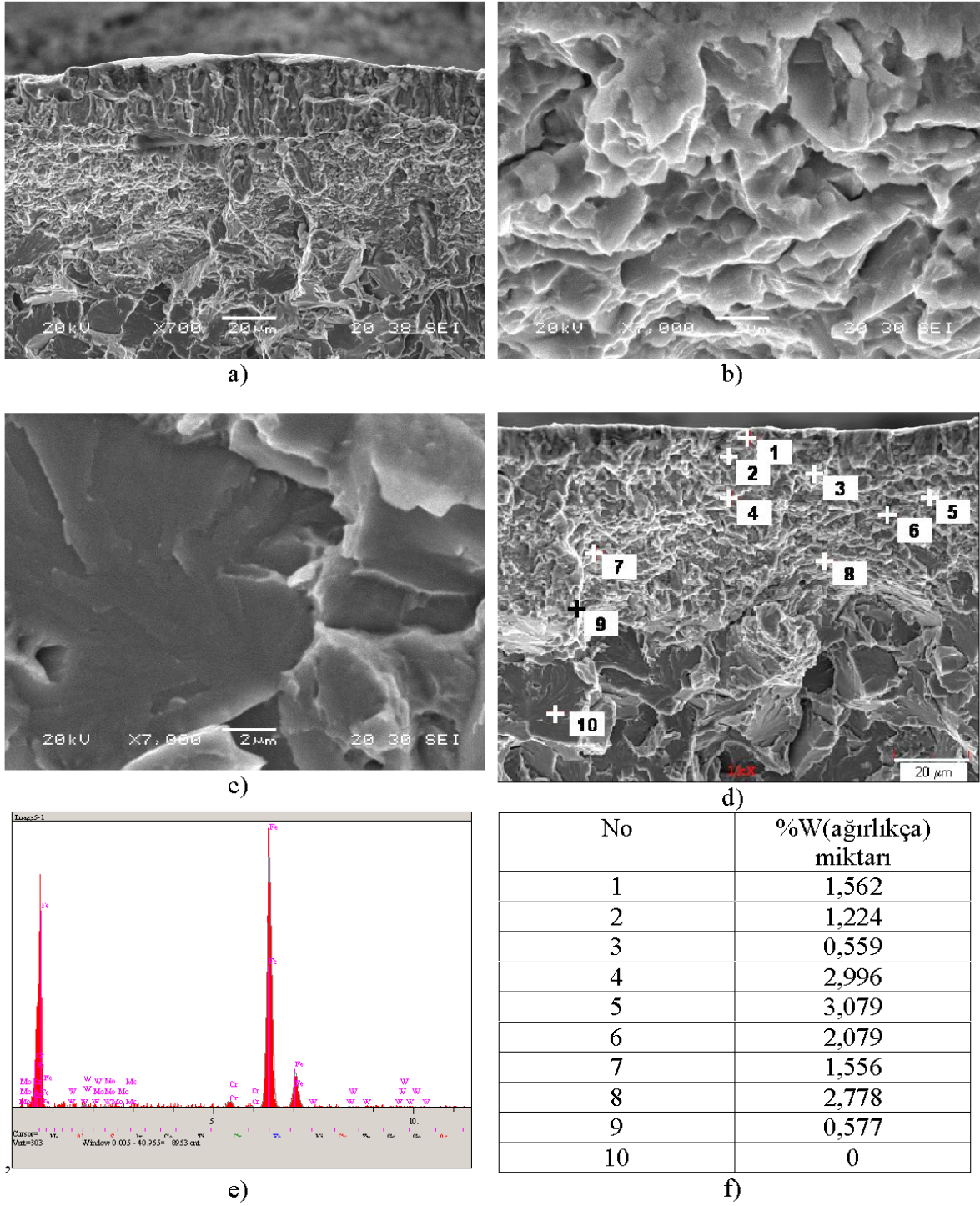


b)

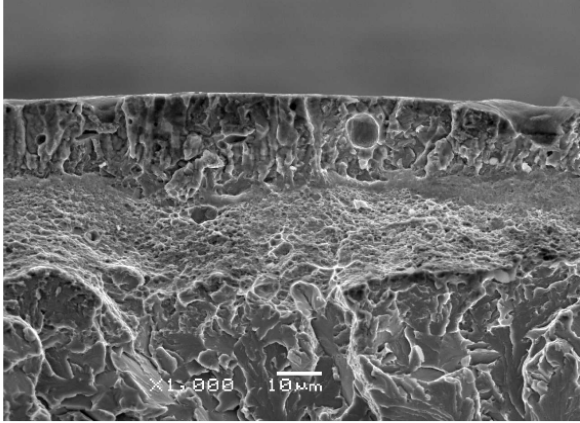


Şekil 8.75 15 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) modifikasyon tabakasından yüksek büyütme SEM, c) modifikasyon EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak %W element miktarı

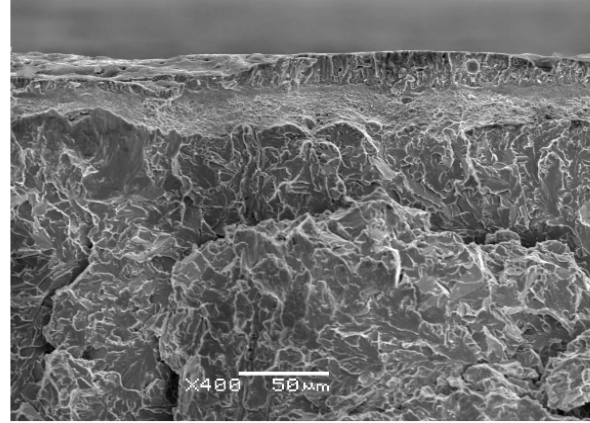
Şekil 8.76'da 16(60mm, 15pulse, 900 mf) no'lu numunenin kırık yüzeyinden alınmış SEM görüntülerinde hem modifikasyon tabakası(Şekil 8.76b) hem de alt tabaka(Şekil 8.76c) yapısı görülmektedir. Her iki yapının farklılığı çok belirgindir. İşleme maruz kalmayan alt tabadaki tanelerin boyutlarının 4-8µm aralığında iken, pulse plazma işlemi sonrası ne kadar küçüldüğünü Şekil 8.75'de görmemiz mümkündür. 17(60mm, 10 pulse, 900 mf) no'lu numuneden bölgesel olarak analizlerde yüzeydeki %W miktarı bir alt bölgeden alınan analizlere göre daha düşüktür (Şekil 8.76).



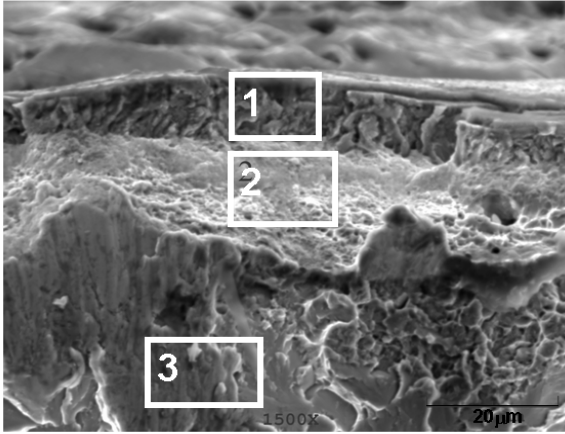
Şekil 8.76 16 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) modifikasyon tabakasından yüksek büyütme SEM, c) ana malzemeden yüksek büyütmede SEM görüntüsü, d) modifikasyon EDS resmi, e) 1 no'lu noktanın element grafiği, f) noktasal olarak %W element miktarı



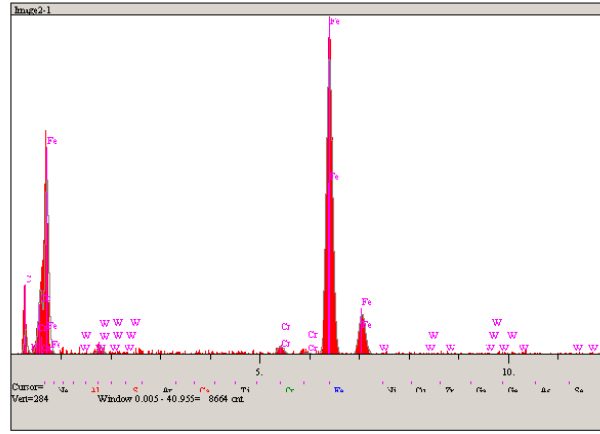
a)



b)



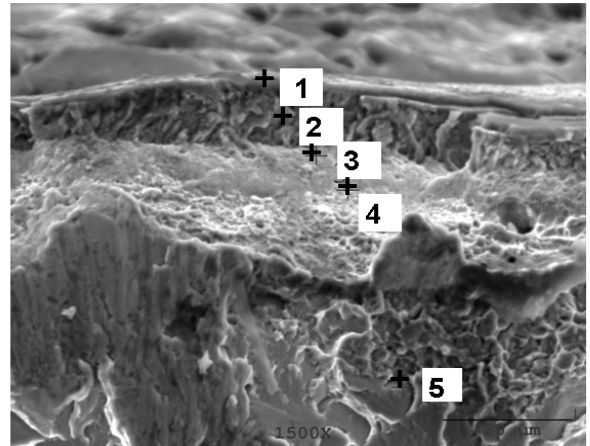
c)



d)

No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	1,066
2	3,164
3	0

e)



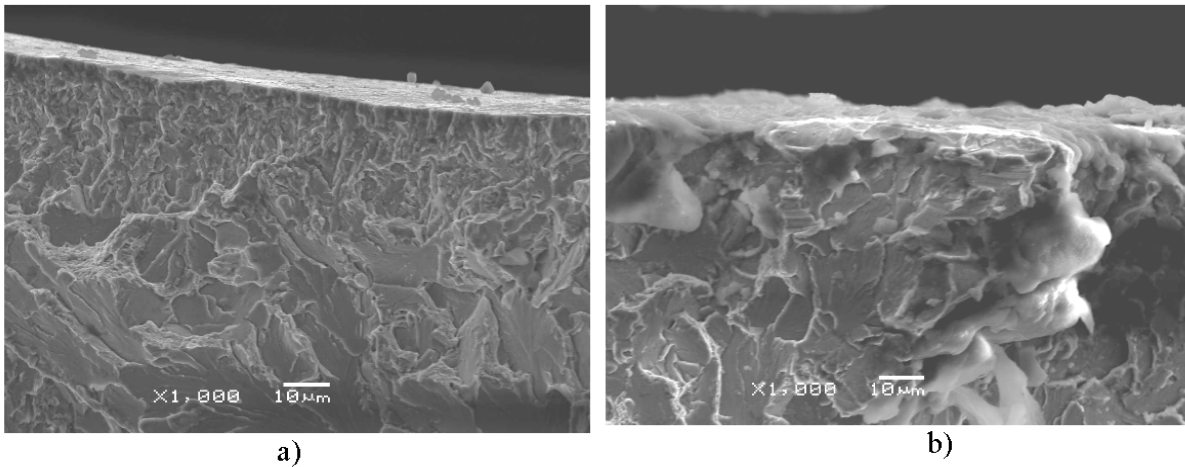
f)

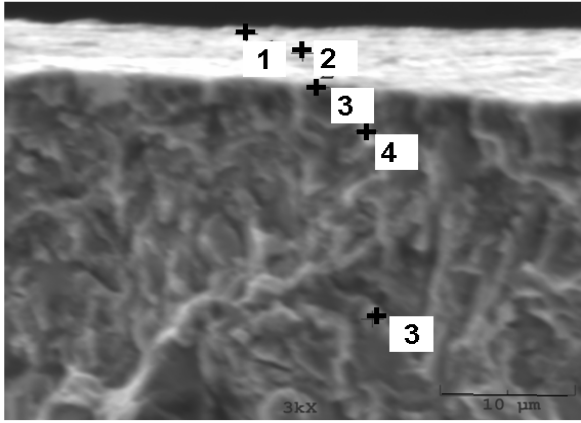
No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	2,622
2	1,575
3	1,704
4	2,706
5	0

g)

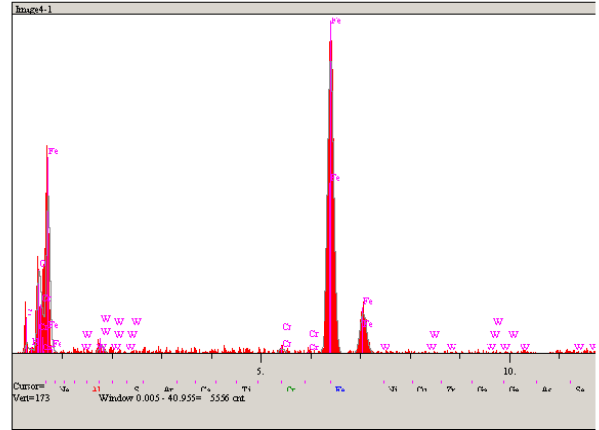
Şekil 8.77 17 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) modifikasyon tabakasından farklı bölgede SEM, c) modifikasyon tabakasından bölgesel EDS resmi d) 1. bölgenin EDS sonuç grafiği, e) bölgesel %W EDS sonuçları, f) aynı bölgeden noktasal EDS analiz resmi, g) noktasal olarak %W element miktarı

Şekil 8.78'de 18(60mm, 5pulse, 900 mf), Şekil 8.79'da 19(70mm, 15pulse, 900 mf) no'lu numune gruplarının SEM ve EDS analizleri görülmektedir. Yine bu numune gruplarından da alınan noktasal EDS analizlerinde wolfram miktarı farklılık göstermiştir. Pulse sayısının fazla olması sebebiyle yüzeyde ergime görülmüştür. Ergime yapısında bazı boşluklar mevcuttur. Wolfram miktarı ilk 10 µm'de daha fazla aşağı inince azalmıştır. Difüzyon esaslı bir proses olması itibariyle bu beklenen bir sonuçtur. 20(70mm, 10pulse, 900 mf) 'lu numuneden alınan SEM ve EDS analiz resimleri Şekil 8.80'de verilmektedir. Şekil 8.80b'de modifikasyon tabakasından alınmış resim dikkat çekicidir. Bu numune gruplarında yapılan EDS analizlerinde 6 no'lu noktada % 4.6 oranında W elementi bulunmuştur. Bu oran yüzey özelliklerinin gelişimi bakımından önem arz etmektedir. Bu kadar yüksek orandaki wolfram miktarının oluşturacağı oksitli bileşiğin mekanik özelliklerin gelişmesinde büyük katkı sağlayacağı düşünülmektedir. 21(70mm, 5pulse, 900 mf) no'lu numunede ise bölgesel EDS analizi yapılmıştır. Bölgesel olarak %W miktarında yüksek diyebileceğimiz oranda değişimler gözlemlenmemiştir.





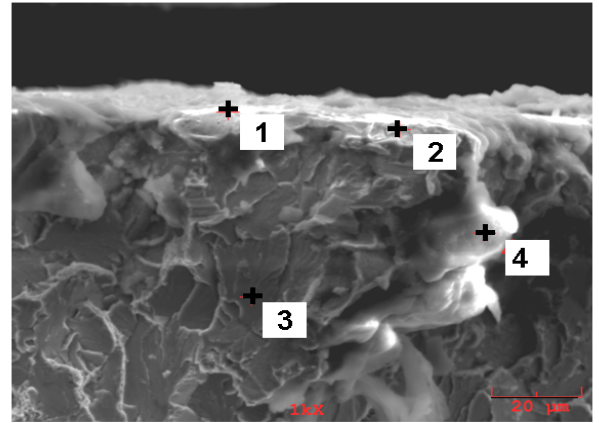
c)



d)

No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	1,021
2	2,127
3	2,077
4	2,001
5	0

e)

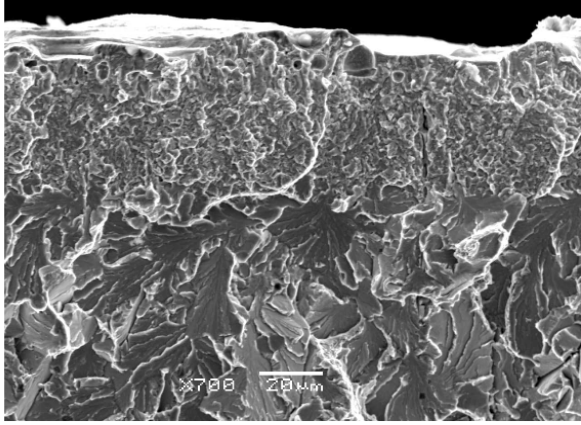


f)

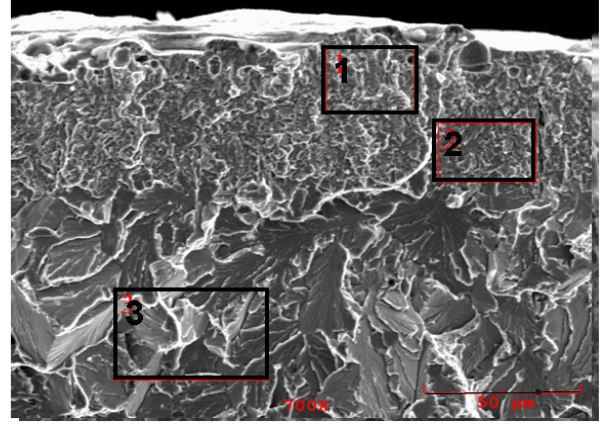
No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	1,914
2	1,514
3	0
4	1,718

g)

Şekil 8.78 18 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) başka bir bölgeden SEM, c) modifikasyon EDS resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak %W element miktarı, f) farklı bir bölgeden EDS analiz, g) noktasal %W miktar değişimi



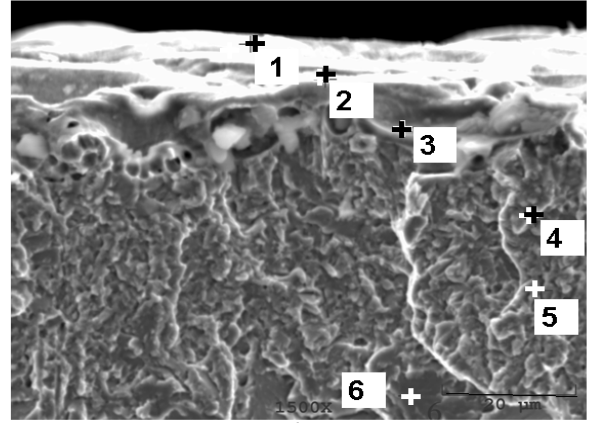
a)



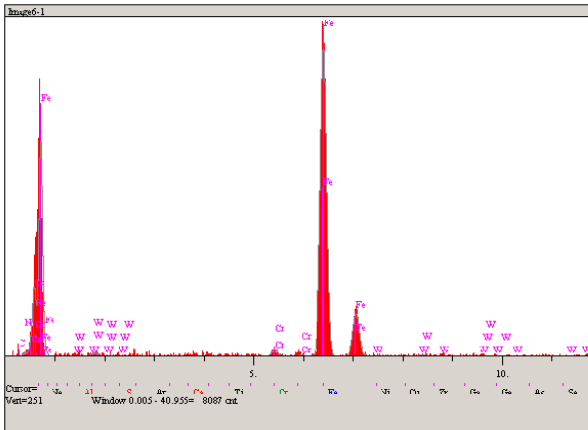
b)

No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	3,643
2	1,240
3	0

c)



d)

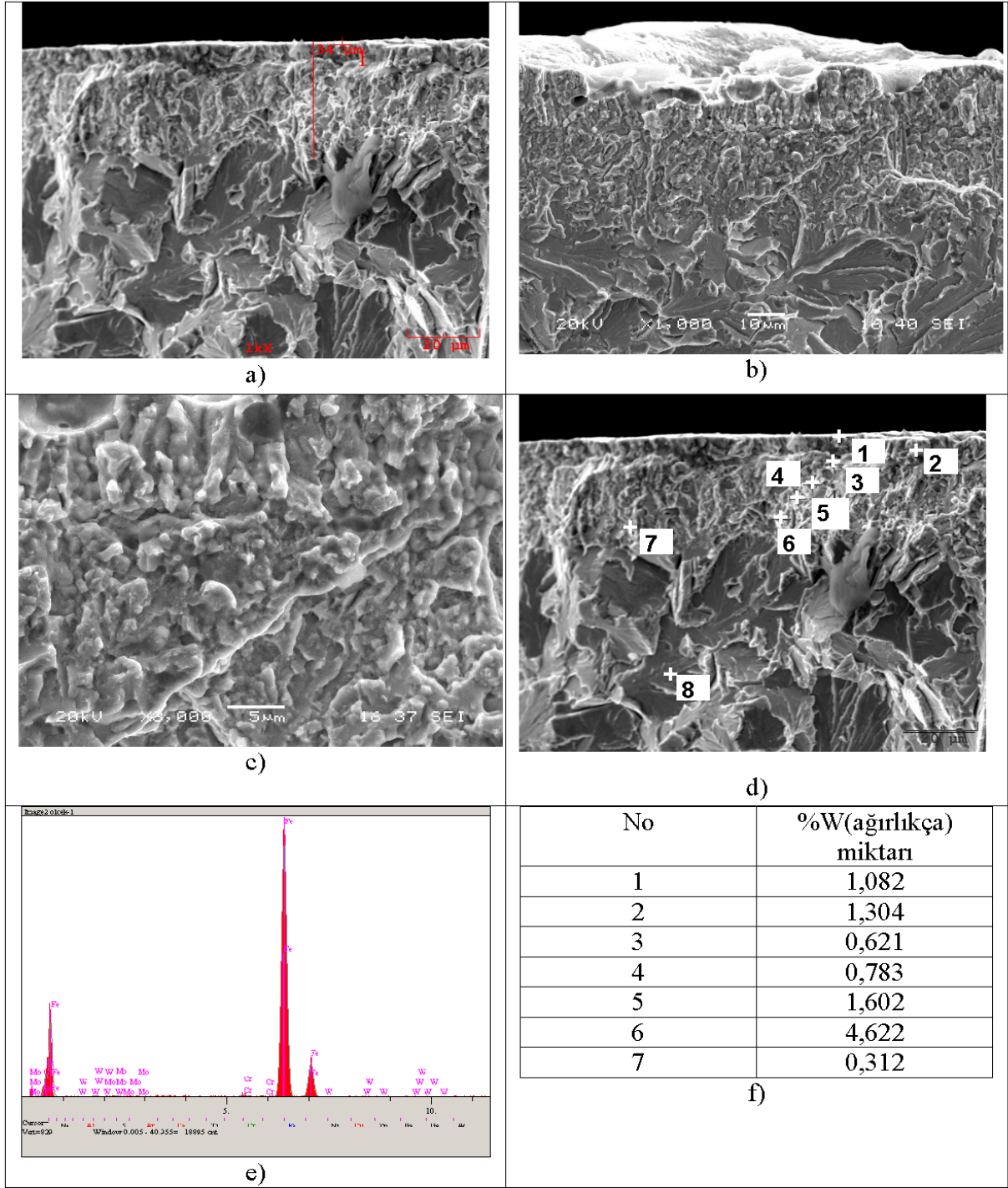


e)

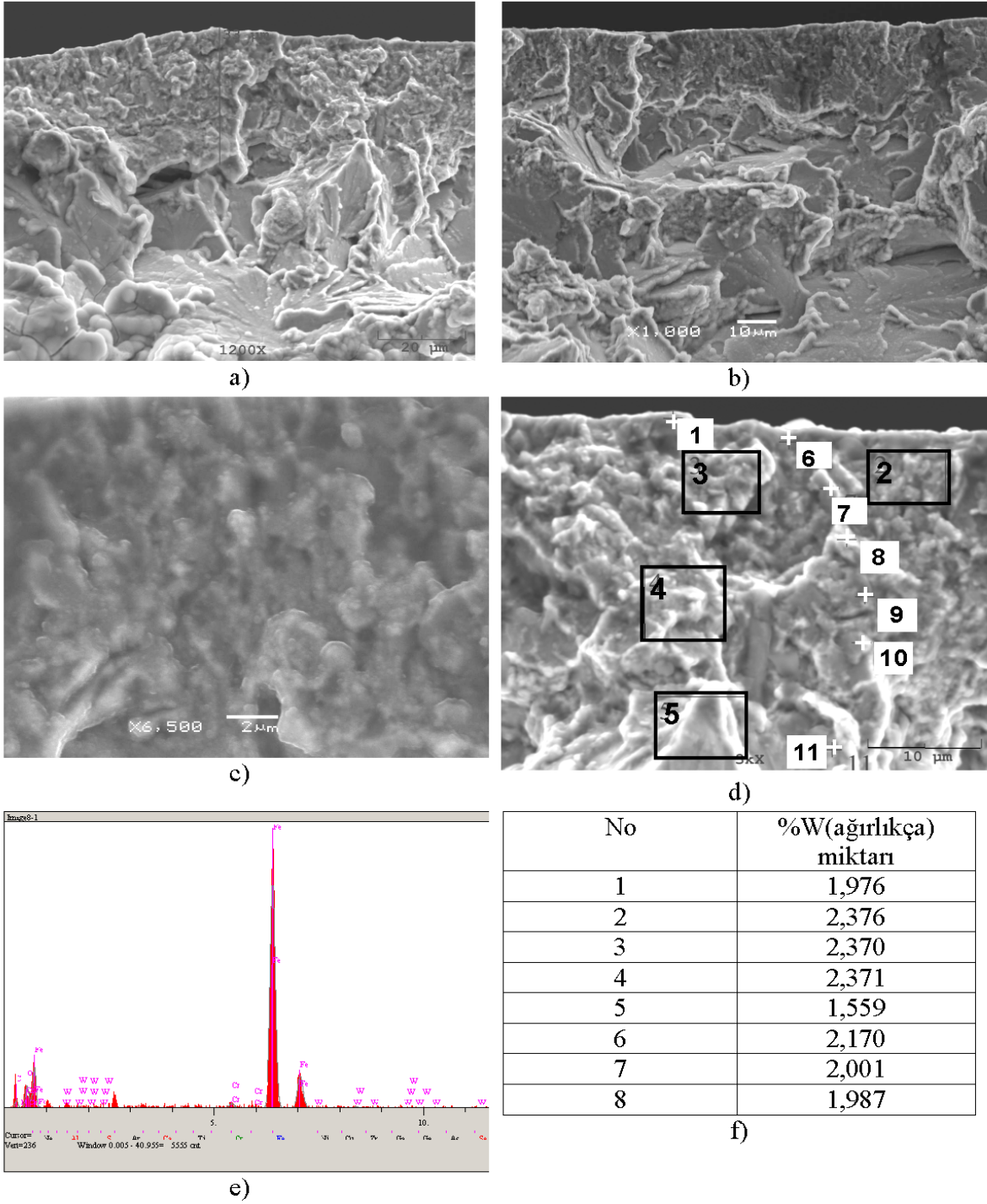
No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	2,940
2	2,738
3	2,101
4	1,619
5	2,134
6	2,345

f)

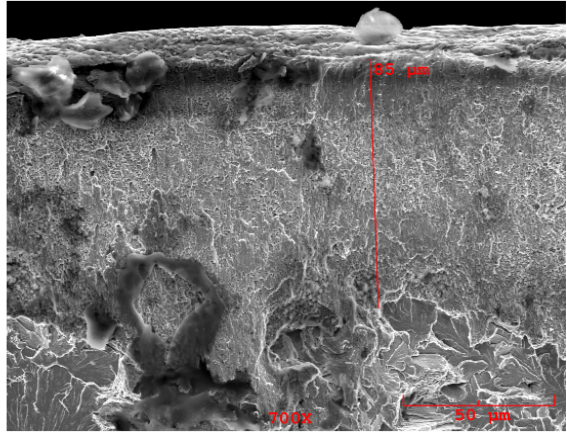
Şekil 8.79 19 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM görüntüsü, b) modifikasyon EDS resmi, c) bölgesel EDS analiz sonuçları, d) başka bir bölgeden EDS analiz resmi, e) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, f) noktasal olarak %W element miktarı



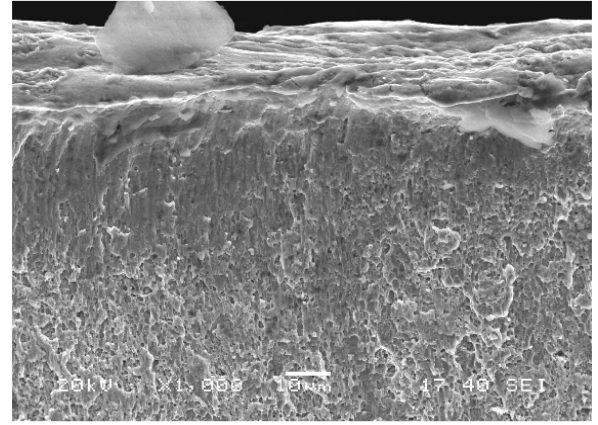
Şekil 8.80 20 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM resmi, b) başka bir bölgeden SEM, c) yüksek büyütmede modifikasyon tabakasından SEM, d) EDS analiz resmi, e) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak %W element miktarı



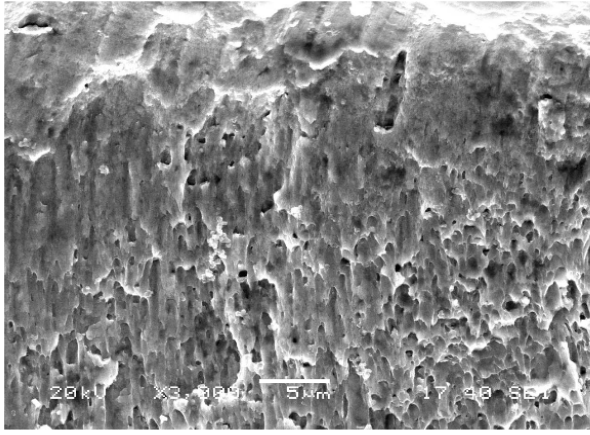
Şekil 8.81 21no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM resmi, b) başka bir bölgeden SEM, c) yüksek büyütmede modifikasyon tabakasından SEM, d) EDS analiz resmi, e) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, f) noktasal olarak %W element miktarı



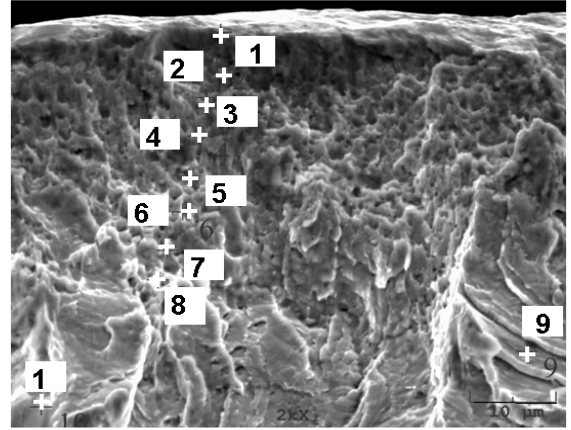
a)



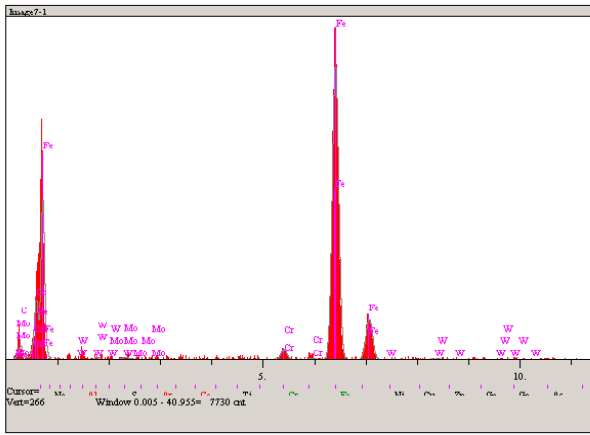
b)



c)



d)

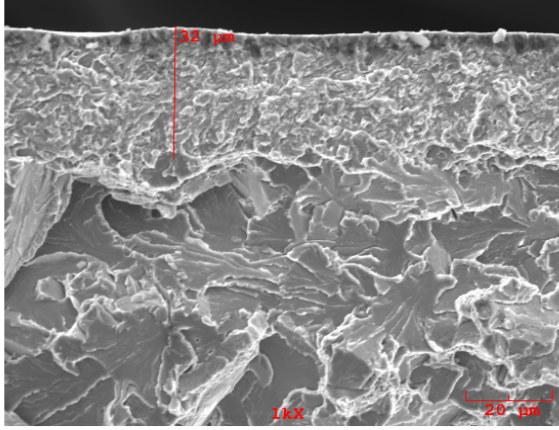


e)

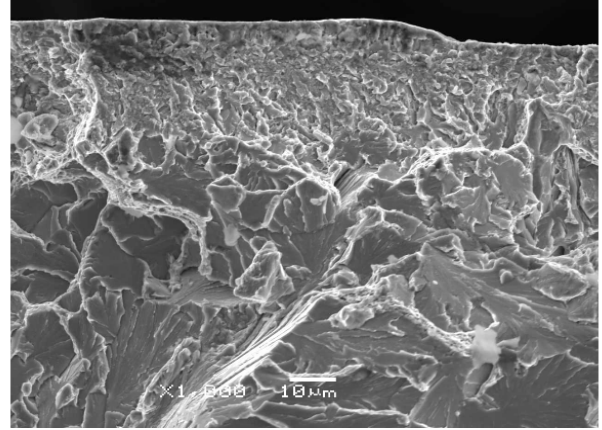
No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	1,548
2	2,673
3	2,768
4	2,137
5	2,988
6	2,880
7	1,597
8	1,471
9	0

f)

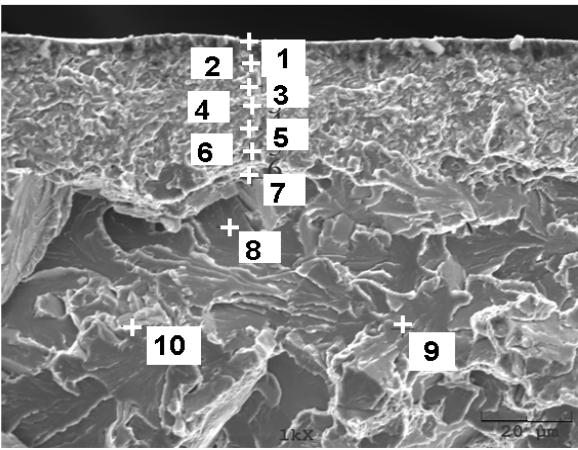
Şekil 8.82 22 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM resmi , b) başka bir bölgeden SEM, c) yüksek büyütmede modifikasyon tabakasından SEM, d)EDS analiz resmi, e) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, f) noktasal olarak %W element miktarı



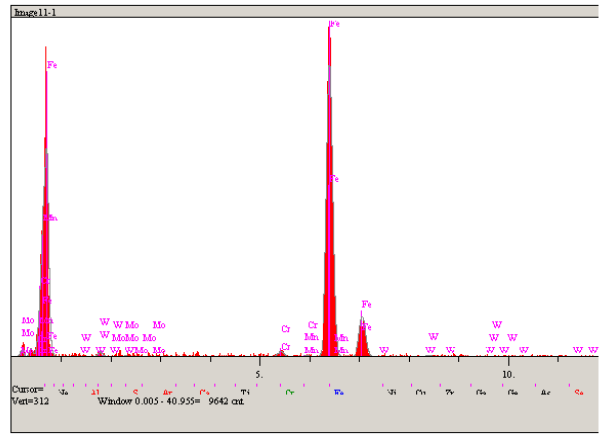
a)



b)



c)

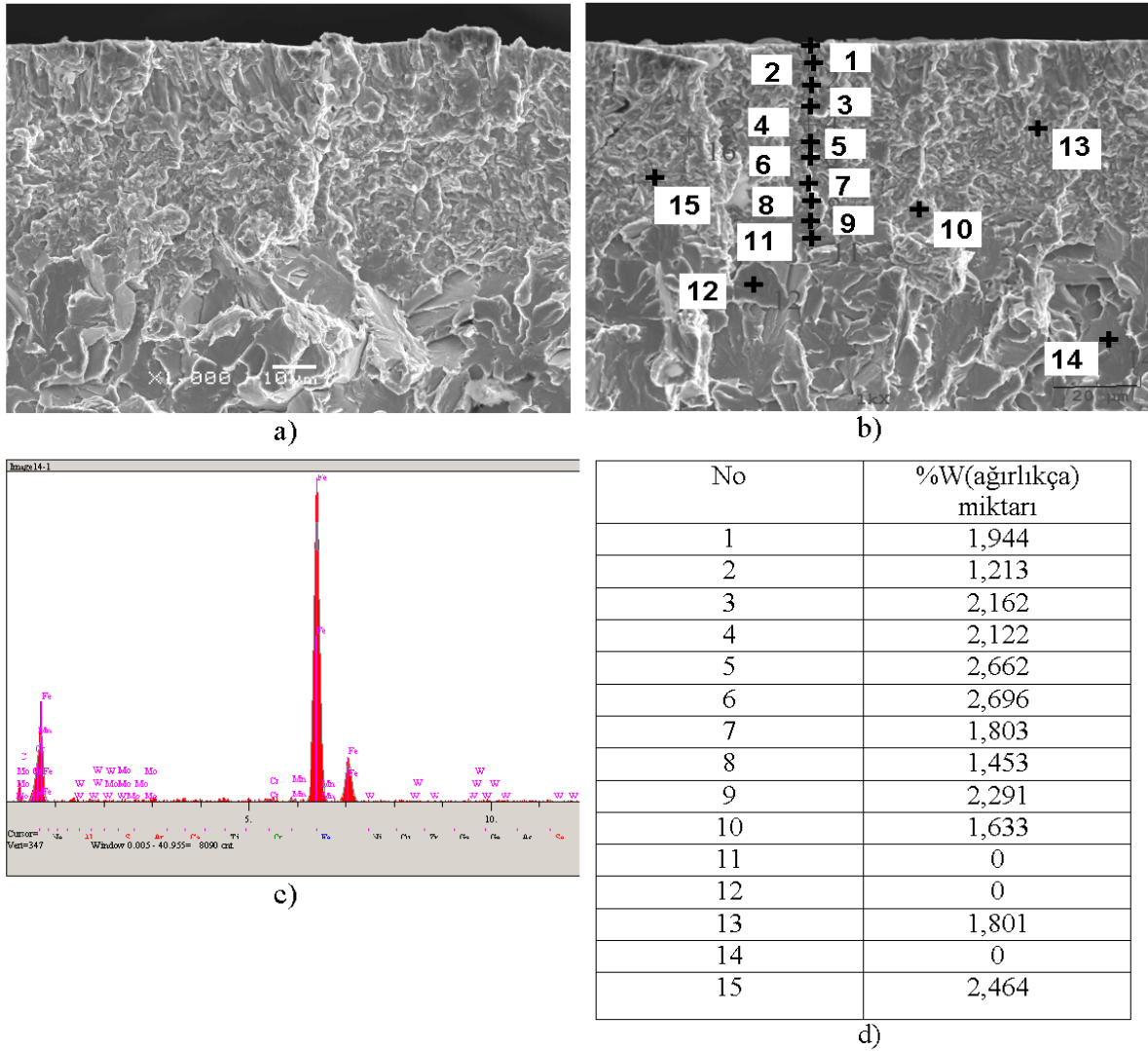


d)

No	%W(ağırlıkça) miktarı
1	2,170
2	0,890
3	1,937
4	3,030
5	1,400
6	2,195
7	0.409
8	0
9	0
10	0

e)

Şekil 8.83 23 no'lu numunenin a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM resmi, b) başka bölgeden SEM, c) EDS analiz resmi, d) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, e) noktasal olarak %W element miktarı



Şekil 8.84 24 no'lu numunenin, a) modifikasyon tabakasından kırık yüzey SEM resmi, b)EDS analiz resmi, c) 1 no'lu noktanın EDS analiz grafiği, d) noktasal olarak %W element miktarı

Şekil 8.82'de 22(80mm, 15pulse, 900 mf), Şekil 8.83'de 23(80mm, 10pulse, 900 mf) ve Şekil 8.84'de 24(80mm, 5pulse, 900 mf) no'lu numune gruplarının SEM ve EDS analizleri verilmektedir. Modifikasyon tabakası ve alt tabaka arasındaki farklılıklar belirgindir. Hızlı ısınma ve soğuma neticesinde küçülen taneler görülmektedir. Yine kolonsal büyüme yönlenmeleri gözlemlenmiştir. Bu büyüme yönlenmelerin varlığı tabakada oluşabilecek çatlakların ilerleme yönü ve hızı açısından önem taşımaktadır. Büyüme yönlerinde çatlak ilerlemesi engellenebilir.

Genel itibarıyla modifikasyon tabakalarını daha iyi görmek amacıyla yapılmış kırma deneyi sonrası; numune gruplarında pulse plazma işleminden dolayı meydana gelen hızlı ısınma ve soğuma neticesince oldukça küçük taneler görülmüştür. İşlem

uygulanmadan tane boyutları 2-8µm olan çelik numunelerin tane boyutları nano seviyesine kadar küçülmüş olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bazı yapılarda çok belirgin olarak kolonsal büyüme yönlenmeleri mevcuttur. Büyüme yönleri yukarıdan aşağı doğrudur. Bu yönlenme yapısının varlığı, üst yüzeyden uygulanabilecek bir yüklemeye karşı (örneğin aşınma ortamlarında) oldukça fazla dayanım gösterebileceğini düşündürmüştür. Aşınma ve sertlik dayanımı beklenen bu modifikasyon çalışması için bu veriler umut verici bulgulardır. Ayrıca tabakada nano seviyesindeki taneler arasındaki 2 µm boyuttaki wolfram ve/veya wolframoksit taneleri mekanik özelliklerin gelişimde son derece büyük önem taşımaktadır. Özellikle aşınma ortamlarında bu kadar büyük taneli oksit tanecikleri malzeme yüzeyinin yüksek dayanım göstermesini sağlar. Sadece aşınma dayanımında değil bu oluşumlar sertlik değerlerinin yüksek olmasında etkili olacaklardır [44].

8.7. Aşınma Deney Sonuçları

Pulse plazma yöntemiyle yüzeyleri modifiye edilen numunelere CSM lineer aşınma cihazı ile 200m yol için 0.15m/sn hızda 5N, 7N, 9N yükler için aşınma deneyi uygulanmıştır. Deneyler esnasında hava sıcaklığı ortalama 32°C'dir. Nem oranı %50-60 civarındadır.

Deneyler sonrası aşınma hız değerlerini hesaplamak için öncelikle aşınma izlerinden profilometre yardımıyla yüzey pürüzlülük ölçümleri alınmış ve daha sonra bu ölçümleri yardımıyla, aşınma bölgelerinin alanları hesaplanmış ve elde edilen bu alan değerleri CSM yazılımındaki formülde yerinde konularak aşınma hız miktarları hesaplanmıştır.

Aşınma deneyleri sonrası aşınma cihazı software'i sürtünme katsayılarını ve iz derinlik değerlerini de vermektedir.

8.7.1. Aşınma hız değerleri

Aşınma deneyleri sonrası profilometre yardımıyla ölçülmüş yüzey pürüzlülük değerleri formülde yazılarak elde edilmiş aşınma miktar değerleri Tablo 8.4'de verilmektedir.

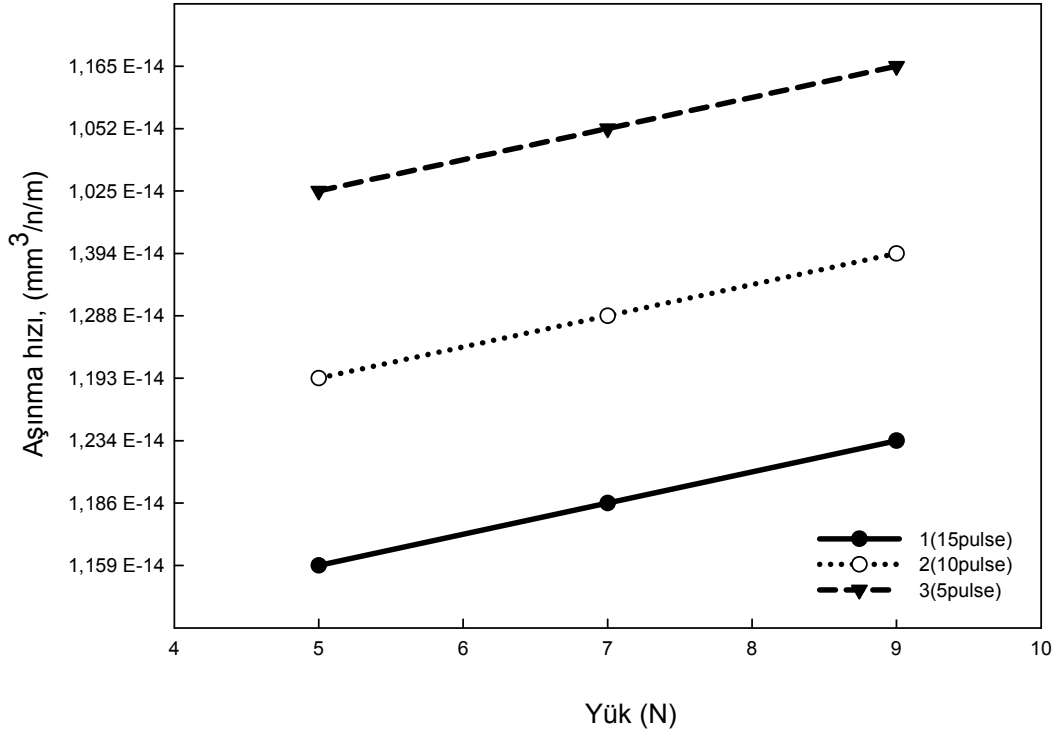
Tablo 8.4 Numune gruplarının aşınma hız değerleri

Numune no	Hız (m/sn)	Yol (m)	Yük (N)	Aşınma Miktarı (mm ³ /n/m)
1	0,15	200	5	1,159E-14
1	0,15	200	7	1,186E-14
1	0,15	200	9	1,234 E-14
2	0,15	200	5	1,193 E-14
2	0,15	200	7	1,288 E-14
2	0,15	200	9	1,394 E-14
3	0,15	200	5	1,025 E-14
3	0,15	200	7	1,052 E-14
3	0,15	200	9	1,165 E-14
4	0,15	200	5	2,022 E-14

4	0,15	200	7	2,071 E-14
4	0,15	200	9	2,167 E-14
5	0,15	200	5	2,122 E-14
5	0,15	200	7	2,145 E-14
5	0,15	200	9	2,231 E-14
6	0,15	200	5	2,221 E-14
6	0,15	200	7	2,226 E-14
6	0,15	200	9	2,321 E-14
7	0,15	200	5	1,002E-14
7	0,15	200	7	1,091E-14
7	0,15	200	9	1,099E-14
8	0,15	200	5	1,031E-14
8	0,15	200	7	1,068E-14
8	0,15	200	9	1,231E-14
9	0,15	200	5	1,002 E-14
9	0,15	200	7	1,239 E-14
9	0,15	200	9	1,324 E-14
10	0,15	200	5	1,003 E-14
10	0,15	200	7	1,265 E-14
10	0,15	200	9	1,276 E-14
11	0,15	200	5	1,000E-14
11	0,15	200	7	1,045 E-14
11	0,15	200	9	1,052E-14
12	0,15	200	5	1,183 E-14
12	0,15	200	7	1,194 E-14
12	0,15	200	9	1,295 E-14
13	0,15	200	5	7,532E-15
13	0,15	200	7	5,786 E-15
13	0,15	200	9	9,996 E-15
14	0,15	200	5	1,311 E-14
14	0,15	200	7	1,397 E-14
14	0,15	200	9	1,188 E-14
15	0,15	200	5	5,482 E-15
15	0,15	200	7	6,491 E-15
15	0,15	200	9	8,159 E-15
16	0,15	200	5	1,018 E-14
16	0,15	200	7	1,191 E-14
16	0,15	200	9	1,171 E-14
17	0,15	200	5	1,116 E-14
17	0,15	200	7	1,212 E-14
17	0,15	200	9	1,103 E-14
18	0,15	200	5	1,189E-14
18	0,15	200	7	1,124E-14
18	0,15	200	9	1,255E-14
19	0,15	200	5	1,141 E-14
19	0,15	200	7	1,107 E-14
19	0,15	200	9	1,186 E-14

20	0,15	200	5	1,158 E-14
20	0,15	200	7	1,190 E-14
20	0,15	200	9	1,245 E-14
21	0,15	200	5	1,221E-14
21	0,15	200	7	1,241E-14
21	0,15	200	9	1,291E-14
22	0,15	200	5	1,373E-14
22	0,15	200	7	1,381E-14
22	0,15	200	9	1,398E-14
23	0,15	200	5	1,377 E-14
23	0,15	200	7	1,381 E-14
23	0,15	200	9	1,399 E-14
24	0,15	200	5	1,393 E-14
24	0,15	200	7	1,399 E-14
24	0,15	200	9	1,398 E-14

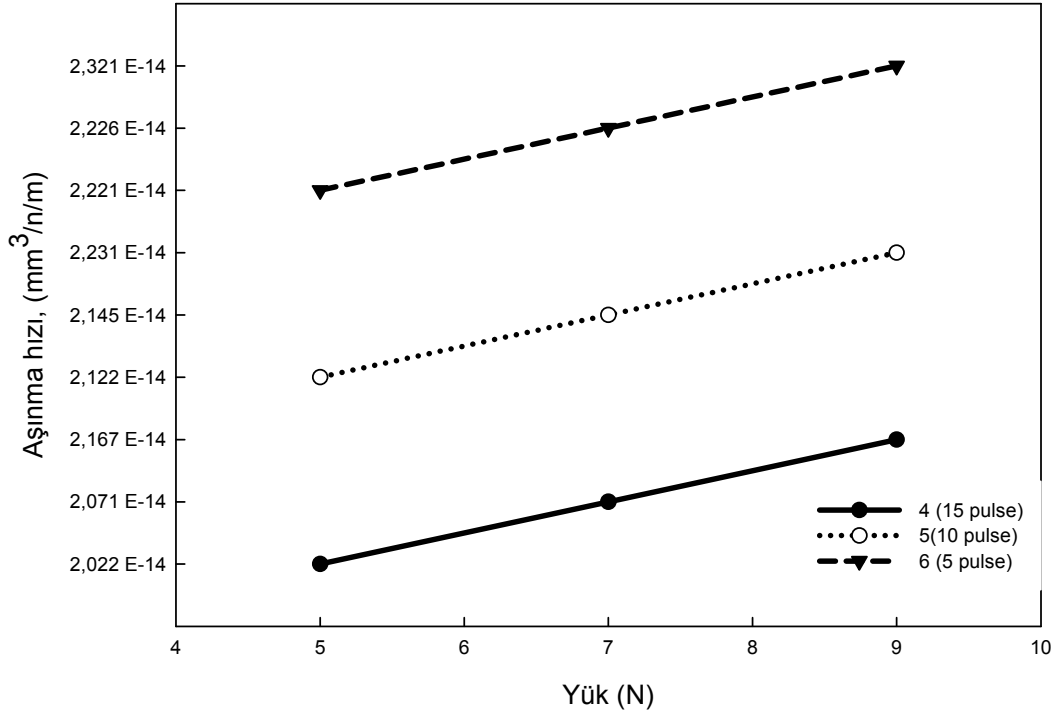
Şekil 8.85’de 1(70mm, 15pulse, 800 mf), 2(70mm, 10pulse, 800 mf), 3(70mm, 5pulse, 800 mf) no’lu numunelerinin yüke bağlı aşınma miktar grafikleri verilmektedir. Bu grafiğe göre; en fazla aşınma değeri 3 no’lu numunede, en düşük değeri ise 1 no’lu numunede görülmektedir. Bu üç numune grubu arasındaki fark olan pulse sayısı aşınma miktarlarını da etkilemiştir. Daha önceden de bahsedildiği üzere pulse sayısının artmasıyla tane boyutunun azalması ve modifikasyon tabakasının daha homojen bir hale gelmesi aşınma miktarlarını etkilemiştir. Nitrojen fazlarının varlığı aşınma dayanımını artırır[139]. Modifiye olmuş numune yüzeyinde oluşmuş demir nitrür ve wolfram oksit içeren tabaka oldukça yüksek sertliğe ve oldukça iyi tribolojik özelliklere sahiptir [147]. Modifikasyon işleminde meydana gelen hızlı ısınma ve soğuma neticesinde oluşmuş olan küçük taneler yüksek sertliğe ve aşınma dayanımlarında artışa neden olmuştur.



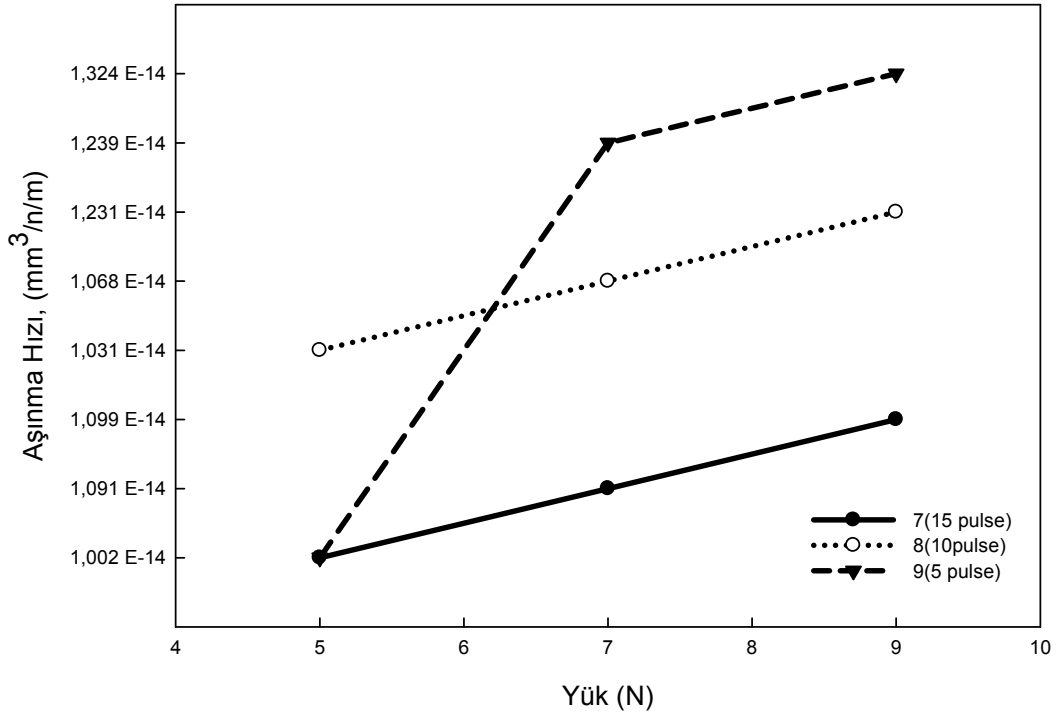
Şekil 8.85 1, 2 ve 3 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi

Şekil 8.86'da verilmekte olan 4(80mm, 15pulse, 800 mf), 5(80mm, 10pulse, 800 mf) ve 6(80mm, 5pulse, 800 mf) no'lu numune grubunun aşınma hız miktarları yine uygulanan pulse sayısına bağlı olarak paralel bir eğilim göstermiştir.

(1, 2 ve 3 no'lu numunelere göre) Numune nozul mesafenin artmasıyla hem sertlik hem de modifikasyon tabaka kalınlığı bakımından daha düşük değerlere sahip olmaları sebebiyle bu grup numunelerin aşınma hız miktarları daha yüksektir. Pulse plazma uygulanma şartlarının değişmesiyle numune yapılarında meydana gelen değişimler aşınma miktarlarını da etkilemiş olduğu düşünülmektedir.

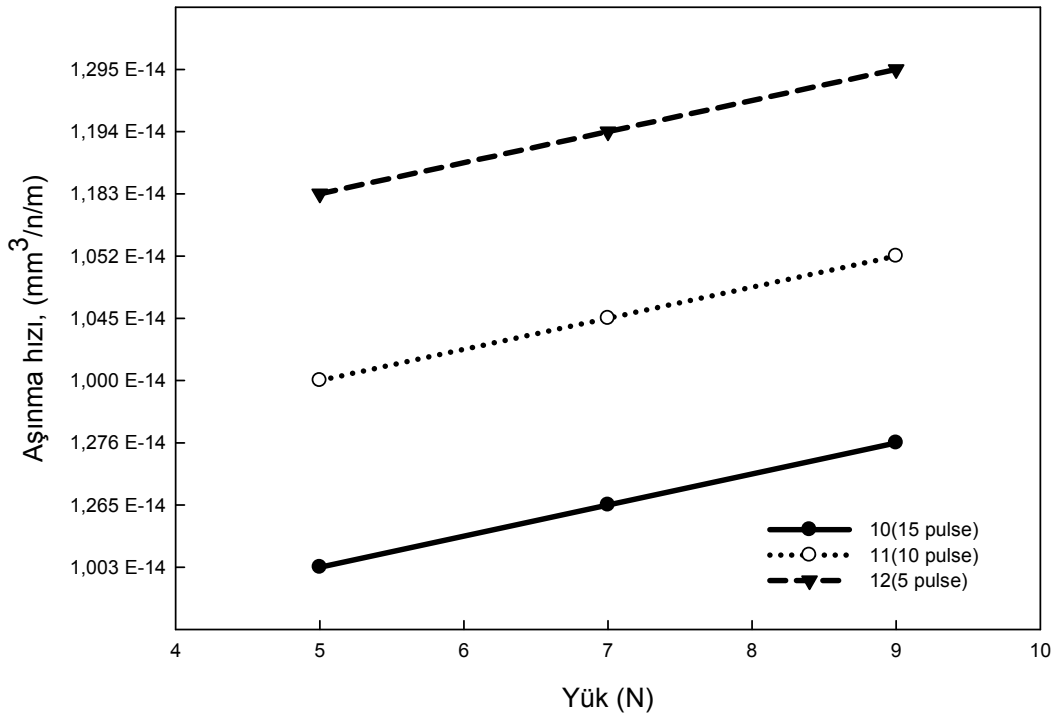


Şekil 8.86 4, 5 ve 6 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi



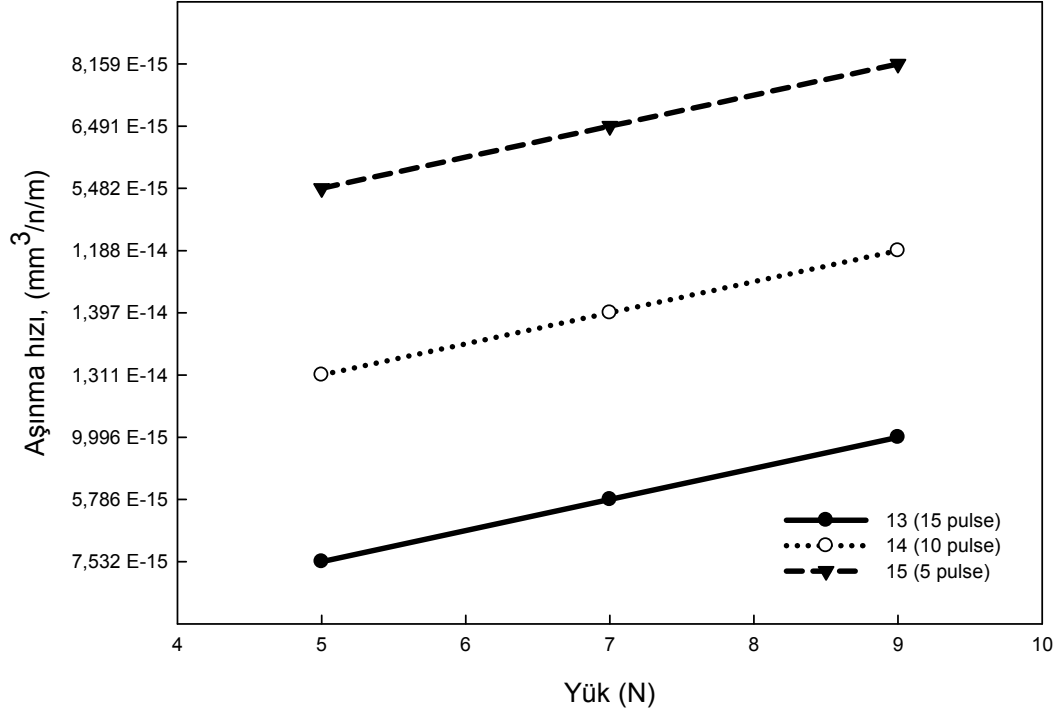
Şekil 8.87 7, 8 ve 9 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi

Şekil 8.87’de 7(60mm, 15pulse, 800 mf), 8(60mm, 10pulse, 800 mf) ve 9(60mm, 5pulse, 800 mf), Şekil 8.88’de 10, 11 ve 12 no’lu numunelerin yük-aşınma hız miktar grafikleri verilmiştir. 7, 8 ve 9 için aşınma hız miktarları grafikte açıkça görülmektedir. Numune grupları arasında 9 no’lu numune 5N yük için 7 ile aynı aşınma miktarına sahipken, 7N ve 9N yük şartları için en yüksek en yüksek değer 9 no’lu numuneye aittir. 10(50mm, 15pulse, 800 mf), 11(50mm, 10pulse, 800 mf) ve 12(50mm, 5pulse, 800 mf) no’lu numuneler içinde ise en düşük aşınma hızı 10 no’lu numuneye aittir.

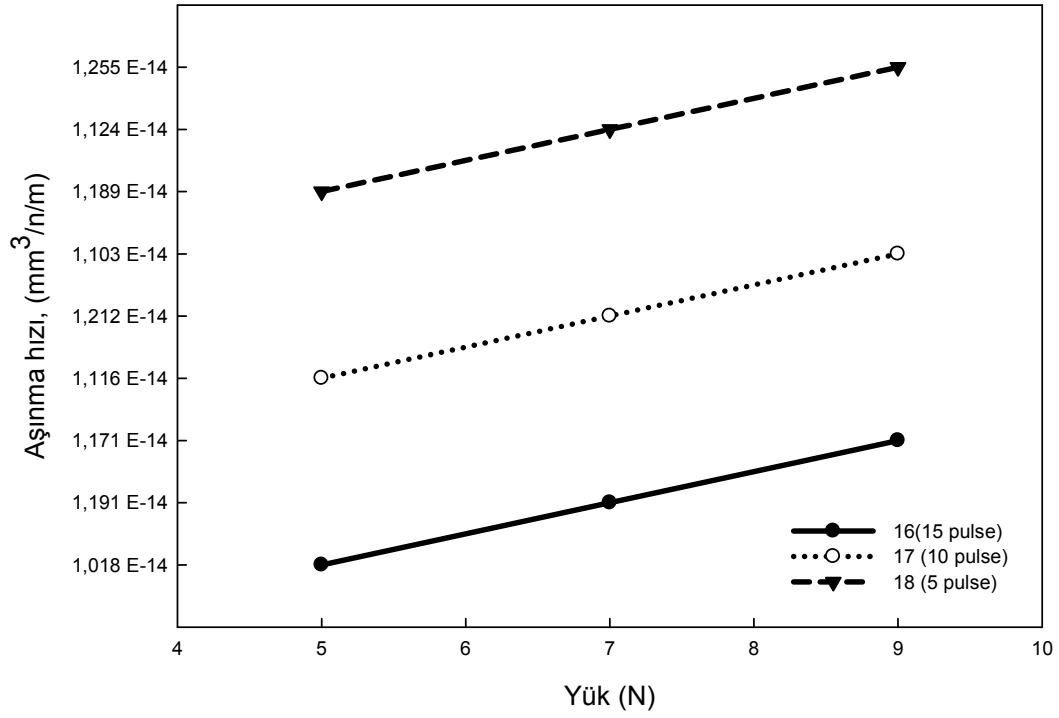


Şekil 8.88 10, 11 ve 12 no’lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi

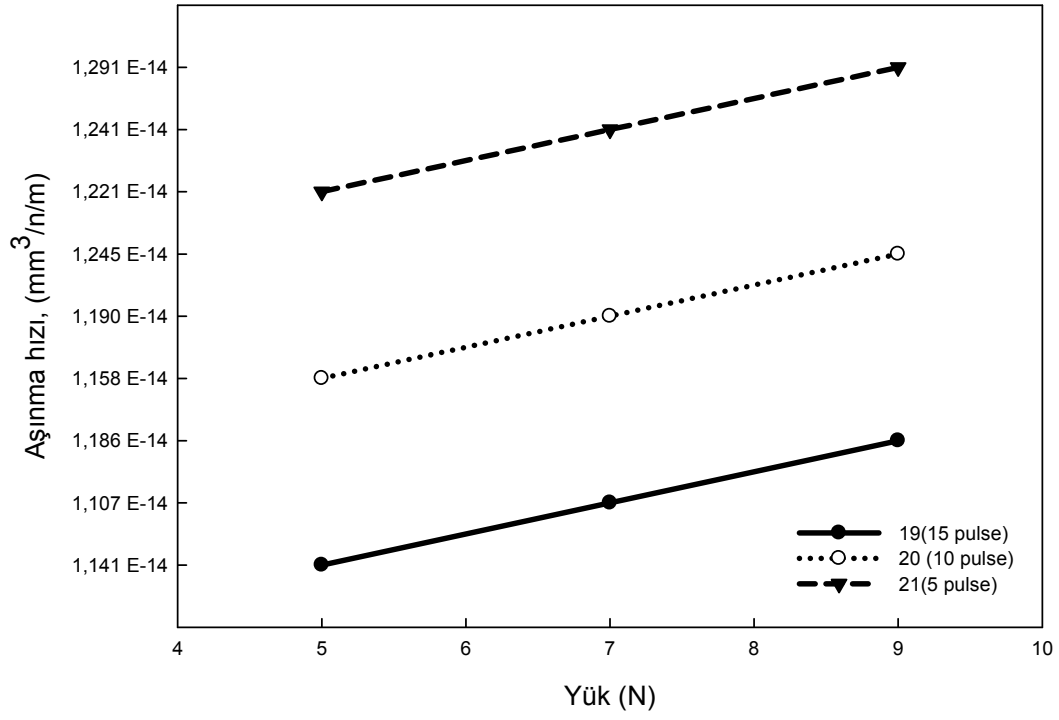
Şekil 8.89 13(50mm, 15pulse, 900 mf), 14(50mm, 10pulse, 900 mf) ve 15 (50mm, 5pulse, 900 mf) no’lu numunelerin yük-aşınma hız miktar grafiklerinde ise yine sertlik ve modifikasyon tabaka kalınlığı değeri yüksek 13 no’lu numunenin aşınma miktarının da düşük olduğu dikkat çekicidir. Numune-nozul mesafesinin arttığı 16(60mm, 15pulse, 900 mf), 17(60mm, 10pulse, 900 mf) ve 18(60mm, 5pulse, 900 mf) no’lu numunelerin aşınma miktarı 13, 14 ve 15 no’lu numune grubuna göre daha yüksektir. Sertlik ve diğer deneysel çalışmalar neticesinde elde edilmiş sonuçlarında da desteklediği üzere bu beklenen bir sonuçtur.



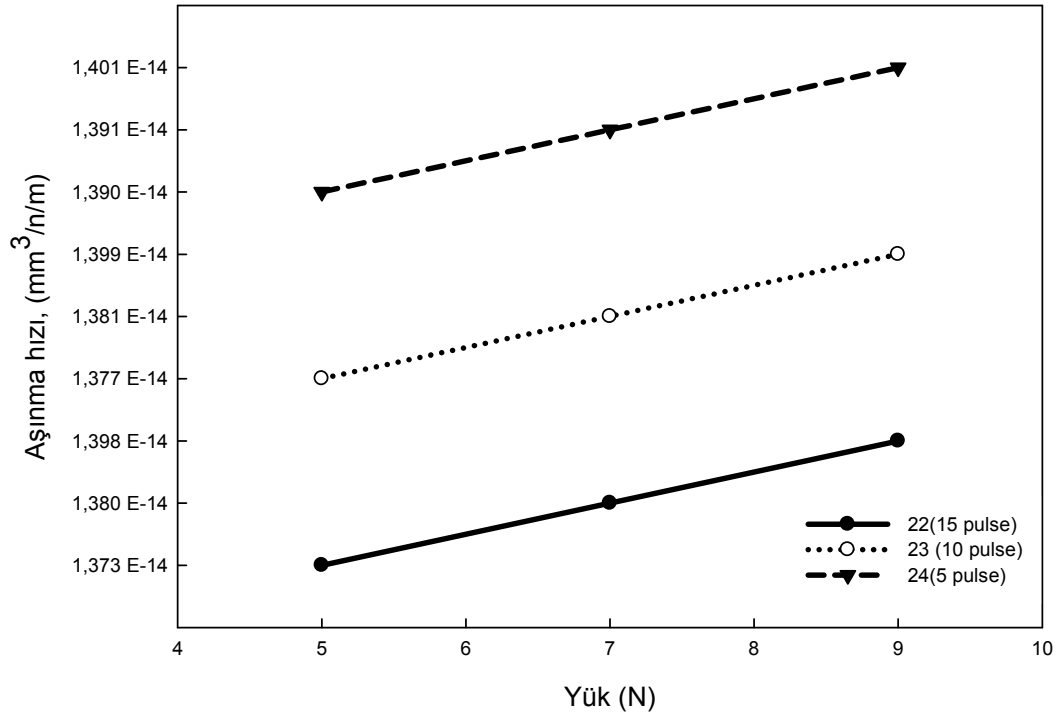
Şekil 8.89 13, 14 ve 15 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi



Şekil 8.90 16, 17 ve 18 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi



Şekil 8.91 19, 20 ve 21 no'lu numunelerin yük-aşınma hız miktar ilişkisi



Şekil 8.92 22, 23 ve 24 no'lu numunelerin yük-aşınma hız ilişkisi

Şekil 8.91’de 19(70mm, 15pulse, 900 mf), 20(70mm, 10pulse, 900 mf) ve 21(70mm, 5pulse, 900 mf), Şekil 8.92’de ise 22(80mm, 15pulse, 900 mf), 23(70mm, 10pulse, 900 mf) ve 24(70mm, 5pulse, 900 mf) no’lu numune gruplarının yük-aşınma hız miktar grafiklerinden de görüleceği üzere aşınma hız değerlerinin artış ve azalışlarında pulse sayısı ve numune nozul arası mesafesinin önemli bir etkiye sahiptir.

8.7.2. Sürtünme katsayıları

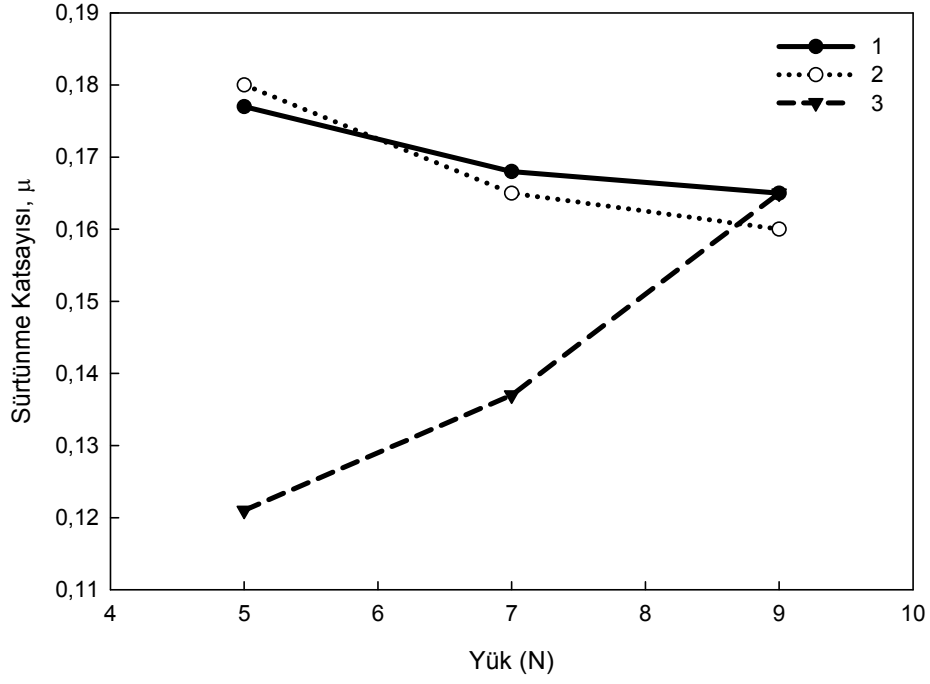
Aşınma deneyleri esnasında CSM aşınma cihazının topladığı veriler neticesinde ortalama sürtünme katsayı değerleri elde edilmiştir. Tablo 8.5’de tüm sürtünme katsayı değerleri görülmektedir. 1, 2 ve 3 no’lu numunelerin yüke bağlı olarak elde edilmiş sürtünme katsayı değerleri Şekil 8.93’de verilmektedir. 1 ve 2 no’lu numunelerin sürtünme katsayı değerleri yüke bağlı olarak azalma eğilimi gösterirken 3 no’lu numunenin değerleri yük arttıkça artma eğilimi göstermiştir. Yük attıkça yüzey üzerinde oluşmuş olabilecek oksit tabaka sürtünme katsayılarının düşüşüne sebebiyet vermiş olabilir. 3 no’lu numunede pulse sayısının az, modifikasyon tabakasının ince oluşu sürtünme katsayı değerlerinin artışına neden olmuş olabilir. Aynı eğilim 4, 5 ve 6 no’lu numuneler içinde geçerlidir. Yalnız bu numune grubunun sürtünme katsayı değerleri tıpkı aşınma hız miktar değerlerinde olduğu gibi 1, 2 ve 3 no’lu numunelerden daha fazladır (Şekil 8.94). 7, 8 ve 9 no’lu numunelerin ise sürtünme katsayı değerleri yüke bağlı olarak sürekli azalma eğilimi göstermiştir (Şekil 8.95). 10, 11 ve 12 no’lu numunelerden 10 no’lu numunenin sürtünme katsayısı yükle artarken diğerlerinin katsayılarının azalma eğilimi gösterdiği görülmüştür (Şekil 8.96). 13 ve 15 no’lu numunelerin sürtünme katsayı değerleri önce azalan sonra artan bir davranış sergilerken, 14 no’lu numune sürekli bir azalma eğilimi göstermiştir (Şekil 8.97). 14 no’lu(10 pulse) numunenin modifikasyon tabaka kalınlık değeri 13 (57µm) ve 15 (40µm) no’lu numune gruplarına göre daha incedir (23µm). Tabaka kalınlığının ince oluşu yüzeyin yüklerden daha fazla etkilenmesine neden olmuş olabilir. Bu eğilim 16, 17 ve 18 no’lu numunelerde de görülmektedir. 17 (28µm) ve 18 (20µm) no’lu numunelere göre daha düşük sürtünme katsayısına sahip olan 16 (45µm) no’lu numune önce artan sonra azalan bir eğilim içindeyken,

diğer 17 ve 18 no'lu numuneler sürekli artan davranış içerisinde dirler (Şekil 8.98). 19 no'lu numune sürekli azalmıştır. 20 ve 21 ise sürekli artan bir davranış göstermektedirler (Şekil 8.99). 24 no'lu numunenin değerleri azalmış 22 ve 23 no'lu numune grupların ki artmıştır (Şekil 8.100).

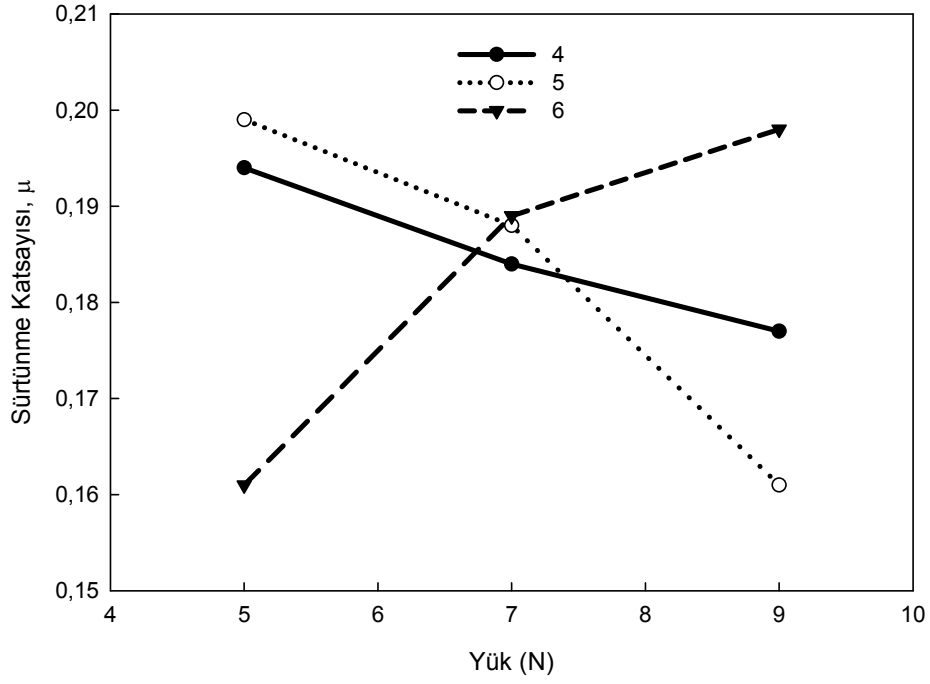
Tablo 8.5 Numune gruplarına ait sürtünme katsayı değerleri

Numune no	Hız (m/sn)	Yol (m)	Yük (N)	Sürtünme Katsayıları, μ
1	0,15	200	5	0,177
1	0,15	200	7	0,168
1	0,15	200	9	0,165
2	0,15	200	5	0,180
2	0,15	200	7	0,165
2	0,15	200	9	0,160
3	0,15	200	5	0,121
3	0,15	200	7	0,137
3	0,15	200	9	0,165
4	0,15	200	5	0,194
4	0,15	200	7	0,184
4	0,15	200	9	0,177
5	0,15	200	5	0,161
5	0,15	200	7	0,188
5	0,15	200	9	0,161
6	0,15	200	5	0,161
6	0,15	200	7	0,189
6	0,15	200	9	0,198
7	0,15	200	5	0,160
7	0,15	200	7	0,145
7	0,15	200	9	0,139
8	0,15	200	5	0,170
8	0,15	200	7	0,154
8	0,15	200	9	0,151
9	0,15	200	5	0,171
9	0,15	200	7	0,145
9	0,15	200	9	0,141
10	0,15	200	5	0,139
10	0,15	200	7	0,143
10	0,15	200	9	0,153
11	0,15	200	5	0,167
11	0,15	200	7	0,134
11	0,15	200	9	0,115
12	0,15	200	5	0,159
12	0,15	200	7	0,114
12	0,15	200	9	0,113

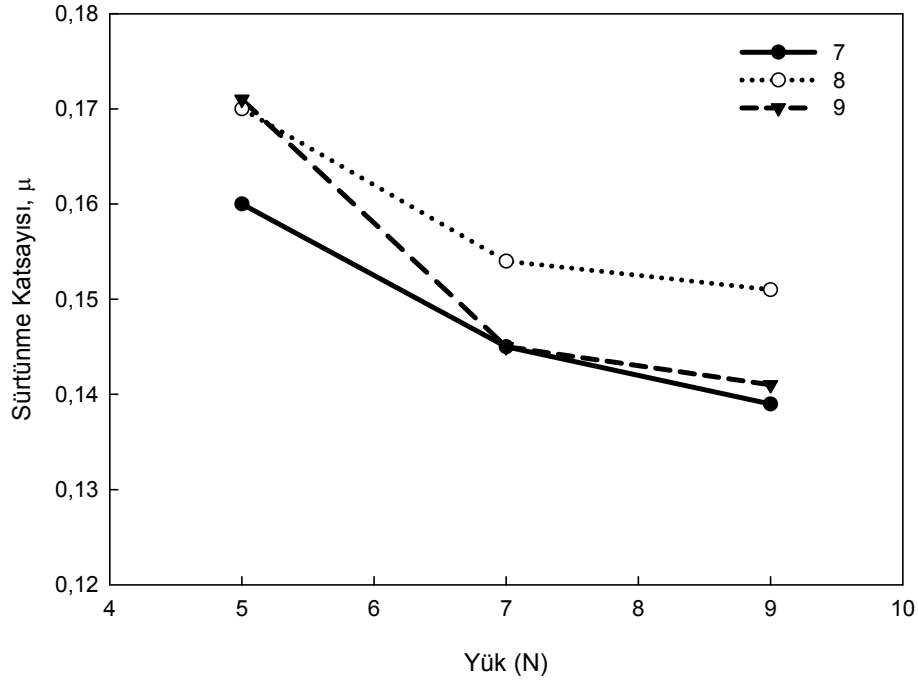
13	0,15	200	5	0,119
13	0,15	200	7	0,099
13	0,15	200	9	0,104
14	0,15	200	5	0,178
14	0,15	200	7	0,170
14	0,15	200	9	0,148
15	0,15	200	5	0,129
15	0,15	200	7	0,120
15	0,15	200	9	0,139
16	0,15	200	5	0,097
16	0,15	200	7	0,142
16	0,15	200	9	0,118
17	0,15	200	5	0,131
17	0,15	200	7	0,130
17	0,15	200	9	0,147
18	0,15	200	5	0,159
18	0,15	200	7	0,160
18	0,15	200	9	0,169
19	0,15	200	5	0,195
19	0,15	200	7	0,189
19	0,15	200	9	0,188
20	0,15	200	5	0,115
20	0,15	200	7	0,122
20	0,15	200	9	0,168
21	0,15	200	5	0,161
21	0,15	200	7	0,166
21	0,15	200	9	0,171
22	0,15	200	5	0,177
22	0,15	200	7	0,178
22	0,15	200	9	0,183
23	0,15	200	5	0,182
23	0,15	200	7	0,180
23	0,15	200	9	0,193
24	0,15	200	5	0,198
24	0,15	200	7	0,187
24	0,15	200	9	0,183



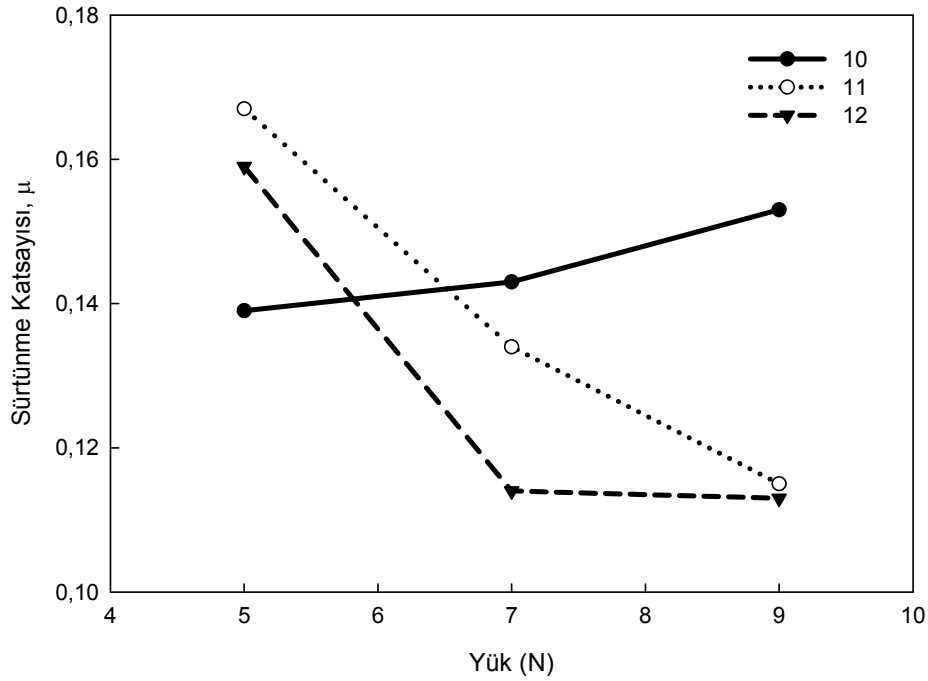
Şekil 8.93 800mf pil kapasitesinde, 1(70mm, 15 pulse), 2(70mm, 10 pulse) ve 3(70mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi



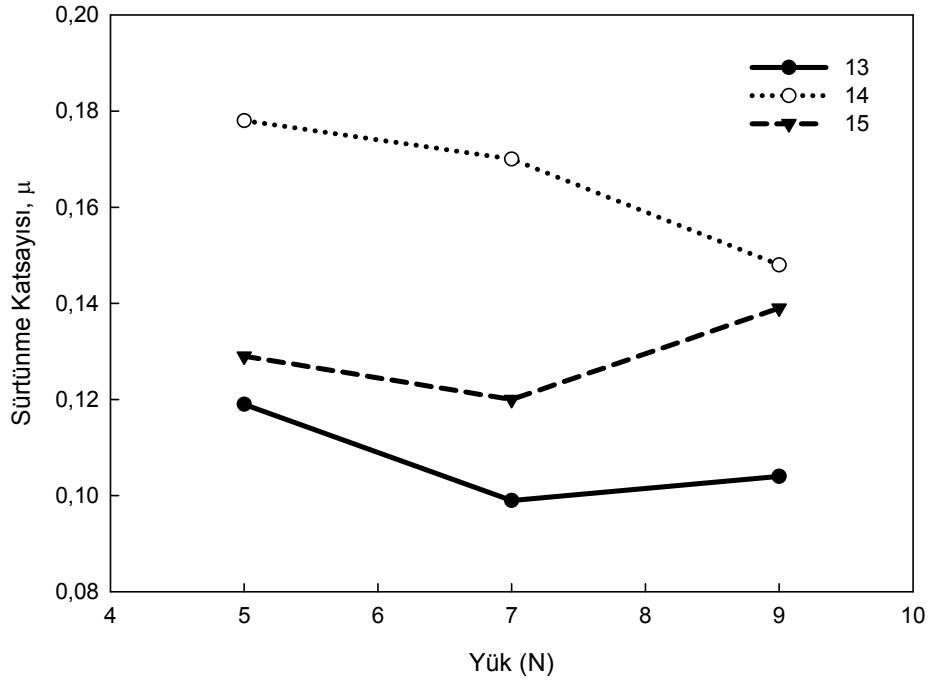
Şekil 8.94 800mf pil kapasitesinde, 4(80mm, 15 pulse), 5(80mm, 10 pulse) ve 6(80mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi



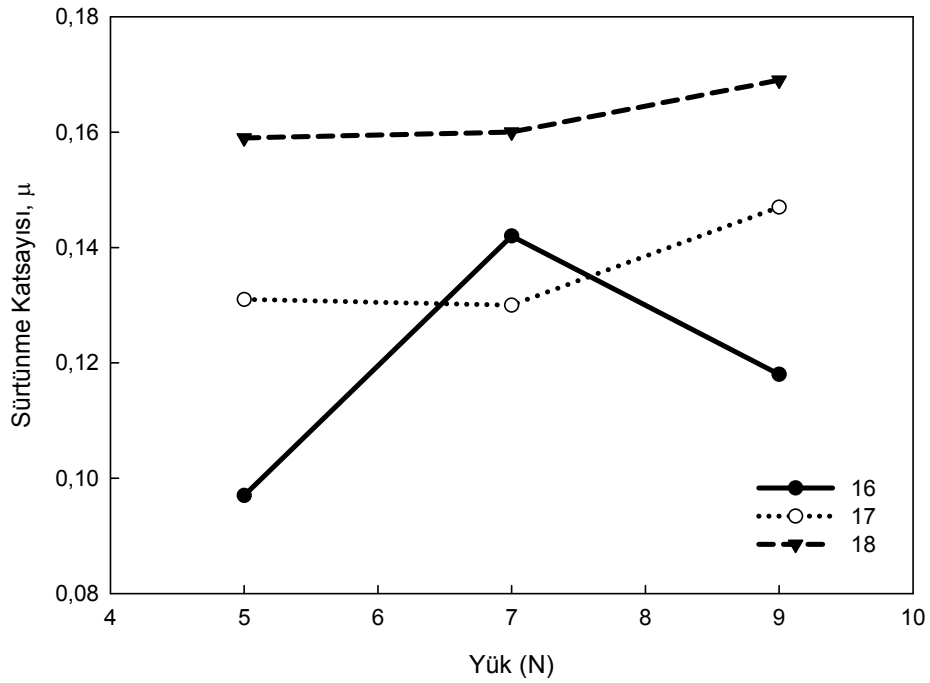
Şekil 8.95 800mf pil kapasitesinde, 7(60mm, 15 pulse), 8(60mm, 10 pulse) ve 9(60mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi



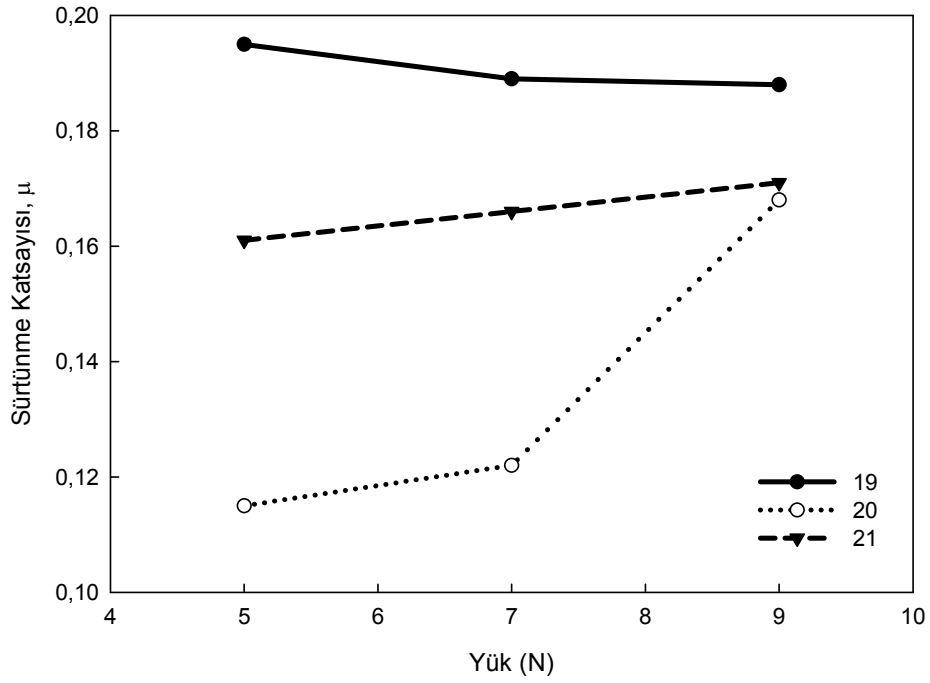
Şekil 8.96 800mf pil kapasitesinde, 10(50mm, 15 pulse), 11(50mm, 10 pulse) ve 12(50mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi



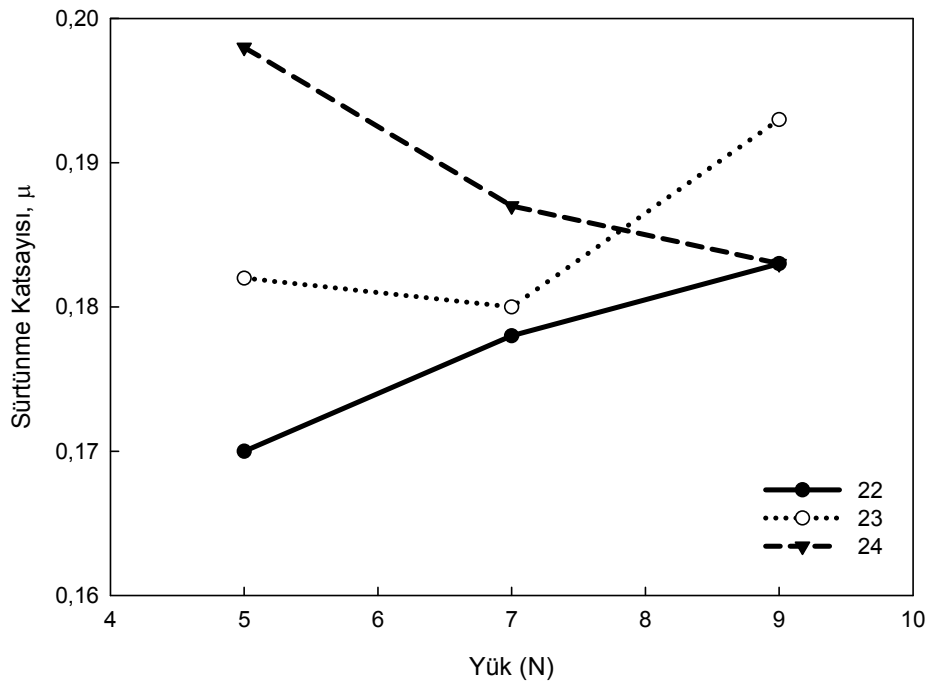
Şekil 8.97 900mf pil kapasitesinde, 13(50mm, 15 pulse), 14(50mm, 10 pulse) ve 15(50mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi



Şekil 8.98 900mf pil kapasitesinde, 16(60mm, 15 pulse), 17(60mm, 10 pulse) ve 18(60mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi

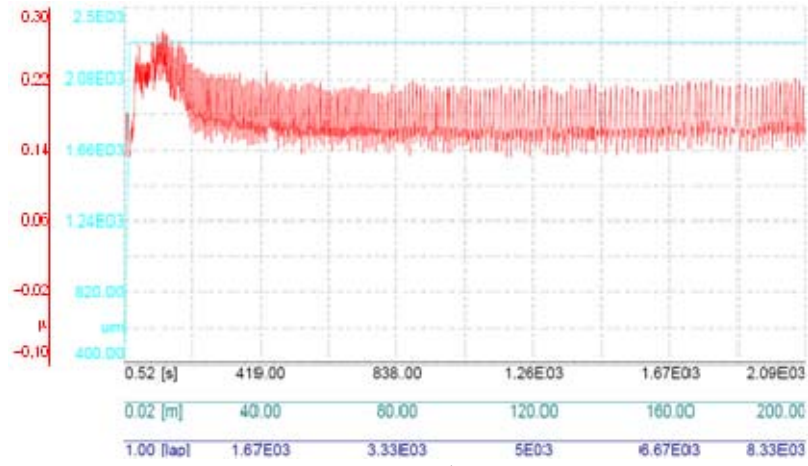


Şekil 8.99 900mf pil kapasitesinde, 19(70mm, 15 pulse), 20(70mm, 10 pulse) ve 21(70mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi

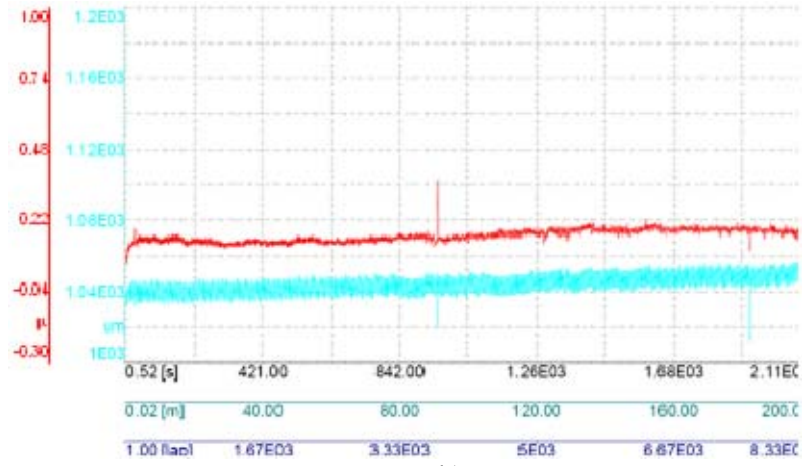


Şekil 8.100 900mf pil kapasitesinde, 22(80mm, 15 pulse), 23(80mm, 10 pulse) ve 24(80mm, 5 pulse) no'lu numunelerin yük-sürtünme katsayı ilişkisi

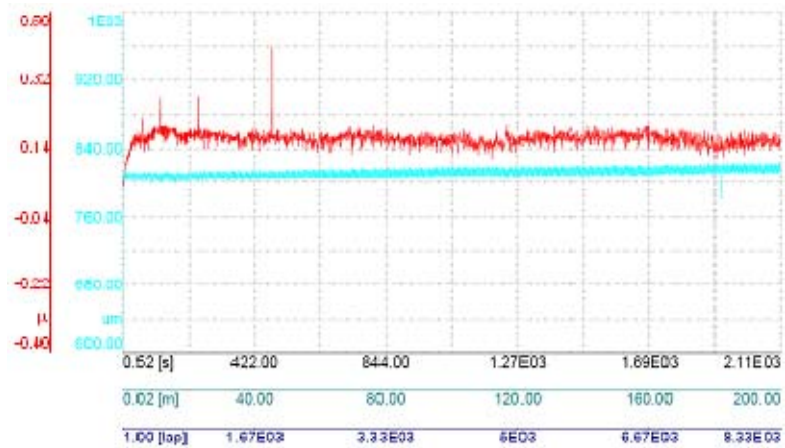
8.8. Sürtünme Katsayı Grafikleri



a)



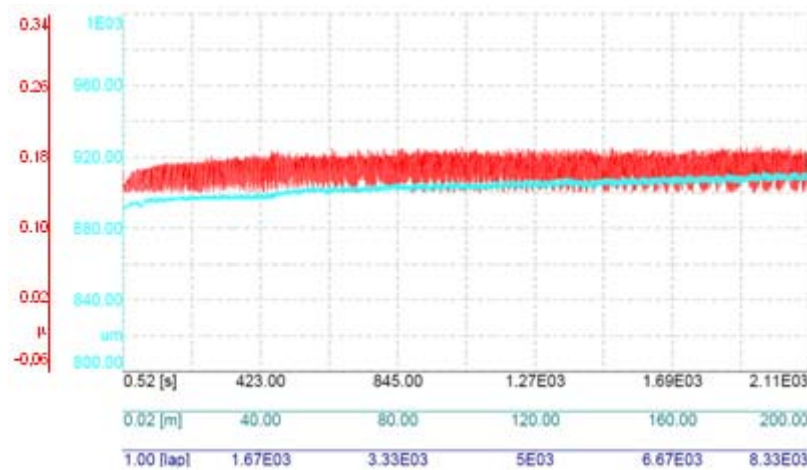
b)



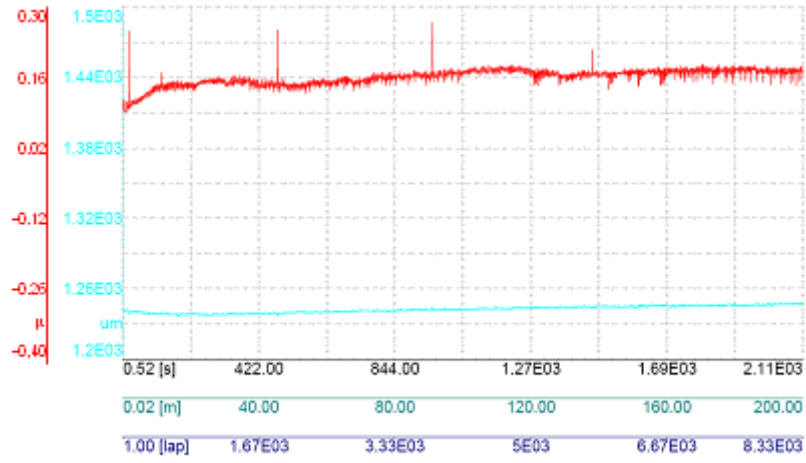
c)

Şekil 8.101 1,2 ve 3 no'lu numune gruplarının a) 1, b) 2 ve c) 3 9N yük altında elde edilmiş sürtünme katsayı grafikleri

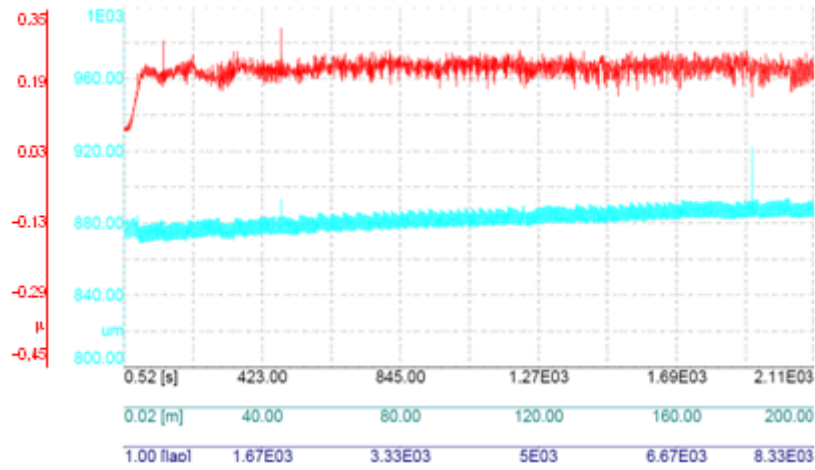
Şekil 8.101’de sürtünme katsayı grafikleri görülen 1(70mm, 15 pulse, 800mf), 2(70mm, 10 pulse, 800mf) ve 3(70mm, 5 pulse, 800mf) no’lu numunelerin aşınma deneyi esnasında gösterdiği sürtünme katsayı değerleri kırmızı renkte, meydana gelen aşınma derinlikleri ise mavi ile gösterilmektedir. Deney sayısının çok olması sebebiyle numune gruplarının sadece 9N yük altında ki grafikleri verilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür. 1 ve 3 no’lu numunelerin sürtünme katsayıları önce artmış ve sonra bu eğilim içerisinde devam etmiştir. 2 no’lu numunenin ise sürtünme katsayısı önce artmış sonra azalmıştır. Aşınma derinliklerinde ise en fazla derinliği 2 no’lu numunede en düşük derinlik değerleri ise 1no’lu numunede görülmektedir. 4(80mm, 15 pulse, 800mf), 5(80mm, 10 pulse, 800mf) ve 6(80mm, 5 pulse, 800mf) no’lu numunelerin sürtünme katsayılarında ise önce bir artış takibinde de bu yönde bir süreklilik görülmektedir. Derinliklere bakıldığında ise 4 no’lu numunenin en fazla derinlik değeri verdiği gözlemlenmiştir (Şekil 8.102). 7(60mm, 15 pulse, 800mf), 8(60mm, 10 pulse, 800mf) no’lu numunelerin sürtünme davranışları da yine aynı şekilde önce artış sonra süreklilik göstermiştir (Şekil 8.103). Şekil 8.104’de sürtünme katsayı grafikleri verilen 10(50mm, 15 pulse, 800mf), 11 (50mm, 10 pulse, 800mf)ve 12(50mm, 5 pulse, 800mf) no’lu numunelerin sürtünme katsayı değerleri genelde sabit bir değişim gösterirken aşınma derinlikleri bakımında en yüksek değeri 10 no’lu numunede görülmektedir. 12 no’lu numune ise en düşük derinlik değerleri gözlemlenmiştir.



a)

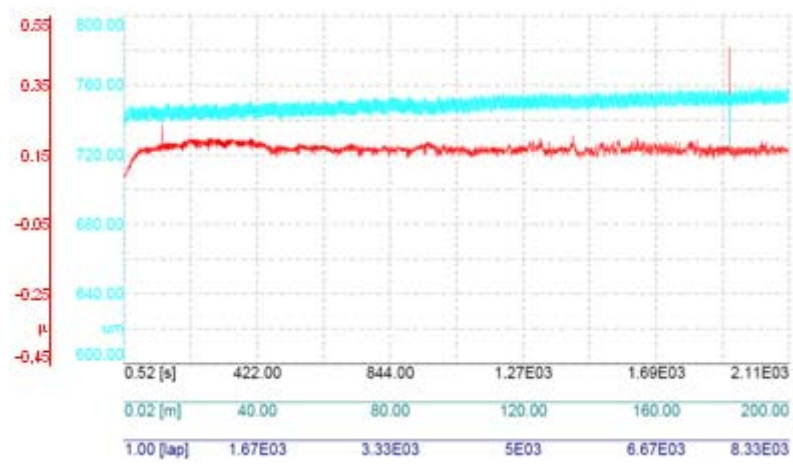


b)

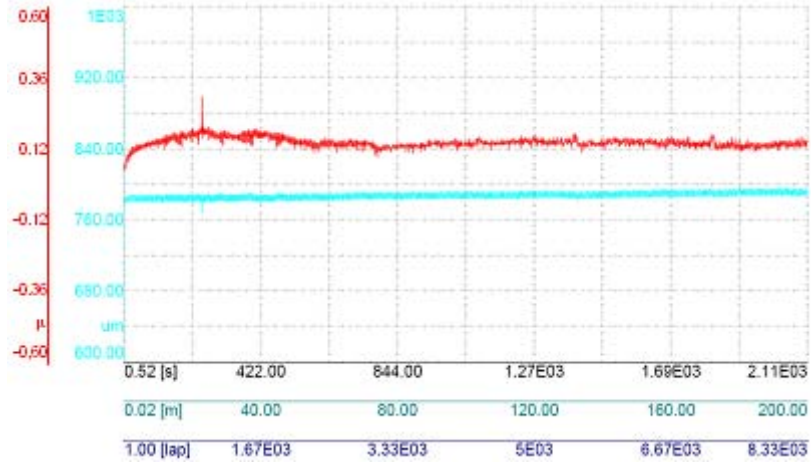


c)

Şekil 8.102 a) 4, b) 5 ve c) 6 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri

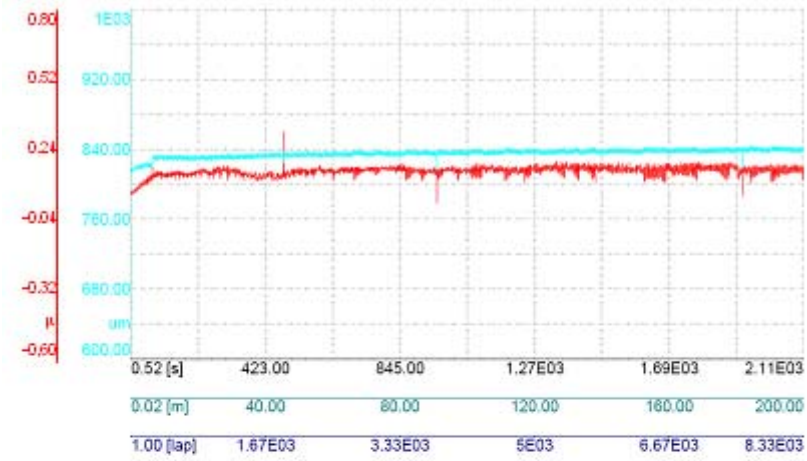


a)

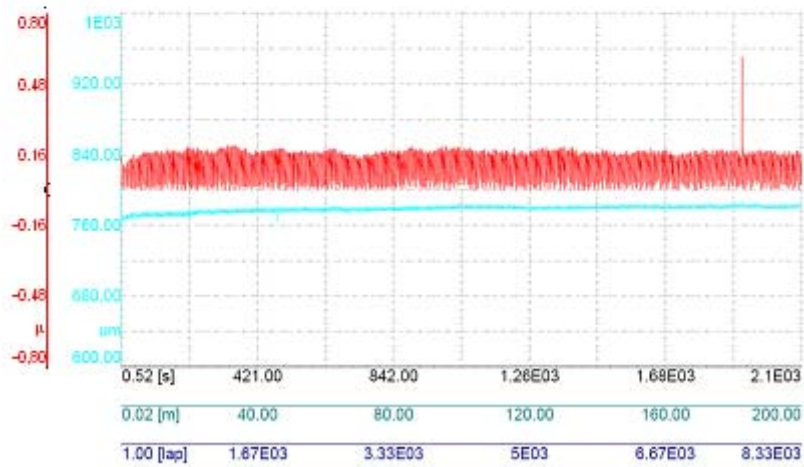


b)

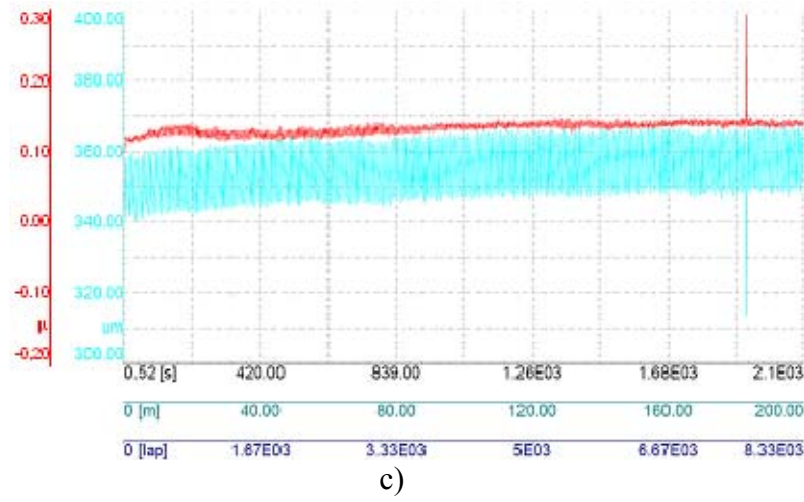
Şekil 8.103 a) 7, b) 8 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri



a)

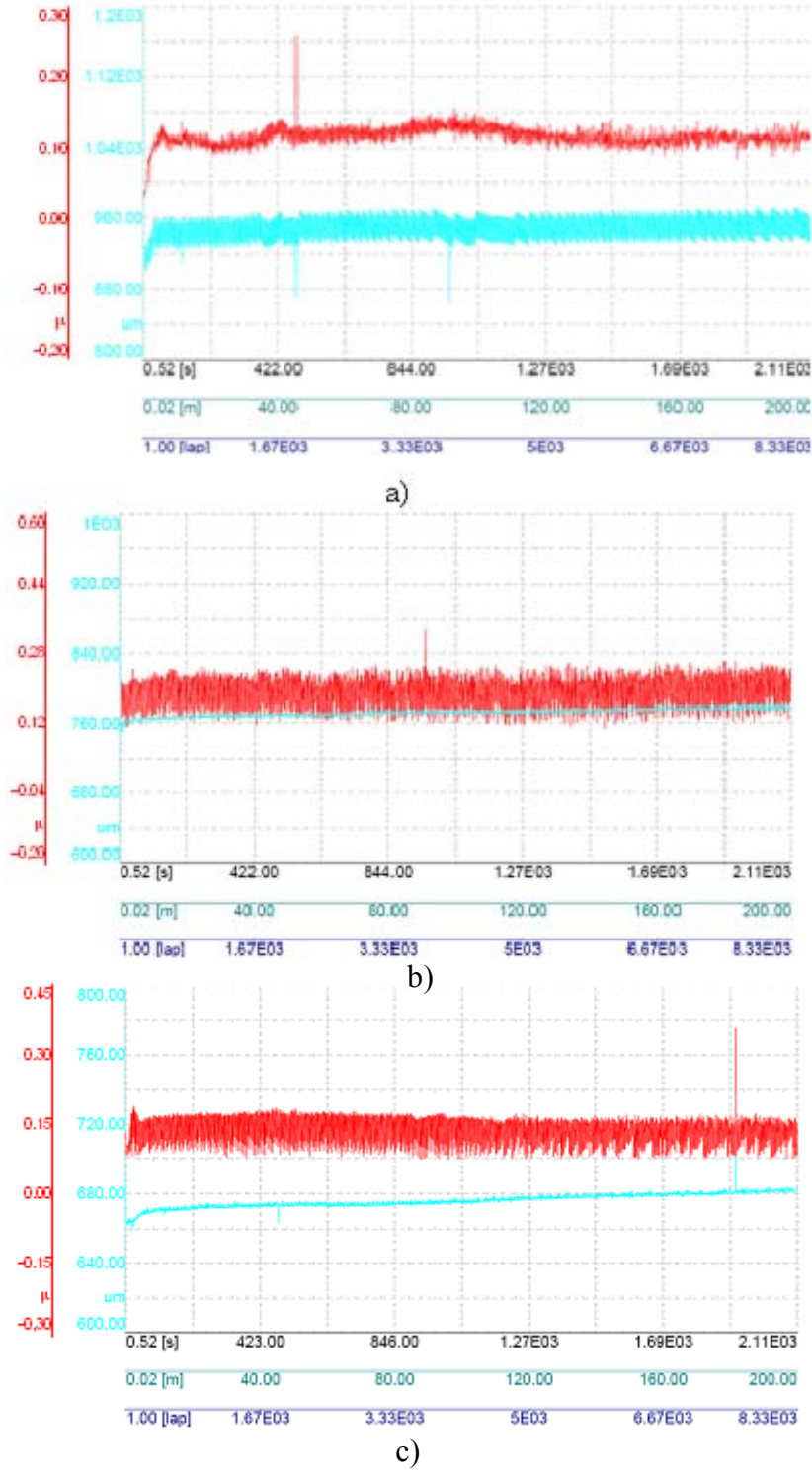


b)



Şekil 8.104 a) 10, b) 11, c) 12 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri

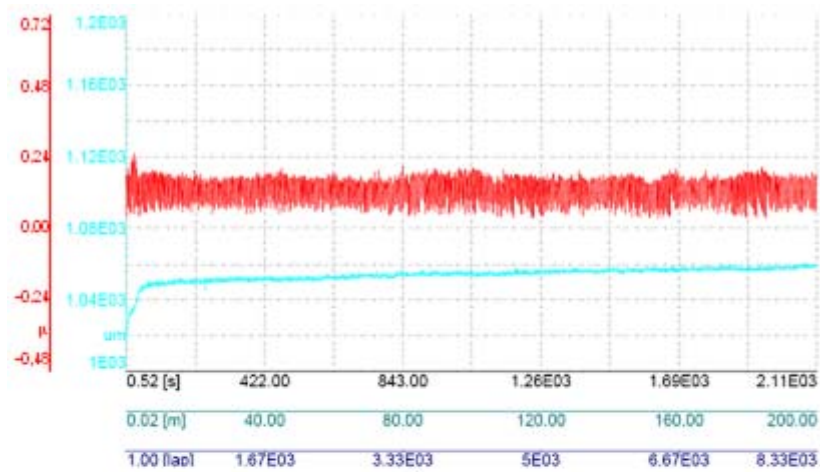
Şekil 8.105'de sürtünme katsayı grafiklerini gördüğümüz 13(50mm, 15 pulse, 900mf), 14(50mm, 10 pulse, 900mf) ve 15(50mm, 5 pulse, 900mf) no'lu numune gruplarından en düşük sürtünme katsayı değeri gösteren grup, en yüksek sertlik değerinin de elde edildiği 13 no'lu numune grubudur.



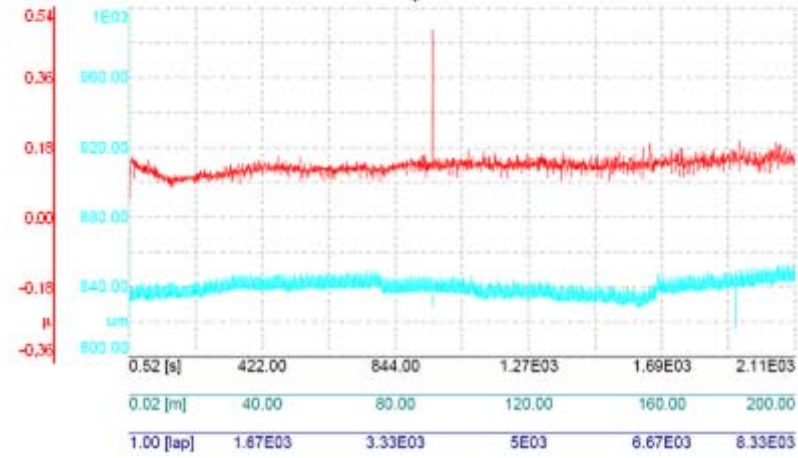
Şekil 8.105 a) 13, b) 14 ve c) 15 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri

Şekil 8.106'da sürtünme katsayı grafikleri verilen 16(60mm, 15 pulse, 900mf), 17(60mm, 10 pulse, 900mf) ve 18 (60mm, 5 pulse, 900mf) no'lu numune gruplarından aşınma derinlik değeri en yüksek olan 16 no'lu numunedir. Derinlik değeri en düşük olan 18 no'lu numunedir. Sürtünme katsayı değerleri genellikle sabit

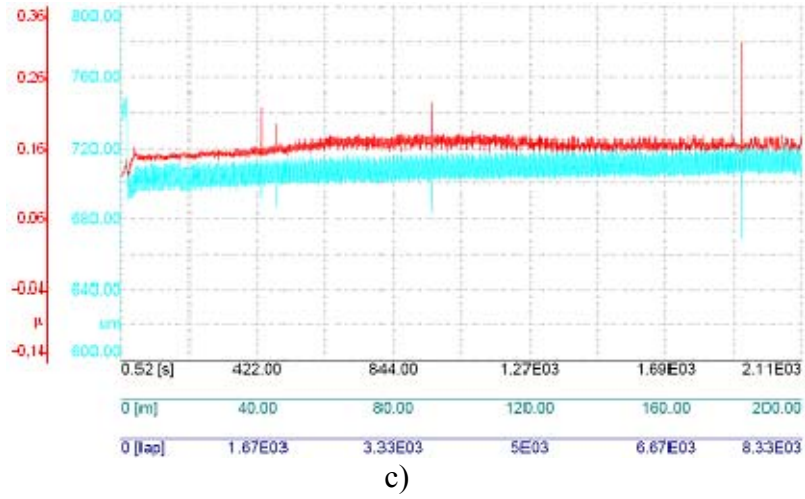
şekilde ilerleme göstermiştir. Bunun nedeni aşınma deneylerinin 200m mesafede yapılması ve bu mesafedeki deneylerin modifikasyon tabakası dışına çıkmamasıdır. Şekil 8.107'de 19(70mm, 15 pulse, 900mf), 20(70mm, 10 pulse, 900mf) ve 21(70mm, 15 pulse, 900mf) ve 8.108'da ise 22(80mm, 15 pulse, 900mf), 23(80mm, 10 pulse, 900mf) ve 24 (80mm, 5 pulse, 900mf) no'lu numunelerin grafikleri mevcuttur. Şekil 8.109'da ise işlem görmemiş AISI 4140 çeliğinin aşınma sonrası sürtünme katsayısı ve derinlik ilişkisini veren grafik mevcuttur. Aşınmanın şiddetli oluşumu grafik değerlerinde de açıkça görülmektedir. Yüzeyine modifikasyon işlem uygulanmadan aşınma deneyi uygulanan 4140 çeliği diğer numune gruplarına göre açıkça görülebilecek biçimde yoğun bir aşınma davranışı göstermiştir. Sürtünme katsayı değerleri, pulse plazma uygulanmış numune gruplarına göre 2 kat daha yüksektir.



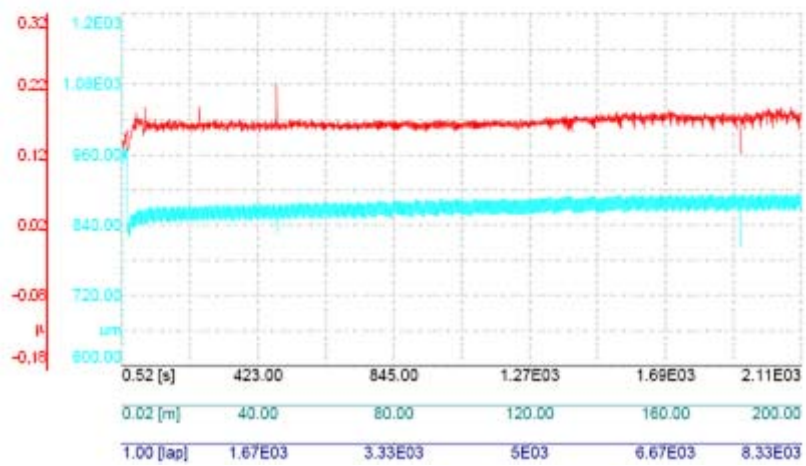
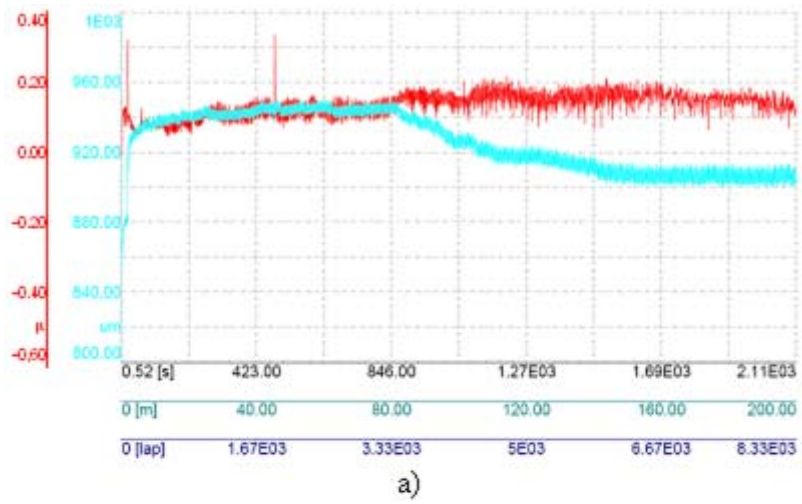
a)

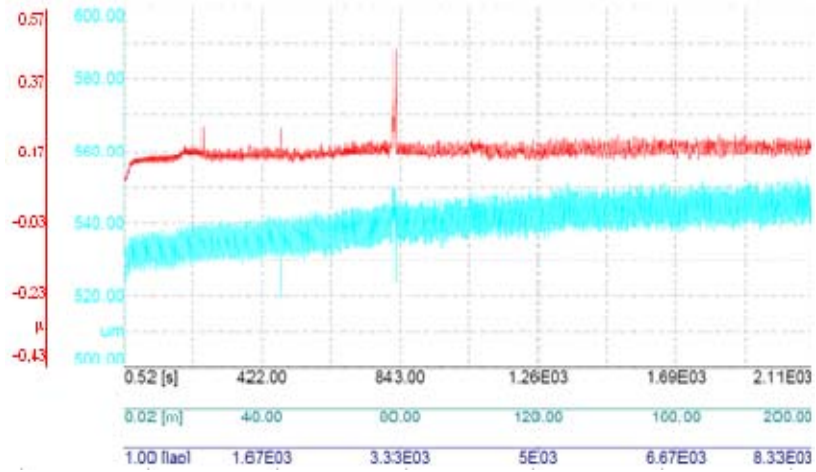


b)



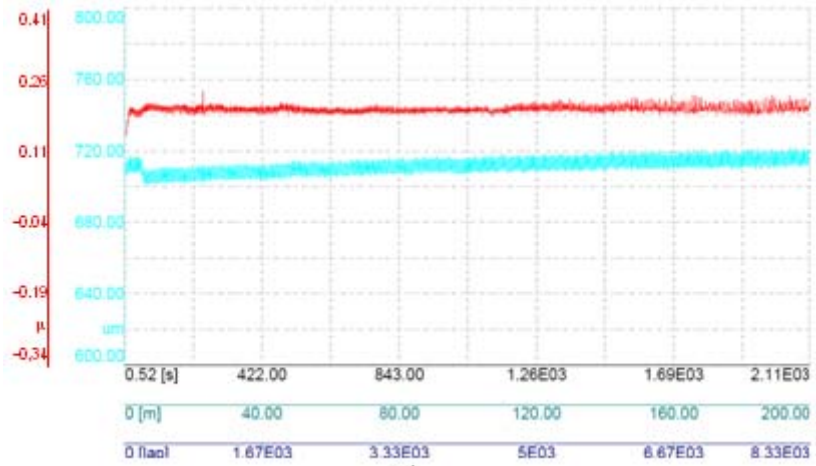
Şekil 8.106 a) 16, b) 17 ve c) 18 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri



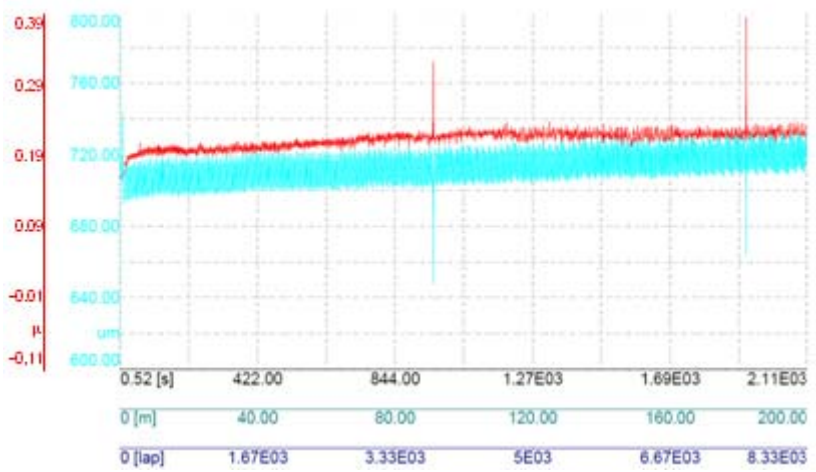


c)

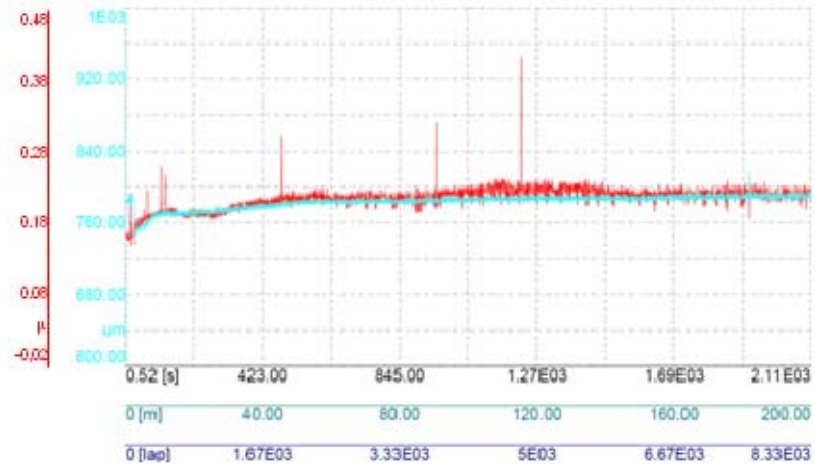
Şekil 8.107 a) 19, b) 20 ve c) 21 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri



a)

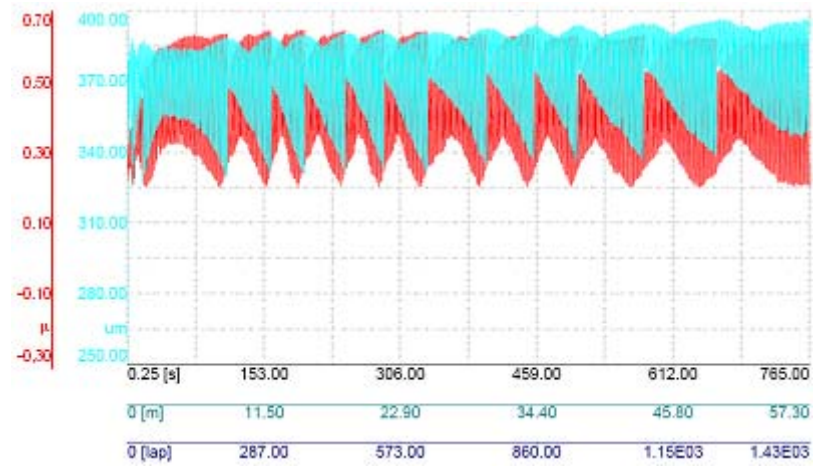


b)



c)

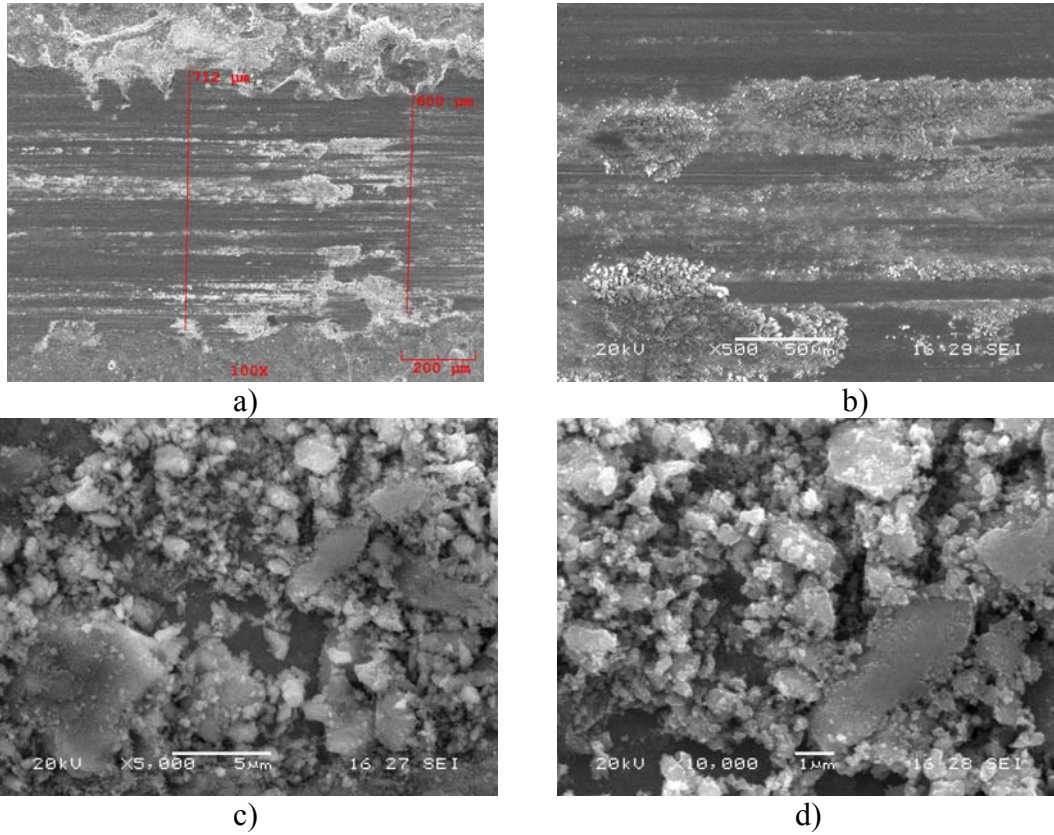
Şekil 8.108 a) 22, b) 23 ve c) 24 no'lu numunelerin 9N yük altında sürtünme grafikleri



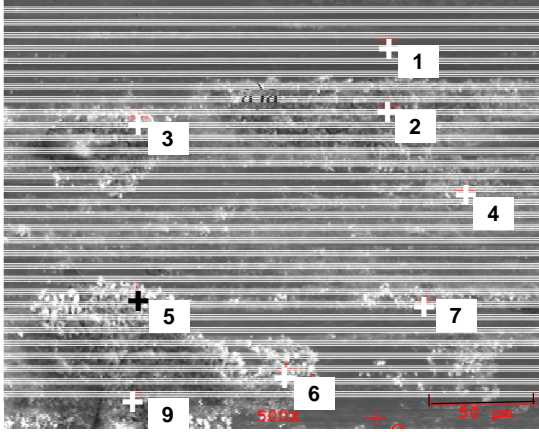
Şekil 8.109 İşlem görmemiş AISI 4140 çeliğinin 9N yük altında sürtünme grafiği

8.9. Aşınma Sonrası Yüzeylerin SEM ve EDS Analizleri

Aşınma deneyi sonrası tüm numune gruplarının aşınma yüzeylerinde SEM ve EDS çalışması yapılmıştır. Şekil 8.110 ve 8.111’de 1 (70mm, 15 pulse, 800mf)no’lu numunenin 1,5m/sn hızda 5N yük altında 200m’de elde edilmiş aşınma yüzeylerinin SEM ve EDS analizleri verilmektedir. Şekil 8.110b’de verilmekte olan SEM görüntüsüne bakıldığında plastik bir deformasyon gerçekleştiği ve abrazyif karakterli bir aşınma süreci sonrası aşınma ürünlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 8.111’de verilmekte olan EDS analiz çalışmasında deneyde kullanılan alümina bilyanın da aşınması sonucu meydana gelmiş aşınma ürünleri arasında görülmüştür. SEM görüntülerinde beyaz renkte görülmekte olan parçaların alümina bilyadan koptuğu düşünülmektedir. Keza EDS analizleri de özellikle 3, 5, 6 ve 7 no’lu bölgede ki EDS analiz sonuçları bu fikri desteklemektedir. Şekil 8.110 c ve d’de aşınma ürünlerinin yüksek büyütmede görüntüleri mevcuttur.



Şekil 8.110 a), b), c), ve d) 1 no’lu numunelerin 1,5m/sn hızda 5 N yük altında 200m’de yapılan aşınma deneyi sonrası yüzeyden alınmış SEM görüntüleri



a)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.000
N	1.211
O	33.500
Al	0.105
Cr	0.735
Mn	0.160
Fe	62.049
W	2.241
	100.000

c)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.000
N	0.000
O	14.423
Al	0.327
Cr	0.477
Mn	0.244
Fe	80.920
W	3.609
	100.000

e)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	3.795
N	1.956
O	23.002
Al	0.083
Cr	0.838
Mn	0.187
Fe	0.000
W	2.519
	32.380

g)

b)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.000
N	0.000
O	0.000
F	15.619
Al	0.000
Cr	0.682
Mn	0.489
Fe	81.765
W	1.446
	100.000

Elt	Sonuç(ağırlıkça)%
C	4.999
N	4.188
O	22.398
Al	0.120
Cr	0.609
Mn	0.096
Fe	0.000
W	1.253
	33.662

d)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.955
N	1.316
O	20.243
Al	0.076
Cr	0.646
Mn	0.159
Fe	74.464
W	2.142
	100.000

f)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	2.298
N	0.342
O	37.210
Al	0.186
Cr	0.531
Mn	0.054
Fe	58.608
W	0.771
	100.000

h)

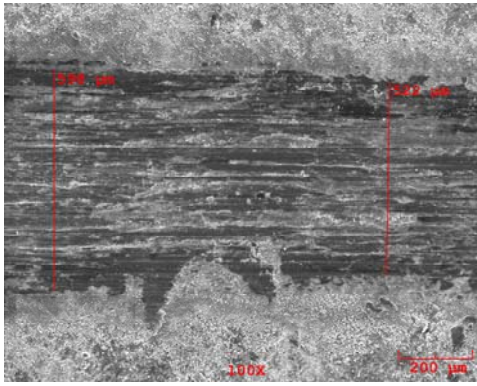
Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.000
N	0.808
O	1.381
Al	0.114
Cr	0.762
Mn	0.123
Fe	94.330
W	2.481
	100.000

1)

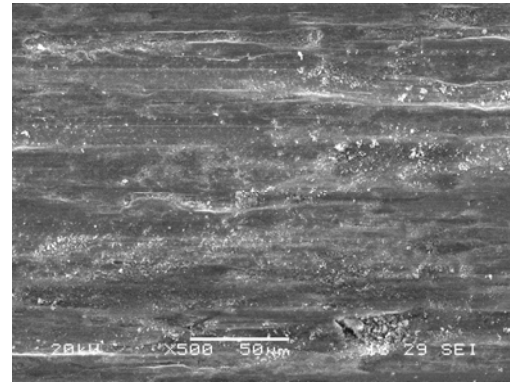
Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	7.165
N	0.842
O	45.163
Al	0.131
Cr	0.254
Mn	0.242
Fe	44.588
W	1.615
	100.000

i)

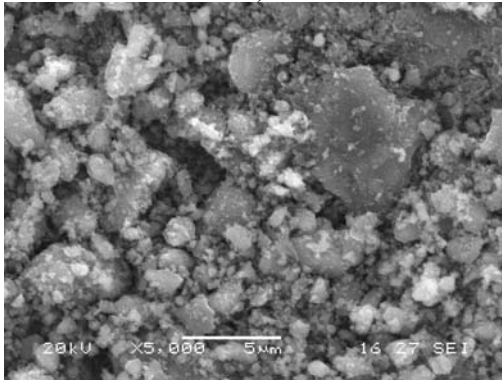
Şekil 8.111 a) 1 no'lu numunenin 5Nyük altında aşınma yüzeyinden alınmış EDS resmi, b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6, h)7, i)8, i)9 no'lu noktaların EDS analizleri



a)



b)

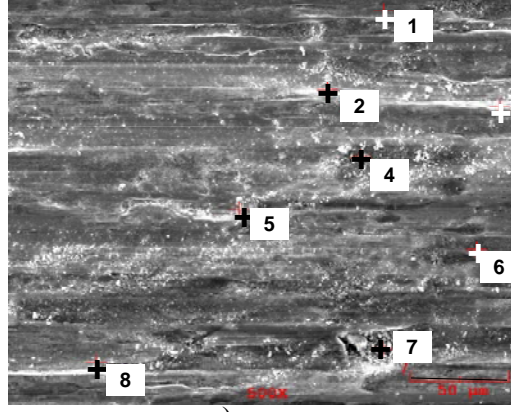


c)

Şekil 8.112 1 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7Nyük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) yüksek büyütmede aşınma ürünleri

Şekil 8.112'de 1 no'lu numunenin 7N yük altında aşınma sonrası yüzeyden alınmış SEM görüntülerine bakıldığında yüzeyde kızaklama aşınma meydana gelmiştir. İnce ve derin olmayan yivler mevcuttur. Yüzeyde meydana gelmiş olduğu düşünülen abrazif aşınma gereği az miktarda malzeme kopmaları meydana gelmiştir. Yüzeyde meydana gelen aşınma ürünlerinde Şekil 9.112c'de yüksek büyütme görülmektedir. Aynı numune ait noktasal EDS analizlerinde ise beyaz olarak görülen parçaların

alümina bilyaya ait olduğunu göstermektedir. 5 ve 8 no'lu noktada bu elementlerin yüksek değerleri dikkat çekicidir.



a)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	2.578
N	1.776
O	2.182
Al	0.221
Cr	0.316
Mn	0.202
Fe	90.629
W	2.097
	100.000

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	4.395
N	0.933
O	5.753
Al	0.233
Cr	0.475
Mn	0.519
Fe	86.385
W	1.305
	100.000

b)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	7.875
N	3.483
O	10.801
Al	0.009
Cr	0.518
Mn	0.197
Fe	74.695
W	2.421
	100.000

c)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	6.400
N	0.593
O	39.244
Al	0.148
Cr	0.419
Mn	0.325
Fe	51.360
W	1.510
	100.000

d)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	2.010
N	0.586
O	26.379
Al	0.199
Cr	0.762
Mn	0.128
Fe	68.410

e)

Elt.	Conc
C	2.010
N	0.586
O	26.379
Al	0.199
Cr	0.762
Mn	0.128
Fe	68.410

f)

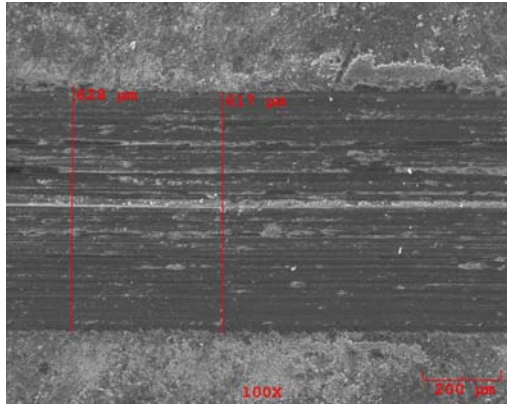
g)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	1.885
N	2.750
O	44.433
Al	0.130
Cr	0.487
Mn	0.216
Fe	49.604
W	0.496
	100.000

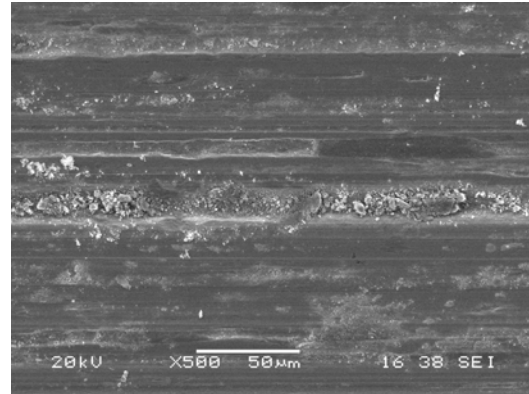
h)

Şekil 8.113 1 no'lu numunenin 7N yük altında a)2, b)3, c)4, d)5, e)6, f)7 ve h)8 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

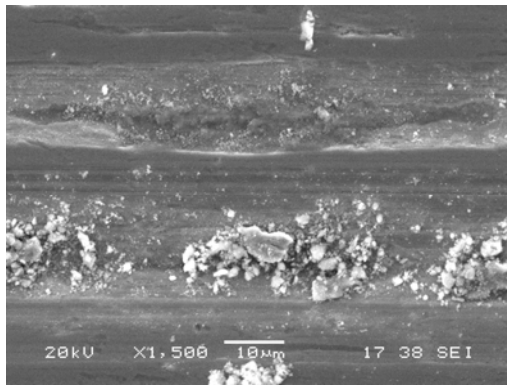
Şekil 8.114'de 1 no'lu numunenin aynı şartlar altında fakat 9 N yük altında yapılmış deneyler sonrası alınmış SEM görüntülerinde plastik deformasyon oluşumu ve pulluklama aşınmanın meydana geldiği düşünülmektedir. Yük artmasıyla yivler genişlemiş ve derinleşmiştir. Yüksek büyütme alınan SEM görüntülerinde aşınan bölge ve aşınma ürünleri daha iyi görülmektedir (Şekil 8.114c ve d). Şekil 8.115'de verilmekte olan EDS analizlerinden noktasal olarak alınmış değerlerden aşınma ürünleri ve bilya parçaları daha iyi belirlenmesi mümkün olmuştur.



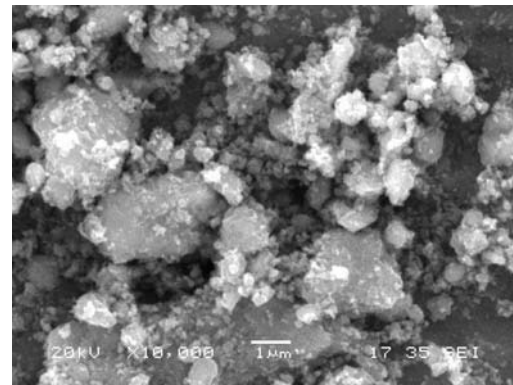
a)



b)

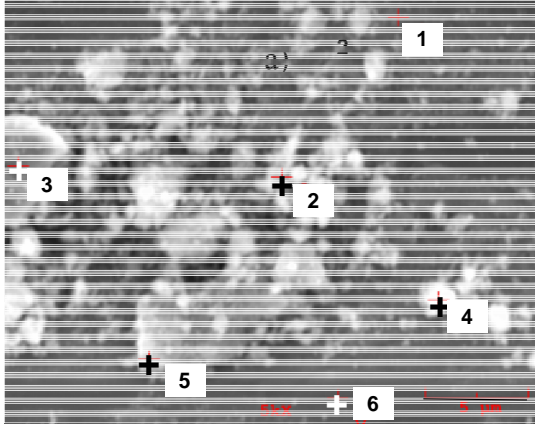


c)



d)

Şekil 8.114 1 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 9N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden yüksek büyütme, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



a)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.000
N	1.332
O	14.669
Al	0.104
Cr	0.575
Mn	0.464
Fe	81.335
W	1.521
	100.000

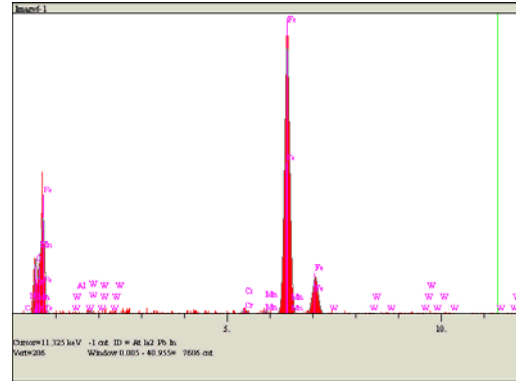
c)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.000
N	0.296
O	15.951
Al	0.102
P	0.117
Cr	0.639
Mn	0.305
Fe	79.795
W	2.794
	100.000

e)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	1.532
N	2.210
O	30.428
Al	0.349
Cr	0.440
Mn	0.732
Fe	62.802
W	1.506
	100.000

g)



b)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	4.912
N	1.097
O	38.763
Al	0.684
Cr	0.450
Mn	0.308
Fe	52.208
W	1.579
	100.000

d)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	5.542
N	3.422
O	42.304
Al	0.560
Cr	0.485
Mn	0.203
Fe	46.845
W	0.639
	100.000

f)

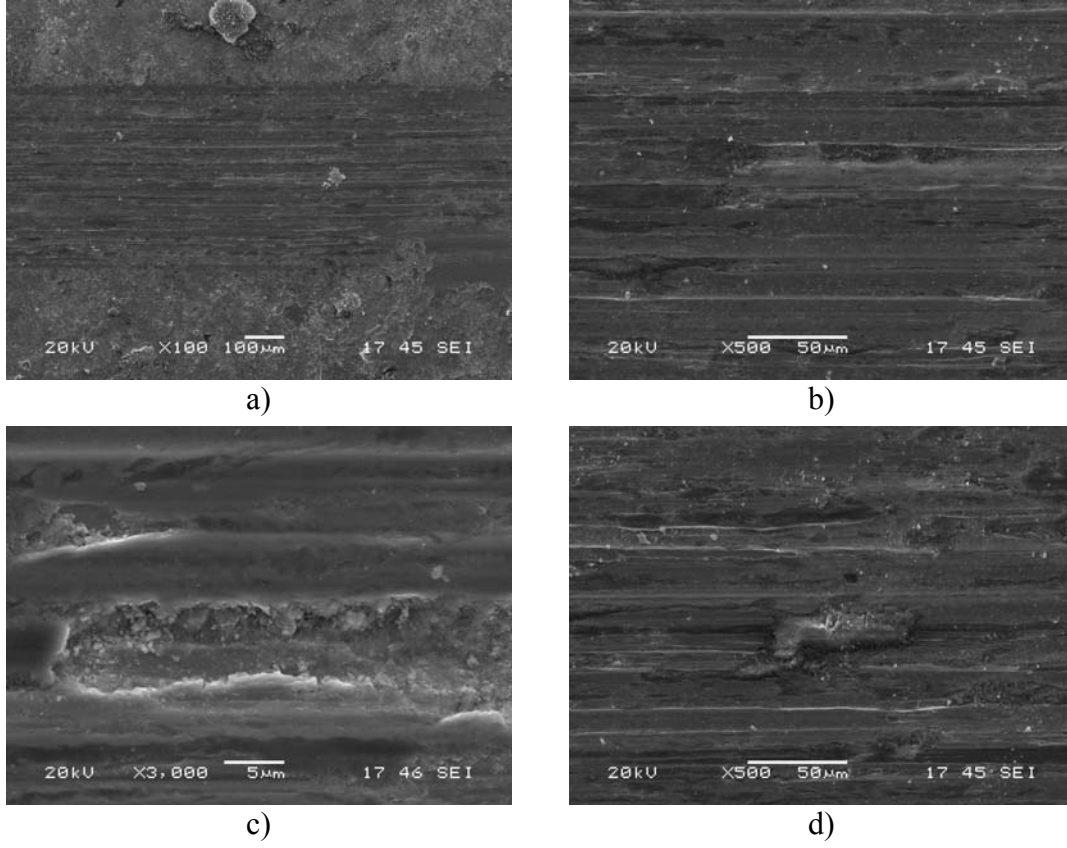
Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.000
N	0.937
O	1.476
Al	0.205
Cr	1.241
Mn	0.787
Fe	93.658
W	1.695
	100.000

h)

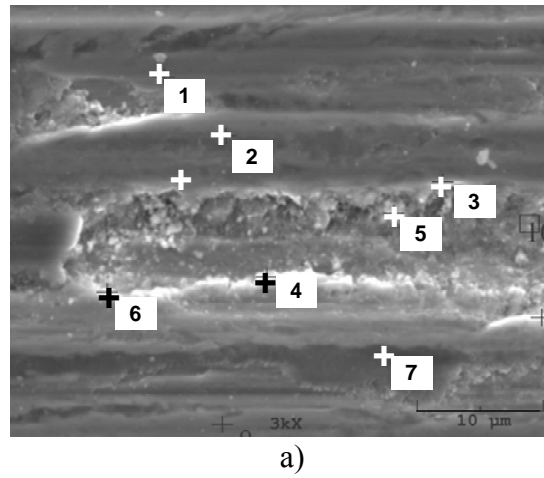
Şekil 8.115 1 no'lu numunenin 9Nyük altında a)2, b)3, c)4, d)5, e)6, f)7, h)8 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

Şekil 8.116'da 2 (70mm, 10 pulse, 800mf)no'lu numunenin 5N yük altında aşınma yüzey SEM görüntüleri verilmektedir. Özellikle Şekil 8.116c'de kazımalı aşınma

görüntüsü görülmektedir. Yüzeyde yivler oluşmuştur. Yine Şekil 8.116c'de görülen resmin EDS analizi alındığında beyaz parçacıkların bilyaya ait olduğu görülmüştür.



Şekil 8.116 2 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden yüksek büyütme, d) farklı bir bölge



Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.305
N	0.660
O	0.000
Al	0.115
Cr	0.525
Fe	96.715
W	1.680
	100.000

b)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	1.815
N	0.815
O	12.775
Al	0.344
Cr	0.575
Fe	82.097
W	1.580
	100.000

d)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	1.516
N	2.122
O	41.388
Al	0.478
Cr	0.302
Fe	52.997
W	1.197
	100.000

f)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.000
N	1.416
O	38.037
Al	0.297
Cr	0.478
Fe	58.058
W	1.715
	100.000

h)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	0.000
N	1.965
O	0.000
Al	0.201
Cr	0.627
Fe	95.576
W	1.631
	100.000

c)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	2.317
N	1.206
O	14.300
Al	0.176
Cr	0.463
Fe	79.062
W	2.476
	100.000

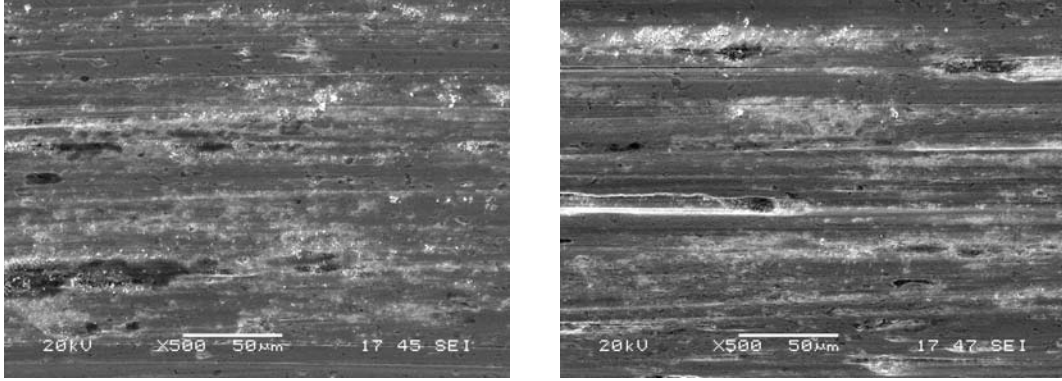
e)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	3.299
N	2.449
O	24.073
Al	0.058
Cr	0.549
Fe	68.027
W	1.545
	100.000

g)

Şekil 8.117 2 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1, c)2, d)3, e)4, f)5, g)6 ve h)7no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

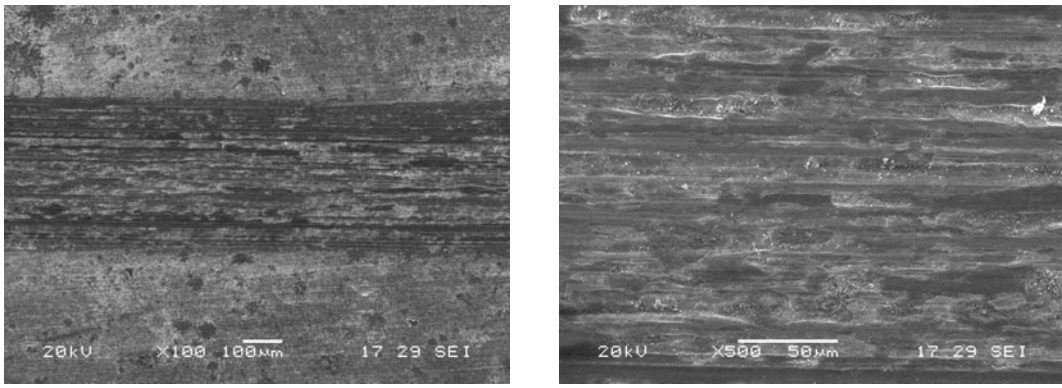
Şekil 8.118'de 2(70mm, 10 pulse, 800mf)no'lu numunenin 7N yük altında meydana gelen aşınma deneyi sonrası SEM görüntülerden az miktarda plastik deformasyon ve abrazif bir aşınma meydana geldiği görülmektedir. Yüzeyde farklı genişlikte yivler meydana gelmiştir.



a)

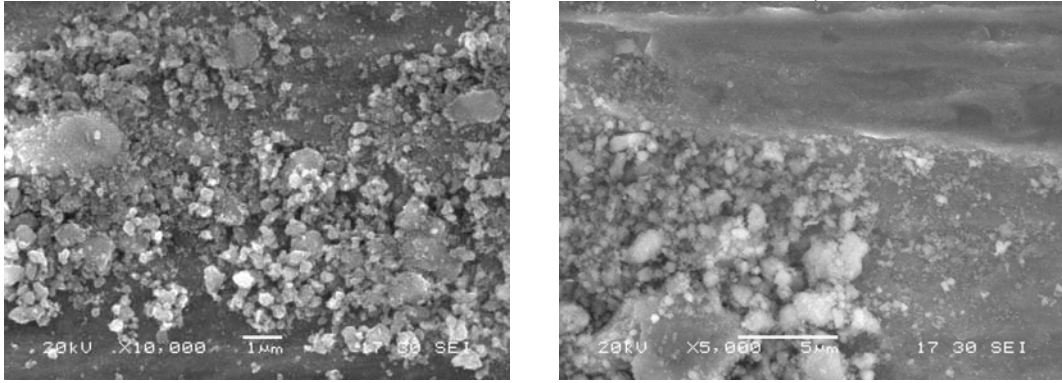
b)

Şekil 8.118 2 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma yüzey görüntüsü, b) farklı bölgeden aşınma görüntüsü



a)

b)



c)

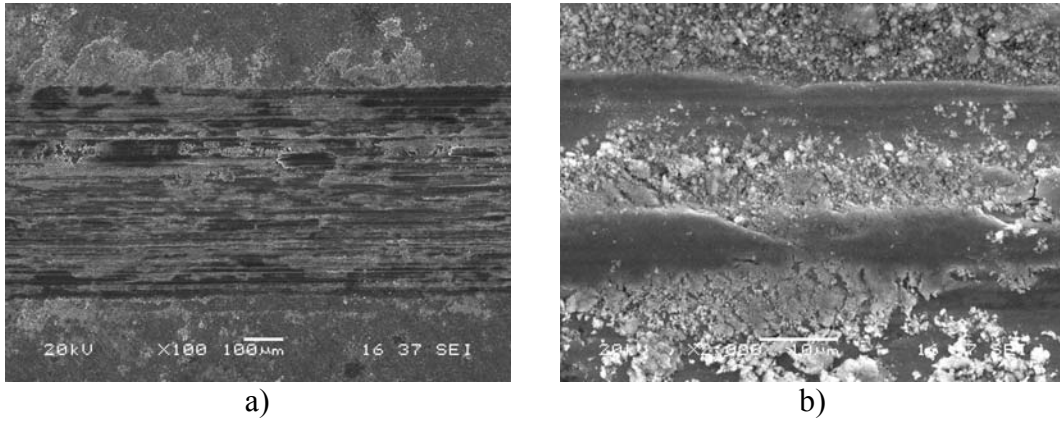
d)

Şekil 8.119 3 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) farklı bölgedeki aşınma ürünleri

Şekil 8.119'da 3(70mm, 5 pulse, 800mf) no'lu numunenin 5N yük altında yapılan deney sonrası aşınma iz kalınlığı, yüzey görüntüleri ve aşınma ürünleri görülmektedir. Plastik deformasyon ve yiv oluşumu mevcuttur. Yüzeyde aşınma ürünleri oldukça fazladır. Bu numunedeki sertliğin az oluşu aşınma ürünlerinin artışına ve aşınmanın daha derin yivler oluşturmasına sebebiyet vermiştir. Yüzeyde

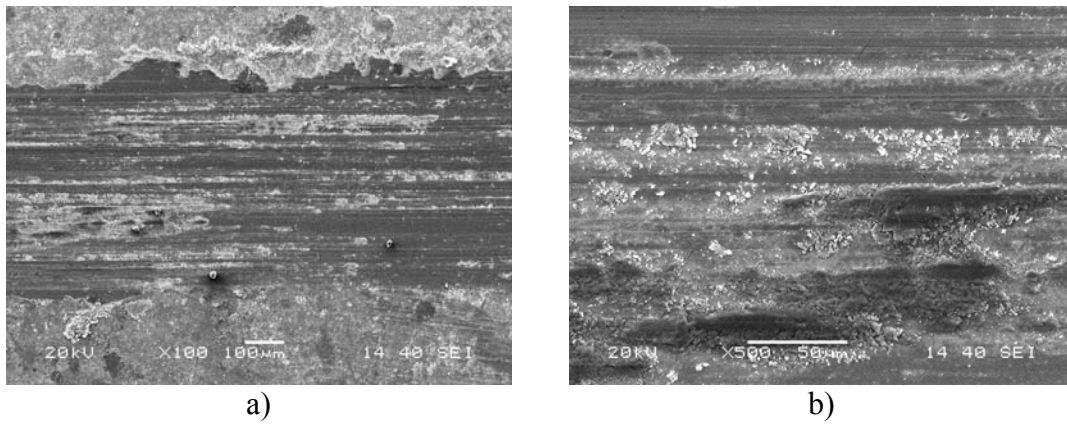
bulunan küçük aşınma artıkları bile kızak etkisi yaratarak pulluklama tipi aşınma oluşturmuştur. Aşınma ürünleri yiv kenarlarında toplanmıştır.

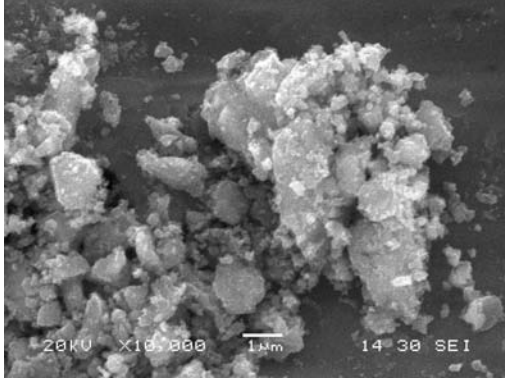
Şekil 8.120'de 3 no'lu numunenin 7N yük altında yapılmış aşınma deneyi sonrası alınan SEM görüntülerine göre yüzeyde kopma ve sıvanmalar meydana gelmiştir. Yüzeyde bilya parçaları görülmektedir.



Şekil 8.120 3 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü

3 no'lu numunenin 9N yük altında yapılmış deney sonrası yüzeylerde plastik deformasyon meydana gelmiştir. Aşınma ürünlerinin yüksek büyütmede görüntüsü alınmıştır (Şekil 8.121). Aşınma ürünleri çok az olsa bile yüzeyde mekanik bir etki yaratarak yüzeylerin bozulmalarına sebebiyet vermektedirler. Aşınma ürünleri bazen abrazif etki yaratarak abrazif aşınmaya neden olmaktadır [148].

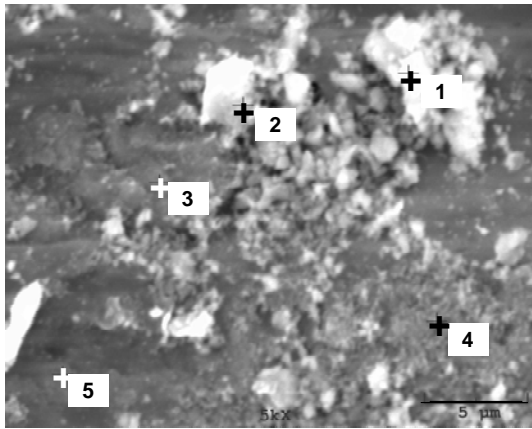




c)

Şekil 8.121 3 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 9N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri

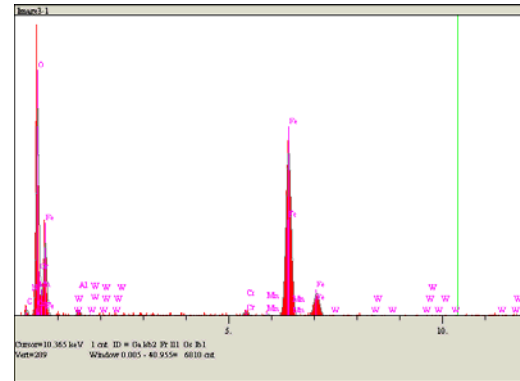
3 no'lu numunenin 9N yük altında aşınma ürünlerinden alınan EDS analizlerine göre beyaz olarak görülen bölgelerde Al ve oksijen element miktarı fazla çıkmıştır. Bu da beyaz olarak görülen tanelerin bilyadan kopmuş olacağı düşüncesini desteklemektedir (Şekil 8.122).



a)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	6.805
N	0.000
O	47.490
Al	0.599
Cr	0.565
Mn	0.248
Fe	43.165
W	1.128
	100.000

c)



b)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	4.773
N	0.351
O	47.338
Al	0.527
Cr	0.513
Mn	0.104
Fe	44.897
W	1.498
	100.000

d)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	4.865
N	1.026
O	44.272
Al	0.558
Cr	0.519
Mn	0.293
Fe	46.905
W	1.562
	100.000

e)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	4.187
O	11,02
Al	0.220
Cr	0.457
Mn	0.205
Fe	85.203
W	1.227
	100.000

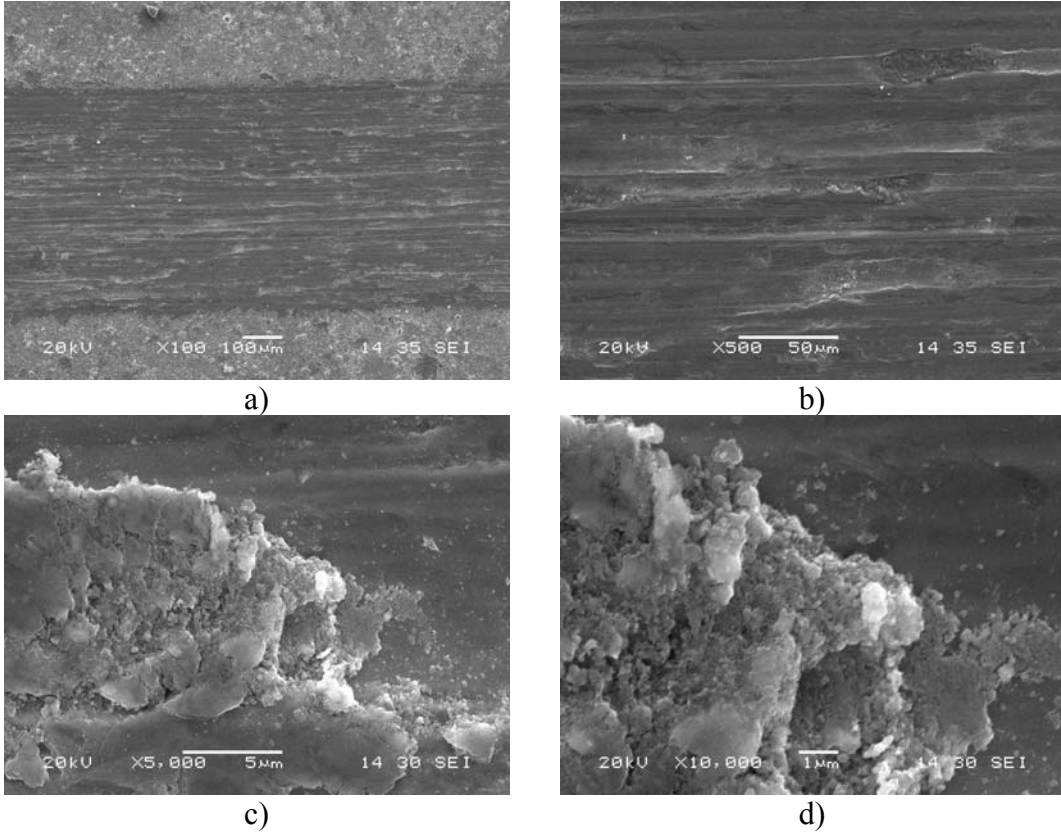
f)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
N	0.187
O	12.402
Al	0.220
Cr	0.457
Mn	0.205
Fe	85.203
W	1.327
	100.000

g)

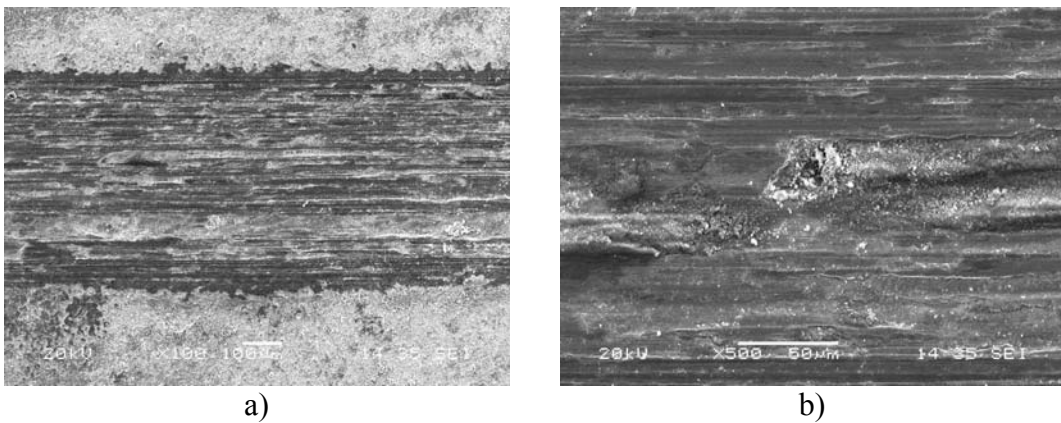
Şekil 8.122 3 no'lu numunenin 9N yük altında, a) EDS görüntüsü, b) 1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4 ve g)5 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

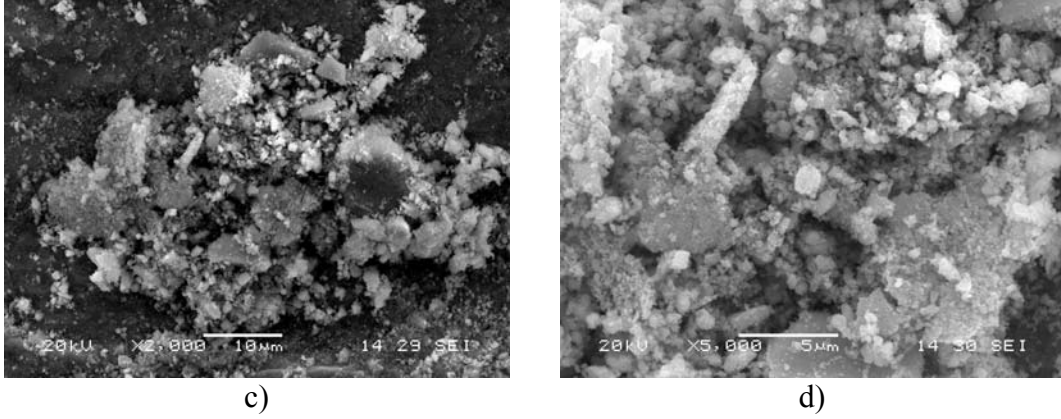
4(80mm, 15 pulse, 800mf)no'lu numunenin 5N yük altında yapılmış deneyleri sonucunda yüzeyde derin olmayan yiv oluşumları ve kızaklama aşınma türü aşınma mekanizmaları görülmektedir(Şekil 8.123). Modifikasyondan dolayı plastik deformasyon şiddeti azaldığı düşünülmektedir [149].



Şekil 8.123 4 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) daha yüksek büyümede aşınma ürünleri

Şekil 8.124'de 4 no'lu numunenin 7N yük altında yapılan deneyler sonrası alınan SEM görüntülerinde derin yivler oluşmuştur. Yüzeyde aşınma ürünleri oldukça fazladır.





Şekil 8.124 4 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d)yüksek büyümede aşınma ürünleri

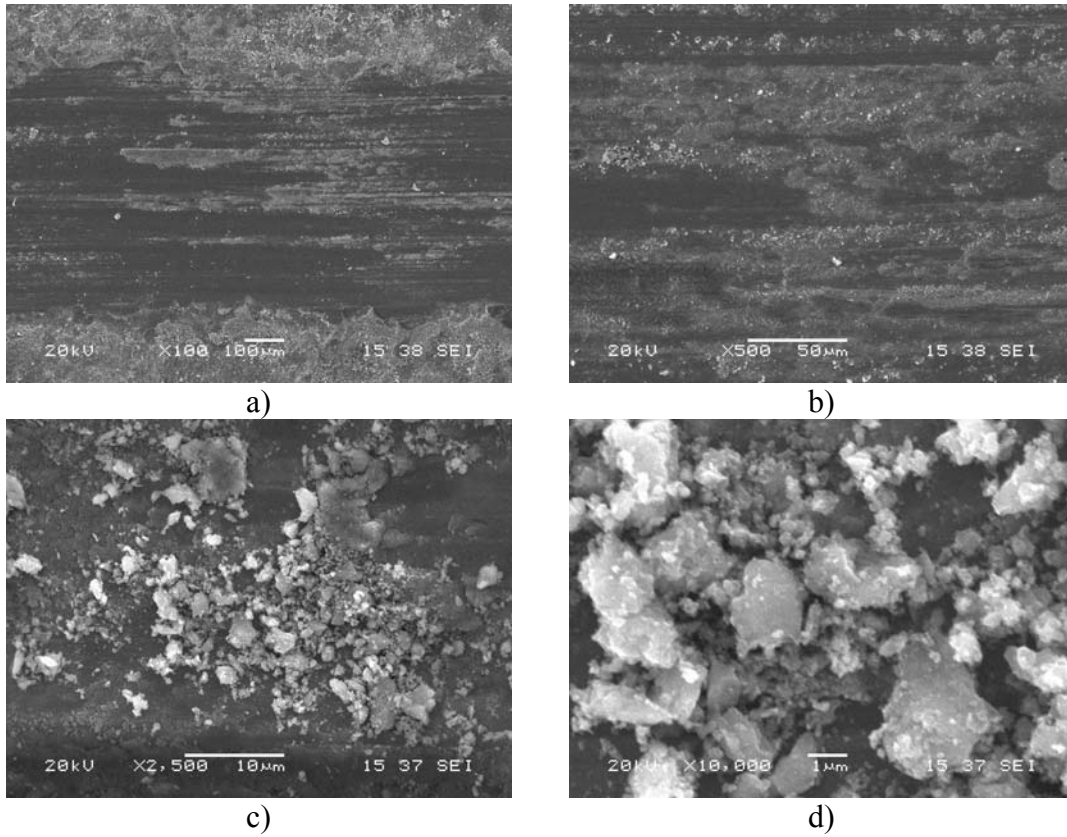
4 no'lu numunenin 9 N yük altında yapılan aşınma deneyi sonrası elde edilen yüzey SEM görüntülerine göre yüzeyde plastik deformasyon oluşumları görülmektedir. Aşınma ürünleri yüzeye bir miktar sıvanmıştır. Aşınma ürünleri yüzeyde görülmektedir (Şekil 8.125). Yükün artmasıyla artan aşınma ürünleri hem adhezif hem abrazif aşınmaya neden olmuştur.

Ayrıca aşınma ürünlerinin boyutu deformasyon ve aşınma miktarı için çok önem arz etmektedir. Aşındırıcı tane boyutu artınca aşınma hız ve aşınma hacmi de artmaktadır. Bununla beraber sadece boyutu değil aşındırıcı tanenin şeklide önemlidir. Köşeli parçacıklar aşınma miktarını ve yiv oluşumunu artırmaktadır. Pek çok araştırmacı bu taneciklerin boyutu ve şeklinin aşınmadaki etkileriyle ilgili araştırmalar yapmıştır [90, 150-152].

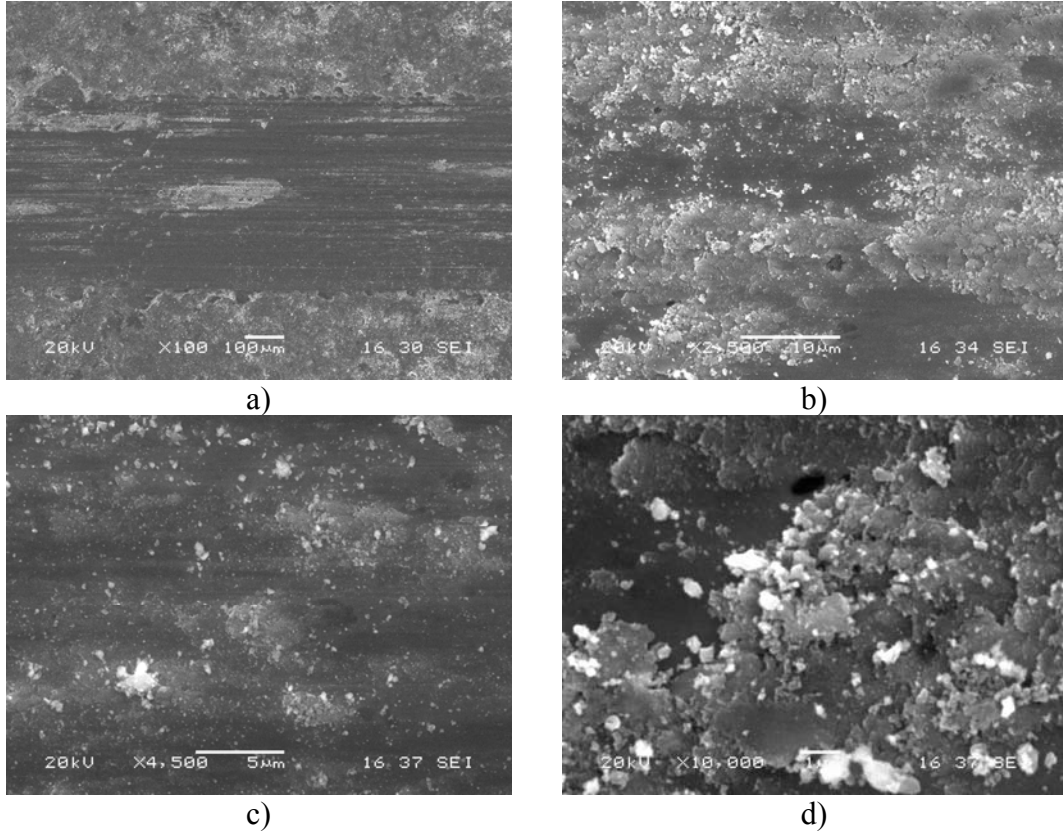
Literatürde belirtildiği üzere pulse sayısı arttıkça yüzeye yapışan malzeme azaltmaktadır. Bunun nedeni pulse sayısının artmasıyla tane boyutunun azalması, azalan tane boyutunun hem sertliği hem de aşınma dayanımı artırarak yüzey özelliklerini geliştirmesi gösterilebilir. Tane boyutu aşınma dayanımında etkin bir faktördür [153-154]. Yüzeye yapışma azalınca sürtünme katsayı azalmaktadır.

Pulse sayısı arttıkça modifikasyon tabaka kalınlığı da arttığından yükün etkisi modifikasyon tabaka dışına taşması daha uzun süre alır ve aşınma dayanımı bu sebep

ile artış gösterebilir. Pulse plazma ile oluşmuş yapıdaki farklı fazların varlığı ve miktarları aşınma dayanımını etkileyen diğer bir faktördür [155]. Özellikle Fe_3N , wolfram ve/veya wolframoksit esaslı fazların varlığı aşınma dayanımı artırmaktadır[44]. Özellikler 1-2 μm gibi büyük boyuttaki wolfram esaslı tanecikler aşınma dayanımında son derece olumlu etkiye sahiptir[120, 44]. Yüksek sertlik değerleri sayesinde wolfram ve oksitleri yüzeyde dayanımın artmasına sebebiyet vermektedir.



Şekil 8.125 4 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 9N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d)yüksek büyümede aşınma ürünleri

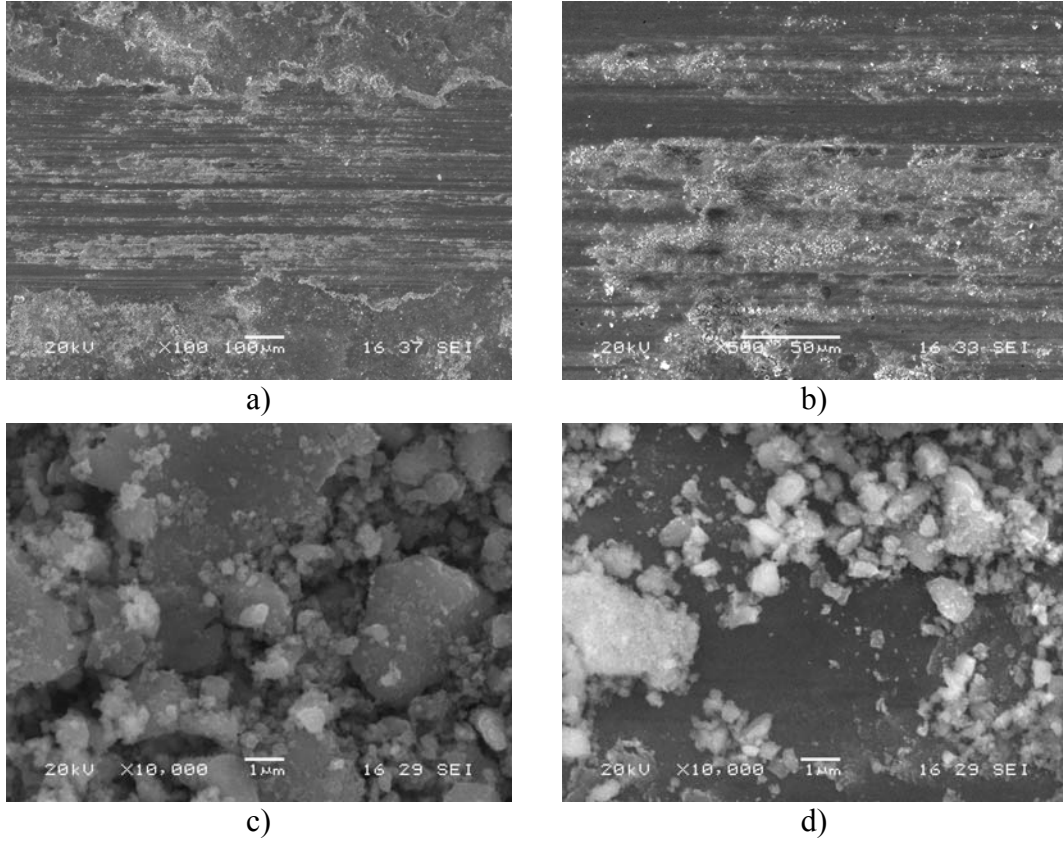


Şekil 8.126 5 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d)yüksek büyümede aşınma ürünleri

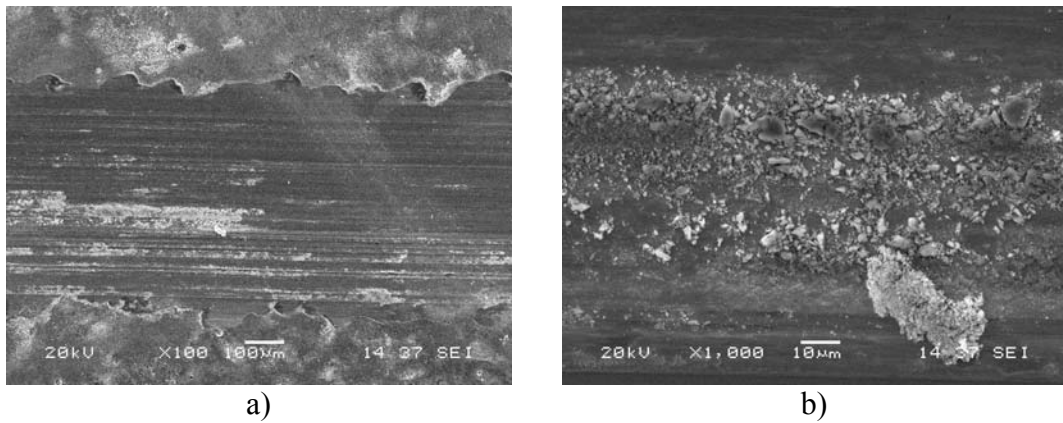
Şekil 8.126'da 5 (80mm, 10 pulse, 800mf)no'lu numunenin 5N yük altında yapılan deney sonrası elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde yüzeyde plastik deformasyon, aşınma ürünlerinin sıvanması ve malzeme kopmalarının olduğu belirlenmiştir. Aynı numunenin 7N yük altında yapılmış aşınma deneyi sonrası görüntülerinde göre yine yük artışıyla plastik deformasyonun kuvvetlendiği ve yüzeyde fazla miktarda aşınma ürünü olduğu dikkat çekicidir. Beyaz renkte görülen aşınma ürünlerinin diğer numunelerde olduğu gibi aşındırıcı bilyaya ait olduğu düşünülmektedir (Şekil 8.127). Yük 9N'a çıktığında ise aşınmanın arttığı ve aşınma ürünlerinin fazla miktarda etrafa yayıldığı gözlemlenmiştir (Şekil 8.128).

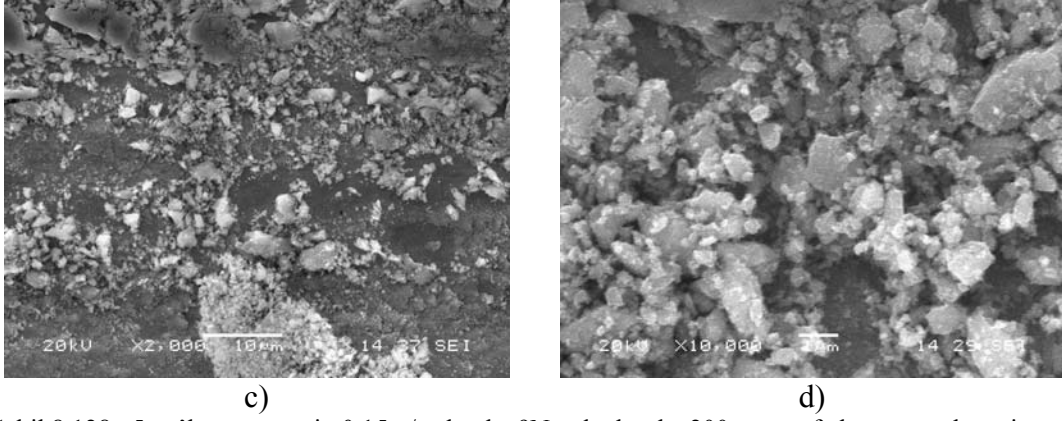
Şekil 8.129'da 6 (80mm, 5 pulse, 800mf) no'lu numunenin 5N yük altında uygulanan aşınma deneyi sonrası yüzeyden elde edilmiş SEM görüntülerinde plastik deformasyon ve abrazyon aşınma oluşumları görülmektedir. Bu numunedeki aşınma ürünlerine uygulanan EDS analizleri (Şekil 8.130) sonucunda; beyaz renkte görülen parçacıklardan alümina bilyadan koptuğu düşünülmektedir. Yük 7N olduğunda ise

yüzeyde kazımalı aşınma sonucu derin oyukların oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 8.131). 9N yükte ise yüzeyde kuvvetli plastik deformasyon ve yivler oluşmuştur (Şekil 8.132).

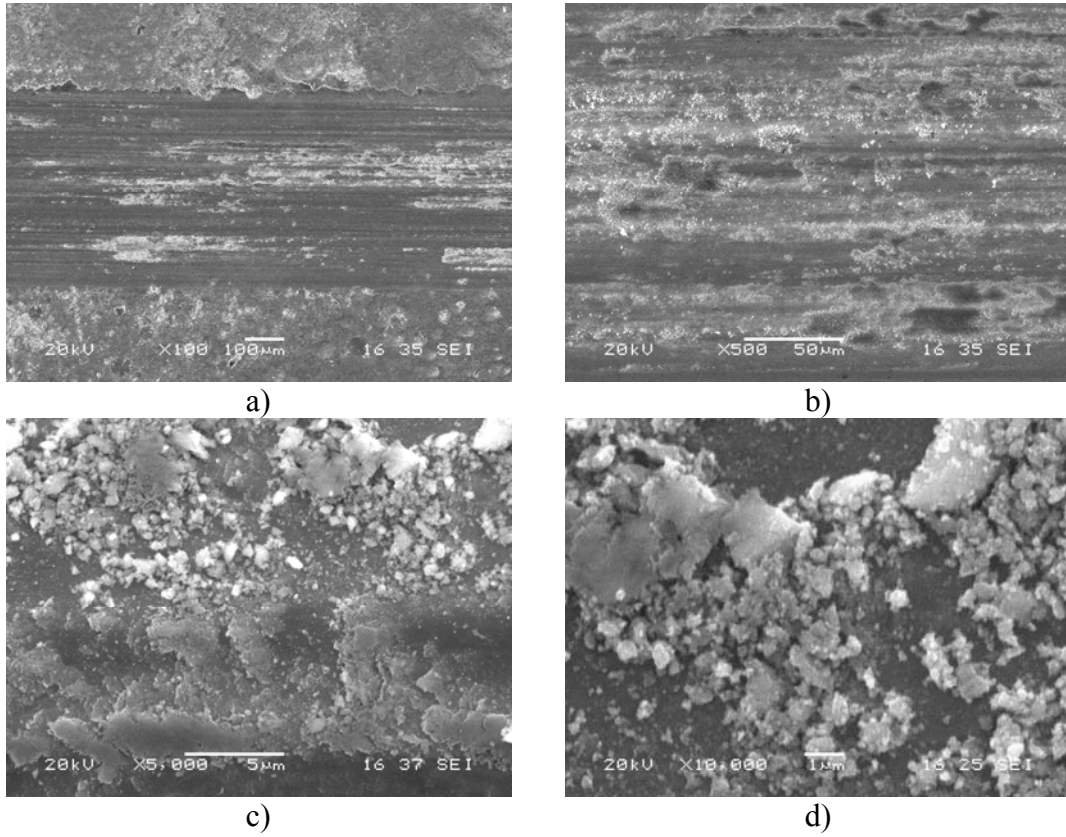


Şekil 8.127 5 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d)yüksek büyümede aşınma ürünleri

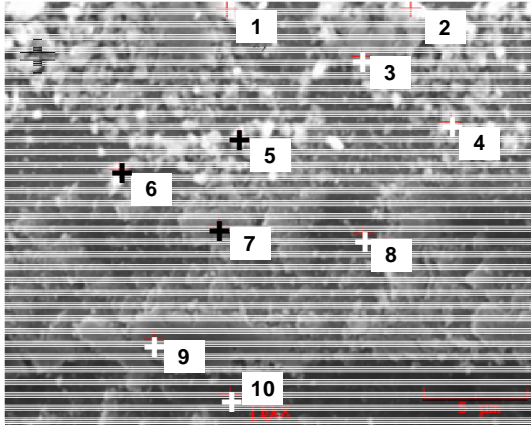




Şekil 8.128 5 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 9N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) yüksek büyümede aşınma ürünleri



Şekil 8.129 6 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) yüksek büyümede aşınma ürünleri



a)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	6.937
N	2.638
O	41.760
Al	0.101
Cr	0.387
Mn	0.136
Fe	46.762
W	1.279
	100.000

c)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	6.276
N	2.756
O	31.448
Al	0.208
Cr	0.416
Mn	0.119
Fe	57.402
W	1.375
	100.000

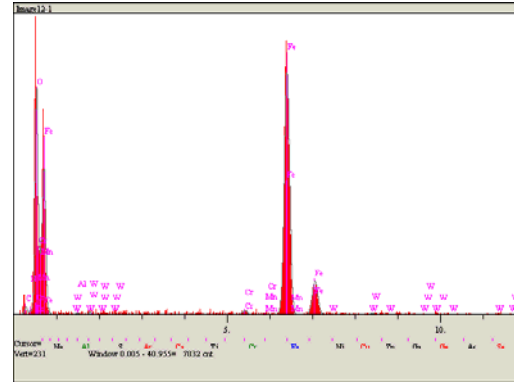
e)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	4.598
N	1.302
O	26.873
Al	0.045
Cr	0.411
Mn	0.383
Fe	65.171
W	1.217
	100.000

g)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	5.679
N	1.355
O	17.568
Al	0.375
Cr	0.374
Mn	0.425
Fe	72.545
W	1.679
	100.000

i)



b)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	7.679
N	4.395
O	41.875
Al	0.189
Cr	0.229
Mn	0.157
Fe	43.825
W	1.651
	100.000

d)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	7.268
N	3.210
O	30.318
Al	0.169
Cr	0.379
Mn	0.209
Fe	57.325
W	1.122
	100.000

f)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	4.619
N	2.234
O	23.590
Al	0.285
Cr	0.427
Mn	0.314
Fe	66.954
W	1.579
	100.000

h)

Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	3.222
N	0.695
O	1.501
Al	0.379
Cr	0.774
Mn	0.000
Fe	91.756
W	1.673
	100.000

j)

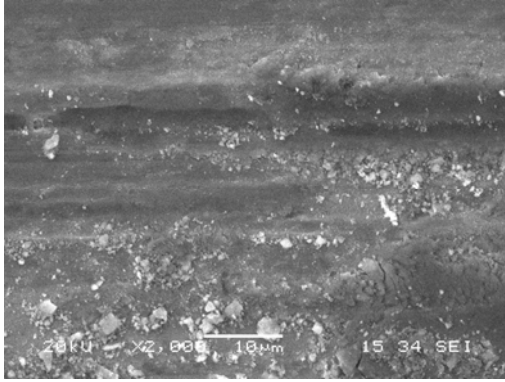
Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	7.682
N	3.736
O	21.684
Al	0.109
Cr	0.733
Mn	0.318
Fe	63.926
W	1.813
	100.000

j)

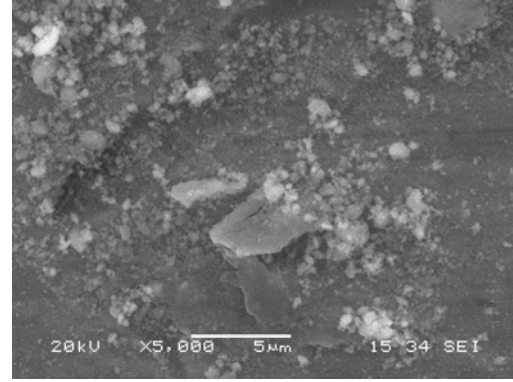
Elt.	Sonuç(ağırlıkça)%
C	4.611
N	1.118
O	0.000
Al	0.060
Cr	0.645
Mn	0.157
Fe	91.074
W	2.335
	100.000

k)

Şekil 8.130 6 no'lu numunenin 5N yük altında a)EDS resim görüntüsü, b) 1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, ı)7, i)8, j) 9, k)10 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

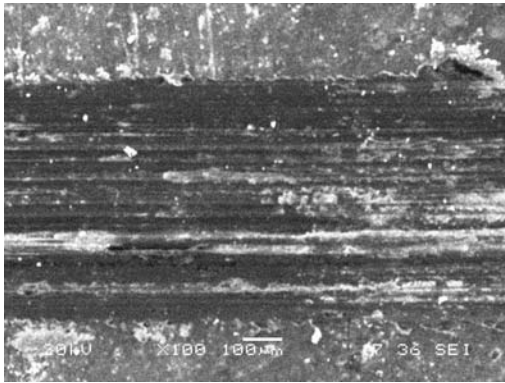


a)

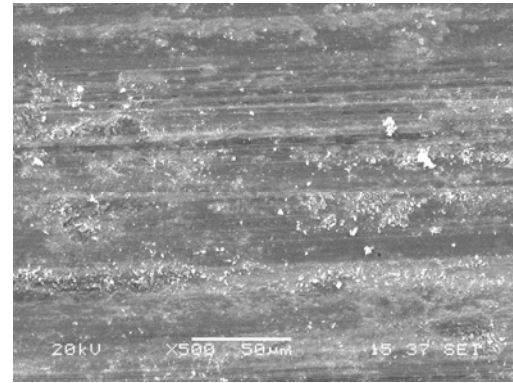


b)

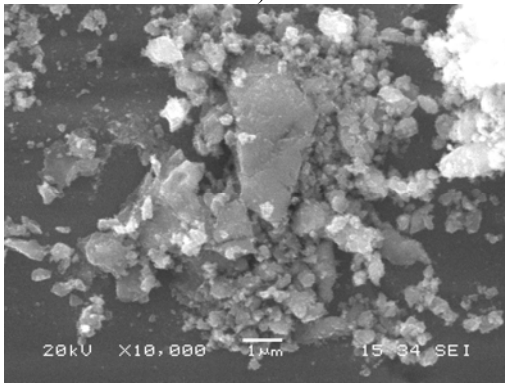
Şekil 8.131 6 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) yüzey görüntüsü, b) aşınma ürünleri



a)



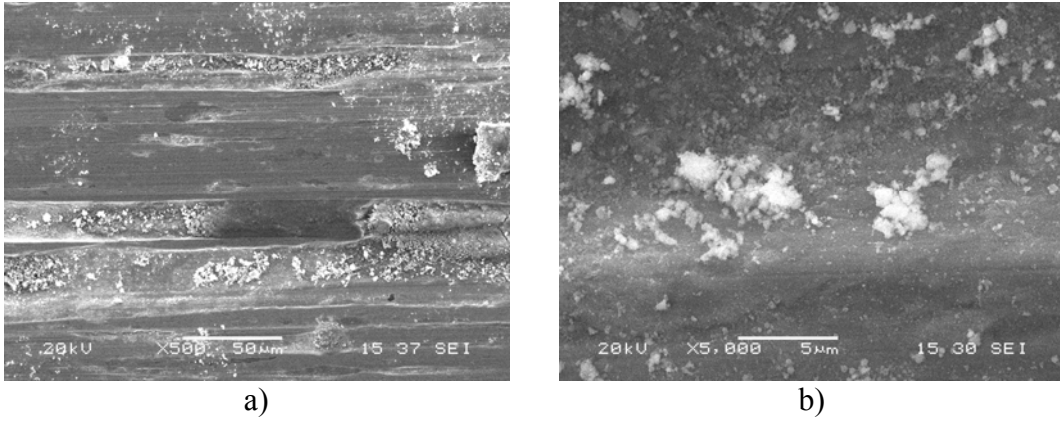
b)



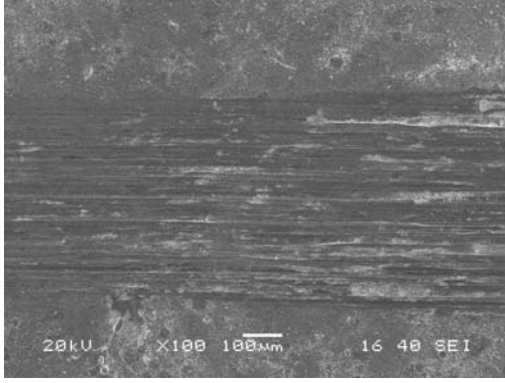
c)

Şekil 8.132 6 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 9N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b) yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri

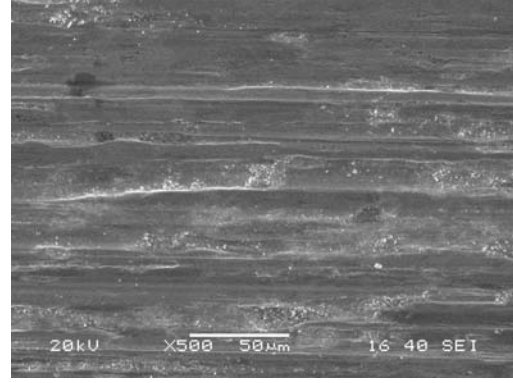
Şekil 8.133'de 7 no'lu numunenin 9N yük altında yapılmış aşınma deneyi sonrası elde edilmiş SEM görüntülerine göre yüzeyde kızaklama aşınma ve plastik deformasyon meydana gelmiştir. Aşındırıcı bilyadan kopan parçalar yüzeyde aşınma ürünlerinin arasındadır. 8 no'lu numuneye 5N yük uygulandığında yüzeyde ince yivler oluşmuştur (Şekil 8.134). Yük 7N olduğunda plastik deformasyon şiddetlenmiş fakat yük 9N olduğunda yüzeyden derin yarıklar oluşmuş sert abrazif karakterli aşınmaların meydana geldiği görülmüştür (Şekil 8.135 ve Şekil 8.136).



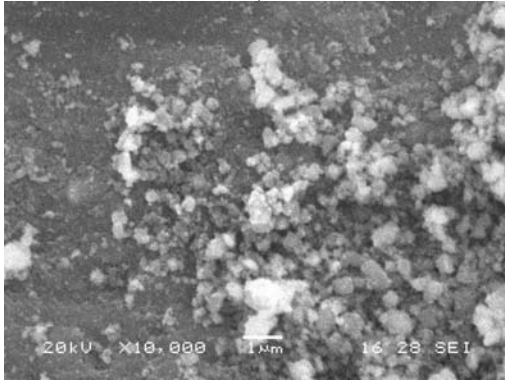
Şekil 8.133 7 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri, a) aşınma yüzey görüntüsü, b) yüksek büyütmede aşınma ürünleri



a)

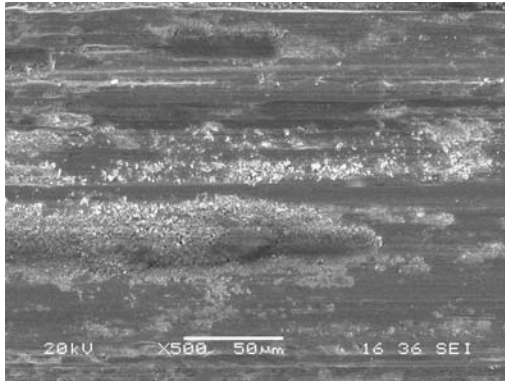


b)

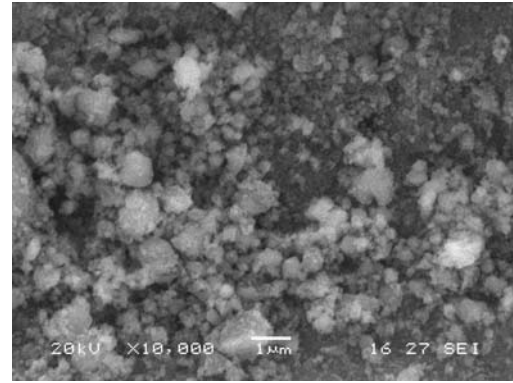


c)

Şekil 8.134 8 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) yüksek büyütmede aşınma ürünleri

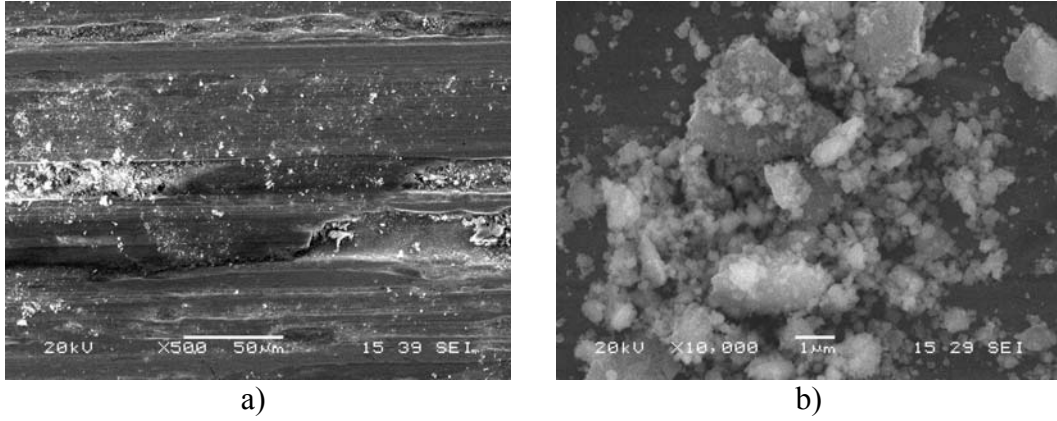


a)



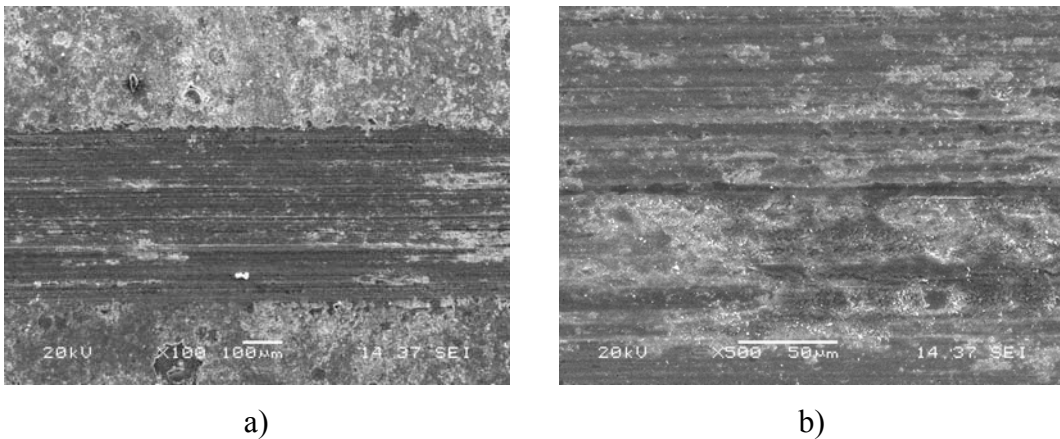
b)

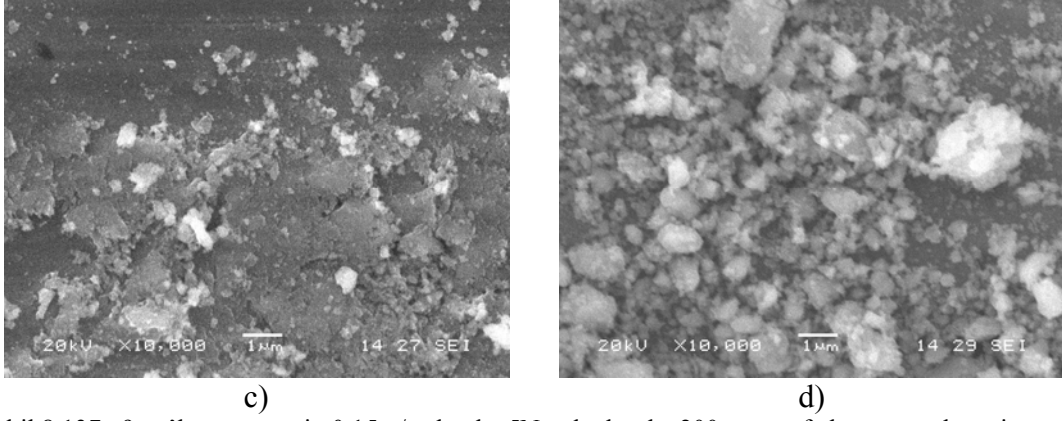
Şekil 8.135 8 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma yüzey görüntüsü, b) yüksek büyütmede aşınma ürünleri



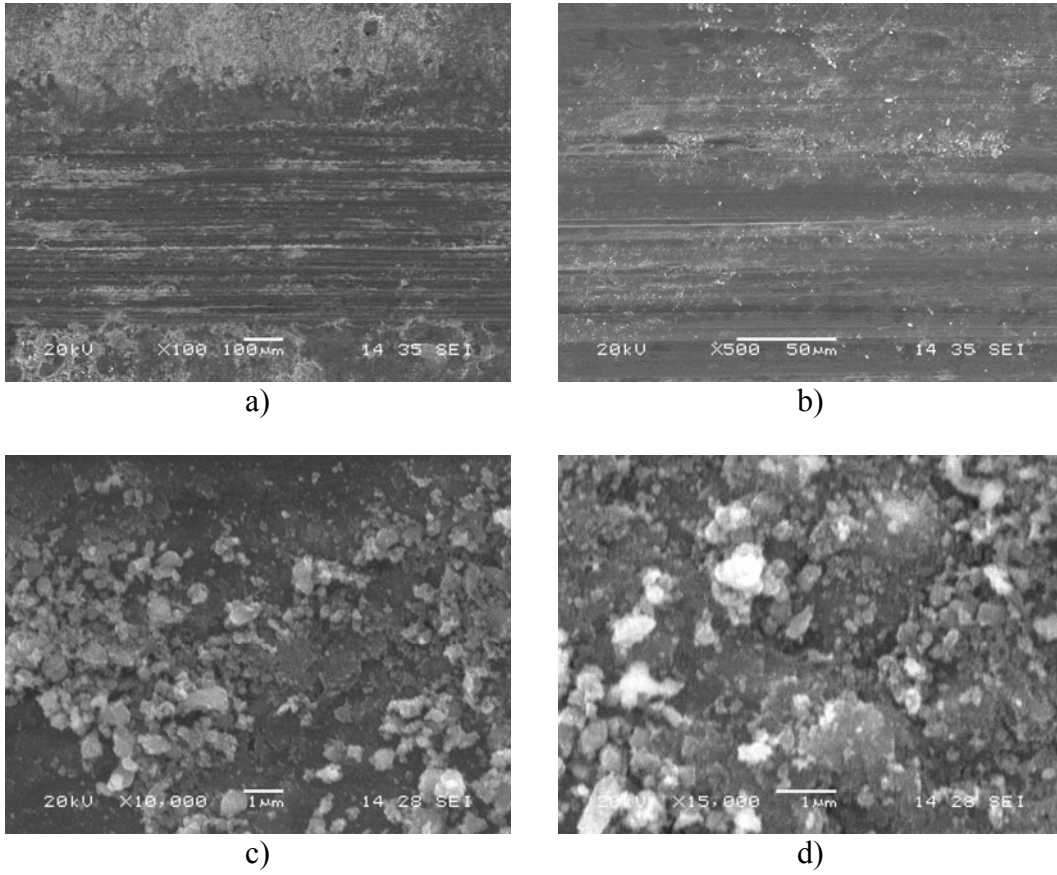
Şekil 8.136 8 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 9N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma yüzey görüntüsü, b) yüksek büyütmede aşınma ürünleri

Şekil 8.137'de 9 no'lu numunenin 5 N yük altında elde edilen aşınma yüzeylerinden alınmış SEM görüntüleri verilmektedir. Bu görüntülere göre plastik deformasyon ve süreksizlik mevcuttur. Az miktarda yiv görülmektedir. Yük 7N olduğunda ise yivler genişlemiştir(Şekil 8.138). 9N yükte ise yüzeyde kızaklama aşınma sonucu yivler derinleşmiştir. Yüzeyde yine aşınma ürünleri gözükmemektedir (Şekil 8.139). 5N yük altında oluşmuş aşınma ürünlerinden alınan EDS analizlerine bakıldığında beyaz olarak görülen tane parçalarının alümina bilyadan geldiği görülmüştür (Şekil 8.140). 10 no'lu numune grubunda ise 5N yük altında elde edilmiş SEM görüntüleri Şekil 8.141'de görülmektedir. Plastik deformasyon ve yiv oluşumları görülmektedir. Yük değişimlerinde de aynı oluşumlar devamlılık göstermiştir (Şekil 8.142 ve Şekil 8.143). 10 no'lu numuneye ait EDS analizleri Şekil 8.144'de görülmektedir. Aşınma ürünlerinden alınan EDS analizleri beyaz renkte ki parçaların aşındırıcı bilyaya ait olduğunu desteklemektedir.

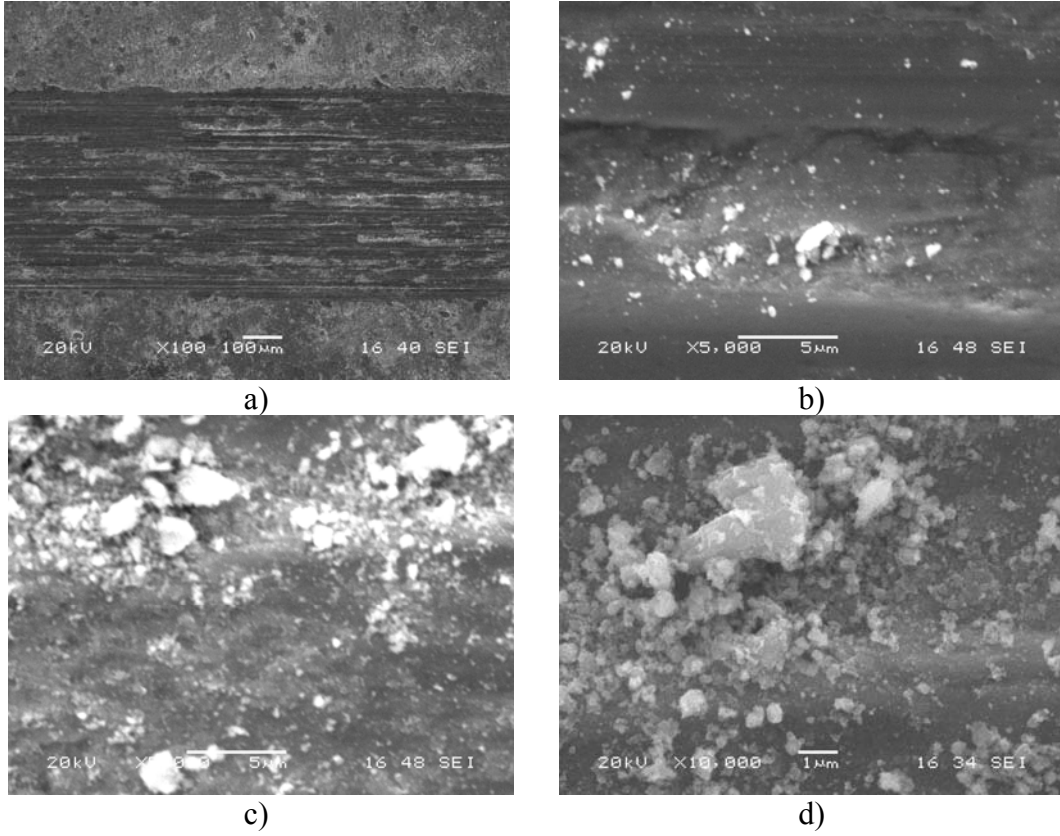




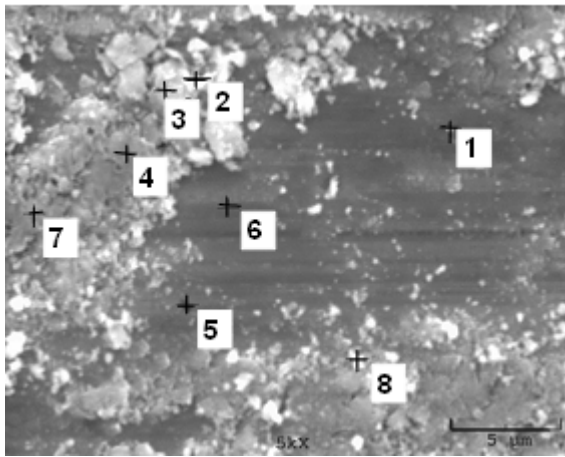
Şekil 8.137 9 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) yüksek büyütmede aşınma ürünleri



Şekil 8.138 9 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) yüksek büyütmede aşınma ürünleri



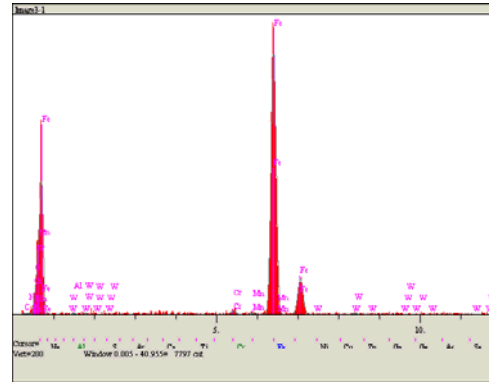
Şekil 8.139 9 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 9N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



a)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	2.429
N	1.917
O	2.403
Al	0.264
Cr	0.602
Mn	0.371
Fe	89.332
W	2.682
	100.000

c)



b)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	4.626
N	1.564
O	33.312
Al	0.275
Cr	0.428
Mn	0.045
Fe	58.536
W	1.214
	100.000

d)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	6.436
N	3.875
O	40.046
Al	0.257
Cr	0.365
Mn	0.229
Fe	47.195
W	1.597
	100.000

e)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	0.000
O	0.834
Al	0.551
S	2.162
Cr	0.792
Mn	2.355
Fe	89.870
W	1.436
	100.000

g)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.334
N	1.345
O	34.409
Al	0.354
Cr	0.410
Mn	0.384
Fe	60.896
W	1.869
	100.000

1)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	2.737
N	2.091
O	34.651
Al	0.063
Cr	0.332
Mn	0.229
Fe	58.088
W	1.809
	100.000

f)

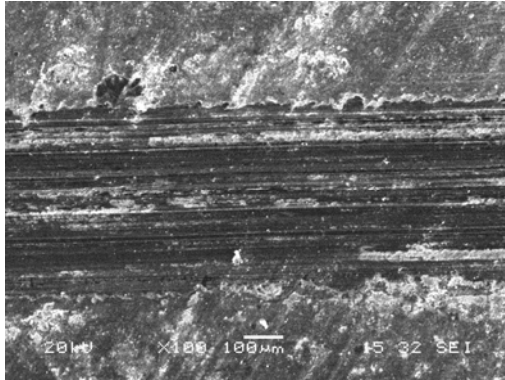
Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	7.747
N	2.970
O	27.931
Al	0.245
Cr	0.606
Mn	0.179
Fe	59.087
W	1.235
	100.000

h)

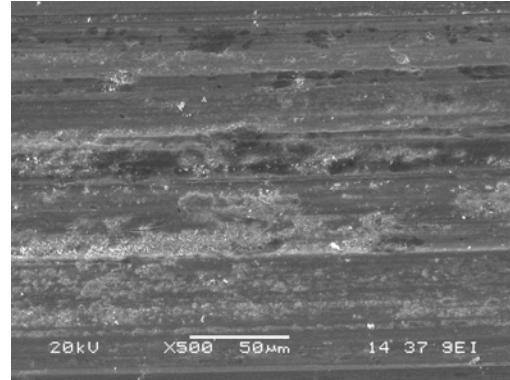
Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	7.747
N	2.970
O	27.931
Al	0.245
Cr	0.606
Mn	0.179
Fe	59.087
W	1.235
	100.000

i)

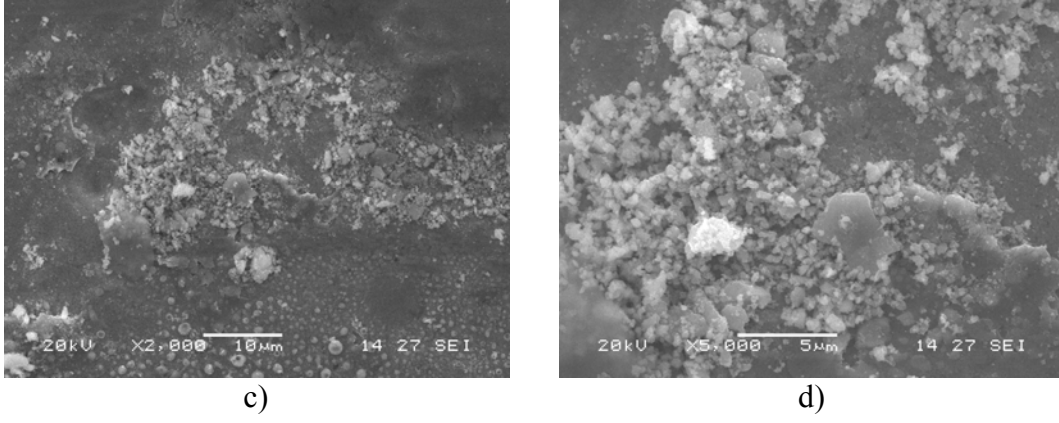
Şekil 8.140 9 no'lu numunenin 5N yük altında a) EDS resmi, b) 1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, ı)7, i)8 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri



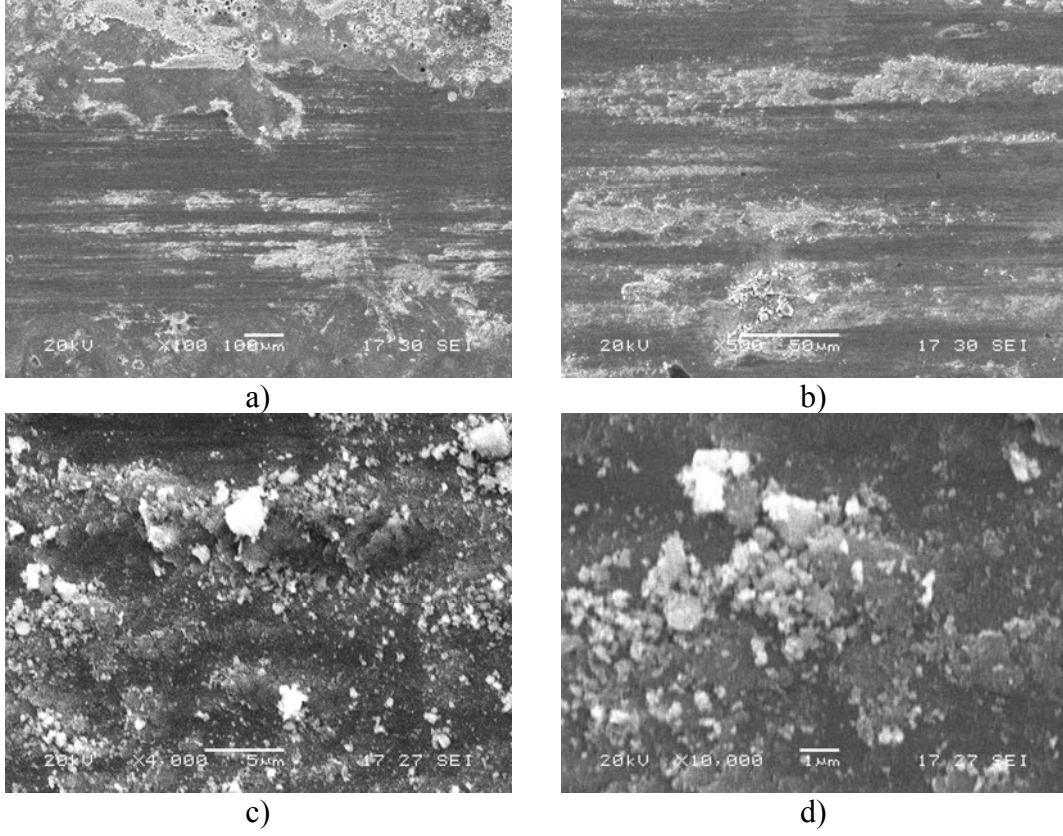
a)



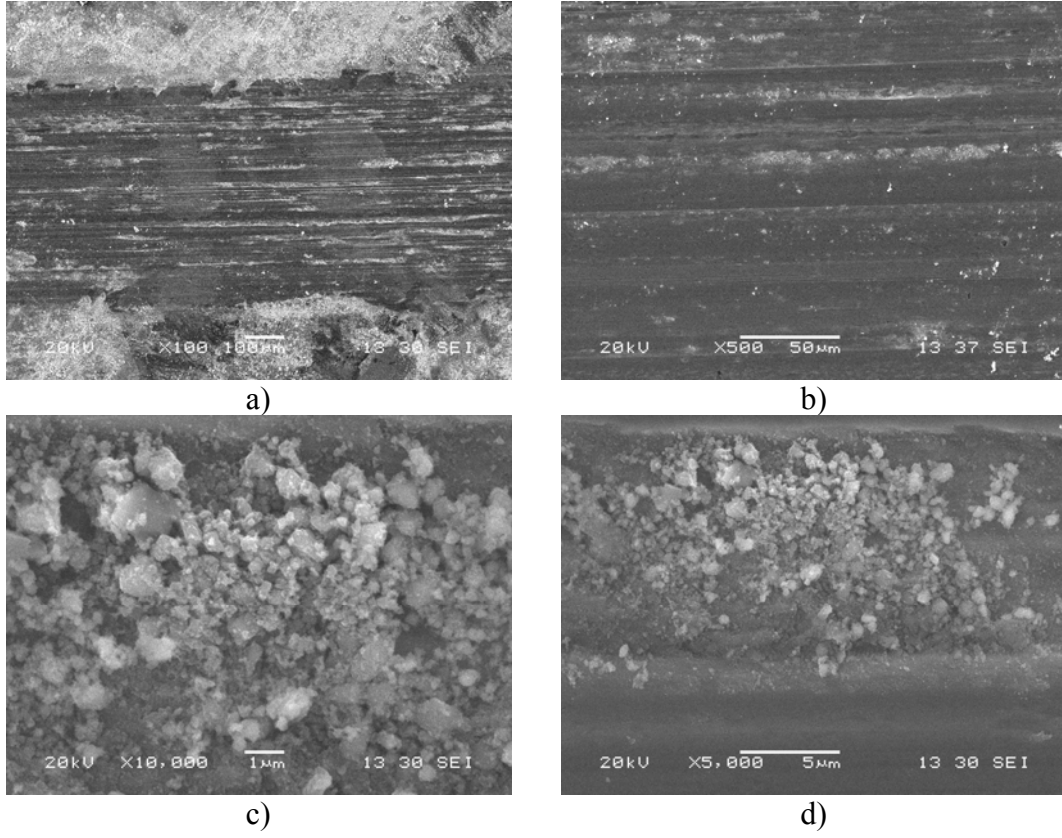
b)



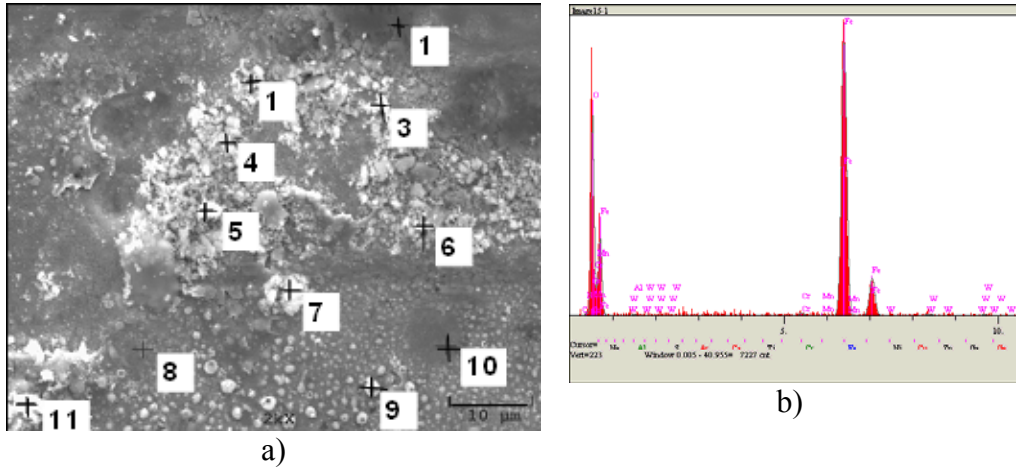
Şekil 8.141 10 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) yüksek büyütmede aşınma ürünleri



Şekil 8.142 10 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) yüksek büyütmede aşınma ürünleri



Şekil 8.143 10 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 9N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) yüksek büyütmede aşınma ürünleri



Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.636
O	36.645
Al	0.157
Cr	0.266
Mn	0.118
Fe	58.165
W	3.013
	100.000

c)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	4.163
N	2.950
O	33.500
Al	0.099
Cr	0.119
Mn	0.036
Fe	57.218
W	1.915
	100.000

d)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	3.503
N	3.752
O	40.995
Al	0.166
Cr	0.357
Mn	0.059
Fe	50.100
W	1.068
	100.000

e)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	11.973
N	2.772
O	44.712
Al	0.176
Cr	0.080
Mn	0.158
Fe	39.487
W	0.642
	100.000

f)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	6.409
N	4.402
O	50.201
Al	0.723
Cr	0.166
Mn	0.313
Fe	35.903
W	1.882
	100.000

g)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.882
N	4.650
O	41.981
Al	0.078
Cr	0.382
Mn	0.134
Fe	50.620
W	1.273
	100.000

h)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.381
N	3.610
O	43.543
Al	0.023
Cr	0.185
Mn	0.344
Fe	50.399
W	1.515
	100.000

ı)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	4.655
O	9.010
Al	0.352
Cr	0.351
Mn	0.436
Fe	83.509
W	1.685
	100.000

i)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	5.582
O	14.576
Al	0.244
Cr	0.193
Mn	0.098
Fe	76.664
W	2.643
	100.000

j)

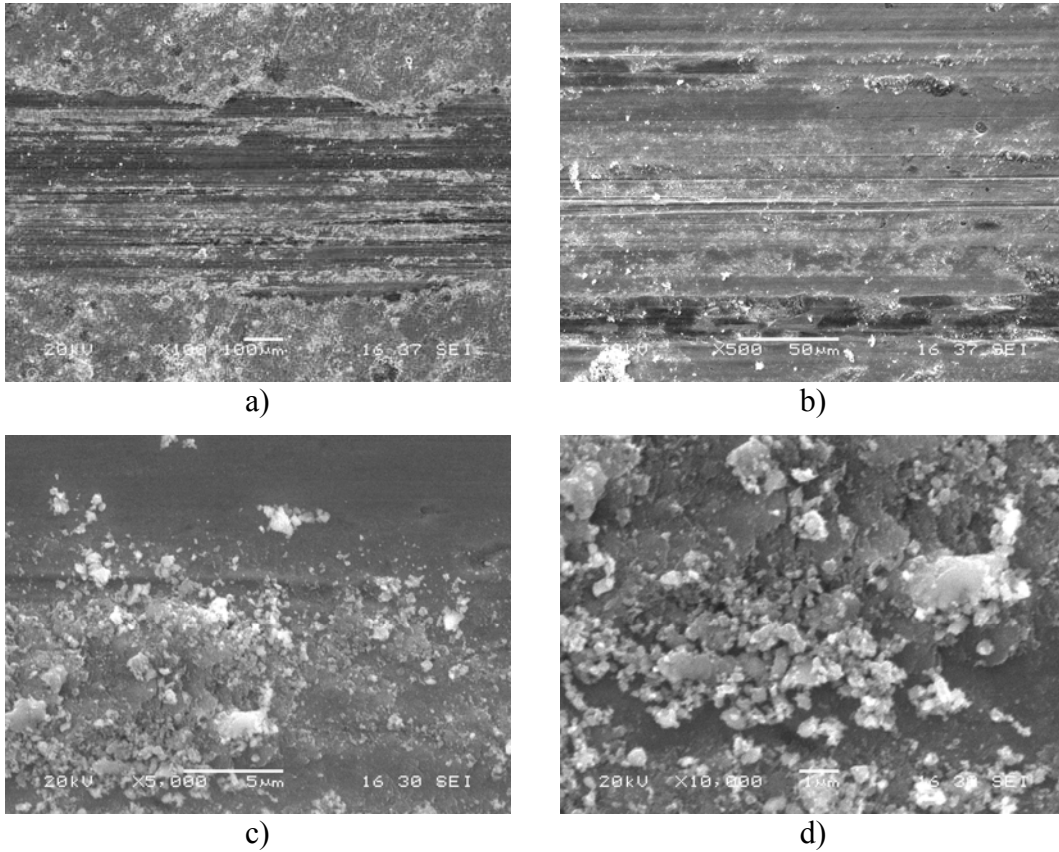
Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	4.184
O	6.223
Al	0.000
Cr	0.560
Mn	0.057
Fe	86.162
W	2.813
	100.000

k)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	5.339
N	2.422
O	51.648
Al	0.215
Cr	0.336
Mn	0.216
Fe	38.651
W	1.173
	100.000

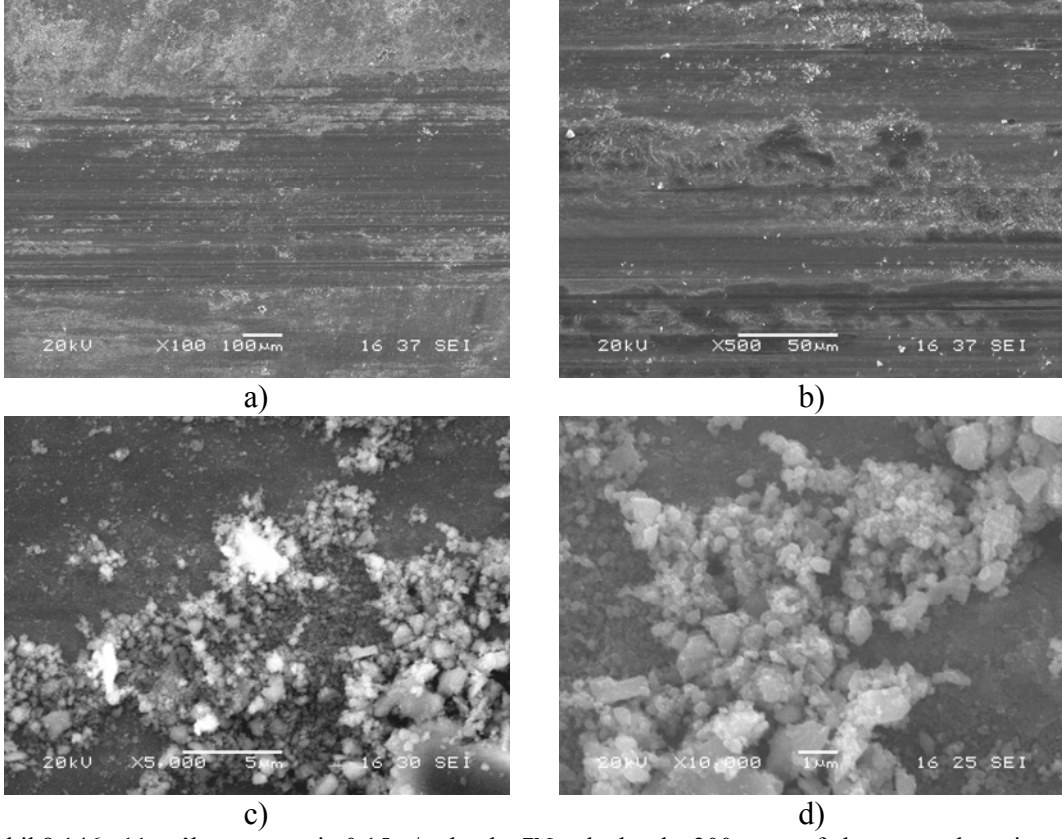
l)

Şekil 8.144 10 no'lu numunenin 5N yük altında a) EDS resmi, b) 1 no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, ı)7,i)8, j)9, k)10, l)11 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

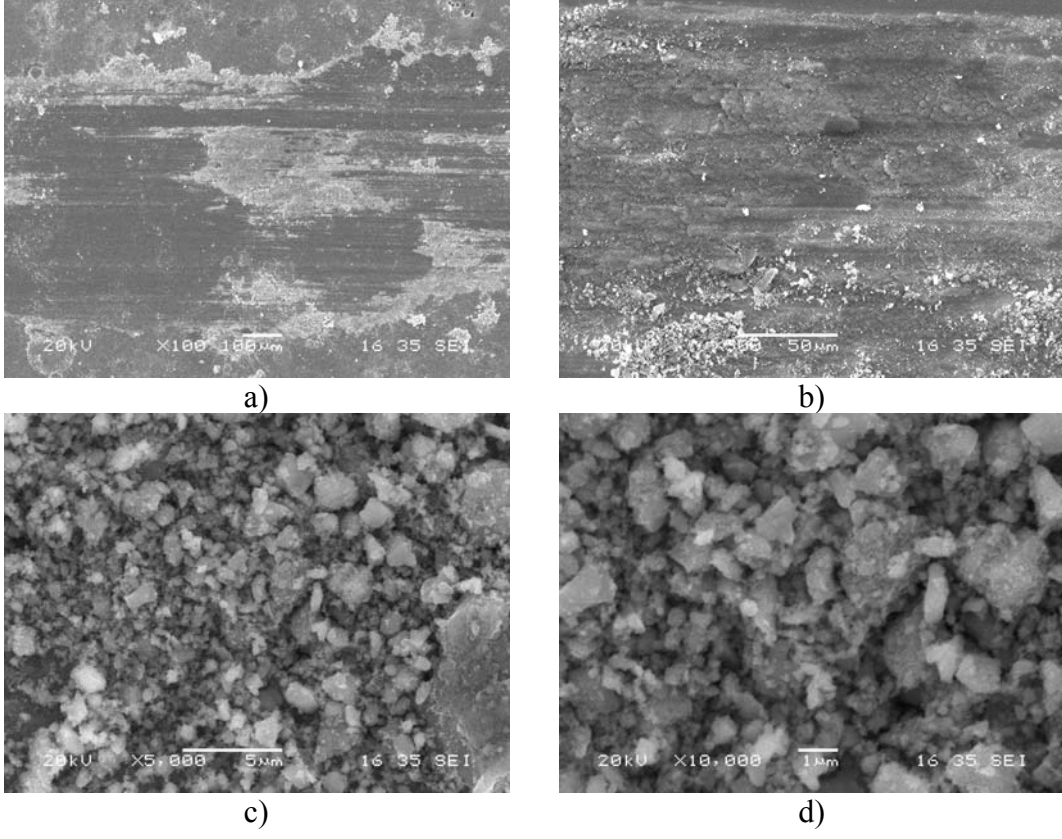


Şekil 8.145 11 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 5N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) yüksek büyütmede aşınma ürünleri

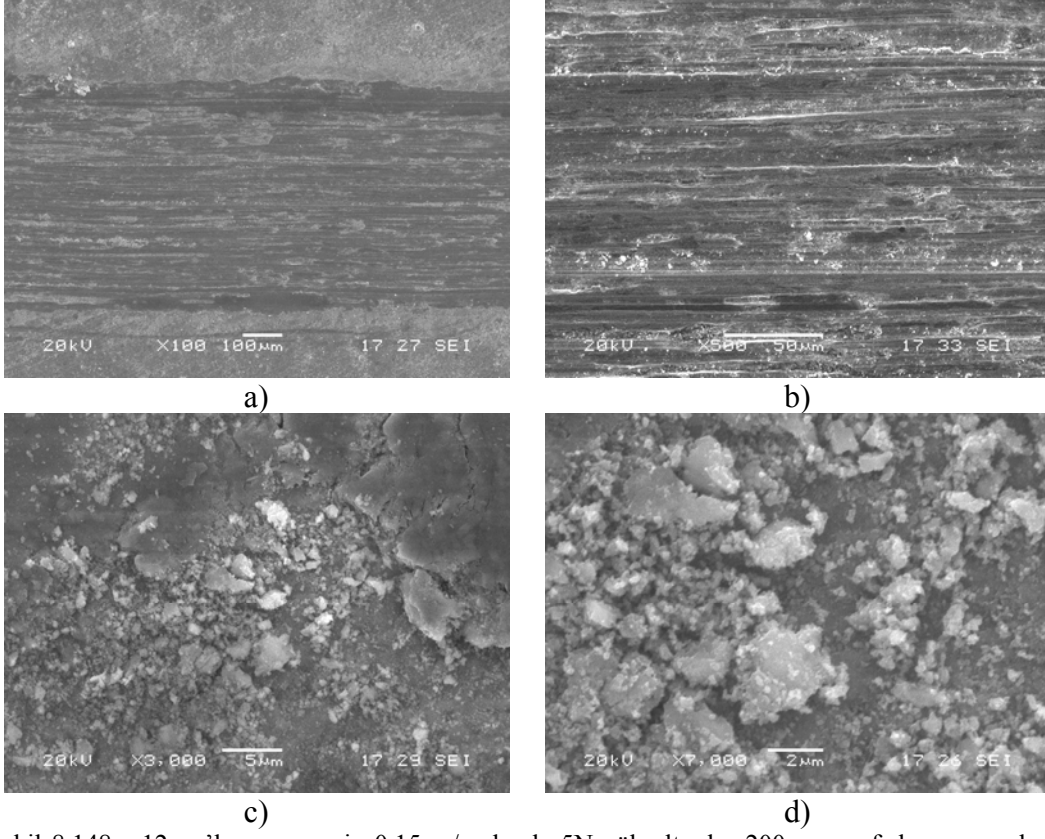
Şekil 8.145'de görülen 11 no'lu numunenin 5N yük altında yapılmış deney sonrası aşınma yüzeylerinden alınmış SEM görüntülerine bakıldığında az bir oranda yiv oluşumları görülmüştür. Yük 7N olunca yine yivler meydana gelmiş aşınma ürünleri yüzeye sıvanmıştır. 9N yük altında ise yüzeyde bozulmalar artmış ve kopmalar meydana gelmiştir (Şekil 8.146 ve Şekil 8.147). 12 no'lu numunenin 5 N yük altında yapılmış aşınma deneyi sonrası elde edilmiş SEM görüntülerinde yüzeyde plastik deformasyon ve yivler oluşmuştur. Yük arttığında yüzeydeki yivler kuvvetlenmiş yer yer malzeme kopmalarına rastlanmıştır. Yüzeyde pulluklama aşınmanın izleri görülmektedir. Bu numuneye ait EDS analizlerinde ise yüzeyden kopmaların olduğu bölgede yer yer bilya parçalarına rastlanmıştır (Şekil 8.148-8.151).



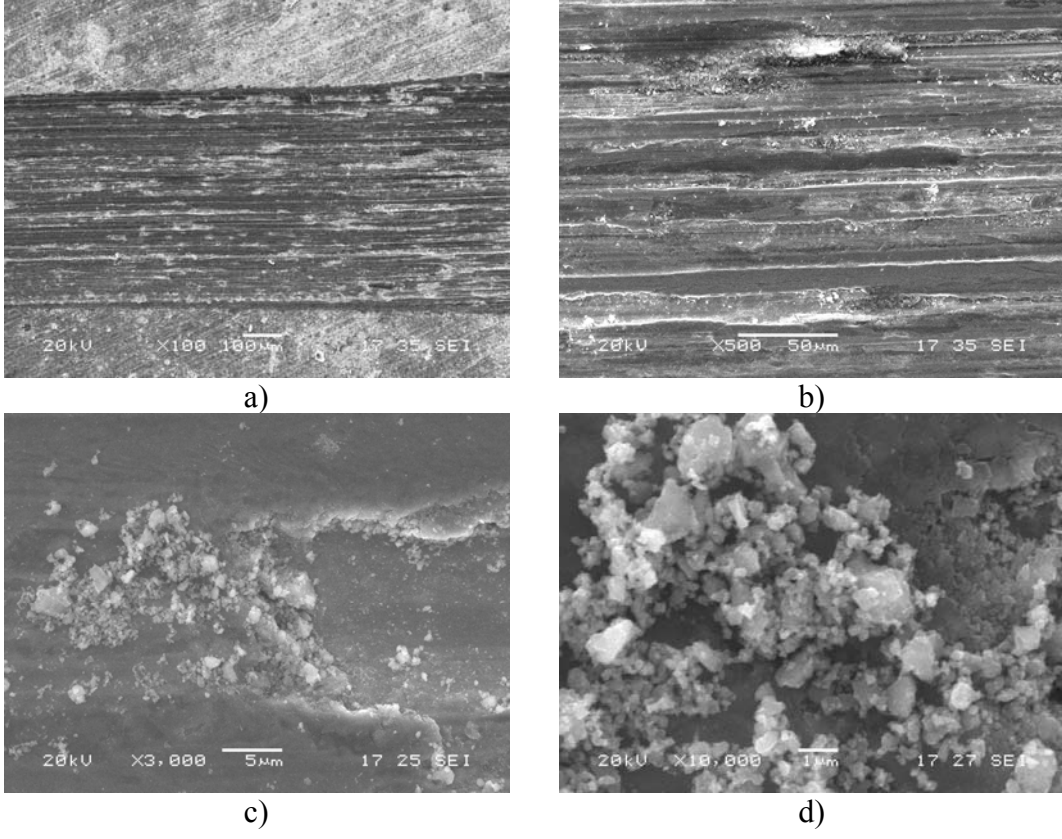
Şekil 8.146 11 no'lu numunenin 0.15m/sn hızda, 7N yük altında, 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri, d) yüksek büyütmede aşınma ürünleri



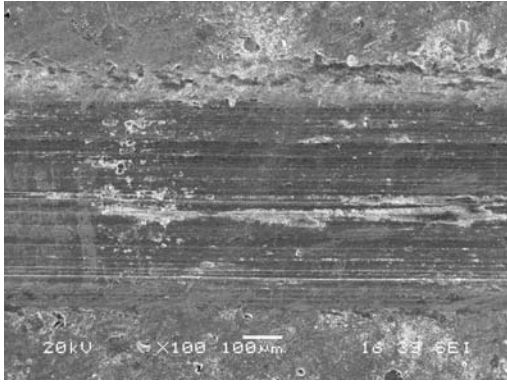
Şekil 8.147 11 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



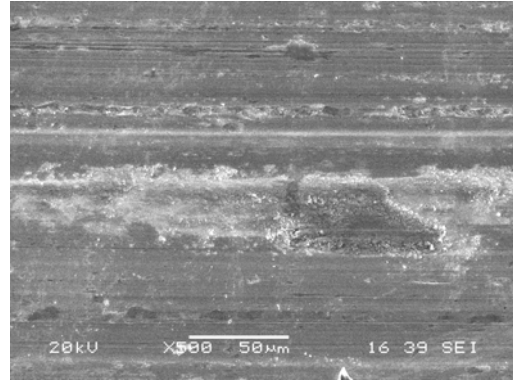
Şekil 8.148 12 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



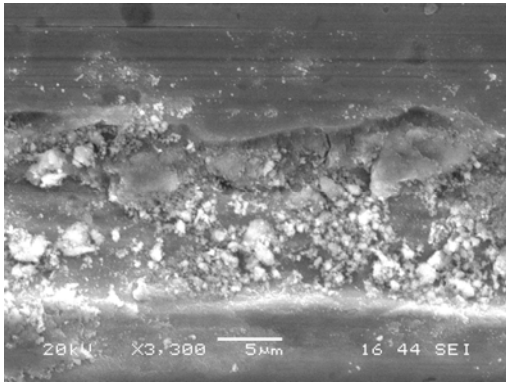
Şekil 8.149 12 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



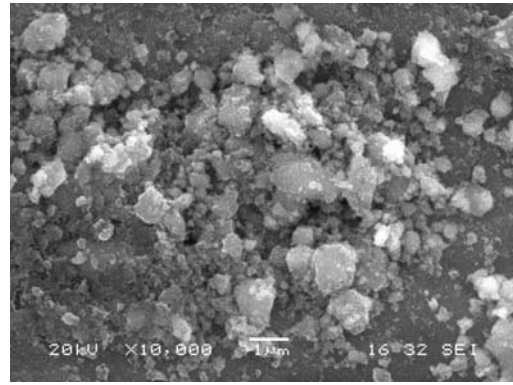
a)



b)

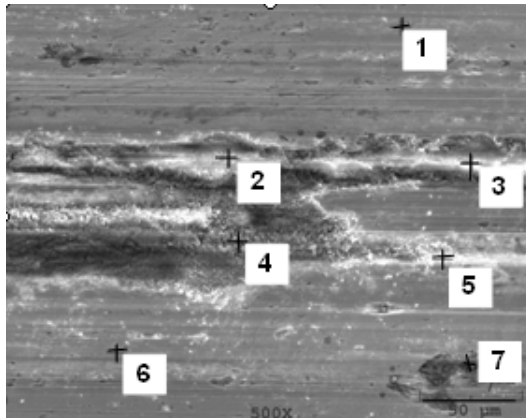


c)

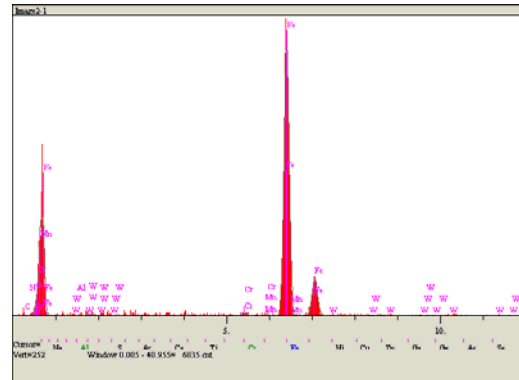


d)

Şekil 8.150 12 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



a)



b)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	1.907
N	0.529
O	1.513
Al	0.049
Cr	0.521
Mn	0.365
Fe	92.549
W	2.566
	100.000

c)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.577
O	45.310
Al	0.941
Cr	0.801
Mn	0.341
Fe	48.857
W	2.174
	100.000

d)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	3.120
N	2.160
O	48.683
Al	0.357
Cr	0.307
Mn	0.291
Fe	42.468
W	2.615
	100.000

e)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.066
O	40.078
Al	0.466
Cr	0.644
Mn	0.506
Fe	55.718
W	1.522
	100.000

f)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	6.868
N	1.811
O	21.692
Al	0.112
Cr	0.416
Mn	0.487
Fe	66.944
W	1.669
	100.000

g)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	0.000
O	3.247
Al	0.148
Cr	0.710
Mn	0.252
Fe	92.803
W	2.840
	100.000

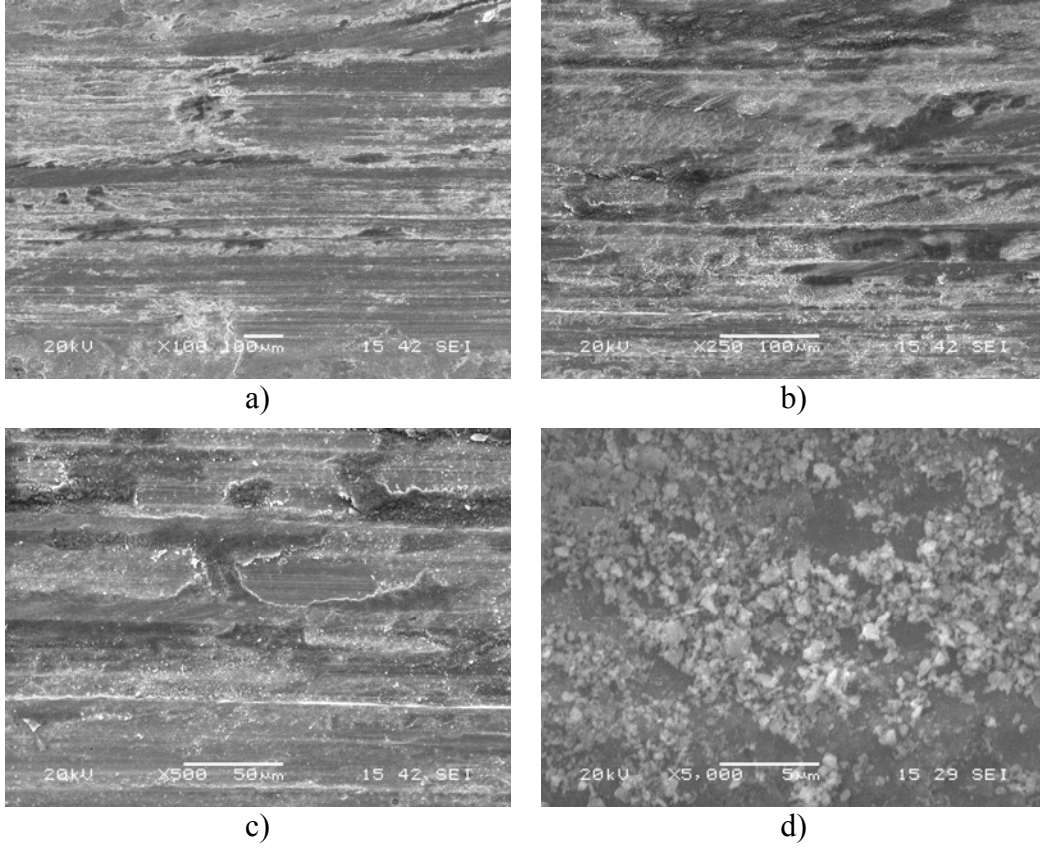
h)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	11.541
N	0.140
O	31.452
Al	0.000
Cr	0.448
Mn	0.077
Fe	53.892
W	2.449
	100.000

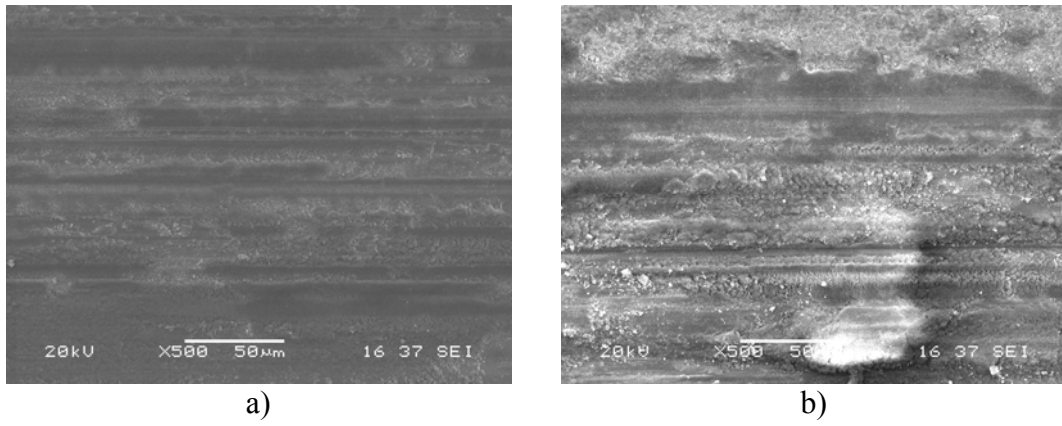
ı)

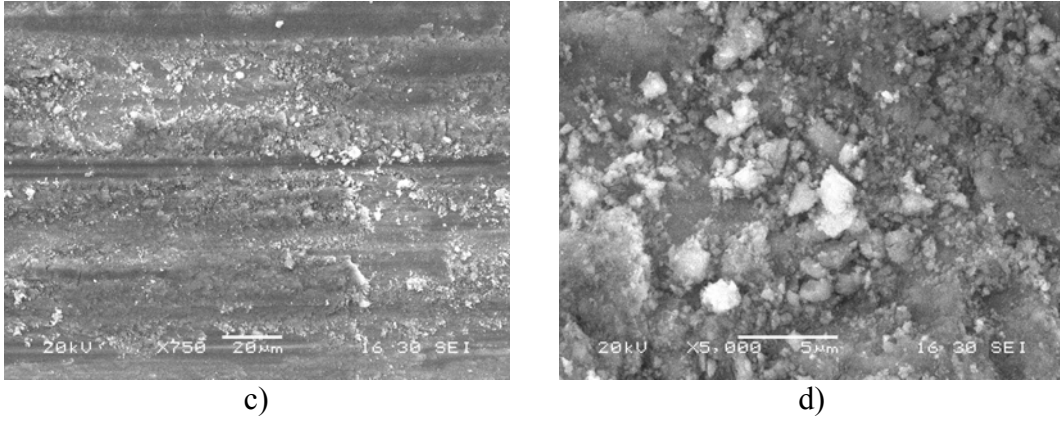
Şekil 8.151 12 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1no'lu noktanın grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, ı)7 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

Şekil 8.152'de görülmekte olan 13 no'lu numunenin aşınma yüzeyinden alınan SEM görüntülerine göre yivler oluşmuştur. Yer yer abrazif aşınma meydana gelmiştir. Yüzeyde süreksizlikler mevcuttur. Yük 7N olduğunda yüzeydeki yivler derinleşmiş ve pulluklama aşınması sonucu yüzeyde aşınma ürünleri oluşmuştur (Şek.8.153-Şek.8.154). Aynı numuneye ait EDS analizleri ile kopmaların olduğu bölgede bilya parçalarının fazlalığı belirlenmiştir (Şekil 8.155).

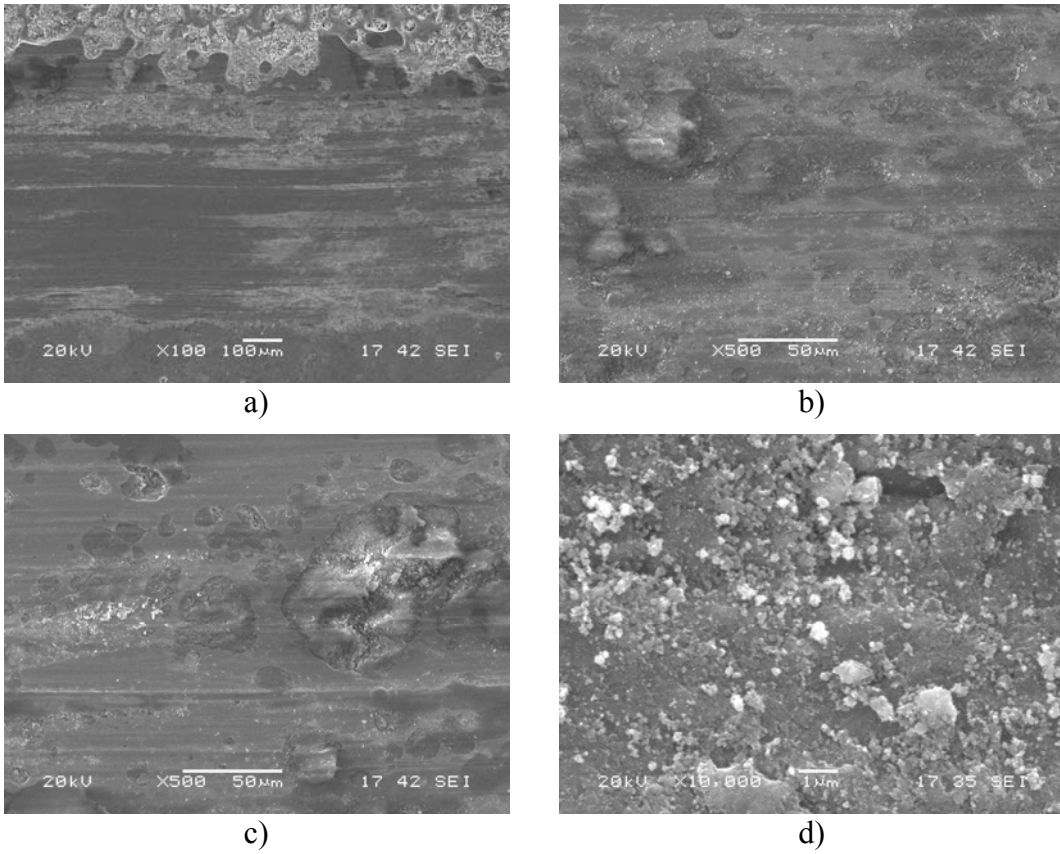


Şekil 8.152 13 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü b)farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri

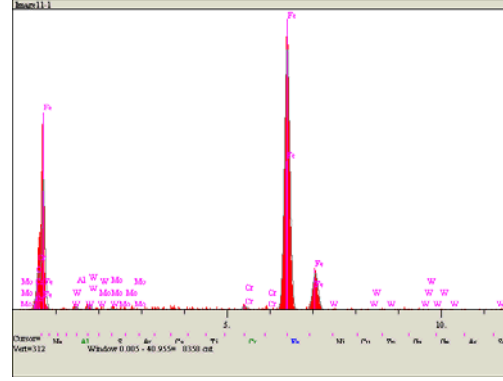
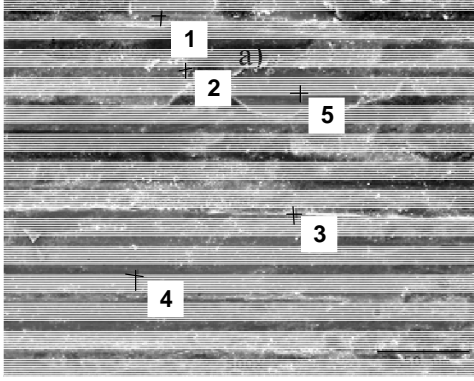




Şekil 8.153 13 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü b)farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



Şekil 8.154 13 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü b)farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



a)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça%)
N	0.701
O	0.000
Al	0.538
Cr	0.453
Fe	96.674
Mo	0.435
W	1.200
	100.000

b)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça%)
N	2.882
O	43.561
Al	0.323
Cr	0.628
Fe	50.492
Mo	0.337
W	1.776
	100.000

c)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça%)
N	1.638
O	11.212
Al	0.304
Cr	0.944
Fe	83.961
Mo	0.855
W	1.086
	100.000

d)

Elt.	Sonuç (ağırlıkça%)
N	0.563
O	0.000
Al	0.222
Cr	0.898
Fe	95.778
Mo	0.253
W	2.285
	100.000

e)

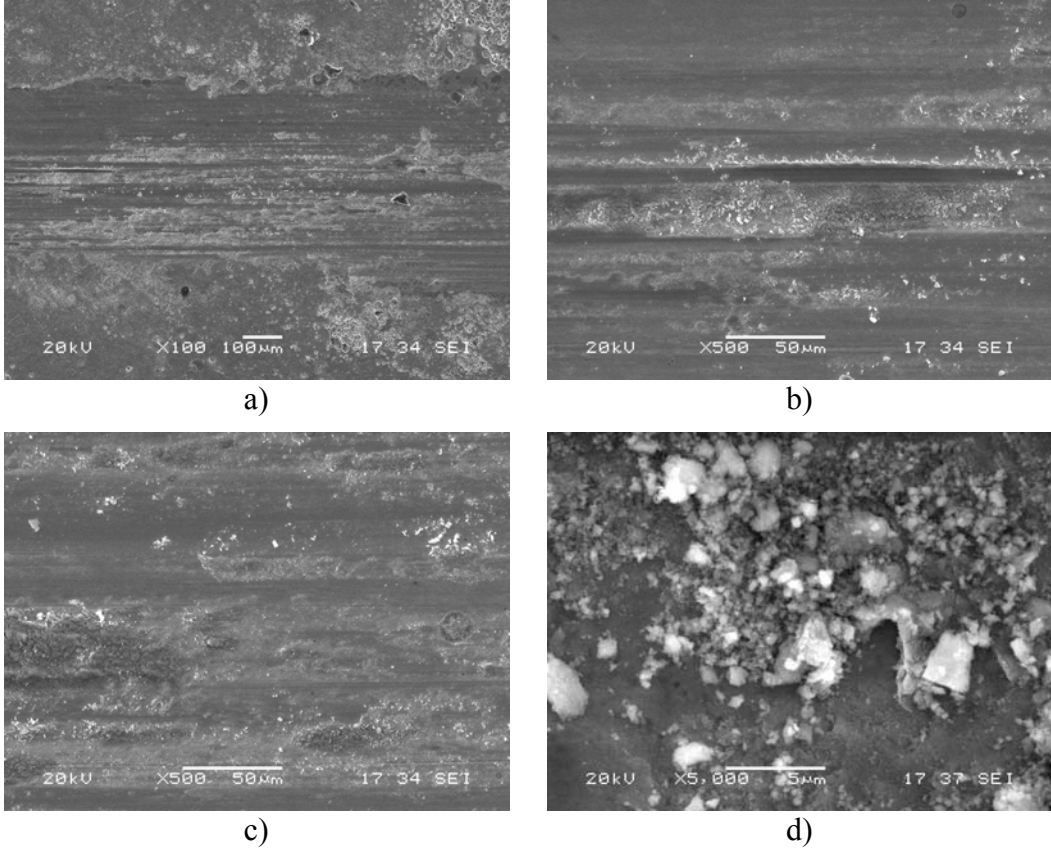
Elt.	Sonuç (ağırlıkça%)
N	0.950
O	0.000
Al	0.332
Ar	0.115
Cr	0.750
Fe	96.221
Mo	0.103
W	1.527
	100.000

f)

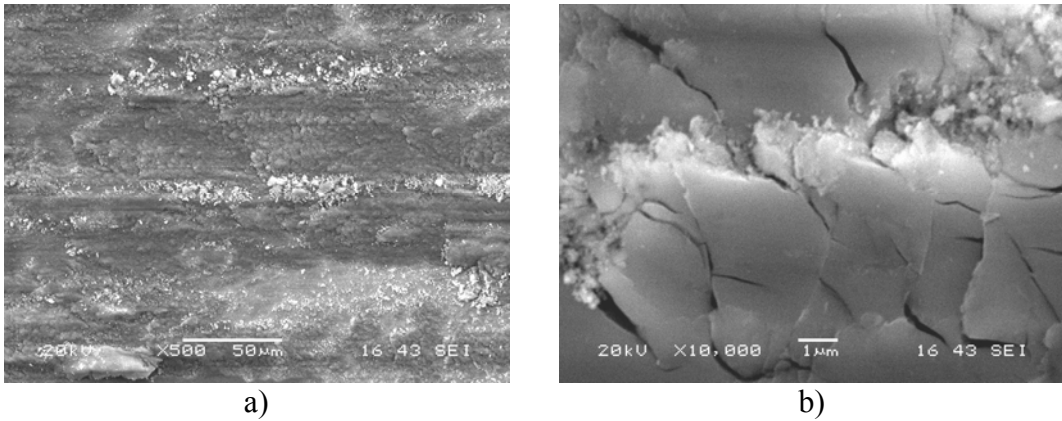
g)

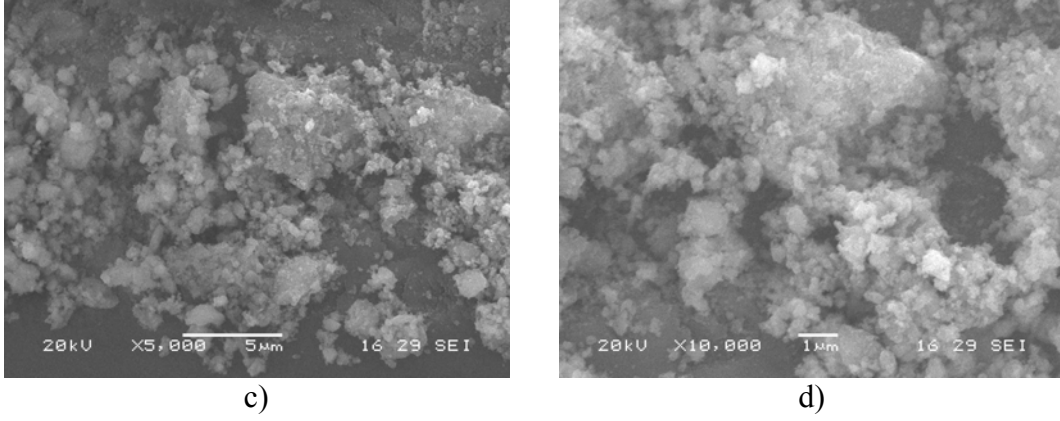
Şekil 8.155 13 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1no'lu noktanın analizinin grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

Şekil 8.156'da görülen 14 no'lu numunenin aşınma sonrası yüzeyinden alınan SEM görüntülerinde 5N yük altında yapıda yiv oluşumları görülmektedir. Aşınma ürünleri yüzeyde dağılmıştır. Plastik deformasyon izleri mevcuttur. Yük 7N olunca deformasyon artmış yüksek büyütmelerde çatlaklar belirlenmiştir ve adhezif aşınma gözlemlenmiştir. Aşınma ürünleri yine yüzeyde görülmektedir (Şekil 8.157). Yük 9N olunca ise aşınma ürünleri artmıştır (Şekil 8.158).

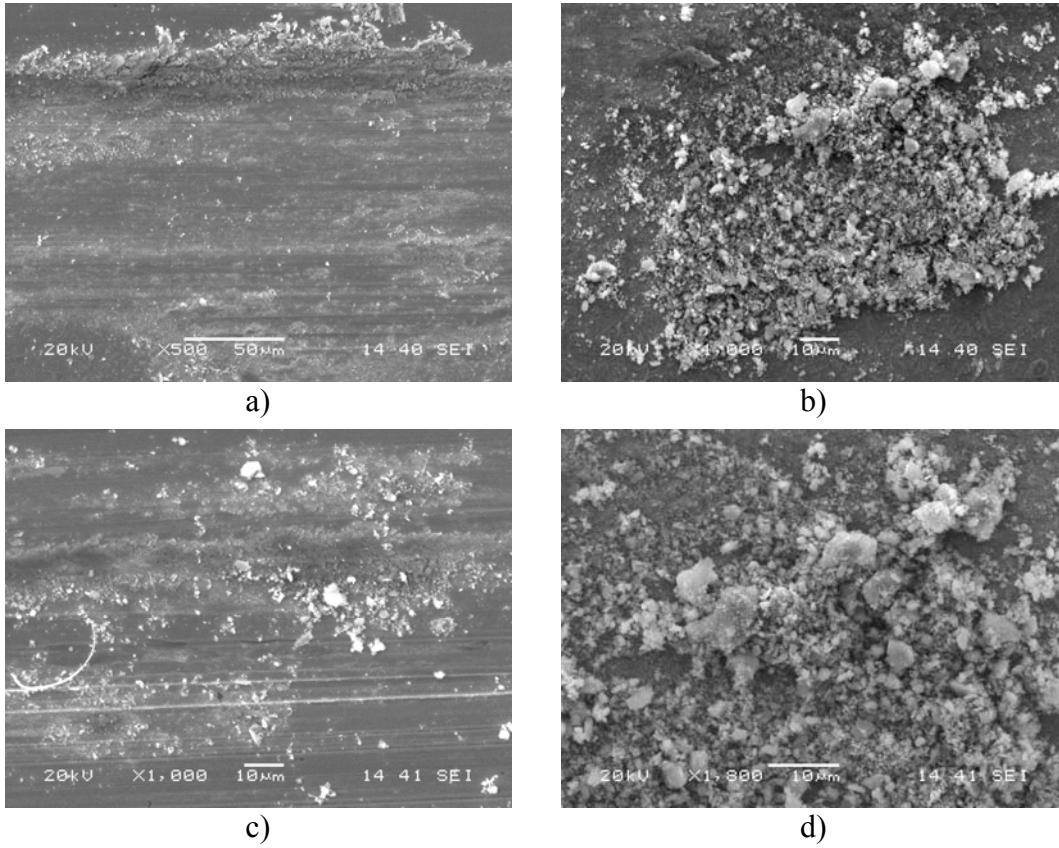


Şekil 8.156 14 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri





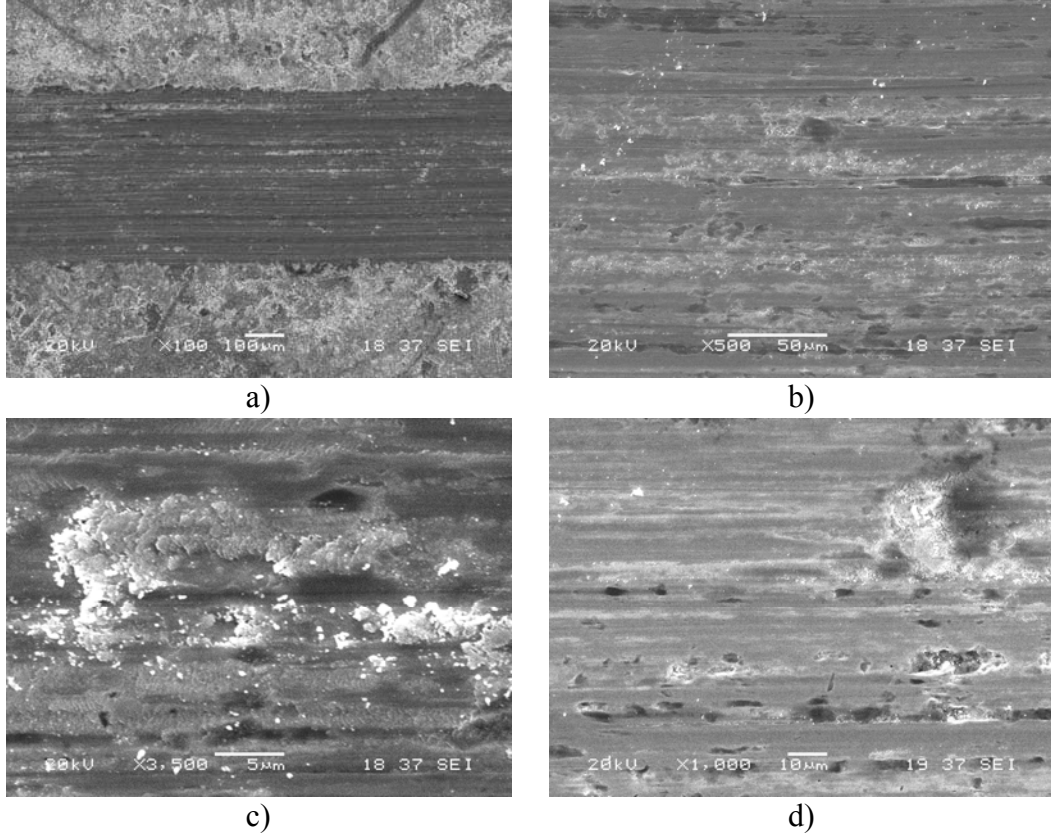
Şekil 8.157 14 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



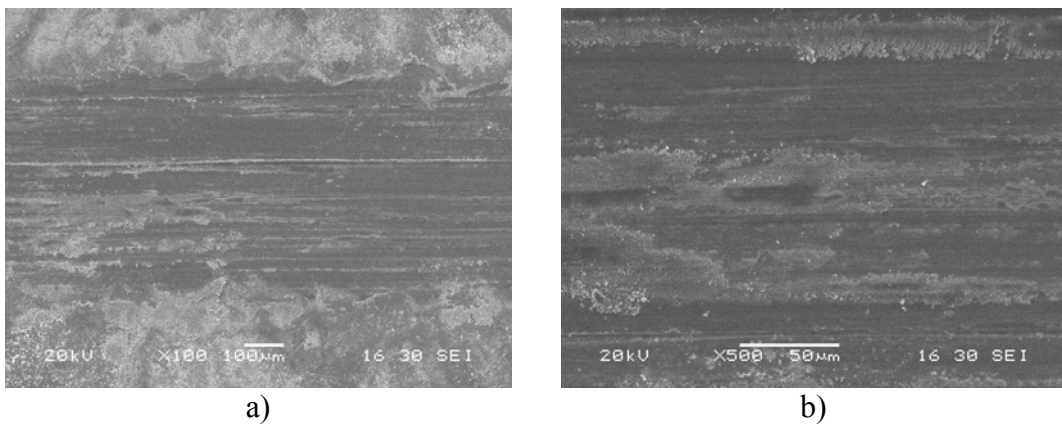
Şekil 8.158 14 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri

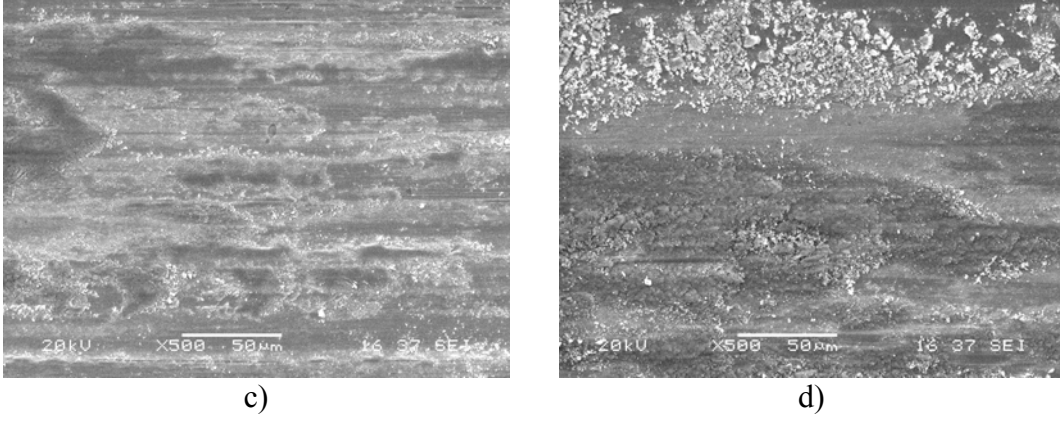
15 no'lu numuneye ait aşınma yüzey SEM görüntülerinde ise plastik deformasyon ve süreksizlikler belirlenmiştir. İnce yivler mevcuttur. Adhezif oluşumda yüzeyde görülmektedir. Yer yer yüzeyden abrazif aşınmadan dolayı malzeme kayıpları meydana gelmiştir (Şekil 8.159). Yük artınca yüzeyde ki abrazif aşınma artmış ve

aşınma ürünleri yüzeye sıvanmıştır. Yivler derinleşmiştir (Şekil 8.160-Şekil 8.161). EDS analiz sonuçlarına göre ise aşınma ürünlerinde bilya parçalarının fazlalığı dikkat çekicidir (Şekil 8.162).

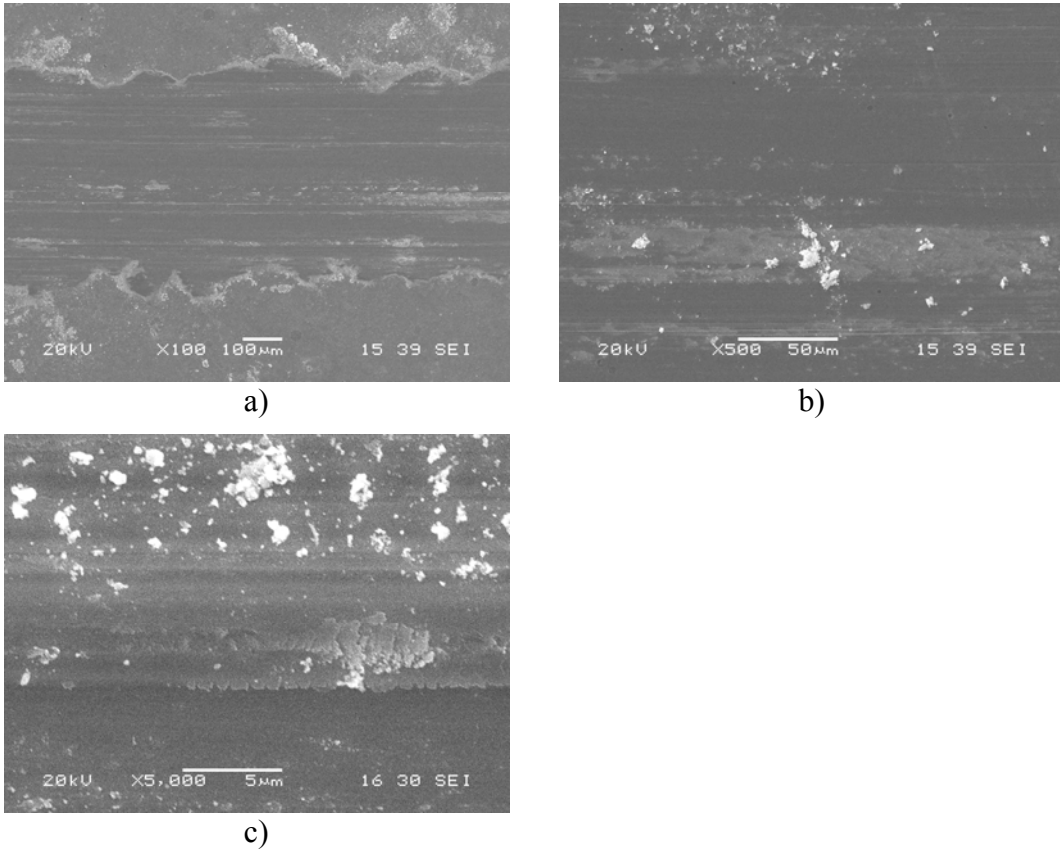


Şekil 8.159 15 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri

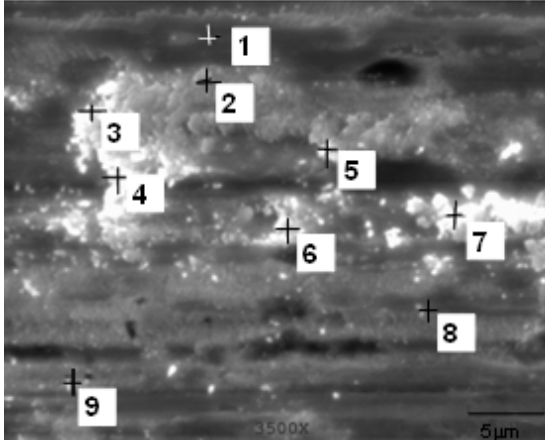




Şekil 8.160 15 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



Şekil 8.161 15 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



a)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	0.380
O	11.833
Al	0.006
Cr	0.536
Mn	0.164
Fe	85.116
W	1.965
	100.000

c)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	6.415
N	3.021
O	17.895
Al	0.468
Cr	0.677
Mn	0.202
Fe	69.605
W	1.717
	100.000

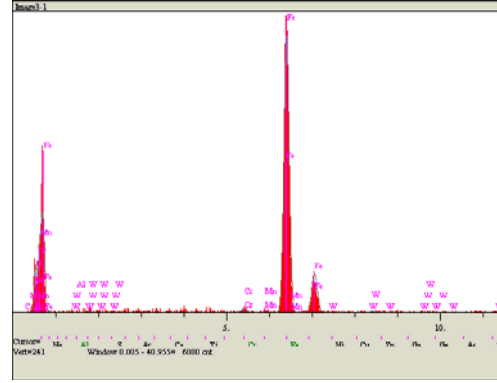
e)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.104
O	21.427
Al	0.756
Cr	0.628
Mn	0.461
Fe	73.038
	100.000

g)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	5.127
N	3.633
O	21.804
Al	0.487
Cr	0.575
Mn	0.122
Fe	67.794
	100.000

i)



b)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.161
O	21.705
Al	0.249
P	0.257
Cr	0.666
Mn	0.060
Fe	73.271
W	2.631
	100.000

d)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	3.528
N	2.040
O	25.115
Al	0.671
Cr	0.622
Mn	0.665
Fe	64.851
W	2.508
	100.000

f)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.012
O	14.374
Al	0.274
Cr	0.377
Mn	0.414
Fe	81.815
W	1.734
	100.000

h)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	0.000
O	10.022
Al	0.097
Cr	0.538
Mn	0.322
Fe	86.490
W	2.532
	100.000

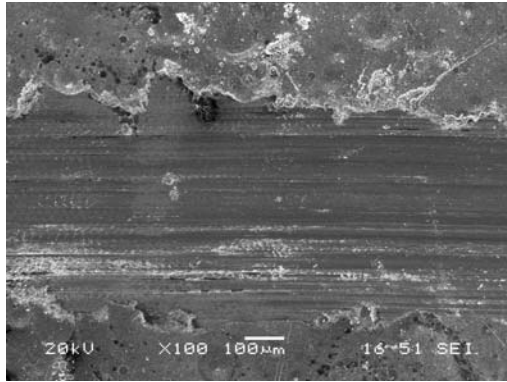
j)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.843
O	6.804
Al	0.296
Cr	0.771
Mn	0.604
Fe	86.974
W	2.708
	100.000

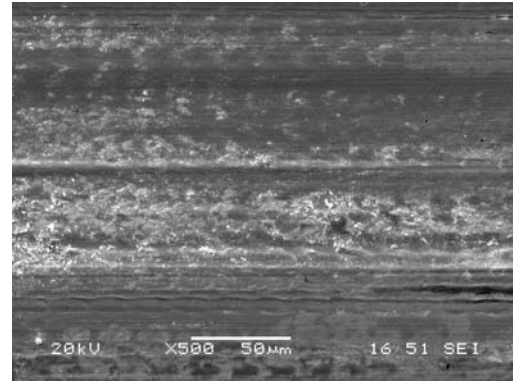
j)

Şekil 8.162 15 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1.nolu noktanın analizinin grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6, ı)7,i)8, j)9 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

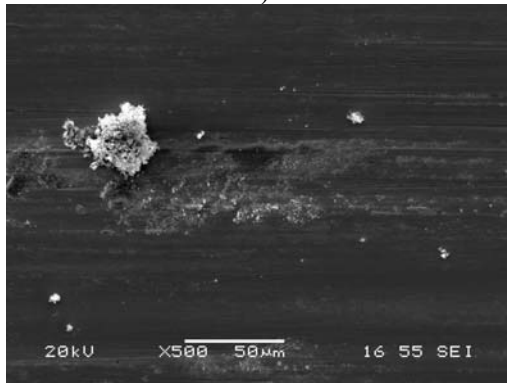
Şekil 8.163'de 16 no'lu numunede ise yüzeyinde pulluklama aşınma meydana gelmiştir. Yük artınca aşınma yivler derinleşmiştir. (Şekil 8.164-Şekil 8.165). EDS analizlerinde yine aşınma ürünlerinin içinde bilya parçacıkları belirlenmiştir (Şekil 8.166). 17 no'lu numunelerde 5N yük altında ise yüzeyde plastik deformasyon ve kazımalı aşınma sonucu oluşan aşınma ürünleri görülmektedir. Yük 7N ve 9N olunca ise yüzeydeki deformasyon süreci artmıştır. Yivler derinleşmiştir (Şekil 8.167-169).



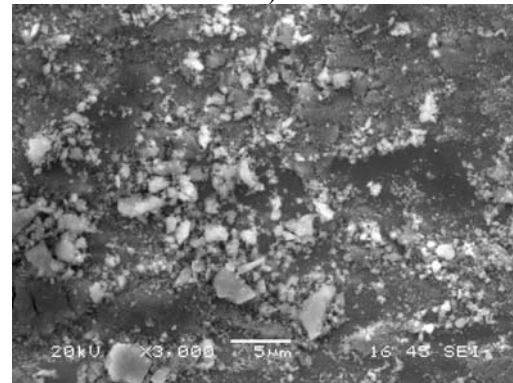
a)



b)

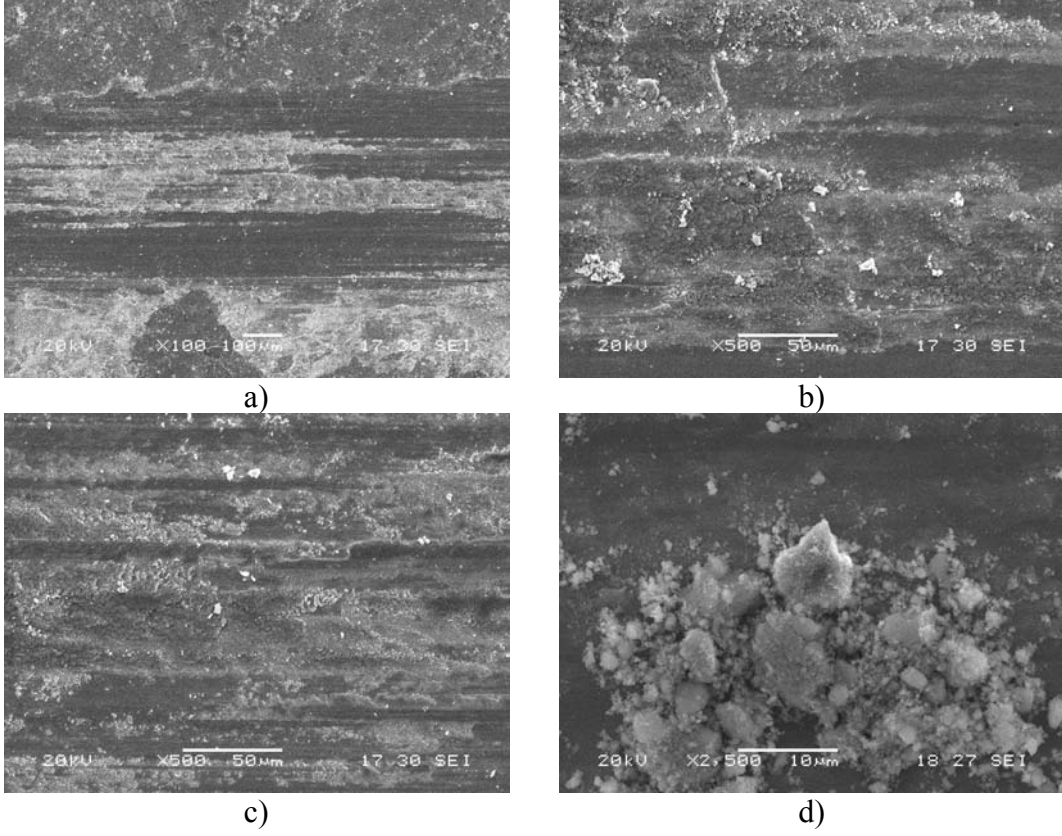


c)

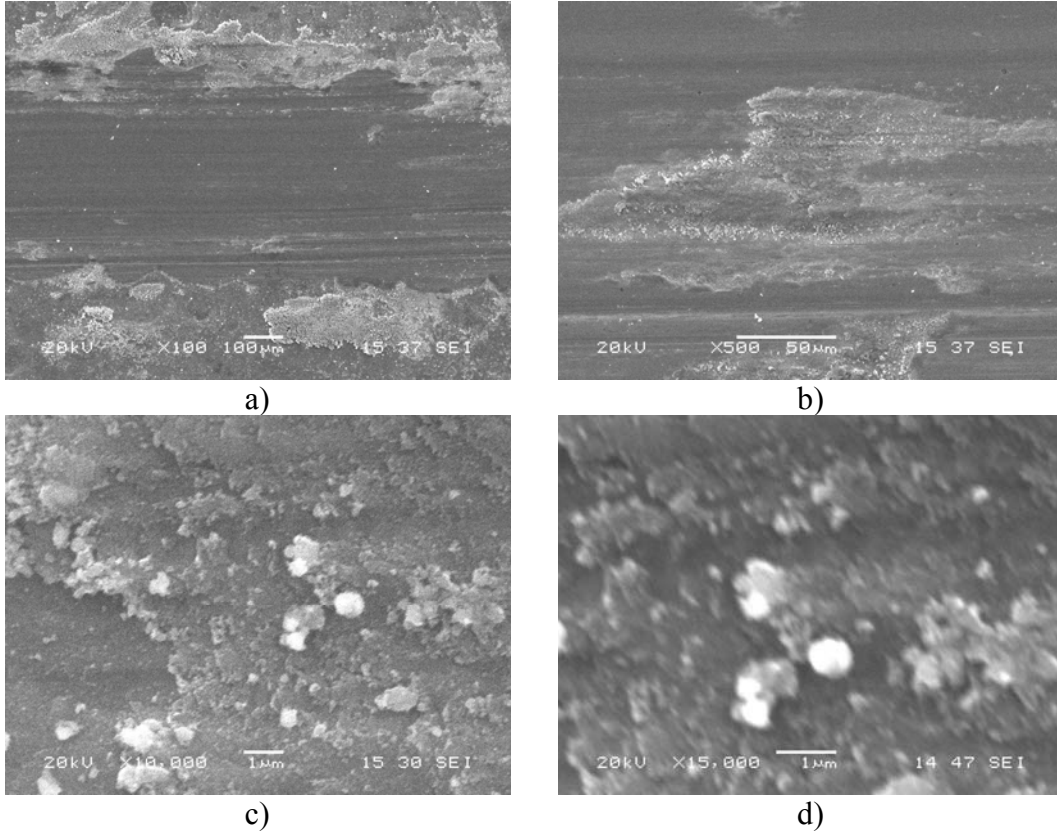


d)

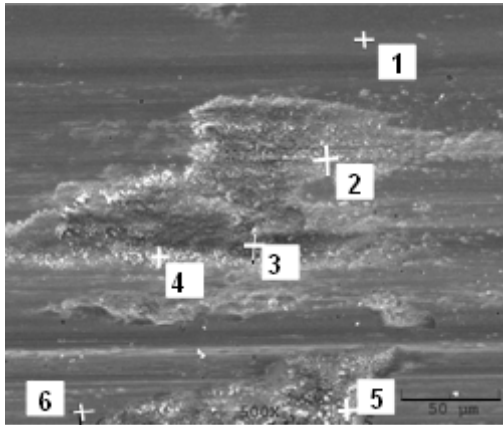
Şekil 8.163 16 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



Şekil 8.164 15 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)yüksek büyütmede aşınma ürünleri



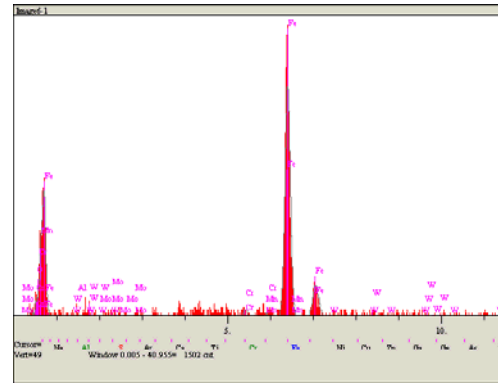
Şekil 8.165 16 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d) yüksek büyütmede aşınma ürünleri



a)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	5.831
O	5.308
Al	0.466
Cr	0.997
Mn	1.358
Fe	85.499
Mo	0.540
W	0.000
	100.000

c)



b)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	3.039
O	16.124
Al	0.390
Cr	1.548
Mn	1.642
Fe	65.018
Mo	0.435
W	11.803
	100.000

d)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.235
O	38.531
Al	1.682
Cr	1.757
Mn	2.555
Fe	53.679
Mo	0.559
W	0.000
	100.000

e)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	0.000
O	14.527
Al	0.539
V	0.816
Cr	2.195
Mn	0.666
Fe	71.595
Mo	0.000
W	9.662
	100.000

g)

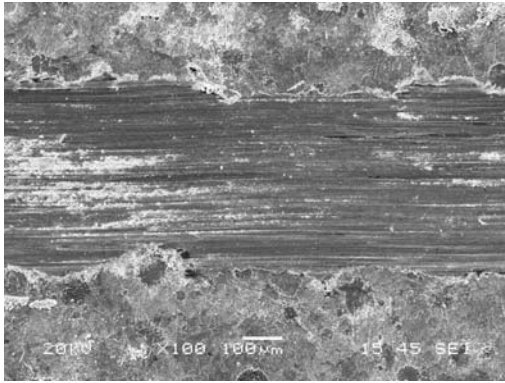
Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	0.000
O	32.360
Al	0.189
Cr	1.745
Mn	1.971
Fe	63.049
Mo	0.685
W	0.000
	100.000

f)

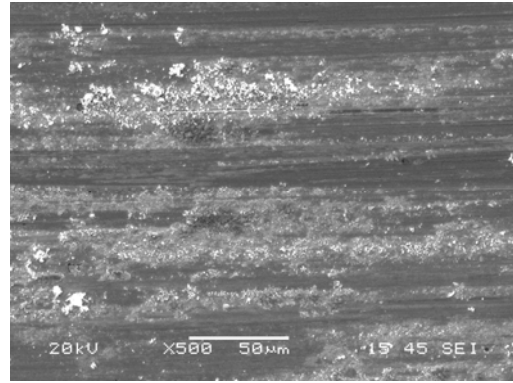
Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	0.000
O	0.000
Al	0.642
Cr	0.589
Mn	2.008
Fe	84.418
Mo	0.339
W	12.004
	100.000

h)

Şekil 8.166 16 no'lu numunenin 5Nyük altında a)EDS resmi, b)1.no'lu noktanın analizinin grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

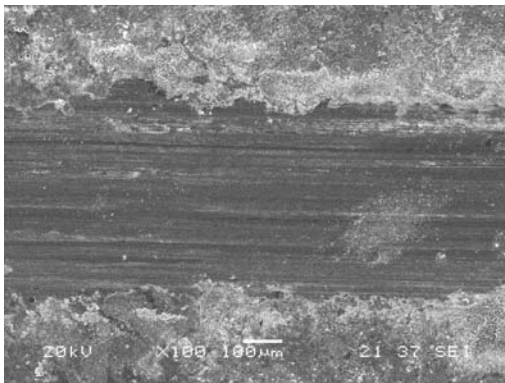


a)

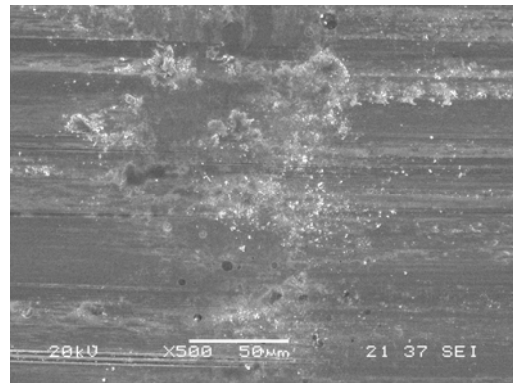


b)

Şekil 8.167 17 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü

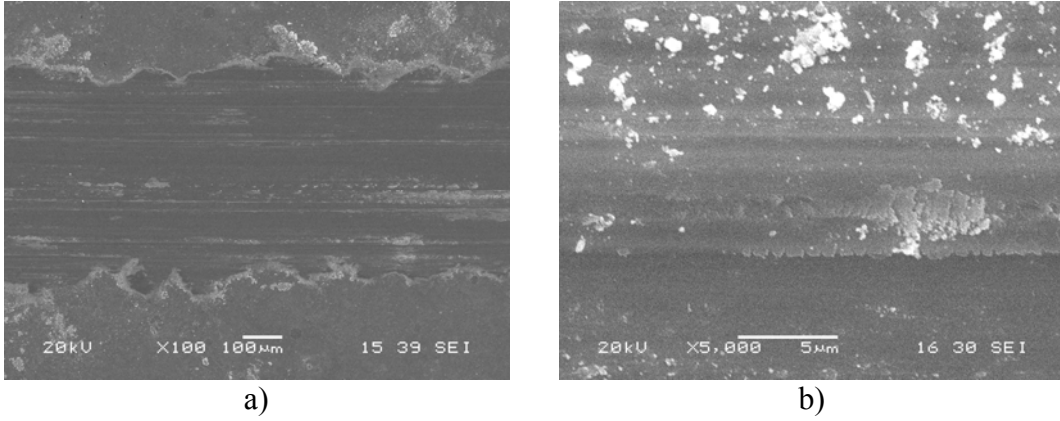


a)



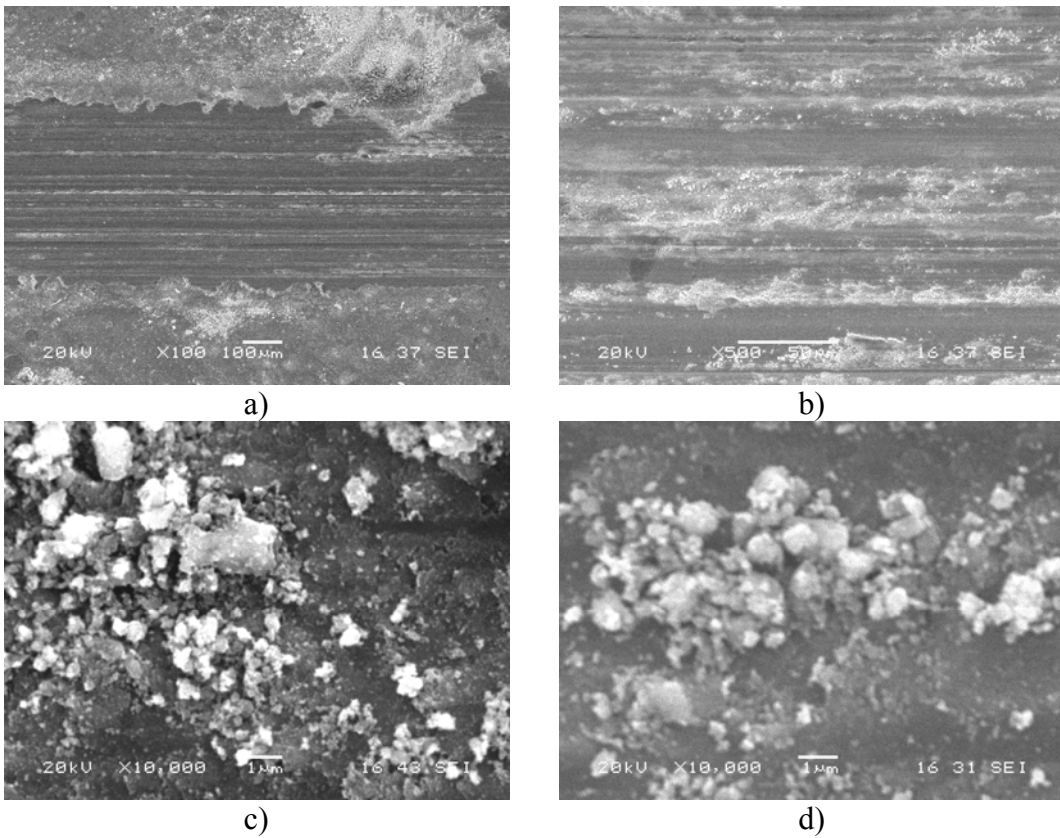
b)

Şekil 8.168 17 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü

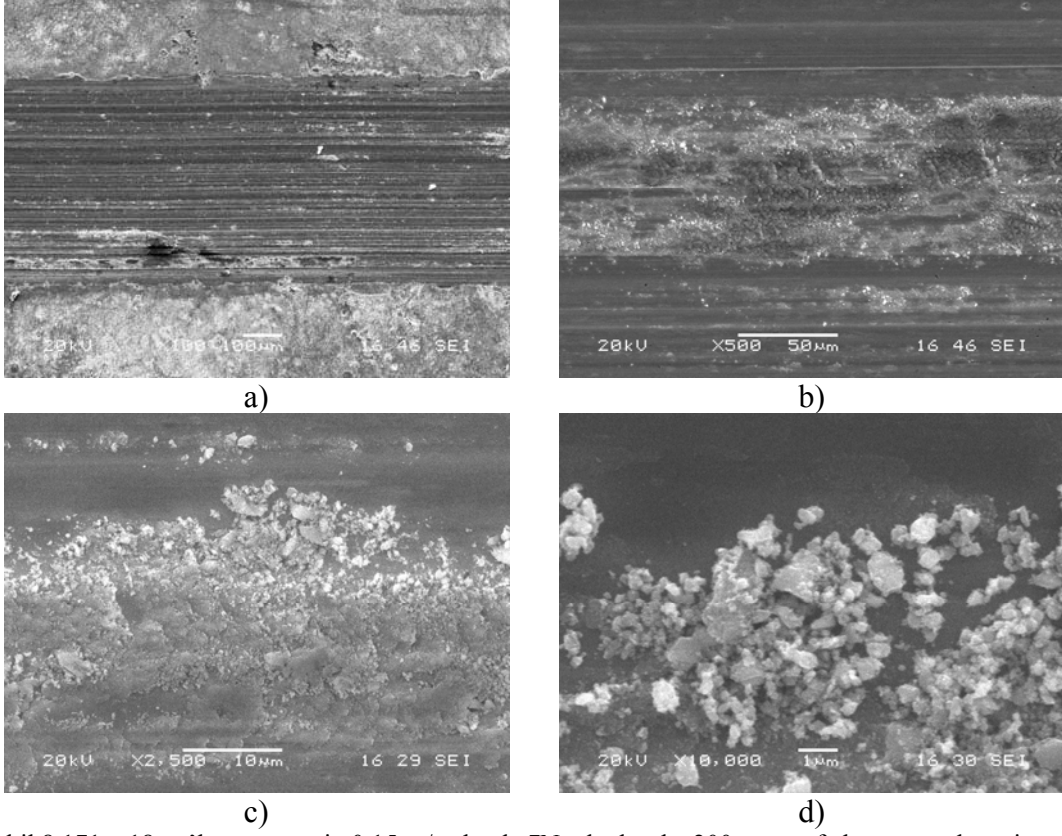


Şekil 8.169 17 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü

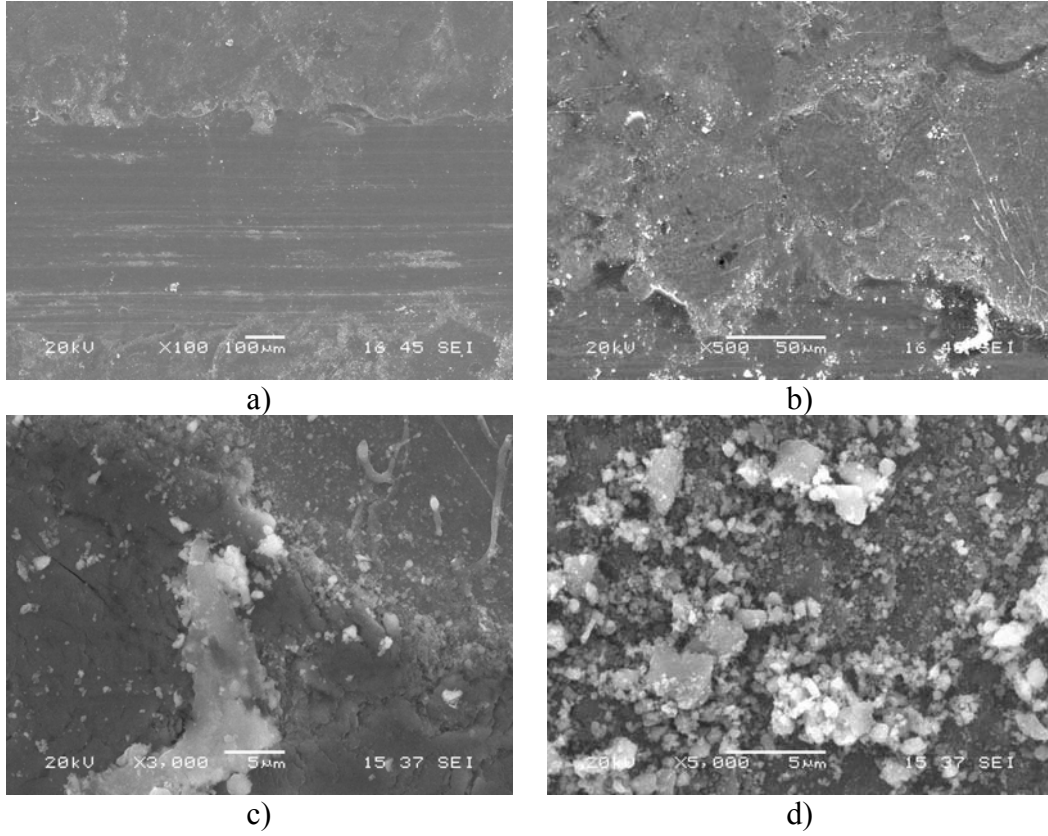
18 no'lu numune grubunda ise yüzeyinde yine diğer gruplarda da gördüğümüz ince yivler oluşmuştur. Kızaklama aşınma izleri mevcuttur. Yüzeyde aşınma ürünleri oldukça fazladır. Yük 7N ve 9N olduğunda yüzeyde aşınma izleri daha belirginleşmiştir (Şek.8.170-8.172). Yivler genişlemiş ve derinleşmiştir. Ayrıca numuneye ait EDS analizleri de Şekil 8.173'de gösterilmektedir.



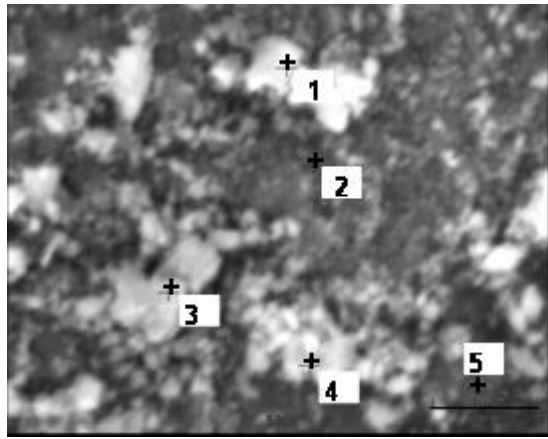
Şekil 8.170 18 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)aşınma ürünleri, d)farklı bölgeden aşınma ürünleri



Şekil 8.171 18 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma görüntüsü, d) aşınma ürünleri

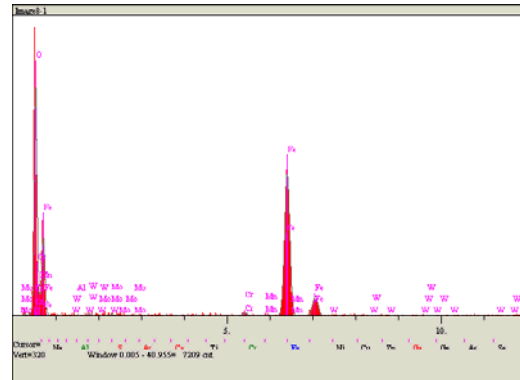


Şekil 8.172 18 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c)farklı bölgeden aşınma görüntüleri, d)aşınma ürünleri



Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	2.183
N	1.752
O	53.245
Al	0.046
Cr	0.450
Mn	0.197
Fe	40.723
Mo	0.362
W	1.042
	100.000

c)



Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.035
O	17.451
Al	0.122
Cr	0.823
Mn	0.222
Fe	77.627
Mo	0.278
W	2.442
	100.000

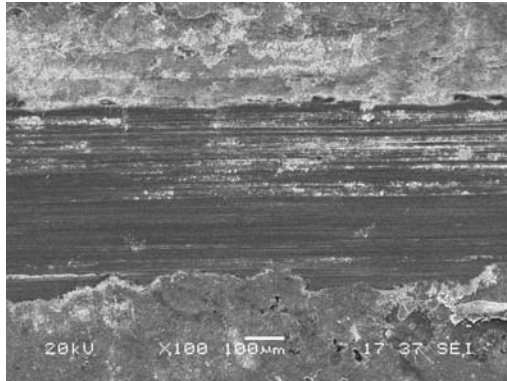
d)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	6.719
N	2.721
O	51.081
Al	0.180
Cr	0.282
Mn	0.216
Fe	37.427
Mo	0.372
W	1.001
	100.000

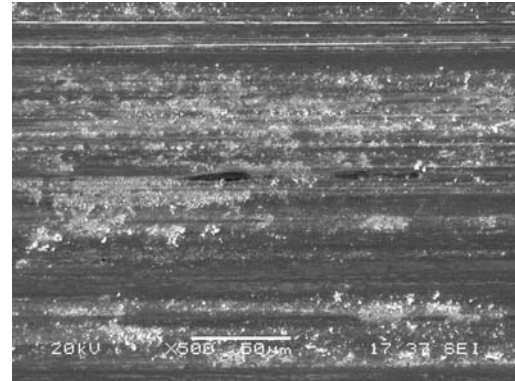
e)

Şekil 8.173 18 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın analizinin grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

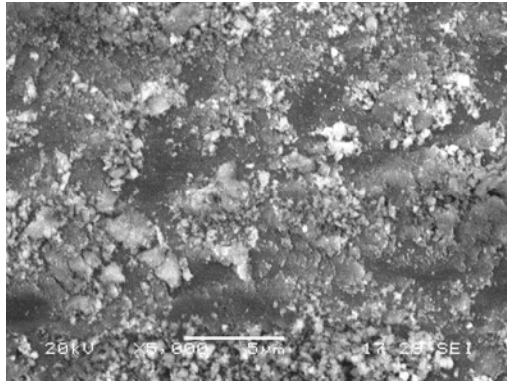
Şekil 8.174'de görülen aşınma SEM sonuçlarına göre yüzeyde yine yivler oluşmuştur. Yük 7N olunca kızaklama aşınma ürünleri yüzeyde görülmüştür. Yük 9N olunca ise yüzeyde bozulmalar artmıştır (Şekil 8.175 ve Şekil 8.176). Yük artmasıyla yüzeyde meydana gelen aşınma mekanizmaları şiddetlenmiştir. Bu numune grubuna ait EDS analiz sonuçları da Şekil 8.177'de gösterilmektedir. Yüzeydeki aşınma ürünlerinden alınan analizlere göre çelikle beraber yüzeyde beyaz renkte görülmekte olan parçaların bilya parçacıkları olduğu belirlenmiştir.



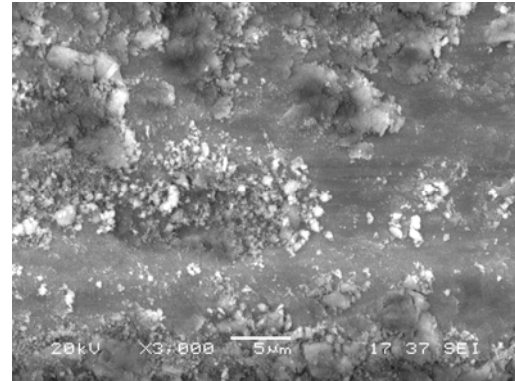
a)



b)

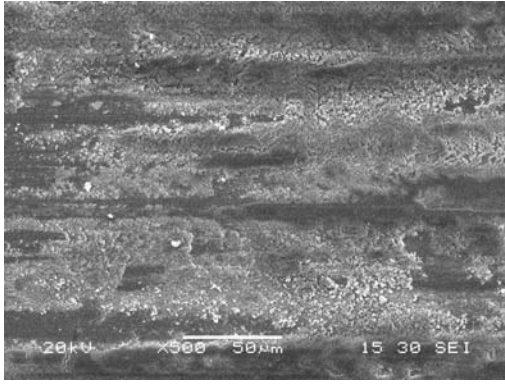


c)

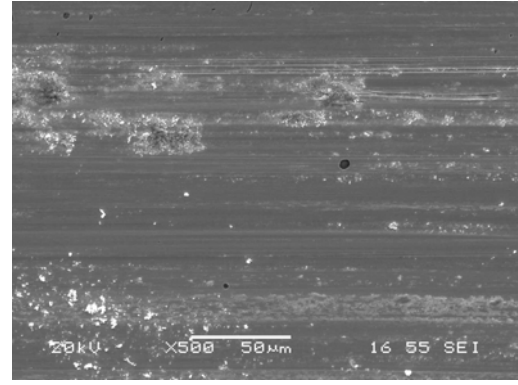


d)

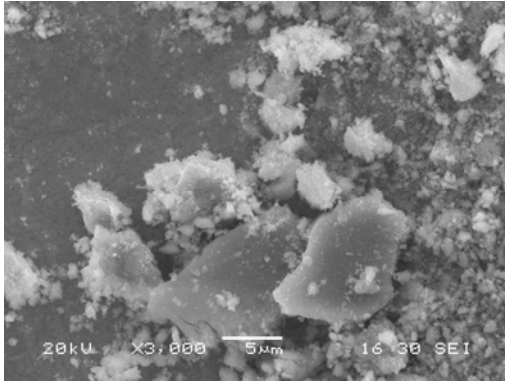
Şekil 8.174 19 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma görüntüsü, d) aşınma ürünleri



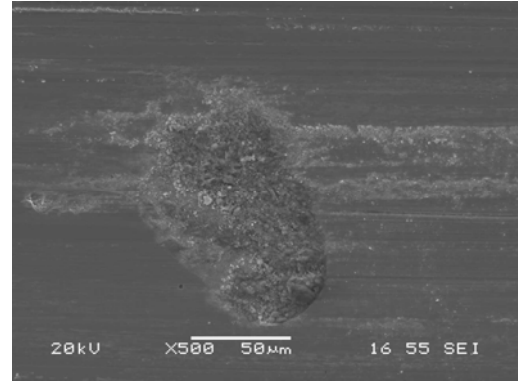
a)



b)

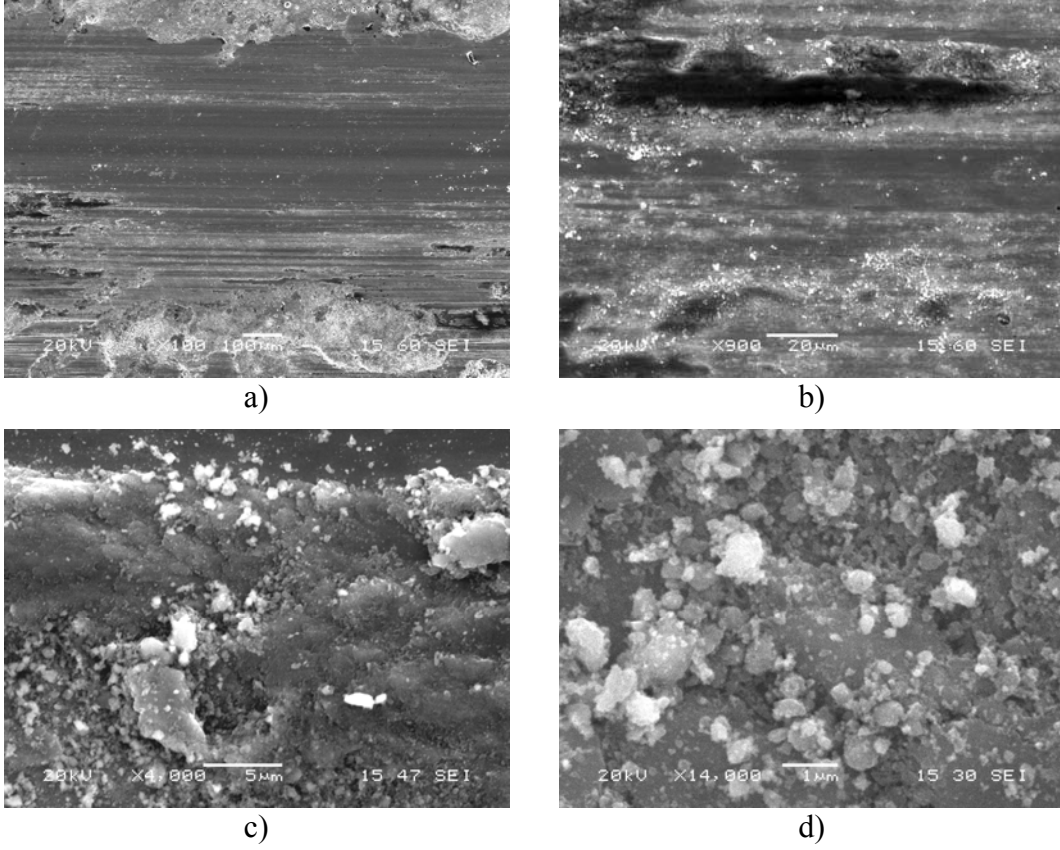


c)

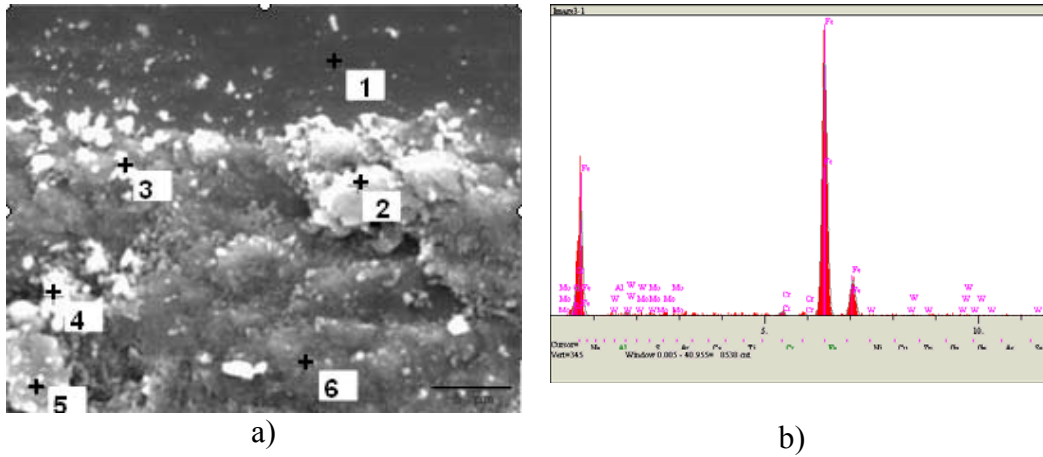


d)

Şekil 8.175 19 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma yüzey görüntüsü, b)farklı aşınma yüzey görüntüsü, c) aşınma ürünleri d) farklı bir bölgeden aşınma görüntüsü



Şekil 8.176 19 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma görüntüsü, d) aşınma ürünleri



Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
N	0.000
O	0.000
Al	0.230
Cr	0.572
Fe	96.463
Mo	0.388
W	2.347
	100.000

c)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	6.774
N	0.000
O	48.277
Al	0.115
Cr	0.252
Fe	42.652
Mo	0.373
W	1.557
	100.000

d)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	7.565
N	0.000
O	45.911
Al	0.177
Cr	0.415
Fe	43.800
Mo	0.351
W	1.781
	100.000

e)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
N	1.555
O	44.968
Al	0.033
Cr	0.357
Fe	51.195
Mo	0.241
W	1.651
	100.000

g)

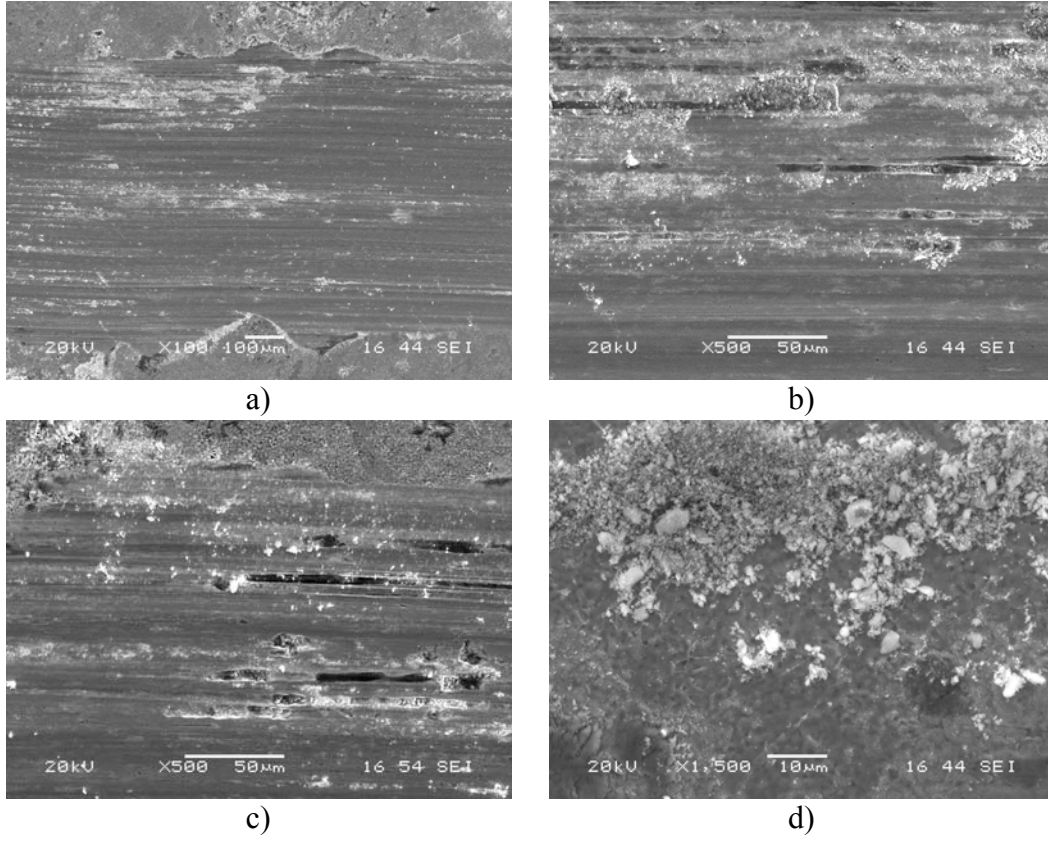
Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	6.008
N	0.893
O	53.029
Al	0.025
Cr	0.454
Fe	38.218
Mo	0.162
W	1.213
	100.000

f)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
N	1.340
O	47.156
Al	0.291
Cr	0.364
Fe	48.247
Mo	0.375
W	2.227
	100.000

h)

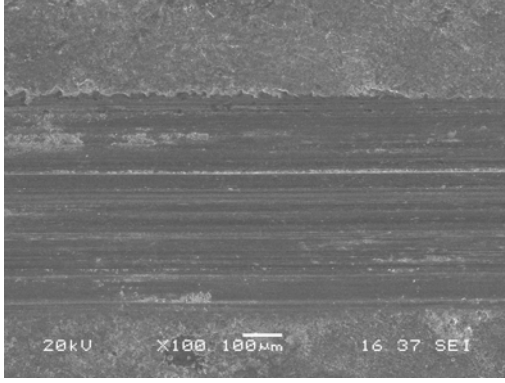
Şekil 8.177 19 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın analizinin grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h)6 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri



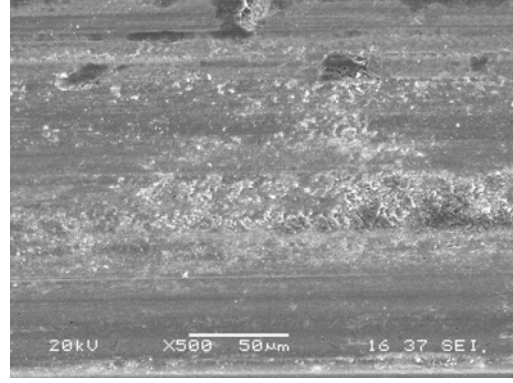
Şekil 8.178 20 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma görüntüsü, d) aşınma ürünleri

Şekil 8.178'de 20(70mm, 10 pulse, 900mf) no'lu numunenin 5N yük altında yapılmış aşınma deneyi sonrası aşınma yüzey görüntülerinde yiv oluşumlarına, rastlanmıştır. Kızaklama abrazif aşınma izleri mevcuttur. Aynı numunenin 7N yük altında yapılan aşınma deneyi sonrası ise plastik deformasyon izleri ve aşınma ürünleri artmıştır (Şekil 8.179b ve 8.179c). Yük 9N olunca delaminasyon aşınma neticesinde yivler derinleşmiş ve genişlemiştir, ayrıca aşınma ürünleri yüzeyde miktarını artırmıştır.

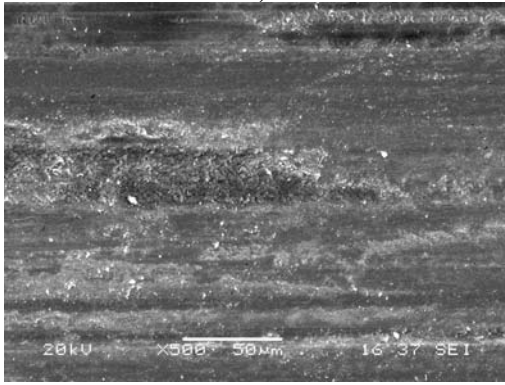
21(70mm, 5pulse, 900mf)no'lu numunenin 5N yük altında yüzeyde oluşan mekanizmalar ince yivlerdir. Yükün artması ile yivler belirginleşmiş ve aşınma ürünleri yüzeyde oranını artırmıştır (Şekil 8.180-8.181). 9N yük altında ise plastik deformasyon şiddetini artırmış yüzeyde yer yer tane kopmaları görülmüştür. (Şekil 8.182). Aynı numunenin EDS analizlerinde beyaz olarak görülen tanelerden alınan EDS analizlerinde bu parçacıkların aşındırıcı bilya olarak kullanılan alüminaya ait olduğu görülmüştür (Şekil 8.183).



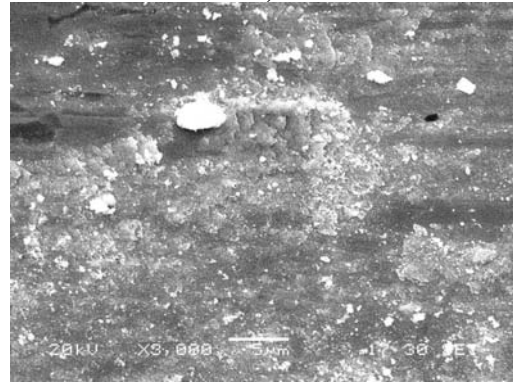
a)



b)

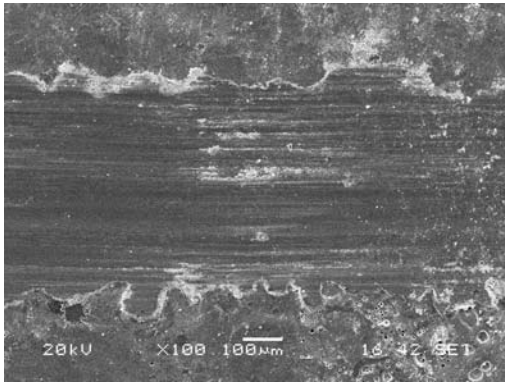


c)

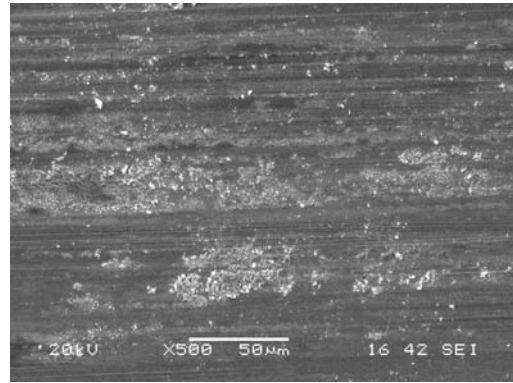


d)

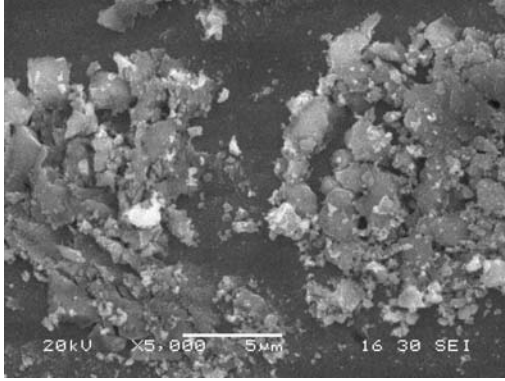
Şekil 8.179 20 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



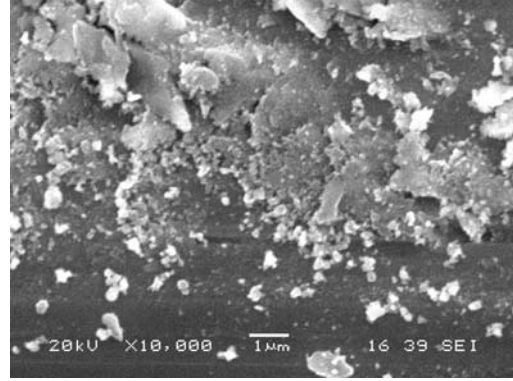
a)



b)

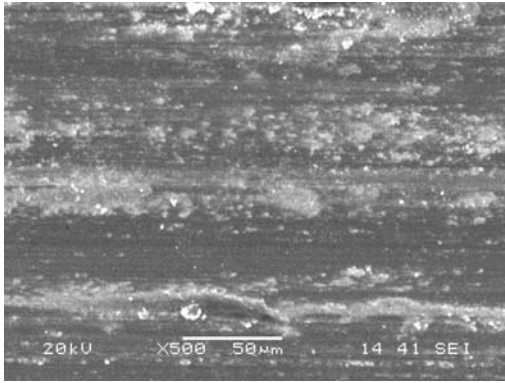


c)

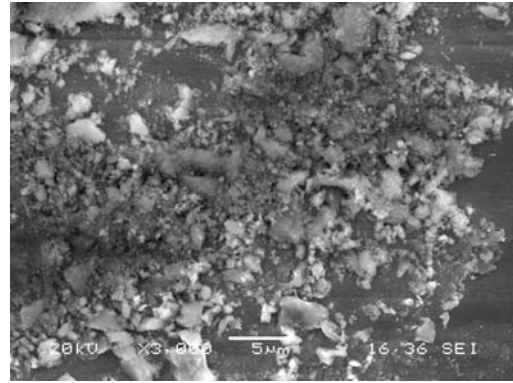


d)

Şekil 8.180 20 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri

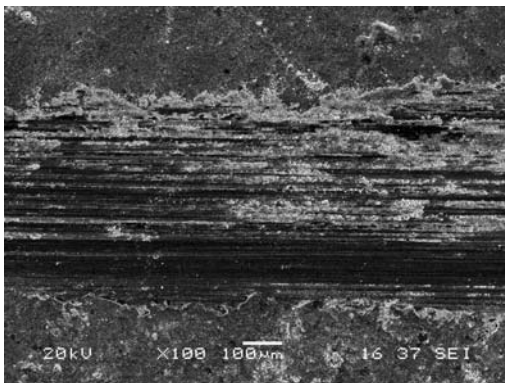


a)

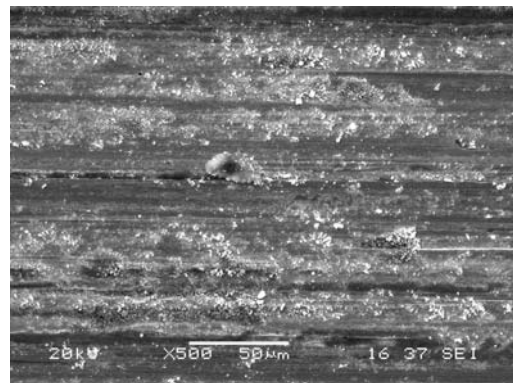


b)

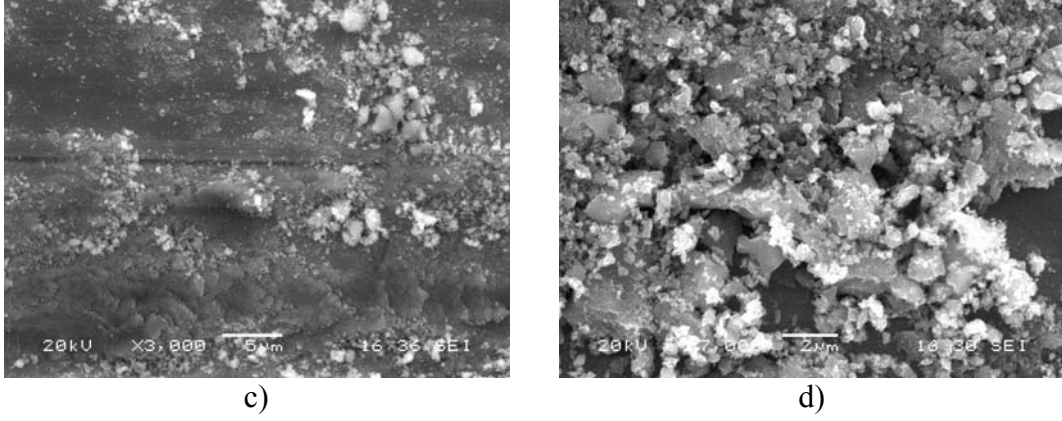
Şekil 8.181 21 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



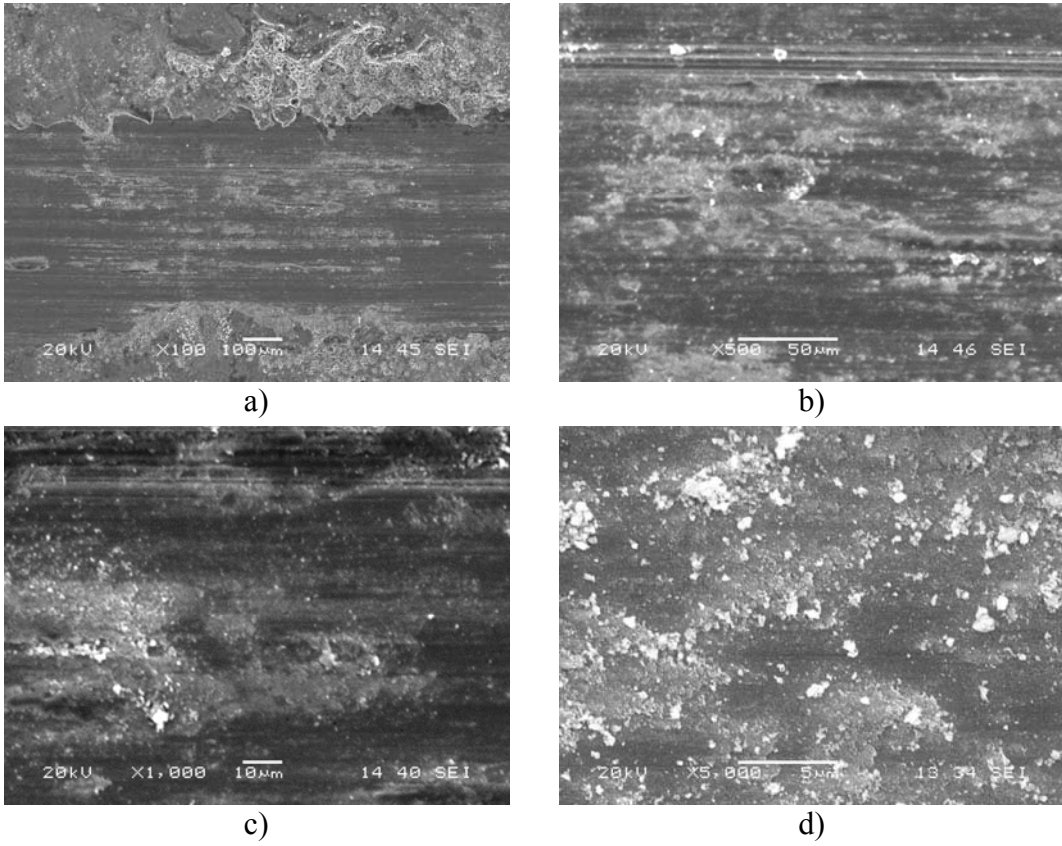
a)



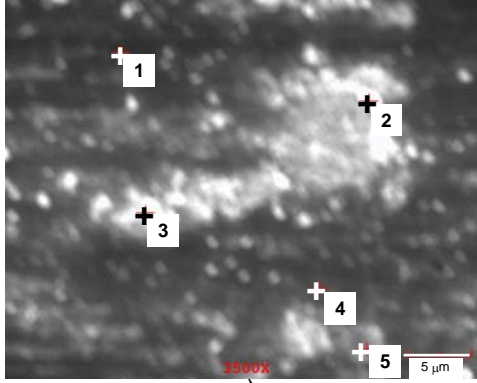
b)



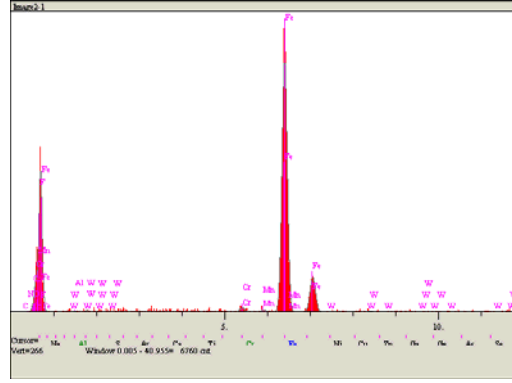
Şekil 8.182 21 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



Şekil 8.183 21 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



a)



b)

Elt.	Sonuç (%ağırlık)
C	0.000
N	0.000
O	0.000
F	15.492
Al	0.129
Cr	0.656
Mn	0.473
Fe	81.048
W	2.202
	100.000

c)

Elt.	Sonuç (%ağırlık)
C	6.489
N	1.506
O	27.567
F	14.973
Al	0.077
Cr	0.466
Mn	0.248
Fe	47.452
W	1.221
	100.000

d)

Elt.	Sonuç (%ağırlık)
C	7.695
N	1.067
O	10.682
F	10.579
Al	0.410
V	0.140
Cr	0.356
Mn	0.166
Fe	67.686
W	1.218
	100.000

e)

Elt.	Sonuç (%ağırlık)
C	0.000
N	0.000
O	0.000
Al	0.011
V	0.000
Cr	0.088
Mn	0.549
Fe	96.593
W	2.759
	100.000

f)

Elt.	Sonuç (%ağırlık)
C	0.000
N	0.000
O	4.001
Al	0.101
Cr	0.688
Mn	0.286
Fe	91.875
W	3.048
	100.000

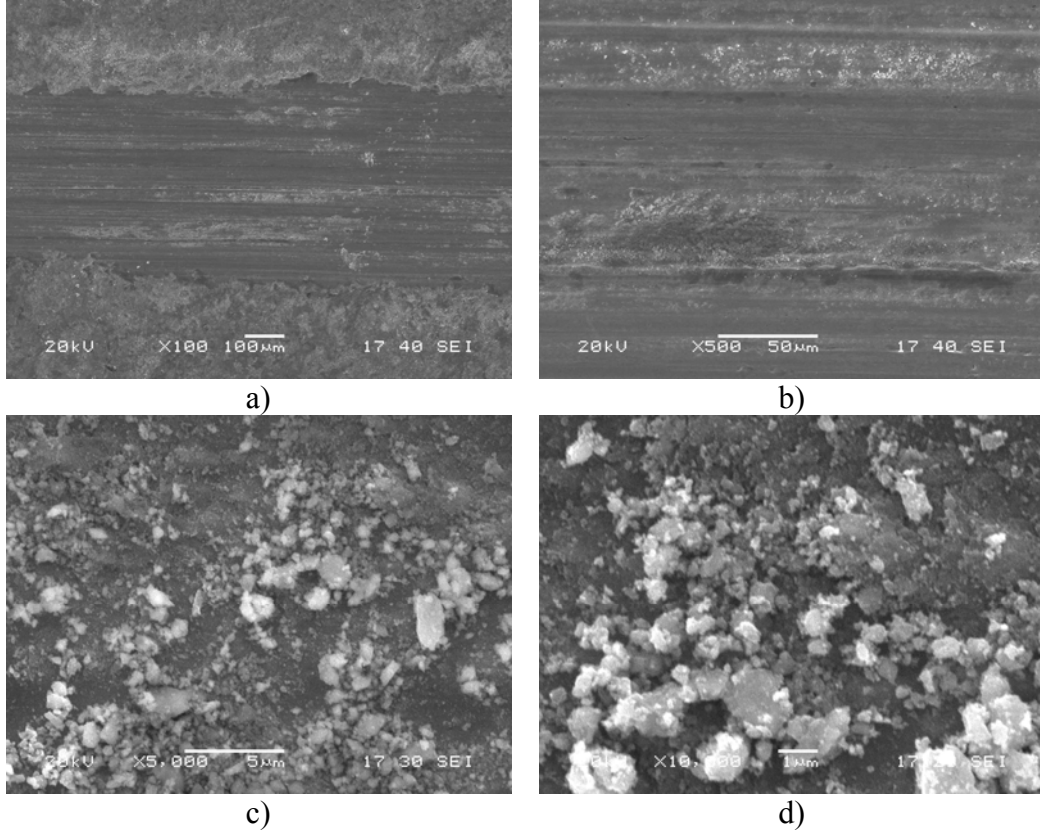
g)

Şekil 8.184 21 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın analizinin grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5 no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

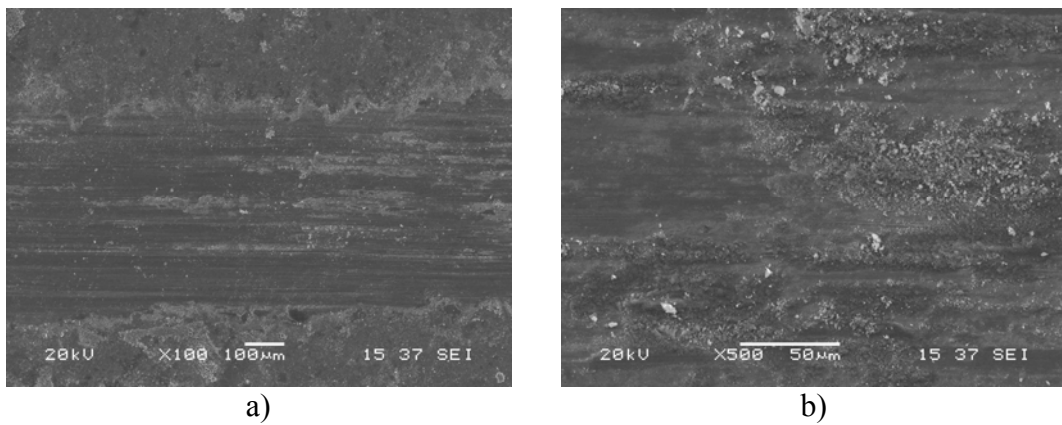
21 no'lu numune ait EDS analizlerinde 2 no'lu noktadan alınan değerden bu parçaların alümina bilyadan geldiği anlaşılmaktadır.

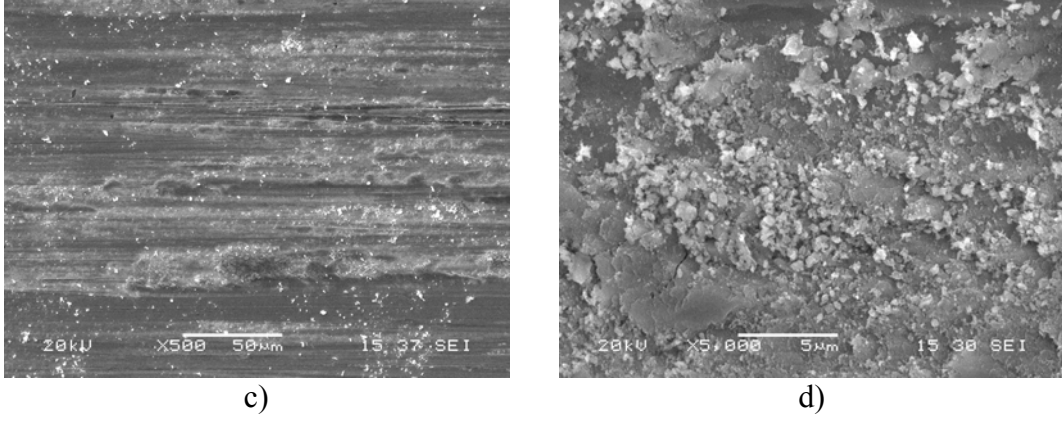
22 (80mm, 15 pulse, 900mf)no'lu numunenin aşınma sonrası yüzeyden alınan SEM görüntülerine göre yüzeyde delaminasyon aşınma izleri (yivler) görülmektedir.

Aşınma ürünleri yine yüzeyde görülmektedir (Şekil 8.185). Yükün 7N ve 9N olmasıyla yüzeydeki yivler derinleşmiş, plastik deformasyon kuvvetli etkiler göstermiştir (Şekil 8.186-8.190). Yük artımıyla yüzeylerde kazımalı aşınma oluşumları şiddetini artırmıştır. Yüzeylerde dağınık biçimde yer aldığı görülmekte olan beyaz parçacıkların alümina bilyadan geldiği düşünülmektedir.

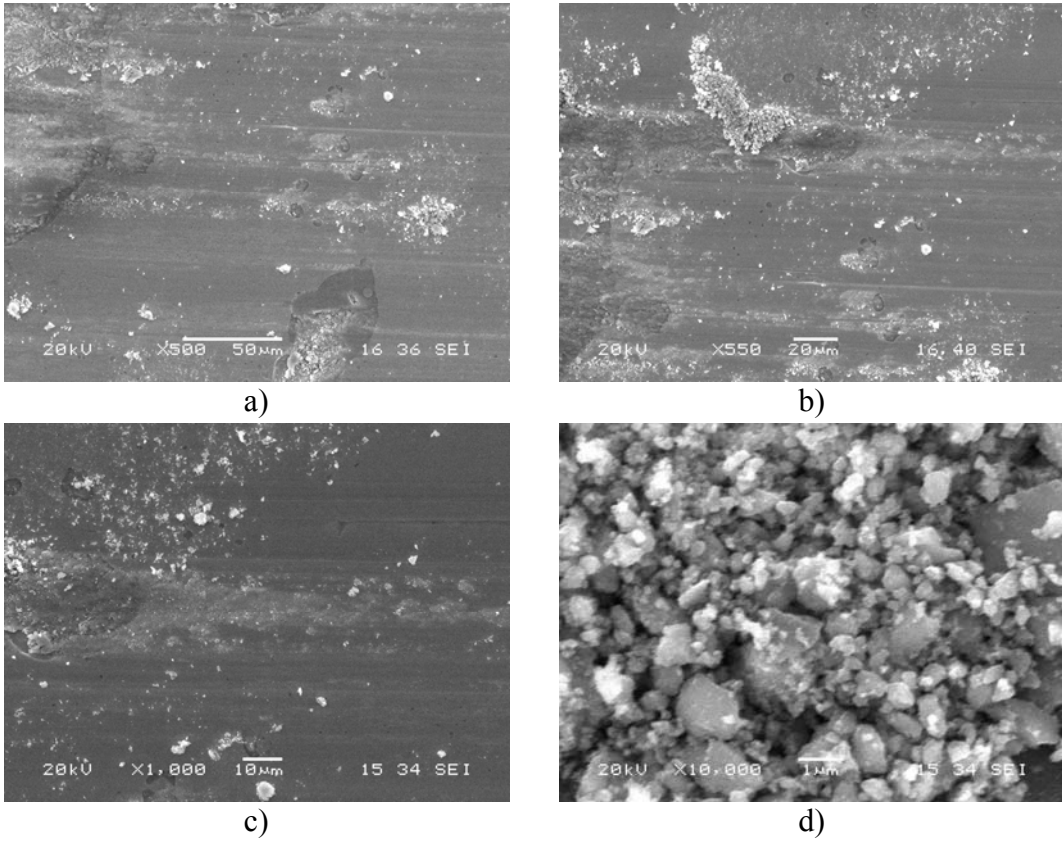


Şekil 8.185 22 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5N yük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri





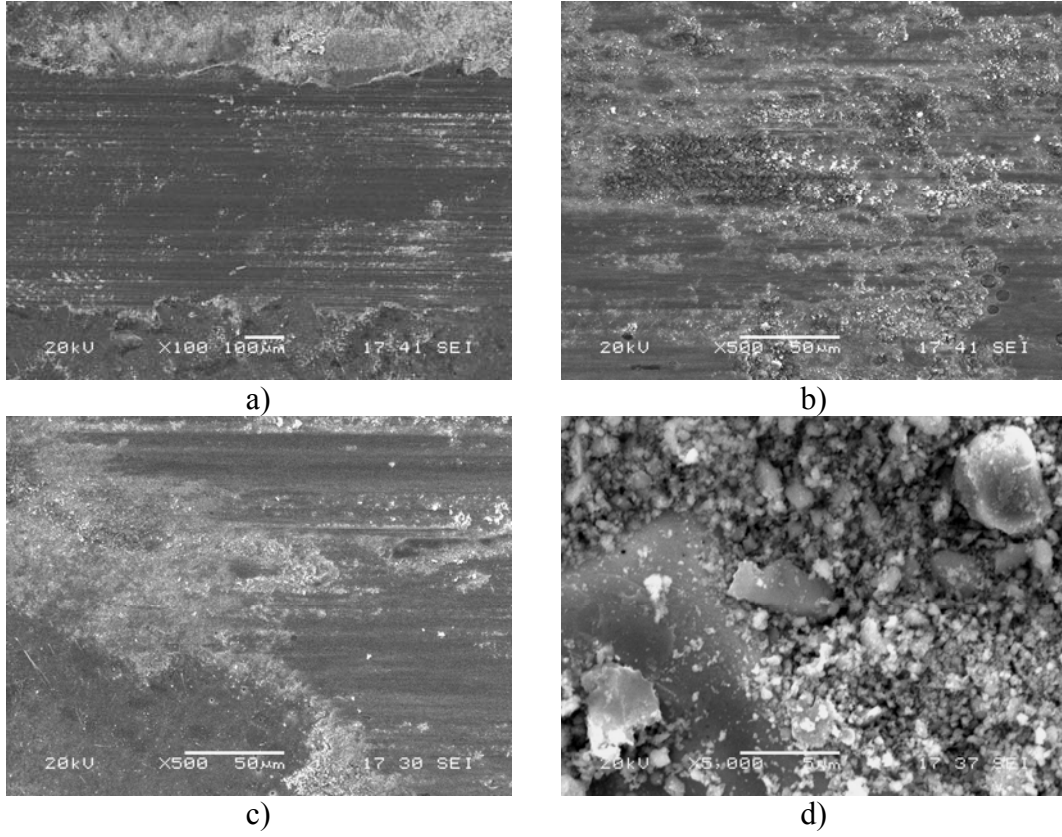
Şekil 8.186 22 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



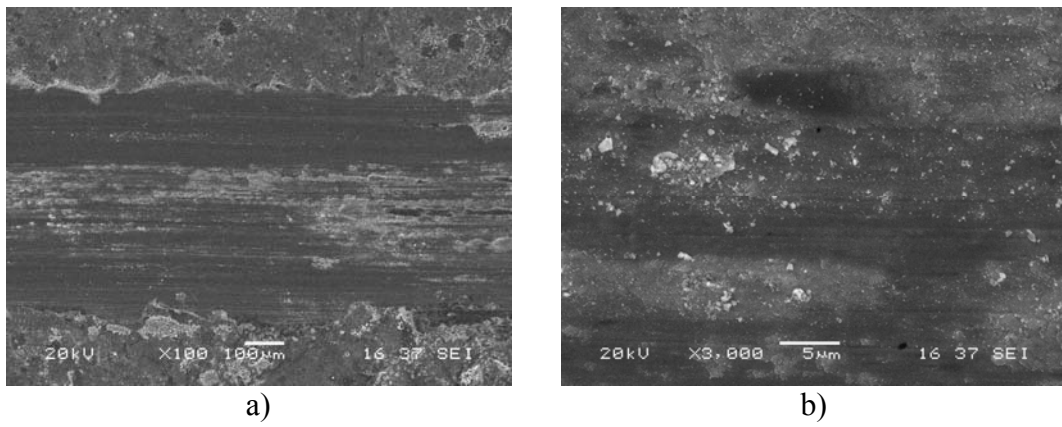
Şekil 8.187 22 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri

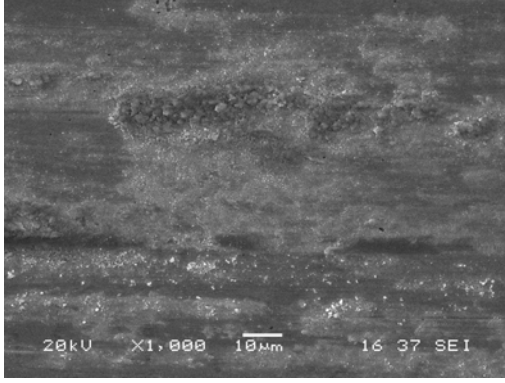
23 (80mm, 10 pulse, 900mf) no'lu numunede 5N yük altında plastik deformasyona uğramış ve yer yer yivler gözükmemektedir (Şekil 8.188). Yük 7N ve 9N olunca yüzeyde aşınma ürünleri artmış, deformasyon oldukça kuvvetli izler göstermiştir (Şekil 8.189-8.190). Adhezif aşınma oluşumları mevcuttur. Aynı numuneye ait EDS

analiz sonuçları Şekil 8.191'de görülmektedir. Yine EDS analizler sonucunda yüzeylerdeki beyaz taneciklerin alümina bilyadan kopan parçacıklar olduğu düşünülmektedir.

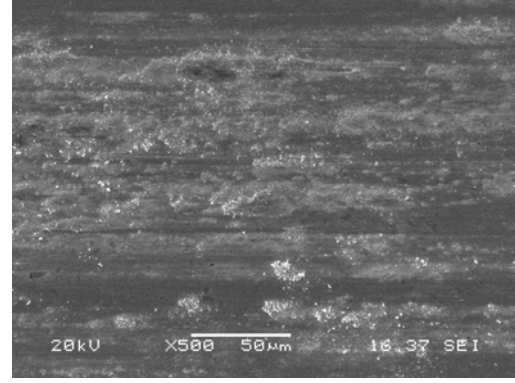


Şekil 8.188 23 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



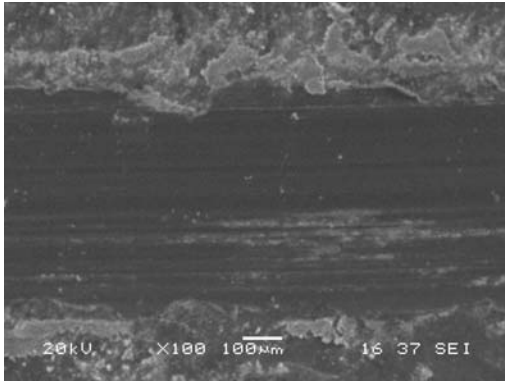


c)

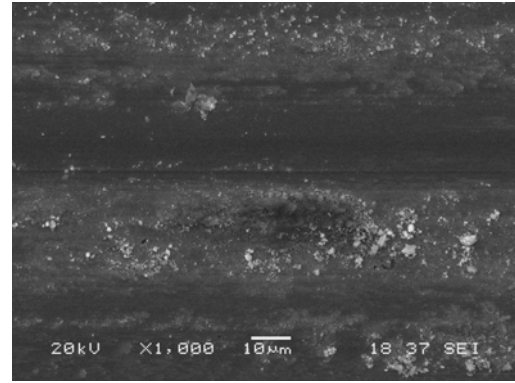


d)

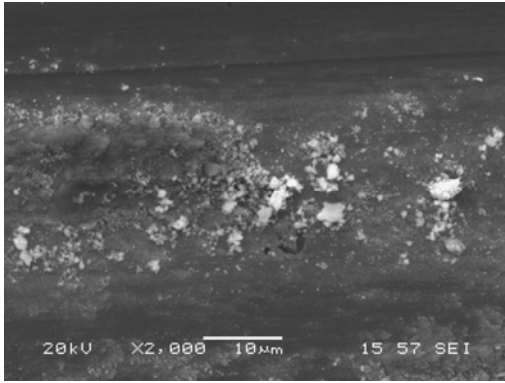
Şekil 8.189 23 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



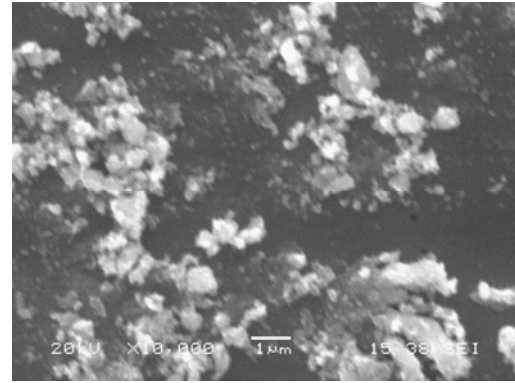
a)



b)

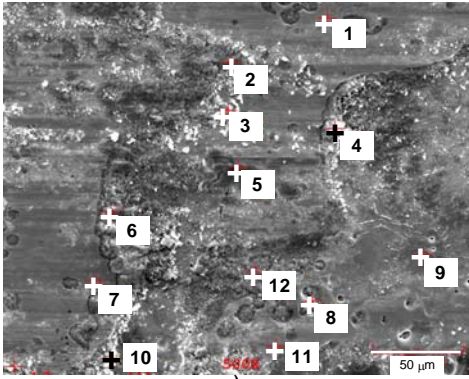


c)



d)

Şekil 8.190 23 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



a)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	2.164
O	0.000
F	17.416
Al	0.140
P	0.026
S	0.163
Cr	0.501
Mn	0.130
Fe	77.504
W	1.955
	100.000

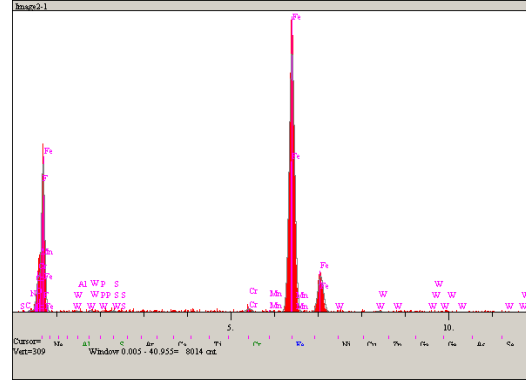
c)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	7.173
N	2.779
O	47.668
Al	0.112
P	0.147
S	0.146
Cr	0.245
Mn	0.107
Fe	40.359
W	1.265
	100.000

e)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	3.555
N	2.261
O	23.438
Al	0.154
P	0.077
S	0.167
Cr	0.468
Mn	0.247
Fe	67.993
W	1.640
	100.000

g)



b)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	0.000
O	30.023
Al	0.098
Si	0.000
P	0.199
S	0.114
Cr	0.809
Mn	0.198
Fe	0.000
W	2.376
	33.816

d)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	1.887
N	2.586
O	54.386
Al	0.467
P	0.133
S	0.073
Cr	0.363
Mn	0.319
Fe	38.453
W	1.333
	100.000

f)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	1.405
N	1.070
O	45.807
Al	0.296
P	0.048
S	0.304
Cr	0.369
Mn	0.000
Fe	49.408
W	1.293
	100.000

h)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	3.154
O	0.966
Al	0.109
P	0.203
S	0.107
Cr	0.857
Mn	0.053
Fe	92.064
W	2.487
	100.000

1)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	1.329
N	1.899
O	48.931
Al	0.090
P	0.095
S	0.051
Cr	0.322
Mn	0.448
Fe	44.687
W	2.147
	100.000

j)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.684
O	40.056
Al	0.067
Si	0.237
P	0.074
S	0.021
Cr	0.278
Mn	0.463
Fe	55.492
W	1.627
	100.000

l)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	2.133
O	45.263
Al	0.161
P	0.288
S	0.211
Cr	0.277
Mn	0.190
Fe	50.855
W	0.624
	100.000

i)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	3.453
O	0.979
Al	0.175
Si	0.179
P	0.136
S	0.156
Cr	0.586
Mn	0.226
Fe	92.521
W	1.589
	100.000

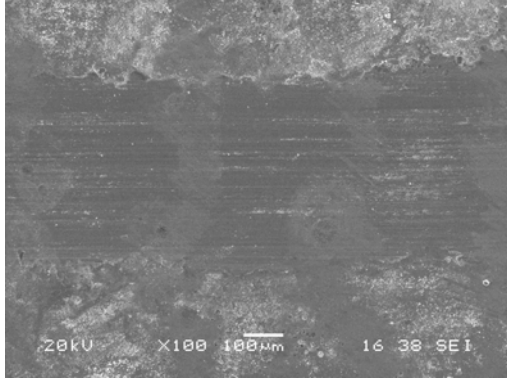
k)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	1.112
O	32.359
Al	0.205
Si	1.809
P	0.132
S	0.166
Cr	0.913
Mn	3.259
Fe	58.188
W	1.858
	100.000

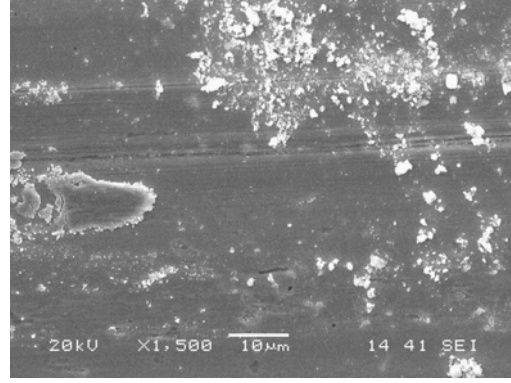
m)

Şekil 8.191 23 no'lu numunenin 5N yük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın analizinin grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, f)4, g)5, h) no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

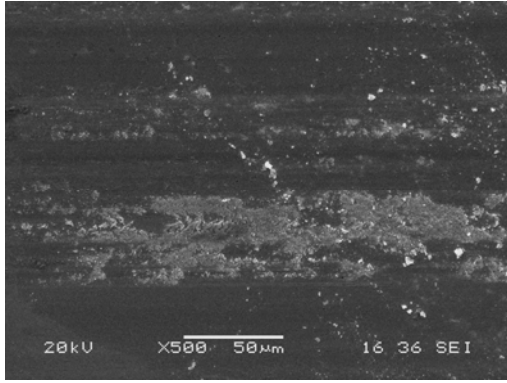
24 no'lu numuneye ait EDS görüntülerinde yük 5N olduğunda ise ince kazımalı aşınma oluşumları ve yine az oranda plastik deformasyon izleri mevcuttur. Diğer numune gruplarında da olduğu gibi yükün artmasının yüzeydeki kazımalı aşınma izlerinin artmasına, yüzey süreksizliklerine ve plastik deformasyona sebep olduğu düşünülmektedir (Şekil 8.192-8.194). Aynı numune grubuna ait EDS analizlerinde ise aşınma ürünlerinden alınan sonuçlarda genellikle yüzeyde beyaz olarak görülen yapıların yine bilya parçaları olduğu belirlenmiştir (Şekil 8.195).



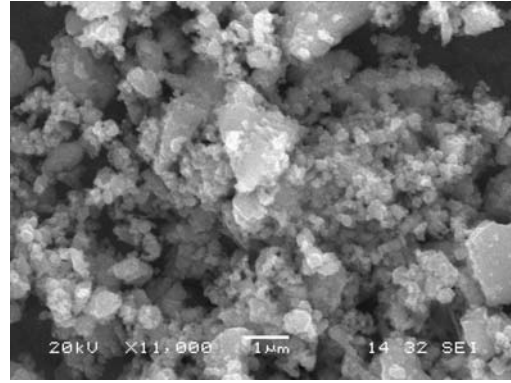
a)



b)

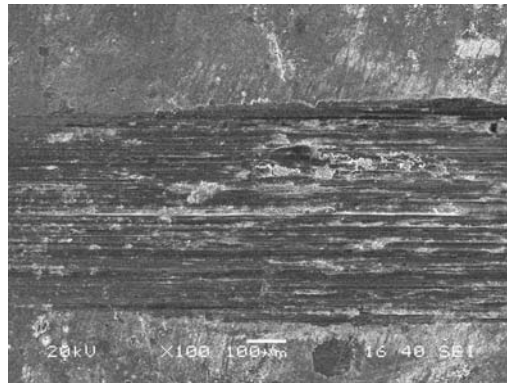


c)

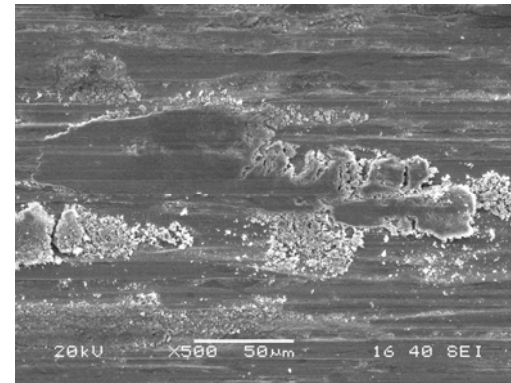


d)

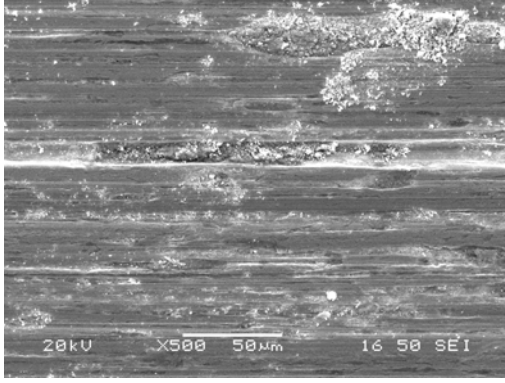
Şekil 8.192 24 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



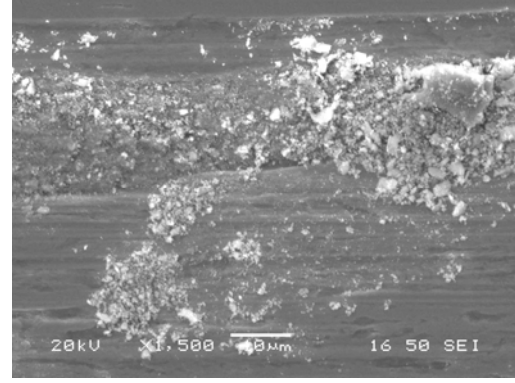
a)



b)

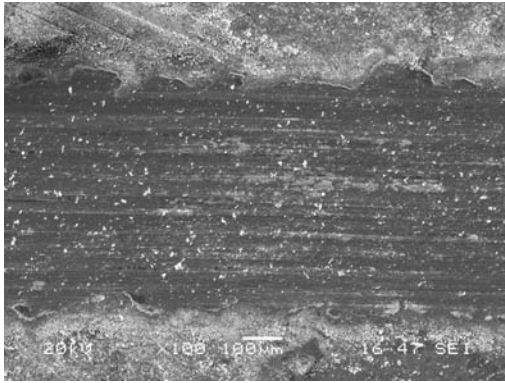


c)

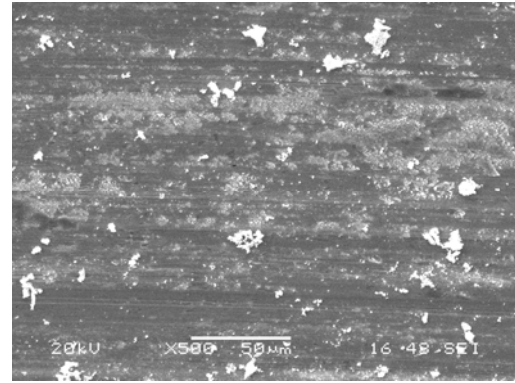


d)

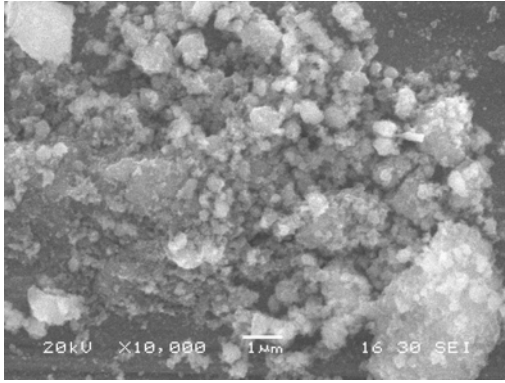
Şekil 8.193 23 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



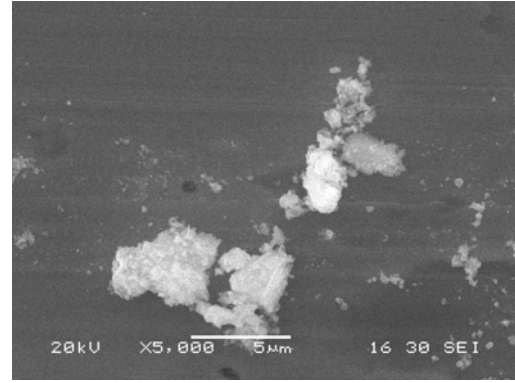
a)



b)

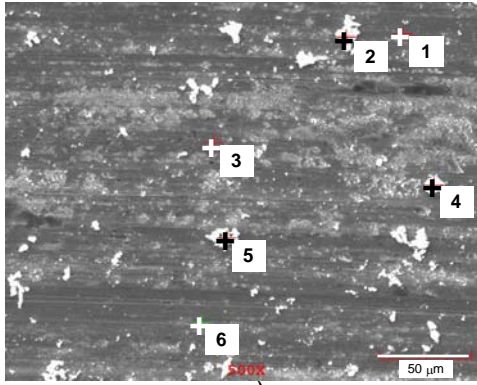


c)



d)

Şekil 8.194 24 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



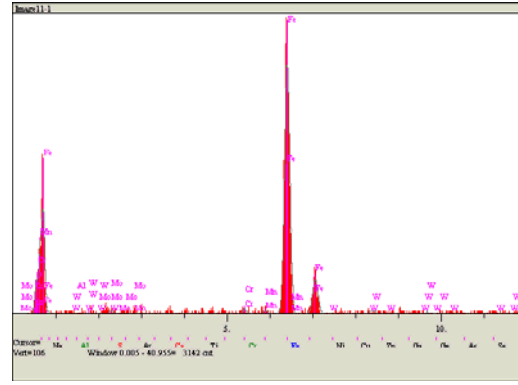
a)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	0.000
O	7.092
Al	0.042
Cr	0.695
Mn	0.972
Fe	83.166
Mo	0.756
W	7.277
	100.000

c)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.281
N	2.109
O	1.880
Al	0.062
Cr	0.394
Mn	0.973
Fe	85.014
Mo	1.003
W	8.284
	100.000

e)



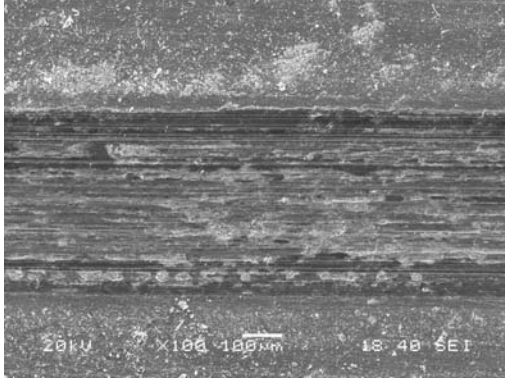
b)

Elt.	Sonuç (%ağırlıkça)
C	0.000
N	2.755
O	41.616
Al	0.437
Cr	0.847
Mn	0.212
Fe	47.769
Mo	0.843
W	5.522
	100.000

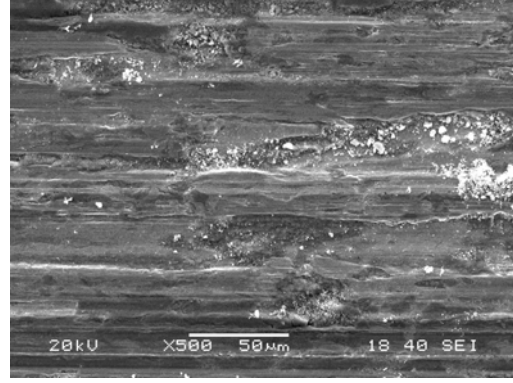
d)

Şekil 8.195 24 no'lu numunenin 9Nyük altında a)EDS resmi, b)1 no'lu noktanın analizinin grafiksel görünümü, c)1, d)2, e)3, no'lu noktalardan alınmış EDS analizleri

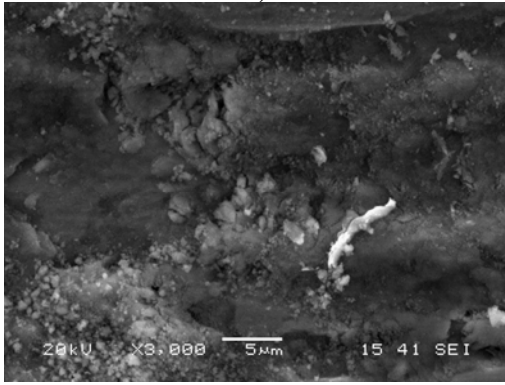
Şekil 8.196'da yüzey modifikasyonuna uğramamış AISI 4140 çeliğinin yüzeyinde 5N yük altında, şiddetli delaminasyon aşınma izleri görülmüştür. Abrasif aşınmanın en tehlikelisi olan kesme ve pulluklama türü aşınmalar görülmektedir. Aşınma ürünleri yivler etrafında toplanmıştır. Yer yer malzeme kopmaları, şiddetli abrasif aşınma göstergesidir. Plastik deformasyon belirgin bir şekilde vardır. Yük 7N olunca yüzeyde bozulmalar artmış, oldukça derin yivler oluşmuştur. Yük 9N olduğunda ise yüzeyde gözle görülebilecek kadar büyük çatlaklar meydana gelmiş, yüzeyde ciddi bozulmalar oluşmuştur (Şekil 8.197-8.198). Yükün artması yüzeylerde ciddi hasar oluşumlarına sebebiyet vermiştir.



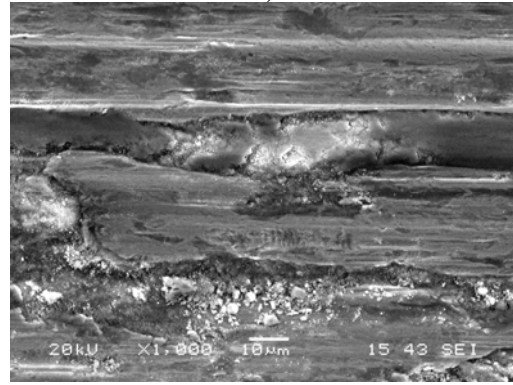
a)



b)

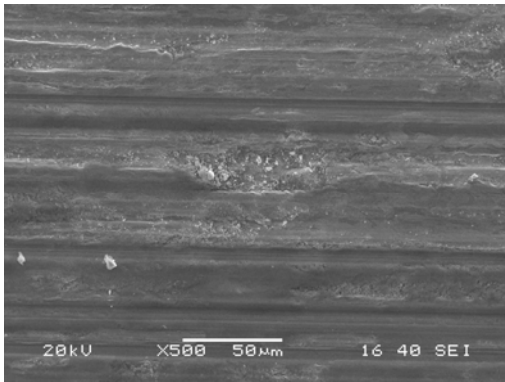


c)

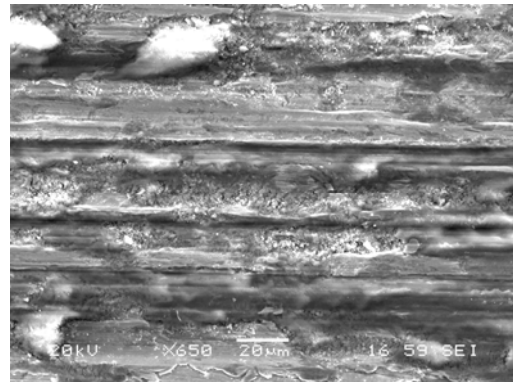


d)

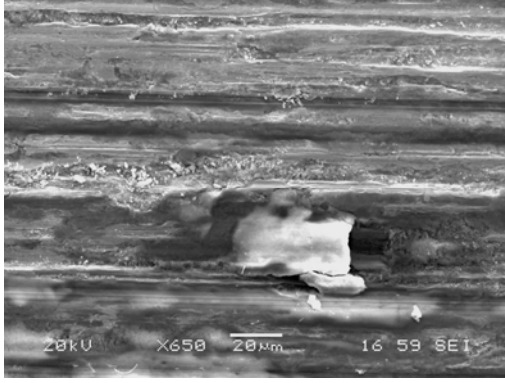
Şekil 8.196 işlem görmemiş 4140 numunenin 0.15 m/sn hızda 5Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



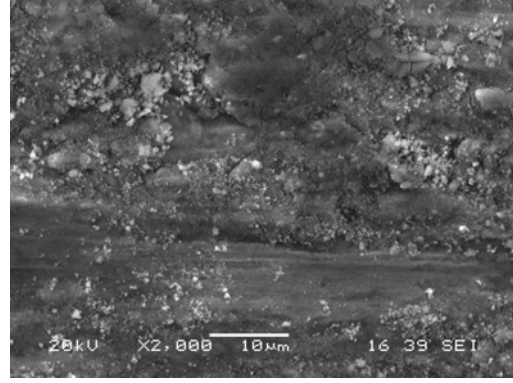
a)



b)

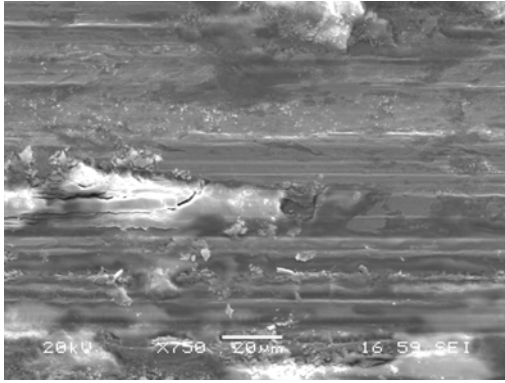


c)

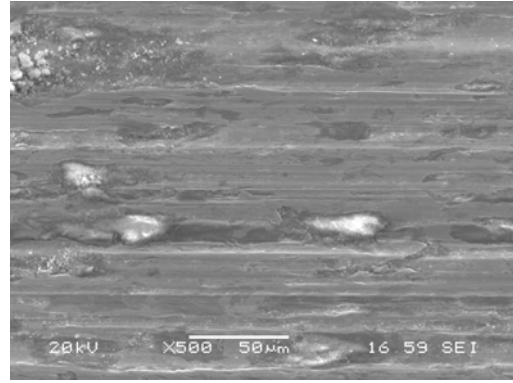


d)

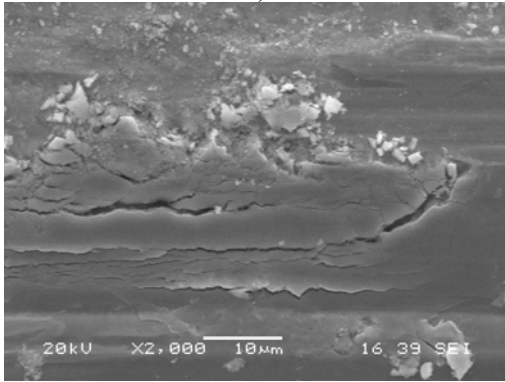
Şekil 8.197 Saf 4140 numunenin 0.15 m/sn hızda 7Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



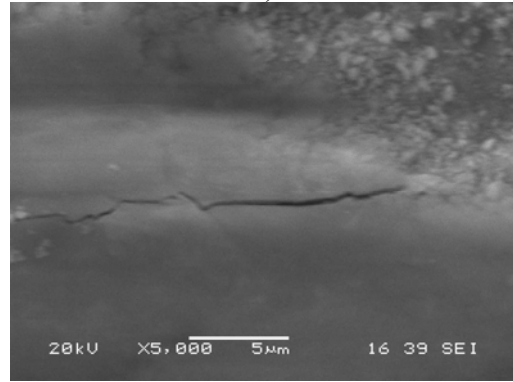
a)



b)

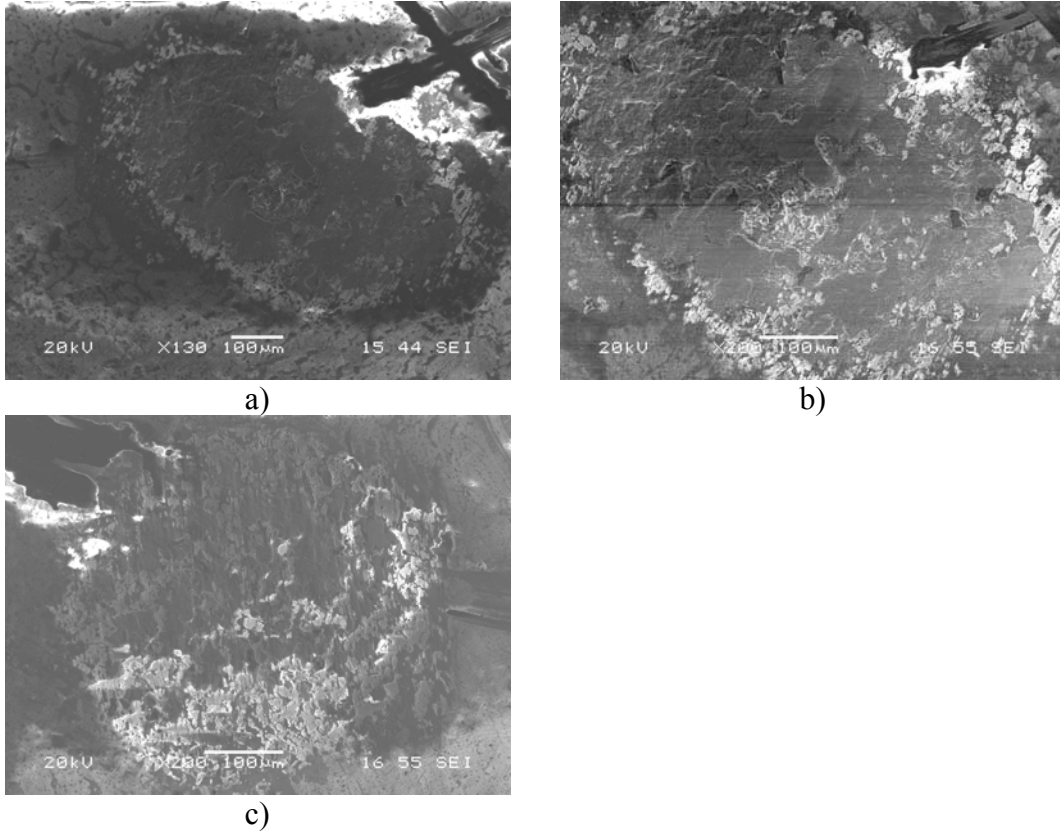


c)



d)

Şekil 8.198 Saf 4140 numunenin 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a) aşınma iz kalınlığı, b) aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü, d) aşınma ürünleri



Şekil 8.199 Aşındırıcı alümina bilyanın 0.15 m/sn hızda 9Nyük altında 200m mesafede aşınma deneyi sonrası yüzey SEM görüntüleri a)aşınma iz kalınlığı, b)aşınma yüzey görüntüsü, c) farklı bir bölgeden aşınma yüzey görüntüsü

Şekil 8.199 ise aşındırıcı bilya olarak kullanılan alümina bilyanın 0.15m/sn hız, 200m mesafe için 9N yük altında yapılmış deneyler sonrası alınmış SEM görüntülerinde bilya yüzeyinde plastik deformasyon ve yer yer malzeme kopmaları gözlemlenmiştir. Yüzeyde adhezif aşınmalar görülmektedir.

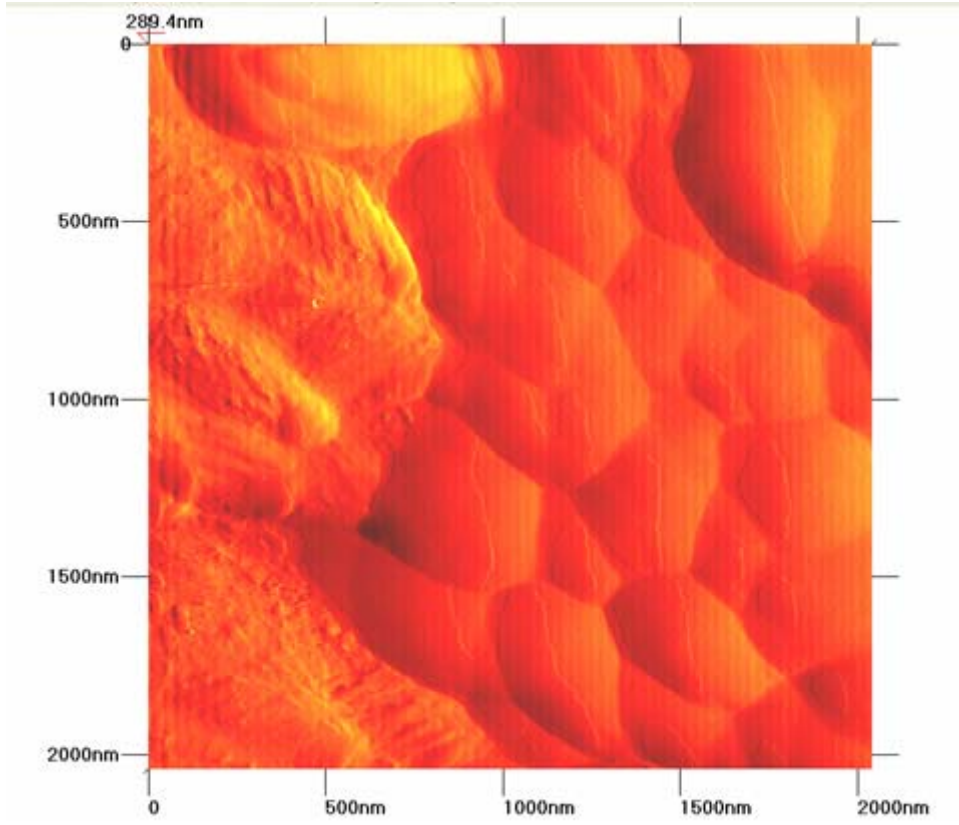
Aşınma deneyleri sonucunda; işlem görmemiş numune gruplarında meydana gelen aşınmanın çok şiddetli ve yüzeyi ağır hasara uğrattığı belirlenmiştir. Yüzey özellikleri pulse plazma ile geliştirilen numunelerde x-ışınları analizi ile varlıkları belirlenen γ -Fe fazı, nitrür esaslı, wolfram ve/veya wolframoksit esaslı fazların varlığı aşınma dayanımının artmasına sebebiyet vermiştir[44]. Özellikle yüzeydeki nanometre boyutunda ki taneler ve bu taneler içindeki 1-2 μ m boyutundaki wolfram ve wolframoksit taneler aşınma dayanımında çok etkili olmuştur. Pulse plazma yöntemi ile numune yüzeylerinde abrazif aşınmanın en hafif şekli olan pulluklama ve kazımalı aşınma görülmüştür. Bu tür aşınmalar yüzeylerde ağır hasarlara yol

açmamaktadır [86-87]. Oysa işlem görmemiş yüzeylerde abrazif aşınmanın en ağır şekli olan kesme aşınma türü ve yoğun deformasyon izleri görülmüştür. Derin oyuklar ve çatlaklar meydana gelmiştir.

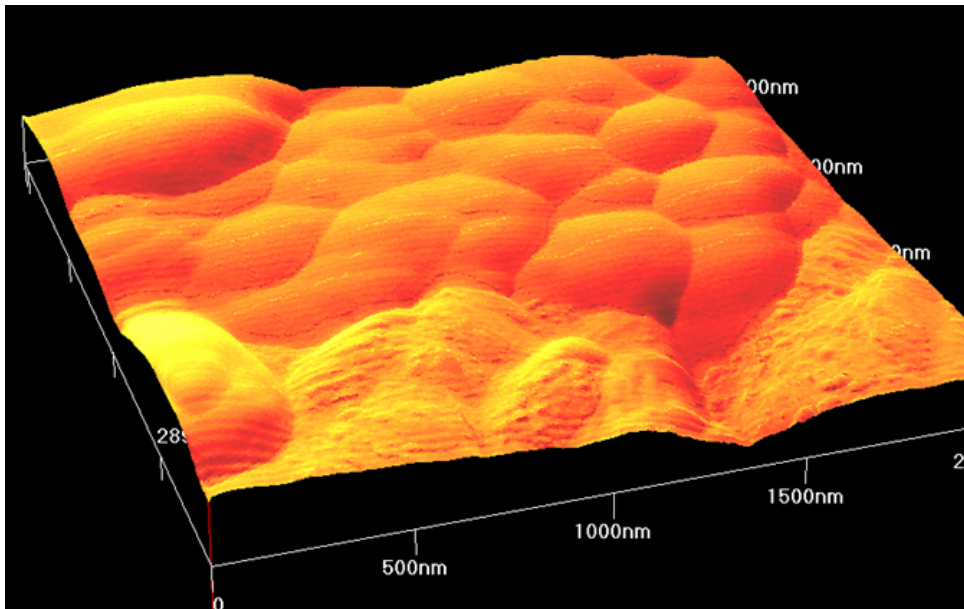
Sonuç olarak; pulse plazma yöntemi ile yüzeyleri modifiye edilen çelikler işlem uygulanmayan numunelere nazaran 2 kat daha fazla dayanım göstermişlerdir. Yüzeylerde meydana gelen bozulmalar, pulse plazma uygulanmayan numunelerde çok şiddetli iken, işlem uygulanmış numunelerde az miktarda meydana gelmiştir. İşlem gören yüzeylerin aşınma dayanımının artmasıyla, kullanım ömürleri artmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, bu malzemelerin ağır çalışma şartları altında uzun süre hasara uğramadan kullanılabilceği düşünülmektedir.

8.10. AFM (Atomic Force Microscope) Analiz Sonuçları

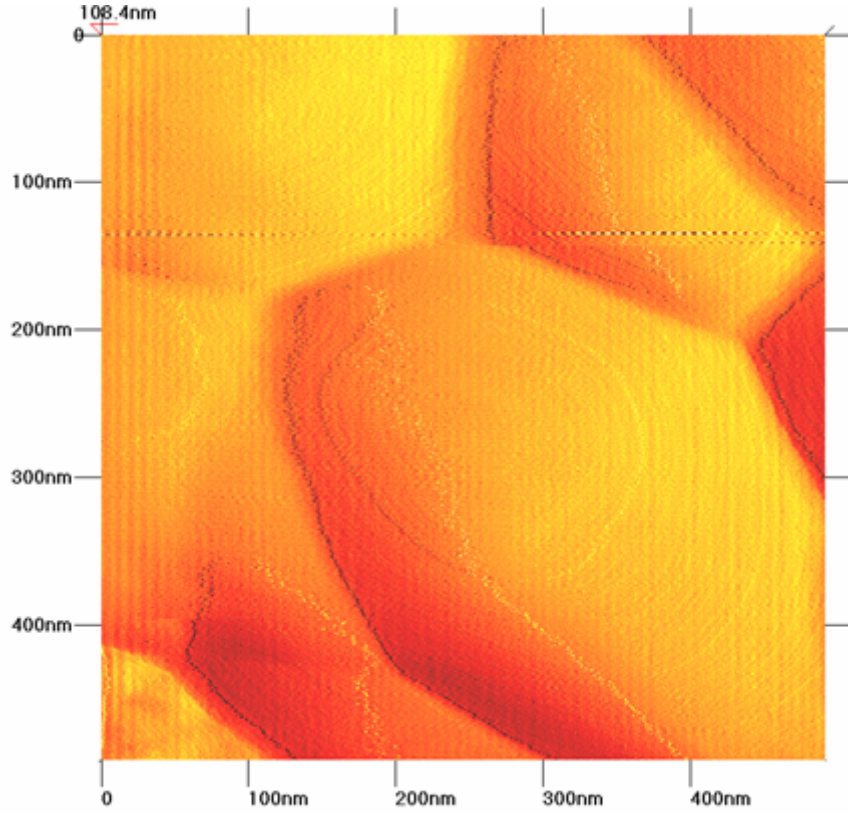
Aşınma deneyi sonrası numunelerin aşınma yüzeylerinden ve normal yüzeylerinden AFM kullanılarak görüntüler alınmıştır. AFM yardımıyla aşınma karakterleri incelenmeye çalışılmıştır. Sadece aşınma yüzeylerinden değil ayrıca aşınma uygulanmamış bölgelerden de görüntü alarak modifikasyon tabakasındaki yapı da incelenmiştir. Şekil 8.200'de 22(80mm, 15 pulse, 900mf) no'lu numunenin yüzeyinden elde edilmiş AFM görüntülerine bakıldığında taneler ve tanelerin üzerinde ince çatlaklar görülmektedir. Bu ince çatlaklar yüksek hızda ısınma ve soğumanın olduğu prosesler de genellikle görülen bir oluşumdur. Ani değişimler tanelerde ince çatlaklara sebebiyet vermektedir [155]. Literatürde de sıklıkla görüldüğü ifade edilen bu ince çatlaklar pulse plazma ile modifiye edilmiş numune gruplarının yüzeylerinde de görülmüştür. Tane boyutu modifikasyon işlemi sonucunda azalmıştır. Şekil 8.201'de bu yapının yan kesitten çekilmiş görüntüsü mevcuttur. Şekil 8.202'de görülen tek bir taneden alınmış AFM görüntüsünde ise pulse plazma işlemi sonrası tane sınırlarında meydana gelen ince çatlaklar daha iyi görülmektedir. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde nanometre boyutunda pürüzlülük belirlenmiştir. Aşınma bölgelerinden alınan pürüzlülük değerleri artış göstererek μm seviyesine çıkmıştır.



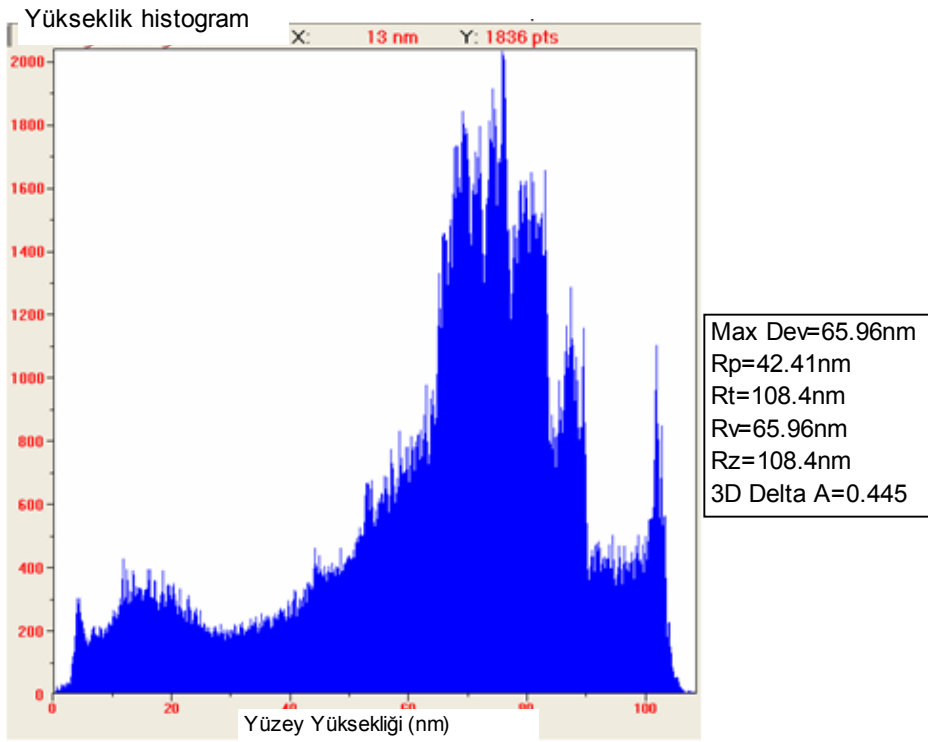
Şekil 8.200 22 no'lu numunenin yüzeyinden elde edilmiş AFM görüntüsü



Şekil 8.201 22 no'lu numunenin yüzeyinden yandan çekilmiş AFM görüntüsü



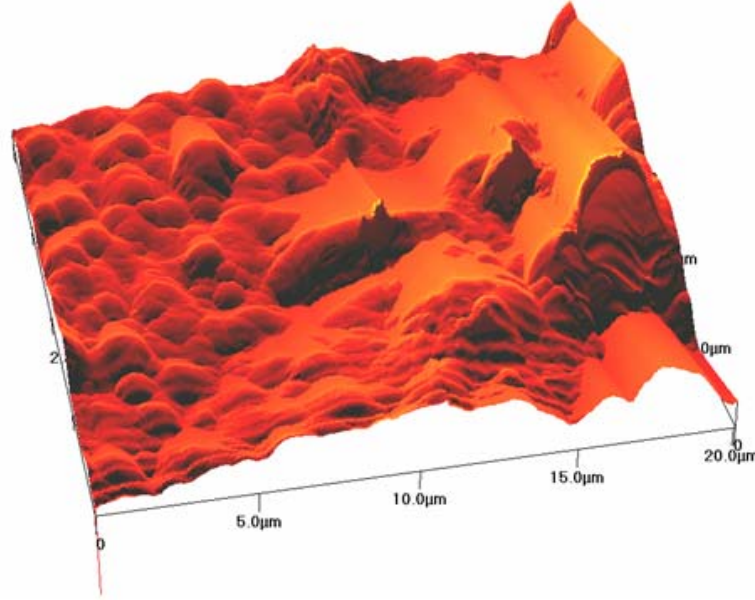
a)



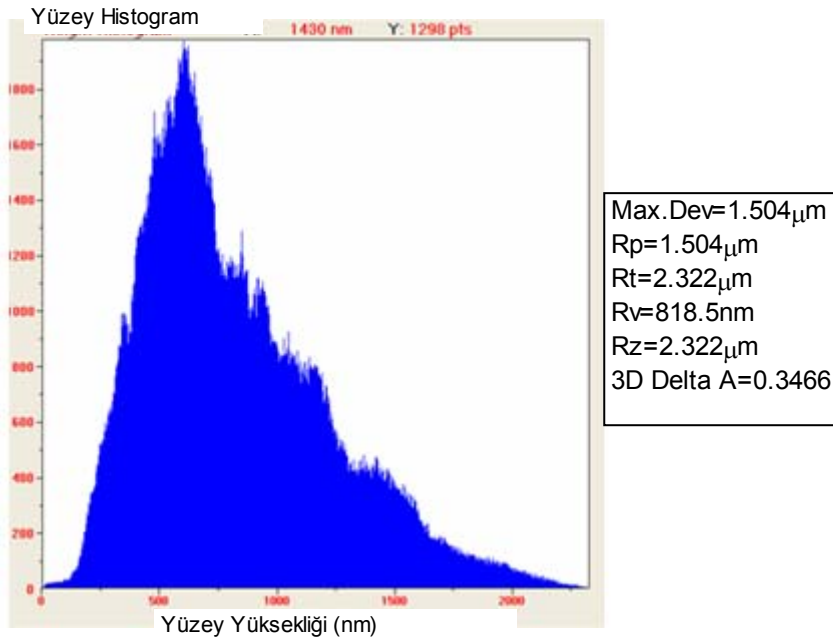
b)

Şekil 8.202 22 no'lu numunenin yüzeyinden a)tek tane yapısından elde edilmiş AFM görüntüsü b)tane üzerinden alınmış pürüzlülük grafiği

3(70mm, 5pulse, 800mf)no'lu numuneye aşınma hızı 0.15m/sn, aşınma mesafesi 200m ve yük olarak 7N seçilerek uygulanmış aşınma deneyi sonrası aşınma içi bölgeden alınmış AFM görüntülerinde yer yer malzeme kopmaları görülmektedir. Pürüzlülük ölçüm değerleri yüksektir (Şekil 8.203).



a)

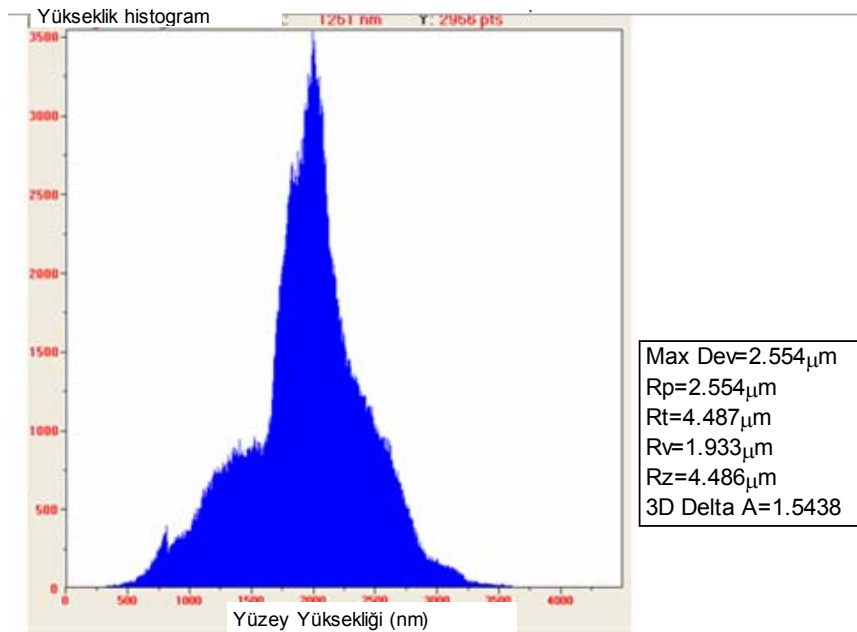
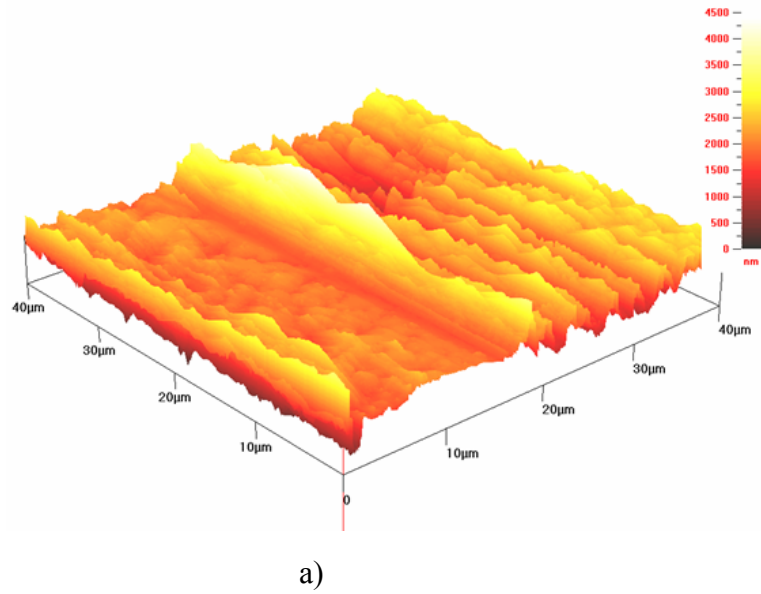


b)

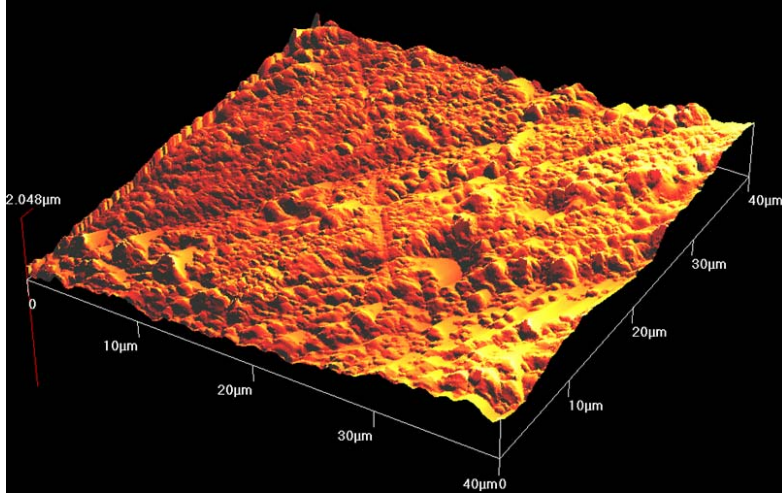
Şekil 8.203 3 no'lu numunenin 7N yük altında aşınma deneyi sonrası a)aşınma içi AFM görüntüsü, b)AFM ile pürüzlülük ölçümleri

Şekil 8.204'de 3 no'lu numuneye ait görüntüde tipik abrazif aşınma davranışı görülmektedir. Sert abrazif karakterli bu aşınmadan ölçülen pürüzlülük değeri de

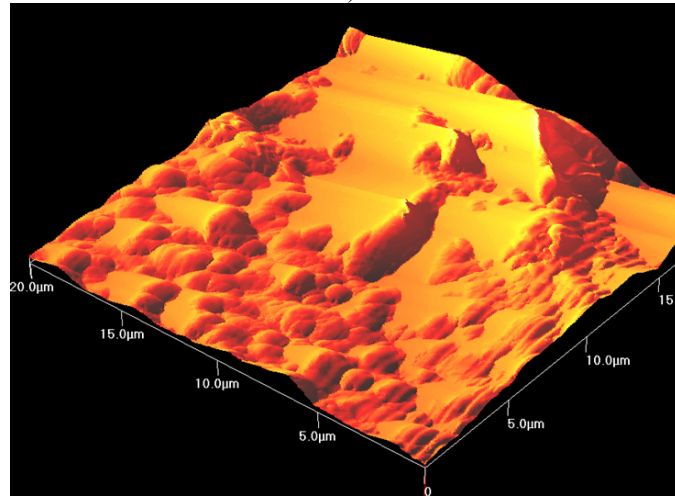
normal numuneden alınan değerlere göre daha yüksektir. Yüzeyde oluşmuş olan yiv genişlikleri $2\mu\text{m}$ 'den başlayıp $10\mu\text{m}$ 'e kadar genişlemiştir. Yine Şekil 8.205'de 3 no'lu numuneye ait aşınma sonrası AFM görüntülerinde farklı oluşumlar görülmektedir. Malzeme kopmaları ve yüzeyde süreksizlikler mevcuttur. Bazı bölgelerde derin oyuklar meydana gelmiştir. Bu bölgeden alınan pürüzlülük değerlerinin yüksek olması dikkat çekicidir. Bu değerlerin yüksek oluşu bölgede daha şiddetli bir aşınma olduğunun göstergesi olabilir.



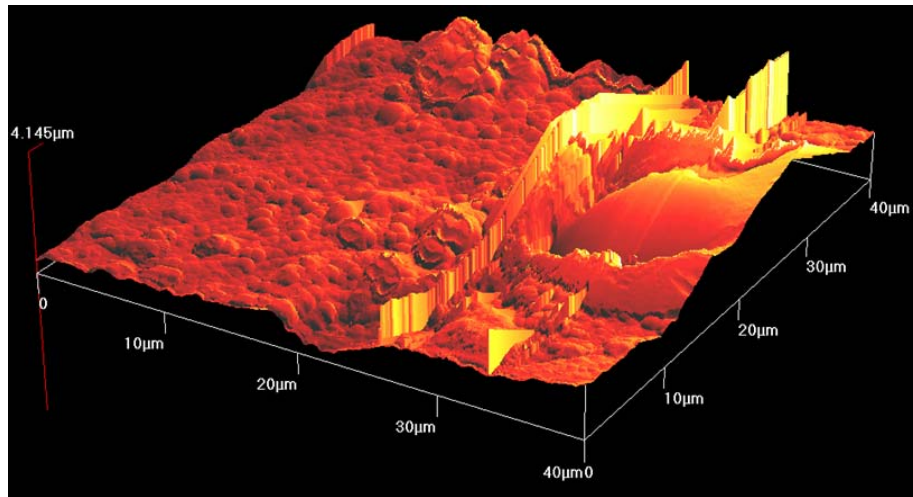
Şekil 8.204 a)3 no'lu numunenin 7N yük altında aşınma deneyi sonrası a)aşınma içi AFM görüntüsü b)AFM ile pürüzlülük ölçümleri



a)



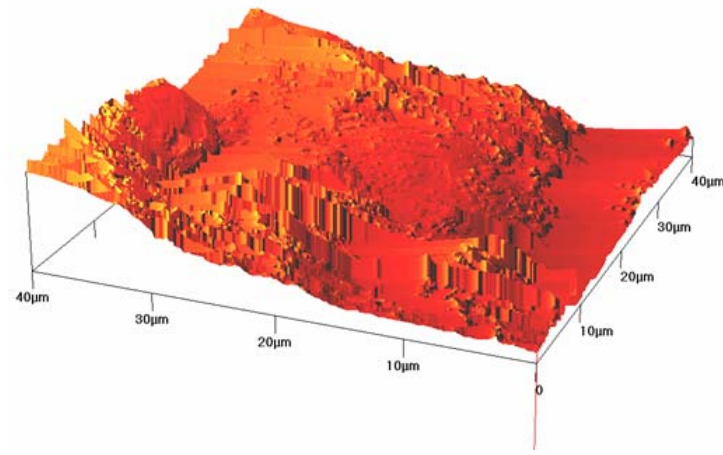
b)



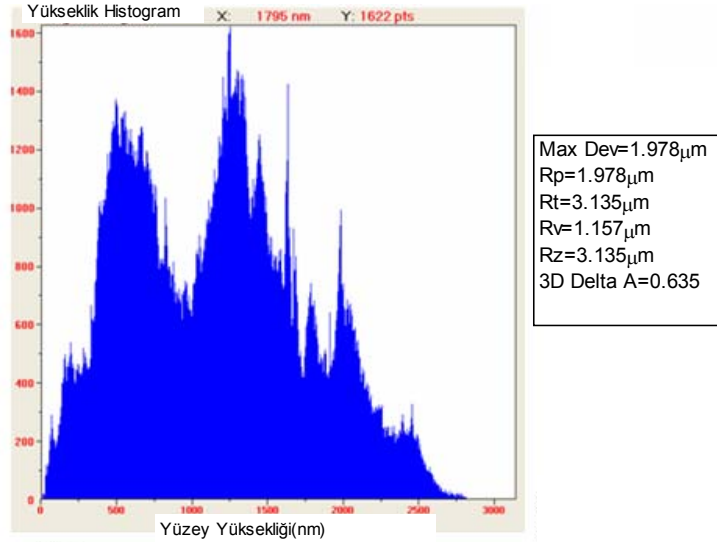
c)

Şekil 8.205 a) 3 no'lu numunenin 7N yük altında aşınma deneyi sonrası, a) aşınma içi bölgelerinden çekilmiş AFM görüntüleri, b) farklı bölgeden çekilmiş aşınma görüntüsü ve c) farklı bir bölgeden çekilmiş aşınma görüntüsü

Şekil 8.206 'da 16 (60mm, 15 pulse, 900mf) no'lu numunenin aşınma yüzey AFM görüntülerine göre yüzeyde deformasyon oluşumları görülmektedir. Meydana gelen yüzey derinliği 3 no'lu numuneye göre daha düşüktür. Bu grup numunenin üretim şartlarının değişik olması nedeniyle, modifikasyon tabaka kalınlık değerleri daha yüksektir. Tabaka kalınlık değerlerinin yüksek olmasından dolayı aşınma deneyi esnasında daha fazla dayanım göstermişlerdir. Uygulanan yük modifikasyon tabakasını aşmadığından dolayı oluşan pürüzlülük değerleri daha düşük olmaktadır.



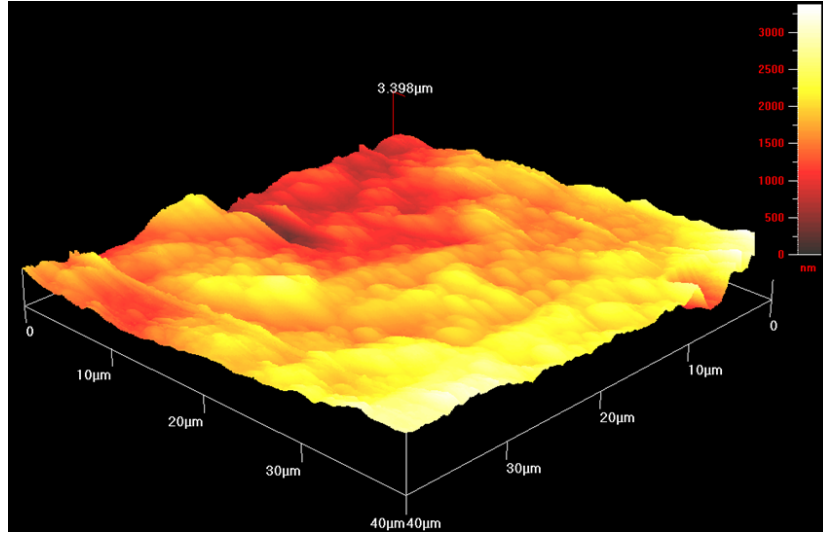
a)



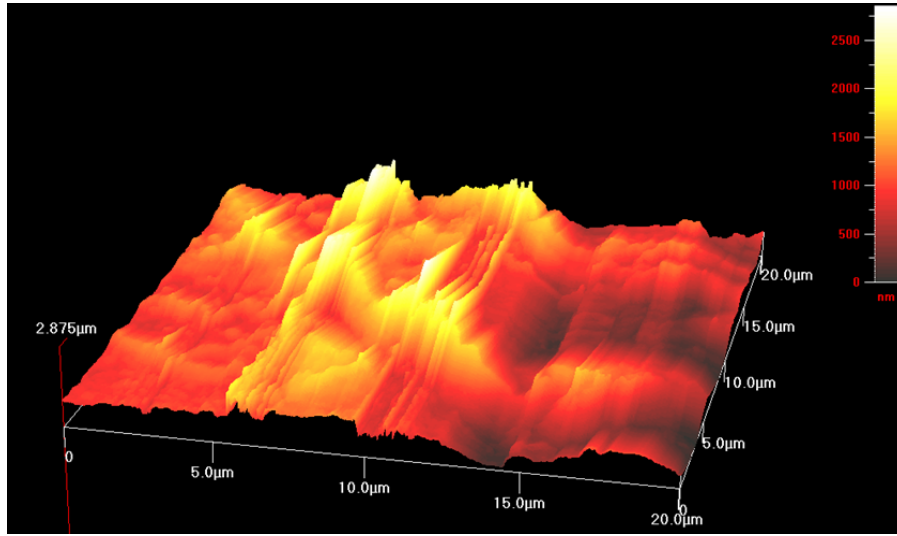
b)

Şekil 8.206 16 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında a)aşınma içi AFM görüntüsü, b) yüzey pürüzlülük değerleri

17 no'lu numunenin normal yüzeyinden alınan AFM görüntüsü Şekil 8.207'de verilmektedir. Şekil 8.208'de ise aşınma içi AFM görüntüleri verilmiştir. Pulluklama aşınma izleri taşıyan yapıda yivler derindir. Farklı genişliklerde pek çok yiv görülen yüzeyde malzeme kopmaları olduğu gözlemlenmiştir.



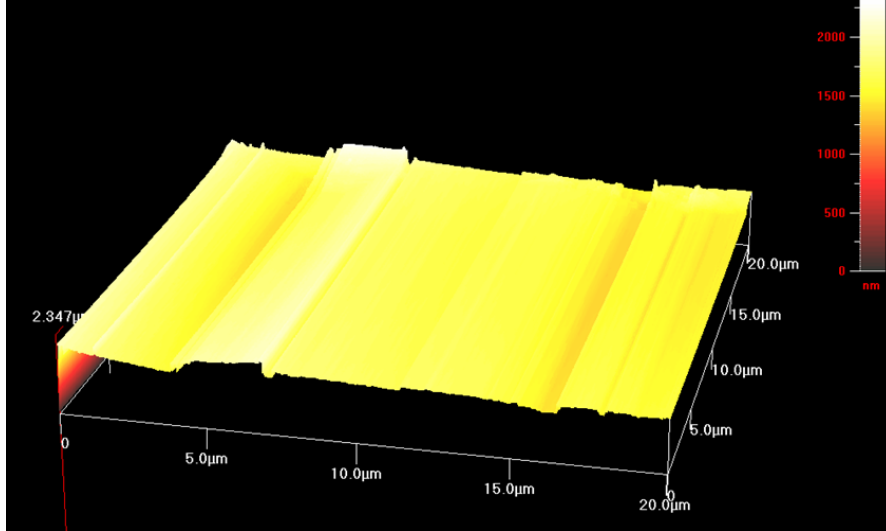
Şekil 8.207 17 no'lu numunenin normal yüzeyden AFM görüntüsü



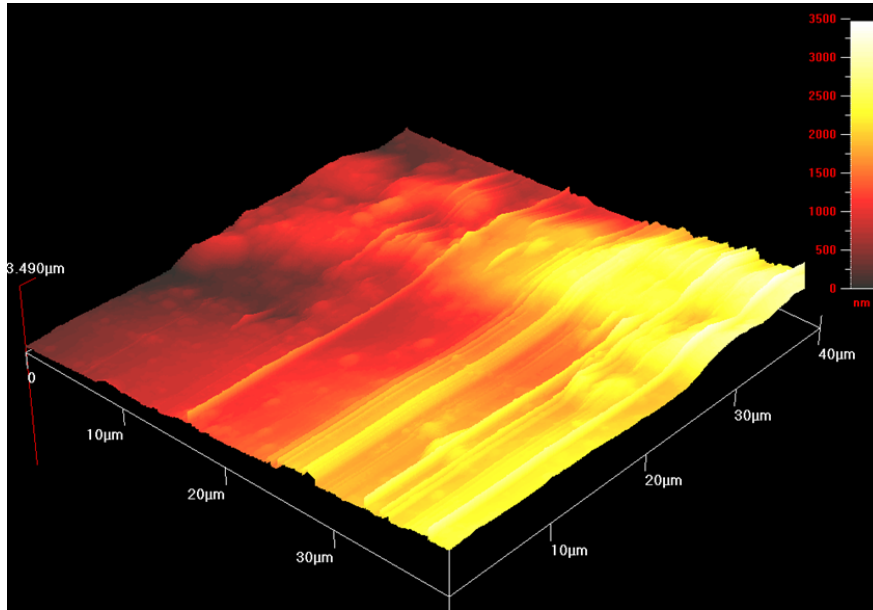
Şekil 8.208 17 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında aşınma içinden başka bir bölge AFM görüntüsü

20(70mm, 10pulse, 900mf)no'lu numunenin aşınma içi AFM görüntüsünde ise yükselti farklılıkları mevcuttur. Yüzeyden malzeme kopmuştur. Pürüzlülük değerleri yüksektir. Yüzeyde pulluklama tarzı aşınma oluşumları mevcuttur. Pek çok yiv

oluşumu gözlemlenmiştir. Yiv büyüklükleri kademeli bir şekilde artış göstermiştir (Şekil 8.209).



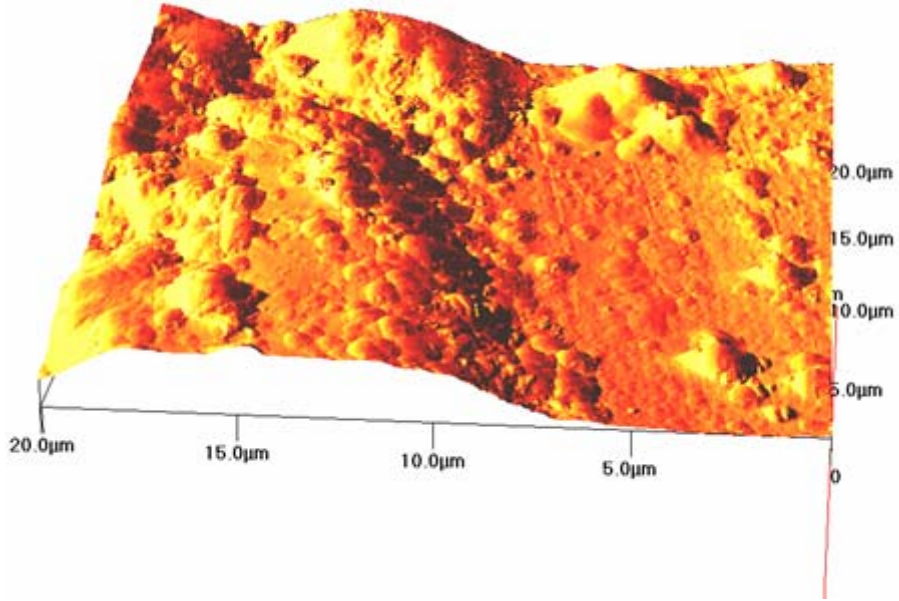
a)



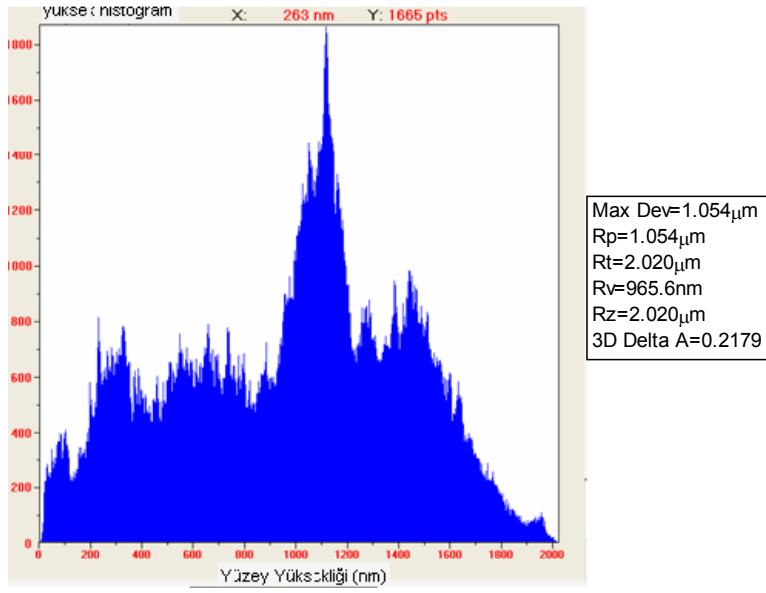
b)

Şekil 8.209 a) ve b) 20 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında farklı aşınma bölgelerinden alınmış AFM görüntüleri

22(80mm, 15pulse, 900mf) no'lu numunenin aşınma yüzey AFM görüntülerinde ince yiv oluşumları gözlemlenmiştir (Şekil 210). Yüzeyde deformasyon izleri görülmektedir. Yüzey pürüzlülük değerleri yüksektir.



a)



b)

Şekil 8.210 22 no'lu numunenin 0.15 m/sn hızda 7N yük altında a) aşınma içi AFM görüntüsü
b) pürüzlülük grafiği

BÖLÜM 9. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

9.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, düşük karbon ve alaşım miktarı ihtiva eden, ucuz ve kolay bulunabilen 4140 çeliğinin yüzey özelliklerinin geliştirilerek, pahalı ve zor bulunan çeliklerin yerine kullanılabilirliği araştırılmıştır. İki farklı pil kapasitesi, dört farklı numune nozul arası mesafe ve üç farklı pulse sayısı değişken parametreler olarak seçilmiştir.

Pulse plazma sistemiyle yüzeyleri modifiye edilen AISI 4140 çelik grubu numunelerine işlem sonrası yapılan deneysel çalışmalar yardımıyla bazı sonuçlara ulaşılmıştır:

Tüm numune grupları pulse plazma uygulandıktan sonra, hassas şekilde işlem yüzeylerinden kesilmiş, elde edilen kesit yapıları metalografik olarak hazırlanmıştır. Kesit yapıdan çekilmiş optik görüntülerinde, kontrast farklılığından dolayı açıkça fark edilebilen bir modifikasyon tabakası olduğu ve parametrelere göre bu modifikasyon tabakasının kalınlık değerlerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Parametrelere göre değişkenlik arz eden modifikasyon tabakalarından elde edilen sonuçlara göre:

1) Pulse sayısı arttıkça modifikasyon tabaka kalınlığı artmakta ve daha homojen ve düzgün bir hal almaktadır. Pulse sayısı 5, 10 ve 15 olarak seçilmiş bu çalışmada modifikasyon işlemi verimli şekilde uygulandığında: en yüksek tabaka kalınlığına 15 pulse etkisi altında elde edilmiştir. 5 pulse ile yapılan çalışmalarda 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.

2) Numune nozul mesafesinin artması veya azalması da tabaka kalınlığının diğer etkileyici faktörüdür. 50mm, 60mm, 70mm ve 80mm olarak seçilmiş mesafelerin içinde en uzak mesafe olan 80mm’de diğer mesafe şartlarına göre daha ince tabaka kalınlıkları (10 μ m) elde edilmiştir. En yüksek kalınlık değeri ise 50mm mesafede (57 μ m) elde edilmiştir. Mesafenin azalması nozulun yüzeye etkileşimini ve odaklanmasını kolaylaştırdığı için bu beklenen bir gelişmedir. Nozuldan saçılarak çıkan iyonlaşmış ürünlerin yüzeye tam odaklanarak girmesi bu proseste oldukça önem arz etmektedir. Mesafenin arttığı şartlar altında odaklanma sorun olmaktadır. Mesafenin artmasıyla etki alanı genişlemiş ve iyonize ürünler tam ve verimli şekilde spot bölgeye girememişlerdir. Dolayısıyla, modifikasyon tabaka kalınlıkları azalmıştır.

3) Ayrıca pil kapasitesi de modifikasyon tabakasının kalınlığında ve homojenliğinde etki sahibidir. Pil kapasitesi 800mf ve 900mf seçilmiştir. Pil kapasitesi 900mf olduğunda modifikasyon tabaka kalınlığının en yüksek değeri ve en homojen yapısı (13 no’lu numunede) elde edilmiştir. 13 no’lu numune grubunda numune nozul mesafesi 50mm, pulse sayısı 15, ve pil kapasitesi 900mf’dir. Pulse plasma işleminin bu parametrelerde uygulanmasıyla tabaka kalınlığı 57 μ elde edilmiştir. Bu değer pil kapasitesi 800mf ve numune nozul mesafesi 80mm ve pulse sayısı 5 olduğunda 12 μ m’ye kadar düşmektedir. Pil kapasitesinin artması sadece modifikasyon tabaka kalınlığını değil, ayrıca sertlik değerlerini de etkilemiştir. Numune grupları içinde en yüksek sertlik değerleri 900 mf pil kapasitesi kullanarak elde edilmiştir. Modifikasyon tabaka yapıları, kalınlıkları ve mekanik özellikler arasında farka sebebiyet veren parametrelerin etkisi, bu sonuçlardan sonra daha iyi anlaşılabilir. Bu sonuçlardan sonra daha iyi anlaşılabilir.

4) 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 en düşük değer olan 50mm kullanılmıştır. Bu değer altında 30mm ve 40mm’de denenmiştir. Fakat bu düşük mesafelerde yüksek enerjiden dolayı yüzeyde ergime ve birtakım bozulmalar gözlemlenmiştir. Bu sebeple 50mm’in üstündeki değerlerde çalışmaya karar verilmiştir.

5) Metalografik olarak hazırlanmış ve parlatılmış kesit yüzeylerde yapılmış SEM, EDS ve EPMA analizlerinde tabakalarda wolfram ve nitrojen element dağılımları incelenmiştir. İncelemelerde genellikle homojen bir dağılım gösterdikleri belirlenmiştir. Wolfram elementinin başarılı bir şekilde yüzeye sokulması mekanik özellikler açısından son derece önemlidir.

6) Elementel alan dağılım haritalarında oksijen elementine rastlanılmıştır. Pulse plazma açık atmosfer şartları altında uygulanan bir proses olması sebebiyle bu olağan bir sonuçtur.

7) Optik çalışmalardan sonra modifikasyon kesit yapılarını daha iyi görmek amacıyla yapılan sıvı azot içinde kırma işlemi sonrası yapılan SEM ve EDS analizlerinde; modifikasyon tabakasında küçük beyaz tanelere rastlanmıştır. EDS analizleri ile bu tanelerin pulse plazma işlemi esnasında tükenen elektroddan gelmiş olan wolfram ve/veya wolframın oksitli bileşikler olduğu belirlenmiştir. Bu beyaz küçük taneler modifikasyon tabakası boyunca dağınık şekilde bulunmaktadır. Bu wolfram tanelerinin boyutları diğer önemli bir noktadır. Boyutları yaklaşık olarak 1-2µm olan bu tanelerin aşınma dayanımının ve sertlik değerlerinin artmasında çok büyük etkiye sahip olduğu düşünülmektedir. Özellikle modifikasyon tabakasında 250-400nm aralığında boyuta sahip taneler arasında 1-2µm boyutundaki wolfram taneleri mekanik özellikler açısından büyük katkı sağlaması literatüre göre beklenen bir sonuçtur.

8) Ayrıca, modifikasyon tabakasında hızlı ısınma ve soğumadan meydana gelen tane küçülmeleri SEM yapılarında görülmektedir. Modifikasyon tabakasının dışında taneler oldukça büyüktür. İşlem uygulanmadan önce yapıda 6-8 µm olan tane boyutları, işlem sonrası 250-400 nanometre boyutuna kadar düşmüştür. Modifikasyon tabakasında ince ve yoğun tane oluşumları dikkat çekicidir.

9) Küçük ve yoğun taneler dispersiyonla sertleşme olmuş olabileceğinin göstergesi olabilir.

10) Bazı kırık yüzeylerde çok belirgin olarak kolonsal büyüme yönlenmeleri gözlemlenmiştir. Bu yönlenmeler yine mekanik özellikler üzerinde çok olumlu etkiye sahiptir. Yönlenmelerin olduğu yönlerde atomların sıkı diziliminden dolayı hem aşınma dayanımı yüksek olur hem de çatlak ilerlemesi oldukça zordur.

11) Yapılana XRD çalışmalarında yapıda α -Fe, γ -Fe, Fe₃N, W, W₃O, W₃O₈ bileşiklerine rastlanmıştır. Bu fazların varlığı aşınma dayanımını ve sertlik değerlerini artırmaktadır.

12) X-ışınları çalışmaları sonucu elde edilen FWHM değerlerinden, tane boyutları hakkında bilgi edinmek mümkündür. X ışınları sonuçlarında; pik genişlikleri artmıştır ve bu genişleme pulse plazma uygulanma parametrelerine göre değişkenlik göstermektedir. FWHM değerlerinden işlem görmüş numunelerin tane boyutlarının işlem görmemiş numuneye göre çok küçüldüğünü anlamamız mümkün olmuştur.

13) Kalıntı gerilim ölçümlerinde numune gruplarının yüzeylerinde basma gerilmeleri görülmüştür. Literatür kısmından da hatırlanacağı üzere mekanik özellikler açısından basma gerilmeleri son derece önemlidir. Sertlik değerlerinin artmasında etkilidirler. Ayrıca basma gerilmeleri malzemelerin yorulma ömürlerini de artırmaktadır. Literatüre uygun olarak -218-926 MPa aralıklarında kalıntı gerilim değerleri elde edilmiştir.

14) Yüksek kalıntı gerilim değerlerinin sebebinin, ısınma-soğuma hızının çok yüksek ve yüzeyde meydana gelen deformasyonun çok fazla olmasından dolayı olduğu düşünülmektedir.

15) Pulse plazma esnasında parametrelerin değişimi, diğer deneysel sonuçları etkilediği gibi kalıntı gerilim değerlerini de etkilemiştir.

16) Kalıntı gerilim sertlik artışında tek başına etken değildir. Ayrıca numune mikroyapısının (oksit bileşiklerin vb.) etkisi vardır.

17) Kesit yüzeyden numune içerisine doğru alınan mikrosertlik değerlerinde elde edilen en yüksek değer 1050 HV 'dir (13 no'lu numunede, 50mm mesafe, 15 pulse 900mf pil kapasitesi). Sertlik değerleri yüzeyden içeriye doğru ilerledikçe önce azalıp sonra artmakta, modifikasyon tabakasının dışına çıkıldığında ise yüksek oranda düşme eğilimi göstermektedir. Sertlikte en düşük değer 700HV ile 6 no'lu numunelerde görülmüştür. 6 no'lu numunede pil kapasitesi 800mf, nozul numune arası mesafe 80mm, pulse sayısı ise 5'dir. Pil kapasitesi düşük, nozul-numune arası mesafenin yüksek, pulse sayısının az oluşu sertlik değerlerini düşürmüştür. Numune gruplarında elde edilmiş sertlik değerleri sonucunda pulse plazma uygulanma şartlarının önemli olduğunu görülmüştür.

18) Numune-nozul mesafesi arttığında iyonize ürünlerin iş parçasının yüzeyine tam ve homojen bir biçimde odaklanarak girmesi zorlaşmaktadır. Bu sebeple giren iyonize ürünlerin miktarsal olarak diğer mesafelere göre az olması durumu oluşmaktadır, bu sebeplerden ötürü sertlik değerleri de değişerek düşmektedir.

19) Modifikasyon işlemine maruz kalan (optimum şartlarda üretilmiş) numunelerin sertlik değerleri, işlem görmemiş halde elde edilmiş sertlik değerlerine göre 4-6 kat artmıştır. Literatürde mevcut çalışmalara göre bu artış çok iyi bir sonuçtur. Diğer bir çok proste ancak ön ısıtma işlemi uygulayarak yüksek sertlik değeri elde edebilmektedir. Ön ısıtma işlemi uygulamadan, birkaç dakikada yüksek sertlik değerleri elde etmek prosesin verimliliğini ve ekonomikliğini açıkça göstermektedir. Diğer yöntemlerle de çalışmamızda elde ettiğimiz mekanik özellikleri yakalamak hem uzun, hem zahmetli, hem de pahalı olmaktadır. Örneğin; aynı sertlik değerleri plazma nitürleme ile yaklaşık olarak 20-30 saatlik bir çalışma ile elde edilmektedir. Uzun proses süreleri hem enerji, hem gaz hem de diğer sarf malzemelerinin tüketiminin artmasına sebep olarak maliyetleri artırmaktadır. Sürenin çok kısa olması nedeniyle de enerji sarfiyatı ve gaz sarfiyatı pulse plazma yönteminde oldukça düşüktür. Pulse plazma uygulamaları hem kolay, hem çok kısa sürede yapılabilen (1-2 dk.) dolayısıyla da ekonomik olmaktadır. İş ve iş gücü kaybı da bu yöntemle en aza indirilebilir.

20) Sertlik değerlerinin artışıında: x-ışınları ile varlıkları belirlenen, γ -Fe, Fe₃N, W, W₃O, W₃O₈ fazları, pulse plazma ile meydana gelmiş yüksek deformasyon ile oluşmuş küçük taneler, deformasyon sertleşme mekanizması, basma kalıntı gerilmeleri etkindir.

21) 200m için 0.15m/sn hızda 5N, 7N ve 9N yük altında uygulanan aşınma deneylerinde farklı sertlik ve faz yapısına sahip numune grupları beklenildiği üzere değişik sürtünme katsayı değeri vermiştir.

22) En düşük sürtünme katsayı değeri; 900mf pil kapasitesi, 50mm nozul numune mesafesi, 15 pulse sayısı ile elde edilen 13 no'lu numunede görülmüştür.

23) Yük artmasıyla sürtünme katsayı değeri bazı grup numunelerde artmış, bazılarında azalmıştır. Yükün artmasıyla sürtünme katsayısının azalması yüzeyde oluşan oksit tabaka varlığından dolayı olabilir. Ayrıca yüzeyden kopan aşınma ürünlerde yüzeye sıvanarak aşınmanın azalmasında bir faktör oluşturmuş olabilirler.

24) Aşınma deneyleri sonucunda, aşınma hızı en düşük olarak 13 (50mm nozul mesafesi, 900mf pil kapasitesi, 15 pulse sayısı)no'lu numunede görülmüştür.

25) Aşınma miktarlarında yükün artmasıyla (bazı istisnalar hariç) artış görülmüştür.

26) Pulse plazma ile yüzey işleme uygulanmış çeliklerde, işlem uygulanmamış AISI 4140 çeliklerine göre 2 kat daha düşük sürtünme katsayı değerleri elde edilmiştir.

27) Aşınma yüzeyleri incelendiğinde; genellikle kazımalı ve pulluklama (abrazif) karakterli aşınma izleri gözlemlenmiştir. İnce yivler oluşmuştur.

28) Yükün artmasıyla yüzeylerde meydana gelen yivler derinleşmiş ve genişlemiştir.

29) Aşınma esnasında elde edilen aşınma ürünlerinde alümina bilyadan kopan parçaların miktarı fazladır.

30) Modifikasyon sonrası numune gruplarının aşınma dayanımları artmıştır. Özellikle kırık yüzey görüntülerinde gördüğümüz, yüzeyden içeriye doğru (yukarıdan aşağıya doğru) meydana gelmiş kolonsal büyüme yönlenmeleri aşınma dayanımında artışa neden olmuştur.

31) Özellikle yüzeyde 250-400nm aralığında ince tanelerden oluşmuş modifikasyon tabakasında 1-2µm boyutunda ki wolfram ve/veya wolfram oksit tanecikleri aşınma dayanımını artırmıştır. Sert ve büyük wolfram oksit taneleri ve nitrür bileşenleri aşınma dayanımını artırmıştır. Oksitli bileşikler adhezyonu düşürerek sürtünme katsayısını düşürmektedirler.

Sonuç olarak; pulse plazma ile yüzeyleri modifiye edilmiş ucuz ve kolay bulunabilen AISI 4140 çeliklerine uygulanmış tüm deneysel çalışmalar neticesinde mekanik ve aşınma dayanımı gibi özelliklerin geliştirilmesi adına çok önemli ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. Özellikle alaşımli ve pahalı çelik gruplarının yerine, kolay bulunan ve ucuz çelik gruplarının yüzey özelliklerinin geliştirilerek kullanılabilmesi adına yapılan bu çalışma sonuçlarının önemli olduğu düşünülmektedir. Özellikle maliyetlerin son derece önemli olduğu günümüzde, hem kurulumu hem de uygulamaları ucuz olan pulse plazma prosesinin 1-2 dk. gibi çok kısa sürede meydana getirdiği yüzey özelliklerinin ekonomik açıdan büyük katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Diğer yüzey işlem prosesleri ile (plazma nitrüleme, iyon imp. v.s gibi) bu kadar kısa sürede (1-2dk.) yüzeyde elde ettiğimiz gelişimi elde etmek mümkün değildir. Hammadde ve enerji temininde sıkıntı çeken endüstriyel alanlarda, maliyeti çok az olan bu yöntemin kullanılmasının çok yönlü kazançlar sağlayacağı umulmaktadır. Özellikle uygun parametre seçimi ile diğer pek çok yüzey işleminden daha verimli sonuçlar elde edilebilmesi mümkündür. Sadece iş göreceğ yüzeye pulse plazma uygulanması diğer bir avantajdır. Tüm yapı bozulmadan yüzey işlemi gerçekleştirilmektedir. Yüzeyde meydana getirdiği değişimler eşdeğer birçok prosese göre çok daha avantajlıdır.

Ekonominin ve hammaddenin özellikle zamanın son derece önemli olduğu günümüzde pulse plazma prosesinin endüstriyel alanlarda her anlamda büyük kazançlar sağlayacağı düşünülmektedir.

9.2. Öneriler

- 1) Pulse plazma esnasında kullanılan elektrot değiştirilerek modifikasyon tabakasına elektrodun etkisi incelenebilir.
- 2) Yüzeyleri modifiye edilen çelik numune gruplarında modifikasyon tabakasında kırılma tokluğu çalışmaları yapılabilir.
- 3) Literatürde korozyon dayanımı arttığı belirtilmektedir. Uygun bir elektrot ve çelik türü ile korozyon dayanımı araştırılabilir.
- 4) Sistemde yeni düzenlemelere yapılarak pulse plazma esnasında kullanılan pil kapasitesi 1000mf ve 1200mf'a çıkarılarak yüksek enerji kullanımının etkisi incelenebilir.
- 5) Pulse plazma uygulanma parametreleri değiştirilerek değişik şartlarda, farklı çalışmalar yapılabilir.
- 6) Değişik %C ve alaşım elementine sahip çeliklerde pulse plazmanın etkisi araştırılabilir. Karbonun ve alaşım elementinin önemi belirlenebilir.
- 7) Farklı analiz cihazlar kullanılarak yüzeydeki element dağılımı daha detaylı incelenebilir.
- 8) Kalıntı gerilim ölçümlerinde diğer teknikler denenebilir. Değişik teknikler neticesinde elde edilmiş veriler karşılaştırılabilir.
- 9) Aşınma deneyi farklı hız, yük ve mesafe için denebilir.
- 10) Aşırı ısınma ve soğuma sonucu yapıda oluşan dislokasyonlar ve diğer oluşumlar için pole-figure çalışması yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] “Çelik Yüzeylerin Kaplanması”, Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, pp.1-8, 2006
- [2] QUERCIA, G., GRIGORESCU, I., CONTRERAS, H., DI RAUSO, C., GUTIERREZ-CAMPOS, D., “Friction and Wear Behaviour of Several Hard Materials”, pp359-369, 2001.
- [3] KESSLER, O.H., HOFFMANN, F.T., MAYR, P., “ Combinations of coating and heat treating processes: establishing a system for combined processes and examples”, Surface and Coatings Technology, Vol.108–109, pp.211–216, 1998
- [4] KWOK, C.T., LK, H., CHENG, F.T., MAN, H.C., “Effect of processing conditions on the corrosion performance of laser surface-melted AISI 440C martensitic stainless steel”, Surface and Coatings Technology, Vol.166, pp.221–230, 2003
- [5] ZLATANOVIC, M., POPOVIC, N., BOGDANOV, Z., ZLATANOVIC, S. “Pulsed Plasma-Oxidation Of Nitrided Steel Samples”, Surface and Coatings Technology 174 –175 , pp.1220–1224, 2003
- [6] ŞEN, S.,“ Isıl işlem Ders Notları” Sakarya Üniveristesi, Teknik Eğitim Fakültesi, pp.5-15, Sakarya, 2006.
- [7] KOSTOV, K.G., UEDA, M., LEPIENSKY, M., SOARES, P.C., JR.C, GOMES, G.F., SILVA, M.M., REUTHER, H., “Surface modification of metal alloys by plasma immersion ion implantation and subsequent plasma nitriding” Surface & Coatings Technology Vol.186 , pp.204–208, 2004
- [8] ÜSTEL, F., “Yüzey İşlemleri Ders Notları”, Sakarya Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, pp.10-20, Sakarya, 2006
- [9] PATWA, R., SHIN, Y.C., “Predictive modeling of laser hardening of AISI5150H steels”, International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol.147, pp. 307–320, 2007
- [10] YARALI, Y., “Pulse plazma Teknolojisi ile Çeliklerde Yüzey Modifikasyonları” Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Ens.,Yüksek Lisans Tezi, 2003

- [11] ASM Handbok, "Vol 6.Heat Treatment", pp.248-252, 2001
- [12] ASBY I, J., JOHNS, "Engineering Materials", Pergamon Pres, pp.40-50, 1992
- [13] ASHBY, M.F., JONES, D.R.H., "Engineering Materials, An Introduction to Their Properties and Application", Pergamon Pres, Oxford, pp.20-40, 1993
- [14] KUO, Y.S., BUNSHAH, OKRENT, D., VAC., J., " Ion Plating&Ion Implantation", Sci&Tech., A4(3), pp.397, 1986
- [15] CONRAD, J.R., CHEN, R.A., SCHEUER, J.T., SRIDHARAN, K., WORZALA, F.J., "Surface Modification of materials by Pulse Plasma Source Ion Implantation", Plasma and Laser Processing of Materials, Edited by UPADHYA, pp.141-146, 1991
- [16] CONRAD, J.R., Proc.Int.Conf. on Surface Modification of Metals by Ion Beams, Riva del Garda, Sept., pp.12-16, 1988
- [17] DEARNALEY, G., BAUMANN, S., NELSON, R.S.ve STEPHEN, J., "Ion Implataion, North Holland, Plasma and Laser Processing of Materials, Edited by UPADHYA, pp.120-123, 1989
- [18] TANG, B.Y., CHU, P.K., WANG, S.Y., CHOW, K.W., WANG, X.F., "Methane and Nitrogen Plasma Immersion Ion Implantation of Titanyum Metal", Surface and Coatings Tech., Vol. 103-104, pp.248-251, 1998
- [19] CHUN, S.Y., CHAYAHARA, A., HORINO, Y., "Development of plasma –Based Ion Implantation (PBII) Techniques at Osaka National Research Ins." Surface and Coatings Tech., Vol. 136, pp.32-35, 2001
- [20] PATWA, R., SHIN, Y. C., "Predictive Modeling Of Laser Hardening Of AISI5150H Steels", International Journal Of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, pp.307–320, 2007
- [21] SUUTALA, J., TUOMINEN, J., VUORISTO P., "Laser-Assisted Spraying And Laser Treatment Of Thermally Sprayed Coatings", Surface&Coatings Technology Vol. 201, pp.1981–1987, 2006
- [22] NAVAS, C., VĪJANDE, R., CUETOS,J.M., FERNÁNDEZ, M.R., DAMBORENEA, J., "Corrosion Behaviour Of NiCr Plasma-Sprayed Coatings Partially Melted With Laser", Surface & Coatings Technology, Vol. 201, pp.776–785, 2006
- [23] VALETTE, S., STEYER, P., RICHARD, L., FOREST, B., DONNET, C., AUDOUARD, E., "Influence Of Femtosecond Laser Marking On The Corrosion Resistance Of Stainless Steels", Applied Surface Science Vol. 252 , pp.4696–4701, 2006

- [24] SCHAAF, P., KAHLE, M., CARPENE, E., “ Reactive Laser Synthesis Of Carbides And Nitrides”, Applied Surface Science, Vol. 247, pp.607–615, 2005
- [25] HEITKEMPER, M., FISCHER, A.,BOHNE, C.H., PYZALLA, A., “Wear Mechanisms Of Laser-Hardened Martensitic High-Nitrogen-Steels Under Sliding Wear, Wear Vol. 250 , pp. 477–484, 2001
- [26] NOORDHUIS, J., HOSSON, DE., M., TH., J., “ Surface Modification by Means of Laser Melting Combined with Shot Peening” Edited by, SUDARSHAN, T.S., BRAZA, J.F., pp.465-470, 1992
- [27] TYURIN, N., KOLISNICHEHK, O.V, ve TSYGANKOV, N.G., “Pulse Plasma Hardening of Tolls”, The Paton Welding Journal, Vol.1, pp. 38-43, 2001
- [28] ZDUNEK, K.,“Combided Impulse-Stationary Impulse Plasma Deposition”, Surface And Coatings Tech., Vol. 98, pp. 1448-1454, 1998
- [29] ZDUNEK, K., BASZKIEWICZ, J., BOLDOK, Z., JELENKOWSKI, J., PSODA, M., SMOLIK, J., “Dublex Antiabrasive Coating Produced By Impulse Plasma Deposition”, Surface and Coatings Tech., Vol. 98, pp.1444-1447, 1998
- [30] KOSTOV, K.G., UEDA, M., LEPIENSKY, M., SOARES, P.C. JR., GOMES,G.F.,SILVA, M.M., REUTHER, H., “Surface Modification Of Metal Alloys By Plasma Immersion Ion Implantation And Subsequent Plasma Nitriding”, Surface & Coatings Technology, Vol. 186, pp.204–208, 2004
- [31] HEITKEMPER, M., FISCHER, A.,BOHNE. C.H., PYZALLA, A., “Wear Mechanisms Of Laser-Hardened Martensitic High-Nitrogen-Steels Under Sliding Wear, Wear Vol.250, pp.477–484, 2001
- [32] PIEKOSZEWSKI, J., WERNER, Z., SZYMCZYK, W., “Application of High Intensity Pulsed Ion and Plasma Beams in Modification of Materials”, Vacuum Vol.63, pp.475-48, 2001
- [33] UGLOV, V.V., ANISHCHIK, V.M., ASTASHYNSKI, V.V., STALMOSHENOK, E.K., RUSALSKY, D.P., CHERENDA, N.N. RUMYANCEV, I.N., ASKERKO, V.V. KUZ’MITSKI, A.M., “ Structure-Phase Transformation Of High Speed Steel By Various High Intensity Ion-Plasma Treatments” Surface and Coatings Technology Vol.180 –181, pp.108–112, 2004
- [34] WEN, F., LO, Y.L., LIN, C.H.; MOU, S.C., “ A Pulse DC Plasma Deposited Resistor Process”, Materials Science Forum, Vol.505-507, pp.865-870, 2006

- [35] GUAN, Q.F., ZOU, H., ZOU, G.T., WU, A.M., HAO, S.Z., ZOU, J.X., QIN, Y., DONG, C., ZHANG, Q.Y., “Surface Nanostructure And Amorphous State Of A Low Carbon Steel Induced By High-Current Pulsed Electron Beam”, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 196, pp.145–149, 2005
- [36] IVANOV, YU., MATZ, W., ROTSHEIN, V., GUNZEL, R., SHEVCHENKO, N., “Pulsed Electron-Beam Melting Of High-Speed Steel: Structural Phase Transformations And Wear Resistance”, *Surface and Coatings Technology* Vol.150), pp.188–198, 2002
- [37] IVANOV, Y.F., ROTSHEIN, V.P., PROSKUROVSKY, D.I, ORLOV, P.V., POLESTCHENKO, K.N., OZUR, G.E, GONCHARENKO, I.M., “Pulsed Electron-Beam Treatment Of WC–Tic–Co Hard-Alloy Cutting Tools: Wear Resistance And Microstructural Evolution” *Surface and Coatings Technology* Vol.125, pp.251–256, 2000
- [38] IVANOV, Y.F., ROTSHEIN, V.P., MARKOV, A.B., Proc. 1st International Congress on Radiation Physics, High Current Electronics and Modification of Materials, Vol.3, Tomsk, Russia, pp.58–62, 2000
- [39] 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, pp.517–520, 2003
- [40] SHENGZHI, H., GAO B., AIMIN, W., ZOU, J., QIN, Y., DONG, C., JIAN, A., QINGFENG, G., “Surface Modification Of Steels And Magnesium Alloy By High Current Pulsed Electron Beam”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* Vol.B 240, pp. 646–652, 2005
- [41] DONG, C., WU, A., HAO, S., ZOU, J., LIU, Z., ZHONG, P., ZHANG, A., XU, T., CHEN, J., XU, J., LIU, Q., ZHOU, Z. “Surface Treatment By High Current Pulsed Electron Beam”, *Surface And Coatings Technology*, Vol.163 –164, pp.620–624, 2003
- [42] MUELLER, G., ENGELKO, V., WEISENBURGER, A., HEINZEL, A.”Surface Alloying By Pulsed Intense Electron Beams”, *Vacuum* Vol. 77, pp.469–474, 2005
- [43] 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, pp.246–252, 2006
- [43] TYURIN, N., KOLISNICENHK, O.V., “Surface Modification by Pulse Plasma”, *Scientific and Technical, The Paton Welding Journal*, pp.1-6, 2001

- [44] 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 (Sur7tec)*, Indian welding society, Chennai, June, 2007
- [45] POGREBNJAK, A., TYURIN, Y., “ Modification Of Material Properties And Coating Deposition Using Plasma Jets”, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, Russian Academy of Sciences, Vol.48 (5) , pp. 487-512, 2005
- [46] POGREBNJAK, A D, TYURIN, Y., “ Modification of material properties and coating deposition using plasma jets”, *Physics ± Uspekhi* 48 (5), pp. 487 ± 514, (2005)
- [47] TYURIN, N., Y., KOLISNICENHKO, O.V ve TSYGANKOV, N.G., “Pulse Plasma Hardening of Tolls”, *Autowelding*, Vol., pp.13-18, 2001
- [48] BORISOV, Y.S., KOLISNICHENKO, O., “Effect of Parameters of Heating the Surface of a Part on Structure of Hardened Layers of Steel U8 in plasma-Detonation Treatment”, *Scientific and Technical, The Paton Welding Journal*, pp.22-25, 2003
- [49] POPOVIC, I., ZLATANOVIĆ, M., “Electrical and Optical Signal Analysis of Pulse Powered Glow Discharge System”, *Materials Science Forum*, Vol.518, pp.337-342, 2006
- [50] KUN, W., XINGFANG, W., YING, F., YANG, S., “ Corrosion Resistance and Microstructure of Stainless Steel Modified by Pulsed High Energy Density plasma, *Journal of Materials Science*, pp. 4633-4638, 1999
- [51] PIEKOSZEWSKI, J., WERNER, Z., LANGER, J., WALIS, L., “Modification of the Surface Properties of Materials by Pulsed Plasma Beams”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 106, pp. 228-233, 1998
- [52] PIEKOSZEWSKI, J., LANGER, J., WALIS, L., WERNER, Z., “Intense Plasma Pulses: Two Modes Of The Use For Surface Processing Purposes”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 93, pp. 209-212, 1997
- [53] 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, pp.49–56, 2000
- [54] 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), pp.193–197, 2000;
- [55] PIEKOSZEWSKI, J., WERNER, Z., LANGNER, J., JAKUBOWSKI, L., “Pulse Implantation Doping-Concentration Profiles And Surface

- Morphology”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Vol. 209-210, pp. 477-482, 1983
- [56] PIEKOSZEWSKI, J., WALIS, L., LANGNER, J., “Surface Morphology Of Nitrogen-Alloyed Steels Using High Intensity Pulsed Plasma Beams” Materials Letters Vol.32, pp. 49-53, 1997
- [57] 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, pp.125-134, 2002
- [58] 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, pp.517–520, 2003
- [59] GARKUSHA, I., BYRKA, E., CHEBOTAREV, V., DEREPOVSKI, N. T., MÜLLER, G., SCHUMACHER, G., POLTAVTSEV, N.S. TERESHIN, V.I., “Properties Of Modified Surface Layers Of Industrial Steel Samples Processed By Pulsed Plasma Streams”, Vacuum, Vol.58, pp.195-201, 2000
- [60] SONG, R., ZHANG, G., CHEN, K., “Electron Beam Surface Treatment. Part I: Surface Hardening Of AISI D3 Tool Steel”, Vacuum Vol. 69, pp.513–516, 2003
- [61] 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, pp.85-97, 2000
- [62] 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, pp.55–73, 2000
- [63] 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, pp.5072–5076, 2007
- [64] PIEKOSZEWSKI, J., GRÖTZSCHEL, 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, pp.394-399, 2000
- [65] 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, pp.246–252, 2006
- [66] NOVAKOVA, A.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, pp.108–112, 2004
- [67] PODGORNIK, B., VIZINTIN, J., LESKOVSEK, V., “ Tribological Properties of Plasma and Pulse Plasma Nitrided AISI 4140 Steel, Surface and Coatings Tech. Vol.108-109, pp.454-460, 1998
- [68] TONG, X., ZHANG, Z., DU, X., LIU, D., 5th World Seminar on Heat Treatment and Surface Engineering, IFHT’95, Isfahan, Iran, pp.599, 1995
- [69] WERNER, Z., STANISAWSKI, J., PIEKOSZEWSKY, 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, pp.263-267, 2003
- [70] MICHALSKI, A., “Nanokristalline Iron Layers Produced By Pulse Plasma Method”, Nanostructured Materials, Vol.8, pp.725-730, 1997
- [71] TYURIN, Y.N., POGREBNJAK, A.D., “Advances In The Development Of Detonation Technologies And Equipment For Coating Deposition”, Surface and Coatings Technology, Volume 111, pp.269-275, 1999
- [72] <http://users.iptelecom.net.ua/~ytyurin>, Ekim 2007
- [73] TYURIN, Y., KOLISNICHENKO, O., SIGANKOV, N., “ Development Of Pulsed –Plasma Technologies For Producing materils”, Autowelding, Kiev, No. 1, pp 22-25, 2002
- [74] ASKELAND, D., “ Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri”, Çeviri: Erdoğan , M., cilt 1, pp.146-148, 2000,
- [75] Malzeme Bilgisi, Cilt 2, İ.T.Ü Yayınları, pp.1-8, İstanbul, 1999
- [76] www.forumturka.net, Ekim-2007
- [77] SMITH,W., “Malzeme Bilimi ve Mühendisliği”,Çeviri; KINIKOĞLU, N.G., pp. 451, 2001
- [78] www.cemtas.com.tr, Ekim-2007
- [79] www.obitet.gazi.edu.tr, Ekim-2007
- [80] www.wikipedia.org, Ekim-2007
- [81] Asil Çelik Tanıtım Kataloğu, Bursa, 2003

- [82] LANGNER, J., PIEKOSZEWSKI, J., WERNER, Z., TERESHİN, V.I., CHEBOTAREV, V.V., GARKUSHA, I., WALİ, L., SARTOWSKA, B., STAROSTA, W., SZYMCZYK, W., KOPCEWICZ, M., GRABIAS, A., “Surface Modification Of Constructional Steels By İrradiation With High İntensity Pulsed Nitrogen Plasma Beams”, Surface and Coatings Technology, Vol. 128-129, pp.105-111, 2000
- [83] www.efundaengineeringfundamentals.com, Eylül-2007
- [84] Osmanlıçelik çelik tanıtım kataloğu, İstanbul, 2006
- [85] CHUANG, J.H. , TSAY, L.W., CHEN, C., “Crack Growth Behaviour Of Heat-Treated 4140 Steel In Air And Gaseous Hydrogen” Int. J. Fatigue Vol. 20, No.7, pp.531–536, 1998
- [86] TAKTAK, Ş. “Plazmada Nitrürülenmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Difüzyon Kinetiği ve Aşınma Davranışının İncelenmesi”, SAÜ, Fen Bilimleri Ens. Doktora Tezi, pp.43-49, 2002
- [87] ARSLAN, S., “SiC ve Grafit Takviyeli Çinko Alüminyum Hibrit Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, SAÜ, Fen Bilimleri Ens.Doktora Tezi, pp.58-69, 2005
- [88] KRAGELSKII, I.V., “Friction and Wear”, Butter worths , London, 1965
- [89] ASM Handbook Wear, Volume 18, pp.13-20, 2000
- [90] HUTCHINGS , I. M., “Tribology : Friction and Wear of engineering Materials”, Adward Arnold , London, pp.50-56, 1992
- [91] <http://www.materials.ox.ac.uk/peoplepages/roberts.html>, Temmuz-2006
- [92] AKKURT, M., “Makine Elemanları” Cilt 1, Birsen Yayınevi, İstanbul, pp.20-24, 1990
- [93] PETERSON, M.B., “Wear Testing Objectives and Aproaches, Selection and Use of Wear Tests for Materials, pp.3-11, 1976
- [94] YILMAZ, F. “Sürtünme ve Aşınma”, Uluslar arası Metalurji ve Malzeme Kongresi,Cilt1, pp.229-256, 1997
- [95] KATO, K., ADACHI, K., “Modern Triboloji Handbok Wear Mechanisms” 7.bölüm, pp.150-160, 2006
- [96] BHUSHAN, B., “ The Enginerering Handbook” Second Edition, 21.bölüm, pp.230-235, 2003
- [97] YILMAZ, F. “Sürtünme ve Aşınma”, Malzeme Mühendisliğinde Olay Çalışmalar, Sakarya Üniversitesi, pp.18-20, 2000

- [98] http://www-group.materials.ox.ac.uk/lectures/surface_handout_5.pdf/ders notları, Temmuz-2006
- [99] BHUSHAN, B., “Surface Roughness Analysis and Measurement Techniques” Modern Tribology Handbook, pp.134-138, 2003
- [100] www.davidson.com.au/products/strain/mg/technology/technotes/tn503.pdf, Ekim-2007
- [101] <http://www.protoxrd.com/xrdinfo.htm>, Eylül-2007
- [102] <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans/2001/mst4640b.pdf>, Eylül-2007
- [103] TOTEMEIER, T.C, WRIGHT, J.K, “ Residual Stress Determination In Thermally Sprayed Coatings—A Comparison Of Curvature Models And X-Ray Techniques”, Surface & Coatings Technology, Vol. 200, pp.3955 – 3962, 2006
- [104] LUAN, B., LIU, X.Y., NAGATA, J., CHEONG, W. “Residual Stress Analysis—An Important Consideration For Coating Of Stereolithography Polymers”, Surface & Coatings Technology, Vol.192, pp.323–330, 2005
- [105] <http://www3.imperial.ac.uk/aeronautics/wingcentre/aerostructures/aerostructure/residualstressfield>, Eylül-2007
- [106] HARADA, Y., FUKAURA, K., HAGA, S., “Influence Of Microshot Peening On Surface Layer Characteristics Of Structural Steel”, Journal of Materials Processing Technology, Vol.191, pp.297–301, 2007
- [107] <http://doc.tms.org>, Ekim-2007
- [108] <http://www3.imperial.ac.uk/aeronautics/wingcentre/aerostructures/aerostructure/residualstressfield>, Ekim-2007
- [109] <http://www.rssummit.org/demos.html>, Ekim-2007
- [110] <http://www.astresstech.com/>, Ekim-2007
- [111] <http://www.stress.com/servicetier3>, Ekim-2007
- [112] HOLZAPFEL, H., SCHULZE, V., VOHRINGER, O., MACHERAUCH, E., “ Residual Stress Relaxation In An AISI 4140 Steel Due To Quasistatic And Cyclic Loading At Higher Temperatures” Materials Science and Engineering Vol. A248, pp.9–18, 1998
- [113] PYZALLA, A., “Stress And Strain Measurements: X-Rays And Neutrons, Physica Vol. B 276-278, pp.833-836, 2000
- [114] LEE, M.K., KIM, G.H., KIM, K.H., KIM, W.W., “Effects Of The Surface

- Temperature And Cooling Rate On The Residual Stresses In A Flame Hardening Of 12Cr Steel”, Journal Of Materials Processing Technology Vol.76, pp.140–142, 2006
- [115] ZOU, J.X., GROSDIÈRE, T., ZHANG, K.M., GAO, B., HAO, S.Z., DONG, C., “Microstructures And Phase Formations In The Surface Layer Of An AISI D2 Steel Treated With Pulsed Electron Beam”, Journal of Alloys and Compounds, Article in press, (2006)
- [116] WITHERS, P. J., BHADRESHI, H. K., “Residual Stress Part 1 – Measurement Techniques”, Materials Science and Technology, Vol. 17, pp.223-225, 2001
- [117] 116http://www.physiqueindustrie.com/residual_stress.php#Definition, Ekim-2007
- [118] http://www.h-and-m-analytical.com/pdfs/residual_stress.pdf, Ekim-2007
- [119] UGLOV, V.V., ANISHCHIK, V.M., ASTASHYNSKI, V.V., SVESHNIKOV, Y.V., RUMIANCEV, I.N., KOSTYUKEVICH, E.A., “Structure And Phase Transformation Of Iron Surface Layer Treated By Compression Nitrogen Plasma Flows”, Surface and Coatings Technology, Vol.180 –181, pp.633–636, 2004
- [120] PROSKUROVSKY, D.I, ROTSHEIN,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), pp.49–56, 2000
- [121] DONG, C., WU, A. , HAO, S., ZOU, J., LIU, Z., ZHONG, P., ZHANG, A., XU, T., CHEN, J., XU, J., LIU, Q., ZHOU, Z., “Surface Treatment By High Current Pulsed Electron Beam” Surface And Coatings Technology Vol. 163 –164, pp.620–624, 2003
- [122] AHANGARANI, SH., SABOUR, A.R., MAHBOUBI, F., “Surface modification of 30CrNiMo8 Low-Alloy Steel by Active Screen Setup and Conventional Plasma Nitriding Methods”, Applied Surface Science Vol. 254, pp.1427–1435, 2007
- [123] MIKOVIC, T., SCHULZE, V., VOHRINGER, O., LOHE, D. “Influence Of Cyclic Temperature Changes On The Microstructure Of AISI 4140 After Laser Surface Hardening”, Acta Materialia Vol. 55, pp.589–599, 2007
- [124] FEUGEAS, J.N., GO´MEZ, B.J., NACHEZL., LESAGE, J., “Steel Surface Treatment By A Dual Process Of Ion Nitriding And Thermal Shock”, Thin Solid Films, Vol.424, pp.125-129, 2003
- [125] KARAKAN, M., ALSARAN, A., ÇELIK, A., “ Effect Of Process Time

- On Structural And Tribological Properties Of Ferritic Plasma Nitrocarburized AISI 4140 Steel”, *Materials and Design*, Vol.25, pp.349–353, 2004
- [126] MEDINA-FLORES, A., OSEGUERA, J., SANTIAGO,P., ASCENCIO, J.A., “Structural Analysis Of AISI-SAE 4140 Steel Nitrided By Post-Discharge Microwave”, *Surface & Coatings Technology* Vol. 188–189, pp.7– 12, 2004
- [127] BRUZZONI, P., BRU, S.P., GO´MEZ, B.J.A., NOSEI, L., ORTIZ, M., JORGE FEUGEAS, N., “Hydrogen Permeation Modification Of 4140 Steel By Ion Nitriding With Pulsed Plasmas”, *Surface and Coatings Technology*, Volume 110, pp.13-181, 1998
- [128] SARIOĞLU, C., “Analysis of XRD Stres Measurement Data of Naturally Grown Oxide Films Al₂O₃ and Cr₂O₃ Based on Existing Reuss, Voigt, and Hill Models”, *Surface Engineering*, Vol.18, No.2, pp105-111, 2002
- [129] ATAR, E., SARIOGLU, C., DEMIRLER, U., KAYALI, E. S., CIMENOGLU,H., “Residual stress estimation of ceramic thin films by X-ray diffraction and indentation techniques”, *Scripta Materialia* Vol.48, pp.1331–1336, 2003
- [130] KRISTOFFERSEN, H., VOMACKA, P., “Influence Of Process Parameters For Induction Hardening On Residual Stresses”, *Materials and Design* Vol. 22, pp.637-644, 2001
- [131] WICK, A., SCHULZE, V., VO´HRINGER, O.,“Effects Of Warm Peening On Fatigue Life And Relaxation Behaviour Of Residual Stresses In AISI 4140 Steel”, *Materials Science and Engineering A293*, pp-191–197, 2000
- [132] PODGORNIK, B.,VI´ZINTIN, J., RONKAINEN, H., HOLMBERG, K., “Friction And Wear Properties Of DLC-Coated Plasma Nitrided Steel In Unidirectional And Reciprocating Sliding”, *Thin Solid Films* 377-378, pp. 254-260, 2000
- [133] SUNDARA, S., RAMAN, G., JAYAPRAKASH, M., “ Influence Of Plasma Nitriding On Plain Fatigue And Fretting Fatigue Behaviour Of AISI 304 Austenitic Stainless Steel”, *Surface & Coatings Technology* Vol.201, pp.5906–5911, 2007
- [134] PANTLEON, K., KESSLER, O., HOFFANN, F., MAYR, P., “ Induction Surface Hardening Of Hard Coated Steels”, *Surface and Coatings Technology* Vol. 120–121, 495–501pp, 1999
- [135] LIU, H., TANG, B., WANG, L., WANG, X., JIANG, B., “Fatigue Life And Mechanical Behaviors Of Bearing Steel By Nitrogen Plasma Immersion Ion Implantation”, *Surface & Coatings Technology*

Vol. 201, pp.5273–5277, 2007

- [136] SARTOWSK, A.B., PIĞKOSZEWSKI, J., WALIS, L., SZYMCZYK, W., STANIS"AWSKI, J., NOWICKI, L., RATAJCZAK, R., KOPCEWICZ, M., KALINOWSKA, J., BARCZ, M., PROKERT, F., “Modification Of The Near Surface Layer Of Carbon Steels With Intense Argon And Nitrogen Plasma Pulses”, *Vacuum*, Vol.78, pp.181-186, 2005
- [137] ZAGONEL, L.F., FIGUEAR, C.A., DROPPA, R., ALVAREZ, F., “Influence Of The process Temperature On The Steel Microstructure And Hardening In Pulse Plasma Nitriding”, *Surface & Coating Technology*, Vol. 201, pp.452-457, 2006
- [138] CORENGIA, P., YBARRA, T.G., MOINA, C., CABO, A., BROITMAN, E., “Microstructural And Topographical Studies Of DC-Pulsed Plasma Nitrided AISI 4140 Low-Alloy Steel”, *Surface & Coatings Technology* Vol. 200, pp. 2391– 2397, 2005
- [139] TYURIN, Y., ZGADKEVICH, M., KOLISNICHENKO, O., “Development Of Pulsed –Plasma Technologies For Producing Micro And Nanstructured Intermetallic Compounds In Surface Layers”, *Paton Arcwelding Journal*, Kiev, No.1, pp. 13-18, 2007
- [140] POGREBNJAK, A.D., SHABLYA, V.T., SVIRIDENKO, N.V., VALYAEV, A.N., PLOTNIKOV, S.V., KYLYSHKANOV, M.K., “Study Of Deformation States In Metals Exposed To Intense-Pulsed-Ion Beams ”, *Surface and Coatings Technology* Vol. 111, pp.46–50, 1999
- [141] PENG, X.D., KHARLOV, A., BYSTRITSKI, V., GARATE, E., “Characteristics Of Material Surfaces Modified Using Plasma-Enhanced Ion Beams”, *Materials Science And Engineering*, Vol.A251, pp.142–149, 1998
- [142] YILBAS, B.S., KHALED, M., GONDAL, M.A.,” Electrochemical Response Of Laser Surface Melted Inconel 617 alloy”, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol.36, pp.269–276, 2001
- [143] LANGNER, J., PIEKOSZEWSKI, J., WERNER, Z., TERESHIN, V.I., CHEBOTAREV, V.V., GARKUSHA, I., WALI, L., SARTOWSKA, B., STAROSTA, W., SZYMCZYK, W., KOPCEWICZ, M., GRABIAS, A., “Surface Modification Of Constructional Steels By Irradiation With High Intensity Pulsed Nitrogen Plasma Beams”, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 128-129, pp.105-111, 2000
- [144] PODGORNIK, B., VIZINTIN, J., “Wear Resistance Of Pulse Plasma Nitrided AISI 4140 and A355 steels”, *Materials Science and Engineering* Vol. A315, pp.28–34, 2001
- [145] KADOLKAR, P.B., WATKINS, T.R., DE HOSSON, J.T.M.C, KOOI,

- B.J., DAHOTRE, N.B., “State Of Residual Stress In Laser-Deposited Ceramic Composite Coatings On Aluminum Alloys”, *Acta Materialia*, Vol.55, pp.1203-1214, 2007
- [146] STRAFFELINI, G., TRABUCCO, D., MOLINARI, A., “Oxidative Wear Of Heat-Treated Steels”, *Wear*, Vol.250, pp.485–491, 2001
- [147] SVAHN, F., RUDOLPHI, Å. K., WALLÉN, E., “The Influence Of Surface Roughness On Friction And Wear Of Machine Element Coatings”, *Wear*, Vol., 254, pp.1092–1098, 2003
- [148] HEITKEMPER, M., FISCHER, A., BOHNE, CH., PYZALLA, A., “Wear Mechanisms Of Laser-Hardened Martensitic High-Nitrogen-Steels Under Sliding Wear”, *Wear*, Vol.250, pp.477–484, 2001
- [149] KARAOĞLU, S., “Structural Characterization And Wear Behavior Of Plasma-Nitrided AISI 5140 Low-Alloy Steel”, *Materials Characterization* Vol.49, pp.349–357, 2003
- [150] BADSE, L.J., “Influence Of Grit Size And Specimen Size On Wear During Liding Abrasion”, *Wear*, Vol.12, pp.35–53, 1968
- [151] KHRUSCHOV, M.M. ” Principles Of Abrasive Wear”, *Wear*, Vol. 28, pp.69–88, 1974
- [152] SEVİM, İ., ERYUREK, B., “Effect Of Abrasive Particle Size On Wear Resistance In Steels”, *Materials And Design*, Vol. 27, pp.173–181, 2006
- [153] WANG, Z.B., TAO, N.R., LI, S., WANG, W., LIU, G., LU, J., LU, K., “Effect Of Surface Nanocrystallization On Friction And Wear Properties In Low Carbon Steel”, *Materials Science and Engineering*, Vol.A352, pp.144-149, 2003
- [154] SANTANA, U.S., GONZ´ALEZ, C. R., ROSAS, G. G, OCA~NA, J.L., MOLPECERES, C., PORRO, J., MORALES, M., “Wear And Friction Of 6061-T6 Aluminum Alloy Treated By Laser Shock Processing”, *Wear*, Vol. 260, pp.847–854, 2006
- [155] TOTİK, Y., SADELER R., ALTUN, H., GAVGALI, M., “The Effects Of Induction Hardening On Wear Properties Of AISI 4140 Steel In Dry Sliding Conditions”, *Materials and Design*, Vol.24, pp.25–30, 2003

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Artvin'in Yusufeli ilçesinde doğmuştur. İlk, orta ve lise tahsilini Adapazarı'nda yaptıktan sonra, 1995 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi'nde bir yıl hazırlık okuduktan sonra Metalurji ve Malzeme Mühendisliğini iyi derecede bitirmiştir. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında başladığı yüksek lisans eğitiminden pekiyi derecede mezun olarak yüksek mühendis ünvanını almıştır. 2003 yılında Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında doktora öğrenimine başlamıştır.

2001 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne Araştırma Görevlisi olarak atanan Yıldız Yaralı ÖZBEK halen bu görevini sürdürmektedir. Evli ve bir çocuk annesidir.