

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

**ELEKTROLİTİK PLAZMA TEKNOLOJİSİ İLE KÜRESEL  
GRAFİTLİ DÖKME DEMİR MALZEMESİNİN YÜZEY  
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Met. ve Malz. Yük. Müh. Aysun AYDAY**

**Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME  
MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mehmet DURMAN**

**Nisan 2013**

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ


ELEKTROLİTİK PLAZMA TEKNOLOJİSİ İLE KÜRESEL  
GRAFİTLİ DÖKME DEMİR MALZEMESİNİN YÜZEY  
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

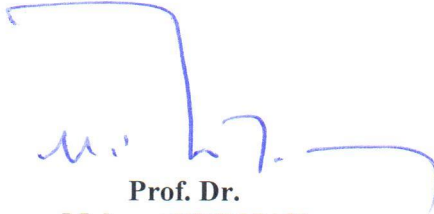
DOKTORA TEZİ

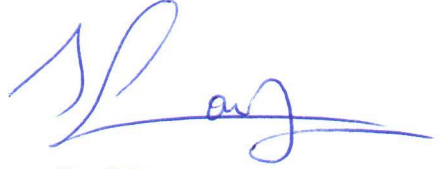
Met. ve Malz.Yük.Müh. Aysun AYDAY

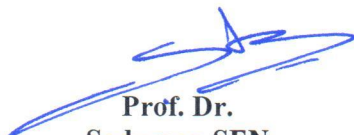
Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ


Bu tez 24/04/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

  
Prof. Dr.  
Hüseyin ÇİMENÖĞLU  
Jüri Başkanı

  
Prof. Dr.  
Mehmet DURMAN  
Üye

  
Prof. Dr.  
S.Can KURNAZ  
Üye

  
Prof. Dr.  
Şaduman ŞEN  
Üye

  
Doç. Dr.  
Murat BAYDOĞAN  
Üye

## ÖNSÖZ

Yüksek lisanstan sonra doktora eğitimimde de danışmanım olarak tezimin tüm aşamalarında fikir ve tecrübeleriyle büyük katkı sağlayan ve çalışmalarımda beni yönlendiren hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet DURMAN'a teşekkür ederim.

Aynı şekilde bilgi ve tecrübeleri ile bu tezin oluşturulmasında her türlü desteği esirgemeyen, her zaman yanımda olan değerli hocam Sayın Prof.Dr.S.Can KURNAZ'a teşekkürlerimi sunarım. Ve Sayın Prof. Dr. Şaduman ŞEN hocama bilgi ve tecrübelerini benimle paylaştığı ve her zaman desteğini hissettiğim için teşekkürlerimi sunuyorum.

Deneysel çalışmalarım sırasında her türlü imkânlarından yararlandığım Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığına, başta Bölüm Başkanı Sayın Prof. Dr. Hatem Akbulut olmak üzere tüm bölüm öğretim üyelerine ve araştırma görevlisi arkadaşlara teşekkürü bir borç biliyorum.

Ayrıca, çalışmalarımın katkılarında dolayı Teknisyen Ebubekir Cebeci'ye, Araş. Gör. Emrah BUDAKOĞLU'na tez çalışmalarımındaki yardımlarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Her zaman yanımda olan arkadaşlarıma, bu süreçteki anlayışınızdan ve desteklerinizden dolayı çok teşekkürler.

Son olarak her daim yanımda olan canım babam ve annem Erol AYDAY ve Sevgi AYDAY, biraz uzaklarda da olsanız hep yanımda hissettiğim Armağan ve Tuğba AYDAY'a dualarını üzerimizden eksik etmeyen anneanneme ve tüm sevdiğime gönülden minnettirim. İyi ki varsınız hepinizi çok seviyorum.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xvi
ÖZET.....	xvii
SUMMARY.....	xviii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Amaç.....	2
BÖLÜM 2.	
DÖKME DEMİRLER.....	4
2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirler.....	5
2.1.1. Giriş.....	5
2.1.2. Küresel grafitli dökme demirlerin üretim türleri.....	7
2.1.3. Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	8
2.1.4. Küresel grafitli dökme demire alaşım elementlerinin etkisi...	9
2.1.5. Küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanları.....	10
BÖLÜM 3.	
YÜZEY İŞLEMLERİ VE ELEKTROLİTİK PLAZMA TEKNOLOJİSİ .....	12
3.1. Giriş.....	12
3.2. Yüzey işlemleri.....	12

3.2.1. Yüzey kaplamalar.....	13
3.2.2. Yüzey sertleştirme.....	15
3.2.2.1. Difüzyonla yüzey sertleştirme prensibi.....	16
3.2.2.2. Termo-kimyasal işlemler.....	17
3.2.2.2.1. Karbürleme.....	17
3.2.2.2.2. Nitrürleme.....	19
3.2.2.2.3. Plazma Borlama.....	20
3.2.2.3. Malzemenin (Yüzeyin) kimyasal yapısını değiştirmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemleri.....	21
3.2.2.3.1. Alev ile yüzey sertleştirme.....	21
3.2.2.3.2. İndüksiyon ile yüzey sertleştirme.....	21
3.2.2.3.3. İyon aşılama yöntemi.....	22
3.2.2.3.4. Lazer yöntemi ile yüzey modifikasyonu.....	22
3.3. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme İşlemi.....	24
3.3.1. Isıyı yüzeye uygulama prensibi ve süresi.....	25
3.4. Elektrolitik Plazma Teknolojisi.....	28
3.4.1. Giriş.....	28
3.4.2. Elektrolitik plazma teknolojisi.....	29
3.4.3. Elektrolitik plazma teknolojisinin kullanım alanları.....	32
3.4.4. Yüzey işlemlerinde ve EPT teknolojisinde karşılaşılan sorunlar ve gelişmeler.....	34
3.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri.....	35
3.5.1. Alev, indüksiyon veya lazerle yüzey sertleştirme.....	37
3.5.2. Nitrürleme.....	37
3.4.3. Alüminyumlama.....	38
3.4.4. Borlama.....	38

## BÖLÜM 4.

AŞINMA.....	39
4.1. Sürtünme Teorisi.....	39
4.1.1. Kuru sürtünme.....	41

4.1.2. Sınır sürtünmesi.....	44
4.2. Aşınma Mekanizmaları.....	45
4.2.1. Adhesiv aşınma.....	48
4.2.2. Abrasiv aşınma.....	49
4.2.3. Yorulma aşınması.....	52
4.2.4. Korozyon aşınması.....	53
4.3. Yüzey Pürüzlülüğü.....	53
4.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri.....	54
<b>BÖLÜM 5.</b>	
<b>DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>58</b>
5.1. Giriş.....	58
5.2. Çalışma Programı.....	59
5.3. Deneylede Kullanılan Malzemeler.....	60
5.4. Yüzey İşlemleri.....	61
5.4.1. EPT işlemi.....	61
5.4.2. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi.....	62
5.5. Yüzey Sıcaklık Ölçümleri.....	65
5.6. Mikroyapı İncelemeleri.....	66
5.6.1. Optik mikroskop incelemeleri.....	66
5.6.2. Taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemeleri.....	66
5.7. Görüntü Analizi.....	66
5.8. Faz Analizleri.....	67
5.9. Sertlik Ölçümleri.....	67
5.10. Aşınma Deneyleri .....	68
<b>BÖLÜM 6.</b>	
<b>DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>71</b>
6.1. Mikroyapı İncelemeleri.....	71
6.1.1. Optik Mikroskop İncelemeleri.....	71
6.1.2. SEM incelemeleri.....	84
6.1.3. Modifikasyon tabakası kalınlıkları.....	91
6.2. Yüzey Sıcaklığı .....	94

6.3. Görüntü Analizi.....	98
6.3.1. Grafit karakterizasyon.....	98
6.3.2. Martenzit Hacim Oranları.....	103
6.4. X-Işını Analiz Sonuçları.....	107
6.5. Sertlik Ölçümleri.....	111
6.5.1. Rockwell sertlik ölçümleri.....	111
6.5.2. Mikrosertlik ölçümleri.....	119
6.6. Aşınma Özellikleri.....	129
6.6.1 Sürtünme Katsayısı Değerleri.....	129
6.6.2. Aşınma kaybı.....	133
6.6.3. Aşınma hızı.....	144
6.6.4. Aşınma SEM görüntüleri ve EDS analizleri.....	153
BÖLÜM 7.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	179
7.1. Sonuçlar.....	179
7.2. Öneriler.....	185
KAYNAKLAR.....	186
EKLER.....	197
ÖZGEÇMİŞ.....	199

## KISALTMALAR VE SİMGELER

EPT	: Elektrolitik plazma teknolojisi
KGDD	: Küresel grafitli dökme demir
$\mu$	: Sürtünme katsayısı
F	: Teğetsel kuvveti
W	: Normal kuvvet
T.Ç.	: Termal çevrim
Y.V.	: Yüksek voltaj
T	: Sıcaklık ( $^{\circ}$ K)
G	: Aşınma izi genişliği
D	: Aşınma izi derinliği
L	: Aşınma izi uzunluğu
V	: Aşınma hacmi
MHO	: Martenzit hacim oranı
HRc	: Rockwell sertlik ölçümü
MYA	: Modifiye yüzey aşınması
KYA	: Kompozit yüzey aşınması
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	: X ışını difraksiyonu



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Dökme demir alaşımlarında karbon ve silisyum içerik aralıkları.....	5
Şekil 3.1.	Yüzey mühendisliği teknolojileri ve endüstriyel sektörler ile karşılıklı etkileşimi.....	13
Şekil 3.2.	Alevle yüzey sertleştirilmenin prensibi ve görüntüsü.....	21
Şekil 3.3.	Lazerle sertleştirilmiş dökme demirlerin kesit görüntüsü a) Gri dökme demir b) Küresel grafitli dökme demir.....	23
Şekil 3.4.	İndüksiyonla sertleştirme ve su vermede karbon yüzdesine bağlı olarak minimum yüzey sertliği değişimi.....	25
Şekil 3.5.	İndüksiyonla sertleştirme işlemi.....	26
Şekil 3.6.	İndüksiyonla sertleştirilmiş krank mili.....	28
Şekil 3.7.	Elektrolitik plazma teknolojisinin şematik olarak gösterimi...	29
Şekil 3.8.	Elektrolitik plazma teknolojisinde plazma oluşumunun şematik olarak gösterimi.....	30
Şekil 3.9.	Farklı şekillerde uygulanabilen EPT yönteminin şematik olarak gösterimi.....	31
Şekil 3.10.	Elektrolitik plazma tekniği uygulanmış malzemelere örnekler	33
Şekil 3.11.	Q235 çeliğinin elektrolitik plazma işlemi sonrası yüzeylerin SEM görüntüleri a) 30s b) 75s c) 120s.....	34
Şekil 4.1.	Aşınmayı etkileyen faktörlerin şematiksel gösterimi.....	40
Şekil 4.2.	Statik ve dinamik sürtünme katsayıları.....	41
Şekil 4.3.	Kuru sürtünme modeli.....	42
Şekil 4.4 .	Sürtünen yüzeylerin görünen ve gerçek temas alanlarının temsili sunumu.....	42
Şekil 4.5.	Bir malzemenin yüzey topografyasının temsili gösterimi.....	43

Şekil 4.6.	Sürtünme ve aşınmanın istenen ya da istenmeyen özellikler olduğu ya da olmadığı bazı kullanım alanlar.....	44
Şekil 4.7.	Aşındırıcı deney yöntemlerinden birkaçının temsili gösterimi	46
Şekil 4.8.	Tribolojik sistemi meydana getiren unsurların şematik gösterimi ve mikro kaynak oluşum noktaları.....	46
Şekil 4.9.	Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (a) adhezif (b) abrazif (c) yorulma (d) korozyon aşınma.....	48
Şekil 4.10.	Adhezif aşınma mekanizması sonucunda aşınma partiküllerinin oluşumunun şematik gösterimi.....	49
Şekil 4.11.	Abrazif aşınma mekanizmasının üç tipi olan a) Kesme, b) Pulluklama, c) Kızaklama aşınmalarının SEM görüntüleri....	50
Şekil 4.12.	a) İki-yüzeyle ve b)üç-yüzeyle abrazif aşınma tipleri.....	51
Şekil 4.13.	Yüzey çatlağının oluşumu ve ilerleme sürecinin şematik gösterimi.....	53
Şekil 4.14.	Grafit küre boyutunun aşınmaya etkisi.....	55
Şekil 4.15.	KGDD'in yüksek gerilim altında abrazif aşınma dayanımı....	56
Şekil 5.1.	Çalışma programı.....	59
Şekil 5.2.	Y blok dökümün şematiksel gösterimi.....	60
Şekil 5.3.	Küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı.....	61
Şekil 5.4.	Elektrolitik plazma teknolojisi cihazının şematik görünümü ve fotoğrafları (1. İş parçası, 2. Seramik bilezik, 3. Tabanca, 4. Paslanmaz çelik anot, 5. Anot tutucu, 6. Numune tutucu)..	62
Şekil 5.5.	Elektrolitik Plazma Teknolojisi uygulaması.....	63
Şekil 5.6.	İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulaması.....	63
Şekil 5.7.	Picolog programı için hazırlanan numunelerin şematik gösterimi.....	65
Şekil 5.8.	Yüzey sıcaklık ölçümleri.....	65
Şekil 5.9.	EPT ile modifiye edilmiş numune görüntüsü.....	66
Şekil 5.10.	Bilgisayar destekli imaj analiz sistemi görüntüsü.....	67
Şekil 5.11.	CSM Tribometer aşınma cihazı.....	68
Şekil 5.12.	(a) Modifiye yüzey aşınma testi (b) Kompozit yüzey aşınma testi.....	69

Şekil 5.13.	Aşınma izi derinliğinin ve genişliğinin şematik gösterimi.....	69
Şekil 6.1.	EPT şematik görünümü ve EPT yöntemi ile KGDD malzemesinin yüzeyinde oluşan a) 3 katmanlı b) 4 katmanlı tabakaların mikroyapısının şematik gösterimi.....	72
Şekil 6.2.	(a) Modifikasyon sonrası 1 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 1T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme).....	73
Şekil 6.3.	(a) Modifikasyon sonrası 2 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 2T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme).....	75
Şekil 6.4.	(a) Modifikasyon sonrası 3 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 3T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ((i) Ergimiş bölge,(ii) Sertleştirilmiş bölge, (iii) Geçiş bölgesi, (iv) Altlık malzeme).....	77
Şekil 6.5.	(a) Modifikasyon sonrası 4 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 4T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ((i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme).....	79
Şekil 6.6.	(a) Modifikasyon sonrası 5 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 5T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme).....	81
Şekil 6.7.	(a) Modifikasyon sonrası İ Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası İ-T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme).....	83
Şekil 6.8.	(a) Modifikasyon sonrası 1 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 1T nolu numunenin SEM görüntüleri ((i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme).....	85

Şekil 6.9.	(a) Modifikasyon sonrası 4 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 4T nolu numunenin SEM görüntüleri ((i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme).....	87
Şekil 6.10.	(a) Modifikasyon sonrası 3-6 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 3T-6T nolu numunenin SEM görüntüleri ((i) Ergimiş bölge,(ii) Sertleştirilmiş bölge, (iii) Geçiş bölgesi, (iv) Altlık malzeme).....	88
Şekil 6.11.	(a) Modifikasyon sonrası İ Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası İ-T nolu numunenin SEM görüntüleri ((i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme).....	90
Şekil 6.12.	EPT parametrelerine bağlı olarak modifikasyon tabakası kalınlık değerleri.....	91
Şekil 6.13.	Modifikasyon sonrası KGDD numunelerinin tabaka kalınlıkları stereo mikroskop görüntüleri ((a) 1 nolu, (b) 2 nolu, (c) 3 nolu, (d) 4 nolu, (e) 5 nolu, (f) 6 nolu, (g) İ nolu)..	93
Şekil 6.14.	EPT sonrası numunenin sıcaklık ölçümünde stereo mikroskop görüntüsü.....	94
Şekil 6.15.	Farklı termal çevrim sayılarında modifiye edilmiş numunelerin yüzey sıcaklık profilleri ((a) 1 nolu (b) 2 nolu (c) 3 nolu) .....	96
Şekil 6.16.	Farklı yüksek voltaj sürelerinde modifiye edilmiş numunelerinin yüzey sıcaklık profilleri ((a) 4 nolu (b) 5 nolu (c) 6 nolu).....	97
Şekil 6.17.	İşlemsiz numunenin alana göre grafit dağılımı – ortalama grafit çapı ve yüzde küresellik histogramı.....	98
Şekil 6.18.	1 nolu numunenin alana göre grafit dağılımı – ortalama grafit çapı ve yüzde küresellik histogramı.....	99
Şekil 6.19.	3 nolu numunenin alana göre grafit dağılımı – ortalama grafit çapı ve yüzde küresellik histogramı.....	100

Şekil 6.20.	İ nolu numunenin alana göre grafit dağılımı – ortalama grafit çapı ve yüzde küresellik histogramı.....	101
Şekil 6.21.	1 nolu numunenin martenzit hacim oranı dağılımı.....	104
Şekil 6.22.	Modifiye edilmiş numunelerin martenzit hacim oranları değişimi.....	106
Şekil 6.23.	İşlemsiz KGDD numunesinin x-ışını analiz sonucu.....	107
Şekil 6.24.	(a) 1 nolu, (b) 2 nolu, (c) İ nolu, (d) 3 nolu-ergimiş tabakanumunelerinin XRD difraksiyon paternleri.....	109
Şekil 6.25.	İşlemsiz, farklı termal çevrimlerde EPT ve indüksiyonla modifiye edilmiş yüzeylerin XRD difraksiyon paternleri kıyaslanması.....	111
Şekil 6.26.	(a) Modifiye edilmiş 1, 2, 3, İ nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri (b) Modifikasyon + Temperleme işlemi sonrası 1T, 2T, 3T, İ-T nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri.....	114
Şekil 6.27.	Modifiye edilmiş ve Modifikasyon + Temperleme işlemi sonrası 1, 2, 3, İ nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri.....	115
Şekil 6.28.	(a) Modifiye edilmiş 4, 5, 6, İ nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri (b) Modifikasyon + Temperleme işlemi sonrası 4T, 5T, 6T, İ-T nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri.....	118
Şekil 6.29.	Modifiye edilmiş ve Modifikasyon + Temperleme işlemi sonrası 4, 5, 6, İ nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri.....	119
Şekil 6.30.	Farklı işlem parametrelerinde modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş 1, 2, 3 ve İ nolu numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	122

Şekil 6.31.	Modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	123
Şekil 6.32.	Farklı işlem parametrelerinde modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş 4, 5, 6 ve İ nolu numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	125
Şekil 6.33.	Modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri.....	126
Şekil 6.34.	(a) İşlemsiz ve (b) İndüksiyonla sertleştirilmiş KGDD numunelerin 0,5N yükte kayma mesafesine bağlı olarak MYA sürtünme katsayısı değişimi.....	131
Şekil 6.35.	(a) 1 nolu ve (b) 3 nolu numunelerin 0,5N yükte kayma mesafesine bağlı olarak MYA sürtünme katsayısı değişimi...	131
Şekil 6.36.	(a) İşlemsiz ve (b) İndüksiyonla sertleştirilmiş (c) 3 nolu numunelerin 2N yükte kayma mesafesine bağlı olarak KYA sürtünme katsayısı değişimi.....	132
Şekil 6.37.	(a) İ-T MYA ve (b) İ-T KYA 0,5N yükte kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimi.....	133
Şekil 6.38.	(a) 3T MYA ve (b) 3T KYA 0,5N yükte kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimi.....	133
Şekil 6.39.	İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin (I) 0,5N (II) 1N, (III) 2N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma kaybı değişimleri (T.Ç.=Termal Çevrim, Y.V.=Yüksek Voltaj).....	139
Şekil 6.40.	İşlemsiz, Modifikasyon + Temperlenmiş numunelerin (I) 0,5N (II) 1N, (III) 2N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma kaybı değişimleri (T.Ç.=Termal Çevrim, Y.V.=Yüksek Voltaj) .....	142

Şekil 6.41.	(a) İşlemsiz, Modifiye edilmiş ve Modifikasyon + Temperlenmiş numunelerin 0,5N, 1N, 2N yük altında modifiye yüzey aşınma kaybı değişimleri (b) İşlemsiz, Modifiye edilmiş ve Modifikasyon + Temperlenmiş numunelerin 0,5N, 1N, 2N yük altında kompozit yüzey aşınma kaybı değişimleri.....	144
Şekil 6.42.	(a) işlemsiz, modifiye edilen numunelerin modifiye yüzey aşınma hızlarının (b) işlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin modifiye yüzey aşınma hızlarının (c) işlemsiz, modifiye edilen numunelerin kompozit yüzey aşınma hızlarının (d) işlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin kompozit yüzey aşınma hızlarının aşınma yüküne ve değişen parametrelere bağlı değişimleri....	149
Şekil 6.43.	İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin minimum yük (0,5N) altında modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1 nolu (c) 2 nolu (d) 3 nolu (e) 4 nolu (f) 5 nolu (g) 6 nolu (h) İ nolu) .....	156
Şekil 6.44.	İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin minimum yük (0,5N) altında kompozit yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1 nolu (c) 2 nolu (d) 3 nolu (e) 4 nolu (f) 5 nolu (g) 6 nolu (h) İ nolu) .....	157
Şekil 6.45.	İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin maksimum yük (2N) altında modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1 nolu (c) 2 nolu (d) 3 nolu (e) 4 nolu (f) 5 nolu (g) 6 nolu (h) İ nolu) .....	161
Şekil 6.46.	İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin maksimum yük (2 N) altında kompozit yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1 nolu (c) 2 nolu (d) 3 nolu (e) 4 nolu (f) 5 nolu (g) 6 nolu (h) İ nolu) .....	162

Şekil 6.47.	İşlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin minimum yük (0,5N) altında modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1T nolu (c) 2T nolu (d) 3T nolu (e) 4T nolu (f) 5T nolu (g) 6T nolu (h) İ-T nolu).....	166
Şekil 6.48.	İşlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin minimum yük (0,5N) altında kompozit yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1T nolu (c) 2T nolu (d) 3T nolu (e) 4T nolu (f) 5T nolu (g) 6T nolu (h) İ-T nolu).....	167
Şekil 6.49.	İşlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin maksimum yük (2N) altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1T nolu (c) 2T nolu (d) 3T nolu (e) 4T nolu (f) 5T nolu (g) 6T nolu (h) İ-T nolu).....	171
Şekil 6.50.	İşlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin maksimum yük (2N) altında kompozit yüzey aşınma izi görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1T nolu (c) 2T nolu (d) 3T nolu (e) 4T nolu (f) 5T nolu (g) 6T nolu (h) İ-T nolu).....	172
Şekil 6.51.	3 nolu numunenin 0,5N yük altında (a) M.Y.A. SEM ve EDS analizi (b) K.Y.A. SEM ve EDS analizi.....	174
Şekil 6.52.	3 nolu numunenin 1N yük altında (a) M.Y.A. SEM ve EDS analizi (b) K.Y.A. SEM ve EDS analizi.....	175
Şekil 6.53.	3 nolu numunenin 2N yük altında (a) M.Y.A. SEM ve EDS analizi (b) K.Y.A. SEM ve EDS analizi.....	176
Şekil 6.54.	1T nolu numunenin 2N yük altında M.Y.A. SEM ve EDS analizi (b) 2T nolu numunenin 2N yük altında M.Y.A. SEM ve EDS analizi (c) 3T nolu numunenin 2N yük altında M.Y.A. SEM ve EDS analizi.....	178



## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	İkincil elementlerin grafit yapısına etkileri.....	6
Tablo 2.2.	TS 526 / DIN1693 standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	8
Tablo 3.1.	Kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması.....	14
Tablo 3.2.	Yüzey sertleştirilmesi için temel yöntemler.....	15
Tablo 3.3.	Parça yüzeyine uygulanan frekans ve buna bağlı olarak sertleşme derinlikleri.....	24
Tablo 3.4.	Alev ve indüksiyonla sertleştirme proseslerinin karşılaştırılması.	27
Tablo 5.1	Küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi.....	61
Tablo 5.2.	Yüzey modifikasyonu işlem parametreleri.....	64
Tablo 6.1.	Modifikasyon işlemi sonrası maksimum yüzey sıcaklık değerleri	95
Tablo 6.2.	Bu çalışmada kullanılan küresel grafitli dökme demirin ve yüzeyleri modifiye edilmiş numunelerin mikroyapısal özellikleri.....	102
Tablo 6.3.	Modifiye edilmiş ve modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin MHO değerleri.....	106
Tablo 6.4.	İşlemsiz, modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş KGDD numunelerinin aşınma yüklerine bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri .....	130
Tablo 6.5.	İşlemsiz, modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş KGDD numunelerinin aşınma yüklerine bağlı olarak aşınma kaybı değerleri.....	134
Tablo 6.6.	İşlemsiz, modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş KGDD numunelerinin aşınma yüklerine bağlı olarak aşınma hızı değerleri.....	146

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Elektrolitik Plazma Teknolojisi, yüzey sertliği, martenzit, aşınma

Bu çalışmada, çeliklere yakın özelliklere sahip olan küresel grafitli dökme demir numunelerinin yüzey özellikleri iyileştirilerek, yaygın olarak kullanılan geleneksel yüzey işlemlerine alternatif bir yöntem olarak Elektrolitik Plazma Teknolojisinin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Farklı termal çevrim ve yüksek voltaj sürelerinde Elektrolitik Plazma Teknolojisi yöntemi ile ve indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi ile küresel grafitli dökme demir numuneleri modifiye edilmiştir. Modifiye edilen numunelere 400 °C’de 45 dakika süre ile temperleme işlemi uygulanmıştır. Yüzeyleri modifiye edilen ve modifikasyon işlemi sonrası temperlenen küresel grafitli dökme demir numunelerin optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri çekilmiş ve modifikasyon tabakası kalınlıkları ölçülmüştür. Elektrolitik plazma işleminde yüzey sıcaklık profilleri PICOLOG programı ile çıkarılmıştır. Değişen parametrelerin modifikasyon tabaka kalınlığını ve yapısını etkilediği belirlenmiştir. İmaj analizi ile grafit küreleri analizi (çap, küresellik, dağılım) ve martenzit hacim oranları hesaplanmıştır.

Modifikasyon tabakasından alınan x-ışını analizlerinde martenzit yapısına rastlanmıştır. Mikrosertlik ölçümlerinde değişen termal çevrime ve yüksek voltaj süresine bağlı olarak farklı sertlik değerleri elde edilmiştir. Artan termal çevrim ve yüksek voltaj süresi ile sertlik değerlerinde artış görülmüştür. İndüksiyonla sertleştirme işlemi ile de maksimum sertlik elde edilen numunelerde benzer sonuçlar elde edilmiştir.

500 m mesafe 0.15 m/sn hızında 0,5N, 1N, 2N yük altında CSM Tribometer aşınma cihazı ile lineer aşınma deneyi yapılmıştır. Aşınma testi iki farklı şekilde uygulanmıştır. Modifiye yüzey aşınması ve kompozit yüzey aşınması. Aşınma deneyleri sonrasında yük değişimiyle sürtünme katsayıları, hacimsel aşınma kaybı ve aşınma hızı değerleri hesaplanmıştır. Aşınma deneyleri sonucunda modifiye yüzey aşınma hızlarının değişen parametrelere ve yüke bağlı olarak modifiye edilmiş ve temperleme işlemi görmemiş numunelerde  $3,33E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $13,7E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$  arasında, modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerde ise  $2,47E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $18,1E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$  arasında değiştiği, kompozit yüzey aşınma hızlarının ise modifikasyon işlemleri sonrasında  $9,68E-06 \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $6,42E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$  arasında, modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerde ise  $1,78E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$  ile  $8,26E-05 \text{ mm}^3/\text{m}$  arasında değiştiği görülmüştür. Aşınma deneyi gerçekleştirilen malzemelerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ve EDS analizleri ile incelenerek aşınma mekanizmaları belirlenmiştir.

# **SURFACE PROPERTIES IMPROVEMENT OF NODULAR CAST IRON MODIFIED BY ELECTROLYTIC PLASMA TECHNOLOGY**

## **SUMMARY**

Keywords: Electrolytic plasma technology (EPT), Surface hardness, Martensite, Wear

In this study, the electrolytic plasma technology was used in order to modify and improve the surface properties of nodular cast iron samples, which show the similar properties with steels, as an alternative to traditional surface coating and improving methods.

The nodular cast iron specimens were modified with various thermal cycles and in high voltage times by means of EPT and induction surface hardness increment methods. These modified samples were exposed to annealing at 400 °C for 45 minutes in heat treatment furnace. The tempered specimens were investigated by optical microscope and scanning electron microscope (SEM) and the thickness of modification layer was measured. The surface temperature profiles in electrolytic plasma process were extracted by PICOLOG program. It was determined that the varied parameters have been affected the thickness and microstructure of modification layer. The analysis of graphite spheres with respect to diameter, sphericity and distribution and martensite volume fraction were calculated by image analysis method. In addition, the martensite structure was observed according to X-ray analysis taken from modified layer of nodular cast iron specimens. Different microhardness values were obtained from samples due to varied thermal cycle and high voltage times. The hardness increases with increasing thermal cycle and voltage application time. The similar results were taken from the samples exposed to induction hardness increment method.

The linear wear test was applied to specimens in 500m sliding distance at 0.15m/s velocity under 0,5, 1 and 2 N loads with two different modes namely wear of modified surface and wear of composite surface. Having completed the wear tests, friction coefficient, volumetric loss and wear rate values were calculated for each load. In the light of findings of this study, it was seen that there is no effect of modification parameters on wear rate of modified surface samples. However, the wear rate of composite surface ones was decreased after the modification processes. The tempering treatment has no effect on not only modified surface, but also composite surface specimens with respect to wear rate. The surfaces of all specimens were investigated by SEM and EDS analysis after linear wear test in order to determine and characterize the occurred wear mechanism.

# BÖLÜM 1. GİRİŞ

## 1.1. Giriş

Malzemeler zaman içerisinde buldukları çevre ile etkileşimleri sonucunda bozulmalara uğrayabilirler. Bu durum performanslarını olumsuz yönde etkiler. Bir malzemenin performansı, kütle ve yüzey özelliklerine bağlıdır. Bu sebeple malzemelerin içyapılarını ve yüzeylerini geliştirici çalışmalar yapılmaktadır. Yüzey işlemleri malzemelerin sertlik, süneklik, yorulma, aşınma, korozyon, ısıl ve darbesel şok gibi mekanik ve tribolojik özelliklerinin bir veya birkaçını geliştirmek ve üretim maliyetini düşürmek amacıyla uygulanmaktadır. Bu nedenle, Küresel grafitli dökme demirlere (KGDD), karbürleme, nitrürleme, karbonitrürleme ve borlama gibi bazı yüzey modifikasyon işlemleri ile indüksiyonla yüzey sertleştirme gibi geleneksel yüzey işlemleri, elektron beam yüzey işlemleri, lazer yüzey eritme ve lazer yüzey sertleştirme gibi modern yüzey mühendisliği tekniklerinin uygulanmasına yönelik çalışmalar başlatılmıştır. Bazı araştırmacılar KGDD'in ısıl işlem uygulamalarından değişik modifikasyonlar yaparak değerlendirmekte ve yeni yüzey teknikleri uygulanmaya çalışılmaktadır [1-8]. Yüzey modifikasyonu ve kaplamalar yukarıda bahsedilen birçok sebepten dolayı büyük ilgi toplamaktadır. Özellikle sürtünmeli ortamlarda kullanılan KGDD'lerin matris özellikleri ve yüzey performanslarını artırıcı çalışmalar yapılmaktadır [3-4,9].

Küresel grafitli dökme demirler, çeliklerin ve dökme demirlerin özelliklerini bir arada bulundurmaları sebebiyle kullanımları günümüzde artmıştır. KGDD'ler, tokluk, çekme dayanımı, sertlik, gibi mekanik özellikleri, ısıl işlem imkanı ve dövülebilirlik bakımından çeliklere en yakın özelliklere sahip olduğundan yüzey özelliklerinin geliştirilmesi de mümkündür. KGDD'ler, otomotiv, demiryolu ve ağır sanayi gibi geniş bir yelpazede değişen uygulamalar için uygun malzemedir. Bu malzemeler dişli, krank mili, kanat, lokomotif tekerleği, tarımsal ekipmanlar gibi

aşınma direncinin iyi olması gereken yapısal elemanlarda kullanılmaktadır [1,7,9-10].

KGDD'lere uygulanan ısı işlem yöntemleri kadar yaygın olan diğer bir yüzey işlemi ise indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemidir. İndüksiyonla sertleştirme işlemi hızlı ısıtma ile dönüşüm sıcaklığının üstüne çıkılması ile östenitin martenzite dönüşümü su verme ile sağlanarak sert ince bir tabaka elde edilmektedir. Uygulanan yüzey işlemi ile sertleştirilen bölge sadece belirlenen bölge ile sınırlı olup işlemin uygulandığında alanda sertlik artışı görülmektedir. İşlemin uygulandığı alandaki aşınma dayanımında ve kalıntı basma gerilmelerindeki artış, lokal olarak uygulanan bölgelerde indüksiyonla sertleştirme işleminden kaynaklanmaktadır. Numunede yüzey işleminin dışında kalan bölgeler prosesten etkilenmemektedir [11-12].

## **1.2. Amaç**

Bu çalışmada, dökme demir ailesi içerisinde, küresel grafitli dökme demir (KGDD), çeliklere en yakın özelliklere sahip olduğundan, Elektrolitik Plazma Teknolojisi (EPT) ile yüzey özelliklerinin geliştirilmesinin mümkün olup olmadığı araştırılmıştır. Literatürde, bu konuda yapılan çalışma sayısının oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu kapsamda, çalışmada elektrolitik plazma teknolojisi ile yüzeyleri modifiye edilmiş küresel grafitli dökme demirlerin mekanik ve tribolojik özelliklerinin indüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş ve hiç işlem görmemiş olanlarla kıyaslanması hedeflenmiştir. Çalışmada, Elektrolitik Plazma Teknolojisi ile yüzeyleri modifiye edilmiş KGDD'nin mikroyapı, mekanik ve tribolojik özelliklerini ön plana çıkartacak deneysel araştırma sonuçlarına ulaşmak amaçlanmamıştır. Aynı zamanda, endüstriyel boyutlu bir modifiye ünitesinin işlevsel hale getirilmesi de hedef alınmıştır.

Çalışmanın birinci bölümünü küresel grafitli dökme demirlere genel bir bakış oluşturmaktadır. İkinci, üçüncü ve dördüncü bölümlerde literatür çalışması gerçekleştirilmiştir. Beşinci bölümde deneysel prosedürden ve bu çalışmalarda kullanılan deney cihazlarından bahsedilmiştir. Numunelerin üretilmesi ve yapılan testler bölüm altında, sonuçlar ve tartışmalar ise bölüm yedide özetlenmiştir.

Mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskopunda (SEM) gerçekleştirilmiştir. Değişen parametrelere bağlı olarak modifikasyon tabakası kalınlıkları ölçülmüştür. Yüzey sıcaklık ölçümleri PICOLOG programı, grafit dağılımları, modifikasyon bölgesi martenzit hacim oranları imaj analiz programı vasıtasıyla incelenmiştir. Modifikasyon tabakası XRD analizi ile test edilmiş yüzey sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri ball on disk CSM-Tribometer cihazında lineer aşınma yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 3 ayrı yükte ve sabit kayma hızında ve sabit mesafede yapılarak, aşınma kaybı, sürtünme katsayısı ve aşınma hızı değişimleri tespit edilmiştir. Aşınma deneyi gerçekleştirilen malzemelerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ve EDS analizleri ile incelenerek aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir.

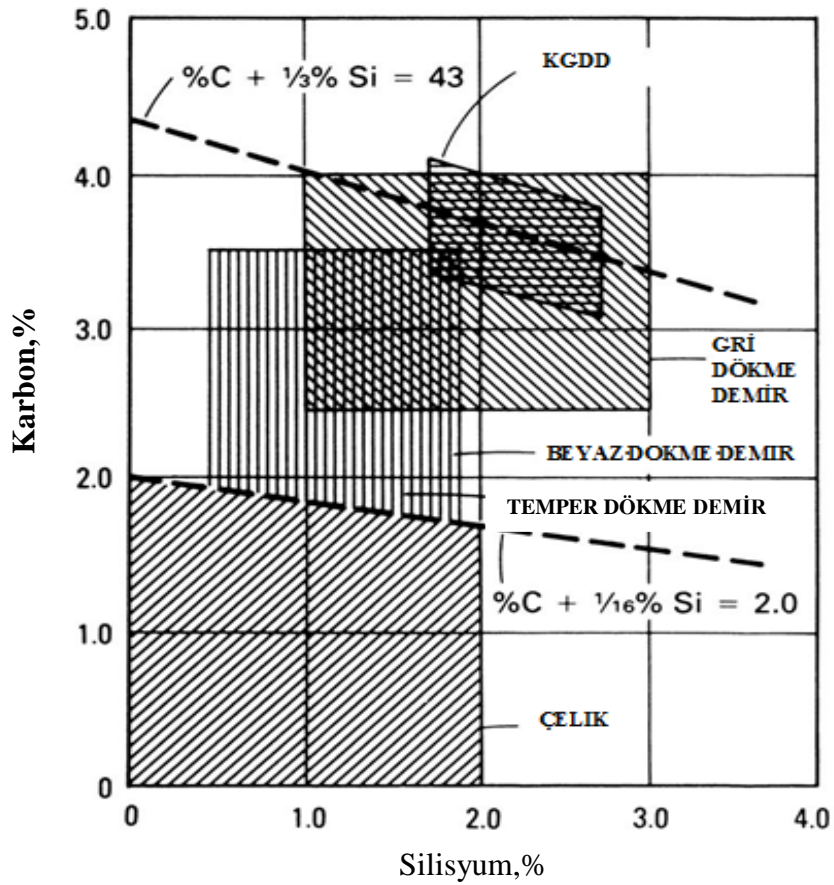
## BÖLÜM 2. DÖKME DEMİRLER

Yüksek fırında veya diğer tesislerde demir cevherinin indirgenmesi ve ergitilmesi yoluyla elde edilen , içinde %2' den fazla karbon ve diğer alaşım elementlerinin (Mn, Si, Cr,.. ) bulunduğu Fe-C alaşımına pik denir. Pikin ergitme fırınlarında tekra ergitilerek bazı metalurjik işlemlerle değişiklik yapılması sonucu bir kalıp içerisine dökülmesiyle elde edilen malzemeye dökme demir denir. Dökme demirler, döküm alaşımlarının en önemli grubu olup bünyelerindeki yapı elemanlarının cins, şekil ve dağılımına göre sınıflandırılırlar:

Gri (lamel), vermicular (silindirik), fibresel (coral), küresel (düktil), beyaz, temper dökme demirler olmak üzere adlandırılırlar. Bütün türleri iyi dökülebilirlik ve iyi mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikleri sınıflandırmak istersek, başlıcaları [10-13];

- a. Düşük ergime sıcaklığı (1150- 1300 °C)
- b. İyi akışkanlık (ötektik bileşime yakın)
- c. Döküm ve kalıp şeklini alabilme kabiliyetinin yüksek olması
- d. Ergitme işlemlerinin kolaylığı ve ucuzluğu
- e. Kimyasal bileşim sınırlarının geniş tutulabilmesi
- f. Talaşla imalat tekniğinde iyi işlenebilme
- g. Titreşim söndürme kabiliyetinin yüksek olması
- h. Aşınma ve korozyona dayanıklılık.

Dökme demirlerin katılaşma yapı ve şartları Fe-C-Si üçlü faz diyagramı ile kritik edilebilir. Dökme demirlerde en önemli iki alaşım elementi C ve Si dur. Bu bileşimlere bağlı olarak önerilen sınır şartlar ve bileşim aralıkları şekil 2.1 de verilmiştir.



Şekil 2.1. Dökme demir alaşımlarında karbon ve silisyum içerik aralıkları

## 2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirler

### 2.1.1. Giriş

Küresel grafitli dökme demir, birbirinden bağımsız olarak (British Cast Iron Research Association (BCIRA) ve International Nickel Company (INCO) tarafından geliştirilmiş ve ilk defa Amerikan Dökümcüler Cemiyetinin 1948'deki yıllık toplantısında döküm endüstrisi için yeni bir malzeme olarak tanıtılmıştır. Bu tip dökme demir için "sfero", "nodüler" ve "küresel grafitli dökme demir adları kullanılmıştır [14-17].



BCIRA yöntemi esas olarak, gri dökme demirle aynı bileşimde olan hiper ötektik dökme demirlere ergimiş halde seryum (Ce) ilavesinden ibarettir. Seryum'un büyük kısmı, bileşimdeki kükürdü gidermekte ve geri kalan yaklaşık % 0.02 Ce ise, grafitlerin lamel yerine küre şeklini almalarını sağlamaktadır. INCO yönteminde ise hipo ve hiper ötektik dökme demirlere benzer olarak magnezyum ilavesi yapılmaktadır. Bu yöntemlerin ilk tanıtılmasından sonra bugün hemen her yerde uygulanan magnezyum yöntemi daha ekonomik oluşu nedeni ile tercih edilmiştir.

Bu elementlerin kükürde karşı ilgileri çok fazla olduğundan, küreselleştirme işleminin iyi bir şekilde yapılabilmesi için eriyik metalin kükürt oranının %0,015'in altında olması gerekir. Alaşım elementlerinden çil oluşumu ve matris yapısında etki edenler birincil alaşım elementi olarak, grafit yapısı ve küreleşmeye etki eden elementler ikincil alaşım elementleri olarak adlandırılırlar. İkincil elementler ve grafit şekline olan etkileri tablo 2.1'de verilmiştir [18].

Tablo 2.1. İkincil elementlerin grafit yapısına etkileri

ELEMENT SINIFI	ELEMENT
Küreselleştirici	Magnezyum, kalsiyum, nadir toprak metalleri (seryum, lantanyum v.b.), yitriyum
Küreselleşmeye Etkisiz	Demir, karbon, alaşım elementleri
Küreselleşmeyi Azaltıcı	Alüminyum, titanyum, arsenik, bizmut, telür, kurşun, kükürt, antimon

Küresel grafitli dökme demir çeliğinkine benzer bir matris içinde dağılmış küre şekilli grafitlerden oluşan bir yapıya sahiptir. Yapı açısından gri dökme demirden tek ayrıcalığı grafitlerin seklidir. Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri grafit sekili ve büyük ölçüde matris yapısı tarafından etkilenmektedir [19].

1970'den itibaren üretimi artan küresel grafitli dökme demirler, mühendislik açısından çeliğin birçok avantajını ve dökme demirlerin ekonomik talaşlı işlenebilme özelliğini bir araya getirmektedir. Bu üstün özellikleri sayesinde, gri dökme demir, temper dökme demir ve çelik döküm yerine kullanılır. Yüksek mukavemet ve iyi aşınma direnci istenilen birçok yerde geniş kullanım alanına sahiptir. Örneğin otomobillerde kam ve krank milleri, dişliler ve fren disk kampanaları küresel grafitli

dökme demirden üretildiğinde daha iyi sonuç vermektedir. Burada küresel grafitli dökme demir ile üretilmesinin sebebi üstün islenebilirlik özelliği ve elastisite modülünün yüksek olmasıdır. Ayrıca çeliğe göre kıyaslandığında daha yüksek aşınma direnci görülmüştür [17,20]. Küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanını genişleten bir başka sebep ise çeliğe uygulanan ısı işlemlere benzer işlemlerle istenilen mekanik özelliklere sahip olabilmesidir [20].

### **2.1.2. Küresel grafitli dökme demirlerin üretim türleri**

KGDD malzemeler herhangi bir ilave ısı işleme gerek duyulmaksızın genel olarak üç şekilde üretilirler.

Ferritik KGDD; Küresel grafitler ferrit ana yapısındadır. Yüksek darbe direnci, göreceli iyi termal iletkenlik, yüksek magnetik geçirgenlik, düşük histerisiz kayıpları, iyi islenebilirlik ve bazı ortamlardaki iyi korozyon direnci belirgin özellikleri arasında sayılabilir.

Ferritik – Perlitik KGDD; Ferrit ve perlit karışımı ana fazında küresel grafitler bulunduran ve en yaygın olan bir türdür. En ucuz tip olup belirgin özellikleri arasında iyi islenebilirlik gelirse de diğer özellikleri tam perlitik ve tam ferritik KGDD'ler arasında bulunur.

Perlitik KGDD; Perlit ana fazındaki küresel grafit metalografik yapısını belirler. Yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci, düşük magnetik geçirgenlik, yüksek histerisiz kaybı, iyi islenebilirlik, orta darbe direnci ve süneklik belirgin özellikleri arasında sayılabilir.

Dökme demirler içinde özel yeri olan KGDD ailesini bu üç grup içinde sınırlamak mümkün değildir. Özel durumlarda mühendislik ihtiyaçlarına cevap veren diğer KGDD çeşitleri de vardır. Martensitik, östenitik ve östemperli KGDD'ler bunlar arasında sayılabilir ancak bunlar pahalı türlerdir. Martensitik KGDD döküm halinde iken sert ve kırılgan olup, nadiren kullanılır. Temperlenmiş martensitik yapı çok yüksek mukavemet ve aşınma direnci gösterir. Östenitik KGDD çekme mukavemeti

en düşük olan KGDD türüdür. Ancak iyi korozyon ve oksitlenme direnci, yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılık en belirgin özellikleri arasındadır. Östemperlenmiş KGDD küresel grafitli dökme demirler ailesine en son katılan, tasarım mühendislerine mukavemet, tokluk ve aşınma direnci özelliklerinin kombinezasyonunu sunan bir türdür [21].

### 2.1.3. Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması

Küresel Grafitli Dökme Demirler çeşitli normlara göre sınıflandırılmaktadır. TS 526'ya ve DIN1693 standartlarına göre Tablo 2.2'de küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması görülmektedir. Küresel grafitli dökme demirler sınıflandırırken TS 526'ya göre çekme mukavemeti 600-700 N/mm<sup>2</sup> nin üzerindeki KGDD'ler demir esaslı mühendislik malzemeleri içerisinde önemli bir yere sahiptir. Yüksek mukavemet ve iyi dökülebilirlik yanında, küresel şekilli grafitler, yapıda yağlayıcı görevi görmektedir [22]. DDK35.3 ve DDK40.3 kodlu malzemeler darbeli çalışma için öngörülen tiplerdir ve standartta çentik darbe dayanımı ile ilgili koşullar verilmiştir.

Tablo 2.2. TS 526 / DIN1693 standardına göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması

Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kısaltması		İç Yapısı	Çekme Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Akma Dayanımı (N/mm <sup>2</sup> )	Kopma Uzaması (%)	Brinel Sertlik Değeri
TS 526	DIN1693					
DDK-40	GGG-40	Daha çok ferritik	420	280	12	140-201
DDK-50	GGG-50	Ferritik-Perlitik	500	360	7	170-241
DDK-60	GGG-60	Perlitik-Ferritik	600	400	3	192-269
DDK-70	GGG-70	Daha çok perlitik	700	450	2	229-302
DDK-80	GGG-80	Perlitik	800	500	2	248-352
DDK35.3*	-	Ferritik	350	220	22	-
DDK40.3*	-	Ferritik	400	250	18	-

#### 2.1.4. Küresel grafitli dökme demire alaşım elementlerinin etkisi

Küresel grafitli dökme demir içerisinde karbon, silisyum, manganez, fosfor, kükürt, bakır, krom, nikel, vanadyum ve bor gibi alaşım elementleri bulunmaktadır. Aşağıda bu alaşım elementlerinin küresel grafitli dökme demire etkileri kısaca açıklanmıştır.

*Karbon:* KGDD bileşiminde % 3-4 karbon bulunmaktadır. Karbon miktarının artmasıyla grafit kürelerinin sayısının artmasına sebep olur. Ayrıca döküm kabiliyetinin artmasına neden olur [23].

*Silisyum:* KGDD içerisinde silisyum miktarı % 1,8-2,8 arasındadır. Silisyum ötektoid dönüşümde oluşan ferritin oranını ve sertliğini arttırarak dökme demir mukavemetinde de önemli artış meydana getirir. Bunun yanında sünek-gevrek geçiş sıcaklığını da yükseltir. Bu nedenle maksimum tokluğun ve sünekliğin sağlanması için silisyum oranı % 2'nin altında tutulmalıdır.

*Manganez:* Özellikle kalın kesitli dökümlerde manganez tane sınırı karbürlerinin oluşumunu teşvik eder. Bunun sonucunda ise süneklik ve tokluk düşer. Ferritik döküm yapısı istenen KGDD malzemelerde manganez oranının % 0,2 tutulması sonucunda maksimum süneklik elde edilmesi için gereklidir. Ayrıca perlitik döküm yapısı sağlamak için manganez oranı % 1'e kadar çıkabilir.

*Fosfor:* Yapıda steadit fazı oluşturarak kırılabilirliği artırır. Bu nedenle yapıda maksimum % 0,05 olarak sınırlandırılmalıdır.

*Kükürt:* Grafitleri küreselleştirmek için kullanılan magnezyum miktarının daha fazla kullanımını gerektirdiği için bileşimi, magnezyum işlemi öncesinde % 0,02 veya daha az bir seviyeye indirilmelidir.

*Bakır:* Malzemede işlenebilirliği artırmak ve tokluğun yanı sıra yüksek mukavemet sağlar.

Yukarıda sözü edilen elementlerden başka antimuan, kurşun, titanyum, tellür, bizmut ve zirkonyum gibi elementlerde çekirdekleşme potansiyeline etki ederler. Bu elementler, bileşiminde ya çok seviyelerde bulunmalı ya da hiç bulunmamalıdır. Krom, nikel, vanadyum ve bor gibi alaşım elementleri ise karbür yapıcı perlitli kararlaştırıcı ya da ferrit oluşumunu teşvik edici elementler olarak bilinir [23-25].

### **2. 1. 5. Küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanları**

Küresel grafitli dökme demirlerin, diğer dökme demirler ve çeliklere göre sahip olduğu bazı üstün özellikleri sebebiyle, kullanım alanları ve üretim miktarları her geçen gün biraz daha artmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerin bazı avantajları aşağıda sıralanmaktadır ;

- a. Küresel grafitli dökme demirler çeliklere göre %10 daha hafiftirler,
- b. Küresel grafitli dökme demirlerden yapılan dişliler, çeliklerden daha sessiz çalışmaktadır. Yapıdaki grafit, sönüm kapasitesinin %40 artmasını sağlamaktadır,
- c. Küresel grafitli dökme demirlerin çelikten daha az çentik duyarlılığı vardır bu yüzden yüzey işlemlerinin çeliklerde olduğu kadar hassas yapılmasına gerek yoktur,
- d. Hammadde olarak küresel grafitli dökme demirler, çeliklerden daha ucuzdur,
- e. Küresel grafitli dökme demirlerden yapılmış belirli dişliler, son şeklini verecek şekilde dökülebilir. Örneğin, döküm işlemi sırasında dişler oluşturulabilir.
- f. Küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği, tavllanmış çelikten oldukça iyidir. Bu nedenle pahalı işleme takımlarının sarfiyatı da az olmaktadır,
- g. Küresel grafitli dökme demir dişlilerin üretiminde kullanılan enerji, çelik dişlilerin üretiminde kullanılan enerjiden daha az olmaktadır. Bu sayede %50 'ye ulaşan enerji tasarrufu sağlanabilmektedir,

- h. Küresel grafitli dökme demirler, bünyesinde bulunan serbest grafit sayesinde çeliklere göre düşük sürtünme katsayısı ve düşük aşınma hızı sergilemektedir.

Belirtilen bu üstün özellikleri sebebiyle, küresel grafitli dökme demirler birçok kullanım alanına sahiptir. Bu kullanım alanları içerisinde en çok payı otomotiv ve mimari uygulamalar almaktadır. Bunlardan bazıları; krank milleri, ön teker destek kolları, direksiyon bağlantılarının kompleks şekilleri, fren diskleri, motor bağlantı rotaları, serbest kollar, tekerlek poyraları, güç iletim bağlantıları, turbo yuvaları ve manifoldlar için yüksek sıcaklık uygulamaları ve bir çok uygulama için yüksek güvenlik valfleri sayılabilir. Ayrıca küresel grafitli dökme demir boru endüstrisi, diğer en büyük kullanım alanını teşkil etmektedir. Bunun yanında, madencilik ve metalürji sektöründe, sıcak hadde merdanelerinde, kalıplarda, ergitme ve cüruf potalarında da kullanılmaktadır [20,25-26].

## **BÖLÜM 3. YÜZEY İŞLEMLERİ VE ELEKTROLİTİK PLAZMA TEKNOLOJİSİ**

### **3.1. Giriş**

Son zamanlarda; teknolojinin hızlı şekilde ilerlemesi sonucu ağırlaşan çalışma koşullarında kullanılan makine ve malzemeler beklenen talepleri tam olarak karşılayamamaktadır. Bu durum yüzey mühendisliğinin önemini ortaya çıkarmıştır. Yüzey işlemleri ile malzemenin sertlik, yorulma, sürtünme, aşınma ve korozyon özellikleri geliştirilmektedir. Yüzey işlemleri, 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 [1,27-28]. Malzeme tasarımı, özellikleri, yüzey mühendisliği teknolojileri ve endüstriyel sektörler arasındaki karşılıklı etkileşim Şekil 3.1’de verilmektedir. Şekilde de görüldüğü üzere malzemelerin öncelikle hangi sektörlerde sorunla karşılaştığı, daha sonra bu problemlerin karakterizasyonu ve nasıl çözümlenebilecekleri, bu amaçla malzeme yüzeylerine uygulanabilecek yüzey geliştirme prosesleri ile malzemelerin tüm sektörlerle olan ilişkilerini açıklamaktadır [29].

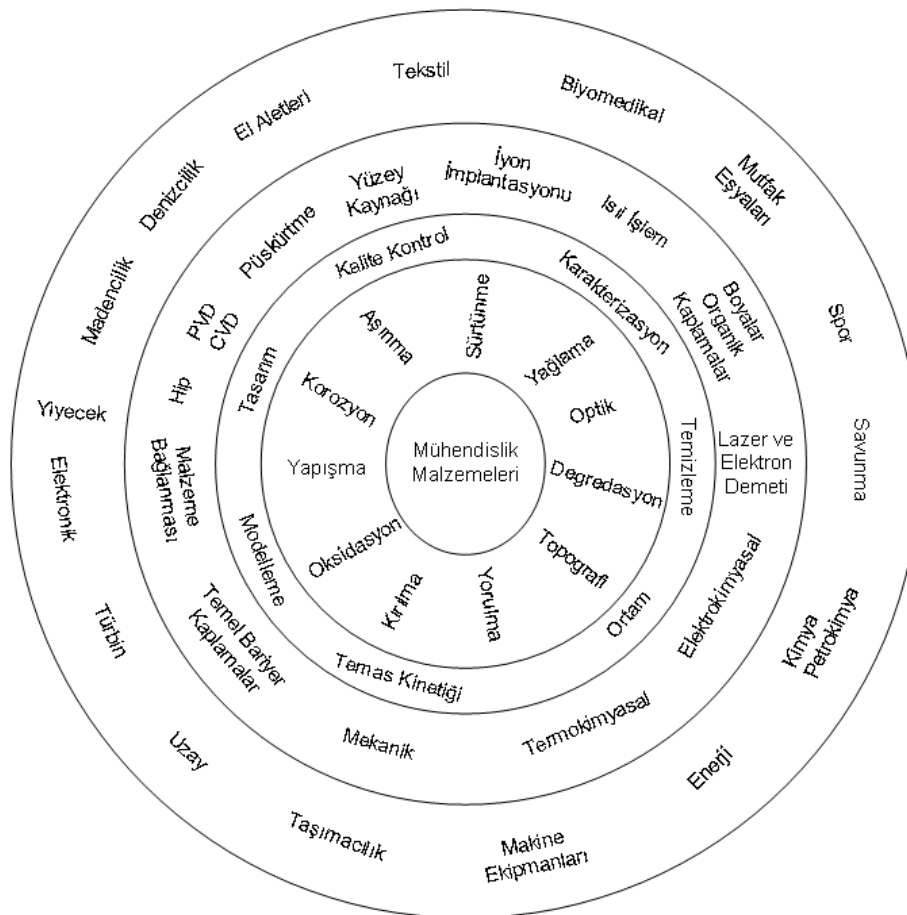
### **3.2. Yüzey İşlemleri**

Yüzey işlemlerini iki temel gruba ayırabiliriz; bunlar yüzey kaplamaları ve yüzey sertleştirme işlemleridir.

### 3.2.1. Yüzey kaplamalar

Bir malzeme yüzeyinde bir element yada bileşiğin biriktirilmesi veya çöktürülmesi işlemi kaplama olarak adlandırılmaktadır. Yüzey kaplamaları altlık malzemesinin termodinamiği ile ilgili olmadığından geniş bir uygulama olanağı sunmaktadır.

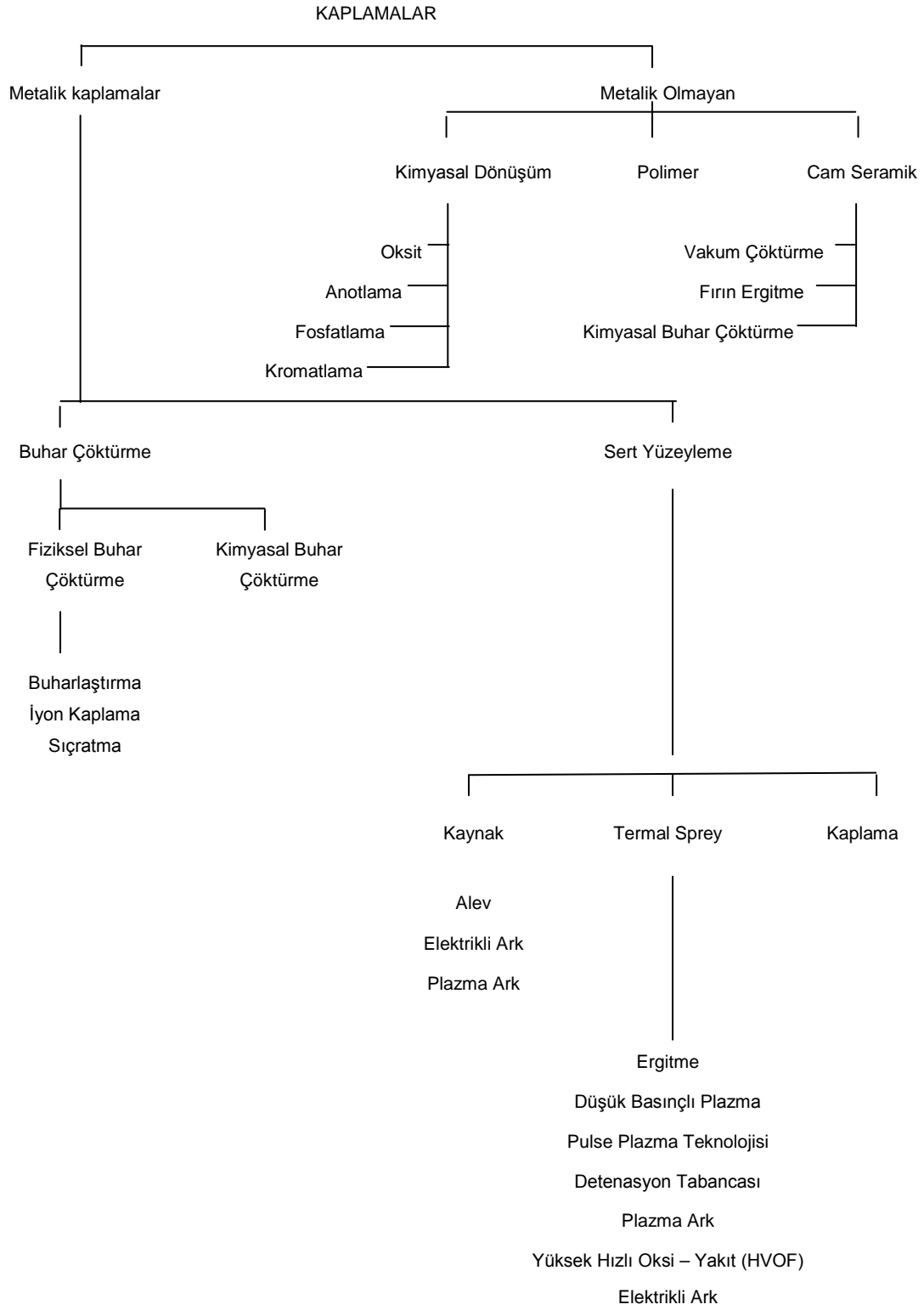
Yüzey kaplamaları temel olarak malzemeyi kullanıldığı ortam etkilerinden korumak ve görünümünü iyileştirmek amacıyla uygulanır. Bu amaçla Tablo 3.1’de sınıflandırılmış çok sayıda kaplama yöntemi verilmiştir. Tabloda verilen sınıflandırmada, kaplama yöntemleri metalik ve metalik olmayan kaplamalar şeklinde iki temel gruba ayrılmaktadır. Kaplamalar malzemelerin korunması, parça performansının artırılmasında, kullanılan en önemli yollardan biridir [29].



Şekil 3.1. Yüzey mühendisliği teknolojileri ve endüstriyel sektörler ile karşılıklı etkileşimi



Tablo 3.1. Kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması [29]



### 3.2.2. Yüzey sertleştirme

Günümüzde kullanılan yüzey işlemleri geleneksel (ısı işlem esaslı) yüzey işlemlerinin temeline dayalı bir uzantısı sayılabilir. Amaç hem geleneksel hem de yeni yüzey işlem teknolojilerinde 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 ya da 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 ve 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 [30].Çelik ve dökme demirlerin deformasyon ve çatlak problemi olmadan yüzeylerinin sertleştirilmesi için değişik yüzey sertleştirme yöntemleri kullanılmaktadır (Tablo 3.2) [29,31].

Tablo 3.2. Yüzey sertleştirilmesi için temel yöntemler [31]

<b>Difüzyon(yayınma) Metotları</b>	<b>Lokal Sertleştirme Metotları</b>
Nitrürleme	Alevle sertleştirme
Karbürleme	İndüksiyon ile sertleştirme
Karbonitrürleme	Lazer ile sertleştirme
Borlama	Elektron ışını ile sertleştirme
Toyota difüzyonu	İyon aşılama /implantation
Titanyum – karbon difüzyonu	Seçici karbürleme ile nitrürleme
	Ark lambası ile sertleştirme

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 [29,32].

### 3.2.2.1. Difüzyonla yüzey sertleştirme prensibi

Difüzyon; malzeme içerisindeki atomların ve diğer sertleştirme elemanlarının sıcaklığa bağlı olarak hareket ettirilmesi ile yer değiştirmesi difüzyon (yayınma) olarak adlandırılır. Difüzyon terimi özellikle katı malzeme içerisinde kütle taşınımını sağlayacak oranda gelişen atom hareketlerini tanımlar. Difüzyon yönteminde malzeme yüzeyinin iç yapısı, 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, niyobyum, 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, ısıl işlemlerin çoğunda büyük önem arz eder [33].

### **3.2.2.2. Termo-kimyasal işlemler**

#### **3.2.2.2.1. Karbürleme**

Sementasyon, katı karbürleme yada katı ortamda karbürleme, yüzeye karbon emdirme veya yüzeyin karbonca doyurulması demektir. Karbürleme işlemi iş parçası yüzeyine karbon difüze etmek sureti ile gerçekleştirilen bir işlemdir. Ortam karbonca zengin iş parçası yüzeyi de karbonca fakir olacaktır ve iş parçasının karbon içeriği 0.25'den az olmalıdır.

Karbürleme, ostenit ( $\gamma$ ) faz alanında yapılmakta (900-930 °C) olup, işlem yüzeyde elde edilmesi istenen tabaka kalınlığına göre 8-12 saat sürebilir. Bu işlem için altlığın alaşımsız yada az alaşımlı çelik olması gerekir ve işlem sonrasında iş parçasının yüzeyinde karbon miktarı %0.7-1 civarında olabilir [30,34]. Karbürleme işlemleri katı ortamda karbürleme, gaz karbürleme, sıvı karbürleme, plazma karbürleme şeklinde sıralanabilir.

- a. Katı ortamda karbürleme; İş parçaları, karbon verici herhangi bir kapalı ortamda (genelde kömür tozu+dökme demir talaşı) ısıtılır. Genelde katı ortamda yapılan işlem uzun süreli ve büyük parçalara uygulanır. Yüzey tabakası kalınlığı homojen olmayabilir.
- b. Gaz karbürleme; Doğrudan CO<sub>2</sub> gazı karbon kaynağı olarak kullanılır ve gazın (CO<sub>2</sub>) redüksiyonu ile açığa çıkan karbon (C) çelik bünyesine girer. Katı ortamda yapılan karbürleme de karşılaşılan uzun işlem zamanları ve ısıtım işlem uygulama gücü gaz karbürlemede oluşmamaktadır.
- c. Sıvı karbürleme; Özel tuz banyolarında gerçekleştirilir. Kullanılan banyolar zehirli siyanür (CN) esaslıdır.
- d. Plazma karbürleme; Plazma ile karbürleme işlemi konusunda, ilk çalışma 1934 yılında Egan tarafından yapılmış ve patenti almıştır. 1960 yılında Vanin plazma ile karbürleme sistemini kurmuştur. Ancak bu sistemin bilinen karbürleme işlemine göre avantajının olmadığı görülmüştür. Son yıllarda kurulan plazma ile karbürleme sistemleri ile bilinen tekniklere göre, bu yöntemin birçok avantajı ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde endüstriyel amaçla kurulmuş birçok plazma ile karbürleme sistemi mevcuttur [31,34].

Plazma ile karbürleme işlemi, plazma ile nitrüleme işlemi ile hemen hemen aynıdır. Sadece kullanılan gaz ve gerilim değeri farklıdır. Bu işlemde doğru akım kullanılmaktadır. Gaz basıncı 1-20 torr olup, anot ve katot arasına genellikle 1000 voltluk bir gerilim uygulanarak plazma oluşturulur. Karbürleme gazı ise genellikle hidrokarbondur. Karbürleme işlemi östenitik termokimyasal işlem olarak sınıflandırılabilir. Çünkü işlem tamamen östenitik şartlarda meydana gelmektedir. Bu işlem 850-1050°C arasındaki sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu işlem sonrası malzemenin ısıtım çarpılması hemen hemen yoktur, çünkü soğuma vakum ortamında olmaktadır. Parçaların geometrisi homojen tabaka elde edilmesi için önemli değildir, her geometriye sahip malzemede homojen kalınlık elde edilebilir. Hatta işlem parametresinin iyi seçilmesi ile 0,5 mm çapındaki bir delik bile karbürlenebilir [31]. Plazma ile karbürleme, işlem süresinin kısa olması, az distorsiyon ve yapının kontrol

edilebilmesi gibi avantajlarından dolayı endüstride çok geniş uygulama alanı bulmuştur.

### 3.2.2.2.2. Nitrüleme

Aşınma direncinin artırılması için uygulanan en yaygın yüzey işlemlerinden biri de nitrüledir. Nitrüleme, iş parçası yüzeyinin azot ile zenginleştirildiği bir termokimyasal prostedir. Nitrüleme, çelik malzemelerin yüzey özelliklerini (aşınma, yorulma ve korozyon) geliştirmek ve çalışma ömürlerini artırmak amacıyla uygulanan en eski termokimyasal proseslerden biridir.

Nitrüleme yöntemleri; gaz, sıvı, toz nitrüleme, plazma nitrüleme şeklinde alt gruplara ayrılmıştır [29-30,34]. Nitrülemede, genelde bir bileşik tabaka (beyaz tabaka) ve bunun altında bulunan difüzyon zonundan oluşan bir yapı meydana gelir. 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 demir nitrürden oluşan difüzyon tabakası bulunur. Çelik içindeki alaşım elementleri ve oranlarına göre, beyaz tabaka altında  $M_xN_y$  türü sert nitrürler oluşmaktadır. Difüzyon tabakası, özellikle Ti, Al, V, Cr, Mo ve W gibi nitrür yapıcı alaşım elementlerinin değişik sıcaklık aralıklarında metal nitrürler halinde çökeldiği zondur [29, 31, 35 ].

Plazma Nitrüleme; yöntemi son yıllarda bilinen nitrüleme yöntemlerine göre birçok avantaja sahip olması nedeniyle endüstrinin ilgisini çekmektedir. Plazma ile nitrürasyon yöntemi elektrik boşalma (glow discharge) şartlarında oluşur. İlk olarak 1930 yılında İsviçreli mühendis Bernard Berghaus tarafından patenti alınmıştır. Bu yöntemde, malzeme yüzeyine iyonize edilmiş azotu yaymak için aktif ve reaktif plazma hali kullanılır. İşlem teorik olarak elektriksiz olarak iletken malzeme yüzeyine N arayer atomunun yayınma işlemidir [36-37]. Plazma ile nitrürasyon işlemi  $N_2$ ,  $H_2$ , Ar ve  $NH_3$  gaz ortamında, 350-590°C arasında gerçekleştirilebilir. Yüzeyi sertleştirilecek malzemenin Cr, Al, V, Mo ve Ti gibi alaşım elemanlarını içermesi yüzey sertliğini daha da artıracaktır. Plazma ile nitrürasyon işlemi sonrası

en dışta beyaz tabaka ve onun altında da difüzyon tabakası olarak adlandırılan yapılar oluşur. Günümüzde askeri amaçlı olarak kullanılan plazma ile nitrürleme işlemi, özellikle motor pistonlarında, krank millerinde, valflerde, kam milinde, dişlilerde, matkap, zımba gibi kesici takımlarda, derin çekilebilen malzemelerde, dönme ve eğilmeye maruz kalan tüm makina parçalarında kullanılmaktadır. Bu işlemin ekonomik ve kolay uygulanabilmesi endüstride kullanım alanını artırmıştır [31,37].

### 3.2.2.2.3. Plazma Borlama

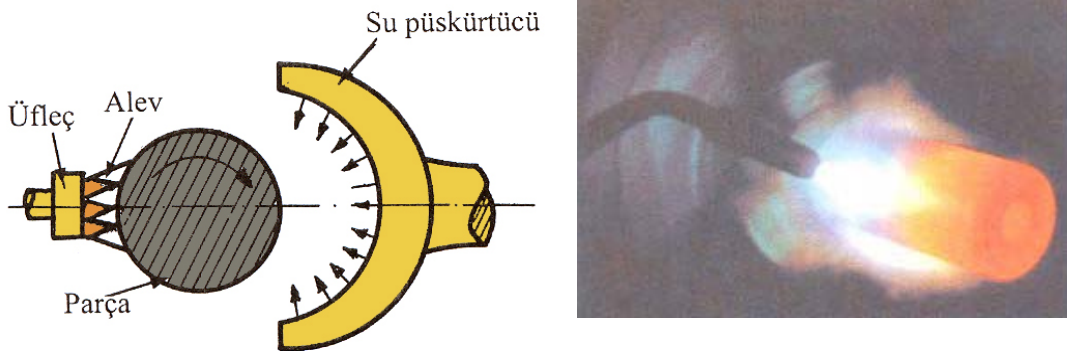
Son yüzyılın başlarından itibaren çalışılmaya başlanan borlama ile çok sert, düşük sürtünme katsayısına sahip, yüksek sıcaklık mukavemeti fazla olan ve korozyona dirençli malzeme yüzeyleri elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bir termokimyasal yüzey sertleştirme yöntemi olan borlamada, bor atomları metal yüzeyine termokimyasal olarak yayınarak sert borür tabakası oluştururlar. Borlama işlemi esnasında FeB ve Fe<sub>2</sub>B tabakaları yüzeyde oluşur ve bu tabakaların sertliği 1800-2000 HV değerine çıkartılabilir. Elde edilen bu sert tabaka aşınmaya karşı dayanımı artırmaktadır. Bu yöntem, yaklaşık 700-1100 °C sıcaklıkta, değişik ortamlarda (katı, sıvı, gaz veya plazma) alaşımsız ve alaşımlı çeliklere, dökme demirlere, demir dışı metal ve alaşımlarına (Ni, Co, Mo, Ti), bu alaşımların toz metalurjisi yöntemiyle üretilen tozlarına, bazı süper alaşımlar ile sermetler gibi birçok malzeme grubuna uygulanabilir.

Plazma borlama, 800-1000 °C sıcaklıkta, yaklaşık 10<sup>-2</sup> Pa gibi bir düşük bir basınçta oluşturulmuş plazma içerisinde yapılan borlamadır. Mikroyapı ve demir bor tabakalarının büyümesi işlem sıcaklığı, gaz karışım oranları, malzeme kompozisyonları, işlem basınç değişim oranları ve uygulanan akım yoğunluğuyla kontrol edilebilmektedir [31,38-39]. Bu yöntem Almanya' da otomotiv sektöründe kullanılmaya başlanmasıyla üstün özellikleri nedeniyle endüstrinin dikkatini çekmiş ve artan ilgiyle araştırmalar yoğunlaşmıştır [40].

### 3.2.2.3. Malzemenin (Yüzeyin) kimyasal yapısını değiştirmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemleri

#### 3.2.2.3.1. Alev ile yüzey sertleştirme

Bu yüzey sertleştirme yönteminde oksii-asetilen yada oksii-hidrojen alevi kullanılır. Malzemenin nispeten kalın bir bölgesi  $\gamma$  faz alanına ısınır. Fakat iç kısım ısınmaz ve iç kısım yumuşak (tok), dış kısım ise sert olur. Eğer ısıtma hızlı olursa sertleşebilen kabuk ince olur. Alev ile sertleştirmede üflecin oluşturduğu sıcaklık direkt olarak malzemenin üst yüzeyini ısıtır (şekil 3.2). Uygulamalarda elde edilen sıcaklık 3000 °C' ye kadar çıkar. Alevle sertleştirme yöntemi indüksiyon ile sertleştirmeye göre daha kaba bir işlemdir. İşlem hassasiyet düşük olan bu yöntemde daha kalın tabaka elde edilir [34].



şekil 3.2. Alevle yüzey sertleştirmenin prensibi ve görüntüsü [41]

#### 3.2.2.3.2. İndüksiyon ile yüzey sertleştirme

Yüksek frekanslı elektrik akımı ile malzemenin sadece yüzey bölgesi  $\gamma$  faz alanına hızla ısıtılır. Frekans yüksek olursa ince bir tabaka ısıl işlem sıcaklığına çıkar. Yüzeyde oluşacak basma gerilmeleri yorulma dayanımını arttırır. Bu işlem manyetik özellik gösteren malzemelere uygulanabilir [34,42,43]. Bu yöntem ilerleyen bölümlerde daha detaylı olarak bahsedilecektir.



### 3.2.2.3.3. İyon aşılama yöntemi

Bir yüzey modifikasyon yöntemi olan iyon aşılama esaslı plazma 1980' li yılların ortalarında geliştirilmiştir. 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 nitrüleme de 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 [30,34].

### 3.2.2.3.4. Lazer yöntemi ile yüzey modifikasyonu

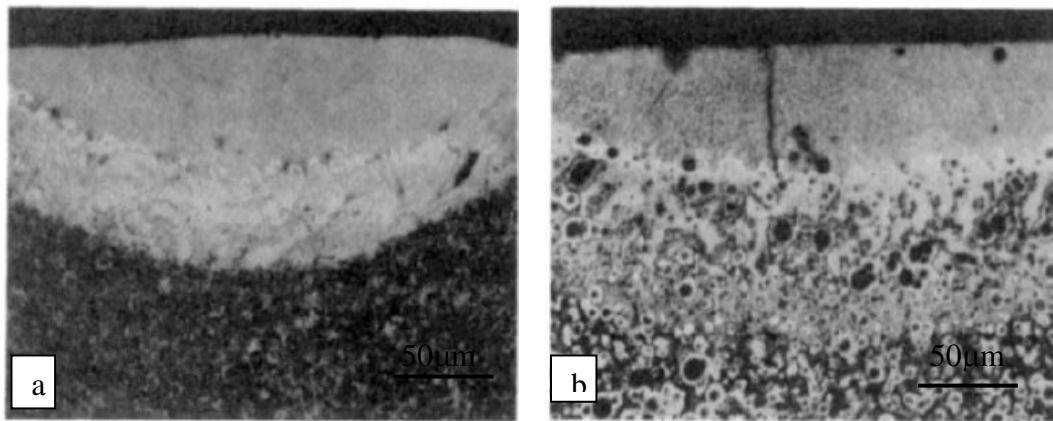
Yüksek enerjili lazerler, malzemenin aşınma direncini arttırmak amacı ile 1960 lardan bu yana kullanılmaktadır [44,45]. Lazer çok kısa sürede malzemelerin ısı verilen yüzeylerinde yüksek sıcaklık üretebilen yüksek enerji ışın türüdür.

Yüzey işlemleri için lazerlerin üç farklı türü ticari olarak kullanılabilir ( CO<sub>2</sub>, Nd, YAG, ve excimer lazer gibi). İlk ikisi birkaç yıldır endüstriyel alanlarda kullanılmaktadır. Bununla beraber excimer lazer 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), temizlemede, 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 ve iş parçalarının yapım alanlarında çalışmalar yapılmaktadır.

Diğer tekniklere nazaran daha pahalı bir teknik olmasında rağmen, bölgesel 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 korozyonu önleme ve aşınma dayanımı gibi özellikler kazandırır. Bununla birlikte, dekorasyon, işaretleme, temizleme benzeri teknikler eğer çok küçük veya hassas bir yüzeyle ilgili ise avantajlıdır [30,34,45-46]. Şekil 3.3 de lazer yöntemi ile sertleştirilmiş dökme demirlere ait mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Şekildende görüldüğü üzere ergimiş zonun altı ısıdan etkilenen sert bölgedir.



Şekil 3.3. Lazerle sertleştirilmiş dökme demirlerin kesit görüntüsü a) Gri dökme demir b) Küresel grafitli dökme demir [46]

### 3.3. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme İşlemi

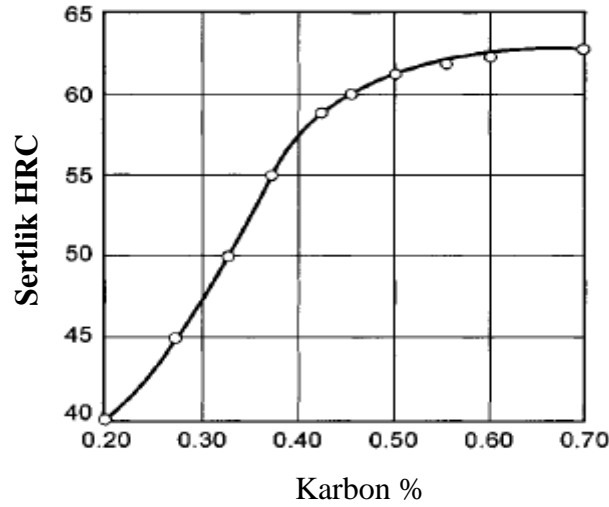
Çelik yada dökme demirin türüne bağlı olarak malzemenin aşınma direncini iyileştirmek yüzey sertleştirmede bir çok süreç ve proses gerektirir. Bu bölüm yüzeye herhangi bir alaşım ilavesi olmaksızın bölgesel yüzey sertleştirme işlemleri ile sınırlı tutulmuştur. Bunlar daha önceki bölümlerde bahsedilmiş olan yüzey sertleştirme işlemleridir. Alev, indüksiyon, lazer beam, elektron beam (demeti) yöntemleridir. Burada daha detaylı olarak indüksiyonla sertleştirme bölümü ele alınacaktır.

İndüksiyonla sertleştirme, yüksek frekanslı alternatif akım geçen bir indüktör ile genellikle su soğutmalı bakır bobin tarafından oluşturulan manyetik alana bir çelik parçası yerleştirilerek oluşturulan çok yönlü bir ısıtma yöntemidir. Alternatif akım frekansının azalması ile yüzey sertlik derinliği artmaktadır. Genel olarak uygulamalarda seçilen frekans 10.000-500.000 Hz değerleri arasındadır [41,43,44]. Parça yüzeyine uygulanan frekans ve buna bağlı olarak sertleşme derinliği Tablo 3.3'de gösterilmiştir [41].

Tablo 3.3. Parça yüzeyine uygulanan frekans ve buna bağlı olarak sertleşme derinlikleri

Frekans (Hz)	Elektrik enerjisinin Girme derinliği (mm)	Sertleşme derinliği (mm)
1000	1,50	4,60-8,90
3000	0,90	3,80-5,10
10000	0,50	2,50-3,80
120000	0,15	1,50-2,50
500000	0,08	1,0-2,0
1000000	0,05	0,25-0,75

Proseste önemli olan diğer parametreler; ısıtma süresi, bobin akımı ve bobin dizaynidir. Şekil 3.4 de artan karbon oranına bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişim verilmiştir [42,43-44].

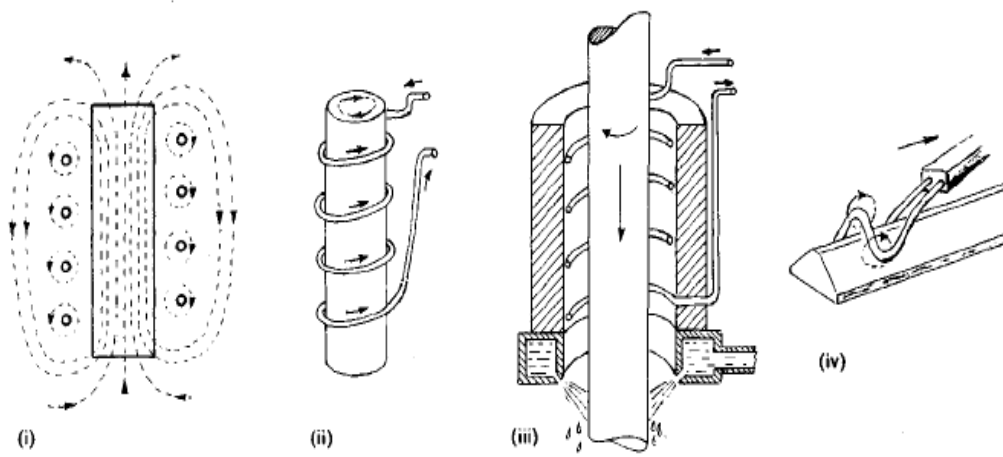


Şekil 3.4. İndüksiyonla sertleştirme ve su vermede karbon yüzdesine bağlı olarak minimum yüzey sertliği değişimi [44]

### 3.3.1 Isıyı yüzeye uygulama prensibi ve süresi

İndüksiyon akımı ile yüzey sertleştirme işleminde alternatif akım yük sargısı ısıtılacak yüzeyi sıkıca sarar (Şekil 3.5 (i)). İşlem yapılacak parçayı saran bobinlerin içerisinde yüksek frekanslı alternatif akım geçirilerek, yüksek frekanslı bir manyetik alan elde edilir. Oluşan yüksek frekanslı akımlar metalin yüzeyinde hareket eder. Metalin bu akımlara karşı gösterdiği direnç nedeniyle parça yüzeyi ısınır (Şekil 3.5 (ii)). Histeresis kayıplar çelik yüzeyinde sıcaklığı artırır ve kritik sıcaklığa birkaç saniyede ulaşır. İş parçası su akışı ile soğutmalı bir tüp içindedir. Yüzey gerekli sıcaklığa ulaşmaz, ya banyoda su vermek için bir banyoya düşürülür ya da otomatik olarak su spreyiyle yüzey sıcaklığı düşürülür.

Uzun miller akslar ve benzeri bileşenler, indüktör bir bloktan geçirilerek aynı zamanda su verme işlemi otomatik olarak gerçekleştirilerek (sertleştirme işlemleri) yapılır (Şekil 3.5 (iii)). Yüzeyin her tarafının eşit ısıtılması için iş parçası döndürülür. Lokalize yüzey sertleştirme işlemleri için indüktör bir prob kullanılır (Şekil 3.5 (iv)). Bu gibi durumlarda sertleşme genellikle havada soğutma ile elde edilir [43].



Şekil 3.5. İndüksiyonla sertleştirme işlemi [43]

#### Avantajları;

- İndüksiyonla yüzey sertleştirmede malzemenin ısınma süresi çok düşük olduğundan çevrenin ısınması çok azdır.
- Bu yöntem ile parça kısa sürede ısındığından etrafa gaz yayılmaz ve daha temiz çevre sağlanır,
- Küçük tesislerde bile kullanılabilir,
- Sürekli bir üretim (seri üretim) için kullanılmaya çok uygundur,
- Alevle sertleştirmeye oranla daha yüksek ısıl girdisi sağlanır,
- Elektrik ortamında otomatik kontrol sayesinde ısıtma daha iyi ayarlanır,
- Parçaların seri imalatında zaman ayarı, elektriksel olarak yüzeye tatbik edilen sıcaklığın ve nüfuz derinliğinin otomatik olarak ayarlanması oldukça kolaydır.

#### Dezavantajları;

- En önemli dezavantajı elektrik üretimi ve ayarlama aletleri gerekli olan tesis oldukça masraflıdır.
- Sargıların imal edilmesi ve geliştirilmesi oldukça pahalıdır,
- Komplike sargıların gerektiği durumlarda ve bunun yanında parça sayısı da çok az ise sertleştirme maliyeti çok artar,
- Kalifiye (yetişmiş) işçiye ihtiyaç duyulur,
- Bu yöntemin malzeme seçimine sınırlama getirmesi de iyi olmayan yönlerindedir,

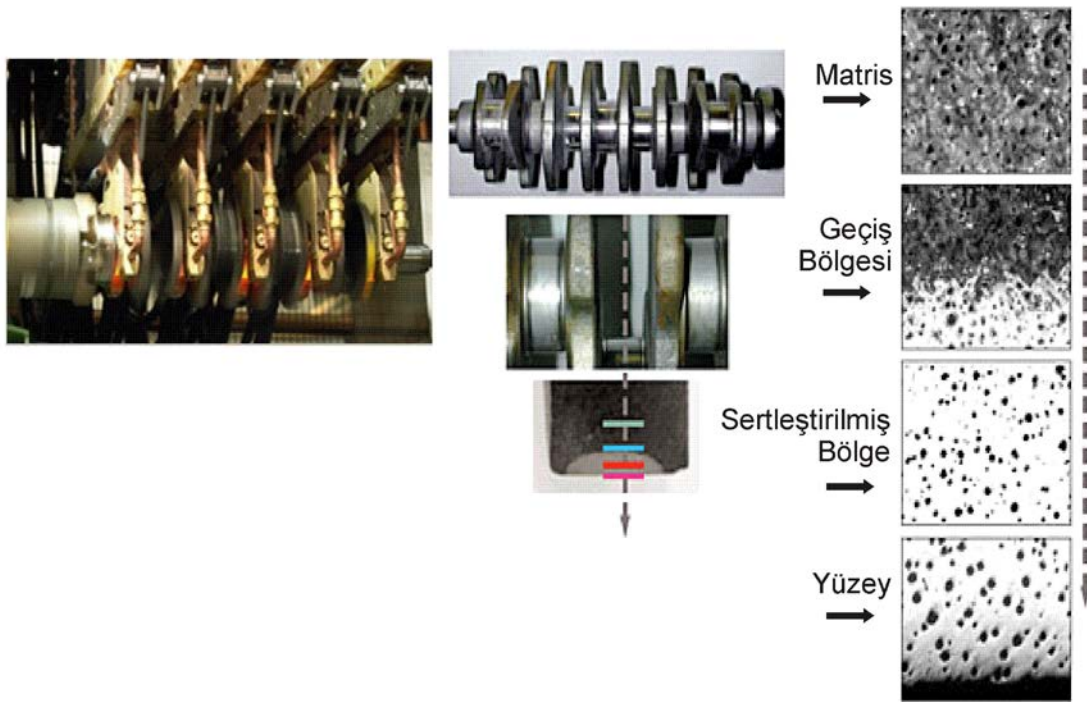
- f. Düşük karbon miktarlı parçalarda diğer yöntemle ulaşabilen sertlik değerlerine ulaşamaz olup yüksek karbonlu çeliklerde ise çatlama tehlikesi meydana çıkar,
- g. Keskin kenar ve köşeli parçaların bu bölgelerinde aşırı ısınmalar meydana geleceği için güçlükler oluşur.

İndüksiyonla sertleştirmede, alaşımların elektriksel dirençleri ve manyetik özellikleri, ısıtma karakterinde önemli farklılıklar doğurabilir. Çelikler ve dökme demirler farklı indüksiyon ısıtma parametreleri gerektirir. Tablo 3.4 de alev ve indüksiyonla sertleştirme yöntemleri kıyaslanmıştır [44].

İndüksiyon akımı ile sertleştirmede sertleştirilecek malzeme, makinedeki yerine takılarak üzerinden elektrik akımı geçecek düzenek sağlanır. Malzeme elektrik akımı verilerek ısıtılır ve uygun soğutma ortamında soğutularak işlem tamamlanır. Sertleştirme işleminden sonra gerilmeleri gidermek için 150-200 °C sıcaklığında menevişleme işlemi yapılır [41]. Şekil 3.6' da indüksiyonla sertleştirilen krank milinin fotoğrafı verilmiştir.

Tablo 3.4. Alev ve indüksiyonla sertleştirme proseslerinin karşılaştırılması [44]

Özellikler	Alevle sertleştirme	İndüksiyonla sertleştirme
Ekipman	Oksifuel torç, özel ısıtma su verme sistemleri	Güç ünitesi, indüktör, su verme sistemleri
Uygulanan malzemeler	Demir alaşımları, çelik, alaşımlı çelikler, dökme demirler	Demir alaşımları, çelik, alaşımlı çelikler, dökme demir
Isıtma hızı (sn.)	Birkaç dakika için birkaç saniye	1-10sn
Sertleştirme derinliği (mm)	1,2- 6,2 mm	0,4- 1,5mm (impulse için 0,1mm)
Parça ölçüleri	Sınırlama yok	Bobine uygun olmalı
Temperleme	Gerekli	Gerekli
Otomasyon	Evet	Evet
Operatör becerisi	Gerekli	Kurulum sonrası çok az gerekli
Maliyet		
Ekipman	Düşük	Yüksek
Parça başına maliyet	Büyük iş parçaları için	Küçük iş parçaları için



Şekil 3.6. İndüksiyonla sertleştirilmiş krank mili [42]

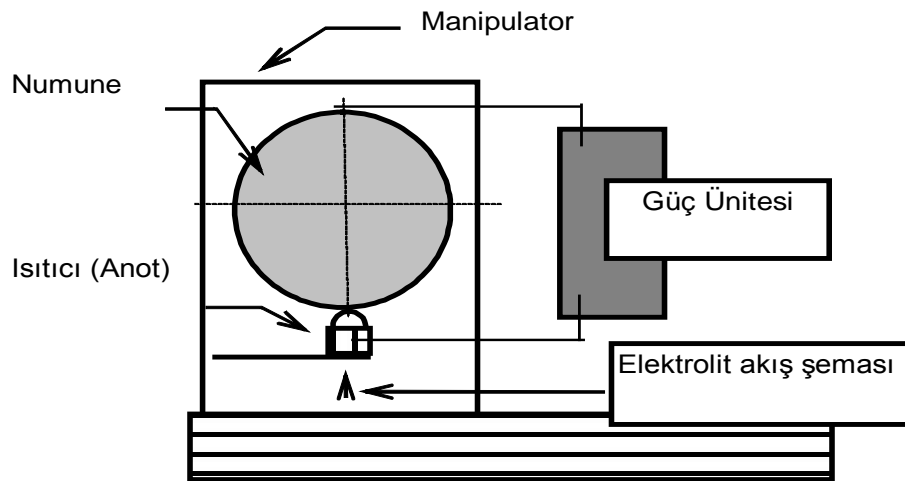
### 3.4 Elektrolitik Plazma Teknolojisi

#### 3.4.1. Giriş

Tribolojik uygulamalarda yüzey mühendisliği uygulamaları çok önemlidir. Bunun en önemli sebepleri; aşınma direncini artırmak ve sürtünme özelliklerini geliştirmektir. 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 [47-49]. Elektrolitik plazma yöntemi ile yüzeylerin modifikasyonu son derece yeni bir modifiye yöntemidir. Bu teknoloji ve donanım parçaların yüzey modifikasyonu için geliştirilmiştir [50].

### 3.4.2. Elektrolitik plazma teknolojisi

Elektrolitik plazma teknolojisi (EPT) parçaların yüzey modifikasyonu için geliştirilmiştir. Özel bir tasarıma sahip anot elektrot ile katot iş parçası arasında yüksek voltaj uygulanarak ark ve plazma oluşturmakta, ark oluşumu ile katot iş parçası yüzeyinin ani ısıtılması ve ısınan yüzeyin elektrolit çözeltisi ile hızla soğutulması esasına dayanmaktadır. Elektrolit çözeltisi farklı bileşimlerde hazırlanabilir. Yüzey işlemi belirlenen süre aralıklarında yüzeyin ısıtılması ve soğutulması çevrimine tabi tutulmasıyla katot iş parçası yüzeyinde sert modifikasyon tabakası elde edilmektedir. Elektrolitik plazmanın şematik olarak görünümü Şekil 3.7' de verilmiştir [51-53].



Şekil 3.7. Elektrolitik plazma teknolojisinin şematik olarak gösterimi

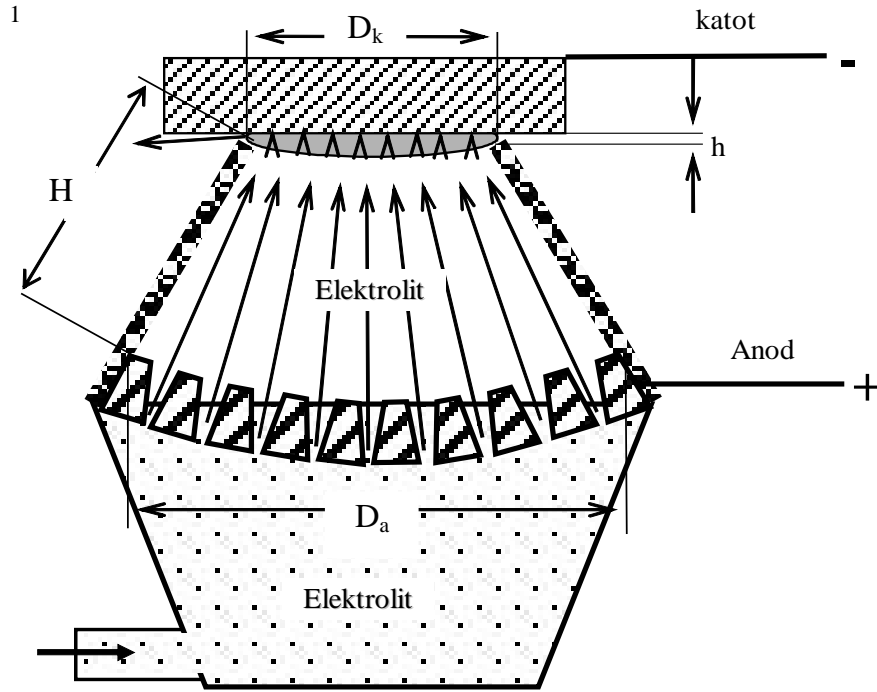
Elektrolitik plazma teknolojisi 4 kısımdan oluşmaktadır. Bunlar;

- Elektrolit besleme tankı (soğutma işlemi; elektrolit),
- Elektrik enerjisini dönüştürücü,
- Anot (nozül-iş parçasını ısıtıcı), katot (numune),
- Manipulatördür.

Şekil 3.8'de gösterildiği gibi sıvı bir çözeltide elektrik deşarjı ve akımı kullanılarak malzeme yüzeyi sertleştirilmekte ve modifiye edilmektedir. Katot olarak gösterilen bölge modifiye edilecek iş parçasını temsil etmektedir. Şemadan görüleceği gibi



elektrolit çözeltisi anottan katoda doğru değiştirilebilen debilerde akmakta ve katot yüzeyinde daralma göstermektedir. Bu daralma sonucu elektrolitin katot yüzeyindeki temas alanı dairesel düşünülüp şekilde “ $D_k$ ” ile sembolize edilmiştir. Şekil 3.8’de  $D_a$ ; Anot nozulun çapını,  $H$ ; Anot ve katot arası mesafeyi,  $h$ ; Plazma tabakasını ve  $D_k$ ; Elektrolitin katot yüzeyindeki temas alanı çapını ifade etmektedir.



Şekil 3.8. Elektrolitik plazma teknolojisinde plazma oluşumunun şematik olarak gösterimi [53]

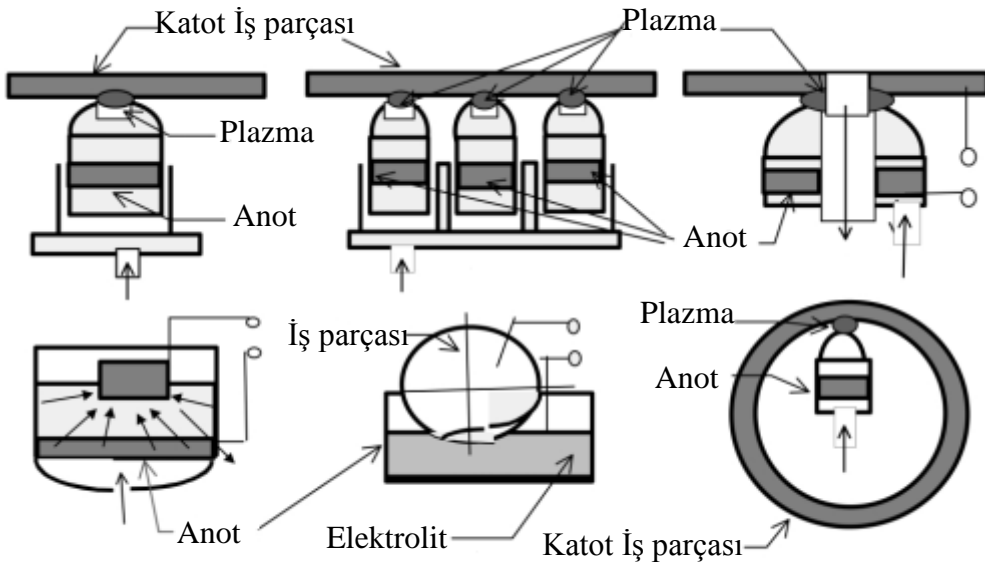
Elektrolitik plazma yüzey modifikasyon teknolojisini benzer işlevli diğer teknolojilerden ayıran en önemli özelliklerinde birisi de kullanılan elektrolittir. Kullanılan elektrolit, su ve suda iyonize olabilen bileşiklerdir. Temel sarf malzemesi olan elektrolit malzemelerinin temini çok kolay olup hiçbir şekilde dışarıya bağımlılık gerektirmemektedir. Elektrolitik plazma yüzey teknolojisinde iyonize malzeme olarak  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}^+$ ) kullanılmaktadır. Bu prostedeki kritik nokta ise doğru elektrolit kompozisyonlarının hazırlanarak, yüzeye ısı çevrimin yanında alaşım elementi difüzyonu sağlanabilmesidir [52-53].

Elektrolitik Plazma Teknolojisinin Avantajları;

- Modifikasyon işlem süresinin kısa olmasıdır (saniyeler mertebesinde),
- 50-500 °C/s aralığında ısıtma – soğutma çevrimine sahip olması,

- c. Yüzey modifikasyon derinliğinin geniş bir aralığa sahip olması (0.1mm-10 mm),
- d. Her hangi bir ön hazırlık işlemine ihtiyaç duyulmaması,
- e. Yüzey işlemi uygulanabilecek malzemelerin geniş bir aralıkta olması (dökme demirler, çelikler, sert alaşımlar v.b. )
- f. Bölgesel olarak sertleştirme sağlanabilmesi ve modifiye edilecek parça boyutlarında sınırlama olmaması (Şekil 3.9),
- g. Benzer yöntemlere kıyasla çok daha ekonomik olması, sarf malzeme maliyetlerinin düşük olması,
- h. Atmosfere açık ortamda çalışılması,
- i. En önemlisi de çevreye duyarlı ve ülkemizde yeni dikkat çeken bir yöntem olması şeklinde sıralanabilir.

Şu ana kadar elektrolitik plazma konusunda yapılmış çalışmalar göstermiştir ki; bu teknoloji günümüz yüzey modifikasyon alanlarında büyük gelişmeler sağlayacaktır. Yapılan araştırmalarda yöntemin özellikle uygulama maliyetinin düşük olması açısından günümüz endüstrisinde mevcut yüzey modifikasyon problemlerinin çözümünde son derece yararlı olacağı düşüncesini desteklemektedir.



Şekil 3.9. Farklı şekillerde uygulanabilen EPT yönteminin şematik olarak gösterimi [52]

Elektrolitik plazma modifikasyon teknolojisinin endüstriyel ve ekonomik yönden birçok avantajları vardır. Bunlar; metal parçaların servis ömrünü arttırması, yüzey sertlik verimliliğini, sertleşme prosesinin verimliliğini arttırması, metal parçaların fiyatlarının azaltılması, yüksek aşım kullanımını azaltması, enerji tüketim seviyesini azaltması vs. şeklinde sıralanabilir [52-53].

### **3.4.3. Elektrolitik plazma teknolojisinin kullanım alanları**

EPT yöntemi endüstriyel olarak birçok alanda kullanılmaktadır. Bunlar; delici makinelerin matkap uçları, delici uçlar, madencilik ve ham maddelerin çıkarılmasında kullanılan araç ve gereçlerde, testerelede, bıçaklarda, metalurji sektöründe haddelerde, disklerde, pulluklarda, sabanlarda, tarım makinelerinde bıçaklarda v.s. şeklinde sayılabilir. Örnek olarak verilen bu malzemelerin performanslarını arttırmak için yüzeylerinde oluşturulan modifiye tabaka kalınlığı 3mm'den 10 mm' ye kadar olması gerekmektedir. Şekil 3.10' da elektrolitik plazma uygulanmış bazı iş parçalarının EPT işlemi sonrası görünüşlerine birkaç örnek verilmiştir [50,52-53].

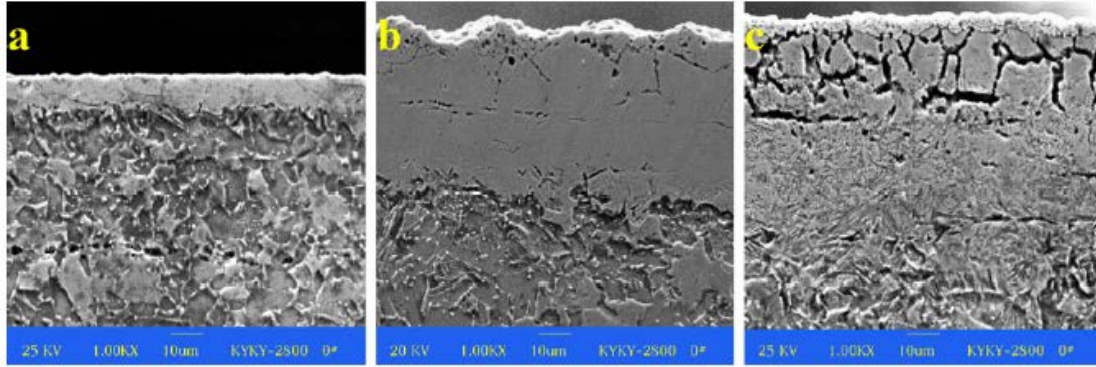


Şekil 3.10. Elektrolitik plazma tekniği uygulanmış malzemelere örnekler [50, 54]

Shen ve arkadaşlarının [55] yaptığı Q235 çeliğine elektrolitik plazma işlemi uygulanmış çalışmada sürenin modifikasyon işlemi üzerine etkisi araştırılmış olup çelik üzerinde homojen ve sertliği dört kat daha arttırılmış olan modifikasyon yüzeyi başarı ile elde edildiği görülmektedir.

Şekil 3.11’de elektrolitik plazma ile modifiye edilmiş Q235 çeliğinin modifikasyon yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Farklı işlem süreleri sonrasında elde edilen modifikasyon yüzeyi görülmekte olup artan süreyle orantılı olarak modifikasyon

tabakası kalınlığında artış görülmüştür [50]. Benzer şekilde bu projede; dökme demire, uygulanan termal çevrimin, yüksek voltaj süresinin değişimine bağlı olarak meydana gelen farklılıklar incelenecektir.



Şekil 3.11. Q235 çeliğinin elektrolitik plazma işlemi sonrası yüzeylerin SEM görüntüleri a) 30s b) 75s c) 120s [55]

#### 3.4.4. Yüzey işlemlerinde ve EPT teknolojisinde karşılaşılan sorunlar ve gelişmeler

Yüzey işlemleri birden fazla bileşene bağlı olması nedeni ile tüm bileşenler doğru seçilmiş olmalıdır. Aksi halde istenen sonuç alınamayacak ve sorunun kaynağını bulmak güçleşecektir. Özellikle EPT teknolojisinde güç kaynağı ve elektrolitik çözelti en önemli iki bileşendir. En uygun güç kaynağı kullanılan malzemeye göre iyi sonuç almanın temel şartıdır. Yüzeyin ergimesine izin vermeden deformasyona uğratmadan optimum şartları belirlemek gerekmektedir. Kaplama sektöründe faaliyet gösteren pek çok kaplama üretim tesisinde bu ve benzeri sorunlar yaşanmakta, yükselen üretim maliyetleri nedeniyle rekabet gücünü giderek kaybetmektedir. Buna karşın sorunlara doğru teşhis konulmadığı için çözülememekte ve giderek daha büyük problemlerle karşılaşılmaktadır.

Bir kaplama tesisinin işlevini sürdürüyor olması, gerçekten olması gereken şekilde çalıştığı anlamına gelmez. Bu konuda bir sonuca varabilmek için proses bilinçli bir bakışla yakından incelenmelidir. Eğer her şey normal gözüktüğü halde;

- a. Kaplama-modifikasyon kalitesinde sorun varsa,
- b. Kaplama-modifikasyon kalınlığında ya da derinliğinde değişkenlik gösteriyorsa,
- c. Elektrolit sıcaklığı gereğinden fazla ısınıyorsa,
- d. Çözelti kısa sürede kirleniyorsa,
- e. Proses süresi uzunsa,
- f. Güç kaynakları sıkça arızalanıyorsa,
- g. Elektrik sarfiyatı fazlaysa,
- h. Üretim maliyetiniz giderek artıyorsa kaplama tesisinizde sorun vardır demektir.

Bu sorunlar çözülmezse yöntem içinden çıkılmaz bir hal alacaktır.

Bu nedenledir ki sanayide karşılaşılan sorunlar göz ardı edilmeden elektrolitik plazma teknolojisi için de tek tek ele alınmıştır. Uygun yöntem ve değişikliklerle çözüme ulaşılmış, çevre dostu ve son olarak ise otomasyona uygun hale getirilmesi hedeflenmiştir [56].

### **3.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey Sertleştirme İşlemleri**

Küresel grafitli dökme demirlerin yüzey sertleştirme işlemleri, alev, indüksiyon veya lazerle sertleştirme, nitrürleme, alüminyumlama ve borlamadan meydana gelmektedir [25,26]. Döküm matris mikroyapısı genellikle ferritik veya perlitik yada her iki matris yapısında içerebilmektedir. Bu durum alaşım elementlerine bağlı olarak farklılık gösterebilir.

Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan ısıl işlemlerin ve yüzey işlemlerinin birçok nedeni bulunmaktadır. Bunlar;

- a. Döküm sonrası gerilim giderme işlemleri,
- b. Tavlama, süneklik ve tokluğu iyileştirmek,
- c. Normalizasyon,
- d. Sertliği arttırmak ya da mukavemeti iyileştirmek,
- e. Sertleştirme ve temperleme,

- f. Östempereleme, yüksek mukavemetli mikroyapı, iyi bir tokluk sağlama ve aşınma direncini iyileştirmek amacı ile uygulanırken,
- g. Yüzey sertleştirme, indüksiyon, alev, lazer vs., bölgesel yüzey sertliği ve aşınma direncini iyileştirmek amacı ile uygulanmaktadır.

Küresel grafitli dökme demirlere alev, indüksiyon ve lazer yüzey işlemleri gibi işlemleri uygulamak mümkündür. Küresel grafitli dökme demirlerde yüzey sertleştirme işlemleri, kısa ısıtma çevrimlerinden dolayı bu prosesler, perlitik matrisli küresel grafitli dökme demirler için daha çok tercih edilir. Ferritik matris içermeyen dökme demirler, tamamen sertleştirebilmek için, alev ve indüksiyon işlemleri için çok kısa süreli östempereleme sıcaklığına gerek duyarlar. %50 ferritik matrisli mikroyapılar, yüzey sertleştirme işlemlerinde beklenen sonucu sağlarken, ferritik matris yüzdesinin arttığı dökme demirlerde su vererek yapılan sertleştirme işlemlerinde östempereleme (870 °C) süresi artırılması gerekmektedir. Perlitik matris mikroyapıları yüzey sertleştirme işlemleri için daha uygun olup, yüzey sertleştirme işlemlerine daha hızlı yanıt vermektedir. Uygun teknoloji ve sıcaklığın 845 ile 900 °C arasında kontrolü ile küresel grafitli dökme demirler için yüzey sertlik oranı ve farklı matris yapıları elde edilmektedir. Uygulanan yöntemler ve sertlik değerleri aşağıda verilmiştir;

- a. Ferritik matrisli KGDD için, alev yada indüksiyon yüzey sertleştirme işlemi ardından tavllanmış ve suda su verilmiş ; 35 - 45 HRC
- b. % 80 ferritik matris ağırlıklı KGDD için, ısıtma sonrası gerilim giderme, havada soğutma; 40 - 45 HRC
- c. % 80 ferritik matris ağırlıklı KGDD için, ısıtma sonrası gerilim giderme, suda su verme, 50- 55 HRC
- d. Perlitik matrisli KGDD için, ısıtma sonrası gerilim giderme, suda su verme, 58 - 62 HRC elde edilmektedir.

Isıtma süresi ve sıcaklık, çözünmüş karbon oranı, profil büyüklüğü ve su verme işlemleri son yüzey sertlik değerini belirlemede etkindir. Alev ve indüksiyon sertleştirme işlemleri genellikle ağır iş parçalarında, kâğıt fabrikalarında volan

dişliler, otomotiv sektöründe krank milleri, soğuk işleme üretilen titanyum folyolar v.s. gibi malzemelere uygulanmaktadır [31].

### 3.5.1. Alev, indüksiyon veya lazerle yüzey sertleştirme

Bu yöntemlerde çok kısa sürelerde ısıtma sağlanabilmesi sebebiyle, GGG-70 ve GGG-80 tipi perlitik küresel grafitli dökme demirler tercih edilmektedir. Ferrit içermeyen küresel grafitli dökme demirler, kolayca su alabilme kabiliyetine sahip olduklarından dolayı tamamıyla sertleşmemesi için östenitleme sıcaklığında çok kısa süre tutulurlar. Döküm haliyle ferritik matrise sahip olan küresel grafitli dökme demirlerin yüzeyini homojen olarak östenitik yapıya dönüştürmek için uzun süreler gerekmektedir. Bu sebeple, yüzey sertleştirme işleminde daha çok perlitik küresel grafitli dökme demirler tercih edilmektedir. Yüzeyde oluşturulan sert tabakanın derinliği çeliklerden farklı olarak, sertleşebilirlik kavramından çok, ısı geçişine bağlıdır. En az % 50 perlit, indüksiyonla yüzey sertleştirmede, ısıtma 3,5 s devir ve 955 - 980 ° C (1750–1800 ° F) sertleştirme sıcaklıkları ile tatmin edici bir sertlik değeri için gerekli olarak kabul edilir. Perlit oranı azaldıkça daha yüksek işlem sıcaklıklarına çıkılması gerekmektedir. Fakat bu da kalıntı östenit riskini ve mikroyapıda ledeburit oluşmasına ve yüzeyin deforme olmasına yol açmaktadır. % 50 ve üzeri perlit matrislerde, sertleştirme sıcaklığı 900 ile 925 ° C (1650 to 1700 °F) arasında olabilir. Yüzeyi sertleştirilmiş alaşımlı küresel grafitli dökme demirler, artan sertleşebilirlik kabiliyetiyle birlikte artan kalıntı östenit mevcudiyeti sebebiyle daha düşük sertlik değerine sahip yüzeyler sergilemektedir. Bu problemin çözülmesi için, 0°C 'nin altındaki soğutma işlemleri uygulanmaktadır. Pratik olarak elde edilebilecek maksimum sertlik 60 HRC 'dir [31].

### 3.5.2. Nitrüleme

Küresel grafitli dökme demirlerin nitrüleme işlemi parçalanmış amonyak (NH<sub>3</sub>) içerisinde 2-3 saat tutulması ile gerçekleştirilmektedir. Bu işlem sonucunda, 60 HRC sertlik elde edilebilmektedir. İşlem sonrasında, küresel grafitli dökme demirlerin 10<sup>8</sup> çevrim sayısındaki yorulma dayanımları 172-210 N/mm<sup>2</sup>'den, 276-289 N/mm<sup>2</sup> 'ye ulaşmaktadır.



Yapılan nitrüleme çalışmalarında, bazı arzu edilmeyen sonuçlarla karşılaşmaktadır. Bunlardan çoğu, kimyasal bileşimle ilgilidir. Silisyum, azotun difüzyon hızını yavaşlattığından, nitrüleme ile yüzeyi sertleştirilecek olan küresel grafitli dökme demirlerin içerdiği silisyum miktarının düşük tutulması önerilmektedir. Aynı şekilde titanyumun da düşük konsantrasyonda olması istenmektedir. Bunun sebebi, titanyumun azotla bileşik yaparak yüzey sertleştirmeyi engellemesidir. Krom, azotu birarada toplayıp biriktirdiğinden ve bu sebeple, dökümün sertlik ve sünekliğini düşürdüğünden dolayı alaşım elementi olarak tercih edilmemektedir. İşlem, 550-600°C'de gerçekleştirilmektedir. 0.1 mm sertlik derinliğinde, 1100 HV'lik sertlik değeri elde edilmektedir. Yüzey sertliğini artırmak için %0.5-1.0 arasında alüminyum, nikel ve molibdenin alaşım elementi olarak ilave edilmesinin faydalı sonuçlar verdiği görülmektedir [19].

### **3.4.3. Alüminyumlama**

Alüminyumlama işlemi, küresel grafitli dökme demirlerin 700 °C'de 20 dakika süre ile sıvı alüminyum banyosu içerisinde tutulmasıyla gerçekleşmektedir. Yüzeyi alüminyumlanmış küresel grafitli dökme demirlerin oksidasyona karşı dirençleri çok iyidir [19].

### **3.4.4. Borlama**

Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması, 750 – 1000 °C arasında katı, sıvı veya gaz ortamında 1–10 saat süre ile gerçekleştirilmektedir. Bor kaplanmış dökme demirler, çeliklere göre daha düşük sürtünme katsayısı değerine sahiptirler. Yüzey sertlikleri ise oluşan FeB ve Fe<sub>2</sub>B fazları sebebiyle 1300–2000 kg/mm<sup>2</sup> değerine ulaşabilmektedirler. Hareketli makine parçalarında, kollarda ve birçok kalıpta, yüzeyi borlanmış küresel grafitli dökme demirler kullanılmaktadır [19].

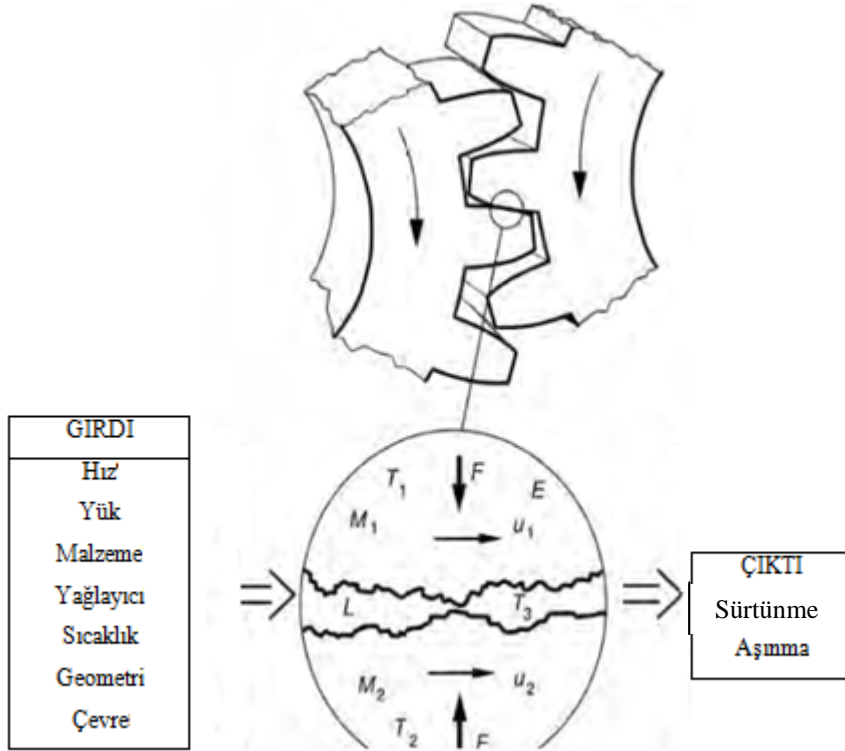
## BÖLÜM 4. AŞINMA

### 4.1. Sürtünme Teorisi

Sürtünme, temas halindeki yüzeylerin ve birbiri üzerinde hareket eden yada, hareket ihtimaline karşı gösterilen direnç olarak tanımlanır [57-58]. Sürtünme hareketi ile birbirine relatif çalışan iki malzeme arasında kinetik enerjinin sürekli olarak düşüş göstermektedir. Birçok farklı mekanizma sonucunda tribofiziksel ve tribokimyasal prosesler oluşabilir. Şekil 4.1 de bu mekanizmalar ifade edilmiştir. Aşınma kavramı ise katı cisimlerin sürtünme yüzeylerinde çeşitli etkenlerle sürekli malzeme kayıplarının ortaya çıkmasıdır. Aşınmayı etkileyen çeşitli faktörler farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bu faktörler, aşağıda dört grup halinde verilmektedir [59].

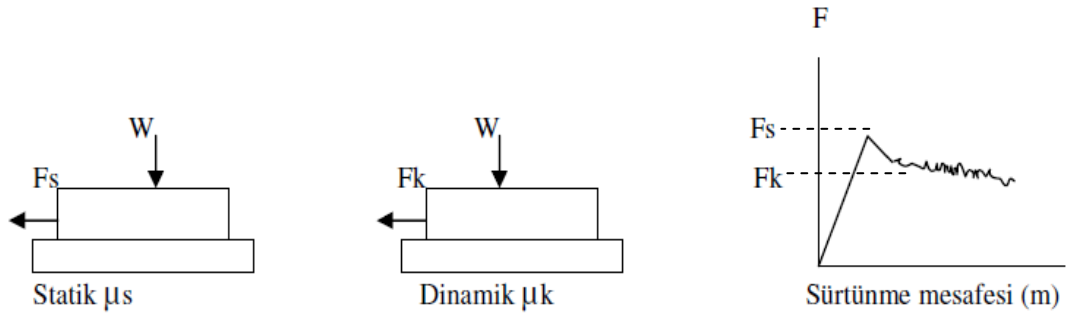
- a. Ana malzemeye bağlı faktörler
  - i) Malzemenin kristal yapısı
  - ii) Malzemenin sertliği
  - iii) Elastisite modülü
  - iv) Deformasyon davranışı
  - v) Yüzey pürüzlülüğü
  - vi) Malzemenin boyutu
- b. Karşı malzemeye bağlı faktörler ve aşındırıcı etkisi
- c. Ortamın etkisi
  - i) Sıcaklık
  - ii) Nem
  - iii) Atmosfer

- d. Servis koşulları
- i) Basınç
  - ii) Hız
  - iii) Kayma yolu



Şekil 4.1. Aşınmayı etkileyen faktörlerin şematiks gösterimi [59]

Malzemelerin biriri üzerinde kaymasını sağlamak için uygulanan kuvvete dik yönde olacak şekilde bir sürtünme kuvveti oluşur. Kaymayı başlatan kuvvet ( $F$ ) ile temas yüzeyine etki eden kuvvet ( $W$ ) arasında eşitlik 4.1’de verilen bağıntı mevcuttur. 1699 yılında Amontons, cisimleri rijit kabul ederek, sürtünmenin izahını, “kayma esnasında parçaları, yüzey pürüzleri yüksekliğince kaldırmak için gerekli enerji” şeklinde yapmış ve bütün cisimler için sürtünme katsayısını 1/3 olarak vermiştir. Daha sonraki senelerde Coulomb, sürtünme katsayısının hızdan bağımsız olduğunu gözlemlemiş ve statik sürtünme katsayısını kaymaya başlama kuvveti ile, kinetik sürtünme katsayısını da hareketi devam ettirme kuvveti ile tarif etmiştir. Bu teorilere göre [60-62];



Şekil 4.2. Statik ve dinamik sürtünme katsayıları [62]

Bu değerlendirmeler sonucunda aşağıdaki matematiksel ifade çıkarılmıştır:

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

$\mu$  = sürtünme katsayısı

$F$  = Sürtünme kuvveti

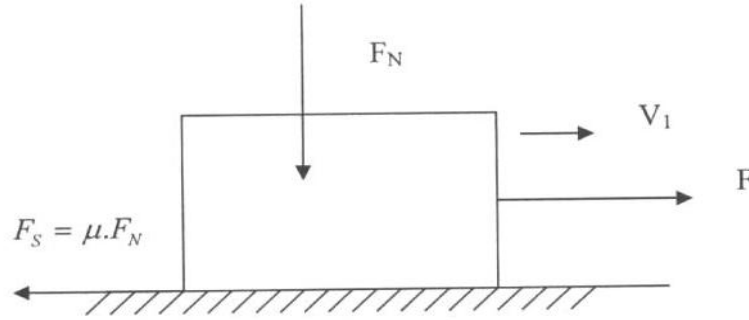
$W$  = normal kuvvet

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.

#### 4.1.1. Kuru sürtünme

Şekil 4.3’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  $\mu$  sürtünme katsayısıdır. Genel ifadeye göre sürtünme izafi hareket yapan veya hareket yapabilme olanağına sahip yüzeylerde oluşur. Şekil 4.3’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.

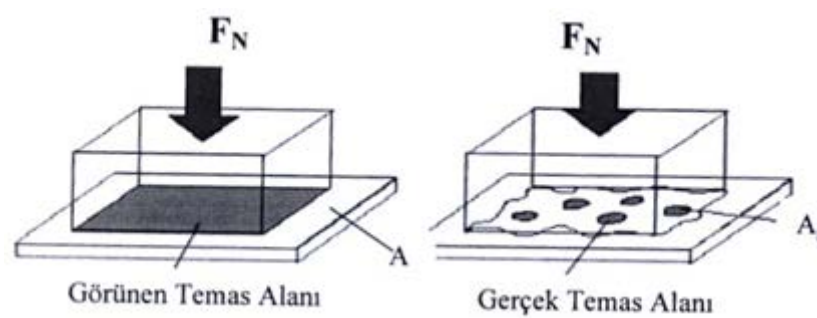


Şekil 4.3. Kuru sürtünme modeli [63]

Coulomb- Amontons kanunu olarak tanınan bağıntıya göre sürtünme katsayısı;

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

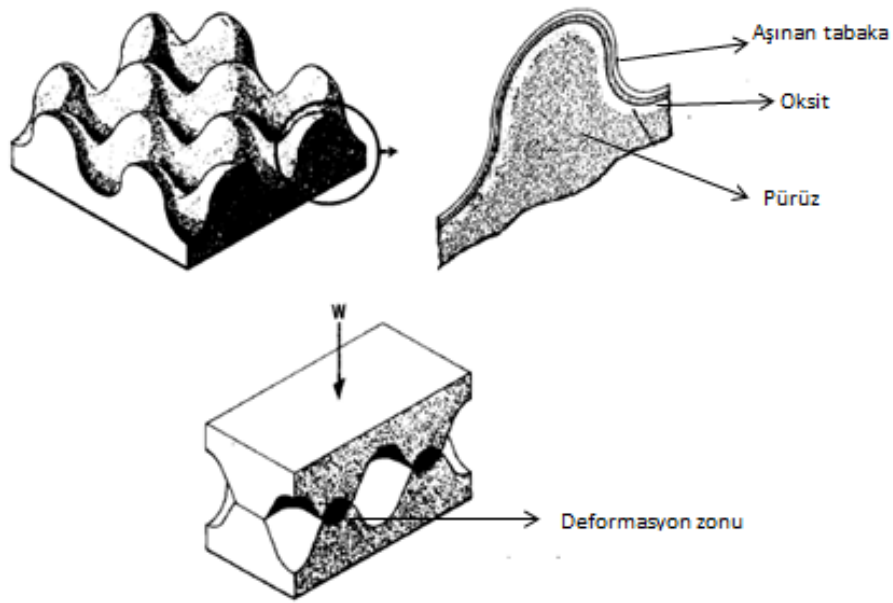
şeklinde ifade edilir. Sürtünme katsayısının en büyük değeri hareketin başlangıcındadır. Sürtünme olayları incelenirken temas yüzeylerinin pürüzlü oldukları ve tam temiz olmadıkları gibi hususlar göz önünde tutulmalıdır. Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de görüldüğü gibi yüzeyler birbiri ile pürüzlerinin tepelerinde temas etmektedirler. Bu küçük temas alanlarının toplamı  $A$  gerçek temas alanını oluşturmaktadır. Bu alan temas yüzeyinin sınırlarını tayin eden  $A_g$  geometrik alandan daha küçüktür [63].



Şekil 4.4. Sürtünen yüzeylerin görünen ve gerçek temas alanlarının temsili sunumu [63]

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

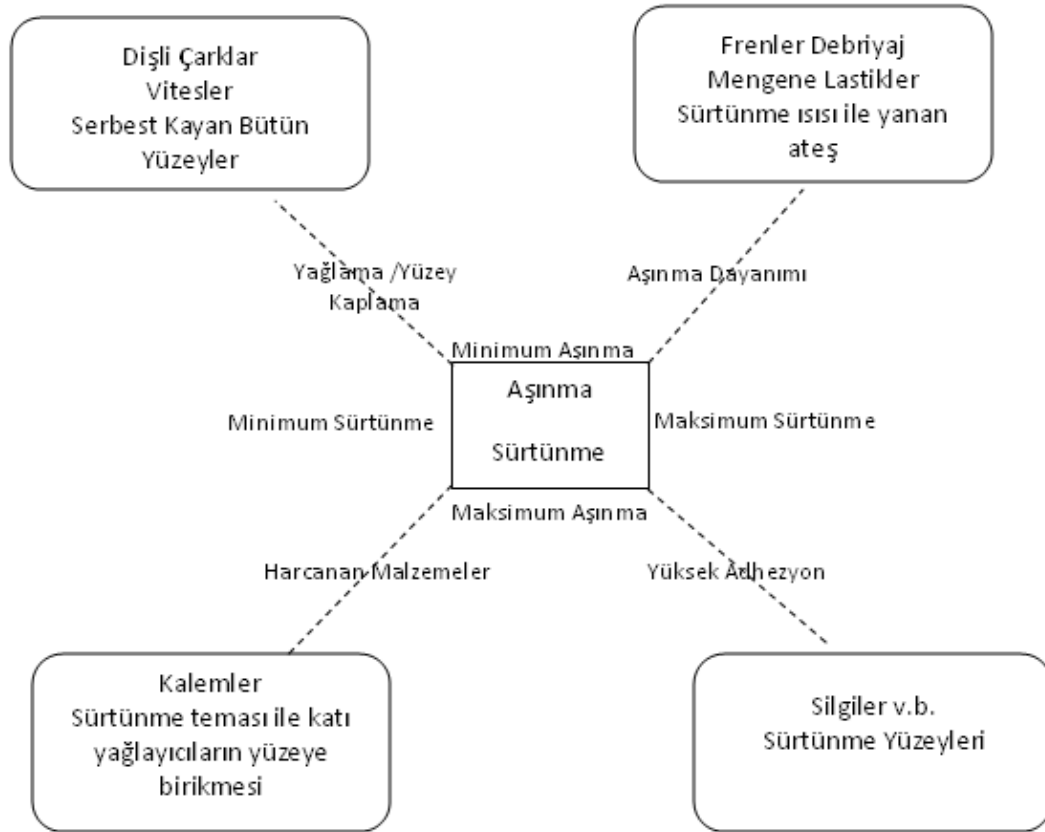


Şekil 4.5. Bir malzemenin yüzey topografyasının temsili gösterimi [63]

Sürtünmenin etkileri belirlendiğinden veya fonksiyonları kontrol edildiğinden beri tasarım ve üretim sürecinde, malzemenin sürtünme özellikleri dikkate alınarak, cihazın ömrü ve verimliliği belirlenmektedir [63].

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 4.6).



Şekil 4.6 Sürtünme ve aşınmanın istenen ya da istenmeyen özellikler olduğu ya da olmadığı bazı kullanım alanları [63]

#### 4.1.2. Sınır sürtünmesi

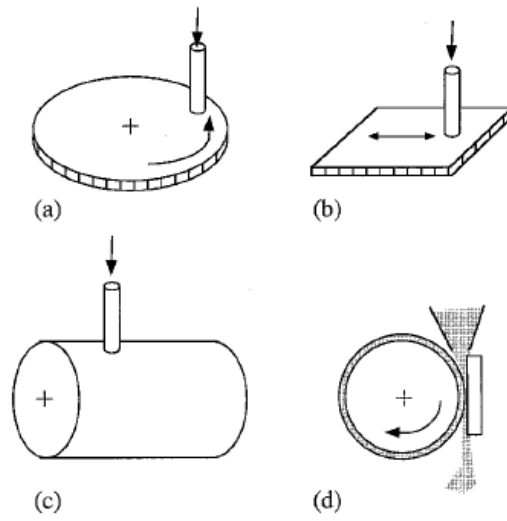
Yüzeyler arasında bulunan herhangi bir yağlayıcı maddeye rağmen sıvı sürtünmesi hali oluşturulmadığı durumda sınır sürtünmesi hali ortaya çıkar. Pratikte en çok rastlanan bu sürtünme halinde sürtünme katsayısı genel olarak 0.02 ile 0.1 arasında değişir.

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. Ucuz yağların oluşturduğu yağ tabakasının kopma mukavemetini büyütmek ve kayma mukavemetini azaltmak için yağlara katkı denilen bir takım ek maddeler konulur. Genellikle organik yağlardan oluşan katkı 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 adsorbsiyon tabakalarından oluşan fiziksel veya kimyasal reaksiyon sonucu meydana gelen tabakalarda oluşan kimyasal esasına dayanır [63].

#### **4.2. Aşınma Mekanizmaları**

Aşınma; bir malzemenin yüzeyinden katı, sıvı yada gaz bir başka malzemenin mekanik etkileşimi sonucu sürekli çok küçük parçaların kopması olarak tanımlanabilir [59-64]. 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 4.7) [65].



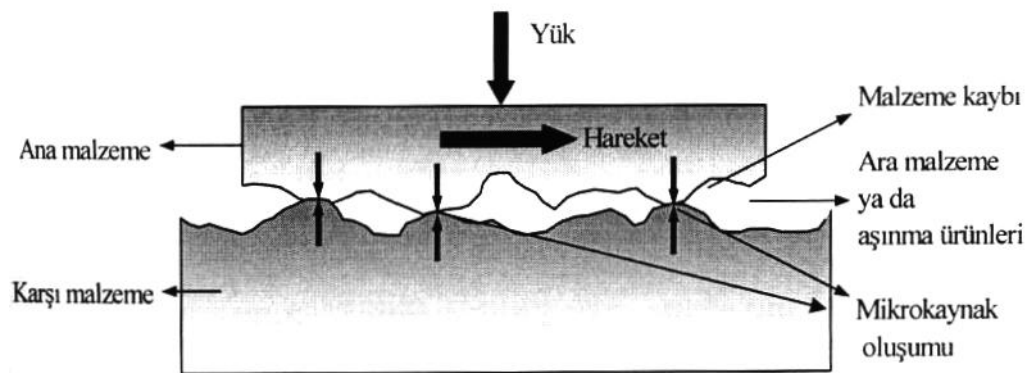


Şekil 4.7. Aşındırıcı deney yöntemlerinden birkaçının temsili gösterimi[61]

Bir aşınma sistemi daha öncede bahsedildiği gibi

- a) Aşınan malzeme
- b) Aşındırıcı malzeme
- c) Ara malzeme
- d) Yük
- e) Hareket

olarak beş ana unsurda incelenebilir. Bu sistemlerin tümü teknikte tribolojik sistemi meydana getirir ve Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Tribolojik sistemi meydana getiren unsurların şematik gösterimi ve mikro kaynak oluşum noktaları [66]

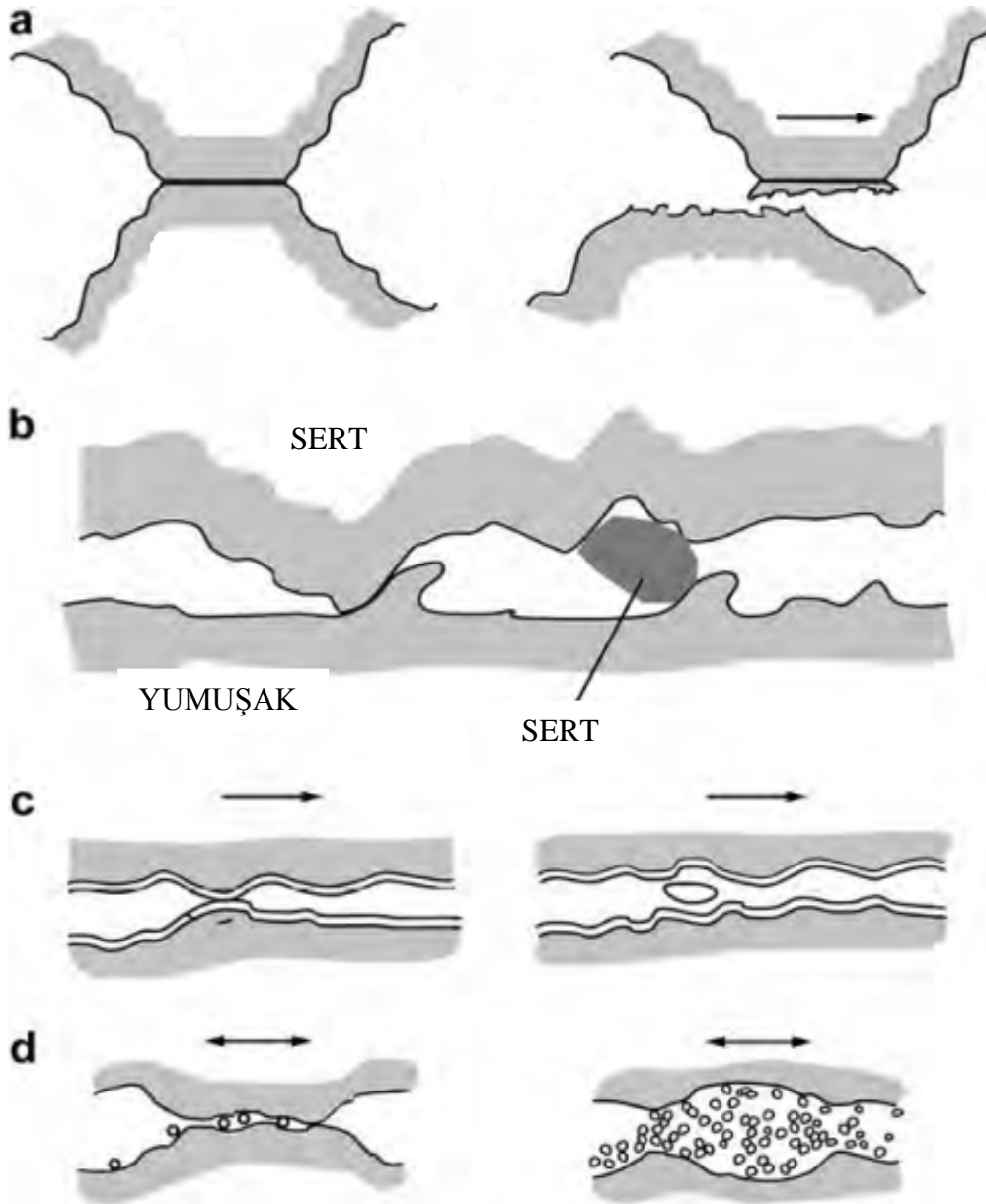
Aşınma;

- 1) Adhesiv aşınma,
- 2) Abrazif aşınma,
- 3) Yorulma aşınması ve
- 4) Koroziif aşınma olarak sınıflandırılmaktadır [62-64].

Katı yüzey boyunca, katı yüzeye karşı hareket eden sert partikül ya da sert yükseltelerin oluşturduğu aşınma türü abrazif aşınmadır. Aşınma genellikle temas eden yüzeyler arasındaki sert partiküllerin ya da diğerine göre sert yüzeylerin relatif hareketlerinden dolayı meydana gelen malzeme kaybını içeren katı yüzeyin hasarı olarak tanımlanır.

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

Havada baskın olan koroziif madde oksijen ise böyle bir ortamda metallerde meydana gelen tribokimyasal aşınma da oksidatif aşınma olarak adlandırılır. Yukarıda bahsedilen bu dört aşınmanın temsili gösterimi Şekil 4.9'da verilmektedir.



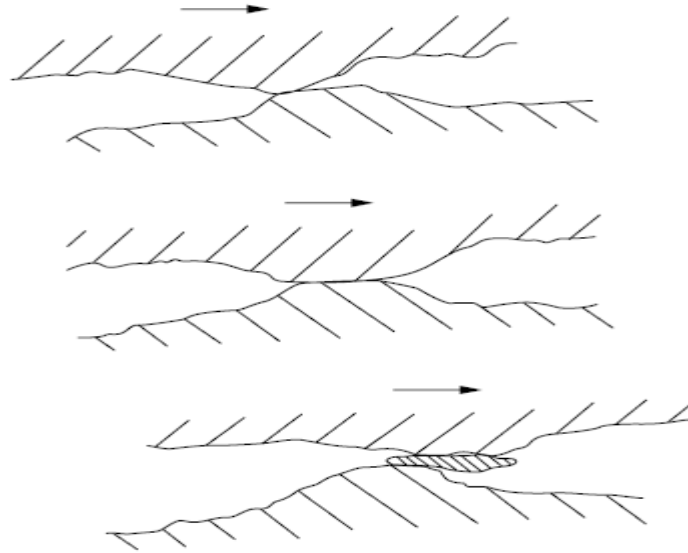
Şekil 4.9. Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi (a) adhezif (b) abrazif (c) yorulma (d) koroziif aşınma [59].

#### 4.2.1. Adhezif aşınma

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

Adhezif aşınmanın etkisini azaltmak için yapılan bazı uygulamaların faydalı olduğu görülmüştür. 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 da aşınma azaltılabilir. Ayrıca sertlikte artırılarak temas alanının azalması sağlanarak aşınma azaltılabilir. Adhesiv aşınmanın şematik görünümü Şekil 4.10'da verilmektedir.

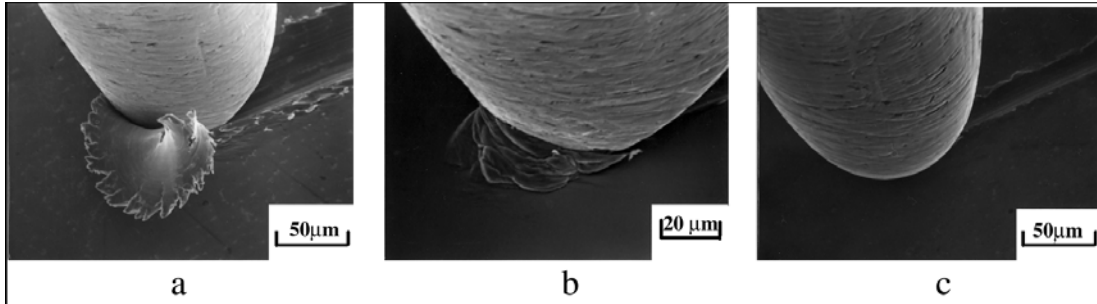


Şekil 4.10. Adhezif aşınma mekanizması sonucunda aşınma partiküllerinin oluşumunun şematik gösterimi [66]

#### 4.2.2. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbirleriyle temas halindeyken kayması sırasında meydana gelir. Yırtılma veya çizilme aşınması olarak da isimlendirilen abrazif aşınma, sistemde hızlı hasara neden olan önemli bir aşınma türüdür. Sert parçacıkların yumuşak metale batması abrazif aşınmaya neden olabilmektedir. Sert partiküller sisteme ya dışarıdan girmekte yada aşınma ürünleri olarak sistem tarafından üretilmektedir [62-66].

Abrazyon boyunca yüzeyden malzemenin nasıl uzaklaştığının açıklanması amacıyla birçok mekanizmanın olduğu ileri sürülmektedir. Bunlar genel olarak kırılma, yorulma ve ergimedir. Abrazif aşınmanın meydana gelmesindeki karışıklıktan dolayı sadece bir tane mekanizma tüm malzeme kaybından sorumlu tutulamaz. Şekil 4.11’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 [62,66].



Şekil 4.11. Abrazif aşınma mekanizmasının üç tipi olan a) Kesme, b) Pulluklama, c) Kızaklama aşınmalarının SEM görüntüleri [62]

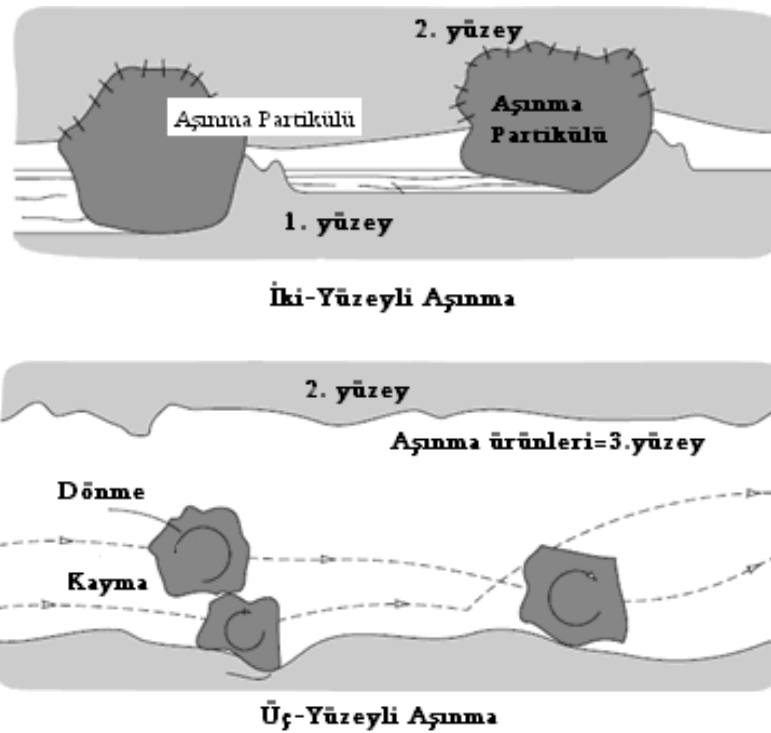
Kızaklama türü aşınma, temastaki iki yüzeyin sertliklerinin birbirinden farklı olduğu durumlarda meydana gelir. Diğerine göre daha sert olan malzeme yüzeyindeki tepecikler daha yumuşak olan yüzeyin içine girer ve eğer ki bir hareket söz konusu ise yüzeyde yiv oluşumuna sebep olurlar. Kızaklama oluşumunun iki ana sebebi kısaca yüzeylerdeki tepecikler 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, abrasif ucun önünde meydana gelir. Pulluklama mekanizmasında yiv önünde toplanan malzeme miktarı, kenarlara toplanan malzeme miktarından fazladır. Yine de pulluklama oluşumu abrasif 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 4.12 (a)ve (b)'de iki-yüzeyli ve üç-yüzeyli temas tipleri gösterilmektedir.



Şekil 4.12. a) İki-yüzeyli ve b) üç-yüzeyli abrazif aşınma tipleri [66]

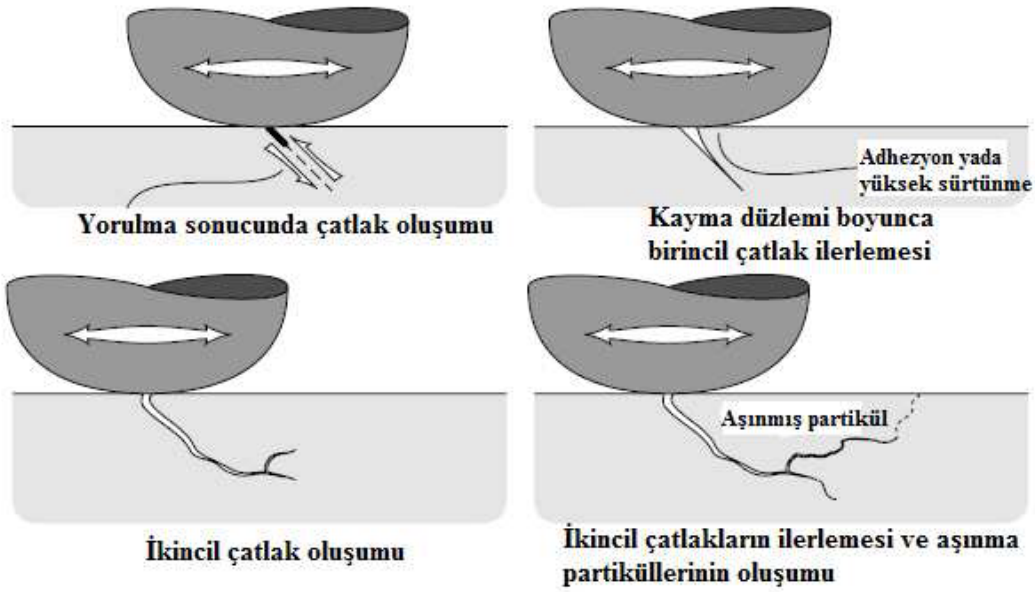
Erozyon aşınması ise, aşınma partiküllerinin ya da gaz, sıvı gibi akışkan bir ortamda bulunan aşındırıcı parçacıkların yüzeye serbestçe çarpması sonucu malzeme yüzeyinden parçaların kopmasıyla ortaya çıkmaktadır. Sıcaklık ve akış hızı arttıkça

aşınma hızlanır. Katı parçacıkların bağıl hareketleri katı yüzeye paralel olduğunda aşınma abrasif erozyon olarak adlandırılır. Katı parçacıkların bağıl hareketi katı yüzeye dik olduğundan ise aşınma çarpma (impact) erozyonu olarak adlandırılır. Eroziif 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 [66].

#### **4.2.3. 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 olaylarına 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 [66].



Şekil 4.13. Yüzey çatlaklarının oluşumu ve ilerleme sürecinin şematik gösterimi [66]

#### 4.2.4. 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 [62,66].

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 [62,66].

#### 4.3. 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, dekoratiflik 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 yapıya has fiziksel-kimyasal özelliklere sahip çeşitli zonlardan oluşmaktadır. Metal ve alaşımların oluşum proseslerinin 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 [64].

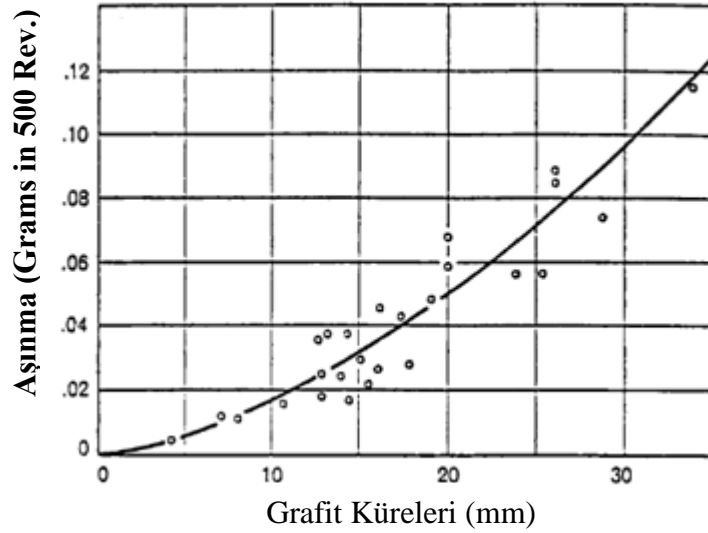
#### **4.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri**

KGDD malzemelerin aşınma davranışı tamamen mikroyapısına ve dolayısıyla mekanik özelliklere bağlı olarak değişim göstermektedir. Mikroyapıda bulunan östenit ve martenzit aşınma davranışını etkileyen en önemli fazlardır.

Şaşırtıcı olmayan bir şekilde, 19. yüzyıldan beri KGDD bir çok mühendislik uygulamaları için popüler bir malzeme haline gelmiştir. KGDD ucuz olması ve daha önce Bölüm 2’de bahsedilen birçok özelliğinden dolayı aşınmaya dayanıklı malzeme olarak tercih edilmiştir. Dökme demir, otomobil fren diskleri veya yatak malzemesi, krank mili olarak kuru aşınma durumlarında uygulama alanı bulur. KGDD motor gömleği olarak, yağlanmış piston hareketi etkisi altında başarılı bir uygulama alanı bulmuştur [67].

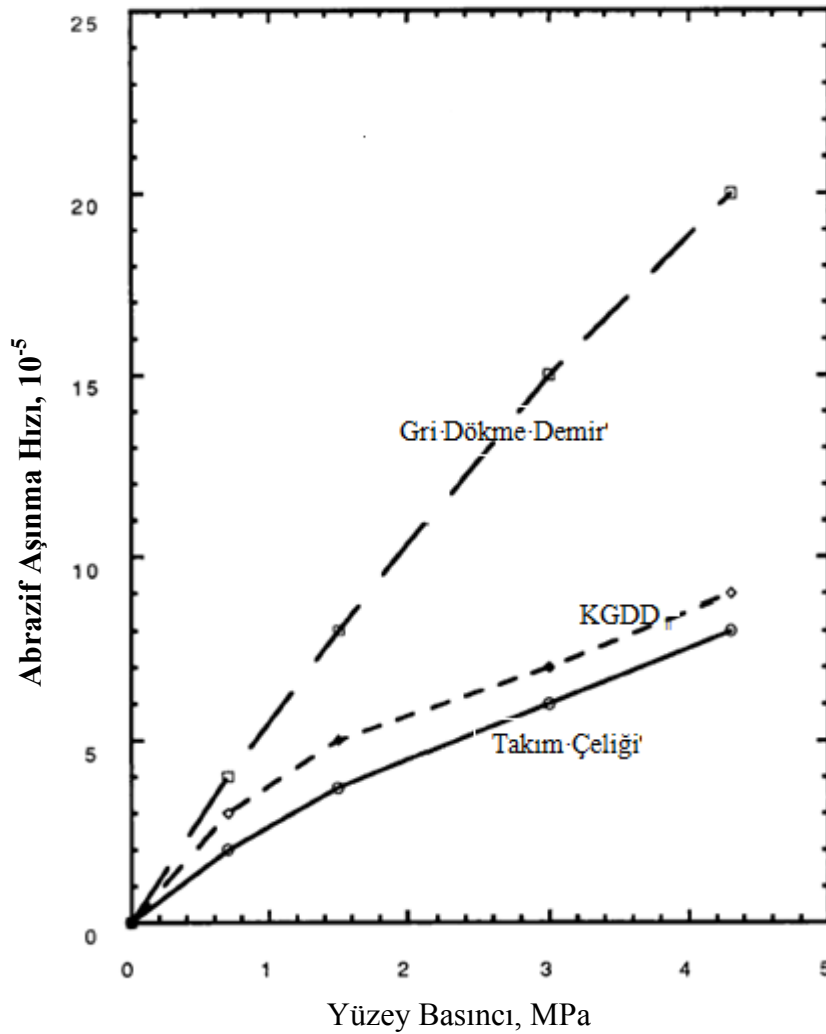
Grafitin Rolü; grafit rolü komplekstir, fakat kuru aşınma ortamlarında en büyük etkisi yağlayıcı görevi görmesidir. Grafit fazının ortalama boyutu ve dağılımı aşınma dayanımında etkilidir. Grafit fazı sürtünmeden kaynaklanan yapışmayı, adhezif temas eğilimini engeller. Grafit sıvı hidrokarbon yağlar tutarak kuru şartlar altında veya geçici yağlayıcı kaybında yüzeyde gerekli olan yağlayıcılığı sağlamaktadır. Grafit bazı sürtünme uygulamaları için zararlı olabilir. Yüksek temas gerilmeleri altında, lamel grafitler aşınma sırasında metal flaksları koparabilir. Yüzey

deformasyonu ağır yük ve yüksek sürtünme altında meydana geliyorsa, yüzeye yakın bölgeden kopan metal parçaları grafit etrafında derin yüzey çatlaklarına ve deformasyona yol açabilir. Şayet bu proses oluşursa, yüzey sertleştirme işlemleri ile giderilebilir. Grafit kürelerinin aşınmaya olan etkisi Şekil 4.14’de verilmiştir. Perlitik matris ve ferrit yüzdesi az olması aşınma direncini optimize etmek için arzu edilir.



Şekil 4.14. Grafit küre boyutunun aşınmaya etkisi

Grafit fazı, yüksek temas gerilimini sınırlamasına rağmen dökme demirlere uygulanan ısıtma işlemi martenzitik yapıyı elde ederek abrazif aşınma direncini iyileştirilmektedir. Yüksek gerilim altında KGDD uygulanan ısıtma işlemi sonrası aşınma dayanımı daha iyi artış göstermektedir. Şekil 4.15’de iki tip dökme demir ve takım çeliğine kıyasla yüksek gerilim altında abrazif dayanımındaki değişim grafiği verilmiştir [21,68]



Şekil 4.15. KGDD'in yüksek gerilim altında abrazyon dayanımı [68]

Abboud ve arkadaşları [45] tarafından yapılan çalışmada, laserle yüzey sertleştirme işleminin otomotiv sektöründe uygulanması için çalışmalar yapılmıştır. Çalışmada modifikasyon tabakasının karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir ve yüzey sertliğindeki değişim açıklanmıştır. Mikroyapıda oluşan martenzit fazının sertliğini arttırdığı ve kalıntı östenitin de düşürdüğü sonucuna varılmıştır.

Çetin ve arkadaşları [69] tarafından yapılan çalışmada, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin aşınma davranışı incelenmiştir. Farklı süre ve sıcaklıklarda östenitlenmiş ve östemperleme yapılmış numunelere 5 farklı boyutta abrazyon aşındırıcı ile aşınma testleri yapılmış olup östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir malzemenin; yüksek dayanımla birlikte iyi süneklik, iyi aşınma direnci ve

yüksek yorulma direnci ve kırılma tokluğunun mükemmel kombinasyonu gibi benzersiz özelliklere sahip olduğu belirlenmiştir [69-72].

Soriano ve arkadaşları [73] tarafından yapılan çalışmada, laserle küresel grafitli dökme demire yüzey sertleştirme işlemi uygulanmıştır. Birçok benzer çalışmada olduğu gibi sertlik, mikroyapı ve kalıntı gerilme testleri yapılmış, işlem parametrelerine bağlı olarak modifikasyon tabakasının 0.6-1 mm'ye kadar değiştiği ve artan sertlikle birlikte aşınma dirncinin arttığından bahsedilmiştir [45,73,74].

Druschitz ve arkadaşları [75] tarafından yapılan çalışmada ise, küresel grafitli dökme demirden üretilmiş kam milinin indüksiyonla sertleştirme işlemi yapılmış, modifikasyon tabakasının karakterizasyonu gerçekleştirilmiş ve yüzey sertliğindeki değişim açıklanmıştır.

## **BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **5.1. Giriş**

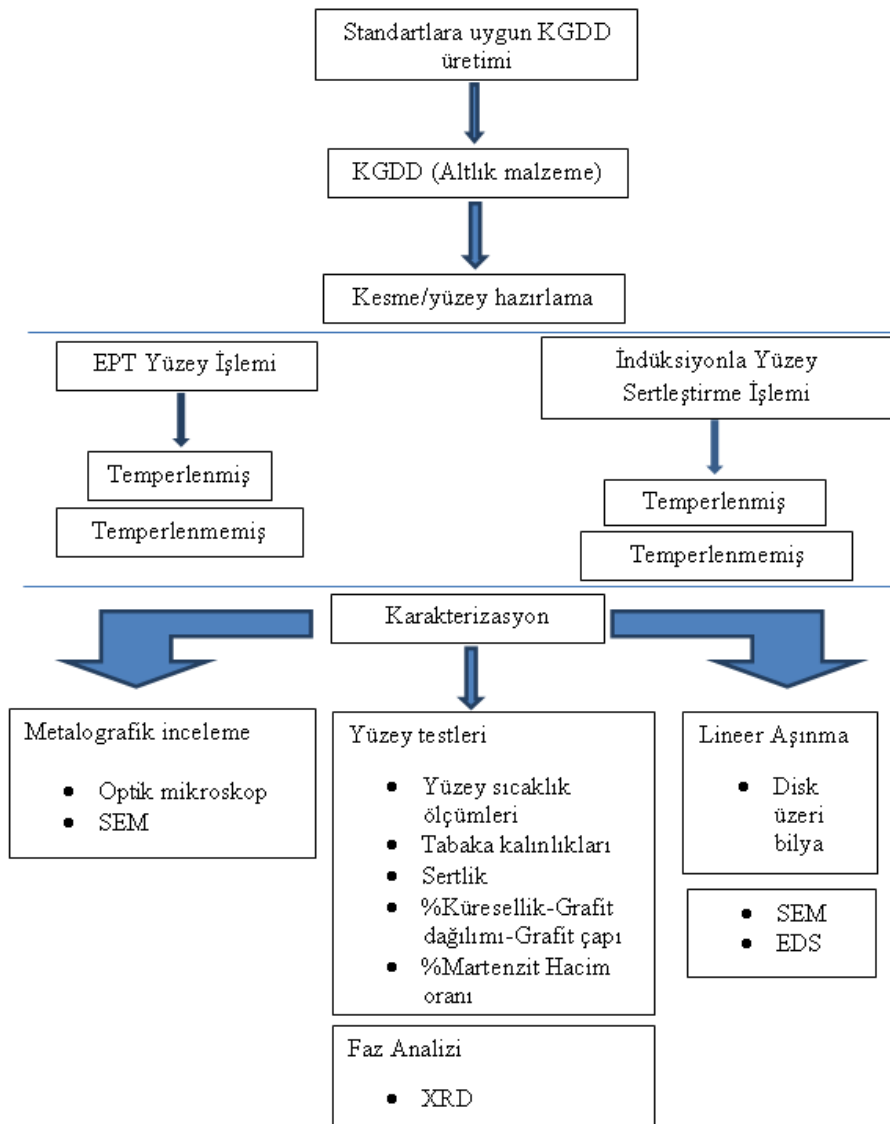
Teknolojinin gelişmesine paralel olarak artan yüzey işlemleri ve kaplama tesislerinin, son zamanlarda malzeme yüzeylerini geliştirme üzerine çok çalışılan konuların başında gelmektedir.

Bu çalışmada, geniş bir kullanım alanına sahip küresel grafitli dökme demir (KGDD) yüzeylerinin elektrolitik plazma teknolojisi ile modifiye edilerek yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Üretilen numunelerin günümüzde yaygın olarak kullanılan indüksiyonla sertleştirme işlemi ile kıyaslamaları yapılmıştır. Yaygın olarak kullanılan KGDD malzemelerin yüzey özelliklerini uzun, zahmetli ayrıca maliyetli olan ısıtma işlemi yapmadan geliştirebilmek hedef olarak seçilmiştir. Literatürde ısıtma işlemi ve geleneksel yüzey sertleştirme işlemleri ile sertleştirilmiş pek çok çalışma mevcuttur [9,11,45,76-80]. Birbirinden farklı pek çok yöntem kullanılmıştır. Diğer yöntemlere göre hem zaman bakımından, hem ekonomik açıdan hem de mekanik özelliklerin üstünlüğü bakımından avantaj sağlayacağı düşünülen elektrolitik plazma teknolojisi bu çalışmada yeni bir yöntem olarak seçilmiştir. Elektrolitik plazma teknolojisinde (EPT) mekanik özelliklerin gelişimini çok kısa sürede ve düşük maliyetle sağlamak başlıca amaçtır.

Bu amaçla EPT ve indüksiyonla sertleştirme yöntemleri ile üretilen numunelerin optik ve SEM mikroyapı görüntüleri, tabaka kalınlığı, yüzey özellikleri (sıcaklık, grafit dağılımı, grafit çapı, % küresellik, % martenzit hacim oranı), faz analizi, sertlik ölçümleri ve aşınma testleri gerçekleştirilmiştir. Modifiye edilen yüzey özellikleri hem EPT işlemi sonrası temperlenmiş hem de indüksiyonla sertleştirme işlemi sonrası temperlenmiş numuneler ile kıyaslanmıştır.

## 5.2. Çalışma Programı

Deneysel çalışmalarda verilen işlem basamakları Şekil 5.1’de verilmiştir. Çalışmaların ilk aşamasında yüzey özellikleri EPT yöntemi ile geliştirilecek olan KGDD malzemelerin üretimi yer almaktadır. Daha sonra malzemelerin indüksiyonla sertleştirme ve EPT işlemleri için hazırlanması ve işlemlerin uygulanması gerçekleştirilmiştir. Karakterizasyon işlemleri sırasında, mikroyapı incelemeleri, yüzey testleri, faz analizleri, lineer aşınma testleri ve testler sonrasında analizler gerçekleştirilmiştir.

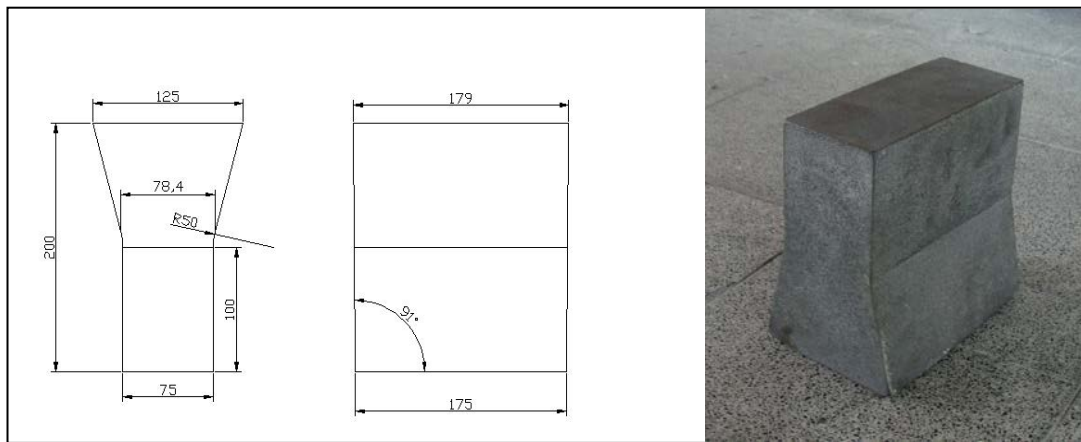


Şekil 5.1. Çalışma programı

### 5.3 Deneylerde Kullanılan Malzemeler

KGDD malzemeler otomobil, uçak ve demiryolu sanayiisinde, 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 geniş oranda kullanılmaktadır [1,26,80-82].

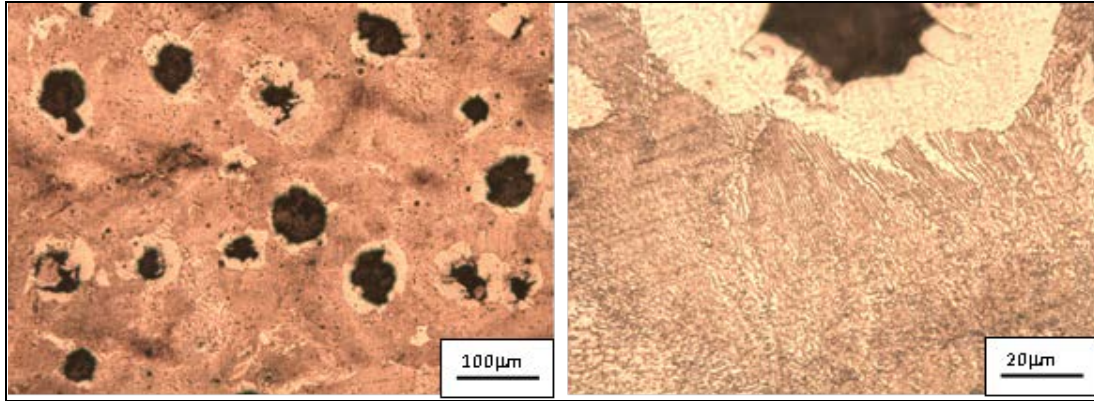
Bu çalışmada KGDD malzemeler Şekil 5.2 'te de şematik gösterimi verildiği üzere standartlara uygun olarak 75x179x200 mm boyutlarında Y-bloklar şeklinde üretilmiştir. Deneylerde kullanılan KGDD malzemelerin kimyasal bileşimi spektral analiz cihazı ile belirlenmiş olup Tablo 5.1 de verilmektedir. KGDD numuneler CNC tezgâhlarında 40 x 40 ve 11 mm boyutlarında kesilerek yüzeyleri mekanik olarak parlatılmıştır. Parlatma işleminde 60, 120, 240, 400 ve 600 gridlik zımparalar kullanılmıştır. Yüzeyler zımparalama işleminin ardından aseton ile temizlenerek kurutulmak suretiyle yüzey işlemleri için hazır hale getirilmiştir. Çalışmalarda kullanılan KGDD numunenin mikroyapısı Şekil 5.3'de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi mikroyapı grafit kürelerden ve etrafında perlitik matris yapıdan oluşmaktadır. Literatürdekine benzer klasik mikroyapı görüntüsü elde edilmiştir [80,82].



Şekil 5.2. Y blok dökümün şematiksel gösterimi

Tablo 5.1. Küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi

Malzeme	Alaşım elementi (% ağırlıkça)							
	C	Si	Mn	Cu	Mg	Cr	P	S
KGDD	3,22	2,51	0,104	0.768	0.0411	0.0444	0.060	0.011



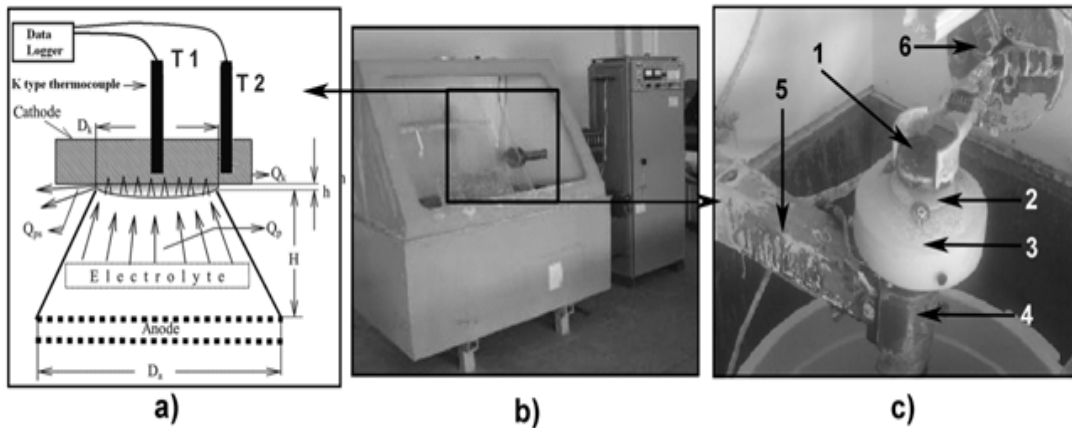
Şekil 5.3. Küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı

## 5.4. Yüzey İşlemleri

### 5.4.1. EPT işlemi

Metalografik olarak hazırlanan KGDD numunelerin EPT yöntemi ile modifikasyon işlemi Şekil 5.4'de verilen cihazda gerçekleştirilmiştir. EPT işlemleri %12 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ve %88 sudan oluşan bir çözelti içerisinde elektrik deşarjı ile malzeme yüzey özellikleri geliştirilmektedir. Su esaslı elektrolite yüksek voltaj uygulanarak katot yüzeyinde (çalışma parçası) plazma katmanı oluşturmakta ve yine oluşan bu plazma katmanının su esaslı elektrolitle ani soğutulması ile katot iş parçası yüzeyinde sert modifikasyon tabakası elde edilmektedir. Yüzey işlemi belirlenen süre aralıklarında yüzeyin ısıtılması (yüksek voltaj süreci) ve soğutulması (düşük voltaj süreci) döngüsüne tabi tutulmakta ve bu işlem döngüsüne ise termal çevrim adı verilmektedir.





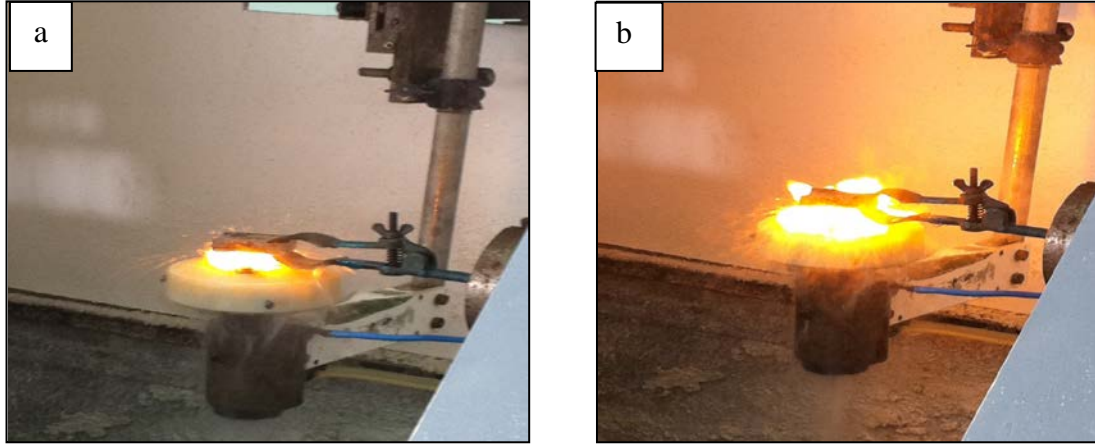
Şekil 5.4. Elektrolitik plazma teknolojisi cihazının şematik görünümü ve fotoğrafları (1. İş parçası, 2. Seramik bilezik, 3. Tabanca, 4. Paslanmaz çelik anot, 5. Anot tutucu, 6. Numune tutucu)

EPT ile modifiye edilen numunelerin işlem sırasında yüzeyde oluşan plazmanın görüntüsü Şekil 5.5 'de verilmiştir. Şekil 5.5 (a) düşük voltaj (su verme/pause) uygulamasında oluşan plazmayı Şekil 5.5 (b) yüksek voltaj (ısıtma/impulse) uygulamasında oluşan plazmanın fotoğrafını göstermektedir. EPT işlemleri %12  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve %88 sudan oluşan bir çözelti içerisinde yüksek voltaj (310V) ve düşük voltaj (250V) değerlerinde farklı süre ve termal çevrimlerde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca KGDD numunelerin yüzeyini indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış olup bu işlemde bir sonraki bölümde bahsedilecektir. EPT ve indüksiyonla sertleştirme işlemleri sonrası temperleme işlemi uygulanmıştır. Temperleme işlemleri  $400^\circ\text{C}$ 'de 45 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. EPT, indüksiyonla yüzey sertleştirme ve modifikasyon sonrası temperleme işlem parametreleri ve numune kodları Tablo 5,2'de verilmiştir.

#### 5.4.2. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi

Metalografik olarak hazırlanan KGDD numunelerin indüksiyonla sertleştirme işlemi için, 30 Kw güç, 300 kHz frekans,  $850\text{--}920^\circ\text{C}$  sıcaklık aralığı olan "inductoneat" marka indüksiyonla sertleştirme cihazı kullanılmıştır. İndüksiyonla sertleştirme işlemi için kullanılan cihaz ve bir örnek uygulaması Şekil 5.6'da verilmektedir. Bu çalışmada, indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi için seçilen işlem parametreleri

Tablo 5.2’de verilmiştir. Su verme işleminde soğutma ortamı olarak bor yağı ve su karışımı kullanılmıştır.



Şekil.5.5. Elektrolitik Plazma Teknolojisi uygulaması (a) Düşük Voltaj (b) Yüksek Voltaj



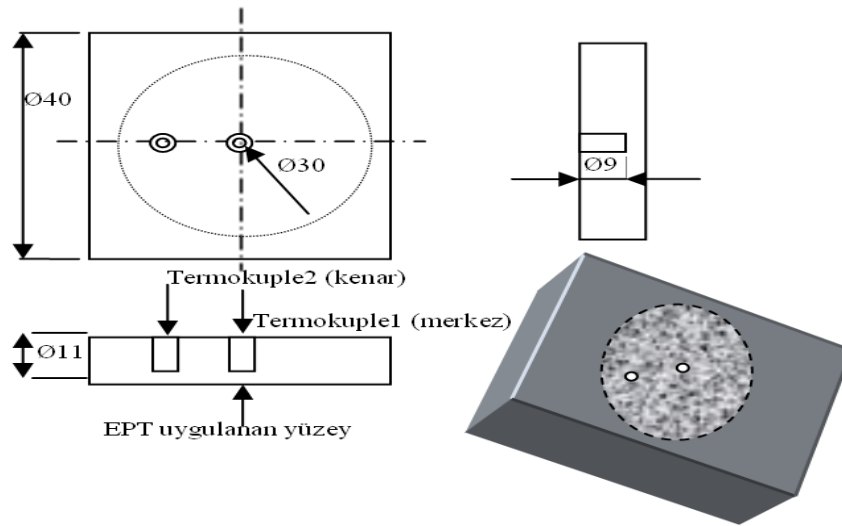
Şekil 5.6. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi uygulaması

Tablo 5.2. Yüzey modifikasyonu işlem parametreleri

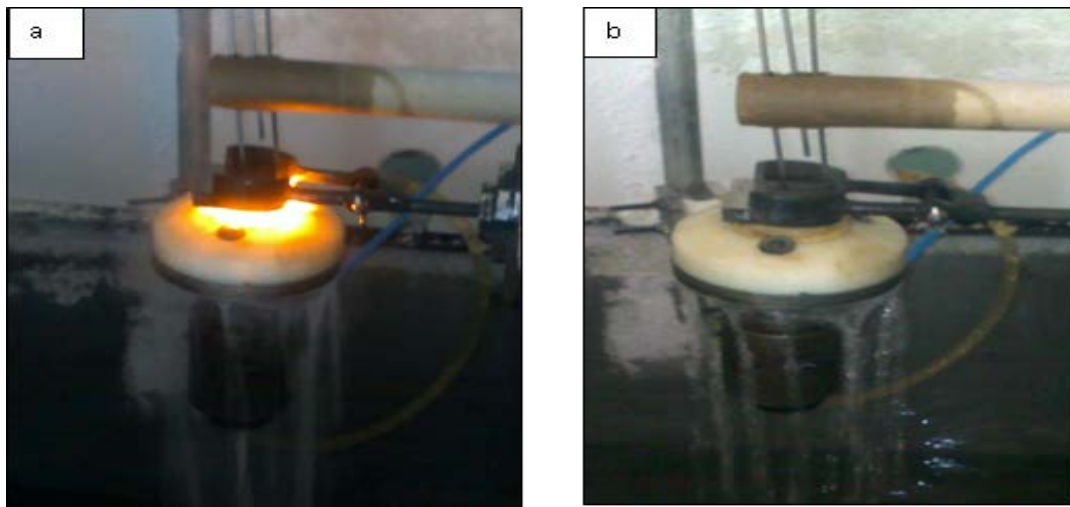
Parametre Kodları	Elektrolitik Çözelti	Yüksek Voltaj (Impulse-V)	Düşük Voltaj (Pause-V)	İşlem Süresi	Termal Çevrim
1	%12 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	310	250	(3-3)x4 - <u>24Sn</u>	4
2	%12 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	310	250	(3-3)x5 - <u>30Sn</u>	5
3	%12 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	310	250	(3-3)x6 - <u>36Sn</u>	6
4	%12 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	310	250	(1-3)x6 - <u>24Sn</u>	6
5	%12 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	310	250	(2-3)x6 - <u>30Sn</u>	6
6	%12 Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	310	250	(3-3)x6 - <u>36Sn</u>	6
İ	30 Kw güç, 300 kHz frekans, 6 sn, 850–920 °C				
1T	1 nolu + Temperleme				
2T	2 nolu + Temperleme				
3T	3 nolu + Temperleme				
4T	4 nolu + Temperleme				
5T	5 nolu + Temperleme				
6T	6 nolu + Temperleme				
İ-T	İ nolu + Temperleme				

### 5.5. Yüzey Sıcaklık Ölçümleri

40x40x11mm ölçülerinde hazırlanan numunelerin arka yüzeyinden modifikasyon bölgesine gelecek şekilde 3mm çapında merkeze ve kenar bölge olarak adlandırdığımız yerlere termokupllar için 2 delik açılmıştır. EPT işlemi için hazırlanan numuneler modifikasyon işlemi öncesi deliklere termokupllar takılarak, belirlenen parametrelerde yüzeyin sıcaklığı PICOLOG programı ile bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Şekil 5.7’de numune yüzeyinde açılan delikler ve numune ölçüleri şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 5,8’de ise deneysel çalışmalar sırasında gerçekleştirilen yüzey sıcaklığı ölçüm işlemleri görülmektedir.



Şekil.5.7. Picolog programı için hazırlanan numunelerin şematik gösterimi



Şekil 5.8. Yüzey sıcaklık ölçümleri

## 5.6. Mikroyapı İncelemeleri

### 5.6.1. Optik mikroskop incelemeleri

Elektrolitik plazma teknolojisi ile, indüksiyonla sertleştirme işlemi ile ve modifikasyon sonrası temperleme ile üretilen KGDD numuneler, modifiye olan yüzeylerinde meydana gelen spot merkezlerini ortalayacak biçimde (Şekil 5.9) Discotom 6 marka kesme cihazı ile hassas biçimde kesilerek mikroyapı incelemeleri için bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler, 60, 80, 120, 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gridlik zımparalarla zımparalama, daha sonra 1µm lik alümina pastayla parlatma ve % 3'lük nitelle dağlama işlemleri ile metalografik olarak hazırlanmıştır. Numunelerin optik mikroyapı incelemeleri NIKON ECLIPSE L150 marka optik mikroskop cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. EPT ve indüksiyonla sertleştirme işlemleri ile modifiye edilen yüzeyin tabaka kalınlığı ölçümleri ise LEICA MZ75 marka stereo mikroskop cihaz üzerine monte edilmiş mikrometre kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 5.9. EPT ile modifiye edilmiş numune görüntüsü

### 5.6.2. Taramalı elektron mikroskop (SEM) incelemeleri

EPT, indüksiyonla sertleştirme ve modifikasyon sonrası temperleme işlemleri ile üretilen KGDD numunelerin mikroyapı incelemelerinde JEOL JSM – 6060 LV marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Ayrıca aşınma testleri uygulanmış yüzeylerin mikroyapı görüntüleri ve elementel analizler SEM çalışmalarıyla gerçekleştirilmiştir.

### 5.7. Görüntü Analizi

EPT, indüksiyonla sertleştirme ve modifikasyon sonrası temperleme işlemleri ile üretilen KGDD numunelerin yüzeyinde oluşan modifikasyon bölgesindeki grafit dağılımı, ortalama grafit çapı, yüzde küresellik, martenzit hacim oranlarının belirlenmesi amacı ile Nikon Eclipse L150 A marka optik mikroskoba bağlı çalışan Clemex Vision Lite görüntü analiz yazılımı kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan bilgisayar destekli görüntü analiz sistemi görüntüsü Şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.10. Bilgisayar destekli görüntü analiz sistemi görüntüsü

### 5.8. Faz Analizleri

Farklı termal çevrim ve yüksek voltaj sürelerinde uygulanan EPT yöntemi ile modifiye edilen KGDD numunelerin yüzeylerindeki fazların tespit edilebilmesi amacıyla RIGAKU D/MAX/2200/PC marka X ışınları difraktometresi kullanılmıştır. Analizlerde  $1,54056 \text{ \AA}$  dalga boyunda  $2\theta$ 'sı  $0^\circ$ - $130^\circ$  arasında olacak şekilde  $2^\circ/\text{dk}$  tarama hızında olan Cu  $K\alpha$  ışın demetleri kullanılmıştır.

### 5.9. Sertlik Ölçümleri

Metalografik olarak hazırlanan numunelerin Rockwell C (HRC) ve Vickers sertlik ölçümleri sırasıyla Bulut Makine (BMS) Future Tech marka sertlik cihazlarında gerçekleştirilmiştir. Mikrosertlik ölçümleri 200 gr yük altında 10 sn. süre ile üç farklı bölgeden alınarak ortalama değer olarak kaydedilmiştir.

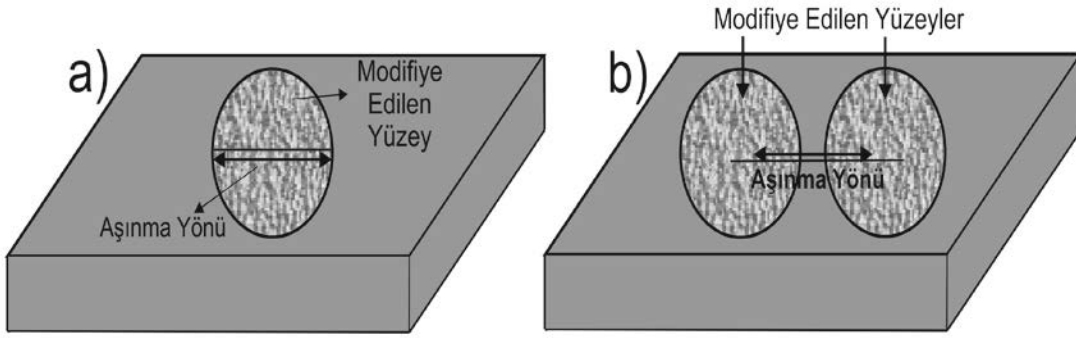
### 5.10. Aşınma Deneyleri

EPT, indüksiyonla sertleştirme ve modifikasyon sonrası temperleme işlemleri ile üretilen KGDD numunelerin aşınma deneyleri CSM marka cihazda disk üzerinde bilya lineer aşınma yöntemi ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.11). Aşınma deneyinden önce numuneler ve aşındırıcı bilyeler alkolle temizlenmiştir. Deneyler sırasında aşındırıcı olarak 6 mm çapında alümina esaslı bilyeler kullanılmıştır. Aşınma deneyleri her numune grubu için 0,5N, 1N ve 2N yüklerinde 0.15m/s hızda, 500 m kayma mesafesinde, 30-35°C sıcaklık aralığında ve %50-60 aralığında bağıl nem ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında yük uygulama kolunun modifiye edilen yüzeye temasında hassas davranılmış yüzeyden doğru veriler alınması sağlanmıştır.



Şekil 5.11. CSM Tribometer aşınma cihazı

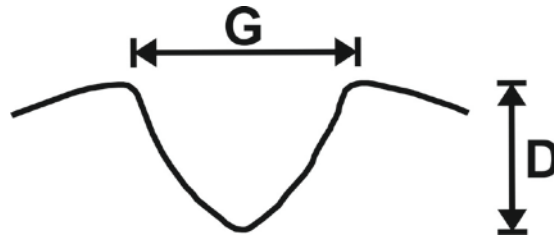
Aşınma deneyleri modifiye yüzeyi tam anlamıyla karakterize etmesi açısından Şekil 5.12’de de gösterildiği üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Sadece modifiye edilen alanda yapılan aşınma deneyleri “modifiye yüzey aşınma (MYA)” testi (Şekil 5.12(a)), aşındırıcı bilyanın hem modifiye edilen yüzeyi hem de altlık malzemeyi aşındıracak şekilde yapılan aşınma testleri ise “kompozit yüzey aşınma (KYA)” testi (Şekil 5.12(b)) olarak ifade edilmiştir. İkinci yöntemin tercih edilmesi özellikle büyük yüzey alanlarında tekrarlanan belirli bir pattern şeklinde yöntemin uygulanmasından ve bu alanlardaki aşınma yüzeyinin hem modifiye edilmiş yüzey hem de altlık malzemedan oluşmasından dolayıdır.



Şekil 5.12. (a) Modifiye yüzey aşınma testi (b) Kompozit yüzey aşınma testi

Ölçümler sırasında elde edilen veriler yine CSM firmasına ait programa aktarılarak sürtünme katsayısı eğrileri elde edilmiştir. Her bir deneyin ardından LEICA MZ75 marka stereo mikroskop ile numunelerin yüzeyinde oluşan aşınma izlerinin genişlikleri ölçülerek kaydedilmiştir. Aşınma hesaplamalarına ve yorumlarına yardımcı olması amacıyla Tencor P-6 marka 2D profilometre yardımı ile numunelerin aşınma sonrası yüzey topografyası alınmıştır. Bu ölçümlerde elde edilen veriler yardımıyla numunelerin aşınma kaybı ve aşınma hızları hesaplanmıştır. Aşınma deneyleri sırasında uygulanan yüke bağlı olarak numuneler ile aşındırıcı bilyeler arasındaki sürtünme katsayıları ile kayma mesafesi arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler elde edilmiştir. Deneyler sonrasında aşınmış yüzeylerin SEM-EDS incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.13’de aşınma izinin derinliği ve genişliğinin şematik olarak görüntüsü verilmiştir. Burada  $V$  aşınma hacmi,  $G$  aşınma izinin genişliği,  $D$  aşınma izinin derinliği,  $L$  aşınma izi uzunluğu olarak tanımlanmıştır. Her numune için gidilen lineer yol ( $L$ ) sabittir.



Şekil 5.13. Aşınma izi derinliğinin ve genişliğinin şematik gösterimi



Numunelerin aşınma kayıpları hacimsel olarak (V), iz genişlik, derinliği ve aşınma izi uzunluğu ile eşitlik (5.1) ile hesaplanmıştır.

$$V = (\pi/4).G.D.L \quad (5.1)$$

## **BÖLÜM 6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA**

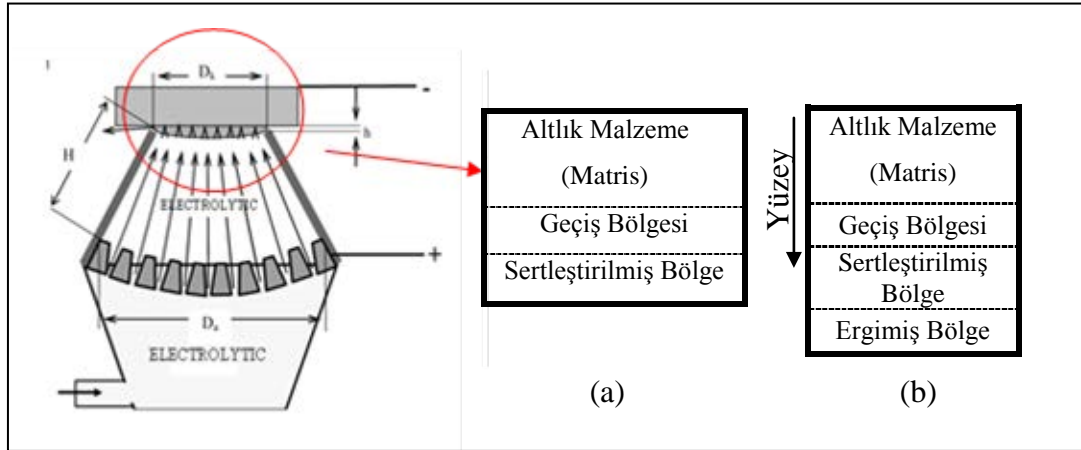
### **6.1. Mikroyapı İncelemeleri**

#### **6.1.1. Optik mikroskop incelemeleri**

Metalografik olarak hazırlanan ve farklı çevrim sayısı ve yüksek voltaj sürelerinde Elektrolitik Plazma Teknolojisi (EPT) yöntemiyle Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) malzemelerinin yüzeylerinde oluşturulan modifikasyon tabakasının, indüksiyonla sertleştirilen KGDD malzemelerinin ve modifikasyon sonrası temperlenen KGDD malzemelerinin mikroyapı incelemeleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir.

Mikroyapı incelemelerinde oluşan EPT modifikasyon tabakasının genel olarak görüntüsü şematik olarak Şekil 6.1'de verilmiştir. EPT işlemi sonrasında mikroyapının termal çevrim sayısı ve yüksek voltaj süresine bağlı olarak 3 veya 4 farklı bölgeden oluştuğu görülmektedir. Termal çevrim sayısı ve yüksek voltaj süresi maksimum olduğu durumda 4 farklı bölge oluşmaktadır. Mikroyapıda görülen tabakalar; (i) ergimiş bölge, (ii) sertleştirilmiş bölge, (iii) geçiş bölgesi, (iv) altlık malzeme (matris). Azalan termal çevrim ve yüksek voltaj süresi ile ergimiş bölgenin oluşmadığı görülmüştür.

4 termal çevrimde 24 saniye süreyle EPT işlemi uygulanmış KGDD numunenin (1 nolu) ve EPT ile modifikasyon sonrası 400 °C' de 45 dakika süre ile temperleme işlemi uygulanan numunenin (1T nolu) optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 6.2 (a) ve Şekil 6.2 (b)'de görülmektedir.

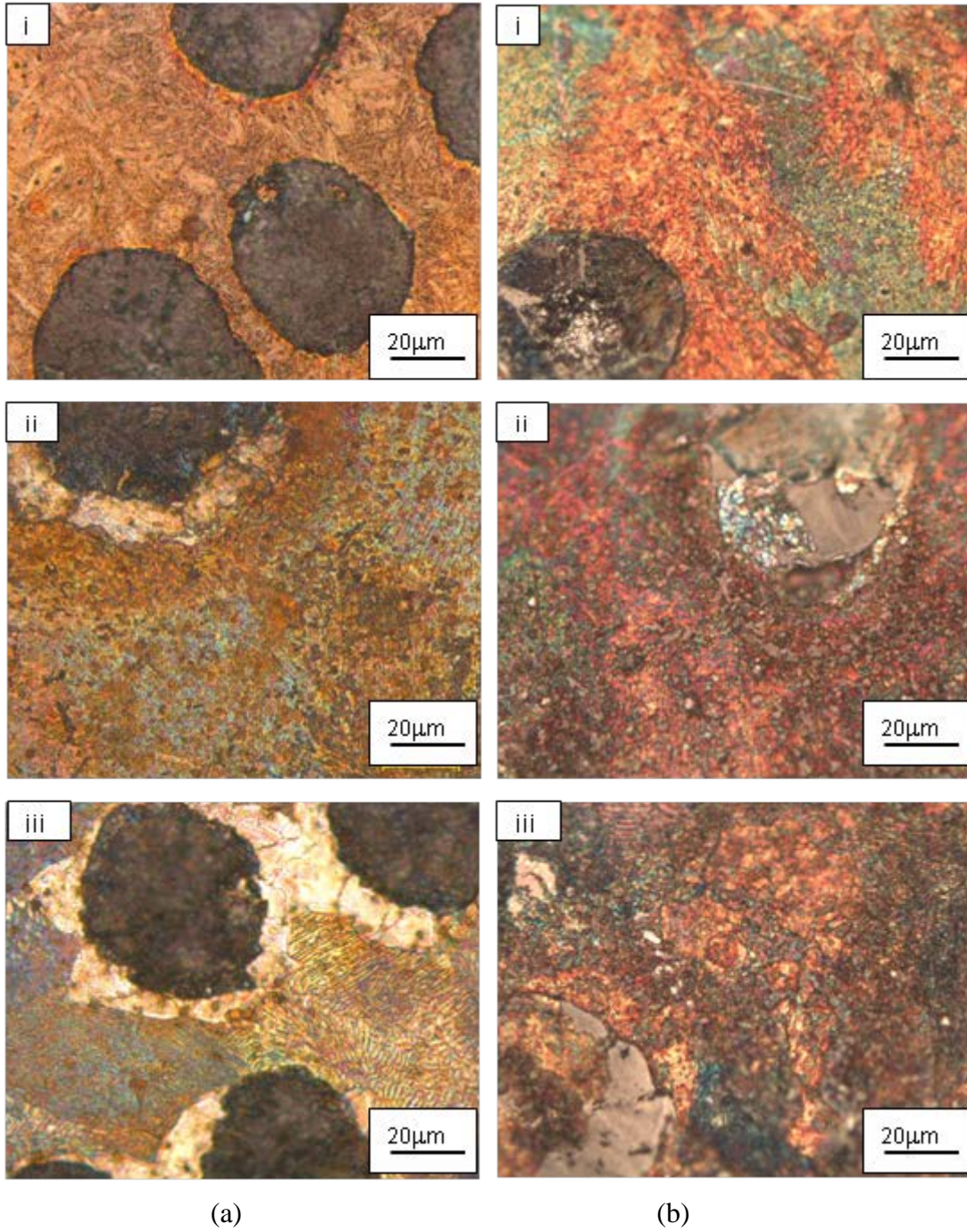


Şekil 6.1. EPT şematik görünümü ve EPT yöntemi ile KGDD malzemesinin yüzeyinde oluşan a) 3 katmanlı b) 4 katmanlı tabakaların mikroyapısının şematik gösterimi

Mikroyapı incelemelerinde modifikasyon tabakasında martenzit dönüşümünün gerçekleştiği belirlenmiştir (Şekil 6.2 a (i)). Yüzeyden iç kısımlara doğru (altlık malzemeye doğru) gidildikçe martenzit oluşumunun azaldığı ve nitekim matriste ferrit ve perlit esaslı yapının oluştuğu görülmektedir.

Modifikasyon tabakasında, yüksek voltaj sürecinde perlit ve ferrit matrisin östenitenmesi sağlanır. Östenit sıcaklığında östenit matris grafit nodüllerden gelen karbonlar sayesinde zenginleşmeye başlar. Düşük voltaj sürecinde yada bir başka deyişle su verme sürecinde karbonca zenginleşmiş östenit, martenzit ve az miktarda kalıntı östenite dönüşmüştür [2,83-89]. Mikroyapılarda modifikasyon tabakasında yer alan grafit kürelerinin bozunmadığı belirlenmiştir.

EPT işlemleri sırasında elde edilen yüksek sertlikteki martenzitik yapının gevrekliğinin giderilmesi amacıyla temperleme işlemleri uygulanmıştır. EPT işlemi sonrası temperleme işlemine tabi tutulan numunelerin (1T nolu) mikroyapı görüntüleri Şekil 6.2 (b)'de görülmektedir. İncelemelerde EPT ile yüzeyde elde edilen martenzit fazının temperleme sonrası şeklini değiştirdiği görülmüştür. Temperleme sonrası martenzit yapısı kabalaşmaktadır. Zigzaglı gruplar oluşturan iğnemsî yapılar temperleme işlemi ile tipik EPT ile modifiye edilmiş şeklini kaybetmektedirler. Benzer durumdaki sonuçlar lazer yüzey işlemlerinde de görülmektedir [2,87-89].



Şekil 6.2. (a) Modifikasyon sonrası 1 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 1T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme)

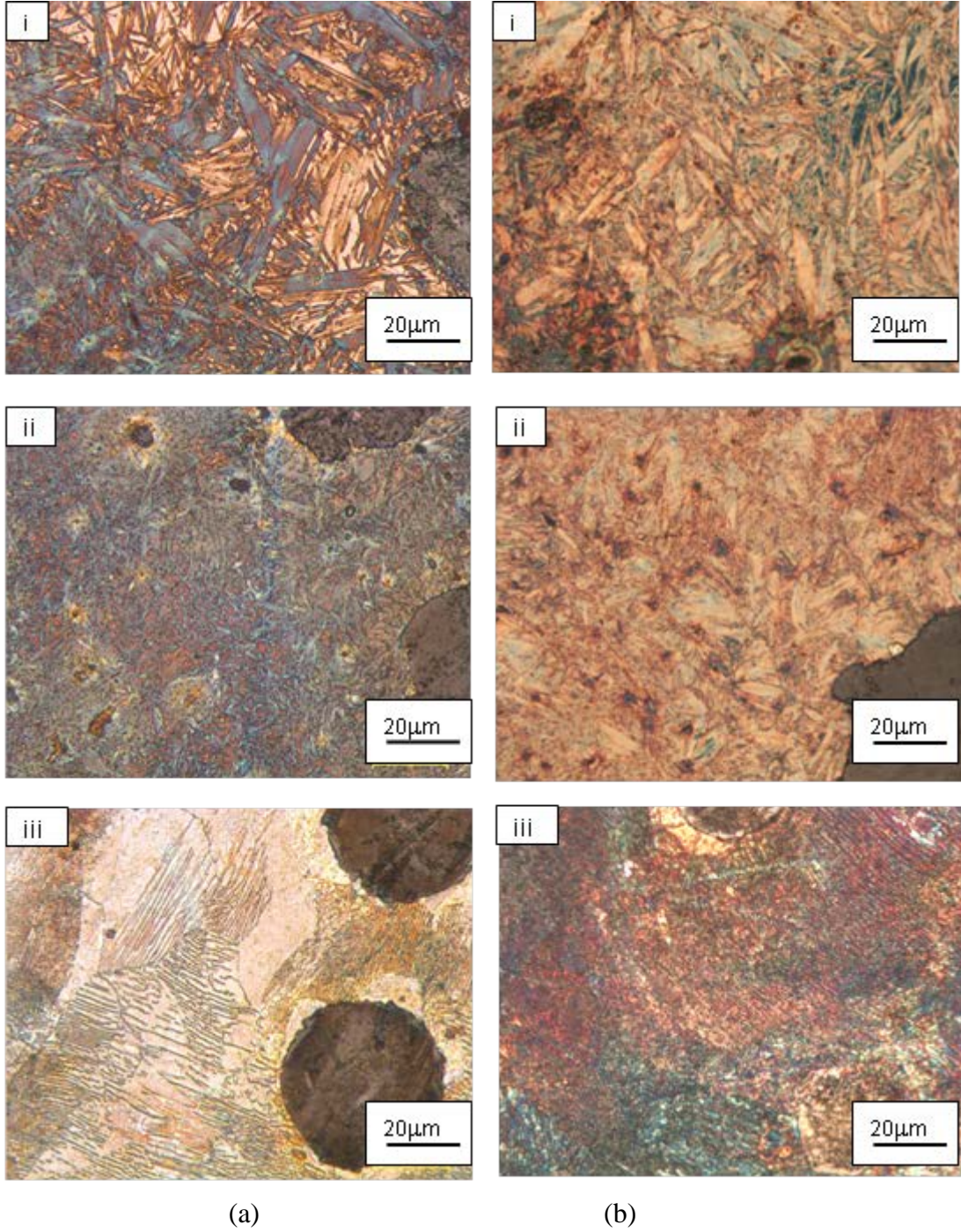
Şekil 6.3(a) ve Şekil 6.3 (b)'de 5 termal çevrimde 30 saniye süreyle EPT işlemi uygulanmış KGDD numunenin (2 nolu) ve EPT işlemi sonrası temperleme işlemi uygulanan numunenin (2T nolu) optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla verilmiştir. 1 nolu numune ile 2 nolu numune arasında işlem parametreleri açısından fark termal çevrim sayısıdır. 1 nolu numunede EPT işlemi 4 termal çevrim uygulanmışken, 2

nolu numunede termal çevrim sayısı 5 olacak şekilde modifiye işlemi uygulanmıştır. Termal çevrim sayısının artması aynı zamanda modifikasyon işlem sürenin de artması anlamına geldiğinden, mikroyapılardan da görüleceği üzere modifikasyon tabaka kalınlığının artmasına ve mikroyapının değişmesine neden olmuştur. Tabaka kalınlıklarının değişimi bir sonraki bölümde verilecektir.

Şekil 6.3(a)'da 2 nolu numunenin mikroyapı görüntülerinde modifikasyon bölgesinde martenzit ve az miktarda kalıntı östenit fazının olduğu çok net görülmektedir. Bu numunede de modifikasyon tabakasında grafit kürelerinin bozunmadığı belirlenmiştir.

Artan termal çevrim sayısı ile EPT işleminin etkisi artmıştır. Uygulanan çevrim sayısı artınca işlem süresi de artacağından, yüzeyin sıcaklığı artmıştır. Bu durum martenzit morfolojisini değiştirmiştir. Mikroyapı görüntülerinde martenzit oluşumunun çok net görüldüğü belirlenmiş olup martenzit iğnelerinin daha belirgin ve kalın olduğu görülmektedir. 1 nolu numunede elde edilen martenzit levhasal iken, 2 nolu numunede iğnemsiz martenzit elde edilmiştir. Bu farklılık işlem sırasında (yüksek voltaj sürecinde) östenitteki karbon miktarının farklılığına bağlanabilir. İğnemsiz martenzit daha çok karbonca zengin östenit bölgede dönüşümü sağlanır. KGDD mikroyapısındaki değişim numune yüzeyinin ısıtma ve soğutma esnasındaki sıcaklık şartlarına ve hızına bağlıdır [90,91].

EPT işlemi sonrası temperleme işlemine tabi tutulan numunelerin (2T nolu) mikroyapı görüntüleri ise Şekil 6.3 (b)'de verilmiştir. 1T nolu numuneye benzer olarak EPT ile yüzeyde elde edilen martenzit fazının temperleme sonrası şeklini değiştirdiği görülmüştür. Temperleme sonrası martenzit yapısında iğnemsiz uçların yuvarlanması ile temperlenmiş martenzit dönüşümü sağlanmıştır.[87,88,92]

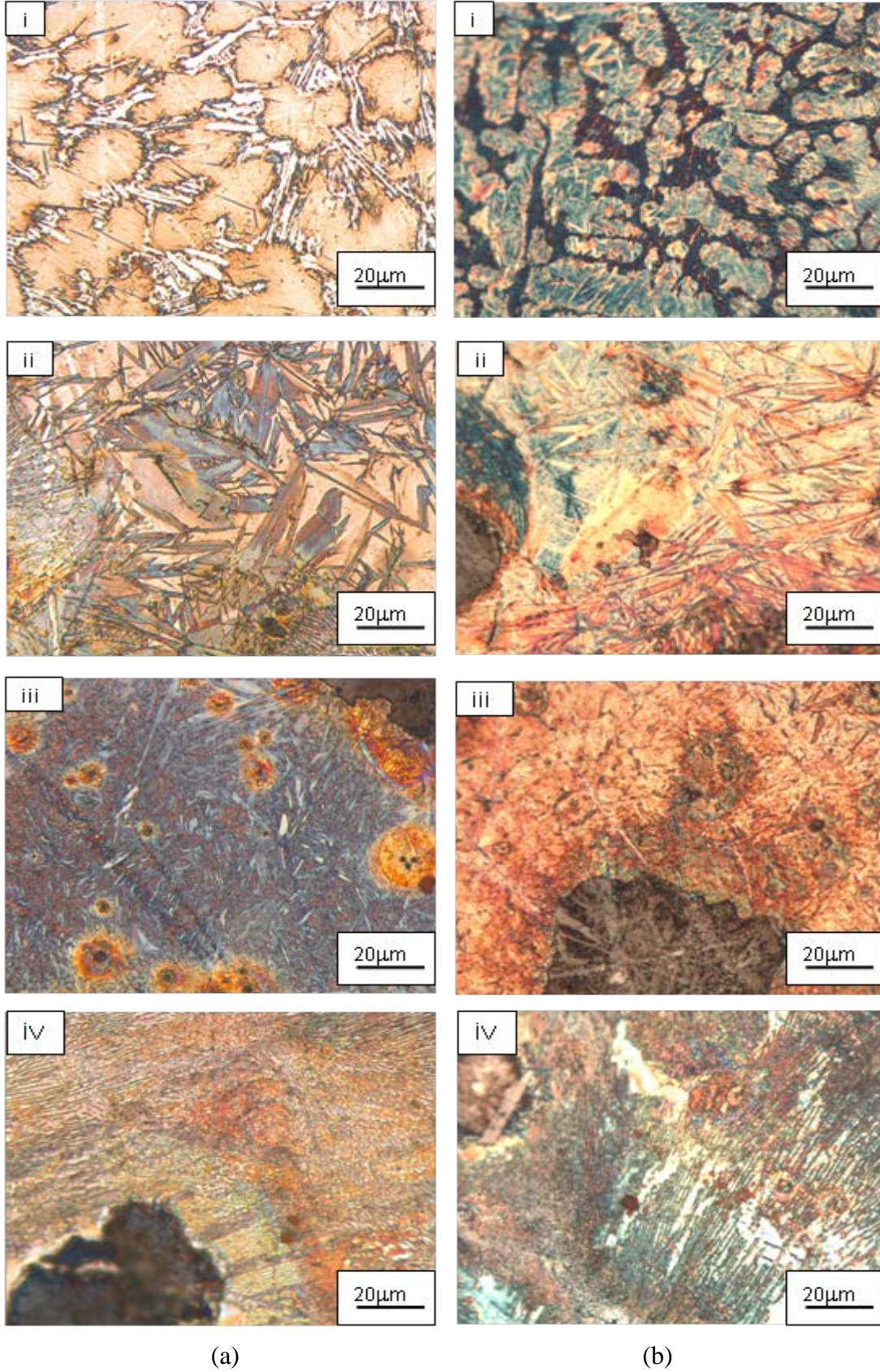


Şekil 6.3. (a) Modifikasyon sonrası 2 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 2T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme)

6 termal çevrimde 36 saniye süreyle EPT işlemi uygulanmış KGDD numunenin (3 nolu) ve EPT ile modifikasyon sonrası temperleme işlemi uygulanan numunenin (3T nolu) optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 6.4 (a) ve Şekil 6.4 (b)'de görülmektedir. EPT işleminde termal çevrimin maksimum değere çıkması ile diğer numune gruplarına göre modifikasyon tabakasında farklılıklar gözlemlenmiş ve

tabaka kalınlığının artışına neden olmuştur. 1 ve 2 nolu numunelerden farklı olarak yüzeyde bir tabaka daha oluşmuştur. Yüzeyde oluşan yeni ve dördüncü tabaka ergimiş bölge olarak adlandırılmıştır (Şekil 6.4 (a)) [3,9,80,93]. Ergimiş bölgede grafit küreleri tamamen bozunmuştur ve yeniden katılma meydana gelmiştir. Bu tabakanın mikroyapısındaki değişim, ısıtma ve soğutma esnasındaki sıcaklık şartlarına bağlıdır. Ergimiş tabaka ince östenit dendritlerden, sementit ve martenzitten oluşmaktadır. Oluşan bu dendritik yapının kolları yeniden katılma esnasında soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir. Mikroyapı incelemelerinde dendritlerin aralarında martenzit yapısının olduğu görülmektedir. Oluşan martenzit daha çok iğnemsî yapıdadır. Çünkü karbon miktarı bu bölgede yüksektir. EPT işlemi sırasında, östenit matris grafit nodüllerden gelen karbonlarca zenginleşmeye başlar [93,94]. Araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda, bu yapı laserle ve EB meltingle üretilen numunelere benzer olduğu görülmüştür [95].

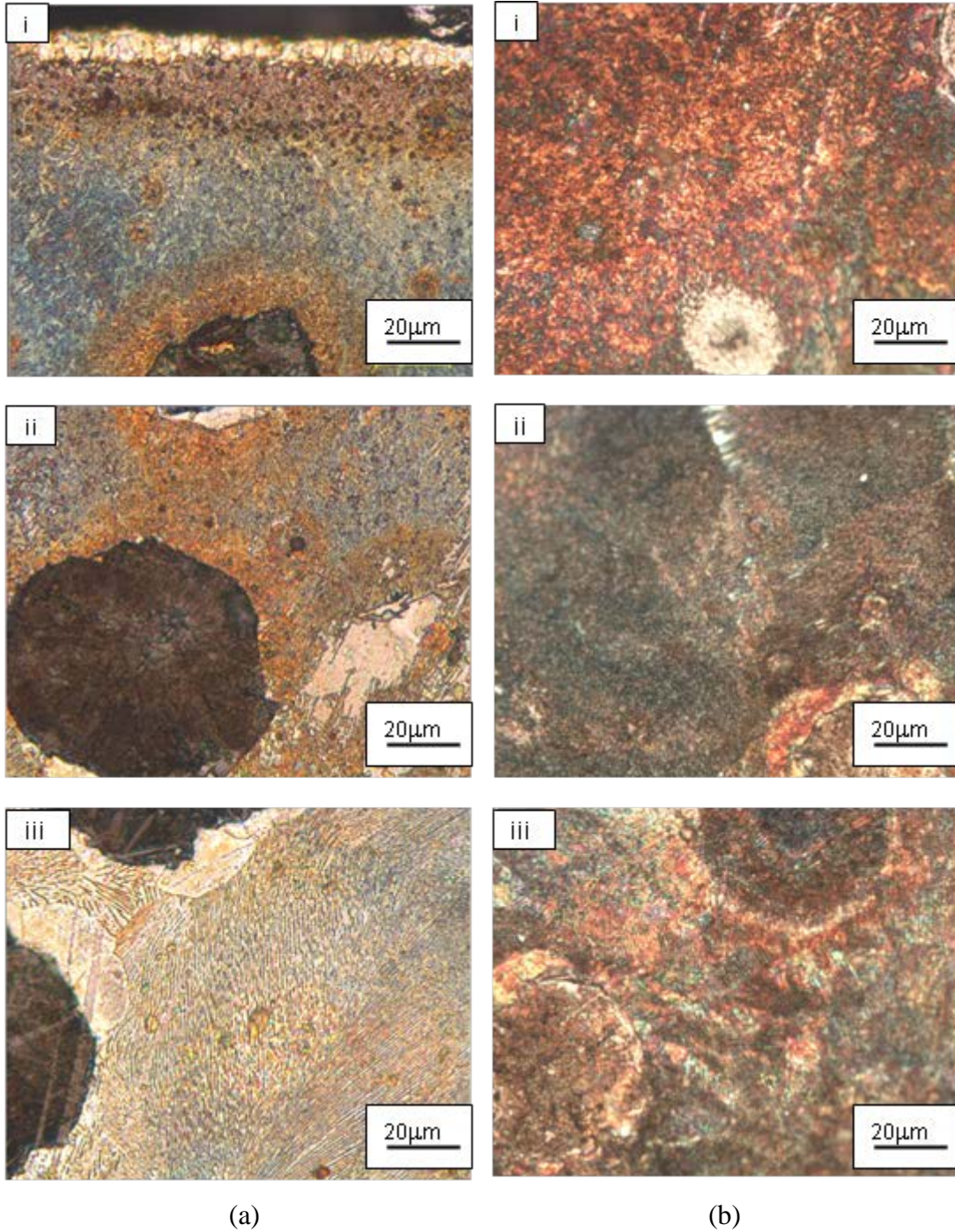
Şekil 6.4 (b)'de EPT işlemi sonrası temperlenmiş KGDD numunesinin (3T nolu) mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde modifikasyon bölgesinde ergimiş bölgede ve sertleştirilmiş bölgede değişim görülmüştür. Ergimiş bölgede dendritlerin kabalaştığı görülmüştür. Temperleme işlemi martenzit yapısının iğnemsî uçlarının yuvarlanmasına ve yapıda daha ince temperlenmiş martenzit oluşumuna neden olmuştur [92].



Şekil 6.4. (a) Modifikasyon sonrası 3 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 3T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ((i) Ergimiş bölge,(ii) Sertleştirilmiş bölge, (iii) Geçiş bölgesi, (iv) Altlık malzeme)



Şekil 6.5 (a) ve Şekil 6.5 (b) 'de görülmekte olan 1 saniye yüksek voltajla 24 saniye süreyle EPT işlemi uygulanmış KGDD numunenin (4 nolu) ve EPT işlemi sonrası temperlenmiş KGDD numunenin (4T nolu) optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla verilmiştir. 4 nolu numune daha önce açıklanan numunelerden farklı olarak uygulanan yüksek voltaj süresi değiştirilmiştir. 1 nolu numune ile toplam işlem süresinin eşit olmasına rağmen elde edilen modifikasyon tabakasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Yüksek voltaj süresindeki değişim modifikasyon için yeterli olmamıştır. Elde edilen modifikasyon tabakası derinliği azalmıştır. 1 nolu numunede yüzeyde martenzitik dönüşümü net bir şekilde görülürken, 4 nolu numuneden yeterli dönüşüm sağlanamamıştır. Şekil 6.5 (a)' da kontrast farklılığından görüldüğü üzere ısıdan etkilenmiş tabakanın daha çok olduğu görülmektedir. Modifikasyon tabakasında, yüksek voltaj sürecinde perlit ve ferrit matrisin östenitlenmesi sağlanmaktadır. Yüksek voltajın minimum seçilmesi ile yüzeyin istenen sıcaklığa ulaşması sağlanamamıştır. EPT işlemi sonrası temperlenmiş KGDD numunesinin (3T nolu) mikroyapı görüntüleri Şekil 6.5 (b)'de verilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde temperleme işlemi ile EPT ile modifiye edilmiş tabaka şeklini kaybetmiştir.



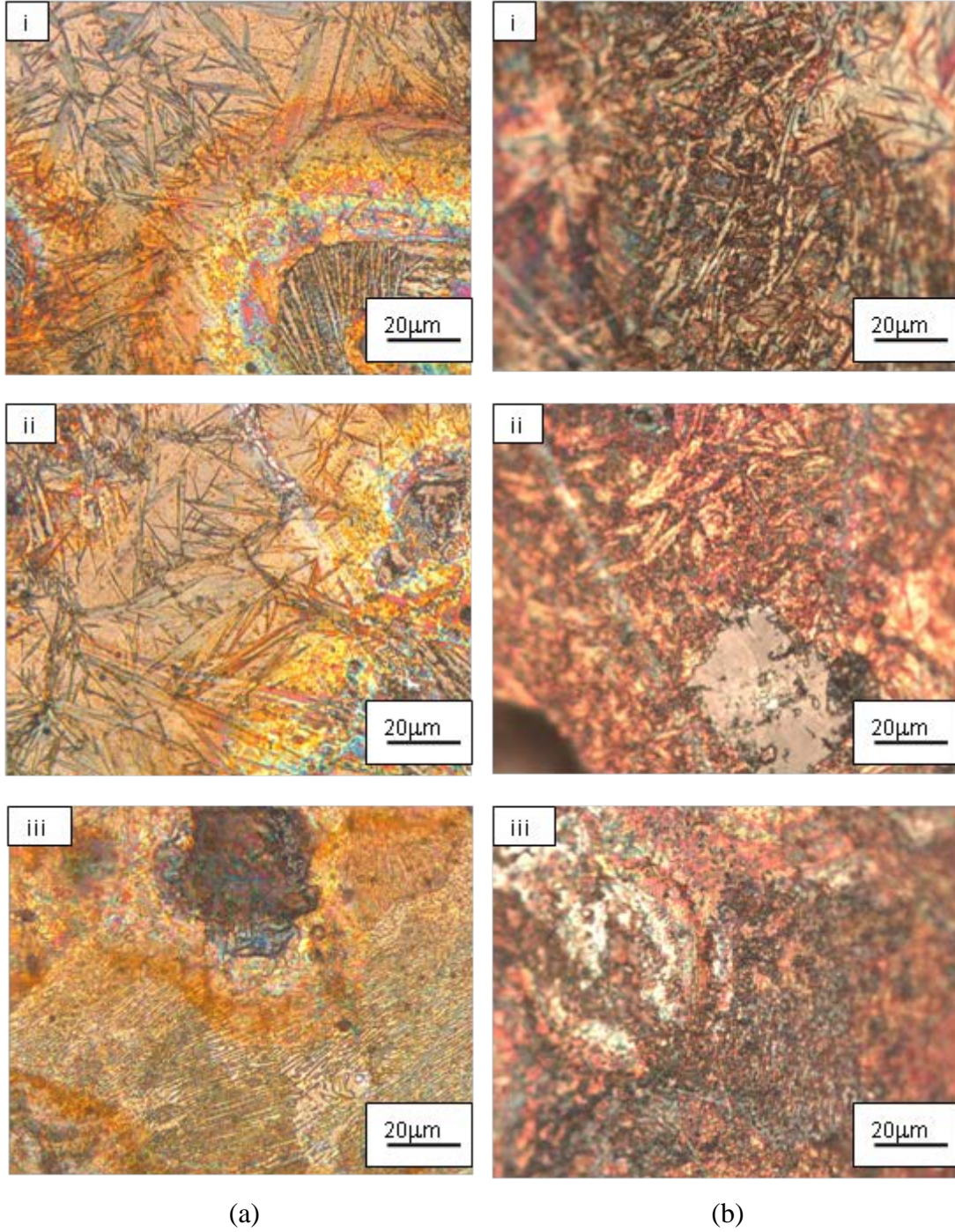
Şekil 6.5. (a) Modifikasyon sonrası 4 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 4T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme)

2 saniye yüksek voltajla 30 saniye süreyle EPT işlemi uygulanmış KGDD numunenin (5 nolu) ve EPT işlemi sonrası temperlenmiş KGDD numunenin (5T nolu) optik mikroyapı görüntüleri sırasıyla Şekil 6.6 (a) ve Şekil 6.6 (b) 'de verilmiştir. Artan yüksek voltaj süresiyle elde edilen modifikasyon tabakası daha önce anlatılan numunelerle benzerlik göstermektedir. Mikroyapı incelemelerinde 5

nolu numunede yüksek voltaj süresinin 2sn olması ile faz dönüşümlerinin sağlanması adına yeterli koşulları oluşturduğunu göstermektedir. Yüzeğe yakın yerlerde grafit küreleri azalmıştır. Yüzeğe, hızlı su verme ile daha ince hücreli dendritlerden ve iğnelerin kabalaştığı martenzit yapısı elde edilmiştir. Yüzeğden altlık malzemeye doğru ilerledikçe martenzitin daha iğnemsisi olduğu görülmektedir. 5T nolu numunenin temperleme işlemi sonrası mikroyapı incelemelerinde iğnemsisi martenzit uçlarının yuvarlandığı görülmüştür (Şekil 6.6 (b)). Daha önce anlatılan numunelere benzer olarak yüzeğe temperlenmiş martenzit elde edilmiştir.

6 nolu numune 3 nolu numune parametreleri ile aynı olup, termal çevrim sayısının ve yüksek voltaj süresinin etkisini araştırmak amacı ile tekrar konulmuştur. 3 nolu numunede olduğu gibi artan yüksek voltaj süresi ile yüzeğe grafit küreleri ergimiştir. Ergimiş bölgeden sonra martenzitik dönüşüm sağlanmıştır. Parametrelerinin aynı olması sebebi ile 6 nolu ve EPT işlemi sonrası temperlenmiş 6T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri tekrar eklenmiştir.

Şekil 6.7 (a) ve Şekil 6.7 (b)' de indüksiyonla sertleştirilmiş KGDD numunesinin (İ nolu) ve indüksiyonla sertleştirme işlemi sonrası temperlenmiş KGDD numunesinin (İ-T nolu) optik mikroyapı görüntüleri görülmektedir. İ nolu numunede modifikasyon sonrası yüzeğe oluşan iğnemsisi martenzitler şekilden çok net görülmektedir. Yüzeğe yakın bölgelerde kalıntı östenit varlığına rastlanmıştır. İndüksiyonla sertleştirme işleminde de 3 nolu numuneye benzer yüzeğe kısmen ergime görülmüştür. Sıcaklık ötektik noktaya geldiğinde ötektik reaksiyon başlamıştır. Hızlı soğuma esnasında yüzeğe yakın bölgede yer yer grafit küreleri bozunmuştur. Ötektik östenit çoğunlukla martenzite ve kalıntı östenite dönüşmüştür. Şekil 6.7 (b)'de indüksiyonla sertleştirme işlemi sonrası temperlenmiş KGDD numunesinin (İ-T nolu) mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde modifikasyon bölgesinde kalıntı östenit dönüşümün azaldığı görülmüştür. Temperleme işlemi martenzit yapısının değiştiği görülmüştür. Martenzit iğne uçları körelmiştir ve yapıda daha ince temperlenmiş martenzit oluşumuna neden olmuştur.



Şekil 6.6. (a) Modifikasyon sonrası 5 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 5T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme)

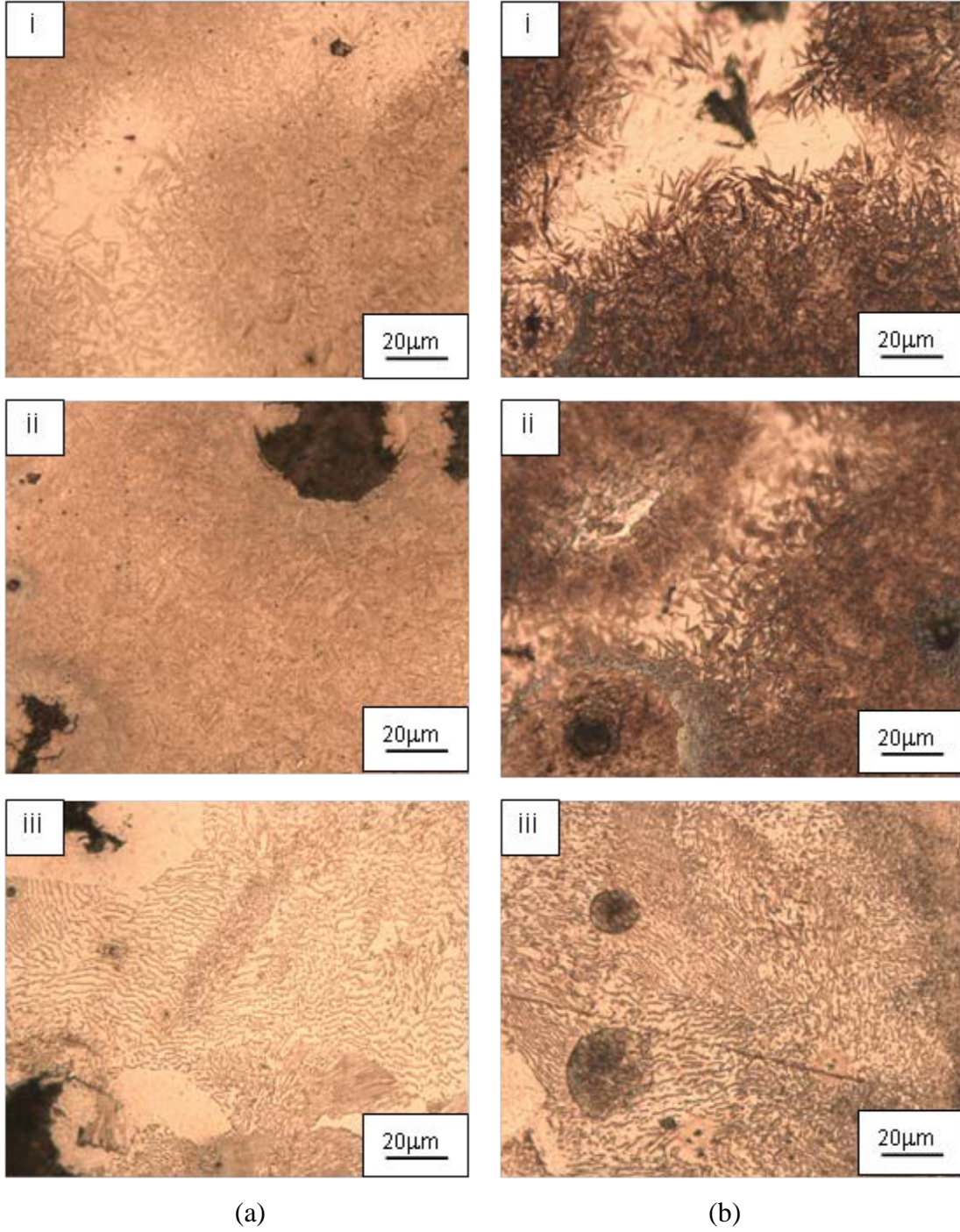
Literatür çalışmalarına göre, EPT teknolojisi ile modifiye edilmiş numunelerden alınan mikroyapı görüntüleri diğer yüzey sertleştirme işlemleri ile benzerlik göstermiştir [3,9,45,84,93,96]. Geleneksel yüzey işlemlerinde olduğu gibi östenitleme sıcaklığı değişikçe elde edilen mikroyapı sonuçları değişmektedir [85,86]. EPT ile modifiye edilen numuneler değişen termal çevrim sayısı ve yüksek

voltaja bağı olarak farklı yüzey sıcaklıkları elde edildiği bir sonraki bölüm de açıklanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar, yüzey sıcaklığının ve yüzeyin modifiye edilebilmesi için uygulanan yüksek voltaj süresinin, termal çevrimin önemli olduğunu göstermiştir. Değişen deney parametreleri modifikasyon tabakasının kalınlığını değiştirmenin yanında mikroyapı bileşenlerini ve yüzeyde oluşan bölge sayısını da değiştirmiştir. Uygulana yüzey işlemleri sonucunda farklı morfolojide iki tip martenzit elde edilmiştir. İğnemsisi ve levhasal.

Optimum parametrelerde modifikasyon tabakasında grafitler bozunmamıştır ve dendrit yapısı yoktur. Grafitlerin ergimemesi matristeki karbon miktarını azalmıştır. Grafitler ergimediği için düşük oranda iğnemsisi martenzit dönüşümü sağlanmıştır. 1 ve 2 daha çok levhasal martenzit oluşmuştur. Grafitin bozunduğu numunelerde ergimiş bölgenin altında daha iğnemsisi martenzitik yapı elde edilmiştir. İndüksiyonla sertleştirilen numunelerde de iğnemsisi martenzit dönüşümü görülmüştür. 3 ve İ nolu numuneler daha benzer yüzey dönüşümleri göstermiştir.

Modifiye edilen KGDD numunelere uygulanan temperleme işlemi modifikasyon tabakasında farklılıklar elde edilmiştir. Martenzitik yapısının iğnemsisi uçları yuvarlaklaşmıştır. Zigzaglı gruplar oluşturan iğnemsisi yapılar temperleme işlemi ile şeklini kaybetmektedir [2,87-89].

Termal çevrimin, yüksek voltajın etkisinin yanında, su vermenin (düşük voltaj süreci) de etkisi incelenmiş olup, yüzeyde deformasyona ve ergimeye neden olduğu için istenen sonucu sağlamadığından tez çalışmalarına konulmamıştır.



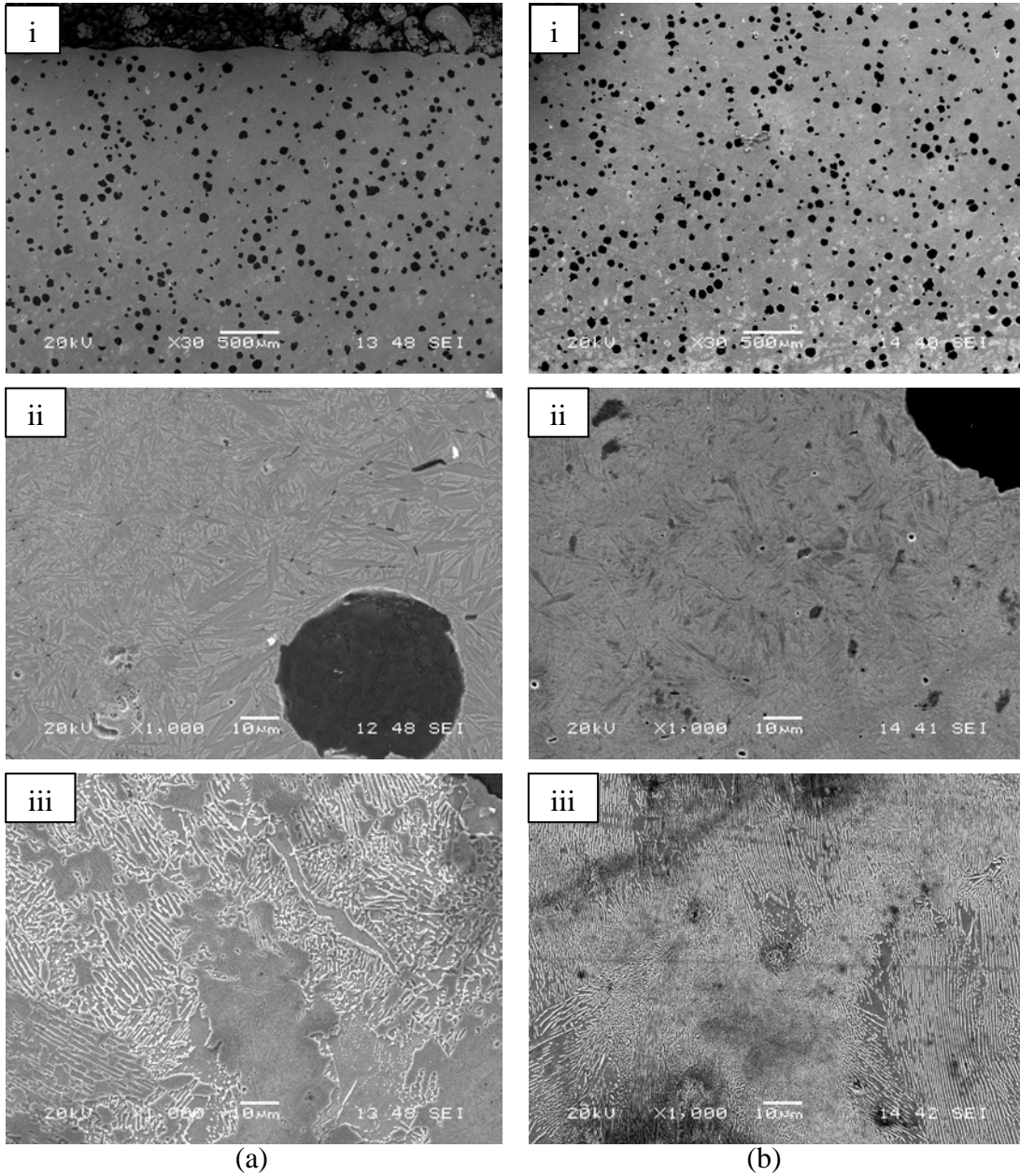
Şekil 6.7. (a) Modifikasyon sonrası İ Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası İ-T nolu numunenin mikroyapı görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme)

### 6.1.2. SEM incelemeleri

Metalografik olarak hazırlanan Elektrolitik Plazma Teknolojisi (EPT) yöntemiyle Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) malzemelerinin yüzeylerinde oluşturulan modifikasyon tabakasının, indüksiyonla sertleştirilen KGDD malzemelerinin ve modifikasyon sonrası temperlenen KGDD malzemelerinin mikroyapı incelemeleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskopla incelenen numunelerden, en düşük termal çevrimle modifiye edilmiş numune (1 nolu) ve en düşük yüksek voltaj süresi ile modifiye edilmiş numune (4 nolu), en yüksek termal çevrim ve yüksek voltaj uygulanmış numuneler (3/6 nolu) seçilip, modifikasyon tabakasındaki değişimleri daha yüksek büyütmelede SEM’de incelenmiştir.

Şekil 6.8 (a) ve Şekil 6.8 (b)’de modifikasyon sonrası 1 nolu ve 1T nolu numunelerin SEM mikroyapıları görülmektedir. Şekil 6.8 (i)’de düşük büyütmede tüm yüzeyin genel görüntüsü verilmiştir. Genel yüzey görüntüsünde grafit kürelerinin homojen şekilde dağılım gösterdiği görülmüştür. Yüzeyde grafit kürelerinin bozunmadığı net bir şekilde görülmektedir. Serleştirilmiş bölgeden alınan SEM görüntüsü Şekil 6.8 (ii)’de verilmiştir. Modifikasyon bölgesinde martenzit dönüşüm görülmüştür. Altlık malzemenin, perlitik matrisli KGDD SEM görüntüsü Şekil 6.8 (iii)’de görülmektedir.

Şekil 6.8 (b)’ de 1T nolu numunenin yüzeyden altlık malzemeye doğru sırası ile SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntülerinde temperlemenin etkisi daha net görülmektedir. EPT işlemi ile elde edilen martenzitik dönüşümün değiştiği Şekil 6.8 (b)(ii)’de görülmektedir. Martenzit iğnelerinin zigzaglı düzeninin bozulduğu ve martenzit iğne uçlarının yuvarlaklaştığı görülmektedir.



Şekil 6.8. (a) Modifikasyon sonrası 1 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 1T nolu numunenin SEM görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme)

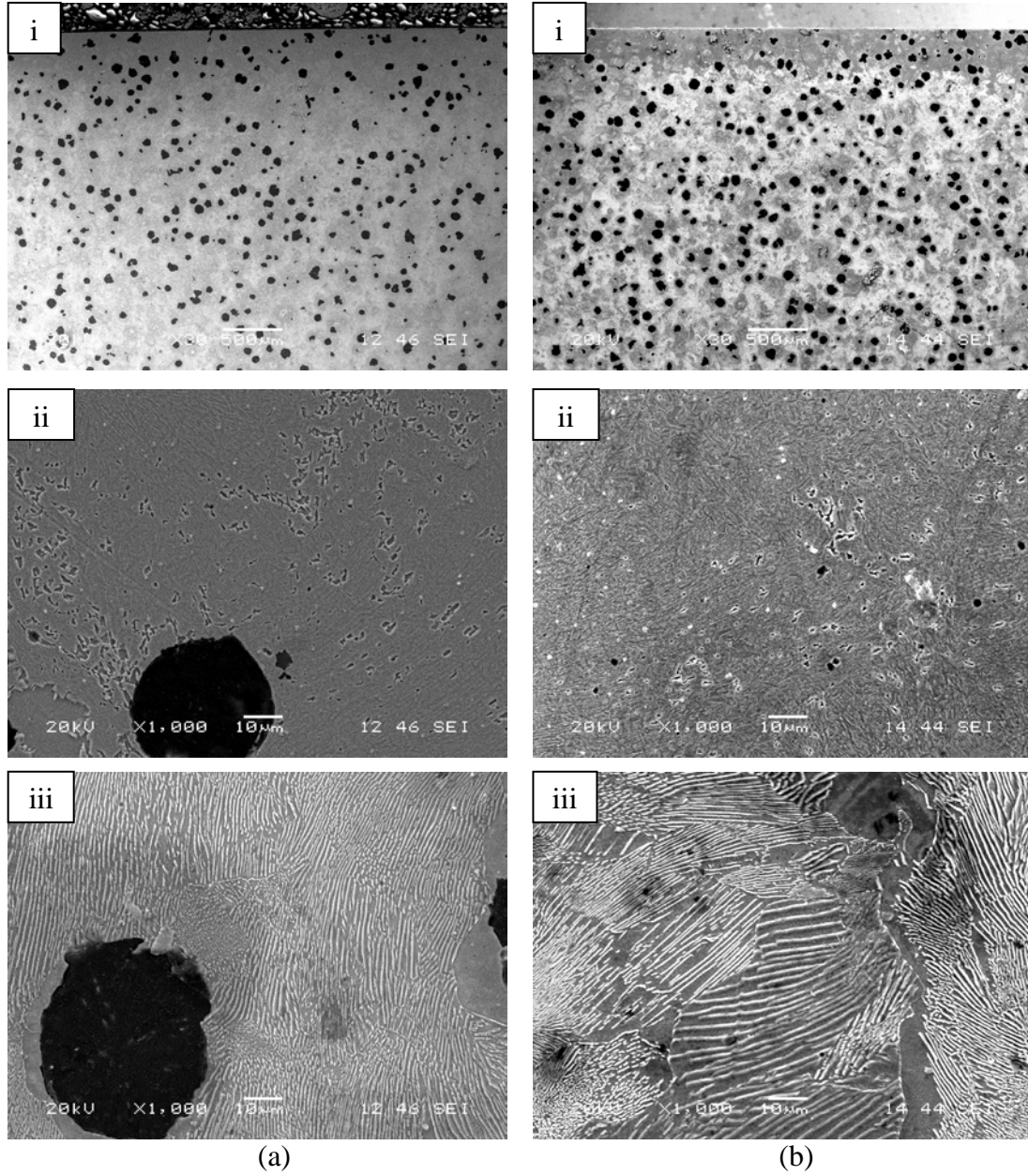
Şekil 6.9 (a) ve Şekil 6.9 (b)'de modifikasyon sonrası 4 nolu ve 4T nolu numunelerin SEM mikroyapıları görülmektedir. En düşük yüksek voltaj süresinin uygulandığı 4 nolu numunede, faz dönüşümlerinin en yetersiz olduğu daha önce ki bölümde detaylı olarak bahsedilmiştir. SEM görüntüsü bir önceki bölümde alınan sonuçları doğrulamaktadır. EPT işlemi sonrası yüzeyde grafit küreleri bozunmamıştır. Yüzeyde homojen bir martenzitik dönüşüm sağlanamamıştır. EPT sonrası temperlenen numuneye ait SEM görüntüleri sırası ile Şekil 6.9 (b)'de verilmiştir.



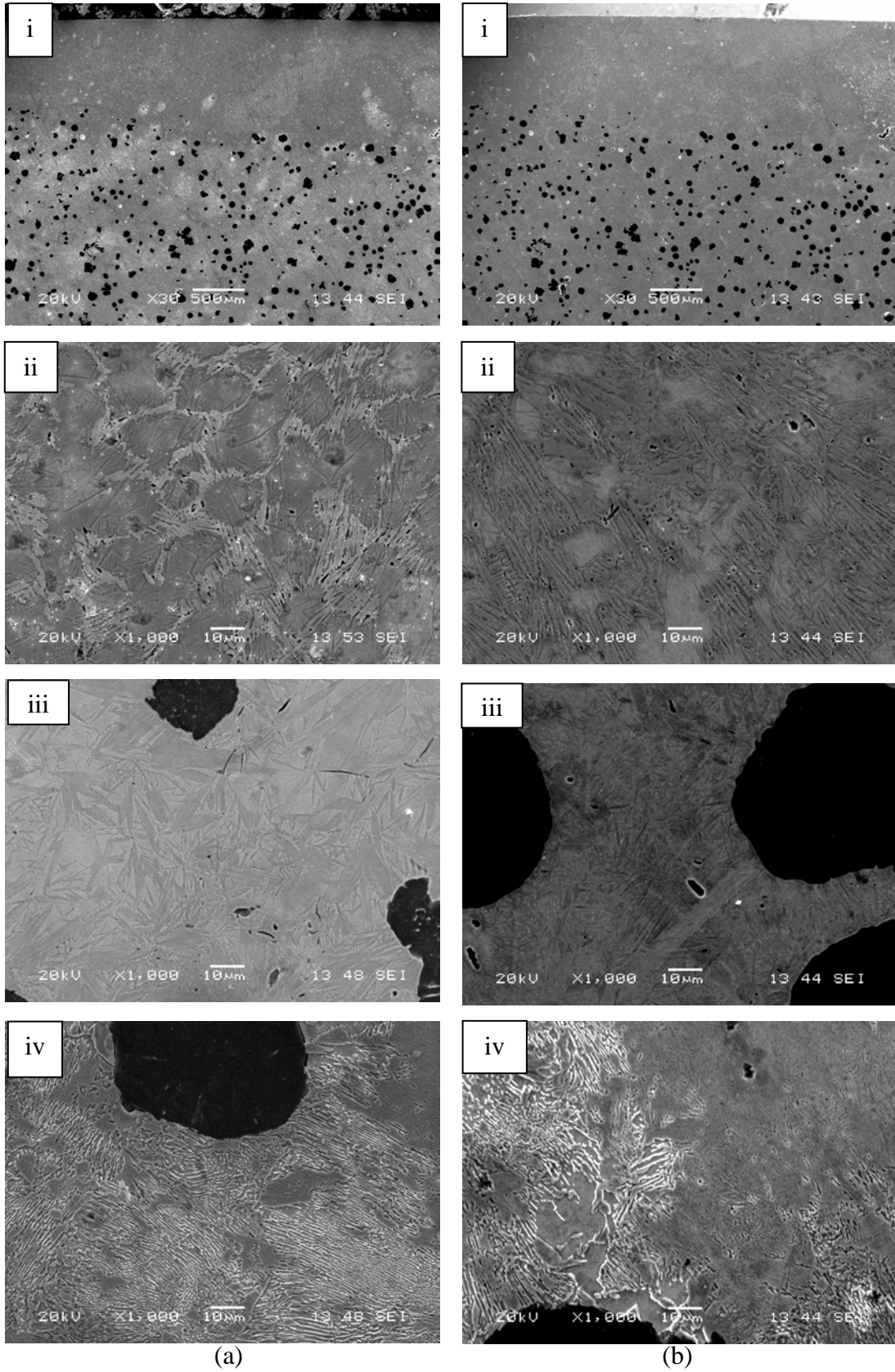
Temperleme işlemi tüm numunelerde olduğu gibi sertleştirilmiş bölgede değişime neden olmuştur.

3 nolu ve 3T nolu numunelerin SEM görüntüleri sırası ile Şekil 6.10 (a) ve Şekil 6.10 (b)'de verilmiştir. Artan termal çevrim sayısı ve yüksek voltaj süresi ile yüzeyde oluşan katmanların değiştiğini daha önceki bölümde söylemiştik. Yüksek termal çevrimle modifiye edilen numune yüzeyinde ergimiş bölge elde edilmiştir. Numunenin genel görüntüsünün verildiği Şekil 6.10 (a)(i)' de maksimum noktada 1000µm'ye kadar grafit kürelerinin ergidiği görülmektedir. Ergimiş bölgeden yüksek büyütmede çekilen görüntü tabakayı daha net bir şekilde vermektedir (Şekil 6.10 (a)(ii)). Bu bölge östenit dendritlerden ve martenzit yapısından oluşmaktadır. Oluşan bu dendritik yapının kolları yeniden katılaşma esnasında soğuma hızına bağlı olarak değişmektedir. SEM incelemelerinde dendritlerin aralarında martenzit yapısının olduğu görülmektedir [94]. Yüzeyden altlık malzemeye doğru gidildikçe grafit küreleri ve martenzitik dönüşüm görülmüştür (Şekil 6.10 (a)(iii)). SEM görüntülerinde martenzit oluşumunun çok net görüldüğü belirlenmiş olup martenzit iğnelerinin daha belirgin olduğu görülmektedir.

Şekil 6.10 (b)'de 3T nolu numunenin SEM görüntüleri verilmiştir. SEM incelemelerinde modifikasyon bölgesinde ergimiş bölgede ve sertleştirilmiş bölgede değişim görülmüştür. Ergimiş bölgede dendritlerin kabalaştığı görülmüştür. Temperleme işlemi sonrası diğer numunelere benzer martenzit yapısının iğnemsî formunu kaybettiği, iğne uçlarının yuvarlaklaştığı ve yapıda daha ince temperlenmiş martenzit oluşumuna neden olduğu görülmüştür.



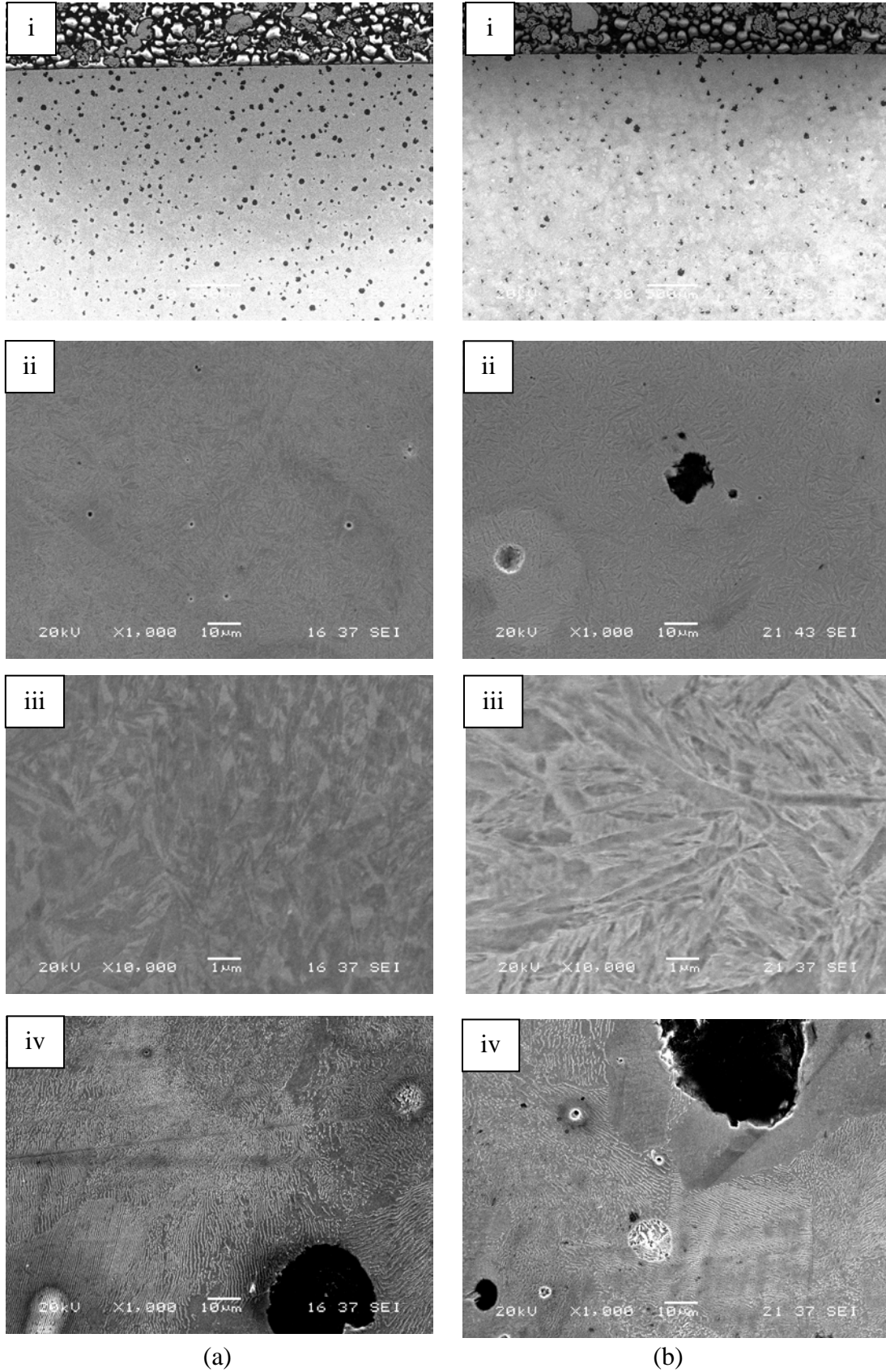
Şekil 6.9. (a) Modifikasyon sonrası 4 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 4T nolu numunenin SEM görüntüleri ( i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme)



Şekil.6.10. (a) Modifikasyon sonrası 3-6 Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası 3T-6T nolu numunenin SEM görüntüleri ((i) Ergimiş bölge,(ii) Sertleştirilmiş bölge, (iii) Geçiş bölgesi, (iv) Altlık malzeme)

Şekil 6.11 (a) ve Şekil 6.11 (b)'de sırası ile indüksiyonla sertleştirilen KGDD ve modifikasyon sonrası temperlenmiş KGDD numunelerin SEM görüntüleri görülmektedir. İndüksiyonla sertleştirme işleminde yüzeyde kısmen ergime görülmüştür. Sıcaklık ötektik noktaya geldiğinde ötektik reaksiyon başlamıştır. Hızlı soğuma esnasında yüzeye yakın bölgede yer yer grafit küreleri bozunmuş ve küre şeklini kaybetmiştir. 3 nolu numunede olduğu gibi belli bir tabakada tamamen yok olmamıştır. Modifikasyon sonrası yüzeye yakın yerde daha iğnemsiz martenzitler elde edilmiştir ve Şekil 6.11(a)(ii)'de çok net görülmektedir. İndüksiyon işlemi sırasında, östenit matris grafit nodüllerden gelen karbonlarca zenginleşmeye başlar. Karbon oranının yükselmesi martenzit dönüşümünün daha iğnemsiz olmasına neden olmaktadır. Yüzeyden altlığa doğru gidildikçe elde edilen martenzitin kabalaştığı görülmüştür.

Şekil 6.11 (b)'de indüksiyonla sertleştirme işlemi sonrası temperlenmiş KGDD numunesinin (İ-T nolu) SEM görüntüleri verilmiştir. SEM incelemelerinde temperleme işlemi sonrası elde edilen martenzit yapısının iğnemsiz yapısının bozulduğu ve modifikasyon bölgesinin değişime uğradığı görülmektedir.

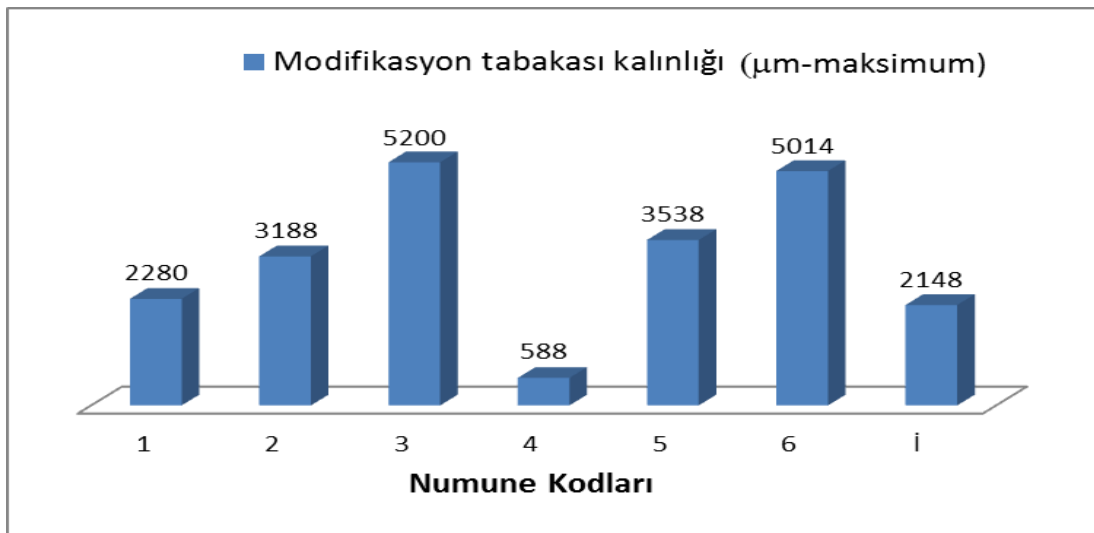


(a) (b)

Şekil 6.11. (a) Modifikasyon sonrası İ Nolu numunenin ve (b) Modifikasyon + Temperleme sonrası İ-T nolu numunenin SEM görüntüleri ( (i) Sertleştirilmiş bölge, (ii) Geçiş bölgesi, (iii) Altlık malzeme)

### 6.1.3. Modifikasyon tabakası kalınlıkları

Farklı çevrim sayısı ve yüksek voltaj sürelerinde Elektrolitik Plazma Teknolojisi (EPT) yöntemiyle Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) malzemelerinin yüzeylerinde oluşturulan modifikasyon tabakasının, indüksiyonla sertleştirilen KGDD malzemelerinin modifikasyon tabakası kalınlıkları stereo mikroskobu ile ölçülmüştür. Maksimum modifikasyon tabakası kalınlıklarının, termal çevrim sayısına ve yüksek voltaj işlem süresine bağlı olarak değişimi ve indüksiyonla sertleştirilen KGDD numunenin tabaka kalınlığı Şekil 6.12’de verilmiştir. Modifikasyon sonrası temperleme işlemi modifikasyon tabakası kalınlığı sonuçlarını etkilemediği için Şekil 6.12’de belirtilmemiştir.



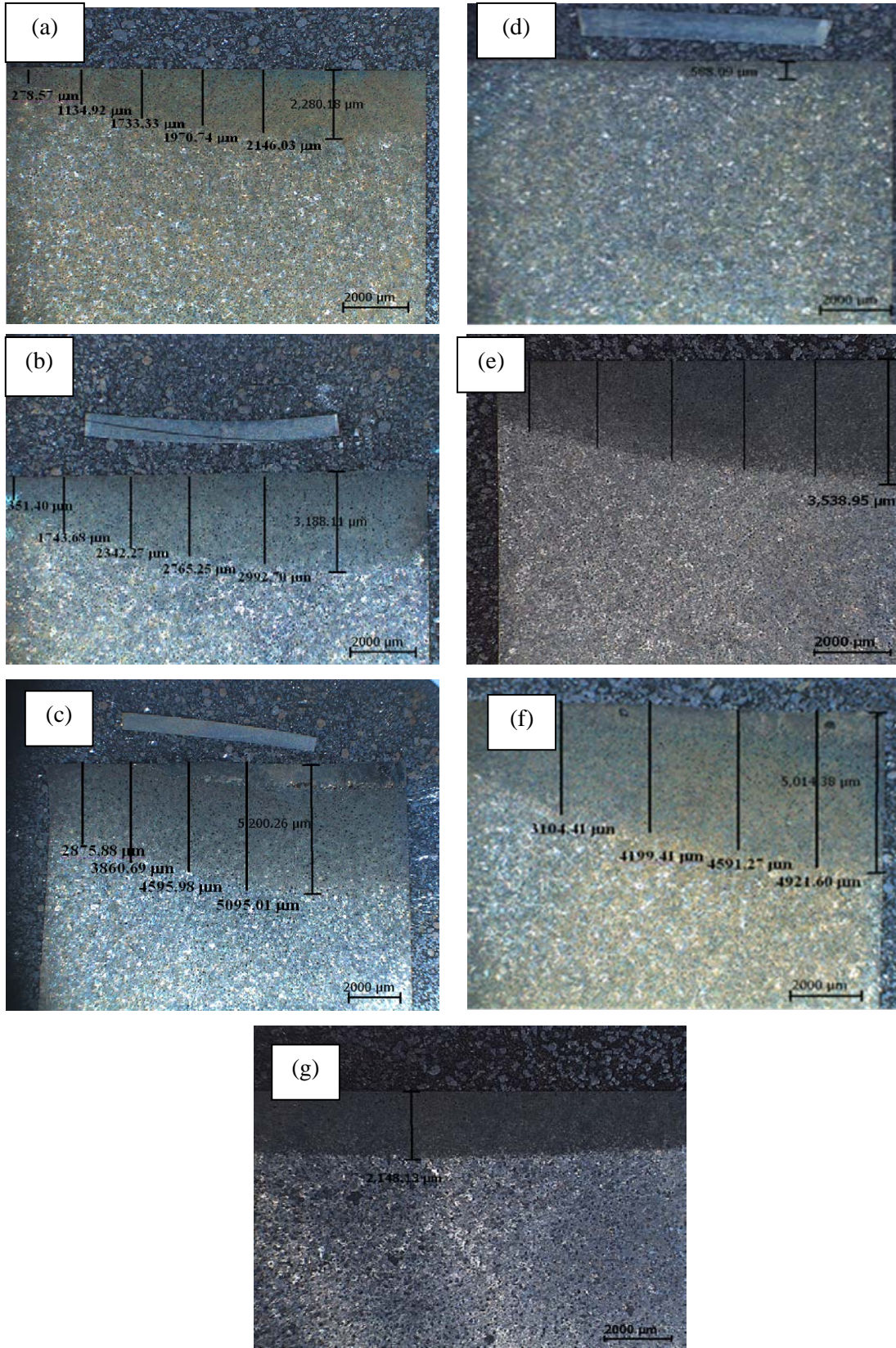
Şekil 6.12. EPT parametrelerine bağlı olarak modifikasyon tabakası kalınlık değerleri

Şekil 6. 13’ de sırasıyla modifiye edilen numunelerin stereo mikroskopla çekilen tabaka kalınlıkları görüntüleri verilmiştir. Şekil 6.13 (a)’ da 1 nolu numuneye ait modifikasyon tabakası değişimi verilmiştir. Termal çevrim sayısının en düşük olduğu 1 nolu numunede maksimum tabaka kalınlığı 2280 µm iken bu kalınlık kenarlara doğru gittikçe azalmaktadır. 2 nolu numunenin tabaka kalınlığındaki değişim Şekil 6.13 (b)’de verilmiştir. 2 nolu numunede maksimum modifikasyon tabakası kalınlığı 3188 µm ölçülmüştür. Termal çevrimin artmasıyla modifikasyon tabakası kalınlığı artış göstermiştir. 3 nolu numunenin modifikasyon tabakası kalınlığındaki değişimi Şekil 6.13 (c)’de görülmektedir. 3 nolu numunede maksimum tabaka kalınlığı 5200

µm olarak ölçülmüştür. En yüksek modifikasyon tabakası derinliği 3 nolu numunede elde edilmiştir. Artan termal çevrimle işlem süresinin 36 sn'ye yükselmesi ile yüzeyde oluşan dönüşüm sıcaklığın artması, numune yüzeyinden daha derinleri etkilemesi için yeterli modifikasyon süresini sağlamaktadır. Artan termal çevrim sayısı ile dikkat edilmesi gereken bir husus, bu çevrim sayısının sonsuz olmadığıdır. Termal çevrim sayısını ve işlem süresini arttırdığımızda yüzeyde kısmi ergime ve deformasyona rastlanmıştır. Optimum parametrelerde tabakanın kalınlığının artacağı ve daha homojen hale geleceği yapılan yüzey çalışmalarından görülmüştür.

Yüksek voltaj süresinin değiştirildiği 4, 5 ve 6 nolu numunelerin modifikasyon tabakası kalınlıkları Şekil 6.13 (d) , Şekil 6.13 (e) ve Şekil 6.13 (f)' de sırası ile verilmiştir. Yüksek voltaj süresinin en düşük olduğu 4 nolu numunede modifikasyon tabakası kalınlığı diğer numunelerde olduğu gibi net bir şekilde stereo mikroskoptan alınamamıştır. Yüzeyde geçiş bölgesi tabaka kalınlığının daha derin olduğu alınan sıra sertlik profilleri sonrasında karar verilmiştir. Termal çevrim sayısında olduğu gibi yüksek voltaj süresinin de artması toplam işlem süresinide arttıracığından, yüzey dönüşüm sıcaklığında 5 ve 6 nolu numunelerde artış görülmüştür. 5 nolu numunede maksimum modifikasyon tabakası derinliği 3538 µm, 6 nolu numunede maksimum tabaka derinliği 5014 µm ölçülmüştür. Bu durum diğer numunelere benzer şekilde modifikasyon tabakası kalınlığının artan yüksek voltaj süresi ile artmasına neden olmuştur. Merkezden kenarlara doğru gidildikçe tabaka kalınlığı azalmaktadır. Bu durum EPT tabancasının şekli ve şiddeti ile açıklanabilir. Tabancanın eliptik şeklinden dolayı kenar bölgede yüzeyin sıcaklığı düşüktür. Bu etkilerden dolayı sıcaklıktaki önemli miktardaki düşüş modifikasyon bölgesinin dış sınırlarında dönüşüm için yeterli sıcaklık sağlanamadığından oluşan modifikasyon görüntüsü yarım ay şeklini almıştır [3,11,94].

Şekil 6.13(g)'de indüksiyonla sertleştirilen numunenin tabaka kalınlığı görüntüsü verilmiştir. Modifikasyon tabaka kalınlığı İ nolu numunede 2148 µm ölçülmüştür. Şekilden de görüldüğü üzere tabaka kalınlığı EPT işleminden farklı olarak yüzeyde eşit bir dağılım göstermiştir.

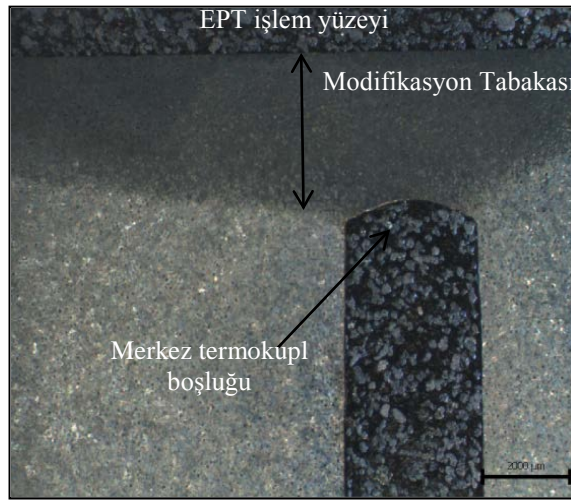


Şekil.6.13. Modifikasyon sonrası KGDD numunelerinin tabaka kalınlıkları stereo mikroskop görüntüleri ( (a) 1 nolu, (b) 2 nolu, (c) 3 nolu, (d) 4 nolu, (e) 5 nolu, (f) 6 nolu, (g) 7 nolu)



## 6.2.Yüzey Sıcaklığı

Farklı termal çevrim ve yüksek voltaj sürelerinde modifiye edilen numunelerin PICOLOG programı kullanılarak gerçekleştirilen yüzey sıcaklığı ölçümlerinin stereo mikroskop görüntüsü Şekil 6.14'de görülmektedir. Tablo 5.2'de belirtilen işlem parametrelerinin yüzey sıcaklığı ölçüm grafiklerinin sonuçları aşağıda sırası ile verilmiştir. Sıcaklık değerleri Bölüm 5.3' de bahsedildiği üzere numune yüzeyinden belli aralıklarla açılmış iki farklı delikten alınacak şekilde belirlenmiştir.



Şekil 6.14. EPT sonrası numunenin sıcaklık ölçümünde stereo mikroskop görüntüsü

EPT parametrelerine bağlı olarak PICOLOG programı yardımıyla ölçülen maksimum yüzey sıcaklık değerleri Tablo 6.1 ve işlem süresine bağlı olarak yüzey sıcaklığı profilleri Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da görülmektedir.

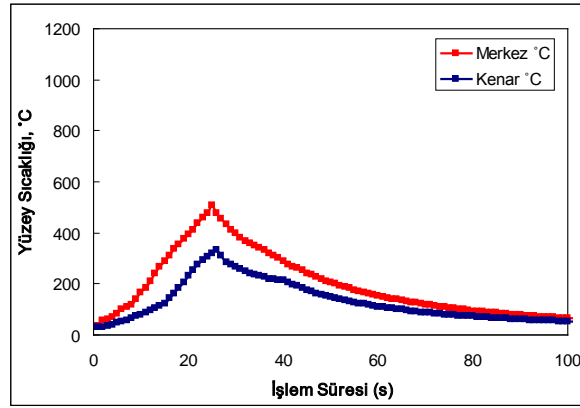
Yapılan ölçümler sonucunda 1, 2, 3 nolu numunelerin alınan sıcaklık profilleri Şekil 6.15'de verilmekte olup termal çevrimin en düşük olduğu 1 nolu numunede maksimum yüzey sıcaklığı modifiye yüzeyin merkezinde ve kenarlarında 24sn sonunda sırasıyla 510 °C ve 350 °C olarak ölçülmüştür. 2 ve 3 nolu numunelerin sırası ile ölçülen yüzey sıcaklık profilleri Şekil 6.15 (b) ve Şekil 6.15 (c)' de verilmektedir. Şekillerde artan termal çevrim süresine bağlı olarak yüzey sıcaklarında bir artışın meydana geldiği görülmektedir. Benzer şekilde, 2 nolu numune için maksimum yüzey sıcaklığı modifiye yüzeyin merkezinde ve kenarlarında 800 °C ve 500 °C iken 3 nolu numunede merkez ve kenar maksimum yüzey sıcaklığı 1100 °C ve 600 °C olarak ölçülmüştür. Yüzey sıcaklıklarındaki bu artış aynı zamanda

modifikasyon tabakası derinliğindeki artışın sebebini de açıklamaktadır. Bu durumda belirlenen sıcaklık değerlerinin ışığında modifikasyon işlemi sonucunda oluşan martenzit dönüşümü için gerekli dış yüzey sıcaklarına ulaşılabildiği sonucuna varılabilmektedir.

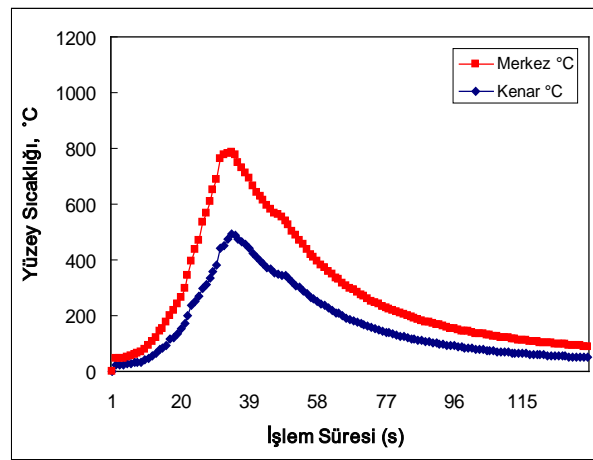
Tablo 6.1. Modifikasyon işlemi sonrası maksimum yüzey sıcaklık değerleri

Numune Kodları	Maksimum Merkez Sıcaklık (°C)	Maksimum Kenar Sıcaklık (°C)
1	510	350
2	800	500
3	1100	600
4	465	290
5	720	380
6	1050	600
i	850-920°C	

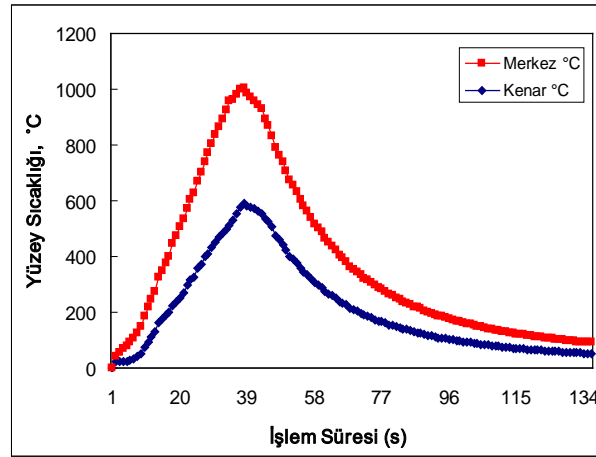
Yüksek voltaj süresinin değiştirildiği 4, 5 ve 6 nolu numuneler için alınan yüzey sıcaklık profillerindeki değişim Şekil 6.16' da sırası ile verilmiştir. EPT işlem süresi 1 nolu numune ile aynı (24s) olmasına rağmen 4 nolu numunede alınan yüzey sıcaklık değerleri ortalama 50 °C düşüş görülmektedir. Maksimum merkez ve kenar deliklerden alınan sıcaklık değerleri sırasıyla 465 °C ve 290 °C ölçülmüştür. 5 nolu numune için bu değerler 720 °C ve 380 °C iken 6 nolu numune için maksimum yüzey sıcaklık değerleri 1050 °C ve 600 °C ölçülmüştür. Değişen yüksek voltaj değeri deney numunelerinde yüzey sıcaklığında gözle görülür farklılıklara yol açmamıştır. Uygulanan tüm işlem parametreleri için martenzitik faz dönüşümü için gerekli yüzey sıcaklığı sağlanmış olup modifikasyon tabaka kalınlığında ve martenzit yapısında farklılıklara neden olmuştur.



(a)

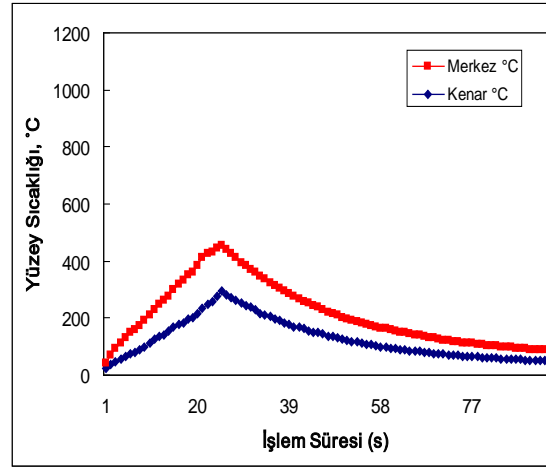


(b)

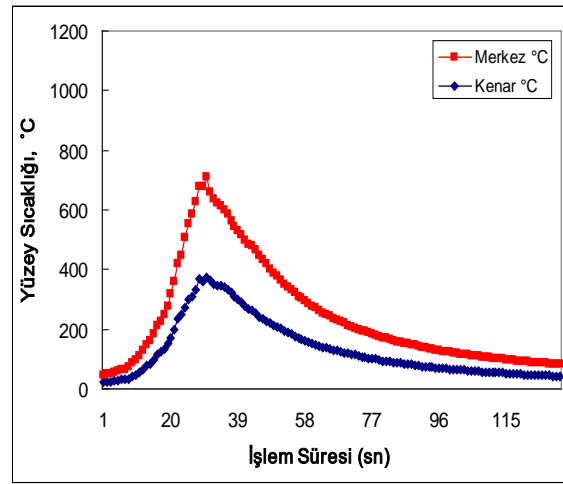


(c)

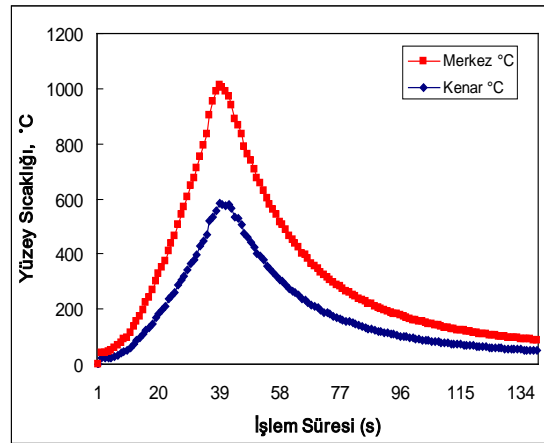
Şekil 6.15. Farklı termal çevrim sayılarında modifiye edilmiş numunelerin yüzey sıcaklık profilleri ((a) 1 nolu (b) 2 nolu (c) 3 nolu)



(a)



(b)



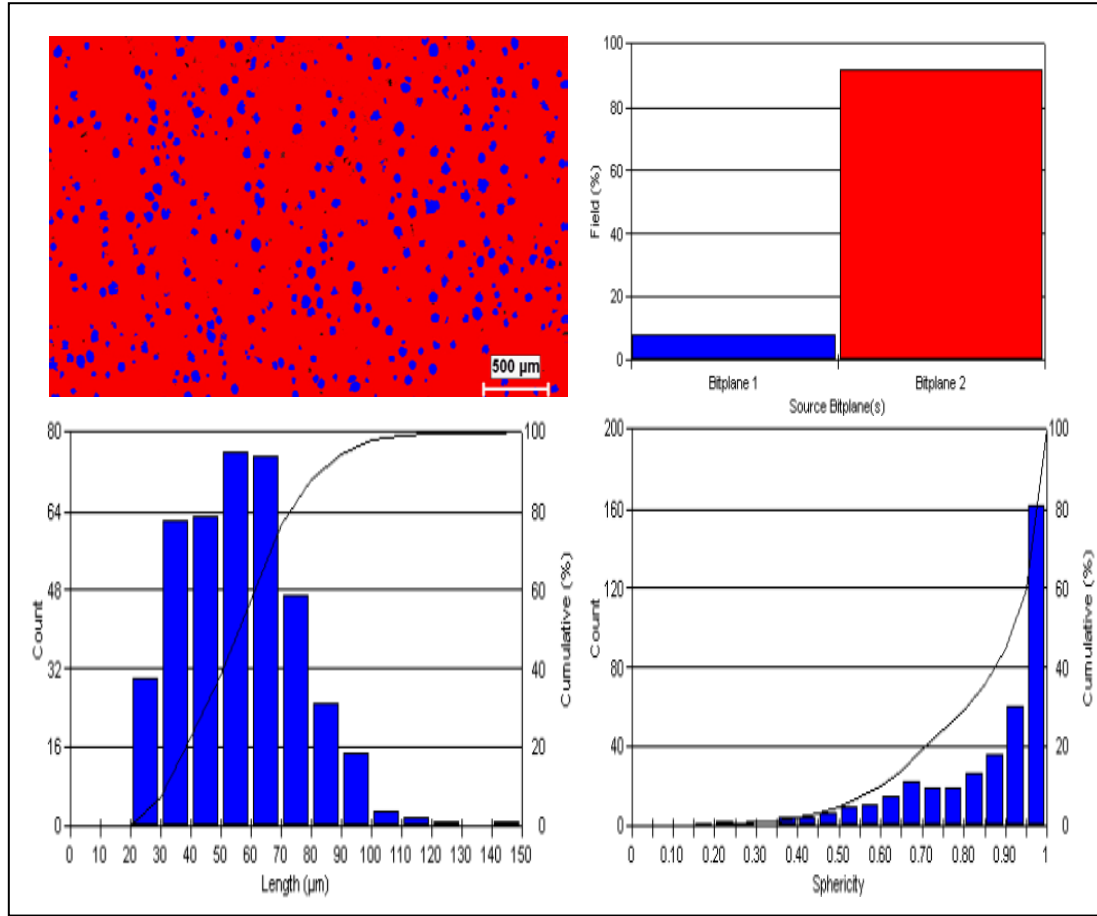
(c)

Şekil 6.16. Farklı yüksek voltaj sürelerinde modifiye edilmiş numunelerinin yüzev sıcaklık profilleri ((a) 4 nolu (b) 5 nolu (c) 6 nolu)

### 6.3. Görüntü Analizi

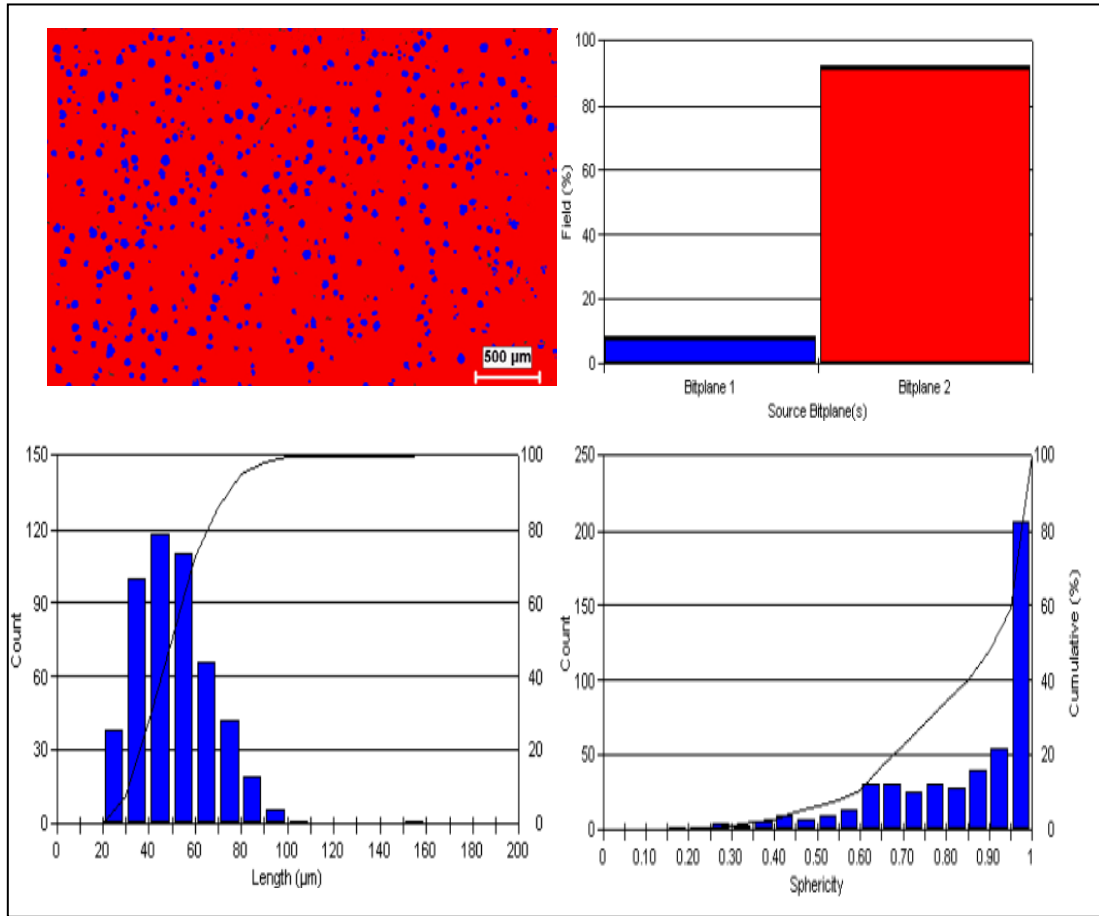
#### 6.3.1. Grafit karakterizasyonu

KGDD'nin mikroyapısal analizi, optik ve taramalı elektron mikroskobu yanısıra, Nikon Eclipse L150 A marka optik mikroskoba bağlı çalışan Clemex Vision Lite imaj analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Analiz neticesinde, KGDD numunesinin EPT modifikasyonu öncesi ve sonrası, grafit/matris yüzde oranı, ortalama grafit çapı ve grafit kürelerinin ortalama küresellik oranları hesaplanmıştır. Uygulanan yüzey işlemlerine göre yapılan analiz sonuçları aşağıda sırasıyla verilmiştir. Şekil 6.17 'de standartlara uygun olarak dökülmüş KGDD için modifikasyon işlemi öncesi alınan sonuçlar toplu şekilde verilmiştir. Analiz sonrası grafit yüzdesi ortalama % 8.1 (% 91.8-matris) olarak ölçülmüştür. Ortalama grafit çapı 56,5  $\mu\text{m}$  ve küresellik yüzdesi ortalama % 85 hesaplanmıştır.



Şekil 6.17. İşlemsiz numunenin alana göre grafit dağılımı – ortalama grafit çapı ve yüzde küresellik histogramı

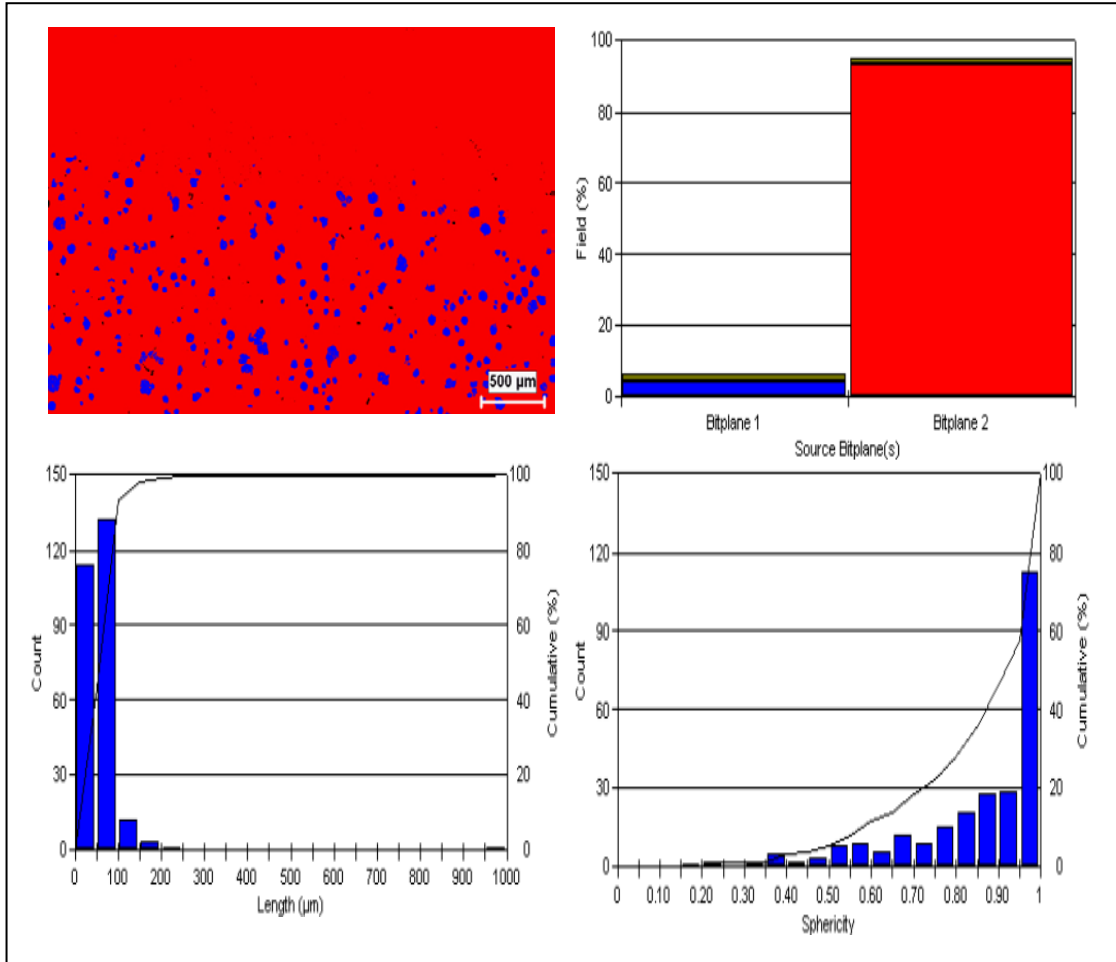
Şekil 6.18’ da EPT ile modifiye edilmiş 1 nolu numuneye ait grafit karakterizasyonu analizleri görülmektedir. Analiz sonrası grafit yüzdesi ortalama % 8.6, ortalama grafit çapı 72,8  $\mu\text{m}$  ve küresellik yüzdesi ortalama % 81 hesaplanmıştır. Standartlara uygun olarak dökülmüş KGDD için alınan küresellik yüzdesi ve grafit yüzdesi değerleri 1 nolu numune ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. 1 nolu numunede alınan kesit görüntüsünde ortalama grafit çapı % 28,4 oranında daha yüksek çıkmıştır.



Şekil 6.18. 1 nolu numunenin alana göre grafit dağılımı – ortalama grafit çapı ve yüzde küresellik histogramı

Şekil 6.19’ da EPT ile modifiye edilmiş, termal çevrim sayısı maksimum olan 3 nolu numuneye ait grafit karakterizasyonu analizleri görülmektedir. Analiz sonrası grafit yüzdesi ortalama % 6.4, ortalama grafit çapı 61,8  $\mu\text{m}$  ve küresellik yüzdesi ortalama % 85 hesaplanmıştır. 3 nolu numunede grafit yüzdesi işlemsiz numuneye göre % 20,9 oranında azalmıştır. Daha önceki mikroyapı incelemelerinde bahsedildiği gibi

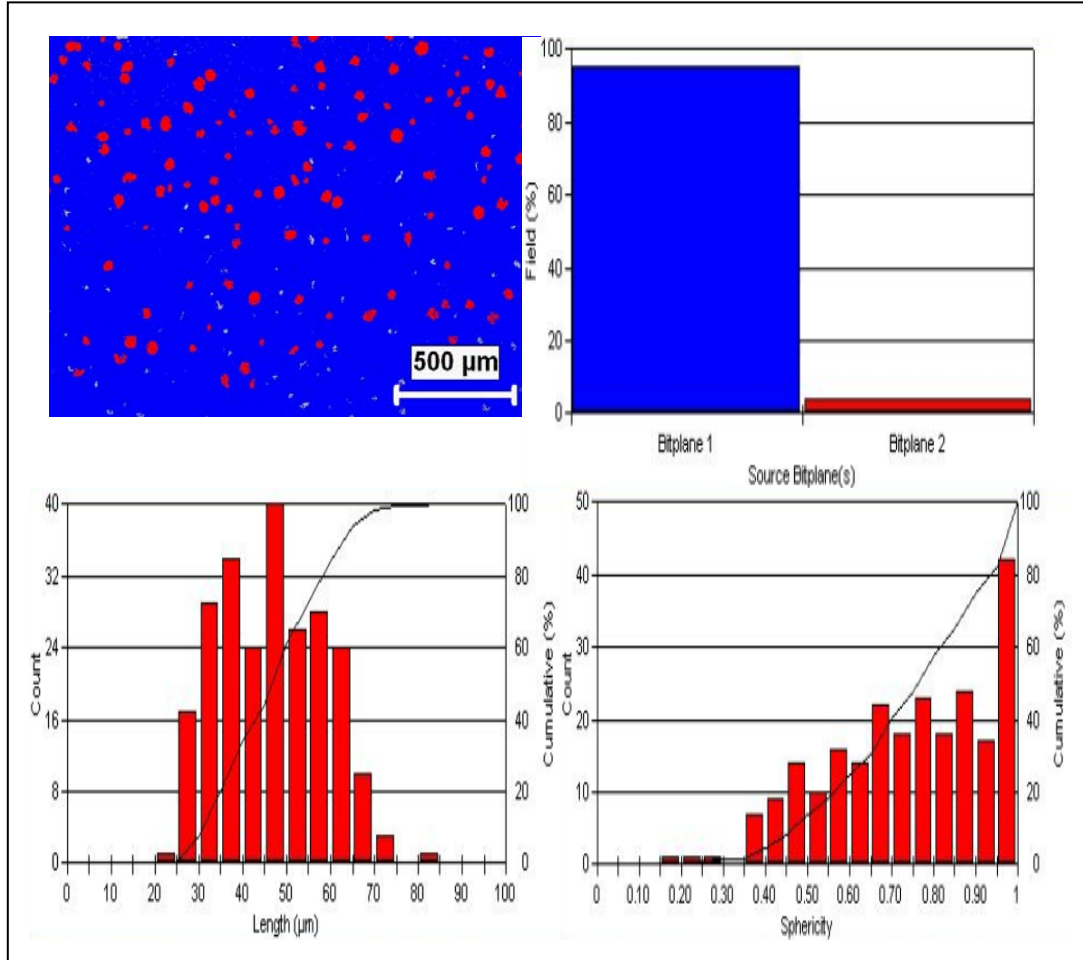
yüzeyde maksimum 1000  $\mu\text{m}$  derinlikte grafit kürelerinin ergidiği belirtilmiştir. Grafit yüzdesindeki azalma mikroyapı sonuçlarını desteklemektedir.



Şekil 6.19. 3 nolu numunenin alana göre grafit dağılımı – ortalama grafit çapı ve yüzde küresellik histogramı

Şekil 6.20’ de indüksiyonla sertleştirilen numune için alınan grafit karakterizasyonu sonuçları toplu şekilde verilmiştir. Analiz sonrası grafit yüzdesi ortalama % 4.1 olarak ölçülmüştür. Ortalama grafit çapı 46  $\mu\text{m}$  ve küresellik yüzdesi ortalama % 74 hesaplanmıştır. İndüksiyon işlemi sonrası grafit yüzdesi işlemsiz numuneye göre % 49,3 oranında azalma görülmektedir. Yalnız bu azalma 3 nolu numunede olduğu gibi belli bir alanda olmamıştır. İndüksiyonla sertleştirilen numuneler kısmi olarak yüzeyde ergime göstermektedir. Küresellik oranı ve küresellik çapı da işlemsiz numuneye ve EPT ile modifiye edilmiş numunelere göre de azalma göstermiştir.

Modifiye edilmiş tüm numunelerin grafit karakterizasyon analizi sonucu küresellik yüzdesi, grafit yüzdesi ve ortalama grafit çapı Tablo 6.2’de verilmiştir. EPT ile modifiye edilmiş 2 nolu numunede analiz sonrası grafit yüzdesi ortalama % 7.3, ortalama grafit çapı 51,2  $\mu\text{m}$  ve küresellik yüzdesi ortalama % 83 ölçülmüştür.



Şekil 6.20. 1 nolu numunenin alana göre grafit dağılımı – ortalama grafit çapı ve yüzde küresellik histogramı

Farklı yüksek voltaj sürelerinde modifiye edilen 4, 5 ve 6 nolu numuneler için Clemex Vision Lite imaj analiz yazılımı kullanılarak aynı şekilde hesaplanmış olan veriler Tablo 6.2’de özetlenmiştir. 4, 5 nolu numuneler toplam modifikasyon süreleri aynı olan sırası ile 1 ve 2 nolu numunelerle benzer sonuçlar göstermektedir. 4 nolu numunede grafit yüzdesi ortalama % 8.6, ortalama grafit çapı 52,6  $\mu\text{m}$  ve küresellik yüzdesi ortalama % 87, 5 nolu numunede grafit yüzdesi ortalama % 7.2, ortalama grafit çapı 64,7  $\mu\text{m}$  ve küresellik yüzdesi ortalama % 80 olarak ölçülmüştür. 6 nolu numunede ise grafit yüzdesi ortalama % 5.7, ortalama grafit çapı 61,8  $\mu\text{m}$  ve küresellik yüzdesi ortalama % 85 olarak ölçülmüş olup işlemsiz numuneye göre



%29,3 oranında grafit yüzdesinde azalma görülmüştür. Artan yüksek voltajın etkisi ile grafit kürelerinin ergidiği bu yüzden azalma gösterdiği mikroyapı bölümde bahsedilmiştir. Alınan sonuçlar bu durumu desteklemektedir.

Tablo 6.2. Bu çalışmada kullanılan küresel grafitli dökme demirin ve yüzeyleri modifiye edilmiş numunelerin mikroyapısal özellikleri

Numune Kodu	Grafit Dağılım Yüzdesi (%)	Grafit Çapı ( $\mu\text{m}$ )	Küresellik Oranı (%)
İşlemsiz KGDD	8,1±0,5	56,5	85
Modifiye Edilmiş KGDD	1	8,6±0,5	72,8
	2	7,3±0,5	51,2
	3	6,4±0,5	61,8
	4	8,6±0,5	52,6
	5	7,2±0,5	64,7
	6	5,7±0,5	61,8
İndüksiyonla sertleştirilmiş KGDD (İ)	4,1±0,5	46	74
Modifikasyon+Temperlenmiş KGDD	1T	8,4±0,5	58
	2T	7,3±0,5	41
	3T	5,7±0,5	53
	4T	8,2±0,5	33,6
	5T	7,1±0,5	42,2
	6T	5,4±0,5	59
İndüksiyon+Temperlenmiş KGDD (İ-T)	4,9±0,5	42,8	54

EPT sonrası temperlenen numune gruplarının sırasıyla grafit/matris yüzde oranı, ortalama grafit çapı ve grafit kürelerinin ortalama küresellik oranları benzer şekilde hesaplanmıştır. Tablo 6.2’de temperlenmiş numunelerin grafit karakterizasyonu sonuçları özetlenmiştir. Temperlenmiş 1T, 2T, 3T, 4T, 5T ve 6T, İ-T nolu numunelerin küresellik oranları temperlenmemiş numunelerle karşılaştırıldığında benzer sonuçlar verdiği görülmüşken, grafit çaplarında ve grafit dağılımlarında

azalma görülmüştür. Meydana gelen bu değişimin aşınma davranışına ve sertliğe olan etkisi ilerleyen bölümlerde bahsedilecektir.

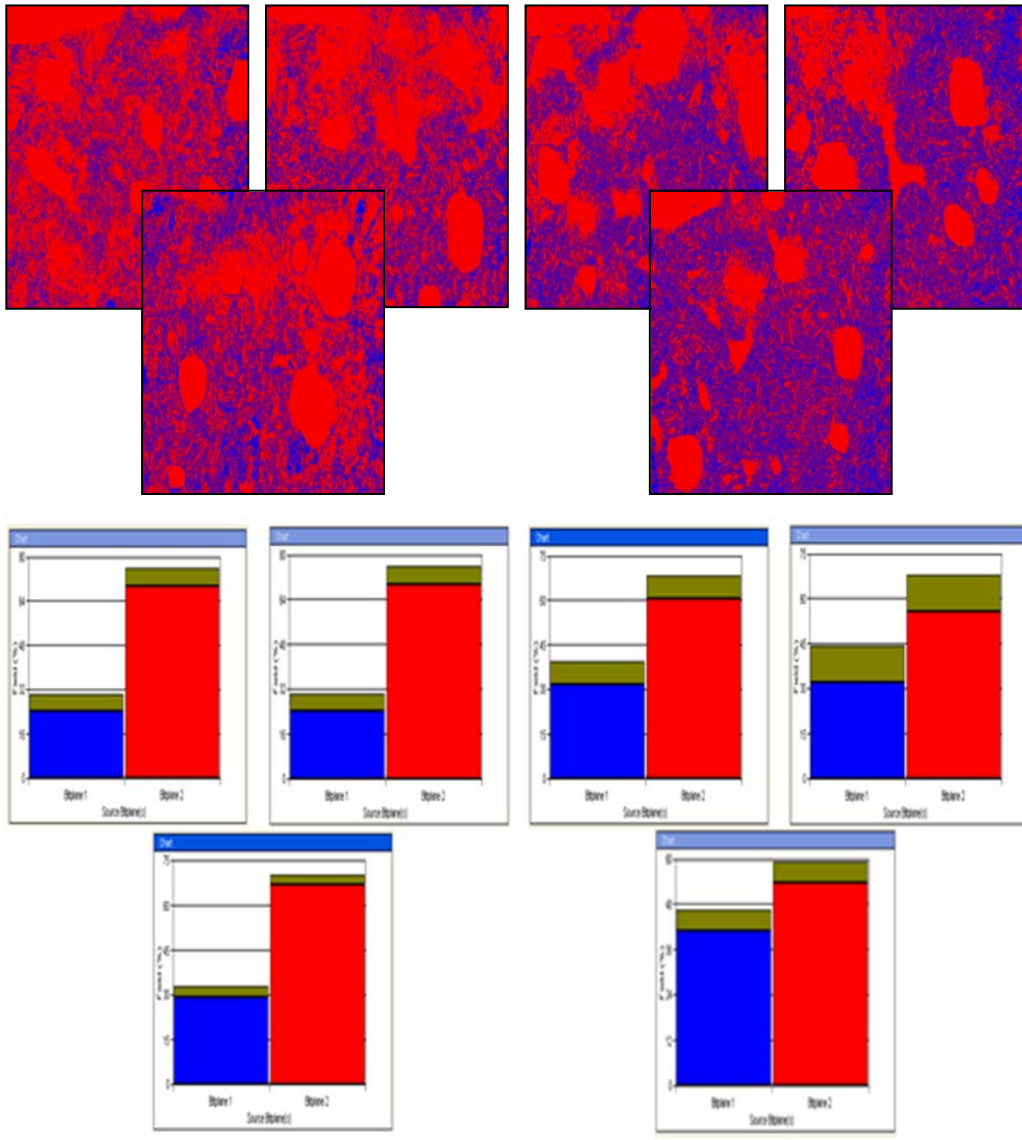
### 6.3.2. Martenzit hacim oranları

Farklı çevrim sayısı ve yüksek voltaj sürelerinde Elektrolitik Plazma Teknolojisi (EPT) yöntemiyle Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) malzemelerinin yüzeylerinde oluşturulan modifikasyon tabakasının, indüksiyonla sertleştirilen KGDD malzemelerinin Nikon Eclipse L150 A marka optik mikroskoba bağlı çalışan Clemex Vision Lite görüntü analiz yazılımı ile yüzeyde martenzit hacim oranı (%MHO) hesaplanmıştır.

Şekil 6.21' de 1 nolu numunenin yüzeyinde oluşan martenzit hacim oranları dağılımları detaylı olarak verilmiştir. Modifikasyon bölgesi merkezinden kenar bölgeye doğru alınan optik mikroskop görüntüleri yardımı ile martenzit oranları hesaplanmıştır. Merkezde martenzit yüzdesi daha yüksekken kenara doğru gidildikçe oranda azalma görülmüştür. Bu durum EPT tabancasının eliptik şeklinden dolayı kenar bölgede yüzey sıcaklığının daha düşük olması ve merkezden uzaklaştıkça yüzeyin hızla soğutulamaması ile açıklanmıştır. 1 nolu numune için martenzit hacim oranı ortalama % 30,53 hesaplanmıştır.

Tüm numune grupları için 1 nolu numuneye benzer şekilde hesaplamalar yapılmıştır. Yüzeyden alınan değerlerin ortalaması alınmış ve her numune için MHO hesaplanmıştır. Tablo 6.3 ve Şekil 6.22' de farklı çevrim sayısı ve yüksek voltaj EPT yöntemiyle modifiye edilmiş numunelerin, indüksiyonla sertleştirilen numunenin ve modifikasyon işlemleri sonrası temperlenen numunelerin MHO verilmiştir. Tablo 6.3 'de verilen 2 nolu numunenin MHO % 47,7 ölçülmüştür. Termal çevrim artışına bağlı olarak martenzit hacim oranında artış meydana gelmiştir. Artan termal çevrimle işlem süresinde artacağından martenzitik dönüşüm için çıkılan östenitleme sıcaklığı da artmıştır. Östenitleme süresindeki artışa bağlı olarak martenzit hacim oranında meydana gelen artışın sebebi, süre uzadıkça östenit fazının miktarının artmasına bağlanmaktadır [11,97-101].

3 nolu numunenin MHO % 15,85 olarak ölçülmüştür. Artan termal çevrime bağlı olarak martenzit hacim oranı yüzeyde azalmıştır. Daha önceki mikroyapı incelemeleri bölümünde anlatıldığı gibi termal çevrimin arttığı 3 nolu numunenin yüzeyinde farklı olarak ergimiş tabaka oluşmuştur. Bu tabaka dendritik yapıdan ve dendritlerin aralarında martenzit yapısından oluştuğu belirtilmişti. Ergimiş tabakanın altındaki sertleştirilmiş tabakada martenzit yapısı daha homojen olarak elde edilmiştir. Bu nedenle martenzit hacim oranı yüzeyde daha düşük ölçülmüştür.



Şekil 6.21 1 nolu numunenin martenzit hacim oranı dağılımı

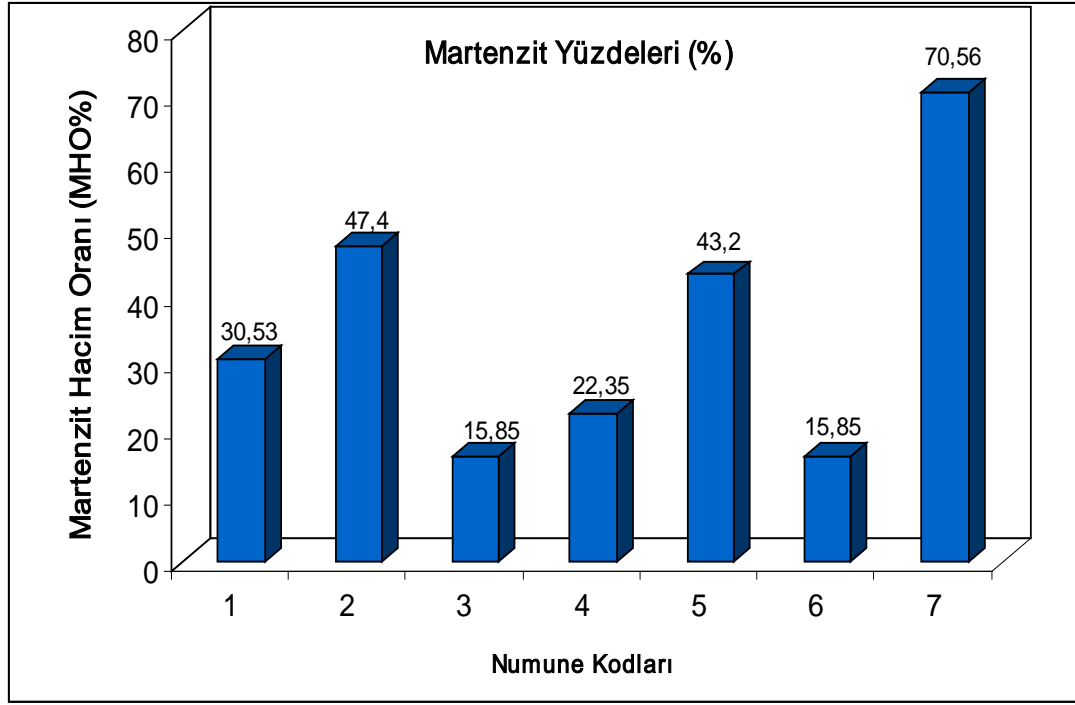
4 nolu numunenin martenzit hacim oranı % 22,35 olarak ölçülmüştür. Yüksek voltaj süresinin en düşük olduğu bu numunede MHO'da azalmıştır. 1 nolu numune ile

toplam işlem süresinin eşit olmasına rağmen MHO'da farklılıklar gözlemlenmiştir. Yüksek voltaj süresinin azalması martenzitik dönüşüm için olmamıştır. Yüzey sıcaklığı bölümündede anlatıldığı gibi yüksek voltaj süresinin düşük olması yüzeyde dönüşüm için homojen ve yeterli sıcaklığın elde edilmesi için yeterli olmamıştır. 5 nolu numunenin martenzit hacim oranı % 43,2 ölçülmüştür. Artan yüksek voltaj süresi MHO'da yaklaşık 2 katlık bir artış göstermiştir. Daha uzun sürede ısıtma martenzitik dönüşümü arttırmış ve mikroyapı incelemelerinde de bahsedildiği gibi yüzeyde daha homojen dağılmasını neden olmuştur.

Tablo 6.3'de verilen 6 nolu numunenin MHO % 15,85 ölçülmüştür. 6 nolu numune 3 nolu numune ile benzer olduğundan, artan yüksek voltaj süresine bağlı olarak numune yüzeyinde farklı olarak ergimiş tabaka oluşmuştur. Ergimiş tabaka dendritik yapıdan ve dendritlerin aralarında martenzit yapısından oluştuğu belirtilmişti. Bu nedenden dolayı artan yüksek voltaj süresi ile martenzit hacim oranı yüzeyde azalmıştır. Ergimiş tabakanın altındaki sertleştirilmiş tabakada martenzit yapısı daha homojen olarak elde edildiği mikroyapı incelemelerinde ele alınmıştı. İndüksiyonla sertleştirilen numunede MHO % 70,56 gibi yüksek bir oran elde edilmiştir. EPT işleminden farklı olarak yüzeyin bir tabancayla modifiye edilmemesi yüzeyde yarım ay şeklinde modifikasyon tabakası değilde homojen kalınlıkta bir tabaka oluşturması MHO'nın daha yüksek ölçülmesine neden olmuştur. Modifikasyon işlemi sonra temperlenen numunelerin MHO'ları da Tablo 6.3'de verilmiştir. Temperleme işleminin martenzit hacim oranlarını değiştirmedeği görülmüştür. Bu durum zaten literatüre paralel olarak da beklenen bir sonuçtur [102,103].

Tablo 6.3. Modifiye edilmiş ve modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin MHO değerleri

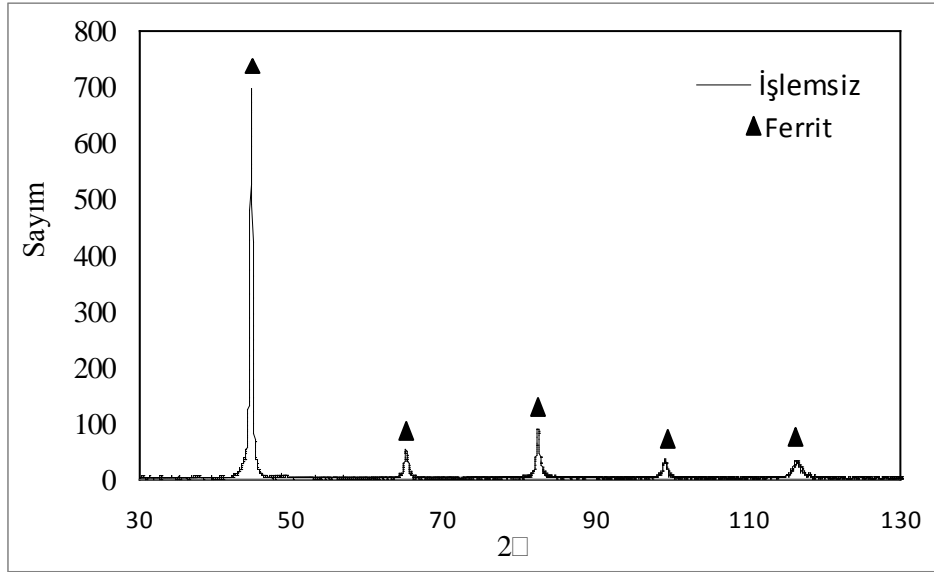
Numune kodları	1	2	3	4	5	6	İ (7)
<b>Martenzit Hacim Oranı (%MHO)</b>	30,53	47,4	15,85	22,35	43,2	15,85	70,56
<b>Martenzit Hacim Oranı (%MHO)/Temperlenmiş</b>	30,53	47,4	15,85	22,35	43,2	15,85	70,56



Şekil 6.22. Modifiye edilmiş numunelerin martenzit hacim oranları değişimi

#### 6.4. X-Işını Analiz Sonuçları

EPT ve indüksiyonla modifikasyon işlemleri sonrasında malzemede oluşan faz dönüşümlerini belirlemek amacıyla x-ışınları difraksiyon analizleri yapılmıştır. Yapılan faz incelemelerinde işlem görmemiş numunede  $\alpha$ -Fe fazının varlığı belirlenmiştir (Şekil 6.23).

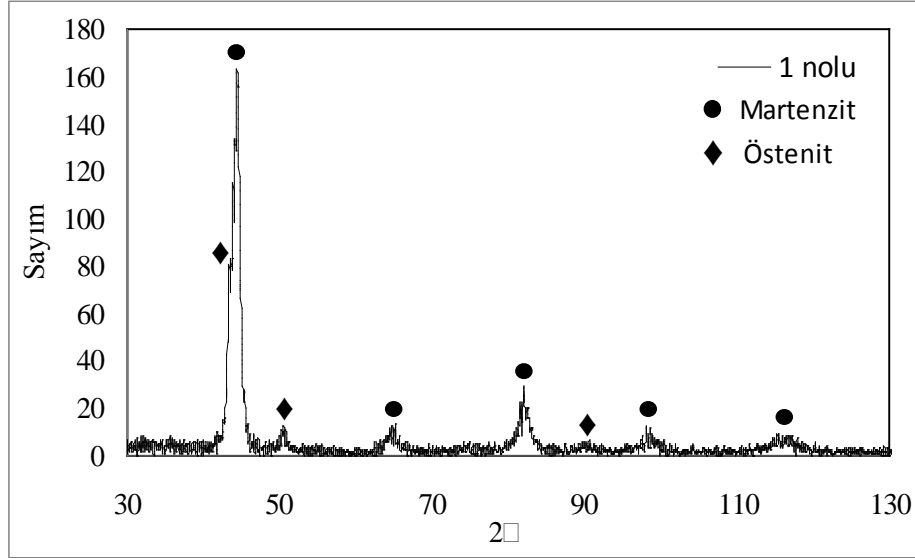


Şekil 6.23. İşlemsiz KGDD numunesinin XRD difraksiyon paterni

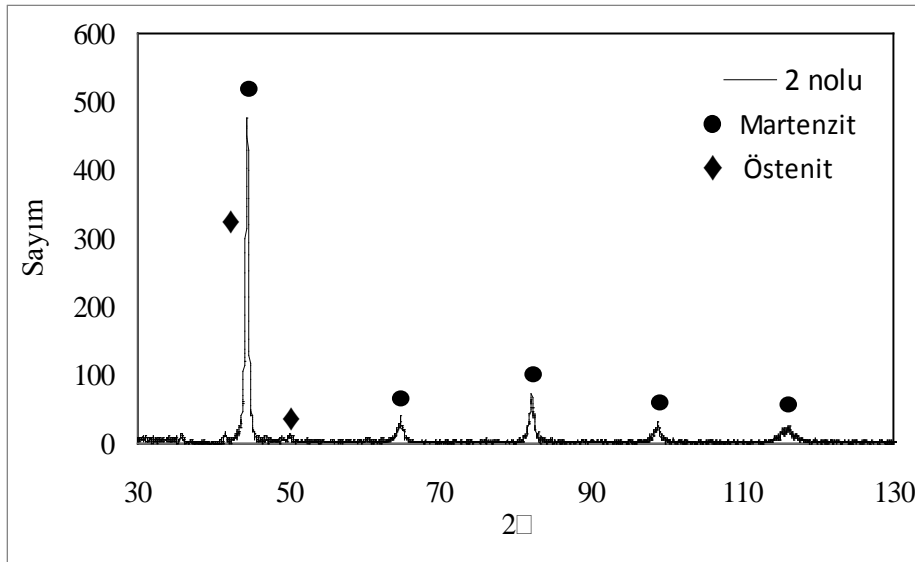
4 (1 nolu), 5 (2 nolu) ve 6 (3 nolu-ergimiş tabaka) termal çevrim ile yapılan EPT ve indüksiyon işlemleri sonucunda elde edilen yüzey modifikasyon tabakalarının faz analizlerinden elde edilen difraksiyon paternleri Şekil 6.24'te görülmektedir. Faz analizlerinde işlem görmemiş numunede sadece  $\alpha$ -Fe fazı bulunurken, EPT ve indüksiyonla modifikasyon işlemleri sonrasında yeni fazların oluştuğu belirlenmiştir. Modifikasyon tabakalarında kalıntı östenit ve martenzit fazının mevcut olduğu görülmüştür.

Şekil 6.24(a)'da termal çevrimin minimum olduğu 1 nolu numunenin XRD analizinde östenit ve martenzit fazı pikleri görülmektedir. Oluşan pikler incelendiğinde, işlemsiz numuneye göre 1 nolu numunede görülen pik genişlemelerinin görülmesi sonucu tane boyutlarının azaldığı düşünülmektedir. Scherrer bağlantısından da bilineceği üzere pik genişliklerinin artması tane boyutunun azaldığı anlamına gelmektedir [104-107]. Şekil 6.24 (b-d)'de sırasıyla

verilen 2 nolu, İ nolu ve 3 nolu numunelerin XRD analizlerinde de görülen piklerde de benzer davranış sergilenmektedir. Modifikasyon işlemi sonrasında örnek olarak alınan numunelerin tümünde pik genişlikleri artmakta ve işlem sonrası yüzeyde değişen miktarda kalıntı östenite rastlanmıştır.

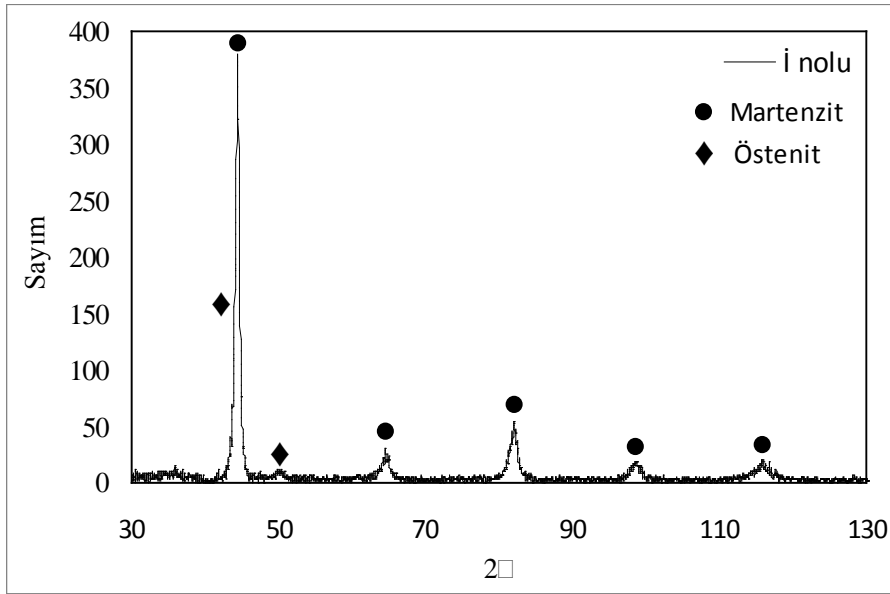


(a)

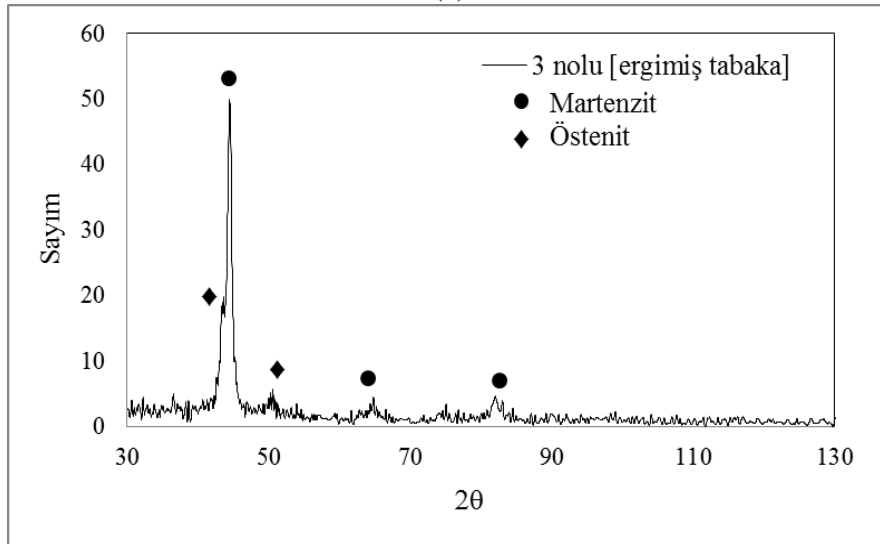


(b)

Şekil 6.24. (a) 1 nolu, (b) 2 nolu, (c) İ nolu, (d) 3 nolu-ergimiş tabaka- numunelerinin XRD diffraksiyon paternleri



(c)



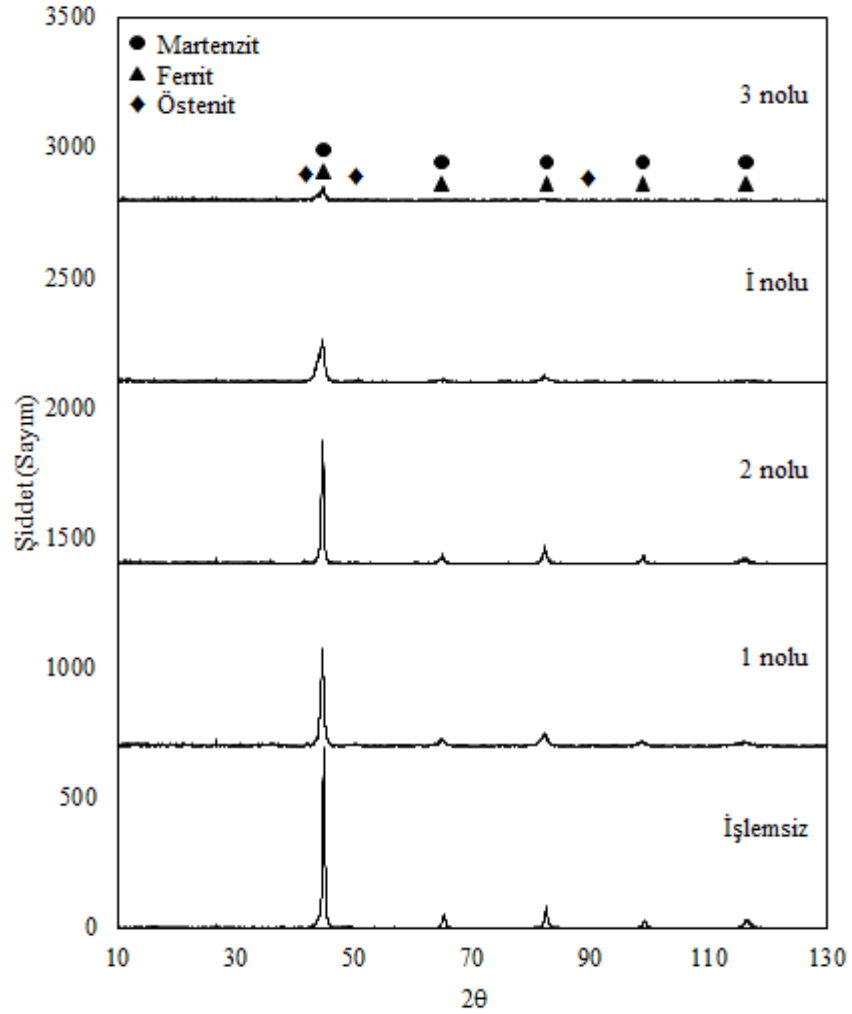
(d)

Şekil 6.24. (a) 1 nolu, (b) 2 nolu, (c) İ nolu, (d) 3 nolu-ergimiş tabaka- numunelerinin XRD difraksiyon paternleri (Devamı)

Farklı şartlarda modifikasyon işlemlerinin faz dönüşümleri üzerine etkisini görebilmek amacıyla elde edilen faz analizleri Şekil 6.25' te bir arada görülmektedir. Modifikasyon işlemleri öncesinde  $\alpha$ -Fe fazının bulunduğu numunede, işlem sonrası farklı faz oluşumları gözlemlenmiştir. Bu fazlar östenit ve martenzit fazıdır.  $\alpha$ -Fe ve martenzit fazı aynı  $2\theta$  derecelerinde oluşmasına rağmen modifikasyon işlemi sonrası piklerin sola ötelendiği görülmektedir. Bu durum martenzit oluşumunu doğrulamaktadır. Yüzeide oluşan martenzitik yapı nedeni ile meydana gerilim artışı



pikleri sola ötelemektedir [105,108-109]. Aynı zamanda modifikasyon işlemleri sonrasında pik genişliklerinin arttığı da görülmektedir. Yapılan çalışmalarda, yüzey işlemleri sırasında oluşan basma gerilmelerinin de (deformasyondan dolayı oluşan) pik genişlemelerine sebep olduğu belirtilmektedir [105].



Şekil 6.25. İşlemsiz, farklı termal çevrimlerde EPT ve indüksiyonla modifiye edilmiş yüzeylerin XRD diffraksiyon paternleri karşılaştırması

Ayrıca faz analizleri farklı fazların aynı pikleri üzerinde çakışmasını önlemek amacıyla Cu K $\alpha$  ışını yerine Cr K $\alpha$  ışını kullanılarak gerçekleştirilmesine rağmen  $\alpha$ -Fe ve martenzit piklerinin çakıştığı belirlenmiştir.

## 6.5. Sertlik Ölçümleri

### 6.5.1. Rockwell sertlik ölçümleri

Elektrolitik Plazma Teknolojisi (EPT) yöntemiyle modifiye edilen numunelerin, indüksiyonla sertleştirilen numunelerin ve modifikasyon işlemleri sonrası temperlenen numunelerin işlem gören alanlarında Rockwell cihazı ile HRc ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tüm numune gruplarında, 3 farklı bölgeye sertlik deneyi uygulanmış, elde edilen değerlerin ortalaması alınarak numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir.

Termal çevrimin değiştiği 1, 2, 3 nolu numunelerin, indüksiyonla sertleştirilen numunenin (İ nolu) ve modifikasyon işlemleri sonrası temperlenmiş 1T, 2T, 3T ve İ-T nolu numunelerin sertlik değişimleri Şekil 6.26 (a)'da gösterilmektedir. Matris malzemenin sertlik değeri ortalama 10 HRC ölçülmüştür. En düşük termal çevrim uygulandığı 1 nolu numunede en yüksek sertlik değeri 32 HRc olarak ölçülmüş olup sertlik değeri merkez bölgede ortalama 3 kat artış göstermiştir. Sertlikteki bu değişim daha önceki bölümde bahsedilen mikroyapısal modifikasyonlardan kaynaklanmaktadır. Mikroyapı incelemelerinde de anlatıldığı gibi su verme işlemi sonrasında numunenin iç yapısında martenzit yapısı oluştuğu ve bu oluşumdan dolayı yüzeyde yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. Modifikasyon bölgesinde merkezinden kenarlara doğru yüzey sertlik değerlerinde azalma görülmektedir.. Modifikasyon alanının en dış bölgesinde sertlik değeri 20 HRc' ye kadar düşmüştür. Bu durum EPT tabancasının şekli ve şiddetinin her yerde homojen olmaması ile açıklanmıştır. Benzer durumdaki sonuçlar lazer yüzey işlemlerinde de görülmektedir [3, 7, 76, 94].

Termal çevrim sayısının 5'e yükseldiği 2 nolu numunede EPT modifikasyon işlemi sonunda merkez sertlik değeri 45 HRc olarak ölçülmüştür. Değişen termal çevrim sayısı işlem süresini artırması ve buna paralel yüzey sıcaklığının artışı sertlik değerlerinin değişmesine neden olmuştur. Artan çevrim sayısı ile modifikasyon bölgesinde sertlik değerleri de artmıştır. Modifikasyon alanının en dış bölgesinde sertlik değeri 28 HRc'ye düşmüştür. Yüzey işlemi sonrası maksimum sertlikte

ortalama 4 kat artış görülmüştür. 1 nolu numuneye benzer olarak bu durum yüzeyde oluşan martenzit yapısı ve bölüm 6.4'de de bahsedildiği gibi artan termal çevrimle martenzit hacim oranının artışı ile açıklanmıştır.

6 termal çevrim uygulanmış 3 nolu numunenin, şekilden de görüldüğü üzere merkez sertlik değeri ortalama 63 HRc olarak ölçülmüştür. Modifikasyon alanının kenar bölgesinde sertlik değeri 45 HRc'ye kadar düşüş göstermiştir. EPT işlemi sonrası merkez sertlik değerinde işlemsiz numuneye göre 6 kat artış gözlemlenmiştir. 3 nolu numunede farklı olarak yüzeyde ergimiş tabakanın oluştuğu Bölüm 6.1'de mikroyapı analizinde bahsedilmiştir. Ergimiş tabakadaki sertlik artışı, oluşan ince dendritik yapılardan ve ledeburit yapısından kaynaklanmaktadır. Gulzar ve arkadaşları [95] tarafından yapılan çalışmada da ötektik matristeki dendritlerin, gerilme altında dislokasyonların hareketlerini engelleyerek sertliğin artmasına neden olduğu ifade edilmektedir. Bu çalışmada elde edilen mikroyapısal sonuçlar benzer mekanizmanın ergimiş tabakanın oluştuğu numuneler için de etkin olduğunu düşünülmektedir.

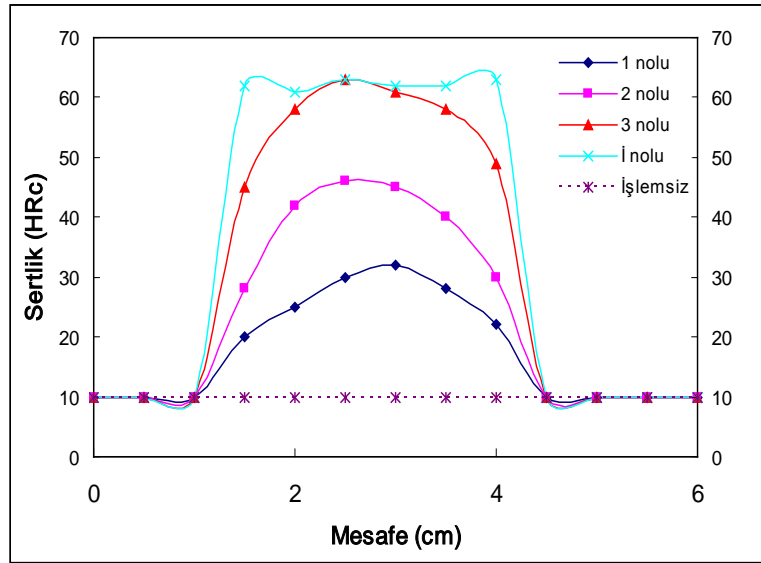
İndüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş İ nolu numunenin ortalama yüzey sertliği  $60 \pm 3$  HRc olarak ölçülmüştür. İndüksiyonla sertleştirilen numunede EPT yönteminden farklı olarak modifiye edilen tüm bölgede sertlik değerinde değişim görülmemiştir. EPT ile modifiye edilen numunelere benzer olarak indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi sonrası yüzeyde elde edilen martenzit yapısından dolayı sertlik artışı görülmüştür.

Modifikasyon sonrası temperlenmiş 1T, 2T, 3T ve İ-T nolu numunelerin yüzey sertlik değişimleri Şekil 6.26 (b)'de gösterilmektedir. Buna göre 1T nolu numunede sertlik değerlerinin 1 nolu numuneye göre 2-4 HRc aralığında azaldığı tespit edilmiştir. Şekil 6.2'de de görüldüğü üzere, temperleme işlemiyle martenzit iğne uçlarının körelmesi ve yapıda temperlenmiş martenzit yapılarının oluşması numunenin sertlik değerlerinde bir miktar düşüşe neden olmuştur [2,92]. 2T nolu numunede maksimum sertlik değeri 41 HRc olarak ölçülmüştür. Modifikasyon bölgesinden kenarlara doğru benzer şekilde sertlik değerleri azalmış ve en dış bölgede 21 HRc'ye kadar düşmüştür. Temperleme işlemi sonrası sertlik değerlerinde 2 nolu numuneye göre 3-4 HRc'lik düşüş görülmüştür. Benzer şekilde temperleme

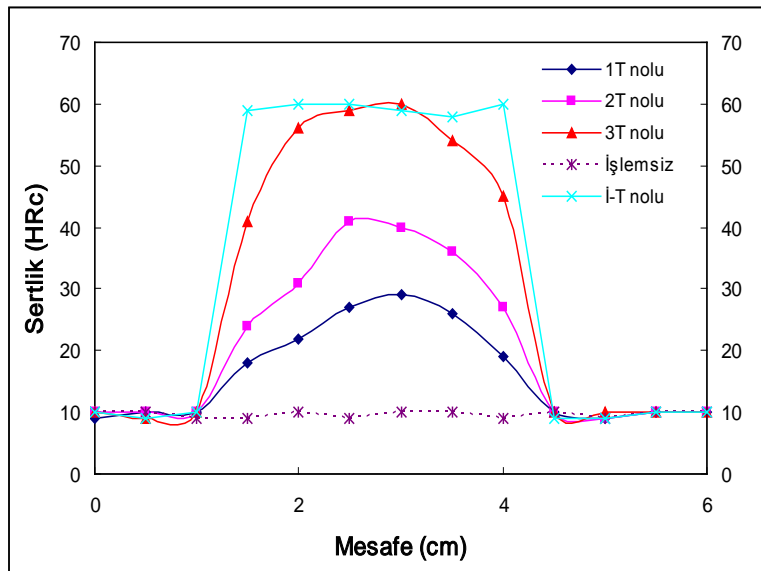
işlemi sonrası yüzeyde oluşan martenzit iğnelerinin yuvarlanması sonucu oluşan temperlenmiş martenzit yapısı sertlik değerlerinde bir miktar düşüğe neden olmuştur. 3T nolu numunenin sertlik verileri 1T ve 2T nolu numunelere benzer olarak temperleme sonrası sertlik değerlerinde 3-4 HRC'lik azalma meydana gelmiştir. Temperleme işlemi sonrası sertlikteki bu azalma, Şekil 6.4'de de görülen kabalaşan dendritlerden kaynaklanmaktadır. İ-T nolu numunenin yüzey sertlik değerlerinde ise EPT işlemlerine benzer olarak temperleme işlemi sonrası düşüş meydana gelmiştir. Şekil 6.7'de de görüldüğü üzere temperleme işlemi sonrası martenzit yapısının kabalaşması ve meydana gelen temperlenmiş martenzit yapısı sertlik değerlerinde azalmaya neden olmuştur.

Sonuç olarak; EPT, numune yüzeyinde  $3 \pm 0,2$  cm çapında modifikasyon bölgesi oluşturmuştur. Yüzey sertlik değeri merkezden uzaklaştıkça düşüş göstermiştir. Bu durum EPT tabancasının şekli ve şiddetinin her yerde homojen olmamasından kaynaklanmaktadır [110,111]. Değişen termal çevrim sayısına bağlı olarak sertlik değerlerinde farklılıklar görülmüştür (Şekil 6.27). Çevrim sayısının minimum olduğu numunede modifikasyon bölgesinde dönüşüm için yeterli sıcaklık elde edilmediği için sertlik değerleri  $30 \pm 2$  HRC' de kalmıştır. Bu iki nedenden dolayı yüzeyde elde edilen martenzitik dönüşüm her sıcaklıkta farklılık göstermiş ve sertlik değerini etkilemiştir.

İndüksiyonla sertleştirilen numunede benzer şekilde martenzitik dönüşümler meydana geldiğinden sertlik artışı görülmüştür. İndüksiyon numunelerinde farklı olarak sertlik değerleri tüm modifiye edilen yüzeyde aynıdır. Modifikasyon işlemleri sonrası temperlenen numunelerin tümünde sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Temperleme işlemi martenzit yapısını değiştirmiş, martenzit iğnelerinin uçlarının körelmesine ve gruplar halinde bulunan martenzitlerin dağılmasına neden olmuştur.

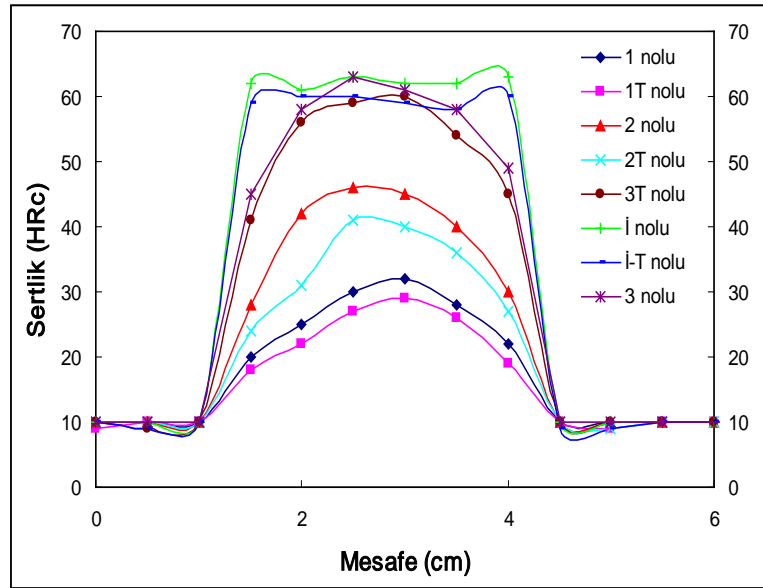


(a)



(b)

Şekil 6.26. (a) Modifiye edilmiş 1, 2, 3, İ nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri (b) Modifikasyon + Temperleme işlemi sonrası 1T, 2T, 3T, İ-T nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri



Şekil 6.27. Modifiye edilmiş ve Modifikasyon + Temperleme işlemi sonrası 1, 2, 3, İ nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri

Yüksek voltaj süresinin değiştiği 4, 5, 6 nolu numunelerin, indüksiyonla sertleştirilen numunenin (İ nolu) ve modifikasyon sonrası temperlenen 4T, 5T, 6T ve İ-T nolu numunelerin yüzey sertlik değişimleri Şekil 6.28 (a)' da verilmektedir. 4 nolu numunenin en yüksek sertlik değeri 21 HRC, matris malzemenin sertliği ise 10 HRC olarak ölçülmüştür. EPT işlemi sonrası yüzeyde 2 kat sertlik artışı görülmüştür. 4 nolu numunenin toplam işlem süresi 1 nolu numune ile aynı olmasına rağmen sertlik verileri daha düşük ölçülmüştür. Yüksek voltaj süresinin minimum olması numunede homojen sertliği ve sertlik derinliğini azaltmıştır. Miokovic ve arkadaşları [100] tarafından yapılan çalışmada hızlı ve kısa süreli ısıtma, östenit forma dönüşümü ve karbon difüzyonunu sınırladığı, östenit oluşumunun başlangıç ve bitiş dönüşüm sıcaklıkları olan, Ac1 ve Ac3 sıcaklıklarını daha yüksek sıcaklıklara kaydıracağı ve bu değişimin sertlik ve sertleştirilmiş tabaka derinliğini değiştirdiği ifade edilmiştir. Benzer mekanizmaların bu çalışmada da olduğu düşünülmektedir. Yüksek voltaj süresinin artışı ile 5 nolu numunede en yüksek sertlik değeri 46 HRC olarak ölçülmüştür. Maksimum sertlik değerinde işlemsiz numuneye göre ortalama 4 kat artış gözlemlenmiştir. Numune grupları arasındaki yüksek voltaj süresi farkı bu sertlik değişikliklerindeki değişimin sebebidir. Artan işlem süresi ile martenzit hacim oranlarında artış görülmüştür. Toplam işlem süreleri aynı olan 2 nolu numune ile benzer sertlik verileri göstermiştir. 2 nolu numuneye benzer olarak bu durum

yüzeyde oluşan martenzit yapısı ile açıklanabilir. 6 nolu numunenin en yüksek sertlik değeri 63 HRc olarak ölçülmüştür. Artan yüksek voltaj süresi ile maksimum sertlik değeri 6 nolu numune de elde edilmiştir. 3 nolu numune ile parametreleri aynı olduğundan maksimum yüzey sertlik değeri işlem süresi en uzun olan numunelerde elde edilmiş olduğu söylenebilir. İ nolu numunenin maksimum yüzey sertliği  $60 \pm 3$  HRc olarak ölçülmüştür. Sertlik artış mekanizmasının yüzeyde elde edilen martenzit yapısından kaynaklandığı görülmüştür.

Modifikasyon sonrası temperlenmiş 4T, 5T, 6T ve İ-T nolu numunelerin yüzey sertlik değişimleri Şekil 6.28 (b)'de gösterilmektedir. 4T nolu numunede sertlik değerlerinin 4 nolu numuneye göre 2-3 HRc aralığında azaldığı görülmüştür. Modifikasyon bölgesinden kenarlara doğru benzer şekilde sertlik değerleri azalmıştır. Temperleme işlemiyle yapıda temperlenmiş martenzit yapısının oluşması numunelerinin sertlik değerlerinde bir miktar düşüğe neden olmuştur. 5T nolu numunede maksimum sertlik değeri 43 HRc olarak ölçülmüştür. Temperleme işlemi sonrası sertlik değerlerinde 2-3 HRc düşüş görülmüştür. Temperleme işlemi sonrası yüzeyde oluşan martenzit iğnelerinin kabalaşması sonucu oluşan temperlenmiş martenzit yapısı sertlik değerlerinde bir miktar düşüğe neden olmuştur. Tüm numune gruplarında olduğu gibi temperleme işlemi sonrası 6T nolu numunede sertlik değerlerinde 3-4 HRc'lik azalma görülmüştür. Temperleme işlemi sonrası ergimiş tabakada kabalaşan dendritlerden dolayı sertlik değerlerinde azalma meydana gelmiştir. İ-T nolu numune benzer olarak temperleme işlemi sonrası yüzey sertlik değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Benzer olarak temperleme işlemi sonrası martenzit yapısı kabalaştığından ve meydana gelen temperlenmiş martenzit nedeni ile sertlik değerlerinde 2-3 HRc oranında azalma meydana gelmiştir.

EPT ile modifiye edilmiş numune gruplarında, modifikasyon bölgesi merkezinden uzaklaştıkça sertlik değerinde düşüş görülmüştür ve bu durum EPT tabancasının şekli ve şiddeti ile açıklanmıştır. Tabancanın eliptik şeklinden dolayı kenar bölgede yüzeyin sıcaklığı düşüktür. Bu etkilerden dolayı sıcaklıktaki önemli miktardaki düşüş modifikasyon alanının dış bölgesinde dönüşüm için yeterli sıcaklık sağlamadığından sert martenzit yapısı elde edilememiştir. Fernandez-Vicente,

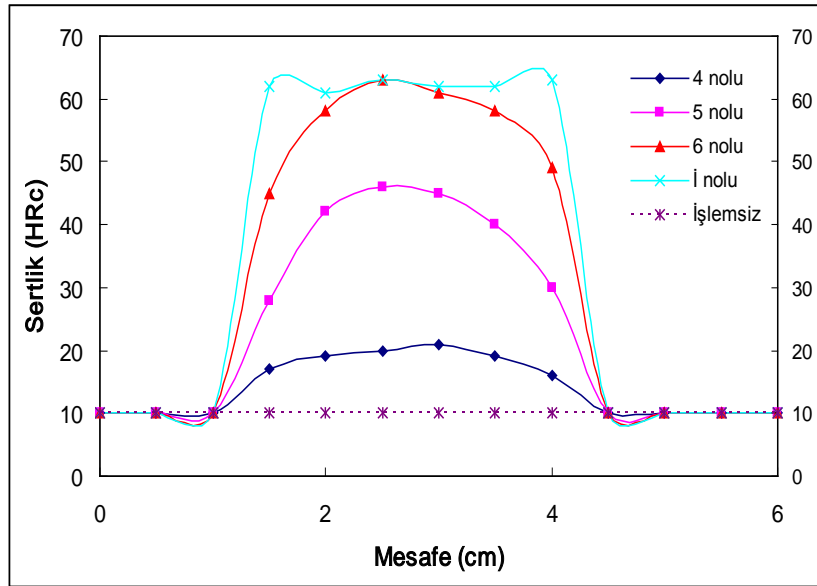
Benyounis, Chen ve arkadaşları [3,7,94] tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

Termal çevrimin ve yüksek voltaj süresinin değişimi sertlik üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Maksimum yüzey sertliği 3 ve 6 nolu numunelerde görülmüştür (Şekil 6.29). Merkezdeki sertlik değeri 63 HRc olup altlık malzemeye göre 6 kat artış göstermiştir. SEM ve optik görüntülerinde de anlatıldığı gibi bu artışın nedeni martenzit oluşumuna ve oluşan martenzit yüzdesindeki artışa dayandırılabilir. Numuneyi daha yüksek sıcaklığa ısıtmak yüzeyde ergimiş tabaka oluşturmuştur. Maksimum termal çevrimde grafitler yüzeyde kısmen ergimişken [11], ergimiş tabakadaki sertlik artış mekanizması, oluşan ince dendritik yapılardan ve ledeburit yapısından kaynaklanmaktadır. Ötektik matristeki dendritler, gerilme altında dislokasyonların hareketlerini engelleyerek sertliğin artmasına neden olduğu düşünülmektedir [95].

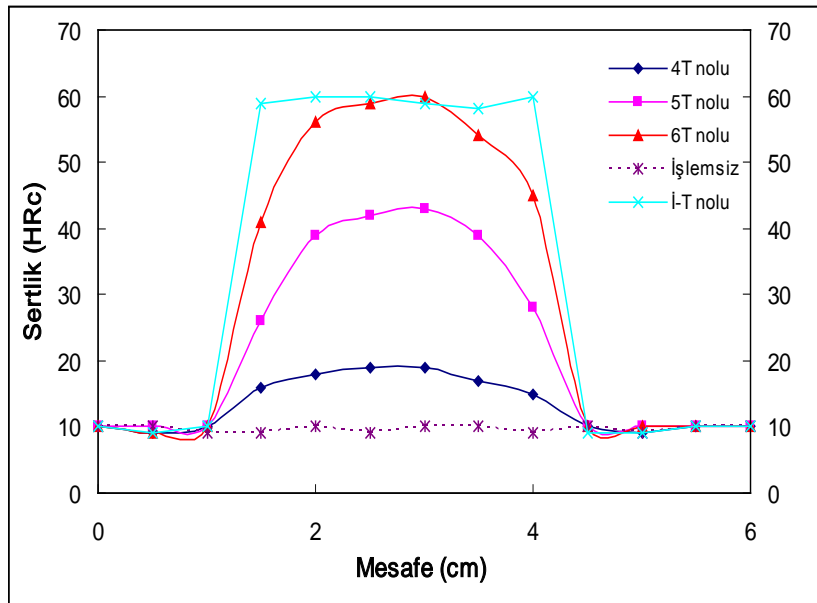
Modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerde yüzey sertlik değerlerinin düştüğü görülmüştür. Temperlemeye bağlı olarak sertlik değerlerinde görülen azalma literatür sonuçlarına göre beklenen bir durumdur [12,88,92,112]. Temperleme işlemiyle martenzit iğne uçlarının körelmesi ve yapıda temperlenmiş martenzit yapılarının oluşması numunelerinin sertlik değerlerinde bir miktar düşüğe neden olmuştur. Mikroyapı bölümünde de bahsedildiği gibi EPT işlemi sonrasında zigzaglı, düzenli gruplar oluşturan iğnemsiz martenzit yapılar, modifikasyon işlemleri sonrasında temperleme işlemi ile tipik modifiye edilmiş mikroyapı şeklini kaybeder ve bu durum sertlik değerlerinin azalmasına neden olmuştur.

Yukarıda bahsi geçen birçok parametrenin bir araya gelmesi ile modifikasyon işlemi sonrası, yüzey sertlik değerleri 10 HRc olan KGDD numunelerinin merkez sertlik değerlerinde 3 ile 6 kat arasında değişen artışlar görülmüştür. Mevcut birçok yüzey sertliğini artırma işlemi ile kıyaslandığında 24 - 36 saniye içinde elde edebilen bu sertlik değerleri oldukça yüksektir ve prosesin ekonomik ve işlem kolaylığı açısından en önemli avantajını oluşturmaktadır.



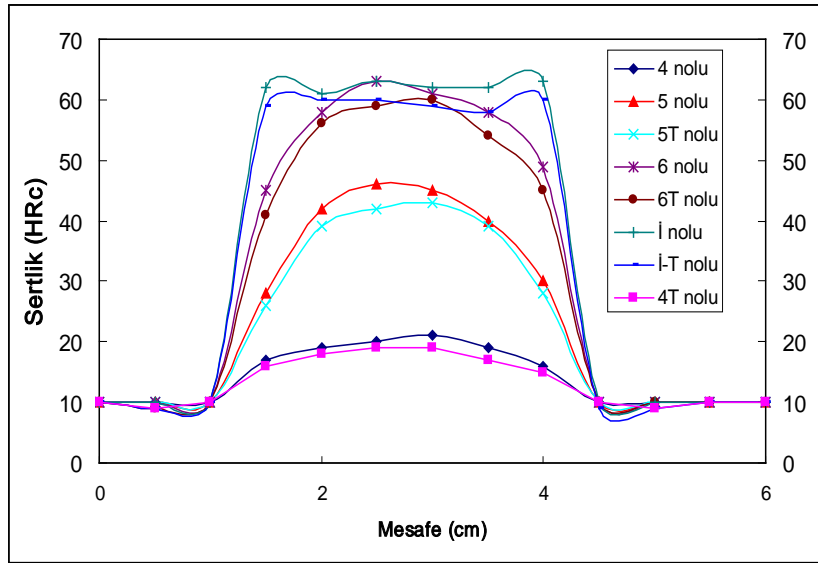


(a)



(b)

Şekil 6.28. (a) Modifiye edilmiş 4, 5, 6, İ nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri (b) Modifikasyon + Temperleme işlemi sonrası 4T, 5T, 6T, İ-T nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri



Şekil 6.29. Modifiye edilmiş ve Modifikasyon + Temperleme işlemi sonrası 4, 5, 6, İ nolu numunelerin yüzeylerindeki mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri

### 6.5.2. Mikrosertlik ölçümleri

Farklı çevrim sayısı ve yüksek voltaj sürelerinde Elektrolitik Plazma Teknolojisi (EPT) ve indüksiyonla sertleştirilen numuneler ile modifikasyon sonrası temperlenen numuneler modifiye olmuş bölgelerinden merkezlenerek yüzeye dik derinliğine kesit verecek şekilde kesilmiş ve elde edilen numuneler metalografik olarak hazırlanmıştır. Numune gruplarının 200 gr yük altında 10 sn süre ile mikrosertlik ölçümleri yapılmıştır. Tüm numune gruplarında, aynı bölgeden sertlik deneyi üç kez uygulanmış elde edilen değerlerin ortalaması alınarak numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir.

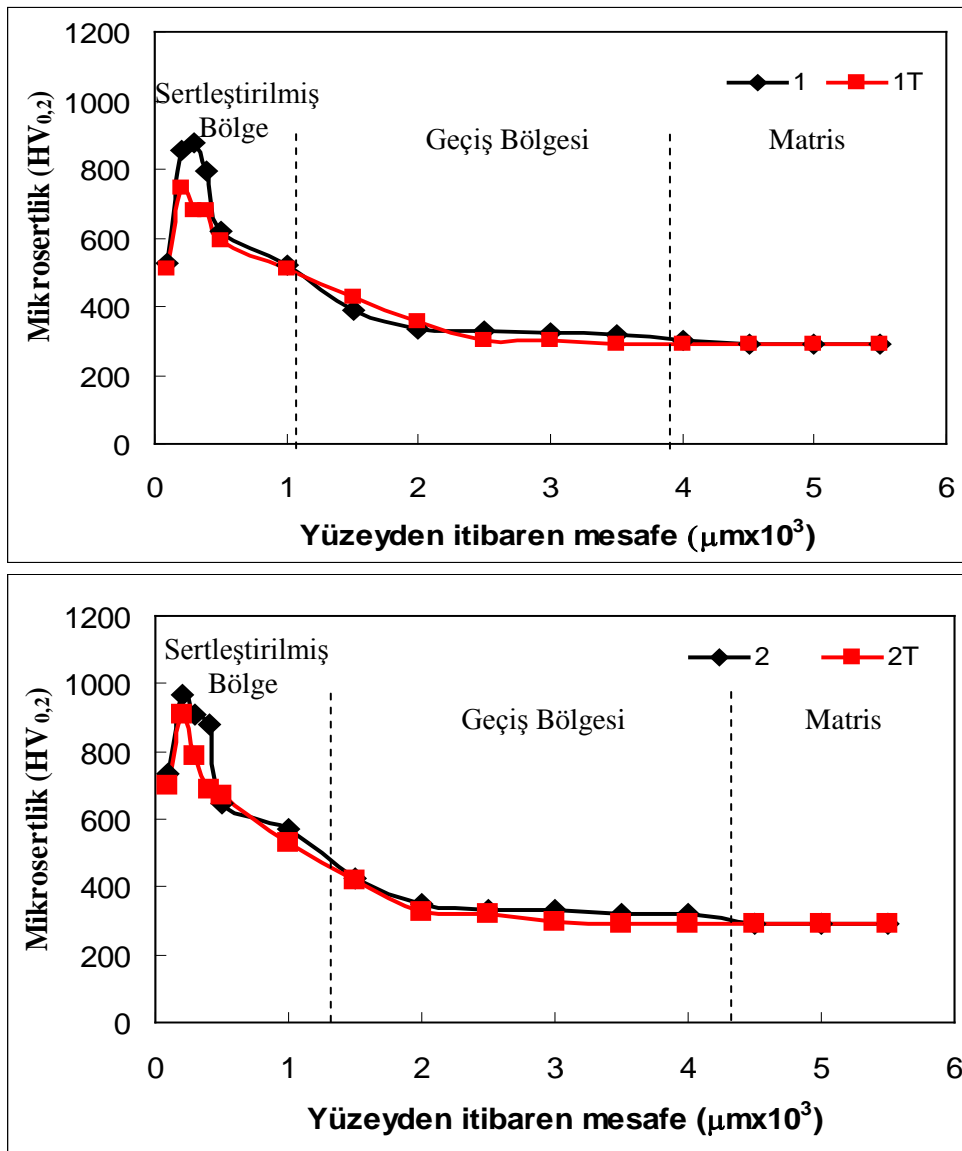
Şekil 6.30' da farklı termal çevrim süreleri ile modifiye edilmiş 1, 2, 3 ve indüksiyonla sertleştirilmiş İ nolu numunelerin ve modifikasyon sonrası temperlenmiş 1T, 2T, 3T, İ-T nolu numunelerin yüzeyden derinliğe doğru mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri görülmektedir.

Mikrosertlik profillerinden de açıkça görüldüğü gibi genel olarak EPT ve indüksiyon işlemleri sonrası yüzeyde üç farklı bölge oluşmaktadır. 1, 2 nolu numunelerde, sertlik yüzeyden 500  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar lineer artış göstermiş, 500  $\mu\text{m}$ 'dan sonra 3500–4500  $\mu\text{m}$  değişen derinliğe kadar sertlik azalmıştır. Sertlikteki bu değişim daha

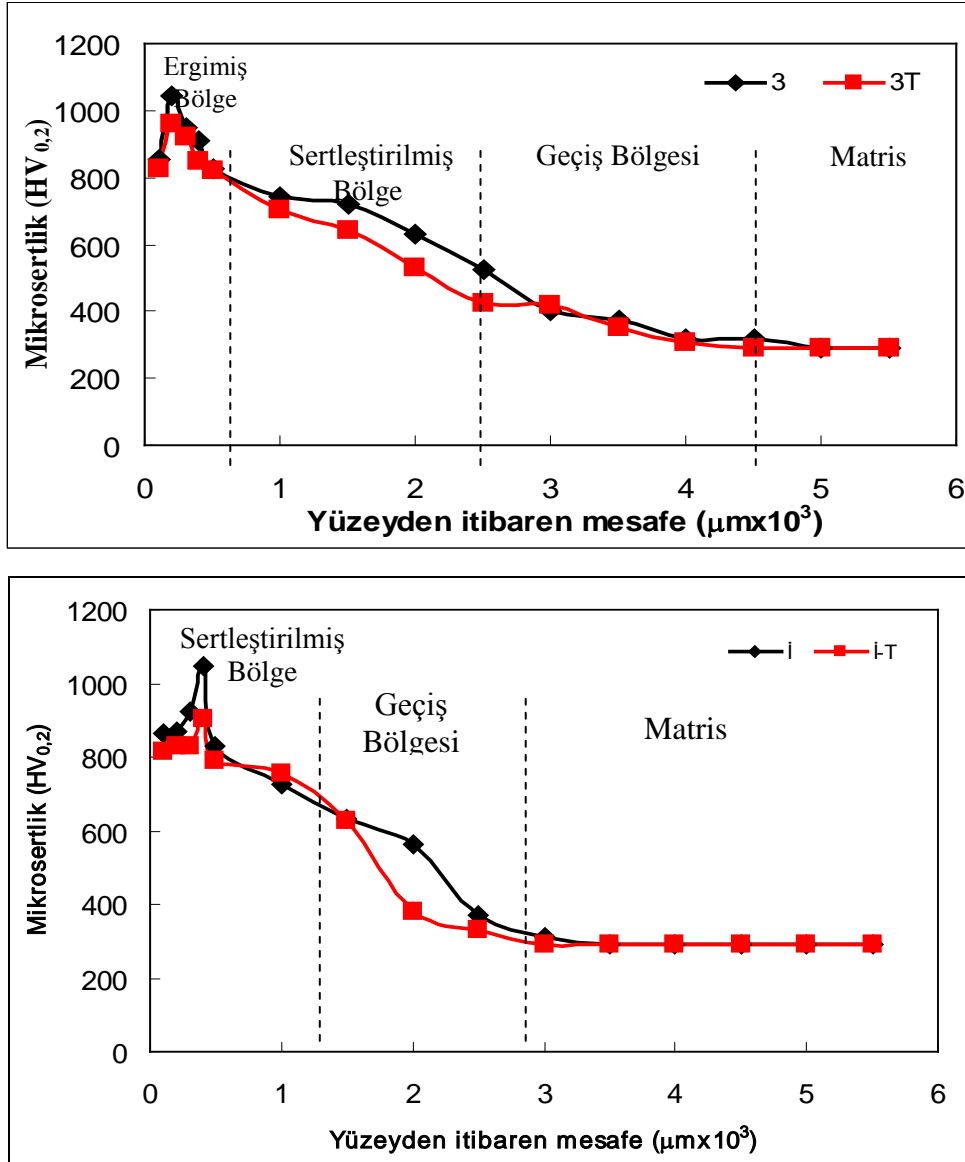
önceki bölümde bahsedilen mikroyapısal modifikasyonlardan kaynaklanmaktadır. Sertliğin arttığı bölgeye “sertleştirilmiş bölge”, sertliğin düştüğü ve sabit kaldığı bölge “geçiş bölgesi” olarak ifade edilmiş, sonrasındaki bölge ise altlık malzemesinin kendi sertliğine ulaştığı bölgedir (matris). Termal çevrimin maksimum olduğu 3 nolu numunede farklı olarak, yüzeye yakın olan kısım ergimiş bölge olarak tanımlanmıştır. Benzer olarak 3 nolu numunede başlangıçta sertlik değerlerinde artış görülmüş, 500  $\mu\text{m}$ 'dan sonra 4500  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar sertlik azalmıştır. 1, 2 ve 3 nolu numunelerin değişen termal çevrim mikrosertlik değerlerini ve sertlik derinliğini etkilemiştir. Artan termal çevrim sayısı ile sertleştirilmiş bölgedeki sertlik değerleri daha yüksek ölçülmüştür. Matris malzemenin sertliği  $250 \pm 10 \text{HV}_{0,2}$  iken, bu üç farklı numune için elde edilmiş en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 880  $\text{HV}_{0,2}$ , 960  $\text{HV}_{0,2}$  ve 1050  $\text{HV}_{0,2}$ 'dir. Her üç numune grubunun sertlik değerleri başlangıçta lineer bir artış göstermiş ve sonra tekrar düşen bir eğilim göstermiştir. Sertlik değerlerindeki bu yükseliş modifikasyon işlemi sonrası yüzeyde oluşan martenzit fazının varlığından ileri gelmiştir. 1 ve 2 nolu numune yüzeylerinde martenzit yapısı oluşurken, 3 nolu numune ergimiş tabakadan sonra homojen martenzit yapısı oluşmaktadır. Martenzitteki bu mikrosertlik çeşitliliği, daha önceki bölümde bahsedilen mikroyapısal modifikasyonlardan ve değişen martenzitik hacim oranlarından kaynaklanmaktadır. İndüksiyonla sertleştirme işlemi sonrası en yüksek sertlik değeri 1045  $\text{HV}_{0,2}$  ölçülmüştür. EPT ile modifiye edilen numunelerde olduğu gibi sertlik yüzeyden 500  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar lineer artış göstermiştir, 500  $\mu\text{m}$ 'dan sonra 2900  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar sertlik azalmıştır. Sertlik artış mekanizması modifikasyon sonrası yüzeyde oluşan iğnemsiz martenzit yapısından kaynaklanmaktadır.

1T, 2T, 3T, İ-T nolu numunelerin sıra sertlik profilleri incelendiğinde, temperleme işlemi sonrası sertlik dağılımı benzer bir grafik göstermektedir. Numunelerin sertlik değerleri yüzeyde önce doğrusal olarak artmış ve ardından matris malzemesinin sertliğine ulaşmaya kadar sürekli bir azalma göstermiştir. Temperleme işlemi sonrasında mikrosertlik değerleri yüzey sertlik (HRC) değerinde olduğu gibi azalmıştır. 1T, 2T, 3T, İ-T nolu numuneler için en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 740  $\text{HV}_{0,2}$ , 900  $\text{HV}_{0,2}$  ve 960  $\text{HV}_{0,2}$ , 900  $\text{HV}_{0,2}$ 'dir. Temperleme işlemi martenzit hacim oranını değiştirmemiş fakat mikrosertlik değerlerini düşürmüştür. Sahin ve

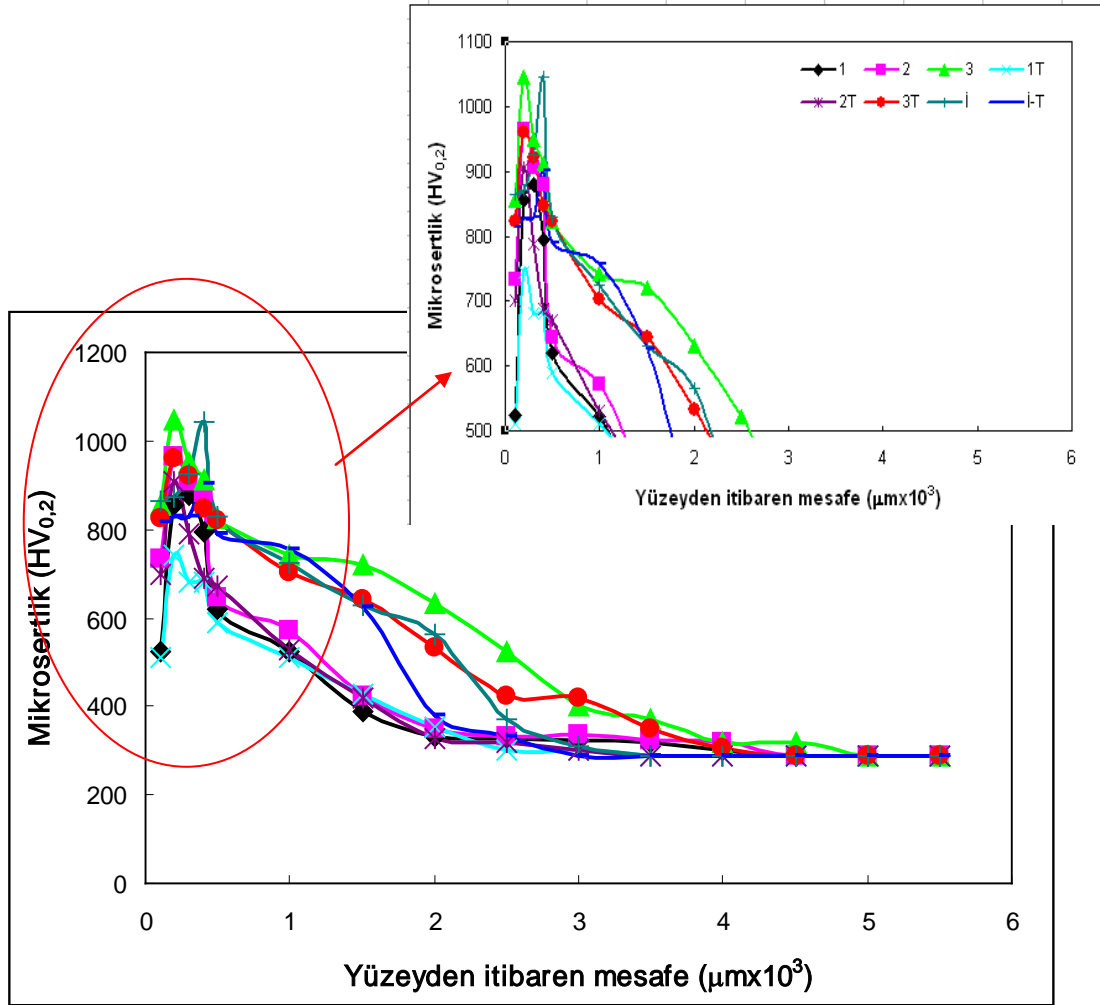
arkadaşları [9] tarafından yapılan çalışmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Mikroyapı bölümünde de bahsedildiği üzere temperleme işlemi martenzit yapısının iğnemsî uçlarının körelmesine ve bu da sertlik değerlerinde düşüşe neden olmaktadır. Benzer sonuçlar Güneş ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada da görülmüştür [92]. Şekil 6.31’de 1, 2, 3 ve İ nolu numunelerin modifiye edilmiş ve modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri toplu olarak verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere maksimum sertlik 3 ve İ nolu numunelerde elde edilmiştir. Fakat 3 nolu numunenin yüzeyden itibaren sertlik derinliği daha fazladır. Minimum sertlik 1 nolu numunede elde edilmiştir. Temperleme işlemi tüm numunelerde sertlik değerlerini düşürmüştür.



Şekil 6.30. Farklı işlem parametrelerinde modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş 1, 2, 3 ve İ nolu numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri



Şekil 6.30. Farklı işlem parametrelerinde modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş 1, 2, 3 ve I nolu numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri (Devamı)

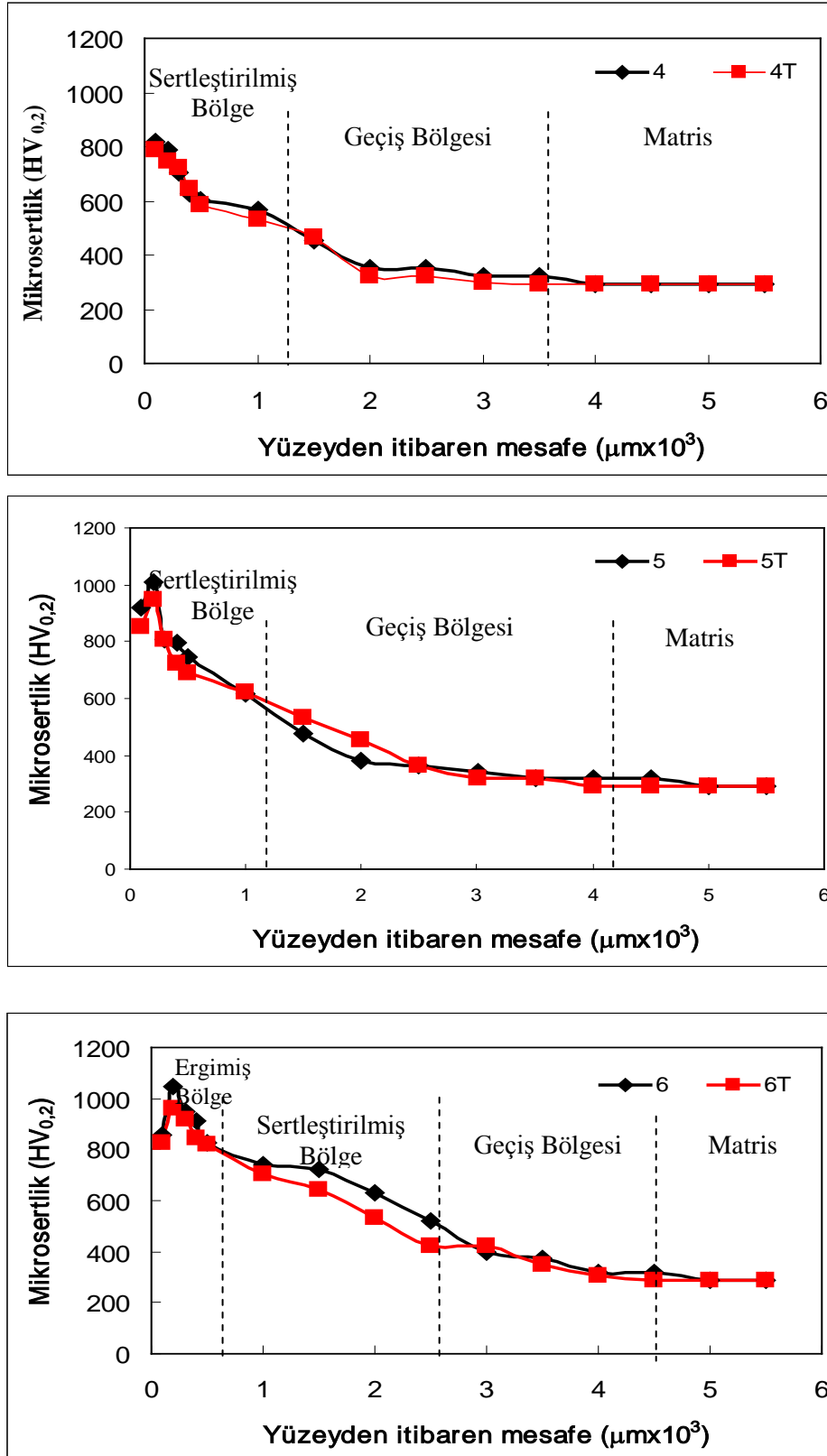


Şekil 6.31. Modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri

Farklı yüksek voltaj süreleri uygulanmış 4, 5 ve 6 nolu numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri Şekil 6.32’de görülmektedir. 1, 2, 3 nolu numunelere benzer olarak sertlik değerleri başlangıçta 500 µm derinliğe kadar lineer artış göstermiş ve sonra tekrar düşen bir eğilim çizmiştir. Bu üç grup numune için elde edilmiş en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 820 HV<sub>0,2</sub>, 1010 HV<sub>0,2</sub> ve 1050 HV<sub>0,2</sub>’dir. Uygulanan yüksek voltaj süresinin değişimi ile sertlik değerinin değiştiği, artan yüksek voltaj süresi ile yüzeyde elde edilen martenzit hacim oranının artması sertlik değerlerini arttırmıştır. Matris malzemenin sertliği 250±10HV<sub>0,2</sub> iken EPT işlemi sonrası sertliğin yüzeyde maksimum 5 kat arttığı ve yüzeyden içeri ilerledikçe bu oranın azaldığı görülmüştür.

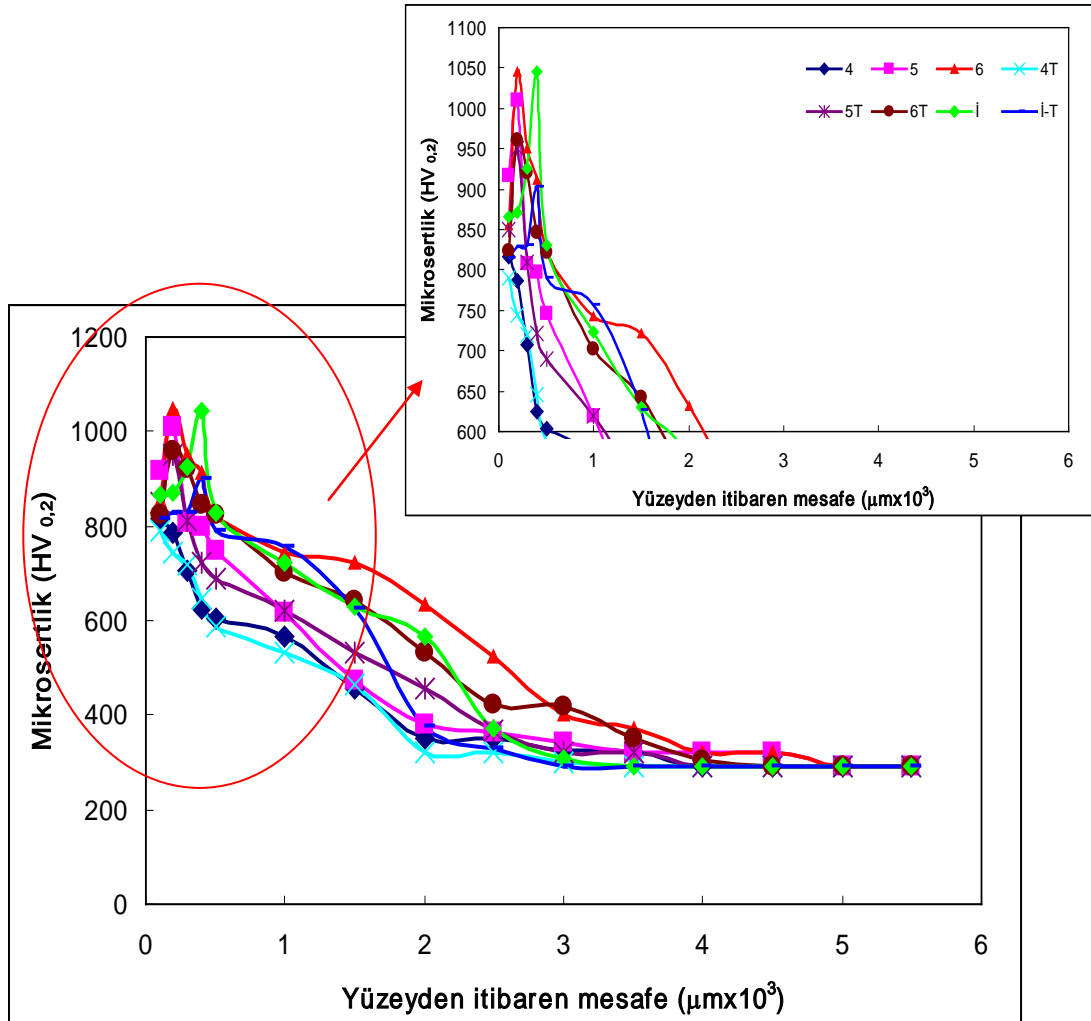
Temperleme işlemi sonrası 4T, 5T, 6T nolu numunelerin mikrosertlik değişimleri incelendiğinde ise, sertlik dağılımı diğer numunelerle benzer bir değişim göstermiştir. Numunelerin sertlikler değerleri yüzeyde önce doğrusal bir artış ve ardından azalan bir değişim göstermiştir. Temperleme işlemi sonrasında mikrosertlik değerleri yüzey sertlik ölçümlerinde olduğu gibi azalmıştır. 4T, 5T, 6T nolu numuneler için en yüksek sertlik değerleri sırasıyla 790 HV<sub>0,2</sub>, 950 HV<sub>0,2</sub> ve 960 HV<sub>0,2</sub>'dir. Mikroyapı bölümünde bahsedilen, temperleme işlemiyle martenzit iğne uçlarının körelmesi ve yapıda temperlenmiş martenzit yapılarının oluşması numunelerinin sertlik değerlerinde düşüşe neden olmaktadır. 6 nolu numunede 3 nolu numune ile benzer şekilde yüzeyde farklı olarak ergimiş bölge görülmüştür. Bu bölgede oluşan denritik yapılara temperleme işlemi sonrası kaba dendritlere dönüşmüş ve numunenin sertliğinde düşüşe neden olmuştur.

Şekil 6.33'de 4, 5, 6 ve İ nolu numunelerin modifiye edilmiş ve modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin mesafeye bağlı olarak sertlik değişimleri toplu olarak verilmiştir. Maksimum sertlik değeri 6 ve İ nolu numunelerde elde edilmiş, ancak 3 nolu numunenin yüzeyden itibaren sertliği yüksek tabaka derinliği daha yüksek bulunmuştur. Minimum sertlik yüksek voltaj süresinin minimum olduğu 4 nolu numunede elde edilmiştir. Modifikasyon sonrası temperleme işlemi tüm numunelerde sertlik değerlerini düşürmüştür.



Şekil 6.32. Farklı işlem parametrelerinde modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş 4, 5, 6 ve 7 nolu numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri





Şekil 6.33. Modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş numunelerin yüzeyden itibaren mesafeye bağlı olarak mikrosertlik değişimleri

Sonuç olarak yukarıda bahsedilen parametreler değerlendirildiği zaman yüksek voltaj süresinin ve değişen termal çevrim sayısının etkisi, indüksiyonla yüzeyi modifiye edilen numunelerinin sertlik profilleri ayrıca temperleme işleminin mikrosertlik profillerindeki etkisi aşağıdaki gibi özetlenebilir:

Numunelerin değişen termal çevrim sayısı ve yüksek voltaj süresi ile ısıtma ve soğutma süreleri değiştiğinden modifikasyon yüzeyinde de farklı oluşumlar görülmüştür. Artan termal çevrim sayısı ve yüksek voltaj süresi ile ısıdan etkilenen tabaka kalınlığı arttığı gibi oluşan martenzit yüzdeside artmıştır. Artan martenzit yüzdesi sertlik değerlerinde artışa neden olmuştur. Artan yüksek voltaj süresi ve termal çevrim sayısı ile östenitik dönüşüm sıcaklığı ve bekleme süresi arttığından, östenit matris grafit nodüllerden gelen karbonlar sayesinde zenginleşmeye başlar. Su

verme sürecinde karbonca zenginleşmiş östenit, martenzit ve az miktarda kalıntı östenite dönüşmüştür. Modifikasyon işlemi sonrasında kalıntı östenitin az olması ve martenzit hacim yüzdesinin artması sertlik değerlerini arttırmaktadır. Fakat maksimum termal çevirim ve yüksek voltaj süresinde modifiye edilen numunelerin yüzeylerinde ergimiş tabakanın oluştuğu ve maksimum sertliklerin bu numunelerde elde edildiği görülmüştür. Ergimiş tabakanın ince östenit dendritlerden ve dendritlerin aralarında martenzitik yapıdan oluştuğu görülmüştür. Oluşan martenzit daha çok iğnemsî yapıdadır. Çünkü karbon miktarı bu bölgede yüksektir. Bu sebeple ölçülen sertlik değerleri ergimiş tabakanın oluştuğu 3 ve 6 nolu numunelerde yüksek çıkmıştır. Modifikasyon işlemine maruz kalmadan sertlik değerleri 250 HV<sub>0,2</sub> olan KGDD'in sertlik değerleri değişen EPT parametrelerine bağlı olarak maksimum 1050 HV<sub>0,2</sub> gibi oldukça yüksek bir değere çıkmıştır. İndüksiyonla sertleştirilen numunede de benzer mekanizmalar nedeni ile yüksek sertlik artışı görülmüştür. Maksimum sertlik değeri 3 ve 6 nolu numuneler ile aynı ölçülmüştür. Temperleme işleminin modifiye edilen tüm numunelerin sertlik değerlerini düşürdüğü görülmüştür. Martenzit fazının temperleme sonrası kabalaşması, düzenli gruplar oluşturan iğnemsî martenzitik yapıların temperleme işlemi ile dağılması ve ergimiş tabakadaki dentritik yapının kabalaşması sertlik değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Genel olarak bütün bu sonuçları maddeler halinde ifade edersek;

- a. Yüzeyde martenzit yapısı oluşumu,
- b. Değişen martenzit yapısı (yüksek voltaj süresine bağlı olarak, termal çevrime bağlı olarak, temperleme işlemine bağlı olarak),
- c. Yüzeyde oluşan ergimiş bölge,
- d. Martenzit hacim oranı,
- e. Yüzey sıcaklık farklılıkları,

sertlik değerlerinin değişmesine neden olduğu söylenmektedir.

Mevcut birçok yüzey geliştirme prosesine göre oldukça yüksek denebilecek bu sertlik değerlerini saniyeler içinde elde edebilmek prosesin ekonomik ve kolay uygulanabilme açısından en önemli avantajını oluşturmaktadır. Örneğin, lazerle yüzey sertleştirme işlemi veya indüksiyonla yapılan yüzey işlemlerinde elde edilen

sertlik değerleri aynı olsa bile [95,100,113-115], EPT işleminin bölgesel uygulanabilir olması, şekil ve boyutta herhangi bir sınırlama olmaması şu anda piyasada kullanılan yöntemlere göre daha avantajlı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca EPT işlemi sonrası sertleştirilmiş tabaka kalınlığı çok daha derin olup yapılan deneyler sonrasında 2,5 – 5 mm arasında değişen modifikasyon tabaka kalınlıkları elde edilmiştir.

## 6.6. Aşınma Özellikleri

Elektrolitik Plazma Teknolojisi (EPT) yöntemiyle ile farklı termal çevrim sayısı ve yüksek voltaj sürelerinde modifiye, indüksiyonla sertleştirilen ve modifikasyon sonrası temperlenen KGDD malzemelerin lineer aşınma deneyi testleri CSM-Tribometer cihazında ball-on-disk yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri modifiye yüzeyi tam anlamıyla karakterize etmesi açısından iki farklı şekilde gerçekleştirilmiştir. Sadece modifiye edilen alanda yapılan aşınma deneyleri (modifiye yüzey aşınma (MYA) testi) ve aşındırıcı bilyanın hem modifiye edilen yüzeyi hem de altlık malzemeyi aşındıracak şekilde yapılan aşınma testleri (kompozit yüzey aşınma (KYA) testi). 6 mm çapında alümina bilya kullanmak suretiyle aşınma deneyleri 3 farklı yük (0,5N, 1N ve 2 N) altında, 500 m mesafede 0,15 m/s hızda gerçekleştirilmiştir. Aşınma deneyleri sonrasında numunelerin sürtünme katsayıları ve aşınma kaybı oranları ve aşınma hızı değerleri hesaplanmıştır. Aşınan numunelerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemeleri ile ve EDS analizleri gerçekleştirilmiştir.

### 6.6.1. Sürtünme katsayısı değerleri

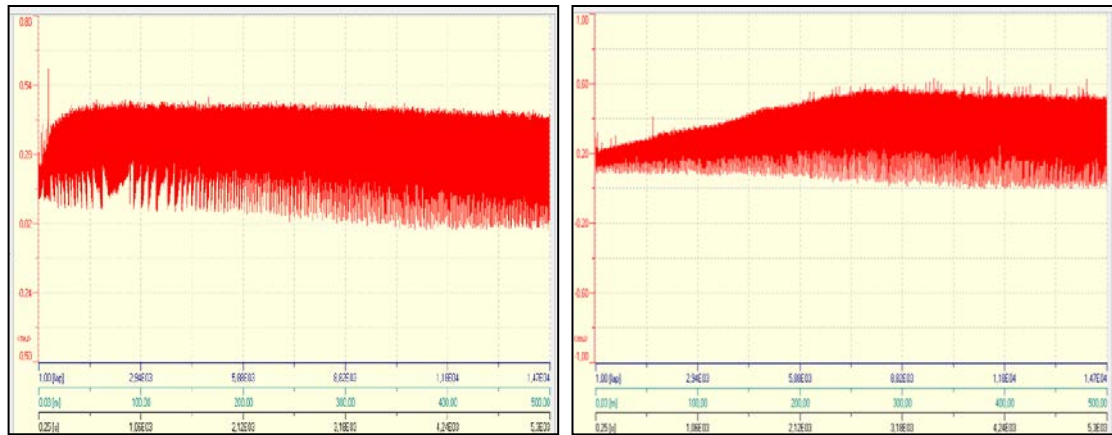
Aşınma deneyleri sonrasında modifiye edilen, indüksiyonla sertleştirilen ve modifikasyon sonrası temperlenen KGDD malzemelerin sürtünme katsayısı değerleri sonuçları Tablo 6.4.'de verilmiştir.

Tablo 6.4. İşlemsiz, modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş KGDD numunelerinin aşınma yüklerine bağlı olarak sürtünme katsayısı değerleri

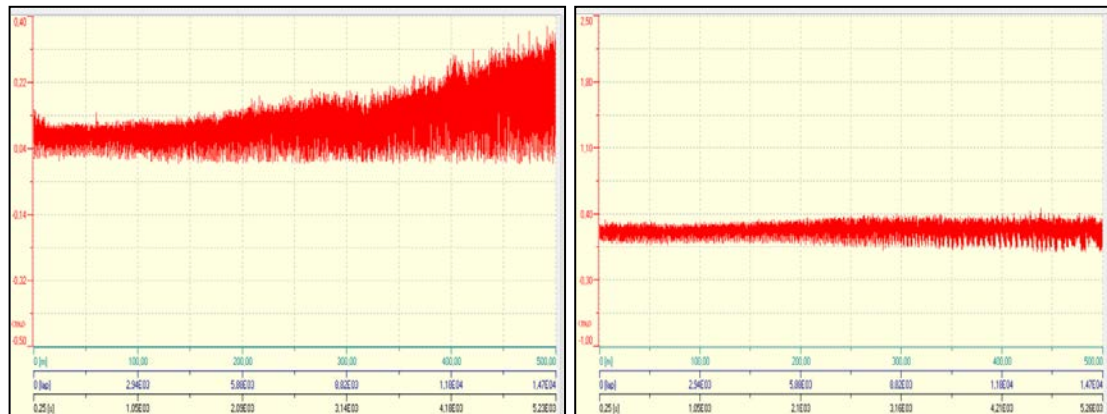
Numune	Yük (N)	Modifiye Yüzey Aşınma	Kompozit Yüzey Aşınma	
		Sürtünme katsayısı	Sürtünme katsayısı	
İşlemsiz KGDD	0,5	0,328	0,347	
	1	0,233	0,233	
	2	0,220	0,220	
Modifiye edilmiş KGDD	1	0,5	0,116	0,114
		1	0,134	0,112
		2	0,198	0,179
	2	0,5	0,147	0,116
		1	0,174	0,117
		2	0,196	0,175
	3	0,5	0,238	0,137
		1	0,111	0,111
		2	0,136	0,157
	4	0,5	0,118	0,163
		1	0,122	0,175
		2	0,177	0,165
	5	0,5	0,124	0,213
		1	0,112	0,170
		2	0,183	0,175
	6	0,5	0,197	0,234
		1	0,134	0,202
		2	0,198	0,200
İndüksiyonla sertleştirilmiş KGDD (İ)	0,5	0,173	0,173	
	1	0,264	0,101	
	2	0,204	0,185	
Modifikasyon + temperlenmiş KGDD	1T	0,5	0,185	0,126
		1	0,182	0,139
		2	0,218	0,125
	2T	0,5	0,085	0,153
		1	0,166	0,201
		2	0,160	0,169
	3T	0,5	0,183	0,170
		1	0,161	0,230
		2	0,235	0,241
	4T	0,5	0,315	0,221
		1	0,175	0,280
		2	0,276	0,279
	5T	0,5	0,160	0,108
		1	0,151	0,172
		2	0,191	0,229
	6T	0,5	0,183	0,153
		1	0,161	0,230
		2	0,235	0,241
İndüksiyon+ Temperlenmiş KGDD (İ-T)	0,5	0,158	0,109	
	1	0,242	0,156	
	2	0,189	0,201	

Aşınma deneyleri sonucunda elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinin tüm numuneler için aşınma yüküne bağlı olarak farklılık göstermediği belirtilmiştir. Aynı şekilde modifikasyon işlemi ve ilaveten temperleme işlemleri sonrasında da sürtünme katsayısı değerlerinde büyük farklılıklar gözlenmemektedir. İşlemsiz, EPT ile modifiye edilmiş, indüksiyonla sertleştirilmiş malzemelerin modifiye yüzey aşınma deneyi sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.220-0.328, 0.098-0.238, 0.173-0.264 arasında değişmektedir. EPT ile modifiye edilmiş ve temperlanmış, indüksiyonla sertleştirilmiş ve temperlanmış numunelerin modifiye yüzey deneyi sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.085-0.315, 0.158-0.242 arasında değişmektedir.

0,5N aşınma yükünde işlemsiz ve indüksiyonla sertleştirilmiş malzemeler için ve 1 nolu numune ile 3 nolu numunenin modifiye yüzey aşınma testi sonrasında belirlenen sürtünme katsayısı değerlerinin kayma mesafesine bağlı olarak değişimleri sırası ile Şekil 6.34 ve Şekil 6.35' de görülmektedir.

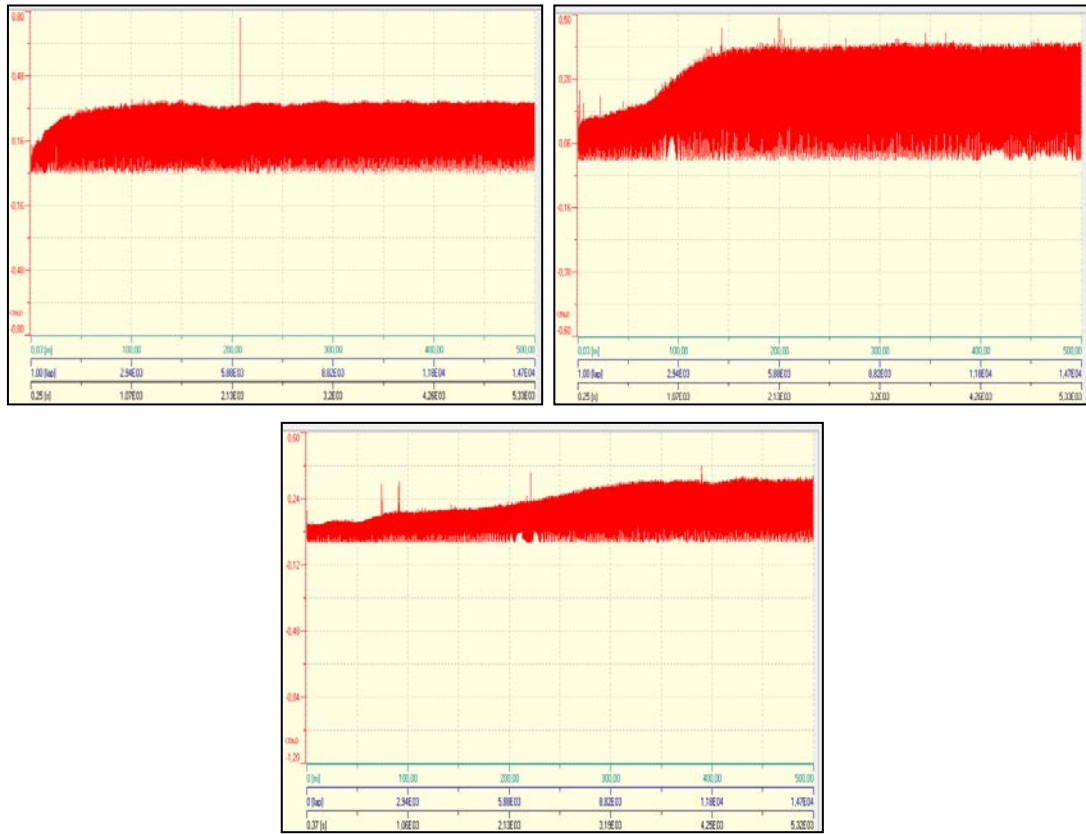


Şekil 6.34. (a) İşlemsiz ve (b) İndüksiyonla sertleştirilmiş KGDD numunelerin 0,5N yükte kayma mesafesine bağlı olarak MYA sürtünme katsayısı değişimi



Şekil 6.35. (a) 1 nolu ve (b) 3 nolu numunelerin 0,5N yükte kayma mesafesine bağlı olarak MYA sürtünme katsayısı değişimi

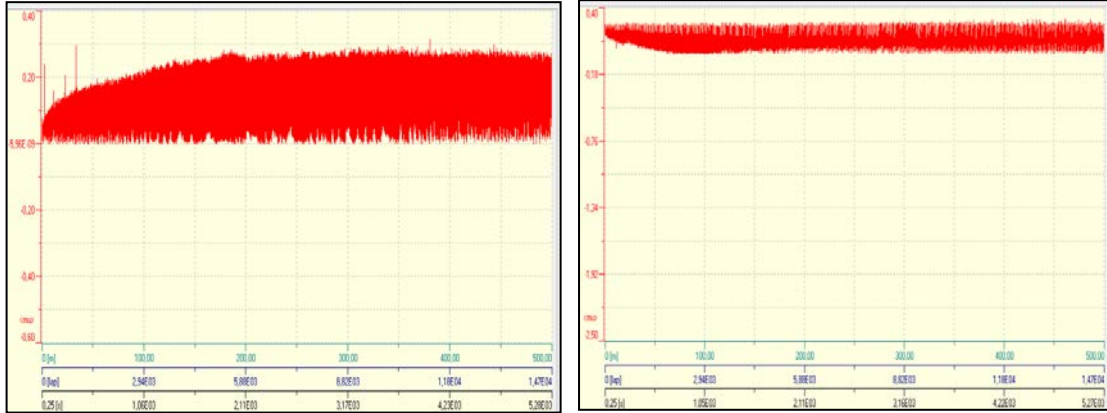
İşlemsiz, EPT ile modifiye edilmiş, indüksiyonla sertleştirilmiş malzemelerin kompozit yüzey aşınma deneyi sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.220-0.347, 0.111-0.234, 0.101-0.185 arasında değişmektedir. EPT ile modifiye edilmiş ve temperlenen, indüksiyonla sertleştirilmiş ve modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin kompozit yüzey aşınma deneyi sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.108-0.280, 0.109-0.201 arasında değişmektedir. Şekil 6.36' da 2N aşınma yükünde işlemsiz ve indüksiyonla sertleştirilmiş malzemeler ve 3 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma testi sonrasında belirlenen sürtünme katsayısı değerlerinin kayma mesafesine bağlı olarak değişimleri görülmektedir.



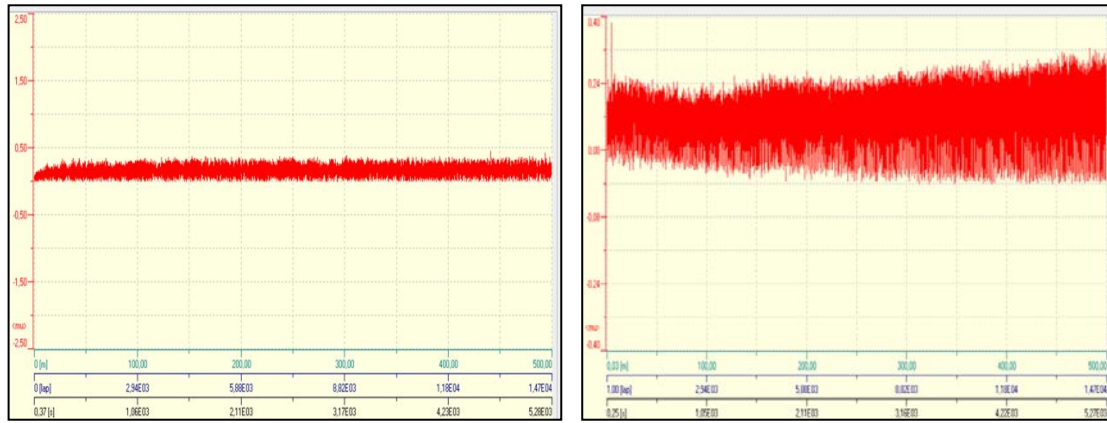
Şekil 6.36. (a) İşlemsiz ve (b) İndüksiyonla sertleştirilmiş (c) 3 nolu numunelerin 2N yükte kayma mesafesine bağlı olarak KYA sürtünme katsayısı değişimi

0,5N aşınma yükünde indüksiyonla sertleştirilmiş ve temperlenmiş numunelerin modifiye yüzey aşınma testi sürtünme katsayısı değişimleri ile kompozit yüzey aşınma testi sürtünme katsayısı değerlerinin mesafeye bağlı olarak değişimleri, 0,5N aşınma yükünde 3T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma testi sürtünme katsayısı

ile kompozit yüzey aşınma testi sürtünme katsayısı değerlerinin mesafeye bağlı olarak değişimleri sırası ile Şekil 6.37 ve Şekil 6.38' de görülmektedir.



Şekil 6.37. (a) İ-T MYA ve (b) İ-T KYA 0,5N yükte kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimi



Şekil 6.38. (a) 3T MYA ve (b) 3T KYA 0,5N yükte kayma mesafesine bağlı olarak sürtünme katsayısı değişimi

### 6.6.2. Aşınma kaybı

2-D profilometre yardımıyla ve stereo mikroskopla ölçülmüş aşınma izi derinliği (D) ve aşınma izi genişliği (G) değerleriyle aşınma kesitinin alanı hesaplanmıştır. Aşınma izi derinliği ve aşınma izi genişliği değerleri, aşınma izinin başı, ortası ve sonu olmak üzere en az üç farklı noktadan alınarak ortalama olarak verilmiştir. Tablo Ek A da her bir numunenin ortalama aşınma izi genişliği ve ortalama aşınma izi derinliği verilmiştir. Her bir numune için kesit alanı hesaplanmış ve lineer aşınma yolu (L) ile çarpılarak aşınma kaybı hacimsel olarak hesaplanmıştır. EPT ve indüksiyonla modifiye edilen, modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma kaybı değerleri Tablo 6.5'de verilmektedir.



Tablo.6.5. İşlemsiz, modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş KGDD numunelerinin aşınma yüklerine bağlı olarak aşınma kaybı değerleri

Numune		Yük (N)	Modifiye Yüzey Aşınma Kaybı ( $\mu\text{m}^3 \times 10^6$ )	Kompozit Yüzey Aşınma Kaybı ( $\mu\text{m}^3 \times 10^6$ )
İşlemsiz KGDD		0,5	23,70	23,70
		1	41,43	41,43
		2	61,56	61,56
Modifiye edilmiş KGDD	1	0,5	16,65	11,96
		1	26,36	21,01
		2	37,71	32,12
	2	0,5	18,06	11,04
		1	28,69	22,83
		2	57,77	30,29
	3	0,5	33,63	4,844
		1	55,24	11,11
		2	68,70	16,57
	4	0,5	17,80	13,73
		1	27,21	20,44
		2	39,63	27,37
	5	0,5	19,48	11,10
		1	36,47	25,50
		2	63,23	27,35
	6	0,5	33,63	4,844
		1	55,24	11,11
		2	68,70	16,57
İndüksiyonla sertleştirilmiş KGDD (İ)		0,5	23,84	7,09
		1	37,47	9,58
		2	50,26	12,55
Modifikasyon + temperlenmiş KGDD	1T	0,5	12,38	12,56
		1	22,41	19,05
		2	39,40	30,53
	2T	0,5	20,82	14,62
		1	35,49	29,16
		2	59,84	41,31
	3T	0,5	61,99	9,33
		1	76,34	13,83
		2	90,31	18,81
	4T	0,5	15,48	14,00
		1	23,42	17,75
		2	34,15	29,63
	5T	0,5	20,66	15,81
		1	43,27	28,74
		2	62,98	36,33
	6T	0,5	61,99	9,33
		1	76,34	13,83
		2	90,31	18,81
İndüksiyon+ Temperlenmiş KGDD (İ-T)		0,5	22,91	8,911
		1	30,74	12,12
		2	51,09	34,24

İşlemsiz, modifikasyon sonrası ve modifikasyon+temperleme sonrası numunelerin 0,5N, 1N, 2N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma izi boyunca meydana gelen aşınma kaybı değişimleri Şekil 6.39' da görülmektedir.

Şekil 6.39 (I)'de 0,5 N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma testi uygulanmış numune gruplarının aşınma kaybı değişimleri verilmiştir. Modifiye yüzey aşınma oranları işlemsiz numuneye göre 1 nolu numunede % 29.7, 2 nolu numunede % 23.8, 4 nolu numunede % 24.88 ve 5 nolu numunede % 17.81 oranlarında azalma meydana gelmişken bu oran 3 nolu, 6 nolu ve İ nolu numunelerde sırası ile % 29.52, % 29.52 ve % 0.58 oranlarında artış göstermiştir. Maksimum modifiye yüzey aşınma kaybı değeri 3 nolu numunede, minimum modifiye yüzey aşınma kaybı ise 1 nolu numunede elde edilmiştir. 1 ve 2 nolu numunelerde artan yüzey sertliği ile aşınma oranlarında azalma görülmüştür. Maksimum yüzey sertliği elde edilen 3 ve 6 nolu numunede modifiye yüzey aşınma kaybı oranı da maksimum çıkmıştır. Daha önceki bölümlerde bahsedilen artan termal çevrim sayısı ve yüksek voltaj süresi ile maksimum sertliğin elde edildiği parametrelerde karbonun yandığı ve yüzeyde 1mm tabaka kalınlığında grafitlerin olmadığı görülmüştür. Grafitin yağlayıcılık etkisinin azalmasından dolayı aynı zamanda da sert ve gevrek bir yüzey elde edilmiş olduğundan maksimum sertliğin elde edildiği 3 ve 6 nolu numunelerde aşınma miktarının daha yüksek olduğu görülmüştür [116]. Benzer durum lazer ile yapılan modifikasyon işlemleri sonucunda elde edilen yüzey aşınmalarında da görülmektedir [117-120]. İndüksiyonla sertleştirilmiş numunede modifiye yüzey aşınma kaybı işlemsiz numuneye göre büyük farklılık göstermemektedir. İ nolu numunenin maksimum yüzey sertlikleri 3 ve 6 nolu numuneler ile aynı olmasına rağmen daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durum mikroyapıların incelendiği bölümde anlatıldığı gibi yüzeyde grafitlerin ergimesi ile ilişkilendirilebilir. İndüksiyonla sertleştirilen numunelerde grafitler yüzeyde kısmen ergimişken, termal çevrimin ve yüksek voltaj süresinin arttığı numunelerde tamamen ergimiştir. Bu sebeple aşınma deneylerinde indüksiyonla sertleştirilen numunelerde grafitin yağlayıcılık etkisi daha çok görülmüştür.

0,5N yük altında yapılan kompozit yüzey aşınma sonuçlarının (Şekil 6.39 (I)) modifiye yüzey aşınma sonuçlarından çok farklı olduğu görülmektedir. İşlemsiz ve

modifikasyon işlemi görmüş numunelerde artan yüzey sertliğine paralel olarak aşınma oranlarında azalma meydana geldiği görülmektedir. Kompozit yüzey aşınma kaybı 1 nolu numunede işlemsiz numuneye göre % 49.5, 2 nolu numune %53.39, 3 nolu numune % 79.5, 4 nolu numune %42, 5 nolu numune %53.13, 6 nolu numune % 79.5, İ nolu numune de %70 oranında azalma göstermiştir. Bu azalmanın sebebinin, aşındırıcı bilyanın hem modifiye edilmiş sert yüzeyi hemde işlem görmemiş altlık yüzeyi aşındırması sırasında işlemsiz bölgelerdeki grafitin yağlayıcılık etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kompozit yüzey aşınma testi sırasında hem tok hem de sert yüzeylerin bu azalmaya katkıda bulunduğu ifade edilebilir.

Şekil 6.39 (II)'de 1N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma deneyi uygulanmış numunelerin aşınma kaybı değişimleri verilmiştir. Modifiye yüzey aşınma kaybı oranları işlemsiz numuneye göre 1 nolu numunede % 36.3, 2 nolu numunede % 30.7, 4 nolu numunede % 34.3 ve 5 nolu numunede % 11.96 ve İ nolu numunede %9.5 oranlarında azalma meydana gelmişken bu oran 3 ve 6 nolu numunelerde % 33.31 oranlarında artmıştır. 1N yükün uygulandığı modifiye yüzey aşınma kaybı grafikleri 0,5N yüke benzer sonuçlar vermiştir. 1 ve 2 nolu numunelerde artan yüzey sertliği ile aşınma kaybı oranlarında azalma görülmüştür. 3 ve 6 nolu numunede maksimum aşınma kaybı görülmüştür. Benzer nedenlerden dolayı artan termal çevrim ve yüksek voltaj süresi ile karbonun yüzeyde ergimesiyle grafitin yağlayıcılık etkisinin azalmasından 3 nolu ve 6 nolu numunelerde aşınma daha çok görülmüştür. İ nolu numunede aşınma sonuçları 3 ve 6 nolu numunelere göre daha iyi sonuçlar verse de, istenen sonuç indüksiyonla sertleştirme işleminde de sağlanamamıştır. 3 ve 6 nolu numunelere benzer şekilde yüzeyde sert fakat gevrek bir modifikasyon bölgesi oluşmuş olabileceğinden aşınma deneyleri sırasında yüzeyde daha fazla hasar oluşmuş olabilir.

1N yük altında yapılan kompozit yüzey aşınma kaybı sonuçlarının (Şekil 6.39(II)) modifiye yüzey aşınma kaybı oranlarından daha düşük olduğu görülmektedir. Kompozit yüzey aşınma oranları incelendiğinde işlemsiz numuneye göre 1 nolu numunede % 49.2, 2 nolu numune %44.88, 3 nolu numune % 73.1, 4 nolu numune % 50.6, 5 nolu numune %38.45, 6 nolu numune % 73.17, İ nolu numune de %76.8

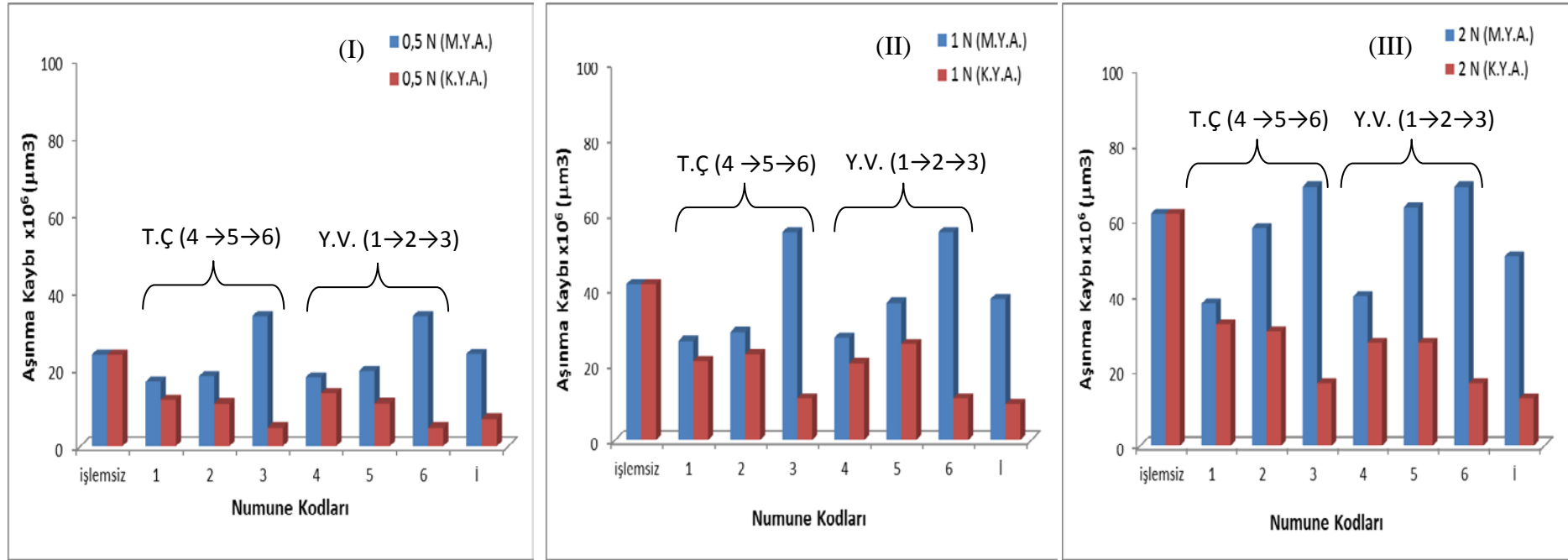
oranlarında azalma meydana geldiği görülmektedir. Benzer şekilde bu azalmanın sebebinin, aşındırıcı bilyanın hem modifiye edilmiş sert yüzeyi hemde işlem görmemiş altlık yüzeyi aşındırması sırasında işlemsiz bölgelerdeki grafitin yağlayıcılık etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

2 N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma deneyi uygulanmış numunelerin aşınma kaybı değişimleri Şekil 6.39 (III)'de görülmektedir. İşlemsiz numuneye göre modifiye yüzey aşınma kaybı 1 nolu numunede % 38.7, 2 nolu numunede % 6.1, 4 nolu numune de %35.6 ve İ nolu numune % 18.3 azalma meydana gelmişken, 3 nolu numunede modifiye yüzey aşınma oranında %11.5, 5 nolu numunede %2.7, 6 nolu numunede %11.5 artış göstermiştir. Benzer nedenlerden dolayı 5 nolu numunede modifiye yüzey aşınma oranı yükün artması ile 3 ve 6 nolu numunelere benzer şekilde artış göstermiştir. Yüzeyde sert ve gevrek bir modifikasyon bölgesi oluşmuş olabileceğinden aşınma deneyleri sırasında yüzeyde daha fazla malzeme kopuşu görülmüştür. Aynı zamanda artan termal çevrim ve yüksek voltaj süresi ile karbonun yüzeyde ergimesiyle grafitin yağlayıcılık etkisinin azalması 3 nolu ve 6 nolu numunelerde aşınma oranının daha çok düşürmüştür.

2 N yük altında kompozit yüzey aşınma oranı (Şekil 6.39 (III)) sonuçları incelendiğinde, işlemsiz numuneye 1 nolu numunede aşınma kaybı % 47.8, 2 nolu numunede %50.7, 3 nolu numunede %73, 4 nolu numunede %55.55, 5 nolu numunede %55.56, 6 nolu numunede % 73.05 ve İ nolu numunede % 79.6 oranında azalma göstermiştir. Kompozit yüzey aşınma sonuçları tüm yüklerde benzer sonuçlar vermiştir. Aşındırıcı bilyanın hem modifiye edilmiş sert yüzeyi hemde işlem görmemiş altlık yüzeyi aşındırması sırasında işlemsiz bölgelerdeki grafitin yağlayıcılık etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Sonuç olarak artan yüke bağlı olarak aşınma kaybı oranlarında artış görülmüştür. Artan yüzey sertliği modifiye yüzey aşınma oranlarından çok kompozit yüzey aşınma kaybı oranlarında etkili olduğu görülmüştür. 1, 2, 4, 5 nolu numunelerde uygulanan tüm aşınma yüklerinde modifiye yüzey aşınma oranlarında azalma meydana gelmişken, 3, 6 ve İ nolu numunelerde artış meydana gelmiştir. Aşınma testi kompozit yüzey aşınması olduğunda bilyanın hemde işlem görmemiş altlık

yüzeyi hem de modifiye edilmiş yüzeyi aşındırması aşınma kaybını minimuma indirmiştir. Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere yüzeyde grafitin değişen yüzdesi, karbonun yanması ve elde edilen martenzit yapısı ve değişen yüzdesi aşınma kaybında etken olduğu söylenebilir.[79,102]



Şekil 6.39. İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin (I) 0,5N (II) 1N, (III) 2N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma kaybı değişimleri (T.Ç.=Termal Çevrim, Y.V.=Yüksek Voltaj)

Şekil 6.40'da 0,5N, 1N, 2N yükleri altında işlemsiz numune ve modifikasyon işlemi sonrası temperlenmiş numuneler için sırasıyla modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma kaybı değişimleri verilmiştir.

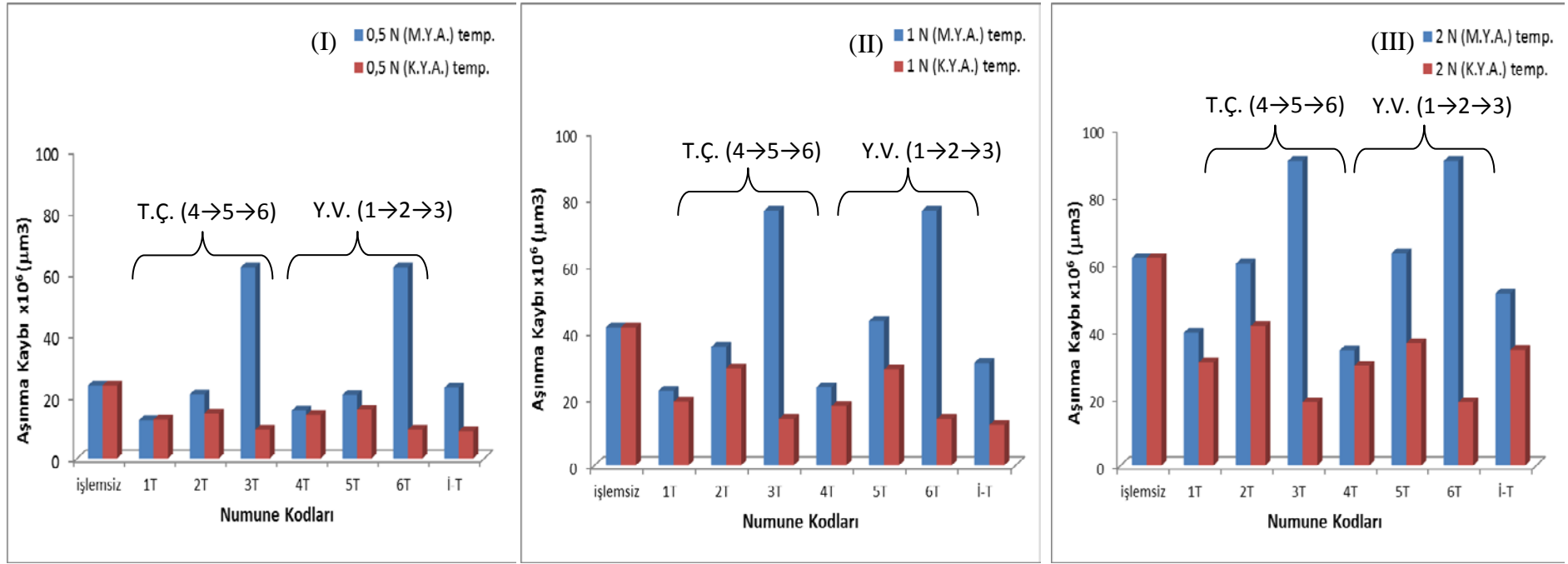
Şekil 6.40 (I)'de 0,5 N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma deneyi uygulanmış temperlenmiş numunelerin aşınma kaybı değişimleri verilmiştir. Temperlenmiş modifiye yüzey aşınma kaybı oranları işlemsiz numuneye göre 1T nolu numunede % 47.7, 2 nolu numunede % 12.1, 4T nolu numunede % 34.7, 5T nolu numunede % 12.83, İ\_T nolu numunede %3.36 oranlarında azalma meydana gelmişken bu oran 3T ve 6T nolu numunelerde % 161.4 oranında artış göstermiştir. Bu oran temperlenmemiş numune oranlarından daha çoktur. Temperleme işlemi sonrası azalan yüzey sertliğinin aşınma dayanımında olumsuz etkili olduğu söylenebilir [102,121]. İndüksiyonla sertleştirme işlemi ile modifiye edilmiş numunelerin modifiye yüzey aşınma oranı işlemsiz numuneye yakın değerler göstermiştir. İ-T nolu numunenin maksimum yüzey sertlikleri 3T ve 6T nolu numuneler ile aynı olmasına rağmen daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu durum mikroyapıların incelendiği bölümde anlatıldığı gibi yüzeyde grafitlerin ergimesi ile ilişkilendirilebilir. İndüksiyonla sertleştirilen numunelerde grafitler yüzeyde kısmen ergimişken termal çevrimin ve yüksek voltaj süresinin arttığı numunelerde tamamen ergimiştir. Bu sebeple aşınma deneylerinde indüksiyonla sertleştirilen numunelerde grafitin yağlayıcılık etkisi daha çok görülmüştür. 0,5N yük altında temperlenmiş numunelerin kompozit yüzey aşınma oranı temperlenmemiş numunelerin sonuçlarına benzer sonuçlar göstermiştir. Modifiye yüzey aşınmasında en kötü sonucu veren 3T ve 6T nolu numuneler, kompozit yüzey aşınmasında işlemsiz numuneye göre % 60.6 oranında iyileşme göstermiştir. Bu oran indüksiyonla sertleştirilen numunede % 62.4 dür. Bu durum daha önce yapılan aşınma deneylerinde olduğu gibi beklenen bir sonuçtur. Fakat temperleme işleminin aşınma kaybı sonuçlarında olumlu bir etkisi görülmemiştir. Temperlenen numunelerde yüzey sertlerindeki azalma aşınma kaybı sonuçlarını olumsuz etkilemiştir [88,92, 102,121-122].

Şekil 6.40 (II)' de 1 N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma deneyi uygulanmış temperlenmiş numunelerin aşınma kaybı değişimleri verilmiştir. Temperlenmiş modifiye yüzey aşınma kaybı oranları işlemsiz numuneye göre 1T

nolu numunede % 45.9, 2T nolu numunede % 14.3, 4T nolu numunede % 43.47, İ-T nolu numunede %25.8 oranlarında azalma meydana gelmişken bu oran 5T nolu numunede % 4.25, 3T ve 6T nolu numunelerde % 45.7 oranında artış göstermiştir. 1N yük altında yapılan kompozit yüzey aşınma kaybı sonuçlarının modifiye yüzey aşınma oranlarından daha düşük olduğu görülmektedir. Modifiye yüzey aşınma kaybı en çok olan 3T ve 6T nolu numunelerde işlemsiz yüzeyden gelen grafitin yağlayıcılık etkisi ile kompozit yüzey aşınma kaybı % 66.6 oranında azalmıştır.

Şekil 6.40 (III)'de 2 N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma testi uygulanmış temperlenmiş numunelerin aşınma kaybı değişimi verilmiştir. Temperlenmiş modifiye yüzey aşınma oranları işlemsiz numuneye göre 1T nolu numunede % 35.9, 2T nolu numunede %2.7, 4T nolu numunede % 44.5, İ-T nolu numunede %17 oranlarında azalma meydana gelmişken, bu oran 5T nolu numunede % 2.25, 3T ve 6T no'lu numunelerde % 31.8 oranında artış göstermiştir. Temperleme işlemi sonrasında martenzit yapısı değiştiği, iğnemsiz ve gruplar halinde dağılan martenzitin yerini daha dağınık ve iğne uçları yuvarlaklaşan temperlenmiş martenzit oluşturduğunu ve bu durumun yüzey sertliğinde düşüşe neden olduğunu daha önceki bölümlerde belirtmiştik. Bu sebeple temperlenmiş numunelerin aşınma kayıpları daha yüksek görülmüştür. 2 N yük altında temperlenmiş numunelerin kompozit yüzey aşınma oranları Şekil 6.40 (III)' de görülmektedir. Uygulanan diğer aşınma yüklerine benzer olarak kompozit yüzey aşınma oranlarının modifiye yüzey aşınma oranlarından çok daha düşük olduğu görülmektedir. Modifiye yüzey aşınma oranları en yüksek olan 3T ve 6T nolu numunelerde işlemsiz yüzeyden gelen grafitin yağlayıcılık etkisi ile kompozit yüzey aşınma oranı % 69.4 azalmıştır.

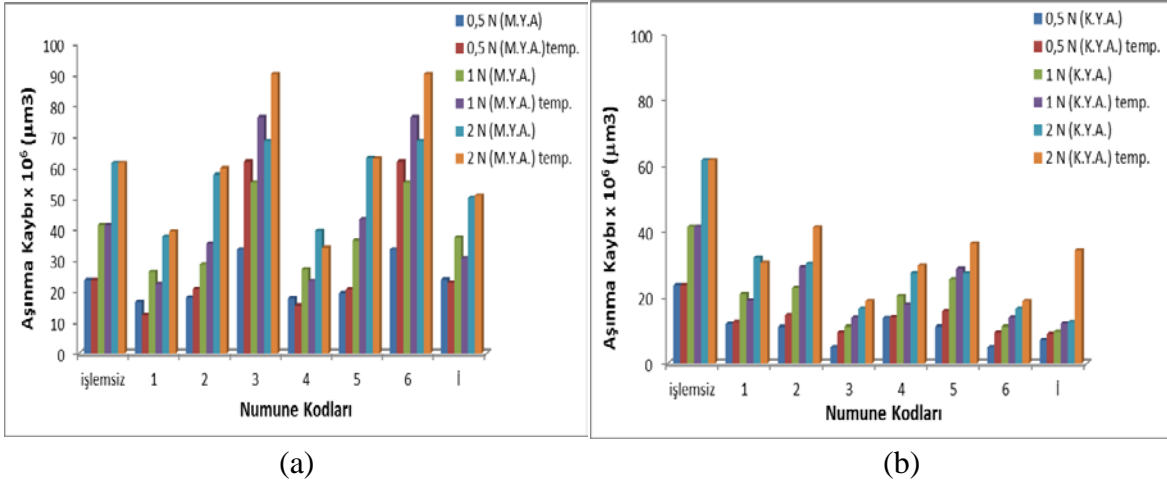




Şekil 6.40. İşlemsiz, Modifikasyon + Temperlenmiş numunelerin (I) 0,5N (II) 1N, (III) 2N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma kaybı değişimleri (T.Ç.=Termal Çevrim, Y.V.=Yüksek Voltaj)

Şekil 6.41 (a) ve Şekil 6.41 (b)' de modifiye edilmiş ve modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin modifiye yüzey aşınma kaybı değerleri ile kompozit yüzey aşınma kaybı değişimleri ayrı grafiklerde ve tüm numune grupları için görülmektedir. Modifiye yüzey aşınma kaybı değerlerinde termal çevrim ve yüksek voltaj süresinin artması ile aşınma oranının 1, 2, 4, 5, İ nolu numunelerde azaldığı 3 ve 6 nolu numunelerde ise arttığı görülmektedir. Artan yüzey sertlik değeri modifiye yüzey aşınma kaybı sonuçlarını olumsuz etkilemiştir. Maksimum sertliğin elde edildiği parametrelerde karbonun yanmasından dolayı grafitin yağlayıcılık etkisinin azaldığı numunelerde sert ve gevrek bir yüzey elde edilmiş olduğundan aşınma miktarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Temperleme işleminin ise modifiye yüzey aşınma kaybı değerlerinde etkili olmadığı görülmektedir. Temperleme işlemi sonrasında iğnemi ve gruplar halinde olan martenzitin yerini daha dağınık ve iğne uçları yuvarlaklaşan temperlenmiş martenzit oluşturduğunu ve bu durumun yüzey sertliğinde düşüğe neden olduğunu daha önceki bölümlerde belirtmiştik. Bu sebeple temperlenmiş numunelerin aşınma kayıplarında azda olsa artış görülmüştür.

Kompozit yüzey aşınma kaybı değerleri ise farklı sonuçlar vermiştir. Genel olarak; artan termal çevrimle ve yüksek voltaj süresi ile aşınma oranı azalan bir dağılım izlemiştir. Fakat temperleme sonrası benzer nedenlerden dolayı kompozit yüzey aşınma kaybı değerlerini de olumsuz etkilemiştir. Sonuç olarak en iyi değişimler kompozit yüzey aşınma testlerinde görülmüştür. Modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin aşınma kaybı değerlerinde az da olsa artış görülmüştür. Bu durum aşınma testleri için uygulanan yüzey işlemlerinin ardından ilave bir ısıl işleme ihtiyacı olmadığını göstermiştir.



Şekil 6.41. (a) İşlemsiz, Modifiye edilmiş ve Modifikasyon + Temperlenmiş numunelerin 0,5N, 1N, 2N yük altında modifiye yüzey aşınma kaybı değişimleri (b) İşlemsiz, Modifiye edilmiş ve Modifikasyon + Temperlenmiş numunelerin 0,5N, 1N, 2N yük altında kompozit yüzey aşınma kaybı değişimleri

### 6.6.3. Aşınma hızı

Aşınma deneyleri sonuçları işlem görmemiş ile modifiye edilmiş ve modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma hızı ve spesifik aşınma hızı değişimleri Tablo 6.6'da verilmiştir.

0,5N, 1N, 2N yükleri altında modifiye yüzey spesifik aşınma hızı değişimleri incelendiğinde; modifiye yüzey aşınma hızı artan sertlik değeri 1, 2, 4, 5 ve İ nolu numunelerde azalmışken, 3 ve 6 nolu numunelerde aşınma hızı artmıştır. Modifiye edilen numunelerin temperleme işlemleri sonrası benzer sonuçlar vermiştir. 0,5N, 1N, 2N yükleri altında kompozit yüzey spesifik aşınma hızı değişimleri incelendiğinde ise aşınma kaybına benzer azalan bir eğilim göstermiştir. Temperleme işleminin kompozit yüzey aşınma hızında da olumlu bir etkisi görülmemiştir. Aşınma hızı ile ilgili detaylı sonuçlar ilerleyen kısımlarda bahsedilecektir.

0,5N yük altında modifiye yüzey aşınma hızı değişimleri incelendiğinde; işlemsiz numuneye göre modifiye yüzey aşınma hızı artan sertlik değeri 1, 2, 4, 5 ve İ nolu numunelerde azalmışken, 3 ve 6 nolu numunelerde aşınma hızı artmıştır. Maksimum yüzey sertliğinin elde edildiği 3 ve 6 (max. termel çevrim ve max. yüksek voltaj süresi) nolu numunelerde modifiye yüzey aşınma hızı da maksimuma çıkmıştır. Daha önceki bölümde anlatıldığı gibi termal çevrim sayısının ve yüksek voltaj süresinin artması ile 3

ve 6 nolu numunelerin yüzeyinde grafit kürelerinin ergidiği belirtilmişti. Grafitin yüzeydeki yağlayıcılık etkisi azaldığı için bu numunelerin aşınma hızı yükselmiştir. 3 ve 6 nolu numunelerde yüzeyde oluşan sert ve kırılğan martenzit ve sementit yapıları plastik deformasyondan çok daha yüzeyde kırılmalarla malzeme kaybına yol açmıştır [116,123]. İ ve 3/6 nolu numuneler eşit maksimum yüzey sertliğine sahip olmalarına rağmen modifiye yüzey aşınma hızı değişimleri yakın sonuçlar vermemiştir. Bu durum indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi sonrası numunelerde yüzeyde oluşan kısmı ergimedenden kaynaklandığı söylenebilir. İ nolu numunede yüzeyde grafitler tamamen ergimediğinden grafitin yağlayıcılık etkisi azalmamıştır [26,102]. Modifikasyon işlemi sonrası temperlenmiş numune gruplarının modifiye yüzey aşınma hızının temperlenmemiş numune gruplarına göre genel olarak daha yüksek olduğu Tablo 6.6'dan görülmektedir. Temperleme işlemi sonrası azalan sertlik değerleri aşınma hızı oranları da artış göstermiştir [106].

0,5N yük altında kompozit yüzey aşınma hızı değişimleri incelendiğinde ise aşınma kaybına benzer azalan bir eğilim göstermiştir. Modifikasyon sonrası içyapıda meydana gelen martenzitten ve altlık malzemeden gelen grafitin yağlayıcılık etkisinden dolayı daha öncedeki bölümlerde de belirtildiği gibi alümina bilyanın hem altlık malzemeyi, hemde modifikasyon yüzeyini aşındırması aşınma hızını düşürmüştür. Temperleme işleminin modifiye yüzey aşınma hızında olduğu gibi olumlu bir etkisi görülmemiştir. Temperleme işlemi ile yapıdaki martenzit, temperlenmiş martenzite dönüştüğünden ve yüzey sertlik değerlerinde düşüş meydana geldiğinden kompozit yüzey aşınma hızları artmıştır [92,102].

Tablo 6.6. İşlemsiz, modifiye edilmiş ve modifikasyon+temperlenmiş KGDD numunelerinin aşınma yüklerine bağlı olarak aşınma hızı değerleri

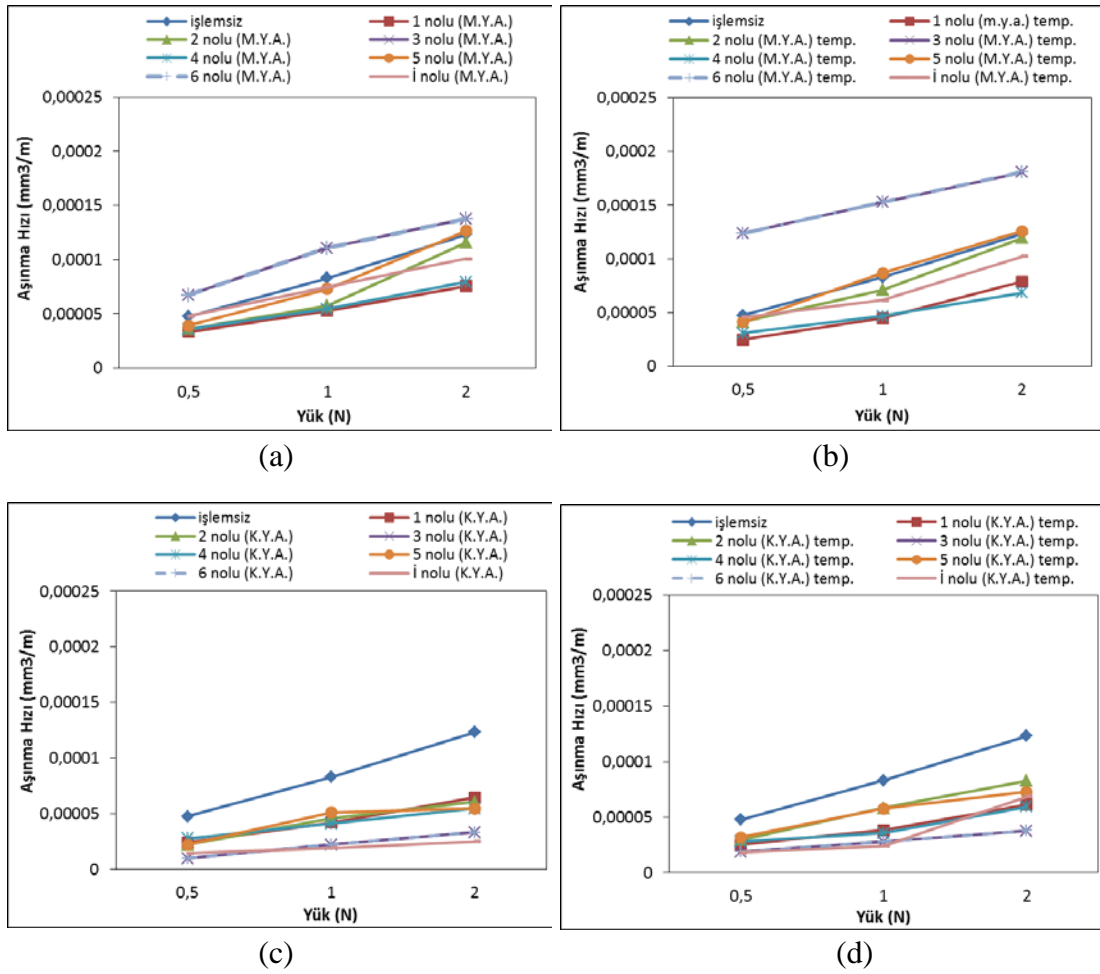
Numune	Yük (N)	Modifiye Yüzey Aşınma Hızı (mm <sup>3</sup> /m)	Modifiye Yüzey Spesifik Aşınma Hızı (mm <sup>3</sup> /Nm)	Kompozit Yüzey Aşınma Hızı (mm <sup>3</sup> /m)	Kompozit Yüzey Spesifik Aşınma Hızı (mm <sup>3</sup> /Nm)	
İşlemsiz KGDD	0,5	4,74E-05	9,48E-05	4,74E-05	9,48E-05	
	1	8,29E-05	8,28E-05	8,29E-05	8,28E-05	
	2	12,3E-05	6,15E-05	12,3E-05	6,15E-05	
Modifiye edilmiş KGDD	1	0,5	3,33E-05	6,66E-05	2,39E-05	4,78E-05
		1	5,27E-05	5,27E-05	4,2E-05	4,20E-05
		2	7,54E-05	3,77E-05	6,42E-05	3,12E-05
	2	0,5	3,61E-05	7,22E-05	2,20E-05	4,41E-05
		1	5,74E-05	5,73E-05	4,57E-05	4,56E-05
		2	11,6E-05	5,77E-05	6,06E-05	3,02E-05
	3	0,5	6,72E-05	13,45E-05	9,68E-06	1,93E-05
		1	11E-05	11,04E-05	2,22E-05	2,22E-05
		2	13,7E-05	6,87E-05	3,32E-05	1,65E-05
	4	0,5	3,56E-05	7,12E-05	2,74E-05	5,49E-05
		1	5,44E-05	5,44E-05	4,09E-05	4,08E-05
		2	7,93E-05	3,96E-05	5,47E-05	2,73E-05
	5	0,5	3,89E-05	7,79E-05	2,22E-05	4,44E-05
		1	7,3E-05	7,29E-05	5,1E-05	5,10E-05
		2	12,6E-05	6,32E-05	5,47E-05	2,73E-05
	6	0,5	6,72E-05	13,4E-05	9,68E-06	1,93E-05
		1	11E-05	11,0E-05	2,22E-05	2,22E-05
		2	13,7E-05	6,87E-05	3,32E-05	1,65E-05
İndüksiyonla sertleştirilmiş KGDD (İ)	0,5	4,76E-05	9,53E-05	1,41E-05	2,83E-05	
	1	7,49E-05	7,49E-05	1,92E-05	1,91E-05	
	2	10,1E-05	5,02E-05	2,51E-05	1,25E-05	
Modifikasyon + temperlenmiş KGDD	1T	0,5	2,47E-05	4,95E-05	2,51E-05	5,02E-05
		1	4,48E-05	4,48E-05	3,81E-05	3,81E-05
		2	7,88E-05	3,94E-05	6,11E-05	3,05E-05
	2T	0,5	4,16E-05	8,32E-05	2,92E-05	5,84E-05
		1	7,1E-05	7,09E-05	5,83E-05	5,83E-05
		2	12E-05	5,98E-05	8,26E-05	4,13E-05
	3T	0,5	12,39E-05	24,7E-05	1,86E-05	3,73E-05
		1	15,3E-05	15,2E-05	2,77E-05	2,76E-05
		2	18,1E-05	9,03E-05	3,76E-05	1,88E-05
	4T	0,5	3,09E-05	6,19E-05	2,80E-05	5,60E-05
		1	4,68E-05	4,68E-05	3,55E-05	3,55E-05
		2	6,83E-05	3,41E-05	5,93E-05	2,96E-05
	5T	0,5	4,13E-05	8,26E-05	3,16E-05	6,32E-05
		1	8,66E-05	8,65E-05	5,75E-05	5,74E-05
		2	12,6E-05	6,29E-05	7,27E-05	3,63E-05
	6T	0,5	12,40E-05	24,7E-05	1,86E-05	3,73E-05
		1	15,3E-05	15,2E-05	2,77E-05	2,76E-05
		2	18,1E-05	9,03E-05	3,77E-05	1,88E-05
İndüksiyon+ Temperlenmiş KGDD (İ-T)	0,5	4,58E-05	9,16E-05	1,78E-05	3,56E-05	
	1	6,15E-05	6,14E-05	2,42E-05	2,42E-05	
	2	10,2E-05	5,10E-05	6,85E-05	3,42E-05	

1N yük altında modifiye yüzey aşınma hızı sonuçları incelendiğinde, modifikasyon sonrası işlemsiz numuneye göre aşınma hızı artan sertlik değeri 1, 2, 4, 5 ve İ nolu numunelerde azalmışken, 3 ve 6 nolu numunelerde artan termal çevrim sayısı ve yüksek voltaj süresiyle aşınma hızı değeri maksimuma çıkmıştır. Temperleme işlemi ile aşınma hızı değerleri daha da artmıştır. Bunun nedeni ise daha önceki bölümde bahsedilen martenzit yapısının değişmesinden sertliğin azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Modifikasyon sonrası temperlenmeyen numuneler daha iyi aşınma performansı göstermişlerdir [88]. 1N yük altında kompozit yüzey aşınma hızı değişimleri ise modifiye edilen numunelerde azalma göstermiştir. Kompozit yüzey aşınma testi 0,5 N yük altında yapılan testlere benzer şekilde sonuçlar vermiştir. Modifikasyon işlemi sonrası iç yapıda meydana gelen martenzitten dolayı numunelerde kompozit yüzey aşınma hızı düşük çıkmıştır. Aşınma hızı artan sertlikle orantılı olarak azalmıştır. Bu durum martenzit yüzdesinden kaynaklanmaktadır. Martenzit hacim oranında ki azalma sertlik değerlerini de düşürdüğünden aşınma dayanımını azaltmıştır. Temperleme işlemi ile kompozit yüzey aşınma hızı değerleri tekrar artmıştır. Bunun nedeni ise daha önceki bölümde bahsedilen martenzit yapısının değişmesinden sertliğin azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Modifikasyon sonrası temperlenmeyen numuneler 0,5 N yük altında olduğu gibi daha iyi aşınma dayanımı göstermişlerdir.

2N yük altında modifiye yüzey aşınma hızı değişimleri incelendiğinde; EPT işlemi sonrası artan termal çevrimle ve yüksek voltaj süresiyle numunelerin modifiye yüzey aşınma hızı değerlerinde 1, 2, 4 ve 5 nolu numunelerde düşüş göstermişken, maksimum yüzey sertliğinin elde edildiği 3 ve 6 nolu numunelerde aşınma hızı da maksimuma çıkmıştır. Bu durum EPT sonrası 3 ve 6 nolu numunelerde yüzeyde oluşan ergimiş tabakadan kaynaklandığı söylenebilir. 3 ve 6 nolu numunelerin yüzeyin de sert ve kırılğan bir katman oluşmuştur. 1000 µm derinliğe kadar yüzeyde grafit küreleri bulunmadığından grafitin yağlayıcılık etkisi azalmıştır. İ ve 3/6 nolu numuneler eşit maksimum yüzey sertliğine sahipken aşınma davranışları modifiye yüzey aşınma deneylerinde yakın sonuçlar vermemiştir. İ nolu numunelerde ergimiş tabaka oluşmadığından grafitin yağlayıcılık etkisi ile aşınma hızının daha düşük değerler elde edilmesine neden olmuştur. Temperleme işleminin daha önce yapılan aşınma testlerinde olduğu gibi modifiye yüzey aşınma hızı değişimlerinde olumsuz etkisi olmuştur.

Temperleme işlemi sonrası aşınma hızı değerleri daha da artmıştır. Bu durum daha önce anlatılan ve yüzeyde oluşan martenzit yapısının değişmesinden ve yüzey sertliğinin azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Modifikasyon sonrası temperlenen numuneler daha kötü modifiye yüzey aşınma dayanımı göstermişlerdir. 2N yük altında kompozit yüzey aşınma hızı değişimleri azaldığı görülmektedir. Modifiye edilen numunelerin artan martenzit yüzdesi ile orantılı olarak artan yüzey sertliği ile aşınma hızı düşüş göstermiştir. Temperleme işleminin kompozit yüzey aşınma hızında da olumlu bir etkisi görülmemiştir. Temperleme işlemi ile yapıdaki martenzit, temperlenmiş martenzite dönüştüğünden ve yüzey sertlik değerlerinde düşüş meydana geldiğinden kompozit yüzey aşınma hızları artmıştır.

Şekil 6.42'de işlemsiz, modifiye edilen ve modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin aşınma hızlarının aşınma yüküne ve değişen parametrelere bağlı olarak değişimi görülmektedir.



Şekil 6.42. (a) işlemsiz, modifiye edilen numunelerin modifiye yüzey aşınma hızlarının (b) işlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin modifiye yüzey aşınma hızlarının (c) işlemsiz, modifiye edilen numunelerin kompozit yüzey aşınma hızlarının (d) işlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin kompozit yüzey aşınma hızlarının aşınma yüküne ve değişen parametrelere bağlı değişimleri

Şekil 6.42 (a)'da aşınma hızlarının değişen parametrelere bağlı olarak değişim eğrileri incelendiğinde; genel olarak artan yük ile aşınma hızlarının arttığı görülmektedir. Modifiye yüzey aşınma hızı işlemsiz numuneye göre 1 ve 2 nolu numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla aşınma hızı değerleri; %24.05, %36.42, %38.69 ile %23.84, %30.71, %5.69 düşüşe sebep olmuştur. 3 nolu numunede 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla modifiye yüzey aşınma hızı değerleri; %29.43, %24.06, %10.4 artışa sebep olmuştur. Termal çevrimin 4 ve 5 olduğu (1 ve 2 nolu) numunelerde modifiye yüzey aşınma hızı işlemsiz numuneye göre düşük olsa da artan yüzey sertliği ile artış görülmüştür. Termal çevrimin maksimum olduğu 3 nolu numunede ise aşınma hızı artmıştır. Modifiye yüzey aşınma hızı işlemsiz numuneye göre 4 ve 5 nolu numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla aşınma hızı değerleri; %24.8, %34.37, %35.52 ile



%17.93, %11.94 düşüğe sebep olmuşken 5 nolu numunede 2 N yük altında %2.38 artışa sebep olmuştur. 6 nolu numunede 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla modifiye yüzey aşınma hızı değerleri; %29.43, %24.63, %10.4 artışa sebep olmuştur. Artan yüksek voltaj süresi modifiye yüzey aşınma hızında 4 ve 5 nolu numunelerde düşüğe sebep olsa da benzer şekilde 5 nolu numunede maksimum yük altında 6 nolu numunede artan sertlikle beraber artmasına neden olmuştur. Buradan elde edilen sonuçlar sertliğin artışı ile gevrekleşen yüzeyden parçaların koptuğu ve yükün artışı ile kopan parçaların yüzeyi daha hızlı aşındırdığını göstermiş ve 3 ve 6 nolu numunelerde oluşan ergimiş bölge aşınma dayanımını düşürmüştür. İ nolu numune işlemsiz numuneye göre 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla modifiye yüzey aşınma hızı değerleri; %0.49 artışa sebep olmuşken, %9.57, %17.88 düşüğe sebep olmuştur. İndüksiyonla sertleştirilen numunelerde de genel olarak aşınma hızında azalma meydana gelmiştir. Maksimum sertlik değeri 3 ve 6 nolu numuneler ile benzer olan İ nolu numunelerde ergimiş tabaka oluşmadığından grafitin yağlayıcılık etkisi ile aşınma hızının daha düşük değerler elde edilmesine neden olmuştur.

Şekil 6.42 (b)'de modifiye edilen numunelerin temperleme işlemi sonrası modifiye yüzey aşınma hızlarının değişen parametrelere bağlı olarak değişim eğrileri incelendiğinde; artan yük ile aşınma hızlarının arttığı görülmektedir. Modifiye yüzey aşınma hızı işlemsiz numuneye göre 1T ve 2T nolu numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla aşınma hızı değerleri; %47.89, %45.95, %35.93 ile %12.23, %14.35, %2.43 düşüğe sebep olmuştur. 3T nolu numunede 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla modifiye yüzey aşınma hızı değerleri; %61.74, %45.81, %31.04 artışa sebep olmuştur. Temperleme işlemi sonrasında 1T ve 2T nolu numunelerde modifiye yüzey aşınma hızı için büyük farklılıklar elde edilmemiştir. Fakat 3T nolu numunede aşınma hızı daha da artış göstermiştir. Temperleme işlemi sonrası azalan sertlik değeri ve ergimiş tabakada oluşan dendritlerin kabalaşması aşınma hızını daha da arttırmıştır. Modifiye yüzey aşınma hızı işlemsiz numuneye göre 4T ve 5T nolu numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla aşınma hızı değerleri; %34.81, %43.54, %44.47 ile %12.86 düşüğe sebep olmuşken 1 ve 2 N yük altında %4.27, %2.38 artışa sebep olmuştur. 6T nolu numunede 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla modifiye yüzey aşınma hızı değerleri; %61.74, %45.81, %31.04 artışa sebep olmuştur. Sonuç olarak temperleme sonrası 5T ve 6T nolu

numunelerde aşınma hızlarında da artış görülmüştür. Daha önceki bölümde de bahsedildiği gibi temperleme işleminin aşınma dayanımında etkili olmadığı söylenmişti.

Şekil 6.42 (c)'de modifiye edilen numunelerin kompozit yüzey aşınma hızlarının değişen parametrelere bağlı olarak değişim eğrileri incelendiğinde; artan yük ile aşınma hızlarının arttığı görülmektedir. Fakat aşınma hızı değerlerinin işlemsiz numuneden daha düşük olduğu görülmektedir. Kompozit yüzey aşınma hızı işlemsiz numuneye göre 1, 2, 3 nolu numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla aşınma hızı değerleri; %49.57, %49.33, %47.8; %53.58, %44.87, %50.73 ile %79.57, %73.22, %73.08 düşüşe sebep olmuştur. Aynı şekilde 4, 5, 6 nolu numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla kompozit yüzey aşınma hızı değerleri; %42.19, %50.66, %55.52; %53.16, %38.48, %55.52 ile %79.57, %73.22, %73.08 düşüşe sebep olmuştur. İ nolu numunede numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla kompozit yüzey aşınma hızı değerleri, %70.25, %76.83, %79.59 düşüş görülmüştür. Kompozit yüzey aşınma testi 0,5N, 1N ve 2N yük altında yapılan testler benzer sonuçlar vermiştir. Artan yük ile aşınma hızı artsa da işlemsiz numuneye göre çok daha düşük değerler elde edilmiştir. Bu azalmanın sebebinin, aşındırıcı bilyanın hem modifiye edilmiş sert yüzeyi hemde işlem görmemiş altlık yüzeyi aşındırması sırasında işlemsiz bölgelerdeki grafitin yağlayıcılık etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Aynı zamanda modifikasyon işlemi sonrası iç yapıda meydana gelen martenzitten ve değişen martenzit yüzdesinden dolayı numunelerde kompozit yüzey aşınma hızı düşük çıkmış ve farklı hızlar göstermiştir. Aşınma hızı artan sertlikle orantılı olarak azalmıştır. Bu durum martenzit yüzdesinden kaynaklanmaktadır. Martenzit hacim oranında ki azalma sertlik değerlerini de düşürdüğünden aşınma dayanımını azaltmıştır.

Şekil 6.42 (d)'de modifiye edilen numunelerin temperleme işlemi sonrası kompozit yüzey aşınma hızlarının değişen parametrelere bağlı olarak değişim eğrileri incelendiğinde; artan yük ile aşınma hızlarının arttığı görülmektedir. Fakat aşınma hızı değerleri işlemsiz numuneden daha düşük olduğu görülmektedir. Kompozit yüzey aşınma hızı işlemsiz numuneye göre 1T, 2T, 3T nolu numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla aşınma hızı değerleri; %47.04, %54.04, %50.32; %38.39, %29.67, %32.84 ile %60.75, %66.58, %69.43 düşüşe sebep olmuştur. Aynı şekilde 4T, 5T, 6T nolu numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla kompozit yüzey aşınma hızı

değerleri; %40.92, %57.17, %51.78; %33.3, %30.63, %40.89 ile %60.75, %66.58, %69.43 düşüşe sebep olmuştur. İ-T nolu numunede numunelerde 0,5N, 1N ve 2N yükler için sırasıyla kompozit yüzey aşınma hızı değerleri, %62.44, %70.8, %44.3 düşüş görülmüştür. Temperleme işlemi ile kompozit yüzey aşınma hızı değerleri tekrar artmıştır. Bunun nedeni ise daha önceki bölümde bahsedilen martenzit yapısının değişmesinden, azalan grafit çapından ve yüzey sertliğinin azalmasından kaynaklandığı söylenebilir.

Sonuç olarak; artan yüke bağlı olarak aşınma hızı her numunede artış göstermiştir. Modifiye yüzey aşınmalarında aşınma hızı genel olarak (1, 2, 4, 5, İ) numunelerde işlemsiz numuneye göre düşük çıksada bu oran çok da farklı değildir. Artan sertlikle beraber aşınma hızlarında azalma meydana gelmiştir. 3, 6 nolu numunelerin modifikasyon işlemi sonrası yüzeylerinde ergimiş tabaka oluşmuştur. Ergimiş tabakada karbon 1mm tabaka kalınlığında yanmış ve yüzeyde grafit yüzdesi azalma göstermiştir. Bu durum modifiye yüzey aşınma testinde aşınma dayanımını azaltmıştır. Kompozit yüzey aşınmasında ise yüke bağlı olarak aşınma hızlarında artış görülse de, bu oranlar işlemsiz numuneden çok daha düşüktür. Aşınma hızının genel olarak azalma nedeni alümina bilyanın hem modifiye yüzeyini hem de altlık malzemeyi aşındırması sonucu, altlık malzemedeki gelen grafitin bilya ile numune arasında yağlayıcı bir tabaka oluşturduğu düşünülmüştür. Modifikasyon sonrası temperleme işlemi hem modifiye yüzey aşınmasında hem de kompozit yüzey aşınmasında iyileşme göstermemiştir. Temperleme işlemi ile yüzeyde temperlenmiş martenzit yapısı oluşmuş ve yüzey sertliği azalmış, aynı zamanda grafit küre çaplarının azalmasına neden olmuştur. Bu durum aşınma dayanımını daha çok azaltmıştır.

#### 6.6.4. Aşınma SEM görüntüleri ve EDS analizleri

Şekil 6.43' de 0,5 N yük altında modifiye yüzey aşınma deneyi gerçekleştirilmiş işlemsiz KGDD ve EPT yüzey işlemleriyle, indüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş KGDD numunelerine ait aşınan yüzeylerin aşınma izi SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir.

Şekil 6.43 (a)'da işlemsiz numunenin 0,5N yük altında modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüsü verilmiştir. İşlemsiz numunenin SEM görüntülerinde, numune yüzeyinde yoğun plastik deformasyon meydana geldiği söylenebilir. Uygulanan yükün 0,5 N olmasına rağmen yer yer yüzeyde derin yivler oluşmuştur. Yüzeyden kopan aşınan partiküller grafit küreleri etrafında yığılmalar oluşturmuştur. Şekil 6.43 (b) ve Şekil 6.43 (c)' de sırası ile 1 ve 2 nolu numunelerin 0,5N yük altındaki modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüleri verilmiştir. 1 ve 2 nolu numunelerde benzer şekilde plastik deformasyona uğramıştır. Ancak yüzey sertliğinin artması nedeniyle işlemsiz numunedeki kadar derin yivler görülmemiştir. Şekil 6.43(d)'de 3 nolu numunenin 0,5 N yük altında modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüsü verilmiştir. Termal çevrimin arttığı 3 nolu numunede 0,5 N yük altında daha çok abrazif aşınma görülmüştür. Aşınan yüzey görüntüsünden yüzeyden malzemelerin koptuğu ve yer yer çatlaklar oluştuğu görülmektedir. Yüzeyden kopan partiküller farklı derinlikte yivlerin oluşmasına neden olmuş ve yüzeyde oksit partikülleri (beyaz renkli) görülmüştür.

Şekil 6.43 (e)'de 0,5 N yük altında 4 nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Yüksek voltaj süresinin minimum olduğu 4 nolu numunenin yüzeyinde yoğun plastik deformasyon meydana geldiği söylenebilir. Bazı bölgelerde yüzeyin kalktığı görülmektedir. Oluşan yivlerin aralarından aşınma partikülleri kopmuş ve yığılmalar oluşturmuştur. Yüzeyde oksit partiküllerine rastlanmıştır. Şekil 6.43 (f)'de 5 nolu numunenin 0,5 N yük altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Yüksek voltaj süresinin arttığı 5 nolu numunede şiddetli plastik deformasyon oluşumu gözlemlenmiştir. Şiddetli plastik deformasyonla birlikte oluşan yivlerin, yiv kenarlarına aşınan partikül transferi olduğu görülmüştür. Kopan bu partiküller yer yer daha derin yivler oluşturmuştur. Şekil 6.43 (g)'de 6 nolu numunenin 0,5 N yük altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Yüksek voltaj süresinin arttığı 6 nolu numunede plastik deformasyonun yanında daha çok yüzeyden

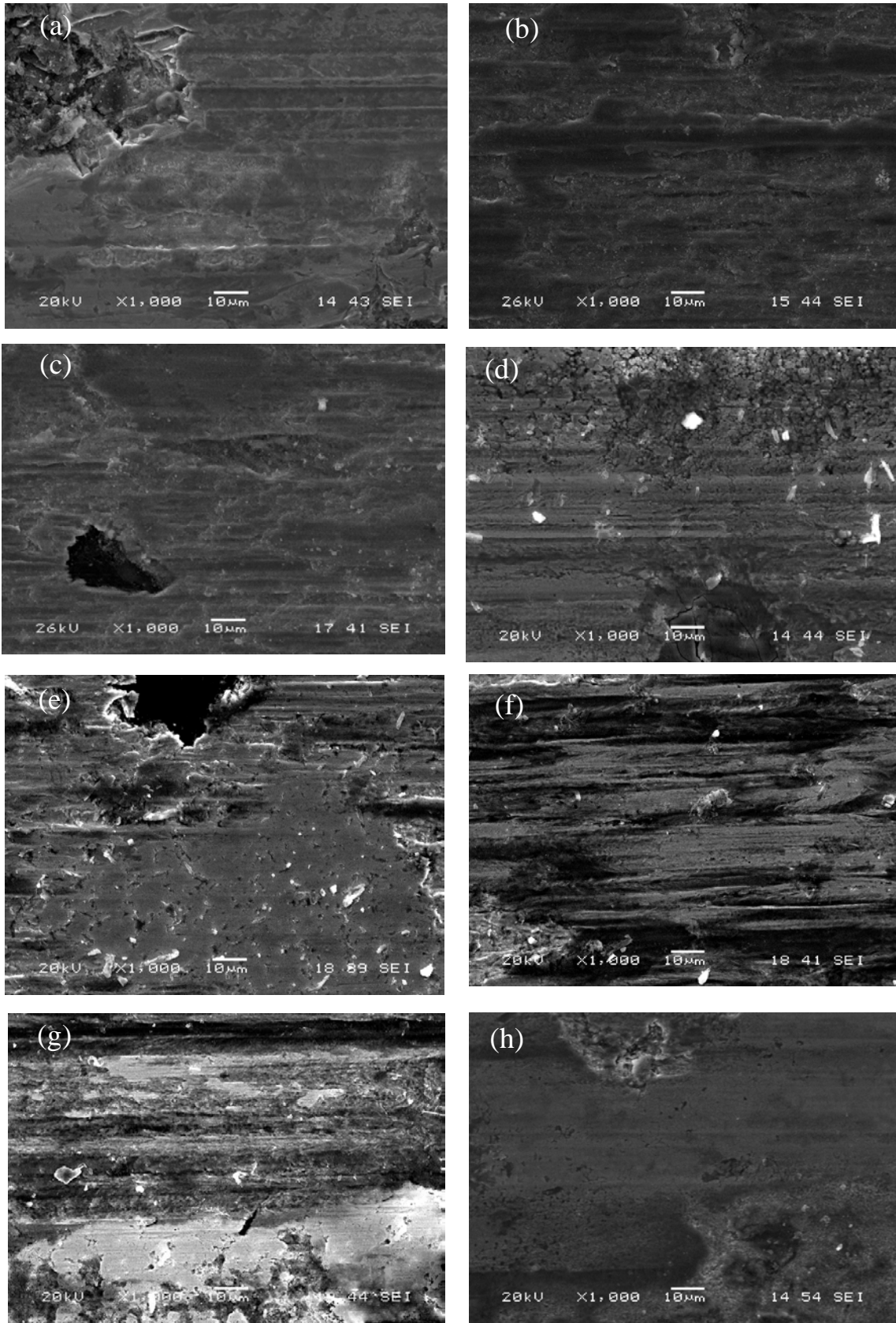
kopan malzemeler olduğu görülmüştür. Aşınmanın şiddetinin termal çevrimin ve yüksek voltajın artışıyla paralel olarak arttığını söyleyebiliriz. Yüzeyde kopan partiküllere ve oksit partiküllerine rastlanmıştır. Deformasyonun şekliyle modifiye edilen yüzeyin gevrek olduğu söylenebilir [101]. 1 nolu numunenin 0,5 N yük altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü Şekil 6.43 (h)'da verilmiştir. İndüksiyonla sertleştirilen numunede ise plastik deformasyonun daha ince bir tabakada olduğu açıktır. Fakat yer yer grafit küreleri çevresinde malzeme kopmalarının olduğu ve kürelerin deformasyona uğradığı görülmektedir. İndüksiyonla sertleştirilen numunenin 3 ve 6 nolu numuneye göre aşınma yüzeyinin çok daha düzgün olduğu ve daha az aşınma ürününün koptuğu ve yüzeye sıvandığını, daha ince yivler oluştuğunu ve sonuç olarak daha az aşınma oluştuğu söylenebilir.

Şekil 6.44' de 0,5 N yük altında kompozit yüzey aşınma deneyi gerçekleştirilmiş işlemsiz numunenin, EPT yüzey işlemi ve indüksiyonla sertleştirilmiş numunelere ait aşınan yüzeylerin kompozit yüzey aşınma izi SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir.

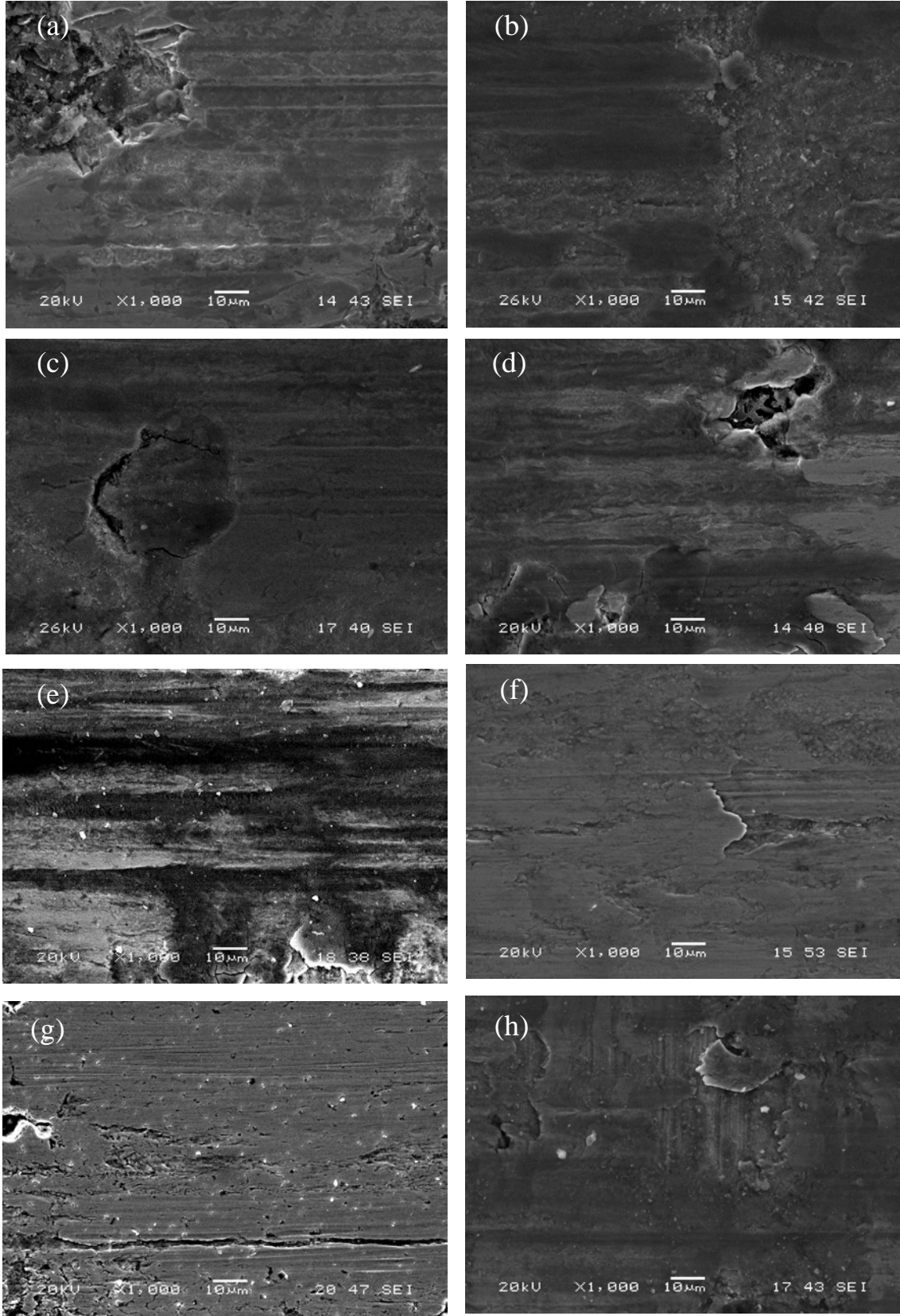
İşlemsiz numunenin 0,5N yük altında kompozit yüzey aşınma SEM görüntüsünde (Şekil 6.44 (a)), numune yüzeyinde yoğun plastik deformasyon meydana gelmiştir. Numune yüzeyinde yer yer yüzeyde derin yivler oluşmuştur. Şekil 6.44 (b)'de 0,5 N yük altında 1 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 1 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi, Şekil 6.43 (b) verilen modifiye yüzey aşınma izine göre aşınmanın daha düzgün olduğu aşınan yüzeyden kopan malzemelerin azaldığı ve yivlerin derinliğinin azaldığı söylenebilir. Şekil 6.44 (c)'de 0,5 N yük altında aşınan 2 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 2 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi Şekil 6.43 (c)' de verilen modifiye yüzey aşınma testine göre daha az yüzey hasarı oluştuğu görülmektedir. Yüzeyde sadece çok ince yivler oluşmuştur. Kompozit yüzey aşınmada daha önceki bölümde anlatılan grafitin yağlayıcılık etkisinin artması ile aşınma yüzeyi daha düzgünleşmiştir. Yüzeyden kopan partiküllerin azaldığı ve oksit partiküllere rastlanmadığı görülmüştür. Şekil 6.44 (d)'de 0,5 N yük altında aşınan 3 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 3 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi tamamen farklılık göstermiştir. Modifiye yüzey aşınma testinde yüzeyin artan gevrekliği nedeniyle daha çok deformasyona uğradığını ve yüzeyden kopan partiküllerin derin aşınma yivleri

oluşturduğunu söylemiştik. 3 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma testlerinde ise yüzeyden kopan malzemelerin azaldığı, abrazyonun yerini daha çok adhezif aşınmanın aldığı görülmektedir. Bu durum bilyanın hem sert yüzeyden aynı zamanda altlık malzemedan geçmesi ile grafitin bilya ve numune arasında yağlayıcı bir tabaka oluşturmasıyla aşınmanın azaldığı, yüzeyde oluşan yivlerin artan sertlikle paralel olarak kompozit yüzey aşınmasında azaldığı söylenebilir [26,27,83].

Şekil 6.44 (e)'de 0,5 N yük altında aşınan 4 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 4 nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izinden farklı olarak oluşan yivler net bir şekilde görülmesine rağmen derin izler oluşmamıştır. Yüzeyde yer yer oksit partiküllerine rastlanmıştır. Şekil 6.44 (f)'de 5 nolu numunenin 0,5N yük altında kompozit yüzey aşınma deneyi sonuçları verilmiştir. Aşınma yüzeyinde derin olmayan yivler oluşmuş, aşınma yüzeyi daha düzgünleşmiştir. Az da olsa yüzeyde kopmalar meydana gelmiştir. Şekil 6.44 (g)'de 6 nolu numunenin 0,5N yük altında kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 6 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi Şekil 6.43 (g)'de verilen modifiye yüzey aşınma izinden çok farklıdır. Altlık malzemedan gelen grafitin yağlayıcılık etkisi ile yüzeyden malzeme kopuşu azalmış ve yüzeyde deformasyona yol açmamıştır. Yüzeyin artan sertlik değeri ile oluşan yivlerin derinlikleri azalmıştır. İndüksiyonla sertleştirilen numunenin kompozit yüzey aşınma izini Şekil 6.44 (h)'da verilmiştir. İ nolu numunede aşınma izinde yer yer kopan malzemelerin varlığına rastlansa da EPT ile modifiye edilen numunelerde olduğu gibi iyileşme görülmüştür. İşlemsiz yüzeyden gelen grafit kürelerinin yağlayıcılık etkisi ile kompozit yüzey aşınma testlerinde daha düzgün aşınma yüzeyleri elde edilmiştir.



Şekil 6.43. İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin minimum yük (0,5N) altında modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1 nolu (c) 2 nolu (d) 3 nolu (e) 4 nolu (f) 5 nolu (g) 6 nolu (h) 7 nolu)



Şekil 6.44. İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin minimum yük (0,5N) altında kompozit yüzey asınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1 nolu (c) 2 nolu (d) 3 nolu (e) 4 nolu (f) 5 nolu (g) 6 nolu (h) I nolu)



Şekil 6.45’de aşınma yükünü maksimum olduğu 2N yük altında modifiye yüzey aşınma deneyi gerçekleştirilmiş işlemsiz numunenin, EPT yüzey işlemiyle modifiye edilmiş, indüksiyonla sertleştirilmiş numunelere ait aşınma izi SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir.

Şekil 6.45 (a)’da işlemsiz KGDD numunesinin 2N yük altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Artan yüklerle birlikte işlemsiz numunenin yüzeyinde plastik deformasyonla birlikte abrazif aşınmanın olduğu görülmektedir. Aşınma sırasında kopan aşınma ürünlerinin oluşan yivlere yapıştığı görülmektedir. Artan yüklerle birlikte oluşan yivlerinin derinliğinin arttığı görülmektedir. Şekil 6.45 (b)’de 1 nolu numunenin 2 N yük altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü vermektedir. 1 nolu numunede aşınma yönünde yivlerin olduğu görülmektedir. Aşınma deneyi sonrası oluşan yivlerin derinliğinin çok olmadığı görülmektedir. Yüzeyin sert ve gevrek olması aşınma izini genişletmiştir. Şekil 6.45 (c)’de verilen 2 nolu numunenin 2 N yük altında modifiye yüzey aşınma izinde aşınan partiküllerin yüzeye sıvandığı görülmektedir. 1 nolu numuneye benzer şekilde oluşan yivler çok derin değildir. Yükün artması ile 3 nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü Şekil 6.45 (d)’ de verilmiştir. Numune yüzeyinde plastik deformasyonun yanında kopan partiküllerin olduğu ve bu partiküllerin numune yüzeyine sıvandığı görülmektedir.

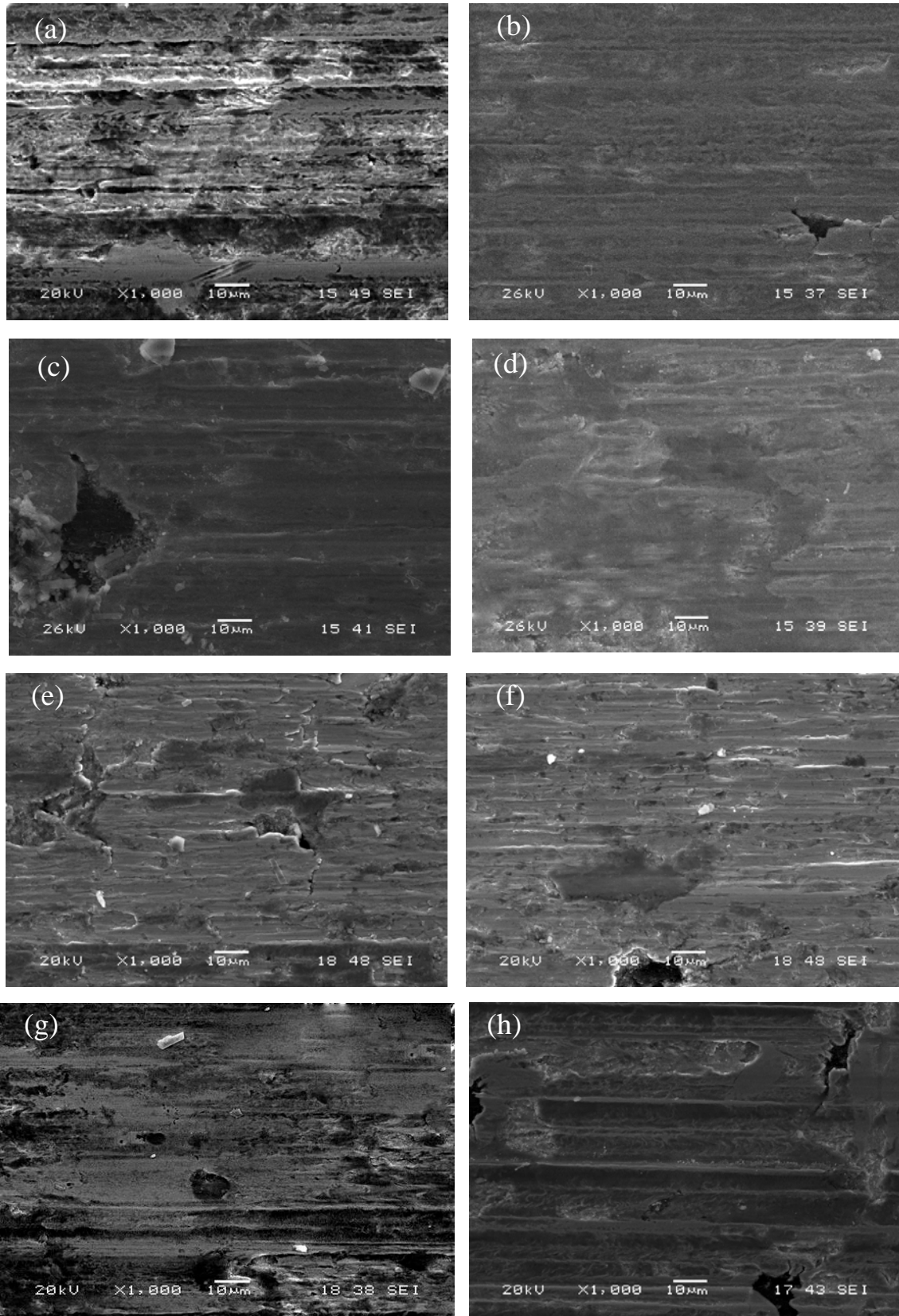
Şekil 6.45 (e) ve Şekil 6.45 (f)’de sırası ile 4 ve 5 nolu numunelerin 2 N yük altında aşınma izi görüntüleri verilmiştir. Her iki numunenin yüzeyinde plastik deformasyonun meydana geldiği ve geniş yivlerin olduğu görülmektedir. Yüzeyden kopan malzemelerin yer yer numune yüzeyine sıvandığı görülmüştür. 4 nolu numunede sertliğin düşük olmasından dolayı yüzeyde mikroçatlaklar meydana gelmiştir. Şekil 6.45 (g)’de 6 nolu numunenin 2 N yük altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Yüzeyde abrazif aşınma ve adhezif aşınma görülmüştür. 6 nolu numune yüzeyde derin yivler oluşmuş ve numune yüzeyinden partiküller kopmuştur. İndüksiyonla sertleştirilen numunenin EPT numunelerine göre daha düzgün aşınma gösterdiği söylenebilir (Şekil 6.45 (h)). Yer yer yüzeyden malzeme koptuğu fakat çok derin yivler oluşturmadığı görülmüştür.

Şekil 6.46'da 2N yük altında kompozit yüzey aşınma deneyi gerçekleştirilmiş işlemsiz numunenin, EPT yüzey işlemiyle modifiye edilmiş, indüksiyonla sertleştirilmiş numunelere ait aşınma izi SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir.

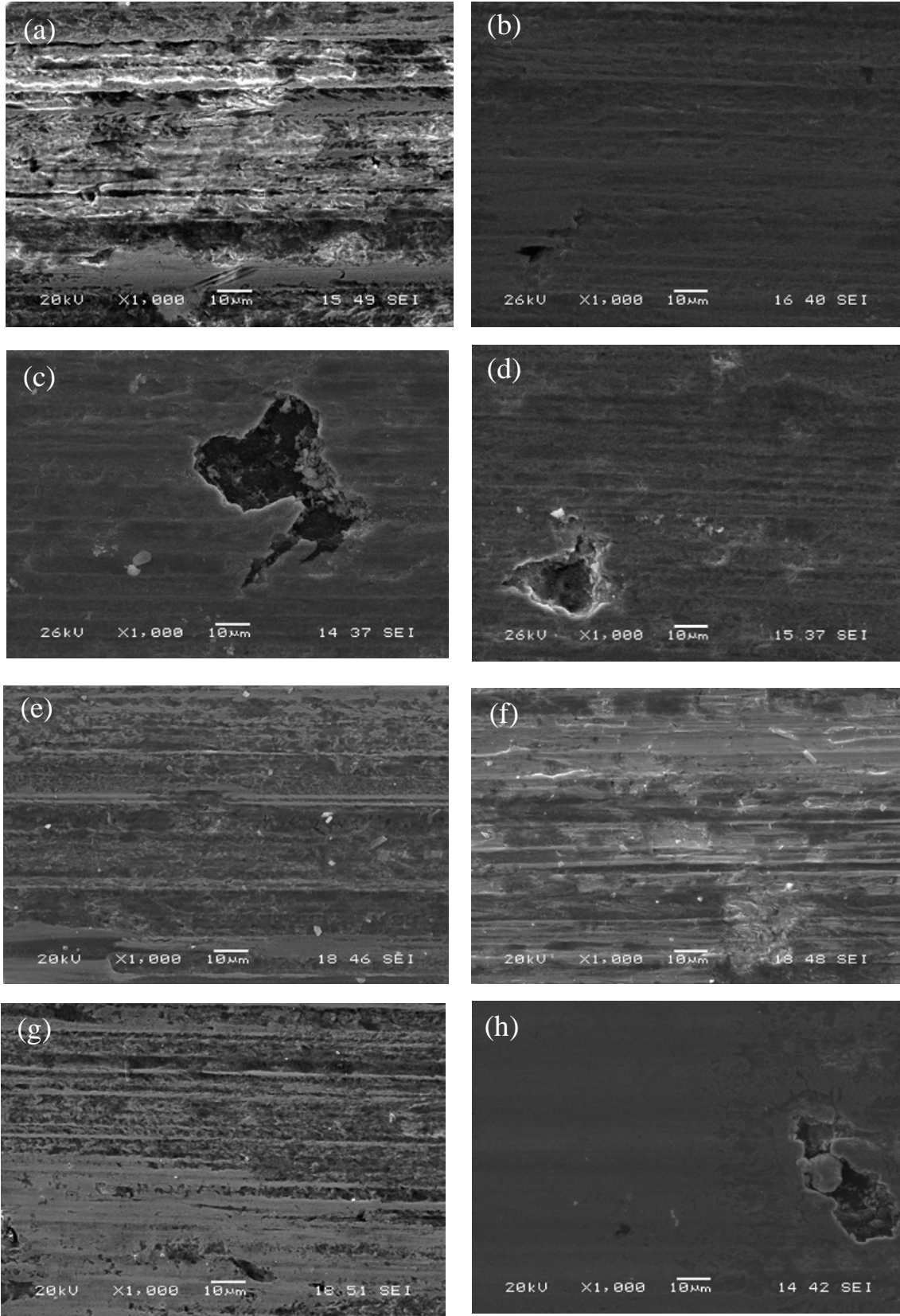
Şekil 6.46 (a)'da verilen işlemsiz numunenin kompozit yüzey aşınma izinde plastik deformasyonla birlikte abrazif aşınmanın olduğu görülmektedir. Aşınma sırasında kopan aşınma ürünlerinin oluşan yivlere yapıştığı çok net görülmektedir. Şekil 6.46 (b)'de 1 nolu numunenin 2 N yük altında kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 1 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izinde, modifiye yüzey aşınma izine göre oluşan yivlerin derinliğinin azaldığı görülmektedir. Modifiye yüzey aşınma türüne göre yüzeyden kopan parçaların azaldığı ve bu aşınan partiküllerin yivlere daha az sıvandığı şekilden görülmektedir. Kompozit yüzey aşınmada daha önceki bölümde anlatılan grafitin yağlayıcılık etkisinin artması ile aşınma yüzeyi daha düzgünleşmiştir. Şekil 6.46 (c) 'de 2 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüleri verilmiştir. 2 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi, modifiye yüzey aşınma izine göre yivlerin genişliğinin daraldığı ve kopan aşınma partiküllerinin azaldığı görülmüştür. 3 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi Şekil 6.46 (d)'de verilmiştir. 3 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izleri incelendiğinde yüzeyde daha ince fakat belirgin yivler oluşturduğu görülmüştür. Fakat bu numunenin modifiye yüzey aşınma numunesi kadar plastik deformasyona uğramadığı görülmektedir. Yüzeydeki aşınma daha düzgündür. Diğer numunelere benzer olarak kompozit yüzey aşınmada altlık malzemedan gelen grafit bilya ve numune arasında yağlayıcı bir tabaka oluşturmuştur.

Şekil 6.46 (e)'de 4 nolu numunenin 2N yük altındaki kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Modifiye yüzey aşınma izine göre aşınmanın daha hasarsız olduğu görülmektedir. Oluşan yivler daha incedir ve derin değildir. Yüzeyden kopan partiküller azalmış ve yüzeye tekrar sıvanma görülmemiştir. Oysa modifiye yüzey aşınmada yer yer pulluklama meydana gelmiştir. Altlık malzemedan geçen bilya grafitin yağlayıcılık etkisi ile sert modifikasyon bölgesinde deformasyonu daha aza indirmiştir. 5 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izinde de benzer görüntüler alınmıştır. Oluşan yivlerin genişliğinde bir miktar artış gözlemlenmiştir (Şekil 6.46 (f)). Şekil 6.46 (g)'de 6 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi verilmiştir. Benzer şekilde kompozit yüzey aşınma testlerinde yer yer aşınma izleri daha belirginleşmişken yer yer

azalma göstermiştir. Fakat oluşan bu yivler modifiye yüzey aşınma izindeki gibi derin ve geniş olmayıp, hasar minimuma inmiştir. İ nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü Şekil 6.46 (h)'de verilmiştir. Modifiye yüzey aşınma testine göre İ nolu numunede aşınma yüzeyinin daha düzgün olduğu, ince ve derin olmayan yivler olduğu ve grafit çevresinde yer yer kopan partiküller görülmüştür. Kompozit yüzey aşınma testinde işlemsiz yüzeyden gelen grafit kürelerinin yağlayıcılık etkisi ile daha düzgün aşınmış yüzeyler elde edilmiştir.



Şekil 6.45. İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin maksimum yük (2N) altında modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1 nolu (c) 2 nolu (d) 3 nolu (e) 4 nolu (f) 5 nolu (g) 6 nolu (h) 7 nolu)



Şekil 6.46. İşlemsiz, modifiye edilmiş numunelerin maksimum yük (2 N) altında kompozit yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1 nolu (c) 2 nolu (d) 3 nolu (e) 4 nolu (f) 5 nolu (g) 6 nolu (h) 7 nolu)

Şekil 6.47’da 0,5 N yük altında modifiye yüzey aşınma deneyi gerçekleştirilmiş işlemsiz numunenin, EPT ve indüksiyonla sertleştirme işlemi sonrası temperlenmiş numunelere ait aşınma izi SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir.

Şekil 6.47 (a)’da işlemsiz numunenin 0,5N yük altında modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüsü verilmiştir. İşlemsiz numunenin aşınma yüzeyinde plastik deformasyon meydana geldiği söylenebilir. Yer yer yüzeyde derin yivler oluşmuştur. Yüzeyden kopan aşınan partiküller grafit küreleri etrafında yığılmalar oluşturmuştur. Şekil 6.47 (b)’de 1T nolu numunelerin 0,5N yük altındaki modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüsü verilmiştir. Aşınma yüzeyinde şiddetli deformasyon meydana gelmiştir. Yüzeyden kopan partiküller yüzeyde yığılmalar oluşturmuş ve bu aşınan partiküller derin izler oluşturmuştur. Şekil 6.47 (c)’ de 2T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüsü verilmiştir. Benzer şekilde numune yüzeyi şiddetli plastik deformasyona uğramıştır. Yer yer yüzeyden kopan partiküllerin kazımalı aşınma oluşturduğu görülmüştür. Şekil 6.47 (d)’de ise 3T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüsü verilmiştir. Numune yüzeyinde ilk dikkati çeken mikro çatlaklar olmuştur. 1T ve 2T nolu numunelerde olduğu gibi şiddetli deformasyona uğramıştır. Yüzeyde oksit partikülleri (beyaz renkli) görülmüştür.

Şekil 6.47 (e)’ de 0,5 N yük altında 4T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Numune aşınma yüzeyinde plastik deformasyon meydana geldiği söylenebilir. Oluşan yivlerin aralarından aşınma partikülleri kopmuş ve yığılmalar oluşturmuştur. Şekil 6.47 (f)’ de 5T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 5T nolu numunede şiddetli plastik deformasyon oluşumu gözlemlenmiştir. Yüzeyde oldukça geniş ve derin aşınma izleri oluşmuştur. Şiddetli plastik deformasyonla birlikte oluşan yivlerin, yiv kenarlarına aşınan partiküllerin transferi olduğu görülmüştür. Kopan bu partiküller yer yer daha derin yivler oluşturmuştur. Şekil 6.47 (g)’ de 6T nolu numunenin 0,5 N yük altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Yüksek voltaj süresinin arttığı 6 nolu numunede plastik deformasyonun yanında daha çok yüzeyden kopan malzemeler olduğu görülmüştür. Yüzeyde mikro çatlaklar oluşmuş ve oksit partiküllerine rastlanmıştır. İ-T nolu numunenin 0,5 N yük altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü Şekil 6.47 (h)’da verilmiştir. İndüksiyonla sertleştirilen numunede ise plastik deformasyon

azalmıştır. Fakat yer yer grafit küreleri çevresinde aşınan malzemelerin koptuğu ve kürelerin deformasyona uğradığı görülmektedir.

Aşınma testleri sonrasında temperleme işleminin modifiye yüzey aşınmada olumlu bir etkisi olmadığı görülmüştür. Temperleme işlemi sonrası yüzeyden alınan modifiye yüzey aşınma izlerinin temperlenmemiş numune gruplarına göre deformasyonun daha şiddetli olduğu görülmüştür. Daha önceki bölümde verilen aşınma kaybı ve aşınma hızı grafikleri bu durumu doğrulamaktadır. Temperleme işlemi ile yüzeyin azalan sertliği deformasyon şiddetinde artışa neden olmuştur. Benzer şekilde yapılan laser yüzey çalışmalarında temperleme işlemi sonrası aşınma dayanımları daha kötü çıkmıştır. [88,106,121].

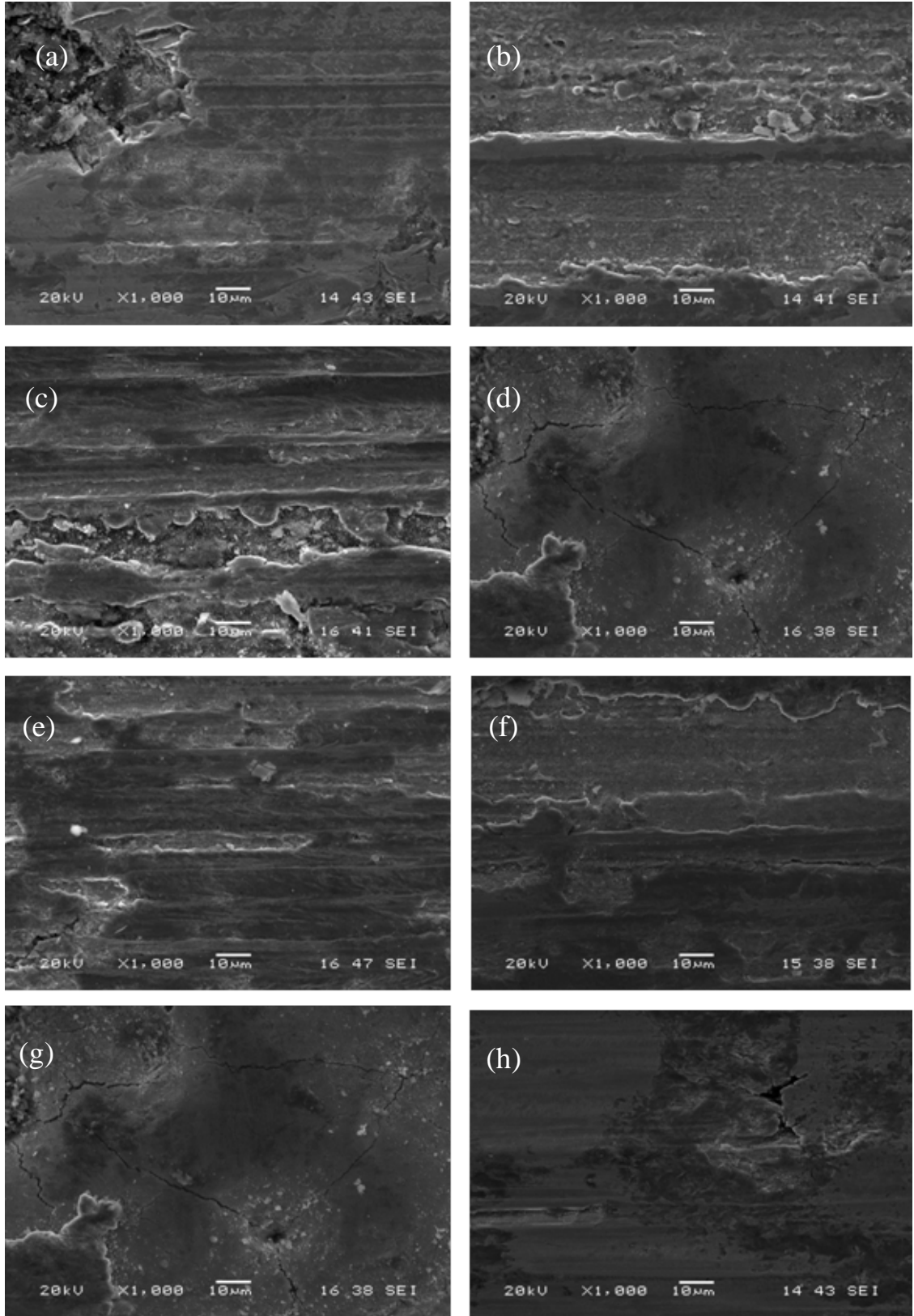
Şekil 6.48 'de 0,5 N yük altında kompozit yüzey aşınma deneyi gerçekleştirilmiş işlemsiz numunenin, EPT ve indüksiyonla sertleştirme işlemi sonrası temperlenmiş numunelere ait aşınma izi SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir.

İşlemsiz numunenin 0,5N yük altında kompozit yüzey aşınma izi SEM görüntülerinde (Şekil 6.48 (a)), numune yüzeyinde plastik deformasyon meydana geldiği görülmektedir. Numune yüzeyinde yer yer yüzeyde derin yivler oluşmuştur. Yüzeyden kopan aşınan partiküller grafit küreleri etrafında yığılmalar oluşturmuştur. Şekil 6.48 (b)' de 1T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 1T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma deneyi sonrasında alınan izin görüntüsü, modifiye yüzey aşınma deneyi sonrası alınan izin görüntüsüne göre çok daha düzgün olduğu aşınan yüzeyden kopan malzemelerin azaldığı ve yivlerin derinliğinin azaldığı görülmüştür. Şekil 6.48 (c)' de 2T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Benzer şekilde 2T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi modifiye yüzey aşınma türüne göre daha düzgün olduğu görülmektedir. Yüzeyde oluşan yivlerin derinliği ve yüzeyde meydana gelen hasar azalmıştır. Şekil 6.48 (d)'de 3T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Modifiye yüzey aşınma deneyine göre 3T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma testi sonrasında yüzeyden kopan partiküllerin azaldığı, çok azda olsa mikroçatlaklar görülmüştür. Aşınma sonrası yüzeyde meydana gelen deformasyonun azaldığı söylenebilir.

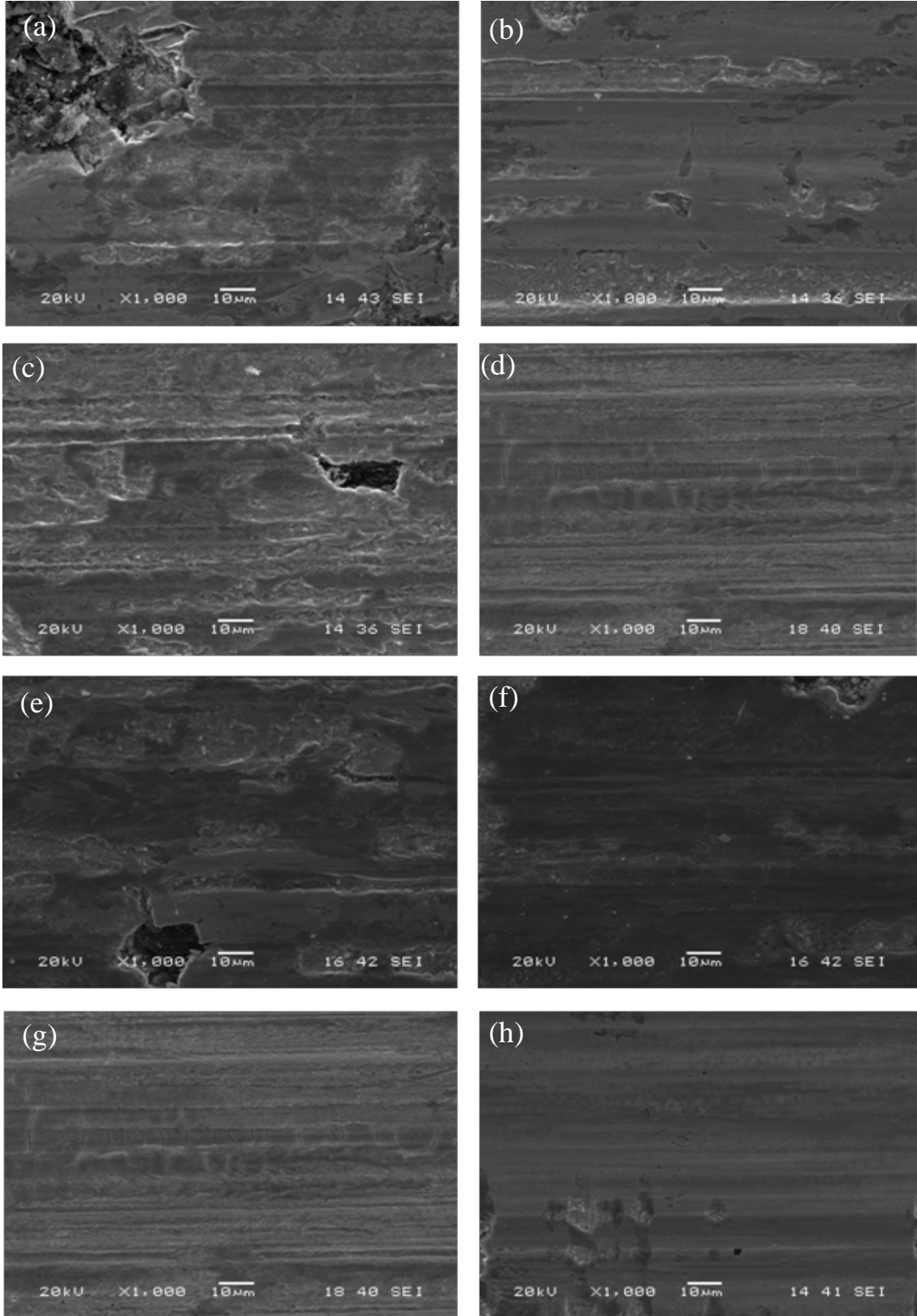
Şekil 6.48 (e)'de 4T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 4T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izinden farklı olup, oluşan yivler net bir şekilde görülmesine rağmen derin izler oluşmamıştır. Şekil 6.48 (f)'de 5T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Aşınan yüzeyin görüntüsü oldukça düzgündür. 5T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izine göre deformasyon şiddeti azalmış olup numune yüzeyinde çok derin olmayan yivler oluşmuştur. Şekil 6.48 (g)'de 6T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Yer yer çok incede olsa mikroçatlaklar görülmüştür. Modifiye yüzey aşınma deneyine göre yüzeyden kopan partiküllerin oluşturduğu deformasyon azalmış ve daha düzgün bir yüzey elde edilmiştir. İ-T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü Şekil 6.48 (h)'da verilmiştir. İ-T nolu numunede kompozit yüzey aşınma izinde yer yer kopan malzemelerin varlığına rastlansa da modifiye yüzey aşınma testine göre daha düzgün aşınma yüzeyi görülmüştür.

Kompozit yüzey aşınma testlerinde daha önceki bölümde anlatılan grafitin yağlayıcılık etkisinin artması ile aşınma yüzeyi tüm numune gruplarında daha düzgünleşmiştir. Bilyanın hem sert modifikasyon yüzeyinden aynı zamanda altlık malzemeden geçmesi ile grafit bilya ve numune arasında yağlayıcı bir tabaka oluşturmuştur. Yüzyeden kopan partiküllerin azaldığı ve oksit partiküllere daha az rastlandığı, yüzeyde oluşan yivlerin derinliklerinin azaldığı söylenebilir.





Şekil 6.47. İşlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin minimum yük (0,5N) altında modifiye yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1T nolu (c) 2T nolu (d) 3T nolu (e) 4T nolu (f) 5T nolu (g) 6T nolu (h) I-T nolu)



Şekil 6.48. İşlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenmiş numunelerin minimum yük (0,5N) altında kompozit yüzey aşınma izi SEM görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1T nolu (c) 2T nolu (d) 3T nolu (e) 4T nolu (f) 5T nolu (g) 6T nolu (h) İ-T nolu)

Şekil 6.49'da 2 N yük altında modifiye yüzey aşınma deneyi gerçekleştirilmiş işlemsiz numunenin, EPT ve indüksiyonla sertleştirme işlemi sonrası temperlenmiş numunelere ait aşınma izi SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir

Şekil 6.49 (a)'da işlemsiz numunenin 2N yük altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Artan yüklerle birlikte işlemsiz numunenin yüzeyinde plastik deformasyonla birlikte abrazif aşınmanın olduğu görülmektedir. Aşınma sırasında kopan aşınma ürünlerinin oluşan yivlere yapıştığı görülmektedir. Artan yüklerle birlikte oluşan yivlerinin derinliğinin arttığı görülmektedir. Şekil 6.49 (b)'de 1T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü vermektedir. 1T nolu numunede aşınma yönünde izlerin olduğu ve daha çok yüzeye kopan partiküllerin sıvandığı görülmektedir. Şekil 6.49 (c)'de verilen 2T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi görüntüsünde, aşınan partiküllerin yüzeye sıvandığı görülmektedir. 1T nolu numuneye benzer sonuçlar elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere yüzeyde daha az oksit partiküllerine rastlanmıştır. Yükün artması ile 3T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü Şekil 6.49 (d)' de verilmiştir. Numune yüzeyinde plastik deformasyonun yanında yer yer yüzeyden tabakanın kalktığı ve bu kopan partiküllerin numune yüzeyinde yivler oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 6.49 (e) ve Şekil 6.49 (f)'de sırası ile 4T ve 5T nolu numunelerin modifiye yüzey aşınma izi görüntüleri verilmiştir. Her iki numunenin yüzeyinde plastik deformasyonun meydana geldiği ve yivlerin olduğu görülmektedir. Yüzeyden kopan malzemelerin yer yer numune yüzeyine sıvandığı, 5T nolu numunede grafit kürelerinin deformasyona uğradığı görülmüştür. Şekil 6.49 (g)'de 6T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. Yüzeyde abrazif aşınma ve adhezif aşınma görülmüştür. 6T nolu numune yüzeyde kopan partiküller yivler oluşturmuş, numune yüzeyinde plastik deformasyonun yanında yüzeyden yer yer tabakanın kalktığı görülmüştür. İndüksiyonla sertleştirilen numunenin EPT numunelerine göre daha düzgün aşınma gösterdiği söylenebilir (Şekil 6.49 (h)). Yer yer yüzeyden malzeme koptuğu fakat çok derin yivler oluşturmadığı görülmüştür.

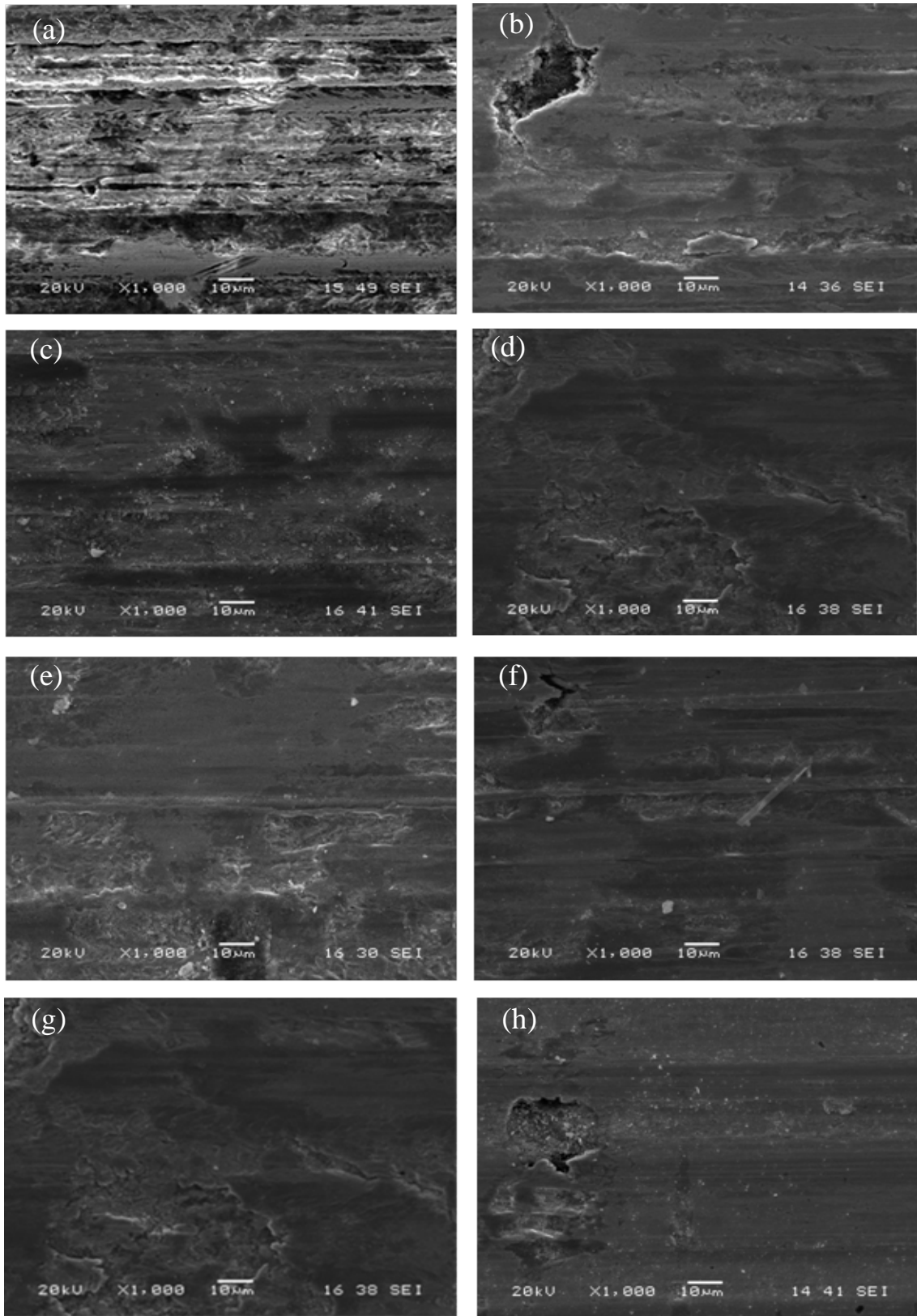
Şekil 6.50'de 2 N yük altında kompozit yüzey aşınma deneyi gerçekleştirilmiş işlemsiz numunenin ve yüzey modifikasyonları sonrası temperlenmiş KGDD numunelerinin aşınma izi SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir.

Şekil 6.50 (a)'da verilen işlemsiz numunenin kompozit yüzey aşınma izinde plastik deformasyonla birlikte abrazif aşınmanın olduğu görülmektedir. Aşınma sırasında kopan aşınma ürünlerinin oluşan yivlere yapıştığı çok net görülmektedir. Şekil 6.50 (b)'da 1T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 1T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izinde modifiye yüzey aşınma izine benzer bir görüntü elde edilmiştir. Yüzeyden kopan partiküller yüzeyde yivler oluşturmuştur. Fakat modifiye yüzey aşınma numunesine göre yüzeye sıvanan partiküller azalmıştır. Şekil 6.50 (c) 'de 2T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüleri verilmiştir. 2T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izinde, modifiye yüzey aşınma izine göre abrazif aşınmadan çok adhezif aşınma görülmüş ve oksit partiküllere rastlanmamıştır. 3T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi Şekil 6.50 (d)'de verilmiştir. 3T nolu numunenin aşınma izleri incelendiğinde yüzeyde belirgin yivler olduğu görülmüştür. Numune yüzeyinden modifiye yüzey aşınma izine benzer, yüzeyden partiküller kopmuş ve deformasyona yol açmıştır.

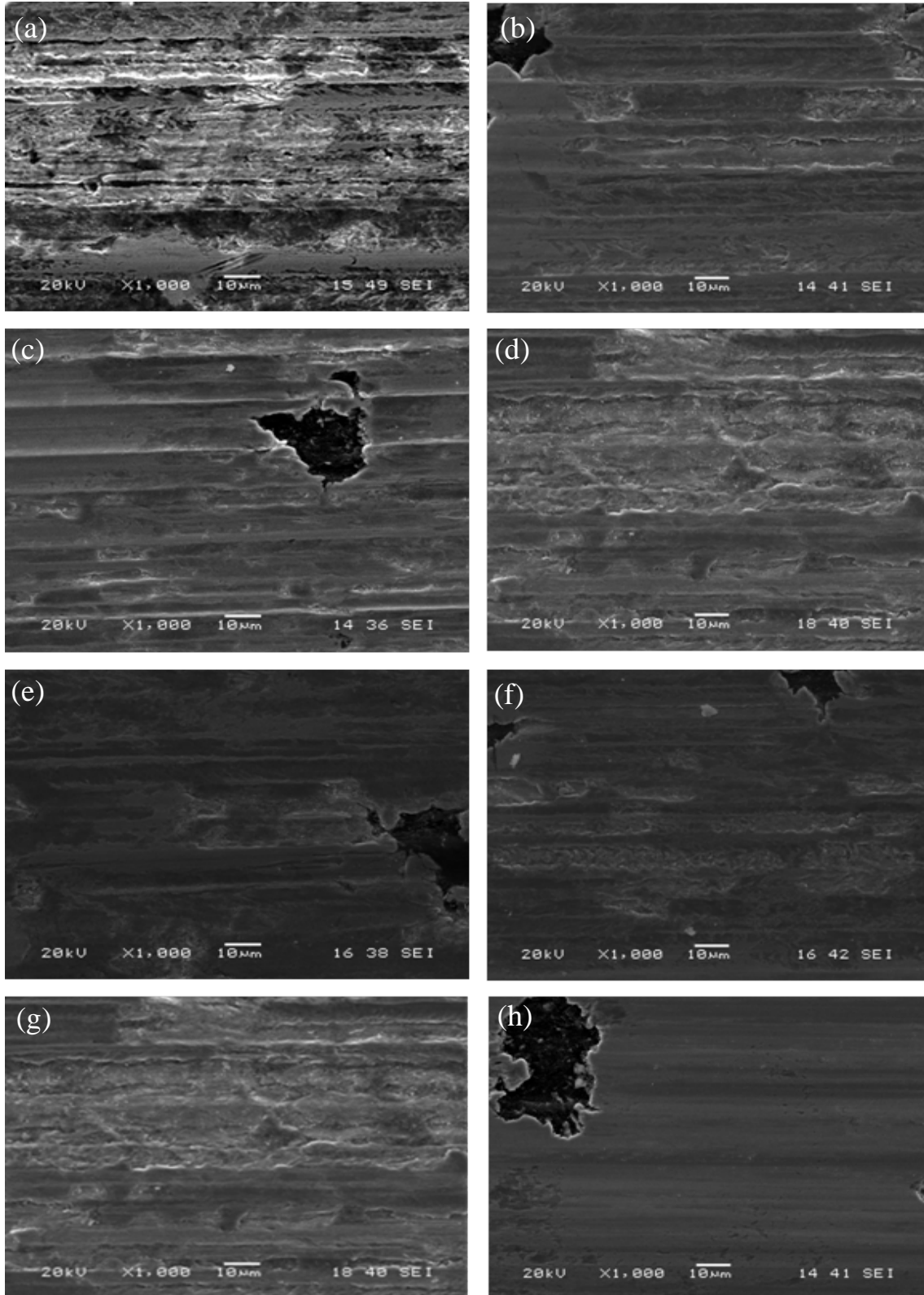
Şekil 6.50 (e)'de 4T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü verilmiştir. 4T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma izine göre kompozit yüzey aşınmanın daha hasarsız olduğu görülmektedir. Numune yüzeyinde oluşan yivler derin değildir ve yüzey daha düzgündür. Modifiye yüzey aşınmadan farklı olarak yüzeyden kopan partiküller azalmış ve yüzeye tekrar sıvanma görülmemiştir. 5T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izinde 4T nolu numune ile benzer görüntüler alınmıştır. 5T nolu numunede yüzeyden kopan partiküllere rastlanmış ve bu partiküller yüzeyde yivlerin oluşumuna neden olmuştur.(Şekil 6.50 (f)). Şekil 6.50 (g)'de 6T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi verilmiştir. Benzer şekilde kompozit yüzey aşınma testlerinde yer yer aşınma izleri daha belirginleşmişken yer yer azalma göstermiştir. Modifiye yüzey aşınma testlerine benzer yüzeyden kopan partiküllerin varlığına rastlanmıştır. İndüksiyonla sertleştirilen numunesinin (İ-T nolu) kompozit yüzey aşınma izi görüntüsü Şekil 6.50 (h)'de verilmiştir. İ-T nolu numunenin kompozit yüzey aşınma testinde modifiye yüzey aşınma testine göre çok daha düzgün aşınma yüzeyi elde edilmiştir. Oluşan yivlerin

daha ince ve yüzeyseldir. Kompozit yüzey aşınma testleri daha önceki bölümde anlatılan grafitin yağlayıcılık etkisinin artması ile aşınma yüzeyi daha düzgünleşmiştir. 0,5N yüke benzer grafitin yağlayıcılık etkisinin artması ile aşınma yüzeyi tüm numune gruplarında daha düzgünleşmiştir. Grafitin artan yağlayıcılık etkisi ile yüzeyden kopan partiküllerin azaldığı görülmüştür. Yüzeyde oluşan yivlerin derinliklerinin azaldığı söylenebilir [116,117,120].

Temperleme işlemi sonrası yüzeyden alınan modifiye yüzey aşınma izlerinin SEM görüntüleri temperlenmemiş numune gruplarına göre deformasyonun daha şiddetli olduğu görülmüştür. Temperleme işlemi ile oluşan temperlenmiş martenzit yapısı yüzey sertliğini düşürdüğü için aşınma şiddetinde artışa neden olmuştur [92,102,121,122].



Şekil 6.49. İşlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin maksimum yük (2N) altında modifiye yüzey aşınma izi görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1T nolu (c) 2T nolu (d) 3T nolu (e) 4T nolu (f) 5T nolu (g) 6T nolu (h) İ-T nolu)



Şekil 6.50. İşlemsiz, modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin maksimum yük (2N) altında kompozit yüzey aşınma izi görüntüleri ((a) İşlemsiz numune (b) 1T nolu (c) 2T nolu (d) 3T nolu (e) 4T nolu (f) 5T nolu (g) 6T nolu (h) İ-T nolu)

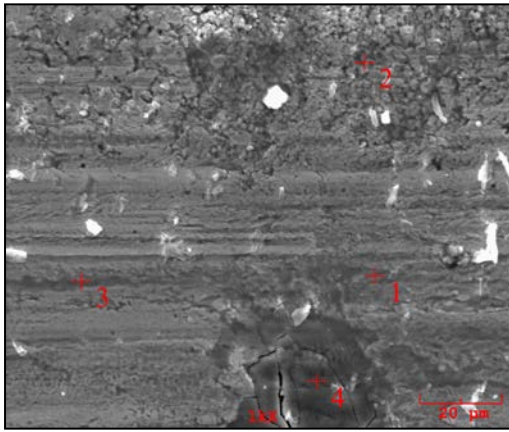
Aşınma hızı bölümünde anlatılan ve maksimum aşınma hızı görülen 3 nolu numunenin 0.5 N, 1 N ve 2 N yükleri altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri sırasıyla verilmiştir. Şekil 6.51 'de 3 nolu numunenin 0,5 N yük altında modifiye yüzey aşınma izleri incelendiğinde aşınmanın daha çok abrazif karakterli aşınma olduğu görülmektedir. Aşınan yüzeyin görüntüsünden yüzeyden malzemenin koptuğu ve yer yer çatlaklar oluştuğu görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde yüzeyde Al ve O elementlerine rastlanmıştır. EDS analizlerinde deneyde kullanılan alümina bilyanın da aşınması sonucu aşınma ürünleri arasında Al ve O piki görülmüştür. 3 nolu numuneye ait kompozit yüzey aşınma izleri incelendiğinde ise abrazif aşınmanın yerini daha çok adhezif aşınmanın aldığı görülmektedir. Modifiye yüzey aşınma izinden farklı olarak daha ince mikroçatlaklar göze çarpmaktadır. 3 nolu numunenin kompozit yüzey aşınma izi EDS analizlerinde Al ve O piklerine rastlanmıştır. Deneyde kullanılan alümina bilyadan yüzeye sıvanmış olabileceği fikrini desteklemektedir.

Şekil 6.52 'de 3 nolu numunenin 1 N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. 1 N yük altında 3 nolu numunede modifiye yüzey aşınma izi incelendiğinde deformasyonun yüksek olduğu ve yüzeyde derin yivler oluştuğu görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde deneyde kullanılan alümina bilyanın da aşınması sonucu meydana gelmiş aşınma ürünleri arasında O piki görülmüştür. Kompozit yüzey aşınma izleri incelendiğinde ise yüzeyde oldukça geniş yivler oluştuğu görülmektedir. Yivlerinin aşınan partiküllerle sıvandığı net olarak görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde aşınma yüzeyinde O pikine rastlanmıştır. Oluşan yivlerin kenarlarında daha çok oksijen elementine rastlanmıştır. Bu da aşınma sırasında alümina bilyadan kopan aşınan partiküllerin yivlerin kenarlarına sıvandığını doğrulamaktadır.

Şekil 6.53 'de 3 nolu numunenin 2 N yük altında modifiye yüzey ve kompozit yüzey aşınma deneyleri sonucunda oluşan aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri görülmektedir. 3 nolu numunede modifiye yüzey aşınma izi incelendiğinde abrazif ve adhezif karakterli aşınma görülmüştür. Plastik deformasyonun olduğu bölgede EDS analizinde oksijen piki görülmüştür. Bu durum kopan aşınmış partiküllerin numune yüzeyine sıvandığını göstermektedir. Kompozit yüzey aşınma izleri incelendiğinde ise

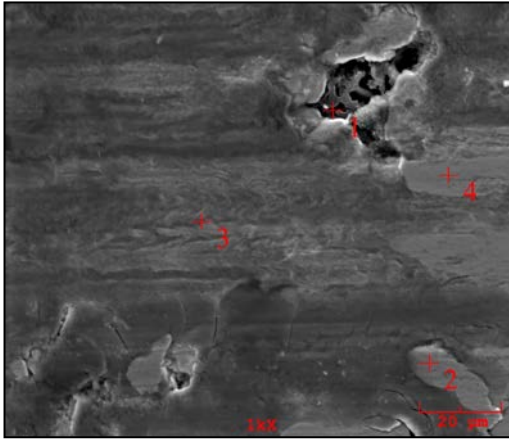


yüzeyde daha düzgün aşınma yivleri oluştuğu görülmüştür. 1 nolu nokta EDS analizinde C oranı oldukça düşük çıkmıştır. Bu durum EPT işlemi sırasında grafitin yüzeyden uzaklaştığını da doğrulamaktadır. EDS analizinde grafit küresinin etrafında oksijen pikine rastlanmıştır aynı zamanda yivlerin olduğu bölgede oksijen pikine rastlanmıştır. Kopan aşınma partikülleri hem grafit küreleri çevresinde hemde yivlerin olduğu yerlerde yığılmalara neden olduğu söylenebilir.



(a)

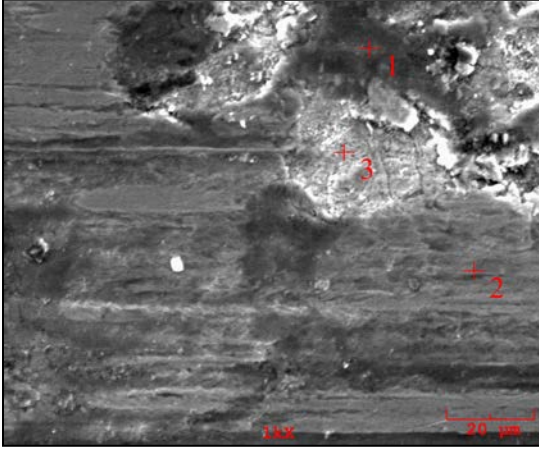
Analiz No	Kimyasal Bileşim (%at)					
	C	O	Na	Al	Si	Fe
1	1.397	19.86	-	0.244	3.02	75.46
2	2.37	20.41	4.30	0.28	1.49	71.12
3	-	28.36	2.94	0.162	2.04	69.48
4	1.29	34.9	2.74	0.70	2.26	58.05



(b)

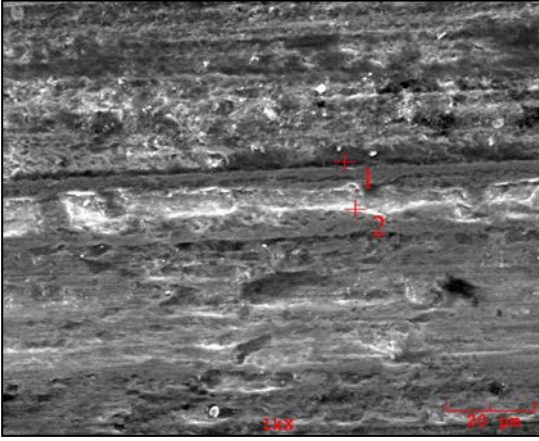
Analiz No	Kimyasal Bileşim (%at)				
	C	O	Al	Si	Fe
1	72.97	14.27	0.194	-	12.56
2	-	-	0.331	3.73	95.93
3	2.58	20.81	0.133	2.69	73.77
4	-	-	0.331	3.738	95.93

Şekil 6.51. 3 nolu numunenin 0,5N yük altında (a) M.Y.A. SEM ve EDS analizi (b) K.Y.A. SEM ve EDS analizi



(a)

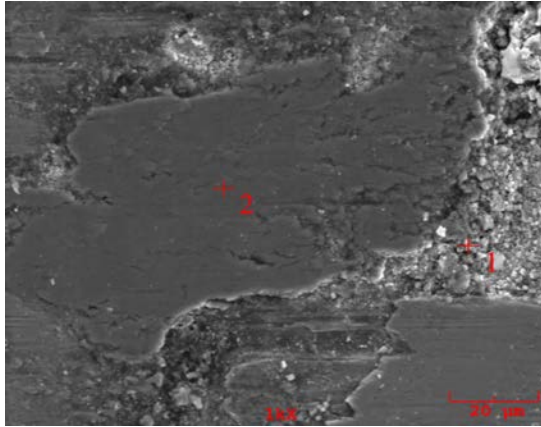
Analiz No	Kimyasal Bileşim (%at)		
	O	Si	Fe
1	38.68	2.704	58.61
2	11.42	2.88	85.69
3	13.27	1.5	85.21



(b)

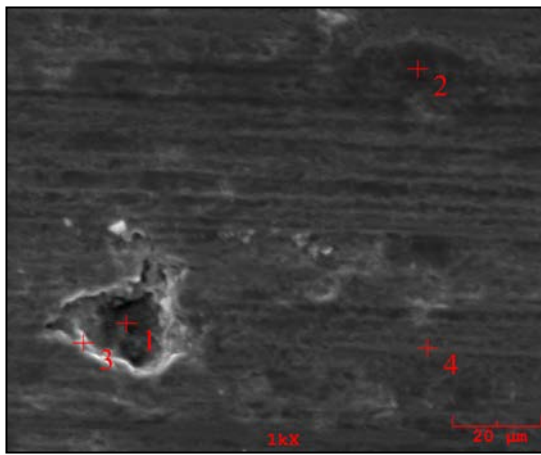
Analiz No	Kimyasal Bileşim (%at)		
	O	Si	Fe
1	22.19	2.57	75.23
2	-	5.29	94.7

Şekil 6.52. 3 nolu numunenin 1N yük altında (a) M.Y.A. SEM ve EDS analizi (b) K.Y.A. SEM ve EDS analizi



(a)

Analiz No	Kimyasal Bileşim (%at)			
	C	O	Si	Fe
1	8.24	39.84	2.41	49.49
2	-	33.18	2.64	64.16



(b)

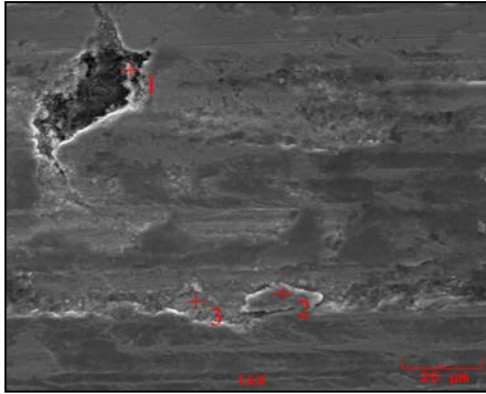
Analiz No	Kimyasal Bileşim (%at)			
	C	O	Si	Fe
1	24.36	-	1.3	74.33
2	-	18.51	1.44	80.03
3	5.65	11.07	2.57	80.69
4	-	6.64	2.4	90.95

Şekil 6.53. 3 nolu numunenin 2N yük altında (a) M.Y.A. SEM ve EDS analizi (b) K.Y.A. SEM ve EDS analizi

Modifikasyon sonrası temperlenmiş 1T, 2T ve 3T nolu numunelerin maksimum yük (2N) altında modifiye yüzey aşınma izleri SEM ve EDS analizleri sırası ile aşağıda verilmiştir. Şekil 6.54 (a)' de 1T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Temperlenmemiş numunelere benzer EDS analizlerinde O pikine rastlanmıştır. Aşınan yüzeyden de görüldüğü üzere grafit çevresinde (1 nolu nokta analizi) ve yivlerin aralarında kalan aşınma partiküllerinin (2 nolu nokta analizi) EDS analizlerinde oksijen pikinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durum bir önceki numunelerde olduğu gibi alümina bilyadan kopan parçaların yüzeye tekrar sıvamamsından kaynaklandığı şeklinde açıklanabilir.

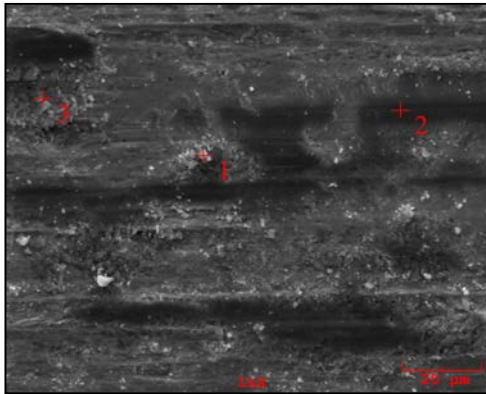
Şekil 6.54 (b)' de 2T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. SEM görüntüsünden de görüldüğü üzere deformasyon artmıştır. Aşınan partiküllerin yüzeye sıvandığı görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde tüm yüzeyde yüksek oranda O ve C pikine rastlanmıştır. Aşınma izinde O piki artışı aşınma sırasında alümina bilyadan aşınma yüzeyine transfer olabileceği fikrini desteklemektedir. Grafitin aşınma deneyleri sırasında deformasyona uğradığı daha önceki bölümde belirtilmişti. Aşınma yüzeyinde C pikine rastlanması grafitten kopan partiküllerin oluşan yivlere yapışmış olabileceğini desteklemektedir.

Şekil 6.54 (c)' de 3T nolu numunenin modifiye yüzey aşınma deneyi sonucunda elde edilen aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Aşınma yüzeyinde yüzeyden yer yer tabakanın kalktığı ve bu kopan partiküllerin numune yüzeyinde yivler oluşturduğu görülmektedir. EDS incelemelerinde diğer numunelerle benzer olarak yüzeyde alümina bilyadan yüzeye transfer olan oksijen pikine rastlanmıştır.



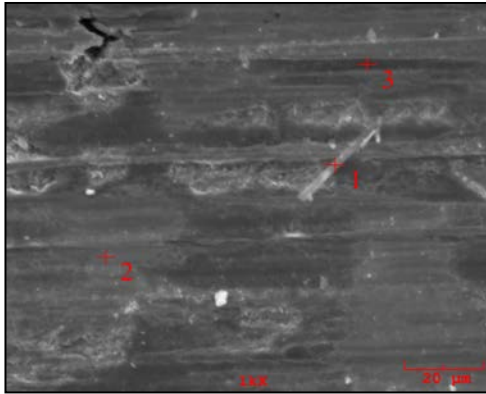
(a)

Analiz No	Kimyasal Bileşim (%at)				
	C	O	Na	Si	Fe
1	21.56	34.93	9.0	1.42	33.06
2	1.89	23.21	3.06	3.03	65.78
3	0.08	12.13	3.74	3.78	80.26



(b)

Analiz No	Kimyasal Bileşim (%at)				
	C	O	Na	Si	Fe
1	2.49	39.96	1.71	2.31	53.5
2	1.6	28.8	0.67	3.02	65.89
3	0.28	11.04	0.14	3.67	84.85



(c)

Analiz No	Kimyasal Bileşim (%at)				
	C	O	Na	Si	Fe
1	1.19	33.55	11.81	2.32	51.12
2	-	-	-	4.08	95.91
3	-	29.35	-	2.82	67.81

Şekil 6.54. 1T nolu numunenin 2N yük altında M.Y.A. SEM ve EDS analizi (b) 2T nolu numunenin 2N yük altında M.Y.A. SEM ve EDS analizi (c) 3T nolu numunenin 2N yük altında M.Y.A. SEM ve EDS analizi

## BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 7.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, geniş bir kullanım alanına sahip küresel grafitli dökme demir (KGDD) yüzeylerinin elektrolitik plazma teknolojisi ile modifiye edilerek yüzey özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Değişen parametrelerin (termal çevrim ve yüksek voltaj süresi) modifikasyon işlemindeki etkisi araştırılmıştır. Üretilen numunelerin günümüzde yaygın olarak kullanılan indüksiyonla sertleştirme işlemi ve modifikasyon işlemleri sonrası temperlenerek üretilen numuneler ile kıyaslamaları yapılmıştır. Modifiye edilen numunelere optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak mikroyapı çalışmaları, tabaka kalınlıkları ve yüzey özellikleri (sıcaklık, grafit dağılımı, grafit çapı, % küresellik, % martenzit hacim oranı) analizleri ile faz analizi gerçekleştirilmiştir. Sertlik ve aşınma mekanik deneyleri uygulanmıştır.

Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmektedir;

1. Yapılan çalışma sonucunda dökülen KGDD numunelerinin perlitik matris ağırlıklı olduğu görülmüştür. Modifikasyon işlemleri sonrasında yüzeyde martenzit yapısı elde edilmiştir. Termal çevrimin ve yüksek voltajın değişimine bağlı olarak EPT işlemi sonrası yüzeyde 3 ve 4 farklı katmanın oluştuğu görülmüştür. Termal çevrimin 4 ve 5 olduğu numuneler ile yüksek voltaj süresinin 1 ve 2 sn olduğu numunelerde 3 katmanlı (sertleştirilmiş bölge, ısıdan etkilenen bölge, matris) olduğu, termal çevrimin ve yüksek voltajın maksimum olduğu numunelerde ise 4 katmanlı (ergimiş bölge, sertleştirilmiş bölge, ısıdan etkilenen bölge, matris) olduğu görülmüştür. 3 katmanlı numunelerin yüzeyinde martenzit yapısı elde edilmişken, 4 katmanlı numunelerde yüzeyde grafitin ergidiği ve ince östenit dendritlerden, sementit

ve kaba yapıda martenzit yapısı elde edilmiştir. İndüksiyonla sertleştirilen numunede de benzer şekilde 3 katmanlı yüzey elde edilmiş ve yüzeyin martenzit yapısından ve kalıntı östenitten oluştuğu görülmüştür.

2. Modifikasyon işlemi ardından temperlenen numunelerde martenzit yapısının değiştiği, martenzit iğne uçlarının yuvarlaklaştığı görülmüş ve temperlenmiş martenzit elde edilmiştir. Zigzaglı gruplar oluşturan iğnemsî yapılar temperleme işlemi ile şeklini kaybetmiştir. Ergimiş tabakanın oluştuğu numunelerde ise yüzeyde oluşan dentritlerin kabalaştığı, dendritler arasındaki martenzit yapının iğnemsî formunu kaybettiği, iğne uçlarının yuvarlaklaştığı ve yapıda daha ince temperlenmiş martenzit oluşumuna neden olduğu görülmüştür.
3. Termal çevrim sayısının en düşük olduğu 1 nolu numunede merkez tabaka kalınlığı 2280  $\mu\text{m}$ , 2 nolu numunenin tabaka kalınlığı 3188  $\mu\text{m}$ , 3 nolu numunede merkez tabaka kalınlığı 5200  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Termal çevrimin artmasıyla modifikasyon tabakası kalınlığında artış görülmüştür. Yüksek voltaj süresinin en düşük olduğu 4 nolu numunede modifikasyon tabakası kalınlığı diğer numunelerde olduğu gibi net bir şekilde alınamamıştır. Yüzeyde geçiş bölgesi tabaka kalınlığının daha derin olduğu alınan sıra sertlik profilleri sonrasında karar verilmiştir. 5 nolu numunede merkez modifikasyon tabakası derinliği 3538  $\mu\text{m}$ , 6 nolu numunede merkez tabaka derinliği 5014  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür. Benzer şekilde artan yüksek voltaj süresi ile modifikasyon tabakası kalınlığında artış görülmüştür. 1 nolu numunede 2148  $\mu\text{m}$  ölçülmüştür.
4. EPT işlemi sonrasında modifikasyon yüzeyinin merkezinden kenarlara doğru gidildikçe tabaka kalınlığı azalmıştır. Tabancanın eliptik şeklinden dolayı kenar bölgede yüzeyin sıcaklığı düşüktür. Bu etkilerden dolayı sıcaklıktaki önemli miktardaki düşüş modifikasyon bölgesinin dış sınırlarında dönüşüm için yeterli sıcaklık sağlanamadığından oluşan modifikasyon görüntüsü yarım ay şeklini almıştır. İndüksiyonla sertleştirilen numunenin tabaka kalınlığı EPT işleminden farklı olarak yüzeyde eşit bir dağılım göstermiştir.

5. Termal çevrimin en düşük olduğu 1 nolu numunede maksimum yüzey sıcaklığı modifiye yüzeyin merkezinde ve kenarlarında sırasıyla 510°C ve 350°C olarak, 2 nolu numune için 800°C ve 500°C iken, 3 nolu numunede merkez ve kenar maksimum yüzey sıcaklığı 1100°C ve 600°C olarak ölçülmüştür. Yüksek voltaj süresinin değiştiği 4 nolu numunede maksimum merkez ve kenar sıcaklık değerleri sırasıyla 465°C ve 290°C olarak, 5 nolu numune için bu değerler 720 °C ve 380 °C iken 6 nolu numune için maksimum yüzey sıcaklık değerleri 1050°C ve 600°C ölçülmüştür. İndüksiyon işlemi ile numune yüzeyinde çıkılan maksimum sıcaklık 850–920 °C arasında değişmektedir. Uygulanan tüm işlem parametreleri için martenzitik faz dönüşümü için gerekli yüzey sıcaklığı sağlanmış olup, yüzey sıcaklıklarındaki bu artış aynı zamanda modifikasyon tabakası derinliğindeki artışın sebebini de açıklamıştır.
6. İşlem görmemiş KGDD'in grafit yüzdesi ortalama % 8.1 olarak, ortalama grafit çapı 56,5 µm ve küresellik yüzdesi ortalama % 85 hesaplanmıştır. Modifikasyon işlemi küresellik yüzdesini etkilememiştir. Grafit çapları EPT işlemi ile 51,2-72,8 µm arasında değiştiği görülmüştür. Artan termal çevrim ve artan yüksek voltaj süresi ile grafit yüzdesinin azaldığı görülmüştür. İndüksiyonla sertleştirilen numunenin grafit yüzdesi % 4,1 ölçülmüştür. Yüzeyde kısmen ergime görüldüğü için grafit yüzdesinde azalma meydana gelmiştir. Modifikasyon işlemi sonrası temperlenen numunelerin küresellik oranları değişmemişken, grafit çapı ve dağılımı azalma göstermiştir.
7. Termal çevrim sayısının en düşük olduğu 1 nolu numunede martenzit hacim oranı (MHO) % 30,53, 2 nolu numunede % 47,7, 3 nolu numunede MHO % 15,85 olarak ölçülmüştür. Yüksek voltaj süresinin en düşük olduğu 4 nolu numunede % 22,35, 5 nolu numunede MHO % 43,2 olarak ve 6 nolu numunede MHO % 15,85 ölçülmüştür. Artan termal çevrimle ve yüksek voltaj süresi ile işlem süresinde artacağından martenzitik dönüşüm için çıkılan östenitleme sıcaklığı da artmıştır. Süre uzadıkça östenit fazının miktarının artmasına bağlı olarak MHO'da artış meydana gelmiştir. Termal çevrimle ve yüksek voltajın maksimum olduğu 3 ve 6 nolu numune yüzeylerinde ergimiş



tabaka oluşmuştur. Oluşan bu tabaka dertritik yapıdan ve dedritlerin aralarında martenzit yapısından meydana geldiği için % MHO azalmıştır. İndüksiyonla sertleştirilen numunede MHO % 70,56 gibi yüksek bir oran elde edilmiştir. EPT işleminden farklı olarak yüzeyin bir tabancayla modifiye edilmemesi yüzeyde yarım ay şeklinde modifikasyon tabakası yerine daha homojen kalınlıkta bir tabaka oluşturmuş ve MHO'nun daha yüksek ölçülmesine neden olmuştur. Modifikasyon işlemleri sonrasında yapılan temperleme işleminin martenzit hacim oranlarını değiştirmedeği belirtilmiştir.

8. Yapılan faz incelemelerinde işlem görmemiş numunede  $\alpha$ -Fe fazının varlığı belirlenmiştir. EPT ve indüksiyonla modifikasyon işlemleri sonrasında yeni fazların oluştuğu belirlenmiştir. Modifikasyon tabakalarında kalıntı östenit ve martenzit fazının mevcut olduğu görülmüştür. Oluşan pikler incelendiğinde, işlemsiz numuneye göre modifiye edilen numunelerde görülen piklerin genişliklerinin arttığı ve  $\alpha$ -Fe ve martenzit fazı aynı  $2\theta$  derecelerinde oluşmasına rağmen modifikasyon işlemi sonrası piklerin sola ötelendiği görülmüştür.
9. İşlem görmemiş KGDD'in sertlik değeri ortalama 10 HRC ölçülmüştür. EPT işlemi sonrası en düşük termal çevrimin uygulandığı 1 nolu numunede merkez sertlik değeri 32 HRc modifikasyon alanının en dış bölgesinde kenar sertlik değeri 20 HRC' ye düşmüştür. Termal çevrim sayısının 5'e yükseldiği 2 nolu numunede merkez sertlik değeri 45 HRc, kenar sertlik değeri 28 HRc olarak, 6 termal çevrim uygulanmış 3 nolu numunenin maksimum sertlik değeri 63 HRc, kenar sertlik değeri 45HRc' ye kadar düşüş göstermiştir. Yüksek voltaj süresinin değiştiği 4 nolu numunenin merkez sertlik değeri 21 HRc, yüksek voltaj süresinin artışı ile 5 nolu numunede merkez sertlik değeri 46 HRc olarak, 6 nolu numunenin merkez sertlik değeri 63 HRc olarak ölçülmüştür. Modifikasyon bölgesinde merkezinden kenarlara doğru yüzey sertlik değerlerinde azalma görülmüştür. İndüksiyonla yüzeyi sertleştirilmiş İ nolu numunenin maksimum yüzey sertliği  $60\pm 3$  HRC ölçülmüştür. EPT yönteminden farklı olarak modifiye edilen tüm bölgede sertlik değeri eşit ölçülmüştür.

10. Maksimum yüzey sertliği 3 ve 6 nolu numunede görülmüştür. Merkezdeki sertlik değeri 63 HRC olup altlık malzemeye göre 6 kat artış görülmüştür. İndüksiyonla sertleştirilen numune ile benzer sertlik değeri elde edilmiştir.
11. Modifikasyon işlemi sonrasında temperlenen numunelerin sertlik değerleri 3-4 HRc aralığında azalma göstermiştir.
12. Matris malzemenin yüzey sertliği  $250 \pm 10 \text{HV}_{0,2}$  ölçülmüştür. Modifiye edilen numunelerde, mikrosertlik yüzeyden 500  $\mu\text{m}$  derinliğe kadar lineer artış göstermiş, 500  $\mu\text{m}$ 'dan sonra 3500–4500  $\mu\text{m}$  değişen derinliğe kadar sertlik azalmıştır. Minimum sertlik yüksek voltaj süresinin minimum olduğu 4 nolu numunede 820  $\text{HV}_{0,2}$  olarak, maksimum sertlik termal çevrimin ve yüksek voltaj süresinin maksimum olduğu 3 ve 6 nolu numunelerde 1050  $\text{HV}_{0,2}$  elde edilmiştir. Temperleme işlemi mikrosertlik değerlerini düşürmüştür. Maksimum sertliğin elde edildiği 3 ve 6 nolu numunede sertlik değeri temperleme işlemi sonrasında 960  $\text{HV}_{0,2}$ 'ye düşmüştür.
13. İndüksiyonla sertleştirme işlemi sonrası en yüksek sertlik değeri 1045  $\text{HV}_{0,2}$  ölçülmüştür. Temperleme işlemi ile sertlik 900 $\text{HV}_{0,2}$ 'ye düşmüştür.
14. İşlemsiz, EPT ile modifiye edilmiş, indüksiyonla sertleştirilmiş malzemelerin lineer ball on disk modifiye yüzey aşınma deneyleri sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.220-0.328, 0.098-0.238, 0.173-0.264 arasında değiştiği gözlemlenmiştir. EPT ile modifiye edilmiş ve temperlenmiş, indüksiyonla sertleştirilmiş ve temperlenmiş numunelerin modifiye yüzey deneyi sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.085-0.315, 0.158-0.242 arasında değiştiği görülmüştür.
15. İşlemsiz, EPT ile modifiye edilmiş, indüksiyonla sertleştirilmiş malzemelerin kompozit yüzey aşınma deneyi sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.220-0.347, 0.111-0.234, 0.101-0.185 arasında değiştiği, EPT ile modifiye edilmiş ve temperlenen, indüksiyonla sertleştirilmiş ve modifikasyon sonrası temperlenen numunelerin kompozit yüzey aşınma

deneyi sonrasında elde edilen sürtünme katsayısı değerleri sırasıyla 0.108-0.280, 0.109-0.201 arasında değiştiği gözlemlenmiştir.

16. İşlemsiz numunede modifiye yüzey aşınma (MYA) kaybı değişen yüke bağlı olarak 23,70- 61,56  $\mu\text{m}^3$  arasında değiştiği görülmüştür. 1, 2, 4, 5 ve İ nolu numunelerde MYA kaybı değerleri azalma göstermişken, 3 ve 6 nolu numunelerde MYA kaybı 33,63-68,70  $\mu\text{m}^3$  arasında arttığı gözlemlenmiştir. Artan termal çevrim sayısı ve yüksek voltaj süresi ile maksimum sertliğin elde edildiği parametrelerde karbonun yandığı ve yüzeyde 1mm tabaka kalınlığında grafitlerin olmadığı görülmüştür. Grafitin yağlayıcılık etkisinin azalmasından dolayı aynı zamanda da sert ve gevrek bir yüzey elde edilmiş olduğundan maksimum sertliğin elde edildiği 3 ve 6 nolu numunelerde aşınma miktarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Modifikasyon işlemi sonrası temperlenen numunelerin tümünde aşınma kaybı oranları artmıştır.
17. İşlemsiz numunede kompozit yüzey aşınma (KYA) kaybı değişen yüke bağlı olarak 23,70- 61,56  $\mu\text{m}^3$  arasında değiştiği görülmüştür. KYA kaybı tüm numunelerde iyileşme göstermiştir. 3 ve 6 nolu numunelerde MYA kaybı 4,84-16,57  $\mu\text{m}^3$  arasında aşınma direncinin iyileştiği görülmüştür. Aşındırıcı bilyanın hem modifiye edilmiş sert yüzeyi hemde işlem görmemiş altlık yüzeyi aşındırması sırasında işlemsiz bölgelerdeki grafitin yağlayıcılık etkisinden kaynaklandığı düşünülmüştür. Kompozit yüzey aşınma testi sırasında hem tok hem de sert yüzeylerin bu azalmaya katkıda bulunduğu ifade edilmiştir. Temperleme işlemi KYA oranlarında arttırmıştır.
18. Artan yüke bağlı olarak aşınma hızı her numunede artış göstermiştir. Modifiye yüzey aşınmalarında aşınma hızı genel olarak (1, 2, 4, 5, İ) numunelerde işlemsiz numuneye göre düşük çıksada bu oran çok da farklı hesaplanmamıştır. Artan sertlikle beraber aşınma hızlarında azalma meydana gelmiştir. 3, 6 nolu numunelerin modifikasyon işlemi sonrası yüzeyde grafit yüzdesi azalma göstermiştir. Bu durum modifiye yüzey aşınma testinde aşınma dayanımını azaltmıştır. Kompozit yüzey aşınmasında ise yüke bağlı olarak aşınma hızlarında artış görülse de, bu oranlar işlemsiz numuneden çok daha düşük hesaplanmıştır. Modifikasyon sonrası temperleme işlemi hem

modifiye yüzey aşınmasında hem de kompozit yüzey aşınmasında iyileşme göstermemiştir. Temperleme işlemi ile yüzeyde temperlenmiş martenzit yapısı oluşmuş ve yüzey sertliği azalmış, aynı zamanda grafit küre çaplarının azalmasına neden olmuştur. Bu durum aşınma dayanımını daha çok azalmıştır.

19. Aşınma yüzeyleri incelendiğinde; modifiye yüzey aşınma testi yapılan numunelerin aşınma şiddetinin daha çok olduğu, meydana gelen yivlerin derinliğinin ve genişliğinin arttığı görülmüştür. Kompozit yüzey aşınma testinde ise aşınma yüzeyinin düzgünleştiği, yüzeyden kopan partiküllerin azaldığı, aşınma sonrası yüzeyde meydana gelen deformasyonun azaldığı gözlemlenmiştir
20. Aşınma yüzeylerinden alınan EDS analizleri incelendiğinde yüzeyde Al ve O elementlerine rastlanmıştır. EDS analizlerinde deneyde kullanılan alümina bilyanın aşınması sonucu aşınma ürünleri arasında Al ve O piki görülmüştür.

Sonuç olarak; Elektrolitik Plazma Teknolojisinin, piyasada yaygın olarak kullanılan indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemine alternatif bir yöntem olduğu ve aynı zamanda yapılan aşınma testleri sonrasında kompozit yüzey aşınma testi dayanımlarının çok daha iyi olduğu görülmüştür. Üretime yönelik çalışmalarda tercih edilecek olan 3 (maksimum termal çevrim) ve 6 (maksimum yüksek voltaj) nolu numunenin parametreleri olduğuna karar verilmiştir.

## 7.2. Öneriler

1. Elektrolitik plazma teknolojisi ve indüksiyonla modifiye edilen numunelerin yorulma dayanımı araştırılabilir.
2. Elektrolitik plazma teknolojisi ve indüksiyonla modifiye edildikten sonra temperlenen numunelere kırılma tokluğu çalışmaları yapılabilir.
3. Elektrolitik plazma teknolojisi ile modifiye edilen numunelerin su verme prosesinin etkisi araştırılabilir.

4. Elektrolitik plazma teknolojisinde kullanılan parametreler ve kullanılan elektrolit çözeltisi değiştirilerek modifikasyon işlemi üzerine etkisi incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] NIE X., WANG L., YAO Z.C., ZHANG L., CHENG F., Sliding wear behaviour of electrolytic plasma nitrided cast iron and steel. *Surface and Coatings Technology*, 200: 2005; pp. 1745 – 1750.
- [2] HEYDARZADEH SOHI M., KARSHENAS G., BOUTORABI S.M.A., Electron beam surface melting of as cast and austempered ductile irons. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154: 2004; 199–202.
- [3] FERNANDEZ-VICENTE A., PELLIZZARI M., ARIAS J.L., Feasibility of laser surface treatment of pearlitic and bainitic ductile irons for hot rolls. *Journal of Materials Processing Technology*, 212: 2012; 989–1002.
- [4] FENG H.P., LEE S.C., HSU C.H., HO J.M., Study of high cycle fatigue of PVD surface-modified austempered ductile iron. *Materials Chemistry and Physics*, 59: 1999; 154-161.
- [5] ŞEKER U., HASIRCI H., Evaluation of machinability of austempered ductile irons in terms of cutting forces and surface quality. *Journal of Materials Processing Technology*, 173: 2006; 260-268.
- [6] KAYALI Y., TAKTAK Ş., ULU S., YALCIN Y., Investigation of mechanical properties of boro-tempered ductile iron. *Materials and Design*, 31: 2010; 1799–1803.
- [7] TOKTAŞ G., TOKTAŞ A., The investigation of spheroidal graphite iron (SGI) as crankshaft material. Balıkesir Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Balıkesir.
- [8] CHEN Y., GAN C.H., WANG L.X., YU G., KAPLAN A., Laser surface modified ductile iron by pulsed Nd:YAG laser beam with two-dimensional array distribution. *Applied Surface Science*, 245: 2005; 316–321.
- [9] ZIMBA J., SİMBI D.J., NAVARA E., Austempered ductile iron: an alternative material for earth moving components. *Cement & Concrete Composites*, 25: 2003; 643–649.
- [10] TONG X., ZHOU H., LIU M., DAI M., Effects of striated laser tracks on thermal fatigue resistance of cast iron samples with biomimetic non-smooth surface. *Materials and Design*, 32: 2011; 796–802.

- [11] SMOLJAN B., CAJNER F., LANDEK D., An Analysis of Induction Hardening of Ferritic Ductile Iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11: 2002; 278-282.
- [12] [www.geartechnology.com](http://www.geartechnology.com), Erişim Tarihi:22.09.2012.
- [13] YILMAZ F., İçme-atık su ve gaz dağıtım şebekelerinde dökme demirler ve düktil demir uygulamaları. İSKİ, 2003; 12-32.
- [14] GANGASANI P.R., Friction and wear characteristics of ductile iron in dry sliding conditions. *Keith millis symposium on ductile cast iron*, 2003.
- [15] ÇELİK Ö., AHLATCI H., KAYALI E., S., ÇİMENOĞLU H., High temperature abrasive wear behavior of an as-cast ductile iron. *Wear*, 258: 2005; 189–193.
- [16] DAWSON S., SCHROEDER T., Practical Applications for Compacted Graphite Iron, *AFS Transactions*, 2004; pp 1-9.
- [17] TOKTAŞ G., TOKTAŞ A., The investigation of spheroidal graphite iron (SGI) as crankshaft material. *Balıkesir Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü, Balıkesir*.
- [18] SEÇKİN İ. A., Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan yüzey işlemlerinin aşınma direncine etkisinin incelenmesi, *İstanbul Teknik Üniversitesi , Yüksek Lisans Tezi*, 2007.
- [19] ŞEN U., Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri. *İTÜ, Fen Bilimleri Ens.Doktora Tezi*, 1997.
- [20] DİKEÇ F., Küresel grafitli dökme demir malzemelerin üretim ve özelliklerindeki gelişmeler. *Mühendis ve makine dergisi*, cilt 26, sayı 305, sayfa 13-19, 1985.
- [21] *ASM Handbook*, Volume 1, pp.17-33, 2005.
- [22] ASKELAND D., *The science and engineering of materials*,1998.
- [23] MITTAL R., NANDA S., Property enhancement of spheroidal graphite cast iron by heat treatment. *National inst. Of tech., Rourkela*, 2010.
- [24] RIPOSAN I., CHISAMERA M., STAN S., SKALAND T., Surface Graphite Degeneration in Ductile Iron Castings for Resin Molds. *Tsinghua Science and Technology*, Volume 13, Number 2: 2008; pp157-163.
- [25] DAVİS J., *Cast iron*, ASM international handbook committee, 1996.

- [26] PODGORNIK B., VIZINTIN J., THORBJORNSSON I., JOHANNESON B., THORGRIMSSON J.T., MARTINEZ CELIS M., VALLE N., Improvement of ductile iron wear resistance through local surface reinforcement. *Wear*, 274–275: 2012; 267–273.
- [27] SLATTER T., TAYLOR H., LEWIS R., KING P., The influence of laser hardening on wear in the valve and valve seat contact. *Wear*, 267: 2009; 797–806.
- [28] NIE X., WANG L., YAO Z. C., ZHANG L., CHENG F., Effect of the material surface hardness on the erosion of AISI316. *Wear*, 259: 2005; 110–117.
- [29] Çelik Yüzeylerin Kaplanması, Erdemir Bilim ve Teknoloji Serisi, 2006.
- [30] TOTTEN G. E., LIANG H., *Surface Modification and Mechanisms*, Marcel Dekker, 2005.
- [31] *ASM Handbook, Heat Treating, Volume 4*, 1994.
- [32] ATAR E., KAYALI E. S., ÇİMENOĞLU H., Characteristics and wear performance of borided Ti6Al4V alloy. *Surface and Coatings Technology*, 202: 2008; 4583–4590.
- [33] BUNSHAH R. F., *Handbook of deposition technologies for films and coatings*, Noyes Publications, 1994.
- [34] SINHA A. S., *Physical metallurgy Handbook*, 2003.
- [35] DAVIS J. R., *Surface engineering for corrosion and wear resistance*, 2001.
- [36] ÇELİK A., ALSARAN A., KARAKAN M., Plazma ile termokimyasal yüzey işlemleri. *Mühendis ve Makina*, Sayı 510, 2002.
- [37] ALSARAN, A., ÇELİK, A., Structural Characterization of Ion-nitrided AISI 5140 Low Alloy Steel. *Materials Characterization*, V47, 3-4: 2001; p207.
- [38] RIE, K. T., Recent Advances Plasma Diffusion Process. *Surface and Coating Tech.*, V112: 1999; p56.
- [39] KÜPER, A., QIAO, X., STOCK, H.R., MAYR, P., A Novel Approach to Gas Boronizing. *Surface and Coating Technology*, 130: 2000; p87.
- [40] CABEO, E.R., LAUDIEN, G., BIEMER, S., RIE, K.-T., HOPPE, S., Plasma-assisted Boriding of Industrial Components in a Pulsed D.C. Glow Discharge. *Surface and Coating Technology*, 116-119: 1999; p229.



- [41] Metal Teknolojisi, Yüzey Sertleştirme-1, Milli Eğitim Bakanlığı, 2006.
- [42] <http://www.inductoheat.eu/> , Erişim Tarihi:20.12.2012.
- [43] HIGGINGS R. A., Engineering Metallurgy, Chapter 4 ,1993.
- [44] ASM Handbook, Surface Engineering, Volume5, 1994.
- [45] ABOUD J.H, BENYOUNIS K.Y., OLABI A.G., HASHMI M.S.J., Laser surface treatments of iron-based substrates for automotive application. Journal of Materials Processing Technology, 182: 2007; 427–431.
- [46] KULKA M., PERTEK A., Laser surface modification of carburized and borocarbured 15CrNi6 steel. Materials Characterization, 58: 2007; 461–470.
- [47] TARAKCI M., KORKMAZ K., GENCER Y., USTA M., Plasma electrolytic surface carburizing and hardening of pure iron. Surface and Coatings Technology, 199: 2005; 205– 212.
- [48] LUK S.F., LEUNG T.P., MIU W.S., PASHBY I., A Study of the Effect of Average Preset Voltage on Effective Case Depth During Electrolytic Surface-Hardening. Materials Characterization, 42: 1999; 65-71.
- [49] LUK S.F., LEUNG T.P., MIU W.S., PASHBY I., A study of the effect of average preset voltage on hardness during electrolytic surface-hardening in aqueous solution. Journal of Materials Processing Technology, 91: 1999; 245–249.
- [50] TYURIN Y., Electrolytic-plasma treatment, E.O. Paton Electric Welding Institute National Academy Sciences of Ukraine.
- [51] LUK S.F., LEUNG T.P., MIU W.S., PASHBY I., Development of electrolytic heat-treatment in aqueous solution. Journal of Materials Processing Technology, 84: 1998; 189–192.
- [52] TYURIN Y. N., POGREBNJAK A.D., Electric heating using a liquid electrode. Surface and Coatings Technology, 142-144: 2001; 293-299.
- [53] POGREBNYAK A. D., KULMENTEVA O. P., KOBZEV A. P., TYURIN Y. N., GOLOVENKO S. I., BOIKO A. G., Mass Transfer and Doping during Electrolyte-Plasma Treatment of Cast Iron. Technical Physics Letters, Vol. 29, No. 4: 2003, pp312–315.
- [54] ERETNEV K.N., LEBEDEV S.V. Processes of heating and cleaning of metal surfaces inelectrolyte and their practical application. Lipetsk., 1997; pp150.

- [55] SHEN D. J., WANG Y. L., NASH P., XING G. Z., A novel method of surface modification for steel by plasma electrolysis carbonitriding. *Materials Science and Engineering A*, 458: 2007; 240–243.
- [56] GENÇ S. K., *Kaplama teknolojisinde karşılaşılan sorunlar ve gelişmeler. Yüzey işlemler sanayi kataloğu*, 2006.
- [57] AKBULUT H., *Malzemelerin aşınma sürtünme davranışları ders notları. Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Sakarya*, 2012.
- [58] YILMAZ F.,S, *Sürtünme ve aşınma. Uluslararası metalurji kongresi, cilt 1, s 229-s257; 1997.*
- [59] HOLMBERG K., MATTHEWS A., *Coating Tribology properties, mechanisms, techniques and applications in surface Engineering. Tribology and interface engineering series, no:56; 1994.*
- [60] *ASM Handbook, Wear, Volume 18, pp.13-20; 2000.*
- [61] ARSLAN, S., *SiC ve Grafit Takviyeli Çinko Alüminyum Hibrit Kompozit Malzemelerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi. SAÜ, Fen Bilimleri Ens.Doktora Tezi, pp.58-69; 2005.*
- [62] BAYER R. G., *Mechanical wear fundamentals and testing. Marcel Dekker, 2004.*
- [63] BHUSHAN B., *Modern tribology handbook. Volume one Principles of Tribology, 2001.*
- [64] BUCKLEY D. H., *Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication. Tribology series, 5, Elsevier, 1981.*
- [65] YILMAZ F., *Sürtünme ve Aşınma. Malzeme Mühendisliğinde Olay Çalışmalar, Sakarya Üniversitesi, pp.18-20, 2000.*
- [66] STACHOWIAK G. W., BATCHELOR A. W., “*Engineering Tribology*”, Elsevier, 2005.
- [67] BELTOWSKI M., BLAUB P.:J., QU J., “*Wear of spheroidal graphite cast irons for tractor drive train components*”, *Wear*, 267: 2009; 1752–1756.
- [68] TKAYA M.B., MEZLINI S., MANSORI M. E., ZAHOUANI H., “*On some tribological effects of graphite nodules in wear mechanism of SG cast iron: Finite element and experimental analysis*, *Wear*, 267: 1–4: 2009; 535–539
- [69] ÇETİN M., GÜL F., *Üst Ösferritik östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin abrazif aşınma davranışı. Teknoloji*, 11,2: 137-144; 2008.

- [70] FRANCUCCI G., SIKORA J., DOMMARCO R., Abrasion resistance of ductile iron austempered by the two-step process. *Materials Science and Engineering A*, 485: 2008; 46–54.
- [71] LAINO S., SIKORA J. A., DOMMARCO R. C., Development of wear resistant carbidic austempered ductile iron (CADI). *Wear*, 265: 2008 1–7.
- [72] SAHİN Y., DURAK O., Abrasive wear behaviour of austempered ductile iron. *Materials and Design*, 28: 2007; 1844–1850.
- [73] SORIANO C., LEUNDA J., LAMBARRI J., NAVAS V. G., SANZ C., Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades. *Applied Surface Science*, 2010; 1-10.
- [74] XIA Y., LIU W., XUE Q., Friction and wear behavior of nodular cast iron modified by a laser micro-precision treatment sliding against steel under the lubrication of liquid paraffin containing various additives. *Wear*, 253: 2002; 752–758.
- [75] DRUSCHITZ A. P., THELEN S., Induction Hardened Ductile Iron Camshafts. SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan, 2002, 01-0918.
- [76] SORIANO C., LEUNDA J., LAMBARRI J., NAVAS V. G., SANZ C., Effect of laser surface hardening on the microstructure, hardness and residual stresses of austempered ductile iron grades. *Applied Surface Science*, 257: 2011; 7101–7106.
- [77] SOHIA M. H., EBRAHIMI M., GHASEMI H. M., SHAHRİPOUR A., Microstructural study of surface melted and chromium surface alloyed ductile iron. *Applied Surface Science*, 258: 2012; 7348–7353.
- [78] GADAG S.P., SRINIVASAN M.N., Dry sliding wear and friction: laser-treated ductile iron. *Wear*, 173: 1994; 21-29.
- [79] NAVAS C., CONDE A., FERNANDEZ B.J., ZUBİRİ F., DAMBORENE J., Laser coatings to improve wear resistance of mould steel. *Surface and Coatings Technology*, 194: 2005; 136–142.
- [80] ALABEEDI K.F., ABBOUD J.H., BENYOUNIS K.Y., Microstructure and erosion resistance enhancement of nodular cast iron by laser melting. *Wear*, 266: 2009; 925–933.
- [81] ZAMMIT A., ABELA S., WAGNER L., MHAEDE M., GRECH M., Tribological behaviour of shot peened Cu–Ni austempered ductile iron. *Wear*, 2012; 12.027.

- [82] MURTHYA K. N., SAMPATHKUMARAN P., SEETHARAMU S., Abrasion and erosion behaviour of manganese alloyed permanent moulded austempered ductile iron. *Wear*, 267: 2009; 1393–1398.
- [83] SLATTER T. , LEWIS R., JONES A.H., The influence of induction hardening on the impact wear resistance of compacted graphite iron (CGI). *Wear*, 270: 2011; 302–311.
- [84] GUO Q., ZHOU H., WANG C., ZHANG W., LIN P., SUN N., REN L., Effect of medium on friction and wear properties of compacted graphite cast iron processed by biomimetic coupling laser remelting process. *Applied Surface Science*, 255: 2009; 6266–6273.
- [85] KILIÇLI V., ERDOĞAN M., Arakritik sıcaklıklardan östemperlenmiş ferritik küresel grafitli dökme demirde yeni ferrit oluşumu. *Journal of Fac. Eng. Arch. Gazi Univ.*, Cilt 22, No 4: 2007; 869-881.
- [86] QIAO Z., ZHANG D., LIU Y., YAN Z., Effect of Austenization Temperature on the Martensitic Transformation in a Low-alloy Ultra-high-strength Steel. *Applied Mechanics and Materials*, 66-68: 2011; pp 1797-1801.
- [87] LESCANO D. E., SILVETTI S. P., Study of microstructure and tempered martensite embrittlement in AISI 15B41 steel. *Procedia Materials Science*, 1: 2012; 134 – 140.
- [88] HASEEB A.S.M.A., ISLAMA A. MD., BEPARI M. A., Tribological behaviour of quenched and tempered, and austempered ductile iron at the same hardness level. *Wear*, 244: 2000; 15–19.
- [89] KRAUSS G., Martensite before and after Tempering, Deformation and Fracture of. *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 2001; 5193–5197.
- [90] DONGWOO S., SUNGHAK L., YANGMO K., SOON-JU K., Surface hardening of a ductile-cast iron roll using high-energy electron beams. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 28, Number 7: 1997; pp. 1499-1508 (10).
- [91] ZHOU R., JIANG Y., LU D., ZHOU R., LI Z., Development and characterization of a wear resistant bainite/martensite ductile iron by combination of alloying and a controlled cooling heat-treatment. *Wear*, 250: 2001; 529–534.
- [92] GÜNEŞ İ., ULU S., AYAN O., Effect of tempering temperatures on wear behaviour of steels quenched and tempered. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13–15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.

- [93] GRUM J., STURM R., Residual Stress State after the Laser Surface Remelting Process. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2001; 10: 270–281.
- [94] BENYOUNIS K.Y., FAKRON O.M.A., ABBOUD J.H., OLABI A.G., HASHMI M.J.S., Surface melting of nodular cast iron by Nd-YAG laser and TIG. *Journal of Materials Processing Technology*, 170: 2005; 127–132.
- [95] GULZAR A., AKHTER J.I., AHMAD M., ALI G., MAHMOOD M., AJMAL M., Microstructure evolution during surface alloying of ductile iron and austempered ductile iron by electron beam melting. *Applied Surface Science*, 255, 2009, 8527–8532.
- [96] PANTELIS D.I., BOUYIOURI E., KOULOUMB N., VASSILIOU P., KOUTSOMICHALIS A., Wear and corrosion resistance of laser surface hardened structural steel. *Surface and Coatings Technology*, 298: 2002; 125–134.
- [97] KOCATEPE K., CERAH M., ERDOGAN M., Effect of martensite volume fraction and its morphology on the tensile properties of ferritic ductile iron with dual matrix structures. *Journal of Materials Processing Technology*, 178: 2006; 44–51.
- [98] BASSO A., MARTINEZ R., SIKORA J., Influence of chemical composition and holding time on austenite→ferrite transformation in ductile iron occurring within the intercritical interval. *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 2011; 9884–9889.
- [99] ERDOĞAN M., TEKELİ S., The effect of martensite volume fraction and particle size on the tensile properties of a surface-carburized AISI 8620 steel with a dual-phase core microstructure. *Materials Characterization*, 49: 2003; 445–454.
- [100] MIKOVIC´ T., SCHULZE V., VÖHRINGER O., LÖHE D., Influence of cyclic temperature changes on the microstructure of AISI 4140 after laser surface hardening. *Acta Materialia*, 55: 2007; 589–599.
- [101] SAHİN Y., KILICLI V., OZER M., ERDOĞAN M., Comparison of abrasive wear behavior of ductile iron with different dual matrix structures. *Wear*, 268: 2010; 153–165.
- [102] SAHİN Y., ERDOGAN M., CERAH M., Effect of martensite volume fraction and tempering time on abrasive wear of ferritic ductile iron with dual matrix. *Wear*, 265: 2008; 196–202.

- [103] CERAH M., KOCATEPE K., M. ERDOGAN, Influence of martensite volume fraction and tempering time on tensile properties of partially austenitized in the ( $\alpha+\gamma$ ) temperature range and quenched + tempered ferritic ductile iron. *Journal of Materials Science*, 40: 2005; 3453 – 3459.
- [104] ZHANG K.M., ZOU J.X., Formation of ultrafine twinned austenite on a cold rolled 316L stainless steel induced by pulsed electron beam treatment under heating mode. *Thin Solid Films*, 526: 2012; 28–33.
- [105] SUN G.F., BHATTACHARYA S., DINDA G.P., DASGUPTA A., MAZUMDER J., Influence of processing parameters on lattice parameters in laser deposited tool alloy steel. *Materials Science and Engineering A*, 528: 2011; 5141–5145.
- [106] PESICKA J., KUZEL R., DRONHOFER A., EGGELER G., The evolution of dislocation density during heat treatment and creep of tempered martensite ferritic steels. *Acta Materialia*, 51: 2003; 4847–4862.
- [107] YANG Q., LUO J.L., Martensite transformation and surface cracking of hydrogen charged and outgassed type 304 stainless steel. *Materials Science and Engineering A*, 288: 2000; 75–83.
- [108] CONG Z.H., JIA N., SUN X., REN Y., ALMER J., WANG Y.D., Stress and Strain Partitioning of Ferrite and Martensite during Deformation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40A: 2009; 1383-1387.
- [109] LIN P., ZHU Y., ZHOU H., WANG C., REN L., Wear resistance of a bearing steel processed by laser surface remelting cooled by water. *Scripta Materialia*, 63: 2010; 839–842.
- [110] CHIANG K., CHEN Y.C., Laser surface hardening of H13 steel in the melt case. *Materials Letters*, 59: 2005; 1919– 1923.
- [111] PANTSAR H., KUJANPAA V., Effect of oxide layer growth on diode laser beam transformation hardening of steels. *Surface and Coatings Technology*, 200: 2006; 2627– 2633.
- [112] MIN-XIAN W., SHU-QI W., LAN W., KANG-MIN C., Effect of Microstructures on Elevated-Temperature Wear Resistance of a Hot Working Die Steel. *Journal of iron and steel research*, 18,10: 2011; 47-53.
- [113] GADAG S.P., SRINIVASAN M.N., MORDIKE B.L., Effect of laser processing parameters on the structure of ductile iron. *Materials Science and Engineering A*, 196: 1995; 145-151.

- [114] OKTAY E., KILIÇLI V., ÖZER M., ERDOĞAN M., Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde indüksiyonla yüzey sertleştirilmenin mikroyapı ve yorulma dayanımı üzerine etkisi. International Iron & Steel Symposium, 02-04 April 2012, Karabük, Türkiye.
- [115] PANTELIS D.I., PANTAZOPOULOS G., ANTONIOU S. S., Wear behavior of anti-galling surface textured gray cast iron using pulsed-CO<sub>2</sub> laser treatment. *Wear*, 205: 1997; 178-185.
- [116] WEI M., WANG S., WANG L., CUI X., CHEN K., Selection of Heat Treatment Process and Wear Mechanism of High Wear Resistant Cast Hot-Forging Die Steel, *journal of iron and steel research, international*. 2012, 19(5): 50-57.
- [117] REBASA N., DOMMARCO R., SIKORA J., Wear resistance of high nodule count ductile iron'', *Wear* 253 (2002) 855–861
- [118] SARKAR A. D., *Wear of metals*. Pergamon pres, volume18,1983.
- [119] ABEDI H.R., FAREGHI A., SAGHAFIAN H., KHEIRANDISH S.H., Sliding wear behavior of a ferritic–pearlitic ductile cast iron with different nodule count , *Wear* 268 (2010) 622–628.
- [120] HATATE M., SHIOTA T., TAKAHASHI N., SHIMIZU K, Influences of graphite shapes on wear characteristics of austempered cast iron, *Wear* 251 (2001) 885–889.
- [121] HEITKEMPER M., FISCHER A., BOHNE, CH. PYZALLA A., Wear mechanisms of laser-hardened martensitic high-nitrogen-steels under sliding wear, *Wear* 250 (2001) 477–484.
- [122] BALACHANDRAN G., VADIRAJ A., KAMARAJ M., KAZUYA E., Mechanical and wear behavior of alloyed gray cast iron in the quenched and tempered and austempered conditions, *Materials and Design* 32 (2011) 4042–4049.
- [123] McCAY M. H., DAHOTRE N. B., HOPKINS J. A., McCAY T. D., The influence of metals and carbides during laser surface modification of low alloy steel, *JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE* 34 (1999) 5789 – 5802.

## EKLER

### Ek A

Numune	Yük (N)	Merkez		İç Dış	
		Aşınma izi genişliği (µm)	Aşınma izi derinliği (µm)	Aşınma izi genişliği (µm)	Aşınma izi derinliği (µm)
İşlemsiz	0,5	209	8,5	209	8,5
	1	345	9	345	9
	2	507	9,1	507	9,1
1	0,5	416	3	332	2,7
	1	534	3,7	450	3,5
	2	628	4,5	472	5,1
2	0,5	288	4,7	276	3
	1	430	5	398	4,3
	2	548	7,9	483	4,7
3	0,5	319	7,9	165	2,2
	1	487	8,5	347	2,4
	2	572	9	467	2,6
4	0,5	417	3,2	332	3,1
	1	523	3,9	414	3,7
	2	632	4,7	477	4,3
5	0,5	292	5	225	3,7
	1	536	5,1	490	3,9
	2	585	8,1	500	5
6	0,5	319	7,9	165	2,2
	1	487	8,5	347	2,4
	2	572	9	467	2,66
İ	0,5	377	4,7	280	1,9
	1	390	7,2	342	2,1
	2	465	8,1	397	2,37



1T	0,5	415	2,3	277	3,4
	1	323	5,2	305	4,6
	2	447,4	6,6	412	5,5
2T	0,5	332	4,7	281	3,9
	1	403	6,6	465	4,7
	2	606	7,4	507,5	6,1
3T	0,5	588	7,9	318	2,2
	1	673	8,5	384	2,7
	2	752	9	470	3
4T	0,5	290	4	328	3,2
	1	351	5	316,75	4,2
	2	426,6	6,1	411,25	5,4
5T	0,5	316	4,9	320,2	3,7
	1	470	6,9	430,75	5
	2	500	9,4	486,25	5,6
6T	0,5	588,3	7,9	318	2,2
	1	673,6	8,5	384	2,7
	2	752	9	470,3	3
İ-T	0,5	296	5,8	278,25	2,4
	1	320	7,2	302,75	3
	2	403	9,5	401	6,4

## ÖZGEÇMİŞ

Aysun AYDAY, 23.08.1980 yılında Almanya Köln' de doğdu. İlkokula Almanya'da başladıktan sonra, orta ve lise tahsilini Eskişehir'de tamamladı. 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünü kazandı. 2003 yılında lisans eğitimini tamamlayıp aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2005 yılında Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümüne araştırma görevlisi olarak atandı. Yüksek lisans eğitimini 2006 yılında tamamlayıp aynı yıl Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği anabilim dalında doktora öğrenimine başlamıştır. Halen araştırma görevlisi olarak görevine devam etmektedir.