

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**PLAZMA ile POLİMER KAPLANMIŞ METALİK
MALZEMELERİN BAZI (TRİBOLOJİK) ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Hatice VAROL ÖZKAVAK

**Danışman
Prof. Dr. Cahit KURBANOĞLU**

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA – 2013**

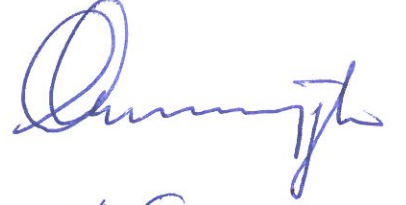
©2013 [Hatice VAROL ÖZKAVAK]

TEZ ONAYI

Hatice VAROL ÖZKAVAK tarafından hazırlanan "Plazma İle Polimer Kaplanmış Metalik Malzemelerin Bazı (Tribolojik) Özelliklerinin Araştırılması" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

Danışman

Prof. Dr. Cahit KURBANOĞLU
İstanbul Medeniyet Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU
Pamukkale Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ertuğrul DURAK
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ahmet KOYUN
Yıldız Teknik Üniversitesi



Jüri Üyesi

Doç. Dr. Ümran ESENDEMİR
Süleyman Demirel Üniversitesi



Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Mehmet Cengiz KAYACAN

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Hatice VAROL ÖZKAVAK

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Termal Püskürtme Kaplamalar	2
1.1.1. Termal püskürtme kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması	5
1.1.2. Termal püskürtme kaplamaların uygulama alanları	7
1.2. Plazma ve Plazma Püskürtme Yöntemi	9
1.2.1. Plazma	9
1.2.2. Plazma ile yüzey modifikasyon işlemleri	11
1.2.3. Plazma püskürtme işlemi	15
1.3. Yüzey Hasarları ve Sınıflandırılması	22
1.3.1. Malzeme kaybı meydana gelmeden oluşan yüzey hasarları	23
1.3.2. Malzeme kaybı meydana gelerek oluşan yüzey hasarları	24
1.3.3. Malzemenin artmasıyla oluşan yüzey hasarları	24
1.4. Sürtünme ve Aşınma	25
1.4.1. Aşınma	27
1.4.2. Aşınma mekanizmalarının sınıflandırılması	29
1.5. Kaplama Malzemeleri	40
1.5.1. Polimer malzemeler	41
1.5.2. Polimer kaplamaların tribolojik özellikleri	43
1.5.3. PTFE kaplamalar	44
2. KAYNAK ÖZETLERİ	47
3. MATERYAL VE YÖNTEM	68
3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler	68
3.2. Deneysel Çalışmalar	70
3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması	71
3.4. Kaplama Malzemesinin Temini ve Kaplama İşleminin Yapılışı	73
3.4.1. Atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi	74
3.4.2. Vakum şartlarında plazma kaplama işlemi	79
3.4.3. Aşınma deneyleri	85
3.4.4. Kaplama yüzeylerinin incelenmesi	88
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	91
4.1. Optik Görüntüler	91
4.2. Kaplama İşlem Öncesi ve Sonrası EDS Analizleri	100
4.3. Aşınma Deney Sonuçları	103
4.3.1. Sürtünme katsayısı sonuçları	104
4.3.2. Sürtünme kuvveti sonuçları	122
4.4. Aşınma Sonrası Yüzeylerin Aşınma İzlerinin Optik Mikroskopta İncelenmesi	135
4.4.1 Atmosferik şartlarda kaplanmış numunelerin aşınma sonrası aşınma iz görüntüleri	135

4.4.2 Vakum şartlarda kaplanmış numunelerin aşınma sonrası aşınma izi görüntüleri	141
4.5. Aşınma Sonrası Yüzeylerin SEM Analizleri.....	158
4.6. Aşınma Sonrası Yüzeylerin Atomik Kuvvet Mikroskobu İncelemeleri (AFM)	170
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	185
KAYNAKLAR	190
ÖZGEÇMİŞ	190

ÖZET

Doktora Tezi

PLAZMA İLE POLİMER KAPLANMIŞ METALİK MALZEMELERİN BAZI (TRİBOLOJİK) ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Hatice VAROL ÖZKAVAK

Süleyman Demirel Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Cahit KURBANOĞLU

Makine elemanlarından yatak, mil, dişli çark ile vida bağlantıları vb kullanım esnasında kuru, yarı sıvı ve sıvı sürtünme altında ve belli sıcaklıklarda gösterdiği davranışların ekonomik ve teknolojik açıdan incelenmesi bu zamana kadar birçok çalışmanın konusu olmuştur. Ayrıca günümüze kadar yapılan çalışmalar incelendiğinde plazma yöntemi kullanılarak kaplanan malzemelerin kaplama yapılmış ve yapılmamış haldeki davranışları karşılaştırılmıştır. Bunun yanında kaplama işlemine etki eden torç çapı, kaplama kalınlığı vb faktörlerin kaplama kalitesine etkisi incelenmiştir. Kaplama yapılmış numunelere aşınma deneyleri uygulanmış ve kaplanmış numunenin aşınma davranışı belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında yatak, mil, dişli çark ile civata gibi makine elemanlarına ekonomik açıdan çözüm üretmek amaçlanmıştır. Bu amaçla AISI 1050 sade karbonlu çelik alt malzeme olarak seçilmiş ve değişik ısı (tam yumuşatma işlemi, su verme + 210 °C’de temperleme işlemi ve su verme + 500 °C’de temperleme işlemi) ve mekanik yüzey işlemlerine (bilyeli dövme işlemi) tabi tutulmuştur. Böylelikle alt malzemenin yüzey sertlik değerinin kaplama kalitesine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Hazırlanan alt malzemeler üzerine atmosferik ve vakum şartlarında RF plazma kaplama yöntemleri kullanılarak kaplama işlemi yapılmıştır. Plazma işlem parametrelerinin kaplama kalitesine etkisinin belirlenebilmesi için işlem süresi, gaz cinsi, frekans, işlem basıncı ve güç gibi işlem parametreleri değiştirilmiştir. Ayrıca çalışmada kaplama malzemesinin kaplama kalitesine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Politetrafloraetilen (PTFE) polimer malzeme atmosferik şartlarda kaplama işleminde, Politetrafloraetilen (PTFE) ve Hekzafloropropan (C₃F₆) polimer malzemeler ise vakum şartlarında plazma kaplama işleminde kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Yapılan kaplamaların aşınma davranışlarının belirlenebilmesi için kaplanmış numunelere tribotester aşınma cihazı kullanılarak aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşınma deney sonrası Enerji Dağılımlı X-ışınları Mikroanaliz Spektrometresi (EDS), Optik Mikroskop, Atomik Güç Mikroskobu (AFM) ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak kaplamaların aşınma karakteristiği analiz edilmiştir. Böylelikle uygun alt malzeme üzerine uygun kaplama malzemesi, yöntem ve parametreleri belirlenmiştir. Çalışmada optimum aşınma davranışı Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunelerde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AISI 1050, Atmosferik basınç plazma, Düşük basınç RF Plazma, Aşınma, PTFE, C₃F₆.

2013, 216 sayfa

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

INVESTIGATION OF SOME (TRIBOLOGICAL) PROPERTIES OF METALIC MATERIALS POLYMER COATED WITH PLASMA

Hatice VAROL ÖZKAVAK

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Cahit KURBANOĞLU

Machine elements such as bearings, shafts, some kinds of gears and bolts which have been served under dry, semi-lubricated and lubricated friction and specific temperatures conditions have been investigated in an economical and technological aspects for years up to dates. Such machine elements in the behavior of the economic and tecnological aspects have been widely investigated until nowadays bymany researhers. These recent studies were made by using plasma coatings on the specimens. Coated and uncoated specimens are compared each other for different behaviour. Besides thatin general, the effects of parameters such as the diameter of the torch, coating thickness etc. On the coating quality were investigated. In order to determine the tribological behaviour of the plasma coated specimens wear tests were applied. To determine the right working conditions for wear behaviour of materials, the test results have been used, in general.The aim of this experimental sudy is to find economical solutions for some machine elements such as bearings, gears and bolts work at wear conditions. For this purpose AISI 1050 carbon steel was selected as a substrate. AISI 1050 carbon steel specimens has been heat treated at different treatment parameters (fully annealed, tempered at different temperatures) and mechanical surface treatment (shot peening) in order todetermine the effects of surface hardness on the coating quality. Surface treated AISI 1050 carbon steel specimens were coated by using atmospheric plasma system and RF vacuum plasma system. Effects of plasma parameters on coating quality try to be investigated by changing plasma treatment parameters such as power, pressure, treatment time and type of gas. Mainly, the effect of coating materials on the coating quality were investigated in this study. Forthis purpose Polytetrafluoroethyle (PTFE) polymer material was used by atmospheric plasma system and polytetrafluoroethyle (PTFE) and hexafluoropropene (C_3F_6) polymer materials were used by vacuum plasma systems. Wear tests of coated specimen's surfaces were tested by using tribotester. After the deposition surface morphology of samples were analysed by EDS, Scanning Electron Microscope (SEM), Atomic Force Microscope(AFM) and Optical Microscope (OM). Suitable substate material conditions, coating material, coating method and treatment parameters tried to be determined by using theseslected values. As a result of this experimental study,optimum wear behavior was obtained at quenched and tempered at 210°C substrate coated with PTFE under vacuum plasma treatment conditions.

Keywords: AISI 1050, Atmospheric plasma, Low pressure RF Plasma, Wear, PTFE, C_3F_6

2013, 216 pages

TEŞEKKÜR

Doktora çalışmam sırasında ilgi ve desteğini yakından hissettiğim, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Cahit KURBANOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarda katkı sağlayan; başta laboratuvar imkânlarını ve bilgilerini paylaşmaktan çekinmeyen Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi saygıdeğer hocam Doç. Dr. Lütfi ÖKSÜZ'e, Wisconsin-Madison Üniversitesi Öğretim Üyesi Sorin MANOLACHE'ye ve Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Ayşegül UYGUN'a teşekkür ederim. Tez çalışmamda her türlü imkânlarından yararlandığım Süleyman Demirel Üniversitesi Teknokent firmalarından olan Plus Plazma Uygulama Sanayi çalışanlarına ve Erdoğan TEKE'ye teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarımın laboratuvar imkânlarını kullanmamda bana yardımcı olan Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Öğretim Üyesi Doç. Dr. Erdem ÇAMURLU'ya teşekkür ederim. Ayrıca çalışmam süresince değerli bilgileriyle desteklerini benden esirgemeyen Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Prof. Dr. Muzaffer TOPÇU'ya teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca 2233 - Doktora Öğrencileri için Yurt İçi Araştırma Burs Programı ile maddi olarak beni destekleyen TÜBİTAK BİDEB'e teşekkür ederim.

Ayrıca 2393- D- 10No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na da teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında desteklerini hissettiğim başta babam Prof. Dr. Remzi VAROL olmak üzere bütün aileme ve eşime sonsuz sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Hatice VAROL ÖZKAVAK

ISPARTA, 2013

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Termal İşlemle yapılan yüzey modifikasyon işlemleri.....	3
Şekil 1.2. Termal püskürtme kaplama işlemi.....	3
Şekil 1.3. Temel termal püskürtme yöntemlerinin enerji kaynaklarına göre sınıflandırılması.....	6
Şekil 1.4. Termal püskürtme yöntemlerinin sınıflandırılması	7
Şekil 1.5. Termal püskürtme yönteminin gelişiminde önemli dönüm noktaları.....	8
Şekil 1.6. Plazmanın oluşumu.....	9
Şekil 1.7. Plazma yoğunluğu- elektron voltuna bağlı olarak plazmanın oluşumu.....	10
Şekil 1.8. Plazmanın elektronun fonksiyonu olarak sınıflandırılması	11
Şekil 1.9. Çevre şartlarına göre plazma püskürtme yöntemlerinin sınıflandırılması .	13
Şekil 1.10. Plazma kaplamada kaplama özelliklerini etkileyen ana parametreler	14
Şekil 1.11. Plazma püskürtme sisteminin sınıflandırılması	15
Şekil 1.12. Plazma püskürtme sisteminin şematik diyagramı	16
Şekil 1.13. Plazma püskürtme tabancası	16
Şekil 1.14. Yüzey hasarlarının sınıflandırılması	23
Şekil 1.15. Statik sürtünme katsayısının belirlenmesi	26
Şekil 1.16. Sürtünmeyi oluşturan temel mekanizmalar (a) Adezyon (b) Çizme (c) Deformasyon ve kırılmış oksit parçaları (d) Sıkışmış aşınma parçaları .	27
Şekil 1.17. Değişik aşınma şartlarında aşınma katsayısının (K) değişimi	28
Şekil 1.18. Aşınmanın sınıflandırılması.....	29
Şekil 1.19. Düşük gerilmeli abrazif aşınma	30
Şekil 1.20. Abrazif aşınma sırasındaki temas şekilleri	32
Şekil 1.21. Abrazif aşınmanın oluşma tipleri.....	33
Şekil 1.22. Saf metal ve alaşımlar için sertlik-aşınma direnci ilişkisi	34
Şekil 1.23. Kompozit malzemeler için abrazif aşınmaya etki eden faktörler	35
Şekil 1.24. Abrazif aşınma- malzeme sertliği/abrazif sertliği ilişkisi	36
Şekil 1.25. PTFE'nin sürtünme katsayısına kayma şartlarının etkisi.....	44
Şekil 1.26. PTFE malzemenin çeliğe teması (a) PTFE aşınma parçacıklarının çelik yüzeye yapışması (b) Belli bir devirden sonra PTFE tabakasının çelik üzerinde oluşması.....	45
Şekil 3.1. Deneysel çalışmada iş akışı	71
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan numunelerin şekli ve boyutları	72
Şekil 3.3. Atmosferik şartlarda plazma kaplama düzeneği	75
Şekil 3.4. Atmosferik şartlarda plazma kaplama düzeneğinde kullanılan plazma kaleminin genel görünüşü	76
Şekil 3.5. Atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi deney düzeneğinin genel görünüşü.....	77
Şekil 3.6. Vakum şartlarında plazma kaplama deney düzeneğinin şematikgörünüşü	80
Şekil 3.7. Vakum şartlarında plazma kaplama işleminde kullanılan vakum çemberinin genel görünüşü	81
Şekil 3.8. PTFE vakum şartlarında plazma kaplama işlemi deney düzeneğinin işleme hazır halde genel görünüşü.....	82
Şekil 3.9. Tribotester deney cihazının genel görünüşü	85
Şekil 3.10. Aşınma deney düzeneği çalışma prensibi	87
Şekil 3.11. Aşınma izi incelemelerinde kullanılan Optik Mikroskopunun genel görünüşü.....	88

Şekil 3.12. Kaplama incelemelerinde kullanılan Tarama Elektron Mikroskopunun genel görünüşü	89
Şekil 3.13. Kaplama yüzey topografisi incelemelerinde kullanılan AFM cihazının genel görünüşü	90
Şekil 4.1. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri .	92
Şekil 4.2. Su verilmiş + 210 °C temperlenmiş alt malzeme üzerine atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri	93
Şekil 4.3. Su verilmiş + 500 °C temperlenmiş alt malzeme üzerine atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri	93
Şekil 4.4. Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri	94
Şekil 4.5. Atmosferik basınçta değişik işlem parametrelerinde PTFE kaplama işlemi sonrası ölçülen ortalama kalınlık değerleri	94
Şekil 4.6. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri	97
Şekil 4.7. Vakum şartlarında plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış numunelerin optik görüntüleri	98
Şekil 4.8. Vakum şartlarında değişik işlem parametrelerinde PTFE kaplama işlemi sonrası ölçülen ortalama kalınlık değerleri	99
Şekil 4.9. Vakum şartlarında değişik işlem parametrelerinde C ₃ F ₆ kaplama işlemi sonrası ölçülen ortalama kalınlık değerleri	99
Şekil 4.10. Kaplama yapılmamış alt malzemeye ait EDS analizi	100
Şekil 4.11. Atmosferik şartlarda plazma ile kaplanmış numunelere ait EDS analizi	101
Şekil 4.12. Değişik alt malzemeler üzerine vakum şartlarında değişik plazma parametreleri kullanılarak PTFE kaplanan numunelere ait EDS analizleri	102
Şekil 4.13. Değişik alt malzemeler üzerine vakum şartlarında değişik plazma parametreleri kullanılarak C ₃ F ₆ kaplanan numunelere ait EDS analizleri (a) ve (b)	103
Şekil 4.14. Değişik alt malzemeler üzerine vakum şartlarında değişik plazma parametreleri kullanılarak C ₃ F ₆ kaplanan numunelere ait EDS analizleri (c) ve (d)	103
Şekil 4.15. Aşınma deneyi sonucu elde edilen değerlerin elde edildiği çıktılar	105
Şekil 4.16. Atmosferik şartlarda kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları...	106
Şekil 4.17. Bilyeli dövülmüş alt malzemenin yüzey topografyası	110
Şekil 4.18. Vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları	112
Şekil 4.19. Vakum şartlarında C ₃ F ₆ kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları	117
Şekil 4.20. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış Tam Yumuşatılmış alt malzeme için (a) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi (b) Frekansın sürtünme kuvvetine etkisi	123

Şekil 4.21. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi (b) Frekansın sürtünme kuvvetine etkisi.....	124
	Sayfa
Şekil 4.22. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi (b) Frekansın sürtünme kuvvetine etkisi.....	124
Şekil 4.23. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış Bilyeli Dövülmüş alt malzeme için (a) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi (b) Frekansın sürtünme kuvvetine etkisi	125
Şekil 4.24. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış Tam Yumuşatılmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi	126
Şekil 4.25. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi	127
Şekil 4.26. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi	128
Şekil 4.27. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış Bilyeli Dövülmüş alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi	129
Şekil 4.28. Vakum şartlarında plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış Tam Yumuşatılmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi	131
Şekil 4.29. Vakum şartlarında plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi	132
Şekil 4.30. Vakum şartlarında plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi	133
Şekil 4.31. Vakum şartlarında plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış Bilyeli Dövülmüş alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi	134
Şekil 4.32. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri	136
Şekil 4.33. Suda sertleştirme ve 210 °C temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri.....	137
Şekil 4.34. Suda sertleştirme ve 500 °C temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma izi görüntüleri.....	138
Şekil 4.35. Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri	139

Şekil 4.36. Değişik alt malzemeler üzerine 5 dk-Ar-10 kHz plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri ((a) Tam yumuşatılmış ; (b) Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; (c) Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; d) Bilyeli dövülmüş).....	141
Şekil 4.37. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri	143
Şekil 4.38. Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri.....	144
Şekil 4.39. Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri.....	145
Şekil 4.40. Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri	146
Şekil 4.41. Değişik alt malzemeler üzerine 180 W-100 mtorr-Ar-7,5 dk plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri ((a) Tam yumuşatılmış ; (b) Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; (c) Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; d) Bilyeli dövülmüş)	148
Şekil 4.42. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde C ₃ F ₆ kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri .	150
Şekil 4.43. Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde C ₃ F ₆ kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri.....	151
Şekil 4.44. Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde C ₃ F ₆ kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri.....	152
Şekil 4.45. Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde C ₃ F ₆ kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri .	153
Şekil 4.46. Değişik alt malzemeler üzerine 50 W-15 dk-300 mtorr plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri ((a) Tam yumuşatılmış ; (b) Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; (c) Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; d) Bilyeli dövülmüş).....	154
Şekil 4.47. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine (a) 100 W-15 dk-100 mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100 W-15 dk-300 mtorr plazma işlem şartlarında C ₃ F ₆ kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri	155
Şekil 4.48. Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine (a) 100 W-15 dk-100 mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100 W-15 dk-300 mtorr plazma işlem şartlarında C ₃ F ₆ kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri	155
Şekil 4.49. Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine (a) 100 W-15 dk-100 mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100 W-15 dk-300 mtorr plazma işlem şartlarında C ₃ F ₆ kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri	156

Şekil 4.50. Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine (a) 100 W-15 dk-100 mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100 W-15 dk-300 mtorr plazma işlem şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri	156
Şekil 4.51. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri	159
Şekil 4.52. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri	160
Şekil 4.53. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri	161
Şekil 4.54. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri	162
Şekil 4.55. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri	164
Şekil 4.56. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri	164
Şekil 4.57. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri	165
Şekil 4.58. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri	165
Şekil 4.59. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri	166
Şekil 4.60. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri	167
Şekil 4.61. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri	167
Şekil 4.62. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri	168
Şekil 4.63. Farklı sertlik değerlerindeki alt malzemeler ((a) Tam yumuşatılmış; (b) Bilyeli dövülmüş; (c) Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış ve (d) Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış) üzerine vakum şartlarında 180 W-100 mtorr-7,5 dk plazma işlem parametreleri kullanılarak yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri	169

Şekil 4.64. Farklı sertlik değerlerindeki alt malzemeler ((a) Tam yumuşatılmış; (b) Bilyeli dövülmüş; (c) Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış ve (d) Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış) üzerine vakum şartlarında 100 W-300 mtorr-15 dk plazma işlem parametreleri kullanılarak yapılan C ₃ F ₆ kaplamalara ait SEM görüntüleri	170
Şekil 4.65. Vakum şartlarında Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	172
Şekil 4.66. Vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	173
Şekil 4.67. Vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	174
Şekil 4.68. Vakum şartlarında Bilyeli Dövülmüş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	175
Şekil 4.69. Vakum şartlarında Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	176
Şekil 4.70. Vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	177
Şekil 4.71. Vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	179
Şekil 4.72. Vakum şartlarında Bilyeli Dövülmüş alt malzeme üzerine plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	180
Şekil 4.73. Atmosferik şartlarda Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	181
Şekil 4.74. Atmosferik şartlarda Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	182
Şekil 4.75. Atmosferik şartlarda Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	183
Şekil 4.76. Atmosferik şartlarda Bilyeli Dövülmüş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri	184

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 1.1. Termal püskürtme işlemi için ısı kaynakları, alev ve parçacık sıcaklığı (Chattopadhyay, 2007).....	6
Çizelge 1.2. Astar kaplama malzemeleri (Chattopadhyay, 2007).....	19
Çizelge 1.3. Termal püskürtme için metalik malzemeler (Chattopadhyay, 2007).....	20
Çizelge 1.4. Kompozitler için termal püskürtme (Chattopadhyay, 2007)	21
Çizelge 1.5. Metal üzerine kaplanan bazı polimerlerin özellikleri (Chattopadhyay, 2007)	22
Çizelge 3.1. AISI 1050 çelik malzemenin kimyasal kompozisyonu (www.efunda.com, 2012)	69
Çizelge 3.2. AISI 1050 çelik malzemenin mekanik özellikleri (Hmwire, 2012).....	69
Çizelge 3.3. Alt malzemelere uygulanan işlemler	73
Çizelge 3.4. Yüzey aktivasyon işlem parametreleri.....	76
Çizelge 3.5. 800°C’de tam yumuşatılmış alt malzeme için plazma kaplama parametreleri	77
Çizelge 3.6. Su verilmiş ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme için plazma kaplama parametreleri.....	78
Çizelge 3.7. Su verilmiş ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme için plazma kaplama parametreleri.....	78
Çizelge 3.8. Bilyeli dövülmüş alt malzeme için plazma kaplama parametreleri	78
Çizelge 3.9. PTFE malzeme plazma kaplama işlemi için vakum şartları.....	83
Çizelge 3.10. C ₃ F ₆ malzeme vakum plazma kaplama parametreleri.....	84
Çizelge 3.11. Tribotester cihazına ve numuneye ait teknik özellikler	87
Çizelge 3.12. Aşınma deney parametreleri	88
Çizelge 4.1. Atmosferik basınçta plazma kaplanmış bazı numunelere ait modifikasyon tabaka kalınlık değerleri.....	91
Çizelge 4.2. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin kaplama tabakası kalınlık değerleri.....	96
Çizelge 4.3. Vakum şartlarında plazma ile C ₃ F ₆ kaplanmış numunelerin kaplama tabakası kalınlık değerleri	96
Çizelge 4.4. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları.....	105
Çizelge 4.5. Atmosferik Şartlarda plazma kaplama işlem parametrelerinden işlem süresinin sürtünme katsayısına etkisi.....	107
Çizelge 4.6. Atmosferik Şartlarda plazma kaplama işlem parametrelerinden frekansın sürtünme katsayısına etkisi	108
Çizelge 4.7. Atmosferik Şartlarda plazma kaplama işlem parametrelerinden gaz cinsinin sürtünme katsayısına etkisi	109
Çizelge 4.8. Atmosferik Şartlarda aynı plazma kaplama işlem parametreleri kullanıldığında alt malzemenin sürtünme katsayısına etkisi	111
Çizelge 4.9. Vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları.....	111
Çizelge 4.10. Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden gücün sürtünme katsayısına etkisi (PTFE kaplanmış).....	113
Çizelge 4.11. Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden basıncın sürtünme katsayısına etkisi (PTFE kaplanmış).....	114

Çizelge 4.12. Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden işlem süresinin sürtünme katsayısına etkisi (PTFE kaplanmış)	114
Çizelge 4.13. Vakum şartlarında aynı plazma kaplama işlem parametrelerinde kaplanmış alt malzemelerin sürtünme katsayısına etkisi (PTFE kaplanmış).....	115
Çizelge 4.14. Vakum şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları	116
Çizelge 4.15. Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden gücün sürtünme katsayısına etkisi (C_3F_6 kaplanmış)	118
Çizelge 4.16. Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden basıncın sürtünme katsayısına etkisi (C_3F_6 kaplanmış)	119
Çizelge 4.17. Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden işlem süresinin sürtünme katsayısına etkisi (C_3F_6 kaplanmış).....	120
Çizelge 4.18. Vakum şartlarında aynı plazma işlem parametrelerinde alt malzemenin sürtünme katsayısına etkisi(C_3F_6 kaplanmış)	121
Çizelge 4.19. Vakum şartlarında kaplama malzemesinin sürtünme katsayısına etkisi	122
Çizelge 4.20. Tam yumuşatılmış; suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemeler üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde ((a) 5 dk-Ar-10 kHz; (b) 5 dk-Ar-15 kHz; (c) 10 dk-Ar-10 kHz ve (d) 5 dk-He-10 kHz) yapılan PTFE malzeme kaplanmış numunelere ait ölçülen ortalama aşınma iz genişlikleri	135
Çizelge 4.21. Atmosferik şartlarda farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemeler üzerine 5dk-Ar-10kHz işlem parametreleri plazma ile PTFE kaplanmış numuneler için elde edilen ortalama aşınma iz genişlikleri.....	140
Çizelge 4.22. Tam yumuşatılmış; suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemeler üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde ((a) 180 W-100 mtorr-Ar-7,5 dk; (b) 180 W-50 mtorr-Ar-7,5 dk; (c) 100 W-100 mtorr-Ar-7,5 dk; (d) 100 W-100 mtorr-Ar-7,5 dk ve (e) 100 W-100 mtorr-He-7,5 dk) vakum şartlarında yapılan kaplamalara ait ölçülen ortalama aşınma iz genişlikleri	142
Çizelge 4.23. Vakum şartlarda farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemeler üzerine 180 W-100 mtorr-Ar-7,5 dk işlem parametreleri plazma ile PTFE kaplanmış numuneler için elde edilen ortalama aşınma iz genişlikleri	147
Çizelge 4.24. Vakum şartlarında değişik işlem parametrelerinde tam yumuşatılmış; suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemeler üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait ölçülen ortalama aşınma iz genişlikleri	149

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

EHDY	Elastohidrodinamik yağlama
H	Aşınma yüzeyinin sertliği
H	Sürtünen parça çiftinin yumuşak olan tarafının sertliği
HDY	Hidrodinamik yağlama
HVAF	Yüksek hız hava yakıt
HVIF	Yüksek hız darbe dövme
HVOF	Yüksek hız oksit yakıt
k	Bolzman sabiti
k	Aşınma katsayısı
N	Uygulanan yük
N _i	İyonlaşmış ortam yoğunluğu
N _n	Nötr atomların yoğunluğu
Q	Her kayma mesafesinde yüzeyden ayrılan hacim
T	Kelvin olarak gaz sıcaklığı
U _i	Gazın iyonizasyon enerjisi
V	Kayma hızı
W	Yüzeye uygulanan normal yük
Y	Birim zamanda aşınma hacmi
μ	Sürtünme katsayısı

1. GİRİŞ

Termal kaplama işlemi değişik amaçlar için kullanılarak günümüze kadar ulaşmış bir yöntemdir. Termal kaplamaların ilk kullanım alanı hasara uğramış makine parçalarının tamiri olmuştur. Daha sonra Dr. Max Ulrick Schoop ve arkadaşları ilk metal püskürtme yöntemi tesisini kurarak yüksek basınçtaki jet içine gaz ve ergimiş metali esas malzeme üzerine uygulamayı başarmışlardır. Bu yöntemlerden birisi olan plazma püskürtme kaplama ise 1962 yılında M. Yenni tarafından literatüre kazandırılmıştır (Sert, 2007).

Plazma, malzemenin dördüncü hali olup, yüzey mühendisliğinde geniş kullanım alanına sahiptir. Sıcaklığın artırılmasıyla katı sıvıya; sıvı da gaza dönüşür. Isı verme işlemine devam edildiğinde gaz atomları yüklü parçacıklara dönüşerek malzeme plazma halini alır. Plazma, yüklü parçacıkların önemli derecede yüksek oranda oluşmasıyla elde edilen iletken bir gazdır. Malzemenin plazma hali, gaz hali gibi belirli bir hacme ve şekle sahip değildir.

Plazma püskürtme tekniği elektrik arkının oluşturulması ve oluşturulan arkın durağan bir gaz içinden geçirilmesiyle meydana gelen yüksek sıcaklığın oluşturduğu plazma ile kaplama malzemesinin gaz haline getirilerek alt malzeme üzerine püskürtülmesi esasına dayanır. Kaplama malzemesi toz, tel veya akışkan halinde olabilir.

Son zamanlarda tüm sektörlerde kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri açısından gelişmiş, ucuz, hafif ve güvenilir malzeme talebi bulunmaktadır. Bu durum yeni malzeme arayışından daha çok, mevcut malzemelerin özelliklerinin geliştirilmesi yönünde yapılan çalışmaları hızlandırmıştır. Yapılan çalışmalarda termal kaplama ile malzemelerde sektörün istediği bu gelişmelerin sağlandığı belirlenmiştir. Bunun yanında malzeme sınırlamasının az olması, kolay uygulanabilir olması ve malzeme yapısının değişmesine neden olmayan ısı girdisi değerleri gibi üstün özelliklere sahip olması nedeniyle termal kaplama yöntemlerinin önemi artmıştır. Bazı makine elemanlarında sadece belirli kısımlarda aşınma, erozyon gibi nedenlerden dolayı erken hasar meydana gelmektedir. Bu kısımların aşınma, erozyon direnci gibi mekanik özelliklerinin istenen seviyelerde elde edilebilmesi ve erken hasarın önlenmesi için daha mukavemetli bir malzeme seçilmesi gerekmektedir. Bu da

maliyeti artırmaktadır. Bu nedenle tüm makine elemanının malzemesinin yüksek özellikte seçilmesi yerine aşınma, erozyon gibi etkenlerden dolayı erken hasara uğrayan bölgelerin (veya kısımlarının) kaplanarak bu özelliklerinin iyileştirilmesi ve böylelikle maliyetin düşürülmesi yönünde çalışmalar yapılmaktadır. Bu yöndeki çalışmalar termal kaplamaları daha da önemli kılmıştır.

Bu tez çalışmasında metalik malzeme grubuna giren sade karbonlu çeliklerin bu amaçla kullanılması veya pahalı malzemelerden imal edilmiş makine parçalarının aynı çalışma şartlarında ömürlerinin artırılmasıyla ekonomik açıdan çözüm elde edilmeye çalışılmıştır.

Bu çalışmada birbirlerine göre izafi hareket eden makine elemanlarından olan yataklar ve aşınma altında çalışan makine elemanları amaçlanarak 30 mm x30 mm x10 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler alt malzeme olarak kullanılmıştır. Alt malzemenin yüzey özelliklerinin kaplama kalitesine olan etkisini belirlemek amacıyla numunelere 800°C’de tam yumuşatma işlemi, sertleştirme ve takiben 210°C ve 500°C sıcaklıklarda temperleme işlemi ve bilyeli dövme işlemi olmak üzere 4 farklı yüzey işlemi uygulanmıştır. Daha sonra bu alt malzemelere atmosferik basınçta plazma kaplama ve vakum plazma kaplama işlemi ayrı ayrı uygulanmıştır. Atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi için kaplama malzemesi olarak Politetraflüoroetilen (PTFE) seçilmiştir. Vakum plazma kaplama işlemi için kaplama malzemesi olarak Politetraflüoroetilen (PTFE) ve Hekzaflurapropan (C_3F_6) kullanılmıştır.

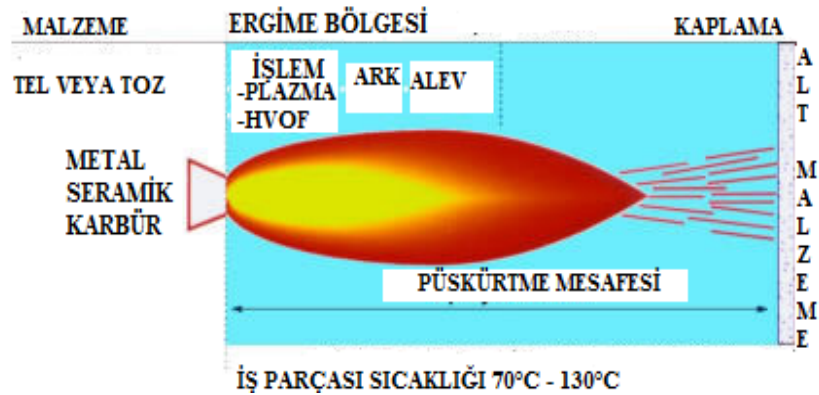
1.1. Termal Püskürtme Kaplamalar

Termal işlem ısı enerjisi ile malzeme morfolojisi, kompozisyon ve aşınma direnci gibi özelliklerin değiştirilmesi esasına dayanır. Termal işlemle yapılan yüzey modifikasyon işlemleri toplu halde Şekil 1.1’de verilmektedir.



Şekil 1.1. Termal İşlemle yapılan yüzey modifikasyon işlemleri (Heimann,2006)

Termal püskürtme ile kaplama işlemi özellikleri geliştirilmek istenen alt malzeme üzerine, alt malzemeyle uyum sağlayabilecek kaplama malzemesinin püskürtülür. Kaplama işlemi püskürtülecek olan kaplama malzemesinin tabanca içinde ergimesi ve sonrasında yüksek hızlı bir gaz bulutu halinde alt malzemeye çarpıp hızlıca katılarak yüzeye mekanik, kimyasal veya metalürjik olarak bağlanmasını sağlar. Termal püskürtme ile kaplama işleminin şematik hali Şekil 1.2’de verilmektedir.



Şekil 1.2. Termal püskürtme kaplama işlemi (Şematik) (Sert,2007)

Termal püskürtme kaplamaları, var olan malzeme özelliklerini iyileştirilmek amacıyla aşağıdaki işlem sırayla uygulanır;

- Problemlerin tespiti,
- İstenen kaplama özelliklerinin belirlenmesi,
- Yöntem, cihaz ve kaplama malzemenin seçilmesi,
- Kaplama işleminin uygulanması,
- Sonuçların teknik ve ekonomik açıdan incelenmesi ve değerlendirilmesi.

Başarılı bir kaplamanın elde edilmesi için alt malzeme özellikleri, kaplama işlemi için kullanılan cihazın teknik özellikleri, püskürtülecek malzeme özellikleri gibi parametrelerin iyi seçilmesi gerekmektedir. Bunun yanında kaplamaya etki eden faktörler ve etkileri aşağıda belirtilmektedir.

a)Gerilme: Yapılan kaplama işlemi sonucunda meydana gelen gerilme kaplamanın ömrünü etkilemektedir. Kaplama yapıldıktan sonra çekme gerilmeleri meydana gelir. Kaplama yoğun yapılırsa kaplama kalınlığı artar. Böylelikle kaplama malzemesi ile alt malzeme arasında oluşan bağ mukavemetini, çekme gerilmesi, başka bir ifade ile yapışma mukavemetini yenerek kaplamanın başarısız olmasına neden olur. Bu nedenle genelde ince kaplamalar kalın kaplamalara göre daha dayanıklıdır.

b) Gözenek (Porozite): Çoğu kaplama işleminde porozitenin oluşması kaçınılmazdır. Ancak kaplamadaki porozite değeri belli bir değerin üzerine çıkarsa başarılı bir kaplama elde edilemez. Genel olarak %1 ve <%25 oranında meydana gelen porozite normal karşılanmaktadır. Normal değerlerin üzerine çıkan porozite oranları kaplama malzemesinin değiştirilmesiyle ayarlanabilir.

c) Mukavemet: Yapılan kaplamanın mukavemet, süneklik ve darbe özellikleri toz halinde kaplama malzemesinin tane boyutu, alt malzeme ile püskürtülecek malzeme arasındaki ilişki, tane sınırı gibi faktörlerden etkilenir. Özellikle alt malzemenin yeterince yüksek mukavemetli ve ekonomik olması tercih edilmelidir.

d) Oksit: Termal kaplama işlemiyle yapılan kaplamaların birçoğu kaplama işleminin açıkta yapılması ve metal kompozisyonundan dolayı oksitlenirler. Kaplamada yüksek oranda oluşan oksit mukavemeti düşürmektedir.

e) Yüzey yapısı: Kaplamalar uygulanırken alt malzeme yüzeyinin farklı yüzey kalitesinde olması gerekmektedir. Bazı kaplama yöntemlerinde alt malzeme yüzeyi ön kaplamayla pürüz değerleri büyütülerek bazı kaplama yöntemlerinde ise alt malzeme yüzeyi değişik yüzey temizleme işlemleriyle temizlenirler (Sert, 2007).

1.1.1. Termal püskürtme kaplama yöntemlerinin sınıflandırılması

Termal püskürtmede yüksek sıcaklıkta alev veya plazma jetini oluşturacak cihazlara ihtiyaç duyulmaktadır. Plazma oluşturmak için gerekli olan plazmatron cihazı gaz akışıyla yüksek akım veya ark ile plazma sağlanır. Metal, seramik ve polimer tozları sıvı aracına püskürtülür ve çok kısa bir sürede plazma jetinde veya alevinde erir. Bu malzeme zerrecikler halinde malzeme yüzeyine püskürtülerek katılaşma sonucu kaplama yapılmış olur. Herhangi bir malzemenin püskürtülmesi sırasında direk katı halden gaz hale geçmesinin engellenmesi için ergime sıcaklığının iyi belirlenmesi gerekir.

Şekil 1.3 'te termal püskürtme yöntemlerinin iki temel enerji kaynağına göre sınıflandırılması verilmiştir. Bu sınıflamada ana enerji kaynaklarından birincisi kimyasal enerji olup ateşleme gazları alev püskürtme torçlarını ateşlemede kullanılır. Diğer kaynak ise elektrik akımı olup plazma matronlar için enerji temininde kullanılır.



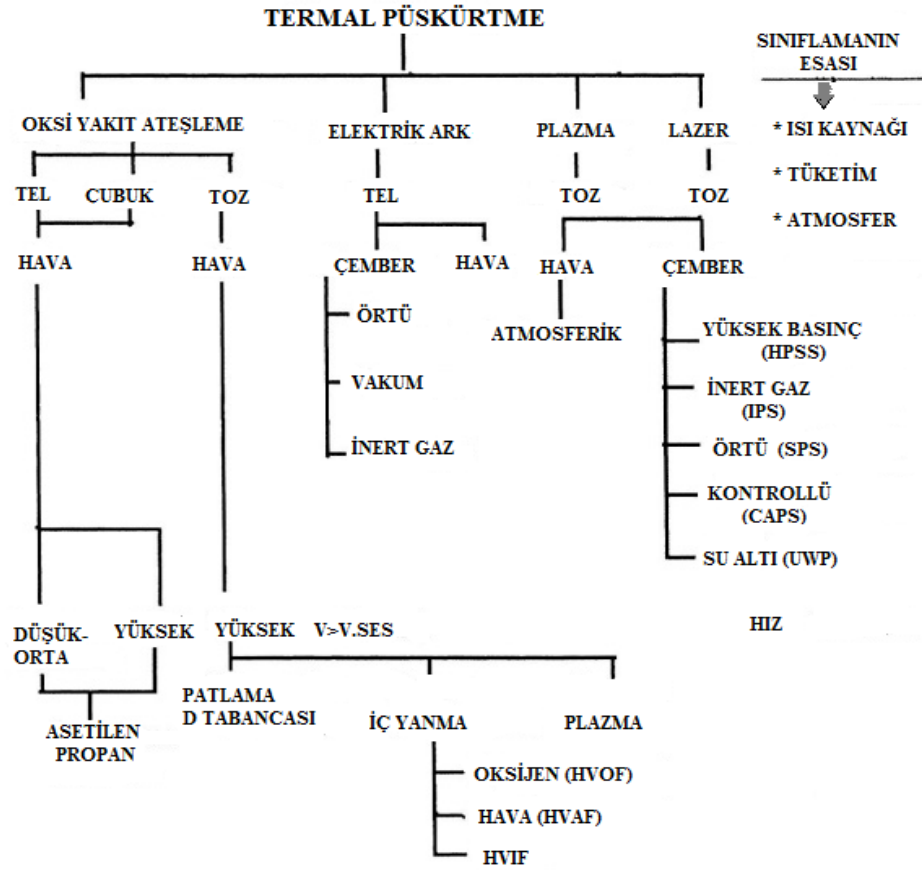
Şekil 1.3.Temel termal püskürtme yöntemlerinin enerji kaynaklarına göre sınıflandırılması (Heimann, 2006)

Termal püskürtme işlemi için işlem parametreleri ve bu parametrelerin sonunda elde edilen özellikler Çizelge 1.1’de verilmektedir.

Çizelge 1.1. Termal püskürtme işlemi için ısı kaynakları, alev ve parçacık sıcaklığı (Chattopadhyay, 2007)

Parametreler	Termal Püskürtme İşlemi						
	LVOF	HVOF	D- TİPİ TABANCA	HVIF	ARK	PLAZMA ARK	VAKUM PLAZMA
Alev Sıcaklığı ($\times 10^3$ °K)	3.5	5.5	5.5	4.0	15	15	12
Güç Girişi (kW)	20	150- 330	-----	-----	2-5	40-200	40-200
Parçacık Sıcaklığı ($\times 10^3$ °C)	2.5	3.3	-----	-----	3.8	3.8	3.8

Ayrıca termal püskürtme işlemi için alev sıcaklığı ve alev hızı açısından sınıflandırması da Şekil 1.4 ’te verilmektedir (HVOF: yüksek hız oksijen yakıt; HVAF: yüksek hız hava yakıt; HVIF: yüksek hız darbeli dövme (Chattopadhyay, 2007).



Şekil 1.4. Termal püskürtme yöntemlerinin sınıflandırılması (Chattopadhyay, 2007)

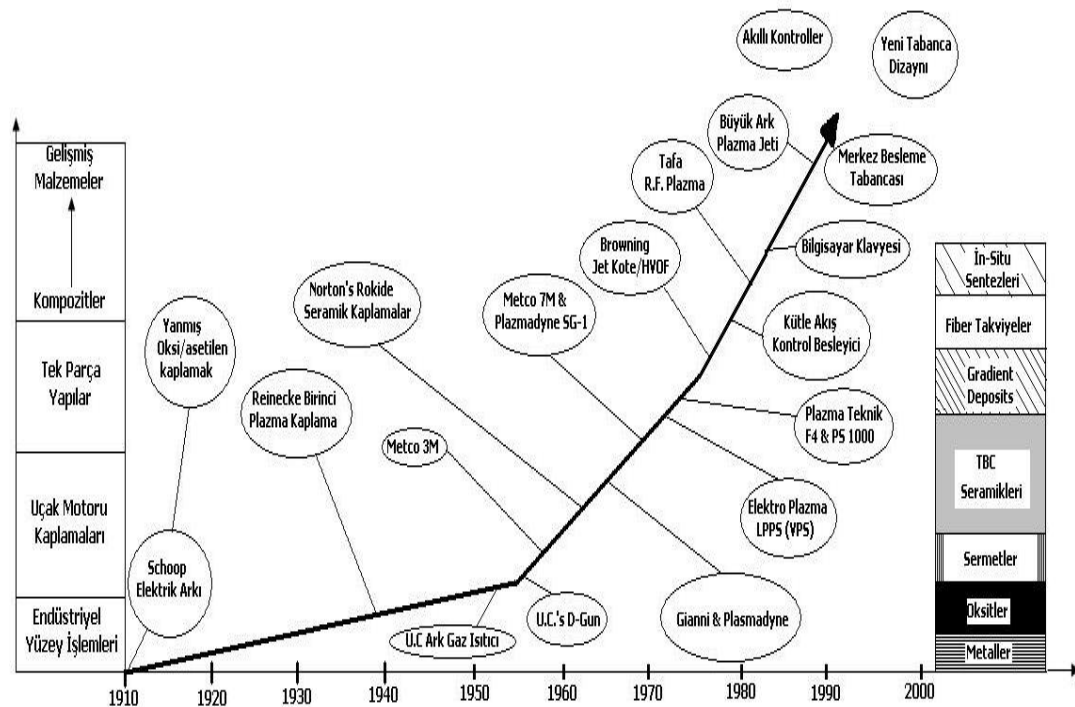
1.1.2. Termal püskürtme kaplamaların uygulama alanları

Birçok makine parçasında beklenmeyen erken hasarlar meydana gelmektedir. Mühendisler bu hasarların nedenlerini belirleyip bu tip hasarları ortadan kaldırmak için çalışmaktadırlar. Bu durum daha kaliteli malzeme üretilmesinin yanında mevcut malzemelerin özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmiştir. Termal püskürtme kaplamalar bu ihtiyaca cevap vermek için kullanılan bir yöntemdir. Termal püskürtme kaplamaların uygulama amacı; birçok makine parçalarını aşınma, korozyon, erozyon, kimyasal ve termal etkilerden korumaktır. Bu nedenle termal püskürtme kaplamaların uygulama alanı oldukça geniştir. Bu alanlardan bazıları şunlardır;

- Kömürle çalışan istasyonlarda kullanılan türbin kanadı gibi makine elemanlarının aşınma ve erozyon kontrolünün sağlanması,
- Kömürle çalışan kazanlarda parçacık erozyonunun kontrolü,
- Pompa parçalarında aşınmanın kontrolü ve sürtünme özelliklerinin geliştirilmesi,

- Köprü gibi mühendislik yapılarında korozyonun engellenmesi,
- Petrokimyasal ve kimyasal işletmelerdeki parçaların korozyondan korunması ve motorlarda yanma odalarında meydana gelen yüksek sıcaklık korozyonunun önlenmesi,
- Adyabatik dizel motorlarında termal ve kimyasal kaplamalarla korunması,
- Motorlarda silindirlerin iç yüzeylerinin korunması,
- Tren yolu, gemi, madencilik takımları ve cihazların yüzeylerinin korunması,
- Süper alaşım kaplamalar sıcak gaz erozyon ve korozyonunun uzay gaz türbininde oluşması engellenmesi,
- Kemik ve diş implantlarındaki aşınmaları engellemek amacıyla biyomedikal kaplamalarda kullanılır.

Bu kadar geniş uygulama alanına sahip termal sprey kaplamalar üzerinde çalışmalar günümüze kadar devam etmektedir. Termal sprey kaplama yöntemleri için dönüm noktası sayılabilecek gelişmeler Şekil 1.5'te verilmektedir.



Şekil 1.5. Termal püskürtme yönteminin gelişiminde önemli dönüm noktaları (Heimann, 2006)

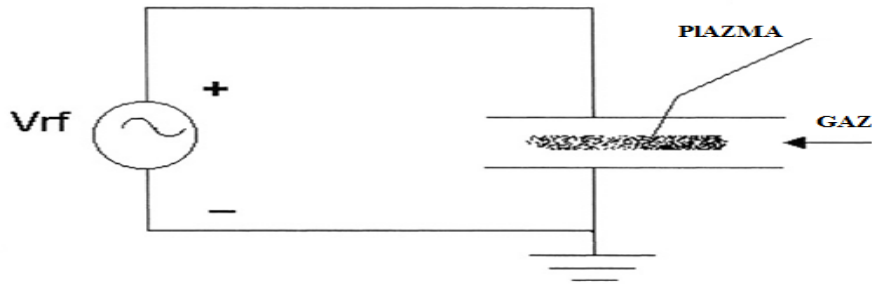
1.2. Plazma ve Plazma Püskürtme Yöntemi

1.2.1. Plazma

Plazma malzemenin dördüncü hali olup yüzey mühendisliğinde geniş kullanım alanına sahiptir. Katı bir malzeme ısıtıldığında sırasıyla aşağıda verilen dönüşümü yaşar;

Katı → Sıvı → Gaz → Plazma.

Sıcaklığın artırılmasıyla katı sıvıya; sıvı da gaza dönüşür. Isı verme işlemine devam edildiğinde gaz atomları yüklü parçacıklara dönüşerek malzeme plazma halini alır. Plazma yüklü parçacıkların miktarının fark edilir oranda oluşmasıyla elde edilen iletken bir gazdır. Atomların iyonlaşması şematik olarak Şekil 1.6’da verilmektedir.



Şekil 1.6. Plazmanın oluşumu (Şematik) (Chattopadhyay, 2007)

İyonlaşmanın derecesi iyonlaşma için bilinen saha eşitliği ile tanımlanır ve bu ifade (1.1)’de verilmiştir.

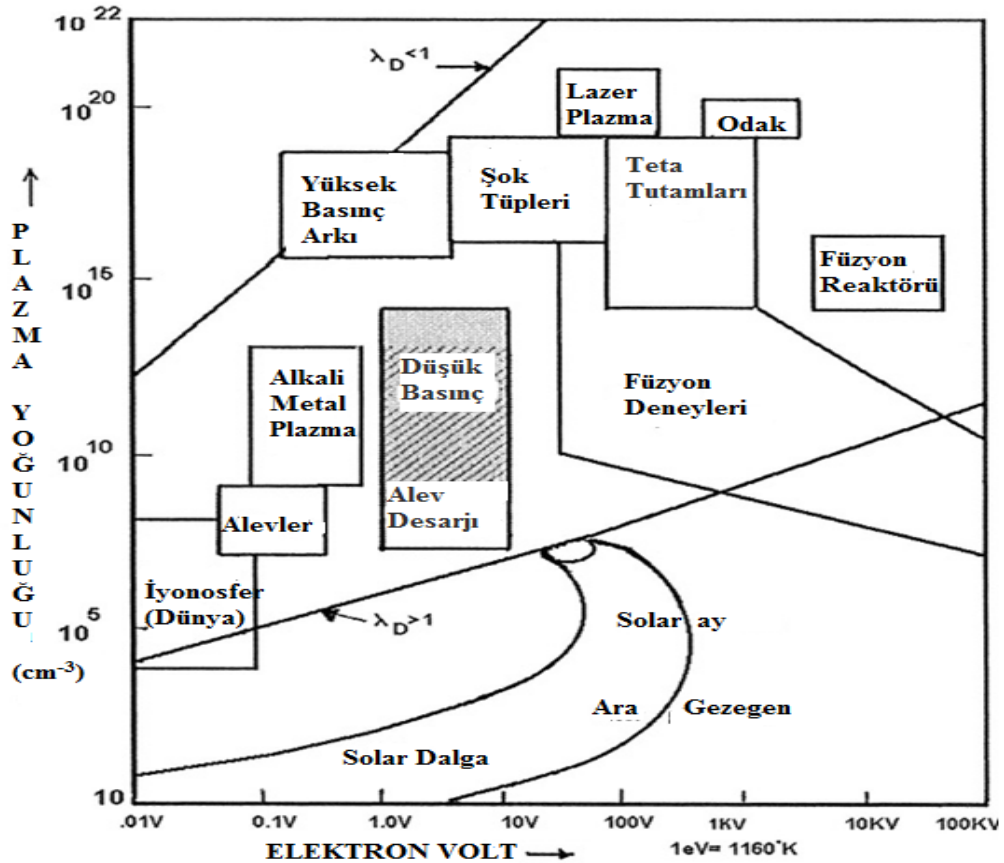
$$N_i / N_n = 24 \times 10^{15} \times T^{3/2} e^{-U_i/kT} / N_i \quad (1.1)$$

Burada N_i =iyonlaşmış ortamların yoğunluğu, N_n =Nötr atomların yoğunluğu, T =Kelvin olarak gaz sıcaklığı, k =Boltzman sabiti, U_i =Gazın iyonizasyon enerjisidir. Plazmanın oluşması için çok az iyonlaşmanın olması gerekir. Atmosferik basınçta, plazmanın oluşması için iyonlaşma enerjisinin 50 – 24 eV aralığında ve plazmanın oluşma sıcaklığı 4000 – 25000 °C arasında değişmektedir.

Plazmanın oluşabilmesi için gerekli şartlar aşağıda verilmektedir:

- Plazmagonik gazların iyonlaşabilmesi için güçlü elektrik akımının gerekli sıcaklığa erişirmesi gerekir.
- Plazmagenik gazlar elektrik enerjisiyle ısınarak en azından parça olarak iyonlaşmalıdır. Bu durum $N_2 \leftrightarrow 2N^+ + e - 360kcal / mol$ ile sağlanır.

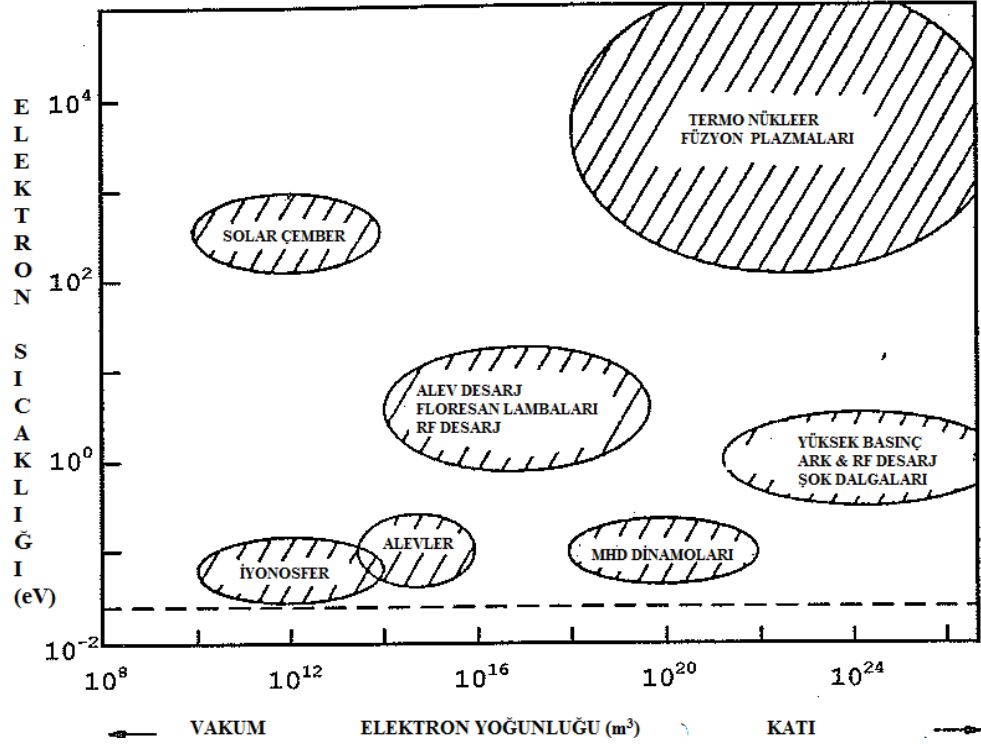
Yüklü parçacık üretimi için çok fazla miktarda (360kcal/mol) enerjiye ihtiyaç duyulur ve bu yüzden iyonlaşma için gerekli sıcaklık binlerce santigrad dereceye ulaşır. Plazma parçacıklarının bir yönde sabit hızda hareketini sağlamak için parçacıklar arasındaki etkileşim enerjisi, parçacığın ortalama kinetik enerjisinden oldukça düşük olmalıdır. Başka bir deyişle Potansiyel Enerji (PE) <<< Kinetik Enerji (KE) şeklinde olmalıdır. Şekil 1.7’de plazma oluşma bölgeleri plazma yoğunluğu (n) ile elektron volt (eV) grafiğinde verilmiştir.



Şekil 1.7. Plazma yoğunluğu- elektron voltuna bağlı olarak plazmanın oluşumu (Chattopadhyay, 2007)

Plazmalar elektron yoğunluğuna bağlı olarak sınıflandırılabilir. Elektron yoğunluğu 10^4 (elektron m^{-3}) civarında olan düşük basınçlı soğuk plazmalar (termal olmayan)

olarak adlandırılır. Yüksek basınçlı termal plazmaların elektron yoğunluğu 10^{24} (elektron m^{-3})dir. Plazmaların elektron yoğunluğu ve elektron sıcaklığına göre sınıflandırılması Şekil 1.8’de verilmektedir.

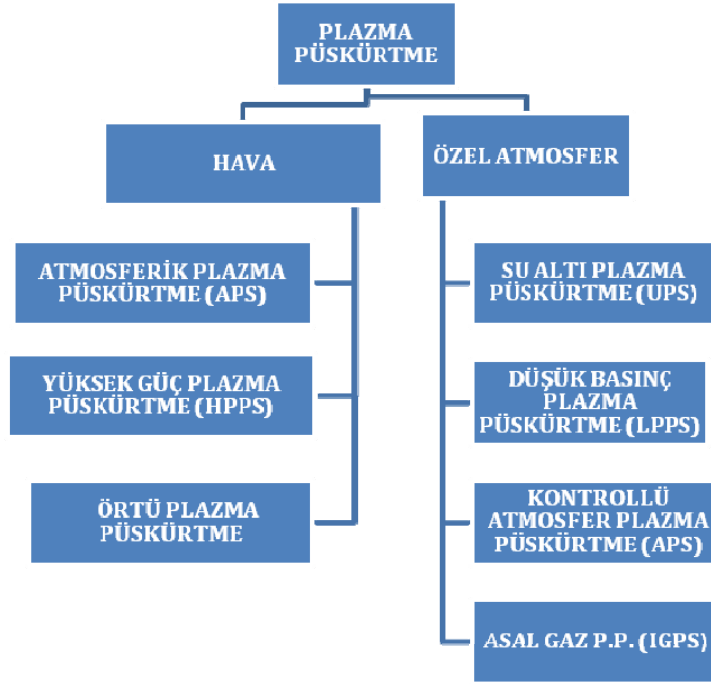


Şekil 1.8. Plazmanın elektronun fonksiyonu olarak sınıflandırılması (Heimann, 2006)

1.2.2. Plazma ile yüzey modifikasyon işlemleri

Düşük sıcaklıkta plazma; termal püskürtme ve diğer yüzey modifikasyon işlemlerinde kullanılmaktadır. Düşük sıcaklık plazmada elektronların veya iyonların ortalama enerjisi gazın potansiyel iyonlaşmasından çok düşük olmalıdır. Sıcak plazma olarak bilinen diğer plazmada ise elektronların ve iyonların ortalama enerjisi gazın potansiyel iyonlaşmasından çok daha büyük olmalıdır. Plazma kullanılarak yapılan yüzey işlemleri kaynak, termal püskürtme, buhar faz kaplama, karbürleme, nitrürleme ve polimerizasyon olarak sıralanabilir. Plazmanın oluşması için gerekli olan Radyo Frekans (RF) ve Doğru Akım (DC) ark indüksiyon ve gaz deşarj ile sağlanır. Termal püskürtmede kullanılan plazma alevinin ortalama yoğunluğu $10^8 cm^{-3}$ olup enerji aralığı 0.07 – 0.7 eV arasında değişmektedir. Bir plazma alevinde çekirdek sıcaklığı soğuk çevre şartlarıyla karşılaştırıldığında çok yüksektir. Plazma aleviyle karşılaştırıldığında alev deşarj plazmada 1 -10 eV mertebesinde yüksek

enerji bantları oluşur. Ayrıca $10^7 - 10^{14} \text{ cm}^3$ gibi geniş aralıkta plazma yoğunluğu elde edilmektedir. Alev deşarj plazma temiz yüzeyler üzerine aşınmaya dayanıklı malzeme elde etmek için buhar fazı kaplamasında kullanılır. Plazma ısısı kaplanan malzemenin fiziksel buhar yöntemi ile buharlaşmasında kullanılır. Olağandışı alev deşarjı plazma nitrürleme ve karbürleme için kullanılır. Plazma ısısı yüzey üzerine sert Bor'un kaplanması için bor difüzyonunun sağlanmasında kullanılır. Reaktif plazma kimyasal buhar kaplama işlemi için kullanılır. $10^{16} - 10^{18} \text{ cm}^3$ değerleri arasında plazma yoğunluğuna sahip ve 0,1 – 5 eV enerjiye sahip ark plazmalar aşınma dirençli malzemelerin kaplanması için kaynağın oluşması sağlanır. Corona deşarj plazma ise plazma polimerizasyonu için kullanılır. Alev püskürtme ile plazma püskürtme arasındaki fark maksimum sıcaklığa ulaşma kabiliyetidir. Alevle püskürtmede sıcaklık asetilen, propan ve bütan gaz yanma odalarının iç entalpisiyle sınırlanmıştır. Bilinen oksit asetilen torçlar 3000 K civarında sıcaklığa ulaşırlar, özel cihazlardan olan D-Gun ve Jet Kate sistemlerinde sıcaklık değeri 3500 K civarındadır. Bilinen AVOF tabancasında ise bu sıcaklık değeri 3200 K altındadır. Elektrik enerji kaynağının kullanıldığı plazmada sıcaklık sınırlaması yoktur, sıcaklık kontrolü enerji giriş oranına bağlıdır. Elektrik ark tel püskürtmede sıcaklık değerleri 6000 K'e yaklaşmaktadır. Atmosferik plazma püskürtme sıcaklıkları ise kullanılan plazma gazı ve güç girişine bağlı olarak 15000 K'e kadar çıkmaktadır. Modern teknolojide birçok plazma kaplama yöntemi kullanılmaktadır. Şekil 1.9.'da plazma püskürtme yönteminin sınıflandırılması verilmektedir. Bu sınıflandırma çevre şartlarına göre yapılmıştır.

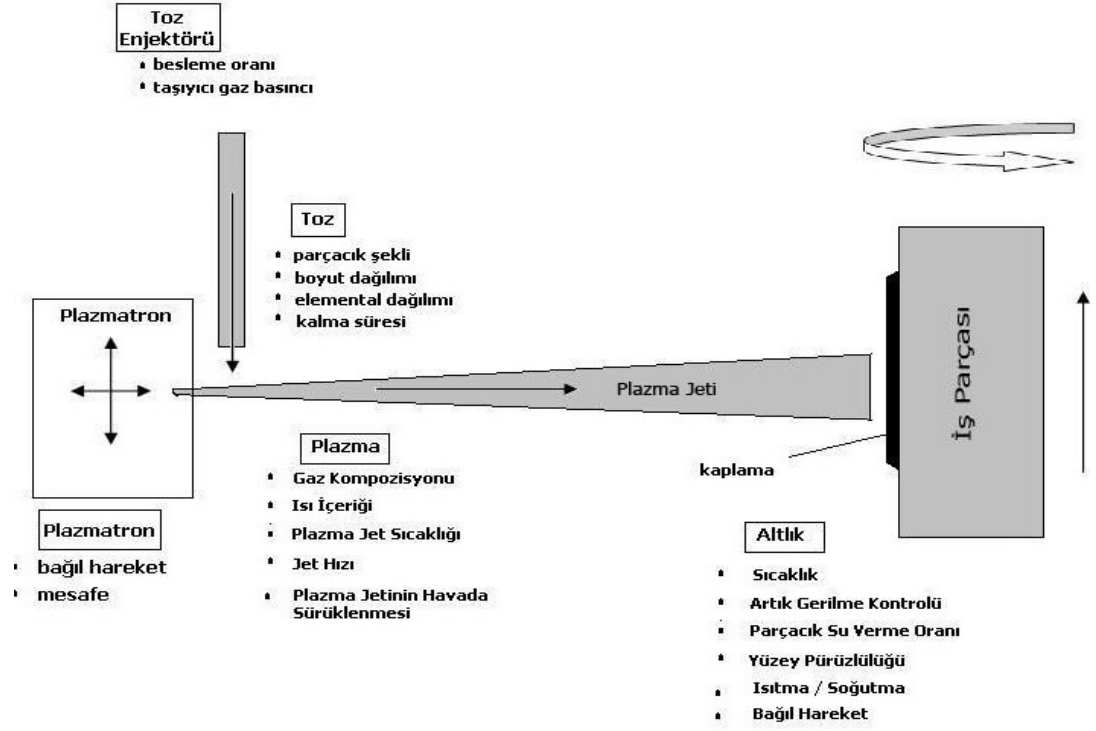


Şekil 1.9.Çevre şartlarına göre plazma püskürtme yöntemlerinin sınıflandırılması (Heimann, 2006)

Günümüzde çok farklı kaplama işlemleri yapılmaktadır. Bu kaplamalar plazma veya alev püskürtme parametrelerini değiştirerek farklı şekillerde yapılabilir. Parametrelerin değişmesiyle kaplama özelliklerinin değiştiği bazı araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir (Heimann, 2006).

Ekonomik ve temel nedenlerden dolayı işlem parametrelerinin hepsi kontrol edilememektedir. Gerçekte 8 – 12 parametre kontrol edilebilmektedir. Giriş gücü, ark gaz basıncı (argon/azot), yardımcı gaz basıncı (hidrojen/helyum), toz gaz basıncı (argon), toz besleme oranı (kütle akış kontrollü), tanecik boyutu ve şekli, enjeksiyon açısı (eksenel/ortagonal), yüzey pürüzlülüğü, alt malzemenin ısıtılması veya soğutulması, püskürtme mesafesi, püskürtme ayrılması ve püskürtme atmosferi (hava, düşük basınç, su, asal gaz) parametreleri kontrol edilebilen parametrelerdir.

Bu parametrelerin yanında ayrıca tozların plazma jetinde kalma süresi, plazma jetindeki gaz kompozisyonu, ısı içeriği gibi parametreler ikincil parametreler olarak göz önünde bulundurulur. Ekonomik nedenlerden dolayı en önemli ikincil parametre kaplama verimliliğidir. Şekil 1.10’da plazma kaplama işlemi için önemli parametreler verilmektedir.



Şekil 1.10. Plazma kaplamada kaplama özelliklerini etkileyen ana parametreler (Heimann, 2006)

Plazma püskürtme ile kaplama yönteminin diğer yöntemlere göre kendine özgü özellikleri vardır. Bunlar;

1. Metal, seramik, polimer ve bunların kombinasyonlarından oluşan birçok malzeme bu yöntem için rahatlıkla kullanılabilir.
2. Karışık seramikler ve alaşımlar içeren parçalar kaplama kompozisyonunda önemli değişiklik yapmadan kaplanabilir.
3. Kaplama kalınlığı boyunca kompozisyonunda değişiklik olmadan, homojen kaplamalar elde edilir.
4. Elektron ışın kaplamaların tersine içinde kolonsal şekilli hatalar bulunmayan ince ve eş eksenli taneli mikroyapı kaplanabilir.
5. Yüksek kaplama oranları (mm/s) elde edilebilmektedir.
6. İşlem asal gaz, su altı, atmosfer gibi birçok çevrede yapılabilir.
7. İnce şekilli yapılar neredeyse orijinal şekillerinde işlem esnasında herhangi bir değişme olmaksızın saf ve karışık seramiklerle kaplanabilir.

1.2.3. Plazma püskürtme işlemi

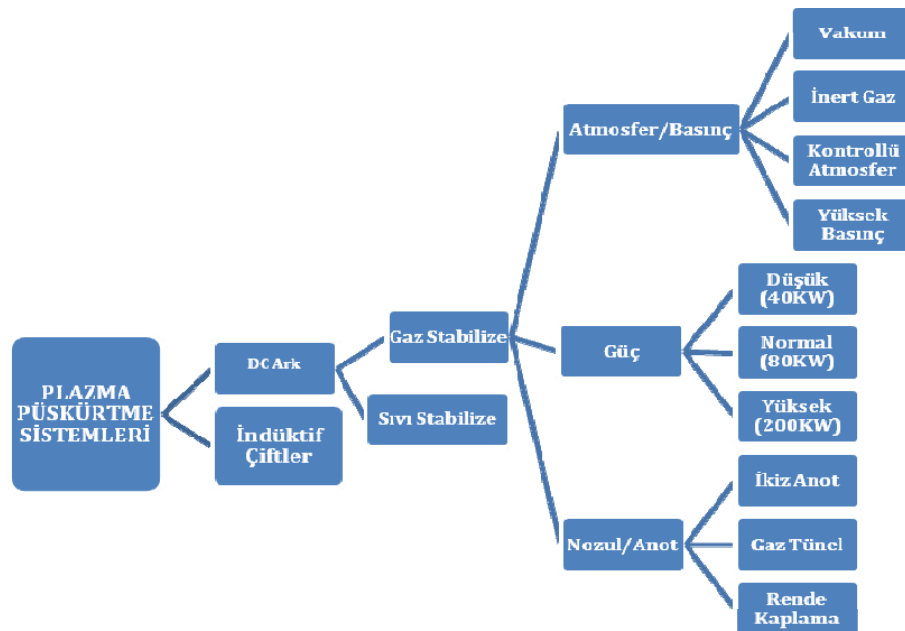
Termal püskürtme işlemi için plazma teknikleri elektrik alan(ark veya indüksiyon), stabilizatör akışkan(gaz veya sıvı) , güç(yüksek veya düşük) ve anot tasarımı (ikiz anot, gaz tünel, rende koruma) açısından sınıflandırılır. Plazma püskürtme sisteminin sınıflandırılması Şekil 1.11’de verilmektedir.

Plazma alevi toz parçacıkların ısınmanı ve böylelikle ergimiş veya yarı ergimiş hale gelmesini sağlar. Plazma jetinin yüksek hızı erimiş veya yarı ergimiş parçacıkların çarpma hızını artırarak ses hızını geçer. Plazma alevinin sahip olduğu ısı enerjisi ve hızı yoğun kaplama yapılmasını sağlar. İletken ve iletken olmayan seramik veya plastikler plazma püskürtme sistemiyle püskürtülebilir.

Plazma püskürtme sistemi;

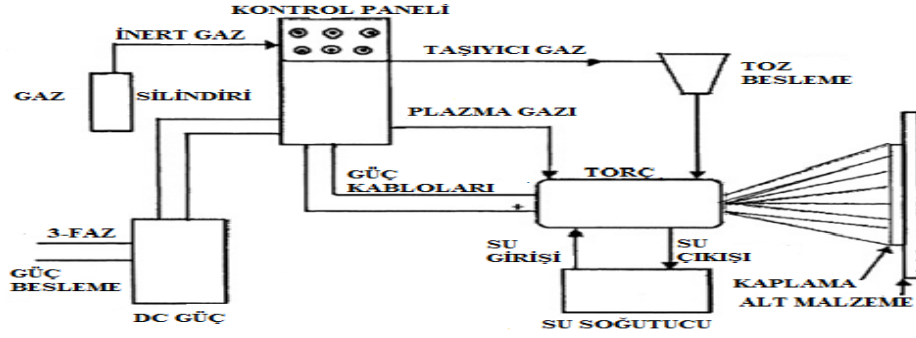
1. Püskürtme tabancası,
2. Torç soğutma su sirkülasyon ünitesi,
3. Güç, kontrol ve taşıyıcı gaz ünitesinden oluşur.

Plazma püskürtme sistemi güce bağlı olarak taşınabilen 40 kW, standart 80 kW ve yüksek güçte 200 kW’lık sistemler halinde kullanılır.



Şekil 1.11. Plazma püskürtme sisteminin sınıflandırılması (Chattopadhyay,2007)

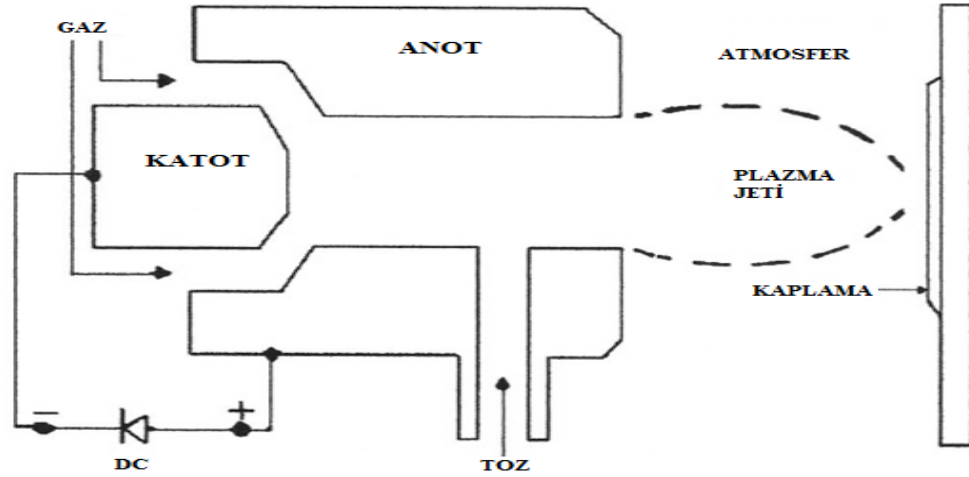
DC ark plazma püskürtme sisteminin şematik diyagramı Şekil 1.12’de verilmektedir.



Şekil 1.12. Plazma püskürtme sisteminin şematik diyagramı (Chattopadhyay, 2007)

Plazma püskürtme sistemini oluşturan elemanlar ve görevleri aşağıda verilmektedir.

Püskürtme Tabancası veya Torç: Plazma püskürtme sisteminin kalbi torçtur. Torç suyla soğutulan bakır anot ve tungsten katottan meydana gelir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Plazma püskürtme tabancası (Chattopadhyay, 2007)

Torçta ark anot ve katot arasında meydana gelir. İkiz anot, gaz tünel nozul ve rende kaplama şeklinde değişik torç şekilleri mevcuttur. İkiz anot sistemde iki anot torç simetrik şekilde katotların karşısına yerleştirilir. Katot ve anotlar inert gazın akışından aradaki mesafe sayesinde korunmaktadır. Bu sistemde güç seviyesini 10-100 kW arasında ayarlanmak mümkündür. Hipersonik hızda yüksek sıcaklıktaki plazma yüksek aşınma direnci ve yüksek adezyonun elde edilmesi istenen WC-Co kaplamalarda iyi sonuçlar vermektedir.

Rende kaplama sisteminin normal sistemlerden en önemli farkı parçacıkların plazmayla karşılaştığı yerde hızlandırıcının olmasıdır. Parçacıklar bu sistemde 1220-1520 m/s hızlara ulaşmaktadır. Yüksek hızlı parçacıklar plazma alevine karışarak bağ

gerilmesini artırırken poroziteyi azaltırlar. Bu sistem özellikle Amerika’da uçaklarda gaz türbin fan kanatlarında yüksek kalitede kaplama eldesi için tercih edilmektedir.

Gaz:Plazmanın oluşması için argon, helyum, azot ve hidrojen gazları kullanılmaktadır. Diatomik (iki atomlu) gazlar (N,H) monoatomik (tek atomlu) gazlara nazaran (Ar, He) yüksek entalpi ve termal iletkenliğe sahiptirler. Bu nedenle yüksek sıcaklıkta düşük ark üretirler. Buna rağmen diatomik gazlar yüksek sıcaklığa ulaşarak mono atomik gazlara nazaran daha iyi kaplama sağlarlar. Azot plazma metal, titanyum-alüminyum ve nitrürlerin farklı formları ile yüksek reaktivite oluşturur. Helyum pahalı olmasına rağmen hidrojen gevrekliğinin engellenmesi istenen yerlerde kullanılır. Argon bu gazların en iyisi olup termal püskürtme için %10 diatomik hidrojen ilavesiyle daha yüksek sıcaklık ve sıcaklık konsantresiyle etkisi daha da iyileşmektedir.

Güç ve Soğutma Sistemi: Plazma püskürtme sisteminde normalde doğru akım (DC) güç kaynağı kullanılır. Güç sistemi gerilim değerleri gazlara göre değişmekte; Argon için 80V, Azot için 160 V ve Hidrojen için 300 V arasındadır. Yaygın kullanılan güç değerleri 40-80 kW’tır. 40 kW’lık sistemlerde torçu soğutmak için buzlu su sistemine gerek duyulmaz ancak 80 kW’lık sistemlerde gereksinim duyulur.

Plazma Püskürtme Atmosferi: Plazma püskürtme işlemi için değişik atmosferler kullanılır. Bunlar atmosferik plazma püskürtme(APS), kapalı plazma alevi (SPS), plazma alevini saran inert gaz (IPS), vakum çemberinde püskürtme sistemi (LPPS) ve yüksek inert gaz basıncı (HPPS)’dır.

Düşük Basıncılı Plazma veya Basıncı Azaltılmış Plazma: Plazma çember basıncının azaltılması parçacık hızını artırır, parçacıklar ile plazma arasındaki ısı geçişini düşürür. Titanyum, alüminyum ve alaşımları gibi reaktif malzemelerin oksidasyonunun neden olduğu kayıp düşük basınçlı plazma ile azaltılabilir. Düşük basınçlı plazma sisteminin ileri hali vakum plazma sistemidir. Vakum altındaki plazma PVD ve CVD kaplamalarla karşılaştırılabilir. Ayrıca bu yöntemle orijinal toz malzeme saflığında kaplama eldesi mümkündür.

Vakum plazmanın avantajlarından bazıları şunlardır;

- Düşük basınç altında yüksek hız ve uzun alev elde edilmesi mümkündür.

- Atmosferik plazmaya göre alev sıcaklığı daha yüksektir.
- Yüksek oksitlenme özelliğine sahip malzemeler için vakum altındaki argon plazmanın yüksek hız özelliği oksitlenmeyi hemen hemen ortadan kaldırır.
- Oksit içermeyen, yoğun ve yüksek yapışma dayanımlı kaplamadır.
- Yüksek kaplama özelliği yüksek kaplama verimliliği ile güçlendirilir.
- Vakum plazma ile püskürtme programlanmış robotlarla yapılabilir.

Kontrollü Atmosferde Yüksek Basıncılı Plazma Püskürtme: Bu sistemin püskürtülen parçacıklar ısıtılırsa düşük porozite ve püskürtme verimliliği elde edilmektedir.

1.2.3.1. Termal püskürtme için astar kaplama ve son kaplama için kullanılan malzemeler ve alt malzemenin yüzey hazırlığı

1.2.3.2.Yüzey hazırlığı

Termal püskürtme işleminde alt malzemenin özel olarak hazırlanmasına ve kaplamadan önce astarın uygulanmasına gerek duyulmaktadır. Termal püskürtme kaplamalarda yüzeyin temizlenmesi kaplama kalitesi açısından önemlidir. Parça yüzeyi yağdan, gresden ve pislikten arındırılmalıdır. Yüzeyler genelde triboetilen gibi çözücüler ile temizlenir. Buna rağmen zor durumlarda yüzeyin temizlenmesi sıcak buhar, buhar püskürtme, ultrasonik temizleme veya bu işlemlerin beraber uygulanmasıyla sağlanabilir. Ayrıca termal püskürtme kaplamalar için yüzey pürüzlülüğü parametresi de kaplama kalitesini etkiler. Bu nedenle alt malzemeler için temiz yüzey pürüzlendirilerek daha etkin yüzey alanı ve kaplamanın adesif bağ özelliği artırılır. Yüzey pürüzlülüğü abrazif kum püskürtme, işleme veya pürüzlendiricilerle sağlanır. Yüzey pürüzlendirilmesinde en fazla bilinen yöntem kum püskürtmedir. Kum püskürtme yöntemi aşındırıcı kumların alt malzeme yüzeyine püskürtülmesi esasına dayanmaktadır. Metal yüzeyler için kum boyutu 16-60 meşh iken plastikler için bu değer ise 60-100 meşh'dir. Seramik alt malzemeler için sert seramik kumlar kullanılır. İnce alt malzemeler için bu değer 25-125 meşh olup iyileştirilmiş kumlardan elde edilir. Kalın alt malzemeler için ise boyutları 18-25 meşh olan iri kum kullanılır. Yüzeyi kumlanmış yüzeylerin yorulma direnci daha

iyidir. En iyi adesif bağ değeri püskürtülen parçacık çapının $\frac{3}{4}$ katı boyutundaki elde edilmiş pürüzlendiricilerin kullanımıyla sağlanır (Chattopadhyay, 2007).

1.2.3.3. Astar kaplama

Alt malzeme üzerine son kaplamanın bağlanma kabiliyetini artırmak için ince bir tabaka halinde astar kaplanır. Astar kaplamanın fonksiyonu alt malzeme ile üzeri arasında adesif gibi görev yapmasıdır. Bilinen astar malzemeleri molibden, nikel-alüminyum ve nikel-krom alaşımlarıdır. Çizelge 1.2’de astar malzeme ve özellikleri verilmiştir. Bazı astar malzemeler yüksek sıcaklık oksidasyonuna karşı direnç geliştirmek amacıyla kullanılır. Ni ve %5Al astar malzemesi 1010°C sıcaklığa kadar dayanabilmektedir. Jet motorlarında kullanılan parçalar için MCrAlY(M=Co veya N) astar malzemesi tercih edilir. Bu malzeme 1300 °C sıcaklığa kadar dayanarak oksidasyonu engeller. Astar malzeme kalınlığı normal şartlarda 0.08-0.18 mm (80-180 µm) arasındadır.

Çizelge 1.2. Astar kaplama malzemeleri (Chattopadhyay, 2007)

Malzeme	Kullanımda izin verilen maksimum sıcaklık (°C)	Astar arayüzeyi
Molibden	315	Metal/metal
80 Ni- 20 Al	620	Metal/ metal /seramik
89 Ni- 20 Al	-	-
94 (Ni + Cr)+6Al	980	-
95 Ni + 5Al	1010	-
80 Ni + 20 Cr	1260	-
MCrAlY Ör: NiCrAlY/CoCrAlY	1260-1316	Metal yüzeyine seramik kaplama için
Zn/ Al	-	Plastik alt malzeme için
Al-Si	-	Seramik kaplamalar için Al alt malzeme

1.2.3.4. Son kaplama malzemeleri

Metalik,seramik, polimerik ve kompozit malzemeler aynı veya değişik malzemelerden oluşan alt malzeme üzerine kaplanır. Metalik malzemeler; çinko ve alüminyumla yapılan termal püskürtme kaplamalar köprülerin ve yapıların atmosferik korozyona karşı korunması için kullanılır. Nikel, demir, kobalt ve bakır

esaslı alaşımlar termal püskürtme için kullanılan metalik malzemeleri oluştururlar (Çizelge 1.3).

Çizelge 1.3. Termal püskürtme için metalik malzemeler (Chattopadhyay, 2007)

Malzeme Tipi	Püskürtülen kaplama malzemesi şekli			Tipik Uygulamaları
	Toz	Tel çubuk	Boru şeklinde tel	
AISI 410	+	+	+	Yankee kurutucusu
AISI 316	+	+	+	Korozyona dirençli kaplamalar
Zn/Al/Zn+Al	+	+	+	Köprü ve yapılar
Çelik	+	x	+	Kazan borusu erozyonu
Fe-Cr-Mo- Al	+	+	+	Kazan/erozyon
Fe-Cr-Ni- Al	+	+	+	Kızdırıcı boruları
Nikel Alaşımları				
a. Kendi kendine çözülen Ni alaşımları	+	x	+	Şaft, yatak
b. İnconel	+	+	+	Astar kaplama
c. Ni/Cr, 50/50	+	+	+	Kazan boruları
Co-Cr-M-C, M=W/Mo/Cb	+	x	+	Türbin kanatları
Bakır Alaşımları Al-Bronz (Cu+%10 Al)	+	+	+	Şaft/ yatak

Seramik malzemeler oksit, karbür, nitrür içeren seramik esaslı kompozitlerdir. Termal püskürtme ile aşınma direncinin artırılması için alümina, titanyum, krom-oksit ve zirkonyum gibi oksitler kullanılır. Seramik oksit malzemeler sinterlenmiş çubuklarda veya tozlarda termal püskürtme uygulamaları için kullanılmaktadır. Alüminanın termal püskürtmesi ise motor supablarında yüksek sıcaklığın neden olduğu korozyon, sürtünme ve oksidasyona bağlı olarak oluşan aşınmayı azaltmak için kullanılır. Titanyumdioksit sert ve yoğun kaplamalarda kullanılır. Yoğun kaplamalar asit ve alkalilere karşı korozif etkilere olan direnci artırır. $TiO_2 + Al_2O_3$ kaplamalar erozyon, aşınma, kavitasyon ve korozyonun neden olduğu aşınmaya karşı direnç gösterir. Düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahip olan zirkonyum ise termal bariyer kaplamalara ihtiyaç duyulan yerlerde tercih edilirler.

Termal püskürtme kompozitleri değişik seramiklerin, seramik+metaller ile seramik ve plastiklerin aşınma direnci istenen uygulamalarda kullanılırlar. Kompozitlerin kullanım alanları Çizelge 1.4’de verilmiştir.

Çizelge 1.4. Kompozitler için termal püskürtme (Chattopadhyay, 2007)

Malzemeler	İşlem	Uygulamalar
Metal ve Seramik Kompozitler		
MCrAlY(M=Ni/CO/Fe)	HVOF/ Plazma	Astar kaplama/Yüksek sıcaklık oksidasyonu
SiO ₂ +ZrO ₂ +CoCrAlY+Al ₂ O ₃	-	Sürekli tavlama yapılan silindirlerde
CoCrAl-Y ₂ O ₃ +CrB ₂	-	-
%75Cr ₃ C ₂ +NiCr	-	Piston çemberi/ Kazan tüpü
Ni-Cr-B-Si-C+Cr ₃ C ₂	-	Sürekli döküm kalıpları
5.5BN+Ni ₄ Cr ₈ Fe+3.5 Al	-	Paslanmaz çelik tavlama fırınlarındaki merdanelerin kendi kendini temizlemesi
BN/ grafit + Ni	-	Uzay motorları- aşınan kaplamalar
WC-Co + stellite	HVOF/P lazma	Fan kanatları
Plastik ve Kompozitler		
Al- Si + MCrAlY + Polimer + Yağlayıcı	Plazma	Gaz türbini ve turbo kompresördeki aşınan kaplamalar
Al- Bronz + polyester	Oksigaz	Korozyona dirençli kaplamalar
SS + LDP	-	Plastik üzerine birincil kaplama

Polimerler, epoksi, polyester, epoksi-polyester, hibrit, akrilik ve flora karbonları içeren metal yüzeyler üzerine kaplanan yüzey alanı geniş kaplamalarda kullanılırlar. Termoplastik gruplardan olan toz kaplamalar polietilen, polipropilen, naylon ve poliviniklorid olarak kullanılır. Metal alt malzeme üzerine kaplanan bazı polimerlerin özellikleri Çizelge 1.5’te verilmektedir.

Çizelge 1.5. Metal üzerine kaplanan bazı polimerlerin özellikleri (Chattopadhyay, 2007)

Polimer	Astar Malzemeli/ Astar Malzemesiz	İşlem Sıcaklığı (°C)		Sertlik (Rockwell)
		Yumuşatılmış	Sertleştirilmiş	
Isı ile sertleşen epoksi polyester				
	Hayır	180	200	-
	Hayır	140	200	-
Polimer	Astar Malzemeli/ Astar Malzemesiz	İşlem Sıcaklığı (°C)		Sertlik (Rockwell)
		Yumuşatılmış	Sertleştirilmiş	
Termoplastik				
Naylon 6/66	Hayır	-	>270	109-110R
Polipropilen	Hayır	167	>176	105-106R
Poliviniklorit	Evet	-	>212	52M
Polietilen	Hayır			
LD (Düşük Yoğunluk)		-	>115	23-25R
		-	>137	58-62R
HD (Yüksek Yoğunluk)				

Epoksi malzemeler için bağlayıcıya gerek duyulmaz. İnce, pürüzsüz, parlak polyester kaplamaların mükemmel korozyon ve elektrik dirençleri vardır. Naylon 6/66 kaplamaların sürtünme katsayıları düşük ve çok iyi yağlama özellikleri vardır. Bu tarz kaplamalar otomobil milinde ve kaymalı yataklarda kullanılır. Polipropilen kaplama malzemeleri metal yüzeylere ancak 360°C'ye kadar ısıtıldığında bağlanırlar. Metal yüzey üzerine polivinilklorit (PVC) kaplandığı zamanlarda bir ön kaplamaya gerek duyulur. Bu kaplama darbe ve kimyasallara karşı dirençli olup bulaşık makinesi sepetlerinde ve borularda kullanılır.

1.3. Yüzey Hasarları ve Sınıflandırılması

Aşınma problemlerinin çözümünün yapılabilmesi için en önemli yöntem parçalarda meydana gelen aşınma tipinin belirlenmesidir. Malzeme; katı bir yüzey üzerinden ergime, kimyasal çözülme veya yüzeydeki atomların fiziksel ayrılması olmak üzere farklı şekilde meydana gelmektedir. Fiziksel ayrılma; düşük genliklerde tekrarlanan gerilmeler veya yüksek gerilme oranlarında meydana gelen bir olaydır. Yüzey

hasarları yüzey tabakaları üzerinde mikro yapısal değişimler veya topografik değişimler olarak tanımlanabilir. Yüzeylerin tanımlanabilmesi hasara neden olan işlemler ve mekanizmalara, bu mekanizmaların parça geometrisiyle olan ilişkisine, malzeme özelliklerine ve tribo sisteme bağlıdır. Yüzey hasarları tribo yüzeyde aktif olan birçok mikro mekanizmaların azar azar ardışık bir şekilde meydana gelmesiyle oluşur. Prensip olarak herhangi bir tribo yüzeyde tek bir hasar oluşmakta ancak, genel olarak iki veya daha fazla tip kombinasyon meydana gelir. Yüzey hasarları için en ideal sınıflandırılma Şekil 1.14 'de verilmektedir.



Şekil 1.14. Yüzey hasarlarının sınıflandırılması (Şematik) (ASM, Volume 18)

1.3.1. Malzeme kaybı meydana gelmeden oluşan yüzey hasarları

Bu hasarlardan ilki mikro yapısal değişimlerdir. Yüksek yük değerlerinde rulmanlarda görülen yüzey hasarıdır. Aşırı yüklenmiş tribolojik parçalarda ise plastik deformasyonun neden olduğu yüzey hasarları görülür. Aşırı gerilme ve sıcaklık değerleri malzemeleri bölgesel olarak yumuşatır ve plastik deformasyona uğramaya meyilli hale getirir. Yüzey sıcaklığı ostenitleşme sıcaklığının üzerine çıkar ve yüzey sertliği 1200 HV değerine ulaşır. Malzemenin bölgesel plastik akmasıyla yüzeyde çukurluklar ile çevrelenmiş çizgisel oyuklar oluşur. Bu tür deformasyonlar yüksek yüzey kalitesi gerektiren yerlerde zararlı olabilir. Aşırı köşeli şekle sahip aşındırıcı taneler kullanılarak bir yüzeyde malzeme kaybı olmaksızın oluşan plastik deformasyona benzer deformasyon oluşumu gözlenebilir. (Şekil 1.14 a-b) (ASM, Volume 18).

Yüzey kırıklarıyla oluşan yüzey hasarlarına farklı sürtünme sıcaklıkları ve sürtünme kuvvetlerinin meydana getirdiği tekrarlayan gerilmeler neden olur. Çekme gerilmeleri ve oldukça gevrek malzeme kullanımı ise çatlak oluşumuna neden olur. Tribo temasta tribo temasların sonunda sürtünme kuvvetinin direk olarak oluşturduğu çekme gerilmeleri ve yüzey tabakasında akma noktasını aşan sıcaklık genişlemesinin neden olduğu çekme gerilmesi olmak üzere iki farklı çekme gerilmesi meydana gelir (ASM, Volume 18).

1.3.2. Malzeme kaybı meydana gelerek oluşan yüzey hasarları

Aşınma kayma hasarının neden olduğu yüzey hasarlarının ilkidir. Yüzeyde meydana gelen plastik deformasyon abrazif aşınmanın izlerini taşır. Aşınma, çizik, çentik gibi etkiler abrazif aşınma izleri olup uygulama ve deformasyon çeşidine göre değişirler. Bu tip yüzey hasarlarının meydana geldiği sistemde yüksek sürtünme ve aşınma oranları gözlemlenmektedir. Sistemlerin yağlamayla geliştirilmemesi veya yeniden dizayn edilmemesi durumunda bu tip yüzey hasarları parçaların kayma ömürlerinde sınırlamalar oluşmaktadır. Bu tip hasarlara tipik örnek ekstrüzyondur. Ekstrüzyon kaymalı veya yuvarlanmalı temasları olan tribolojik sistemlerde meydana gelen bir yüzey hasarıdır. Bunların yanında çentik oluşumu, gevrek kırılma, yorulma kırılması gibi yüzey hasarlarında da malzeme kaybı meydana gelir (Şekil 1.14 c-d) (ASM, Volume 18).

1.3.3. Malzemenin artmasıyla oluşan yüzey hasarları

Bu yüzey hasarında malzeme transferi bir tribo yüzeyden diğerine doğru meydana gelir veya birçok tribolojik koşulda sıklıkla gevrek aşınma parçacıklarının ayrılması şeklinde meydana gelir. Genelde malzeme ilavesi şu şekilde olur;

- a) Yüzeyi kaplayarak
- b) Yüzeyin içine gömülmüş olarak
- c) Yüzey üzerine sırayla az veya çok kaplama oluşturarak

Malzeme transferi tribo yüzey için bazı durumlarda zararlı olurken bazı durumlarda da yararlı olur. Malzeme transferinin meydana gelmesi bazı durumlarda yüzeyi aşınmadan koruyarak karşı yüzeyin aşınma oranını artırır. Böylelikle malzeme

transferinin düzgün yapılandırılmasıyla karşı yüzeyin zarar görmesi engellenir (Şekil 1.14 e-f) (ASM, Volume 18).

1.4. Sürtünme ve Aşınma

Sürtünme bir yüzeyin diğeri üzerinde kaymaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilmektedir. Sürtünme birçok endüstriyel işlemlerde ve günlük işlerde önemli rol oynamaktadır. Sürtünme bir yapının hareket etmesine, yönünün değişmesine ve daha sonrada durmasına yardım eder. Sürtünme olmadan cıvata bağlantıları sağlanamaz, sürtünme kaynağı yapılamaz.

Katı yüzeyler için sürtünme 1875 yılında Cloumb kanunları ile açıklanmaya çalışılmıştır. Bu kanunlara göre aşağıdaki ifadeler elde edilmiştir;

- Statik sürtünme genellikle kinetik sürtünmeden (veya dinamik) daha büyüktür.
- Sürtünme kayma hızından bağımsızdır.
- Sürtünme kuvveti uygulanan yük ile orantılıdır.
- Sürtünme katsayısı temas alanından bağımsızdır.

Sürtünme; sürtünme katsayısıyla ifade edilir ve sembolü μ 'dir. Sürtünme katsayısı sürtünme kuvveti (F_s) ile yüzeye dik kuvvetin (F_N) oranlamasıyla bulunur (Kurbanoglu, 2006).Sürtünme katsayısı eşitlik (1.2)'de verilmektedir.

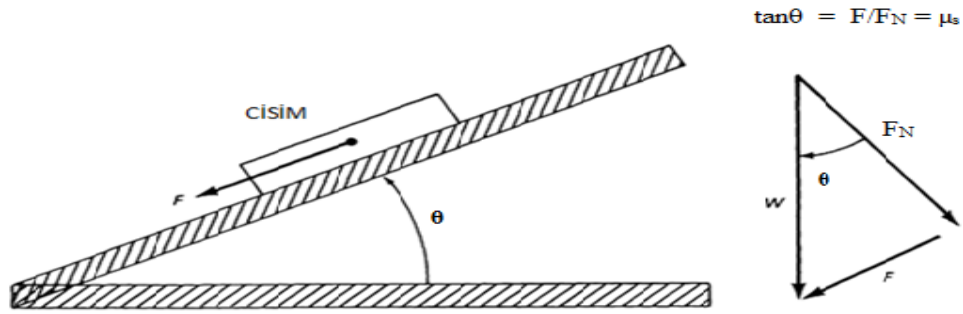
$$F_s = \mu \cdot F_N \quad (1.2)$$

Burada μ sürtünme katsayısını, F_N yüzeye etki eden normal dik kuvveti ve F_s sürtünme kuvvetini temsil etmektedir. Sürtünme günlük yaşantı içinde geniş yer tutmaktadır. Örneğin konforlu bir yürüyüş sağlayabilmek için μ değerinin 0,2 – 0,3 arasında olması gerekmektedir. Buzda yürümek çok zordur, çünkü ayakkabı – buz çifti için μ değeri <0,05'dir ve kaygan bir yüzeyin μ değeri 0,15'dir. Sürtünme katsayısı çok iyi yağlanmış yataklarda 0.03, kuru kayma şartları için 0.5 – 0.7 arasındadır.

Şekil 1.15’de W ağırlığındaki cisme eğik düzlemde (sürtünme açısı θ ’dir.) hareket verilmektedir. Sistem için statik sürtünme katsayısı değeri eşitlik (1.3)’de verilmektedir.

$$\mu_s = \tan\theta = F_s / F_N \quad (1.3)$$

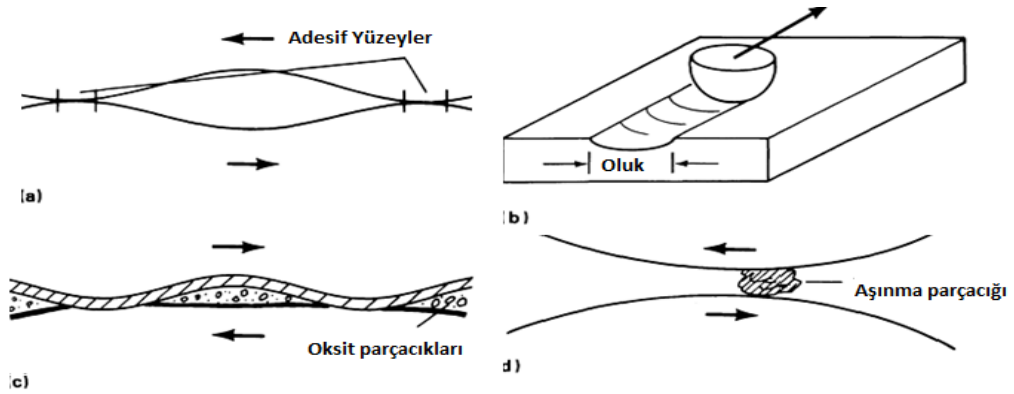
Burada μ_s sürtünme katsayısı, F_s sürtünme kuvveti ve F_N dik kuvveti temsil etmektedir. Bu ifadeden μ_s değerinin bulunması kolaydır, fakat kuvvet ölçümlerinde genelde hem statik hem de dinamik veya kinetik sürtünme katsayılarının kullanılması gerekmektedir. Bu ölçümlerden sonuçlar elde edilse de değişik ölçüm sistemlerinin değişik karakteristikleri, yüzeyin temizliği ve çevre şartları da etkilidir (Kurbanoglu,2006).



Şekil 1.15. Statik sürtünme katsayısının belirlenmesi (ASM, Volume 18)

Mikroskobik seviyede incelendiğinde yüzeyler tam olarak düz görünmezler. Yüksek büyütmede parlatılmış numuneler üzerinde çizik, çukur ve pürüz gözlemlenir. İki yüzey birbirine temas ettirildiğinde yüzeydeki pürüzler temasa geçer. Bu noktalarda temas basıncı yumuşak malzemenin sertliğine yakın olursa bölgesel ölçüde plastik deformasyon meydana gelir ve iki metal arasındaki birleştirilen bağlantılar soğuk kaynakla şekillendirilir. Kayma başladığında bu bağlantılar sürtünme kuvvetiyle kırılmaya zorlanır ve bu durum sürtünmenin adesif bileşeninin oluşmasını sağlar. Birçok mekanizmadan dolayı sürtünme, özel bir malzeme özelliği değildir. Fakat ölçüm koşulları, yüzey pürüzlülüğü gibi etkenlere de bağlıdır. Bu karmaşıklığa rağmen μ değeri değişik yöntemlerle ve değişik laboratuvar imkânlarıyla belirlenebilir. Özel fiziksel, kimyasal veya malzemeyle ilgili sürtünmeye neden olan olaylar sürtünme mekanizmaları olarak adlandırılır. Bu mekanizmalar yüzyıllardır bilim adamları ve mühendislerin ilgi alanına girmiştir. Değişik derecelerde

sürtünmenin oluşmasına neden olan mikroskobik mekanizmalar adezyon, yüzey pürüzlülükleri ve mekanik etkileşimler, pürüzlerle bir yüzeyden diğerine sürtülmesi, oksit gibi yüzey tabakalarının kırılması ve/veya deformasyonu ve aşınmış parçaların hareket yüzeylerine sıkışmasıdır. Sürtünmeyi oluşturan temel mekanizmalar Şekil 1.16’da şematik olarak verilmektedir (ASM, Volume 18).



Şekil 1.16 Sürtünmeyi oluşturan temel mekanizmalar (a) Adezyon (b) Çizme (c) Deformasyon ve kırılmış oksit parçaları (d) Sıkışmış aşınma parçaları (ASM, Volume 18)

1.4.1. Aşınma

Aşınma modelinin tahmin edilmesi ve yağlayıcılardaki gelişme birçok mühendislik sistemlerinin performansının ve ömür maliyetinin gelişmesinde önemli ölçüde etkilidir. Aşınmanın anlaşılabilmesi mekanik, fizik, kimya ve malzeme bilimindeki temel bilgilere ihtiyaç duyulur. Aşınma genel olarak yüzeyden malzeme ayrılması, malzemenin tekil yüzeyden malzeme hareketi veya bir yüzeyden başka bir yüzeye malzeme transferi şeklinde tanımlanmıştır. Bu tanım yüzeyde birbirine göre hareket eden işlem yüzeylerinde meydana gelen malzeme kaybı olarak daraltılabilir. (Stachowiak, 2006)

Aşınma çok karmaşık bir işlem olup aşınmayı anlatan gerçekçi bir model üretilmek çok zordur. Normal yük ve aşınma oranı arasındaki ilişkiyi içeren aşınmayla ilgili varsayım Archard aşınma eşitliği (1.4) ile verilmektedir(Stachowiak, 2006).

$$Q = \frac{KN}{H} \quad (1.4)$$

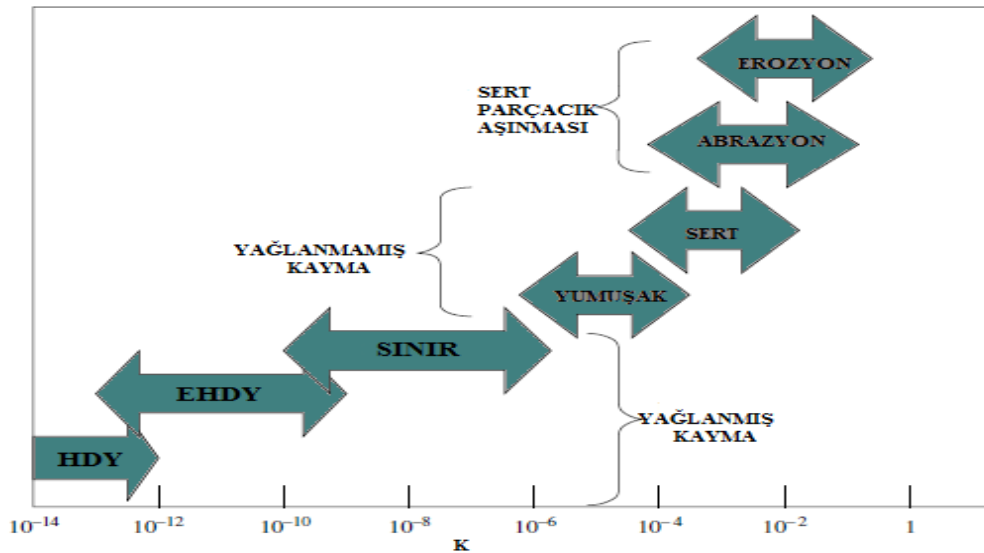
Burada Q: her kayma mesafesinde yüzeyden ayrılan hacim; N: yüzeye uygulanan normal yük; H: Aşınma yüzeyinin sertliği ve K: aşınma katsayısı (birimsiz) olarak kullanılmıştır. K değeri farklı aşınma işlemlerinin karşılaştırılması için önemlidir. Eğer K, N, H aşınma sırasında sabit kalıyorsa zamana göre bağıl kayma mesafesi veya sabit kayma hızı yüzeyden ayrılan malzeme miktarıyla doğrudan orantılı olur ve eşitlik 1.4 doğrulanmış olur (Stachowiak, 2006).

Mühendislik uygulamalarında özellikle sertlikleri belirlenemeyen elastomer gibi malzemeler için aşınma eşitlik (1.5) ile verilmektedir (Stachowiak, 2006).

$$k = \frac{K}{H} = \frac{Q}{N} \quad (1.5)$$

Burada k özel aşınma oranı olup birimi $\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$ 'dir. Diğer büyüklükler eşitlik 1.4'te verildiği gibidir.

Sertlikleri $H=1\text{GPa}$ olan malzemeler için (yumuşak çelik veya sert alüminyum alaşımları gibi) k değeri K ile aynıdır. Şekil 1.17'de değişik aşınma tipindeki K değerlerinin yaklaşık değerleri verilmektedir. Şekil 1.17'de verilen kısaltmaların anlamları aşağıdaki gibidir; HDY: Hidrodinamik yağlama, EHDY: elastohidrodinamik yağlama (Stachowiak, 2006).

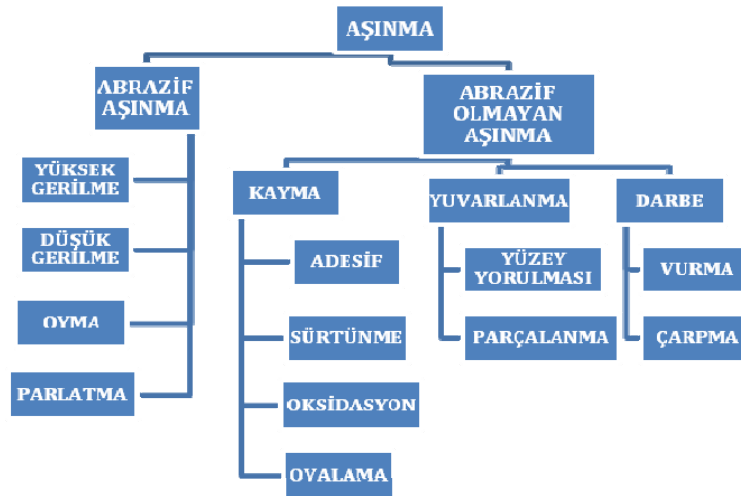


Şekil 1.17. Değişik aşınma şartlarında aşınma katsayısının (K) değişimi (Stachowiak, 2006)

Aşınmanın sert ve yumuşak olmak üzere iki farklı şekli mevcuttur. Sert parçacıklar mevcut olduğu ve aşınma çeşidi olarak abrazyon ve erozyonun görüldüğü durumlarda yüksek K değerleri elde edilir. Yağlanmamış kayma şartlarında ve sert parçacıkların aşınmasında meydana gelen K değerleri pratik mühendislik uygulamalarında tolere edilemez. Çoğu tribolojik tasarımı yağlamayla aşınma oranını azaltır ve aşınmanın azalmasıyla ömürde artışlar sağlanır.

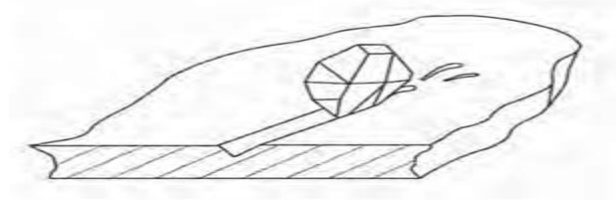
1.4.2. Aşınma mekanizmalarının sınıflandırılması

Aşınmanın sınıflandırılmasının yapılması için bugüne kadar birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalardan elde edilen ortak sonuç erozyonu aşınma çeşidi olarak kabul edilmemesi gerektiğidir. Bunun nedeni erozyonu yüzey üzerindeki mekanik hareketin neden olduğu sıvı akışı olmasıdır. ASTM'ye göre aşınma abrazif ve abrazif olmayan olarak iki grupta incelenmektedir. Şekil 1.18'de aşınmanın sınıflandırılması verilmektedir.



Şekil.1.18.Aşınmanın sınıflandırılması((Stachowiak,2002)

Abrazif aşınma; karşı yüzeyin sertliğinden daha fazla sertlikte pürüz veya parçacık içeren sistemlerde görülen aşınma sistemidir. Bu sistemlerde malzemeayrılır. Şematik olarak düşük gerilmeli abrazif aşınma mekanizması Şekil 1.19'da verilmektedir.



Şekil 1.19. Düşük gerilmeli abrazif aşınma(Stachowiak,2002)

Şekil 1.18’de abrazif aşınma çeşitleri yüksek gerilme, düşük gerilme, oyma ve parlatma olarak sınıflandırılmıştır. Böyle bir sınıflandırmanın yapılma nedeni hasar görmüş yüzeylerdeki değişik şekillerde abrazif aşınma meydana gelmesidir. Düşük gerilmeli aşınmaya en güzel örnek yürürken zeminde meydana gelen aşınma verilebilir. Yüksek gerilmeli aşınmada çizikler ise büyük çentiklerin oluşumuna neden olur. Parlatma abrazyonu diğer aşınma mekanizmaları gibi kısa sürede oluşmaz. Parlatma aşınması yüzey pürüzlülük değerleri düştüğü durumlarda meydana gelir. Çok iyi parlatılmış yüzeyde optik mikroskopta incelendiğinde herhangi bir çizik görülmez. Oyulma aşınması sert malzemeler ve kayalarda darbe ve vurma ile meydana gelir. Bu aşınmaya en iyi örnek kazı makineleridir.

Abrazif olmayan aşınma kesin tarifi yapılamayan bir terim olup ASTM tarafından ortaya konulmuştur. Gerçekte abrazif olmayan aşınma, aşınmanın bir çeşidi olup kayma sistemlerini içermektedir. Bu sistemler abrazif parçacıkları içermezler. Aslında abrazif olmayan sistemler yağlanmış sistemlerdir. Adhesif aşınma birbirine göre hareket eden mekanizmalar arasında adhezyonla malzeme transferi olarak tanımlanabilir. Genellikle aşınma mekanizmaları adhesif aşınmayla başlar ve sonra abrazif hareketle parlatma işlemi meydana gelir. Ovalama aşınması adhesif aşınmanın bir şekli olup sürtünen yüzeyler arasındaki adhezyonu meydana gelir. Ovalama sürtünmesi en çok steril sistemlerde kullanılan paslanmaz çeliklerde görülür. Sert-sert yağlanmamış metal çiftlerinde meydana gelen aşınma çeşidi oksidasyon aşınmasıdır. İki sertleşmiş çelik yağlama olmadan ovalanırsa ovalanan yüzeyler arasında paslanma meydana gelir. Pas, demir oksit olup su ile ilgili değildir. Eğer sert-sert çiftler yağlanarak kullanılırsa genellikle oksidasyon aşınması meydana gelmez. Çünkü yağ parçacıkları yüzeyleri birbirinden ayırır. Sürtünme aşınması küçük genlikteki titreşimler sonucu meydana gelir. Bir yüzey diğerine sürttüğü zaman sürtünme aşınması meydana gelir ve malzeme yüzeyden titreşim

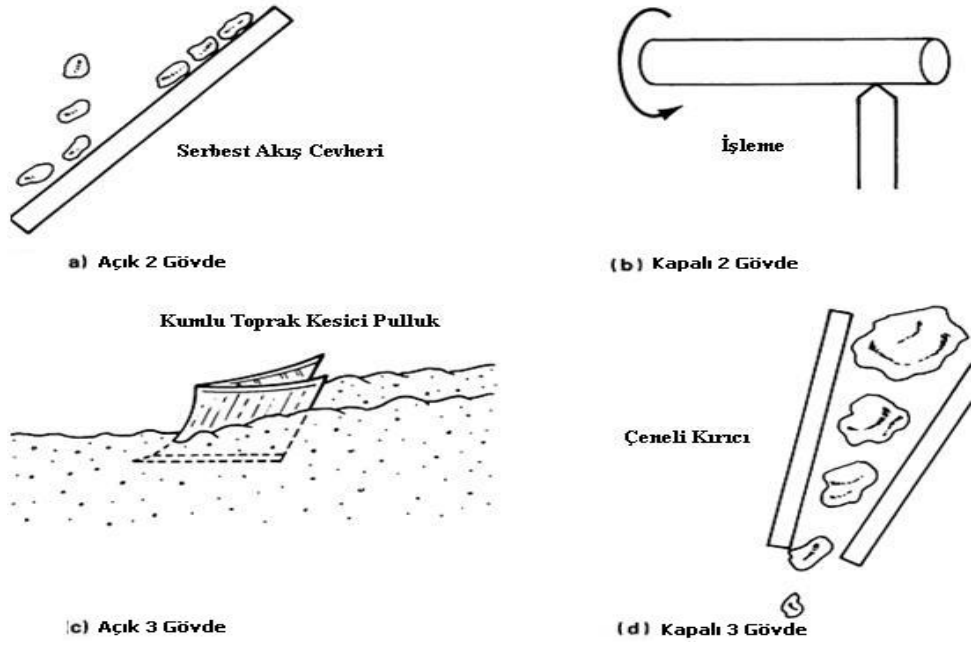
hareketleriyle veya sürtünme korozyonuyla ayrılır. Makine sistemlerinde doğru yuvarlanmayı elde edebilmek çok zordur. Yuvarlanma işlemi sırasında yuvarlanma yüzeylerinde elastik sapmalar meydana gelmektedir. Kaplanan yüzeylerde yuvarlanma işlemi sonucu parçalanmalar meydana gelir. Bunun nedeni gerilmeden kaynaklanan yüzey altı kırıkların meydana gelmesidir. Darbe aşınması ise darbeli çalışan sistemlerde meydana gelen bir aşınma şeklidir. Darbeler yüzeye doğru ilerleyen yüzey altı çatlaklara neden olur. Meydana gelen hasarlar plastik deformasyonla veya birçok ukurcukla sonuçlanır. Bu aşınma çeşitlerinin yanında torna tezgâhı gibi tezghların takımlarında aşınmalar meydana gelir.

1.4.2.1. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma ASTM'ye göre sert parçacıklar veya pürüzlerin kuvvet karşısında katı yüzeyden ayrılması olarak tanımlanabilir. Abrazyonun maliyeti çok yüksek olup sanayileşmiş lkelerde gayri safı ekonominin %1-4'n oluşturmaktadır. Abrazyonun etkisi tarım, madencilik gibi endüstriyel alanlarda kullanılan pulluk, pres, p arabaları, hareket eden tekneler gibi makinelerde/ sistemlerde açıkça görülmektedir.

Abrazyon temas çevresinin yanında temas şekline göre de sınıflandırılabilir. Temas şekilleri (2 – gövde) ve (3 – gövde) şeklindedir. Verilen aşınma yol uzunluğu ve yükü için (3- gövde) sistemler (2- gövde) sistemlere göre 10 – 1000 kat düşük olduğu endüstriyel olarak kanıtlanmıştır. Abrazif aşınma sırasında görülen temas şekilleri (açık ve kapalı) şekil 1.20'de verilmektedir.

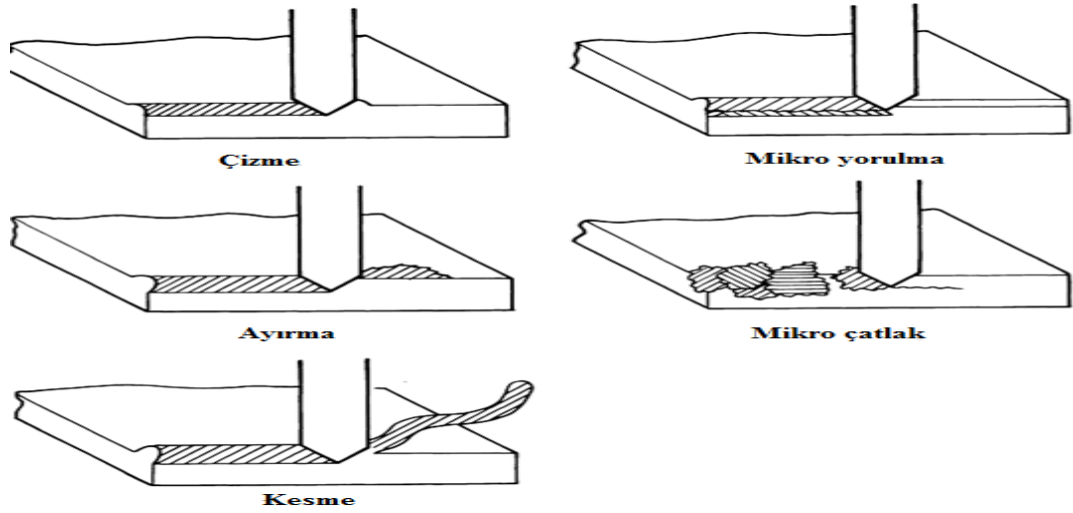
Değişik deneylerle verilen yk ve yol uzunluğunda aşınma oranı açık ve kapalı sistemler için aynı olduğu belirlenmiştir. Buna rağmen kapalı sistemlerde meydana gelen kayıplar açık sistemlere göre daha yüksektir. Bunun nedeni sistemlerin yüksek yüklerde çalışmasıdır.



Şekil 1.20. Abrazif aşınma sırasındaki temas şekilleri (ASM, Volume 18)

Ayrıca abrazyon düşük gerilme, yüksek gerilme veya oyulma olarak da sınıflandırılabilir. Düşük gerilme abrazyonu abrazif kalıntıların değerlerine nazaran bozulmadığı durumlarda görülür. Yüksek gerilme abrazyonu ise abrazif parçacıkların parçalanması durumlarında görülür.

Abrazyon sırasında malzemenin yüzeyden nasıl ayrıldığı bazı mekanizmalar ile belirlenebilir. Bu mekanizmalar kırılma, yorulma ve ergimeyi içerir. Meydana gelen kayıplar sadece bir mekanizmayla açıklanamaz, çünkü abrazyon olayı çok kompleks bir olaydır. Şekil 1.21’de bir yüzeye geçen tekil abrazif tepenin meydana getireceği etkiler verilmektedir. Bu etkiler çizme, mikro çatlaklar, ayırma, mikro yorulma ve kesmedir.



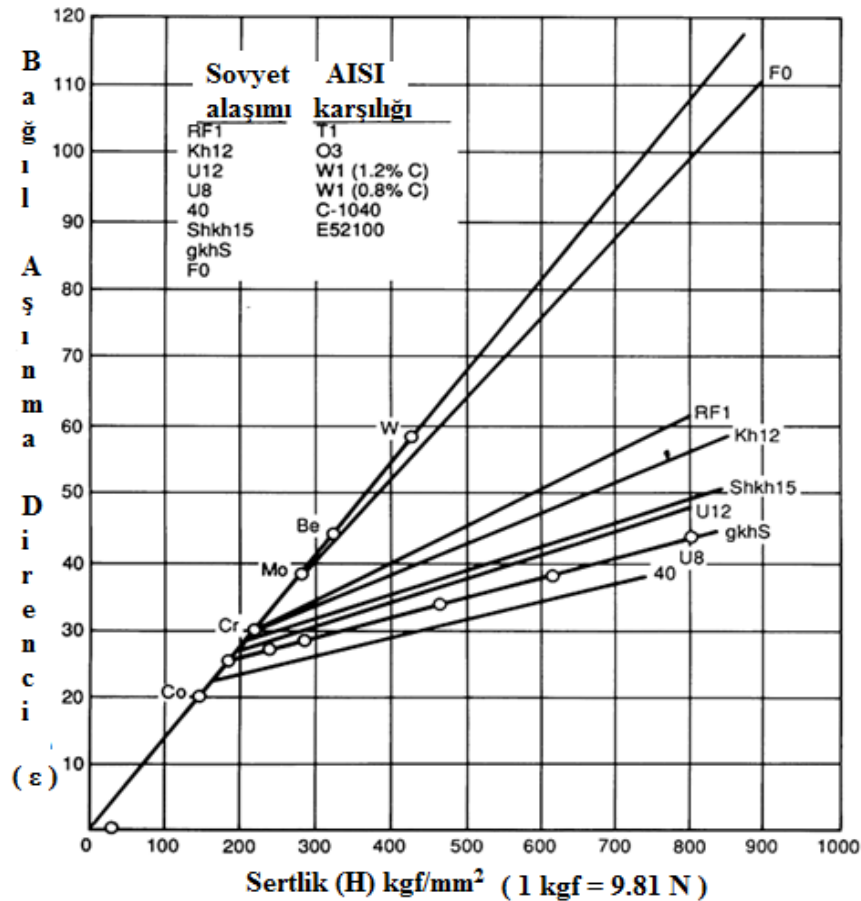
Şekil 1.21. Abrazif aşınmanın oluşma tipleri (Stachowiak,2002)

Çizme; malzemenin oyuktan kenara doğru yer değiştirmesi şeklinde tanımlanabilir. Bu olay düşük yüklerde meydana gelir ve gerçekte malzeme kaybı meydana gelmez. Soğuk işlem sırasında meydana gelen dislokasyonların birikmesiyle malzemenin yüzeyinin kenarında hasarlar meydana gelir. Eğer bu soğuk işlenmiş yüzeylerde daha sonraları çizikler oluşursa soğuk işlem dışında ilave şekillendirme işlemleri sonucunda mikro yorulma görülür. Sünek malzemelerde en fazla görülen aşınma şekli kesmedir. Kesme sırasında abrazif parçacık çentikle yer değiştirir. Gevrek malzemeler için abrazif aşınma çeşidi ise mikro çatlaktır. Mikro çatlaklar uygun yükler nedeniyle abrazif tanecikler malzemenin kırılma tokluğunun aşmasına neden olduğu durumlarda oluşur. Bu aşınma çeşidi seramik malzemelerde ve beyaz demir gibi çok gevrek malzemelerde görülür. Malzeme karakteristiklerindeki çeşitlilik hem abrazif aşınmayla ilişki kurma hem de onun üzerindeki bazı etkilerine bağlıdır. Bu özellikler sertlik, elastik modülü, akma dayanımı, ergime sıcaklığı, kristal yapı, mikro yapı ve kompozisyonudur.

Teorik ve deneysel incelemelerle malzemenin sertliğinin aşınma oranı ile ilgili olduğu belirlenmiştir. Şekil 1.22’de saf malzemeler için tavlama sertliği ile bağlı aşınma direnci arasındaki ilişki verilmektedir. Bu ilişki deneysel olarak belirlenmiştir. Saf malzemeler için bağlı aşınma direnci sertlik değeri arttıkça artmaktadır. Aşınma oranı sertlikle lineer olarak azalır. Değişik sertlikteki çeliklerin doğruları saf malzemelere göre farklı eğimlere sahiptir. Bu durum aşınma oranı veya

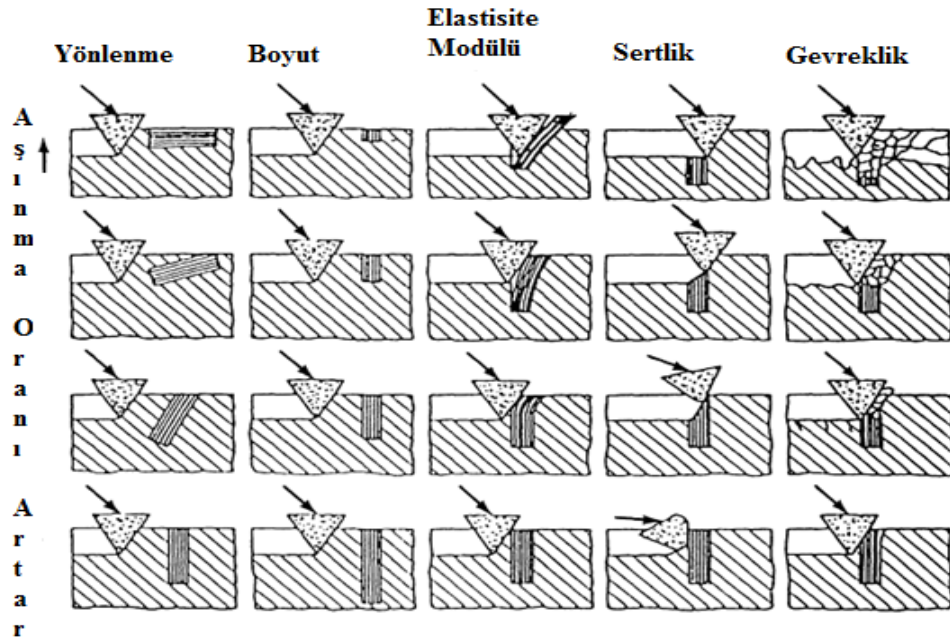
aşınma direnci değerinin alaşımlarda saf malzemelere göre değişiklik ortaya çıktığını göstermektedir.

Abrazif aşınma ayrıca kristal yapı ve yöntemlere de bağlıdır. Alison'a (ASM, Volume 18) göre kübik sistemde kristalleşen metallerin aşınma oranı hegzagonal metallere göre iki kat fazladır. Bu durum hegzagonal metallere uygulanan düşük sertleştirme oranlarıdır. Bunun yanında Stejin ise tekil kristallerin aşınmasını çalışmıştır. Kübik yüzey merkezli (kym) ve kübik hacim merkezli (khm) malzemeler için 100 ve 110 düzlemlerinde oluşmuş malzemelerde yüksek aşınma oranını anlatan geniş çizikler elde edilmesine rağmen 001 düzlemi tercih edilmiştir. Bunların yanında mikro yapı da önemlidir. Ferrit, perlit veya martenzite göre aynı sertlikteki ostenit ve beynit fazları abrazyona karşı daha dirençlidir. Bunun nedeni ostenitin sünek olması ve yüksek şekil değiştirme oranına sahip olmasıdır.



Şekil 1.22. Saf metal ve alaşımlar için sertlik-aşınma direnci ilişkisi (ASM, Volume 18)

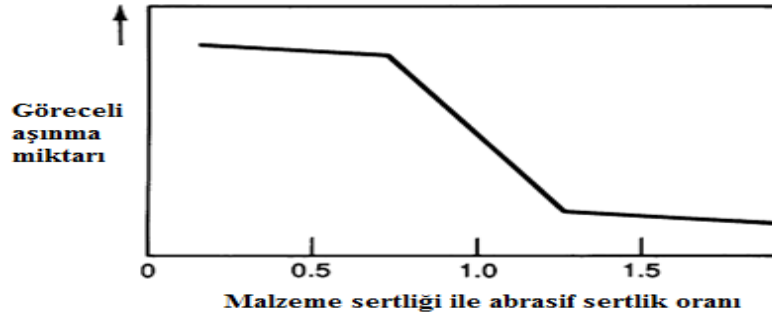
Malzemelerin performansının artması için alaşımlama işlemi yapılır. Bu ilaveler çatlak oluşumuna veya ilave bölgeler oluşmasına neden olur. Demire karbon ilave edilmesi abrazyon direncinin geliştirilmesine katkıda bulunurken çatlak oluşumuna neden olması güzel bir örnektir. Malzeme özelliklerini geliştirmek için bilinen bir yöntem de ikinci faz oluşturmaktır. Malzemelerde uygulanan işlemler sonucu çökelti oluşur ve bu çökelti akma dayanımı ve sertlikte büyük artışlara neden olur. Parçacık boyutu ile abrazif tane boyutu arasındaki ilişki önemlidir. Büyük abrazif tanecikler geniş aşınma çizgileri oluşumuna neden olurlar. Şekilsiz tanecikler aşınma çentiklerine ve abrazif taneciklere göre daha küçükse matristen ayrılır ve malzemenin abrazyon direncine bir miktar eklenir. Eğer abrazif tanecikler sert parçacıklara göre çok küçükse parçacıklar arasındaki boşluk büyük olur. Sertlik, tokluk gibi parçacık karakteristikleri aşınmayı engellemek için çok iyi rol oynarlar. Yüksek sertlik değerleri onları kesmeye dayanıklı hale getirir. Tokluk ise kırılmaya karşı direnç sağlar. Yeni geliştirilmiş malzemelerin bulunmasıyla takviyeli kompozit kullanımı daha yaygın hale gelmiştir. Bu malzemeler pratikte çok fazla aşınmaya maruz kalırlar. Bu malzemelerin abrazif aşınmasını etkileyen faktörler yönlenme boyutu, elastik modülü, bağıl sertlik ve ikincil fazın kırılabilirliği. Zum Gahr (ASM, Volume 18) tarafından bu parametrelerin etkisini özetleyen model Şekil 1.23’de verilmektedir.



Şekil 1.23. Kompozit malzemeler için abrazif aşınmaya etki eden faktörler (ASM, Volume 18)

Malzeme özelliklerinin yanında çevre şartları da aşınmayı etkiler. Abrazyonda meydana gelen kayıplar malzemenin içyapısından kaynaklanmaz. Çevresel faktörler abrazif kayba neden olur, fakat bunlarla sınırlı değildir. Aşındırıcı ve özellikleri, sıcaklık, temas hızı, malzeme yüzeyindeki aşındırıcının birim yükü, nem ve korozyon etkiler de göz önünde bulundurulmalıdır.

Önceleri geliştirilen basit abrazif aşınma modelinde aşındırıcıların farklılığı göz ardı edilmiştir. Ancak aşındırıcı değişirse aşınma oranı da değişir. Abrazif özelliklerde olan kritik açı dikkate alınmakla birlikte sertlik, tokluk ve abrazif boyutu gibi diğer aşındırıcı özellikleri de aşınma oranına katkıda bulunmaktadır. Malzemelerin aşınma oranı belirlenirken abrazif parçanın sertliği önemli bir parametredir. Abrazif sertliği aşınmış malzemenin sertliğini aşarsa tipik abrazif aşınma daha kötü şekilde meydana gelir (Şekil 1.24). Abrazif sertliği malzeme sertliğini aşarsa yüzeye nüfuz eder ve kesme izlerinden kırılmadan malzeme kopar.



Şekil 1.24. Abrazif aşınma- malzeme sertliği/abrazif sertliği ilişkisi (ASM, Volume 18)

Abrazif taneciğin şekli de önemli bir parametredir. Çünkü abrazif şekli, malzeme yüzeyindeki oyukların şekline etki eder. Ayrıca temas yükü ve temastaki elastik halden plastik hale dönüşümü de etkiler. Çalışmalar yuvarlak yapıdaki abraziflerin keskin yapıdakilere göre daha az aşınmaya neden olduklarını göstermektedir. Ayrıca abrazyon sırasındaki abrazif taneciğin tokluğu önemli bir parametredir. Abrazif tokluğu arttığında malzeme kaybı artar. Sıcaklığın artmasıyla sertlik ve akma dayanımı düşeceği için sıcaklık arttığında abrazif aşınma miktarının artar (ASM, Volume 18).

Temas hızı abrazif aşınma üzerinde etkilidir. Şöyle ki; abrazif aşınma oranı; temas hızının artırılmasıyla açıkça artmaktadır. Bu durum sürtünme ısıyla açıklanabilir. Archard eşitliğinde (1.4) görüldüğü üzere yük ile abrazif aşınma orantılıdır. Bu orantı yükün abrazif parçacıkların kırılmasına neden olacak kadar artmasıyla bozulur. Eğer kuvvetler abrazif parçacıkları kırar ve yeni keskin noktalar oluşturursa aşınma artar, abrazif parçacıklar yuvarlak olursa aşınma azalır. Atmosferik nemin abrazif aşınmaya etkisi açık olmayıp beklenene göre ters bir etkiye sahiptir. Larsen – Bosse (1975) değişik çeliklerde ve saf metallerde atmosferik nemin atmosferik aşınmaya etkisini incelemiştir. SiC abrazif kullanıldığında aşınma bağıl nemin %65' e arttırılmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum SiC abrazif parçacıkların nem etkisiyle kırılması sonucu oluşmuştur şeklinde açıklanabilir. Aşınmanın artmasına neden olan bir diğer olayda Rehbinder etkisidir. Rehbinder etkisi kimyasal–mekanik mekanizmalarla ilgilidir. Bu mekanizmalar iyonlar veya atomik hidrojen gibi kimyasal maddelerin çatlak kökünde kırılma özelliklerine etki ederek aşınma oranını artırır. Merker (1975) ise nemin artırılmasıyla demir ve yumuşak çelik için aşınma oranının düştüğünü, titanyum için sabit kaldığı ve bakır için arttığını çalışmalarıyla bulmuştur. Bu sonuçlar nemin aşınmaya olan etkisi tam olarak açıklanamamasına neden olmaktadır (ASM, Volume 18, Dowson,1998).

Özellikle düşük pH gibi korozyon koşullar abrazif aşınma oranını artırmaktadır. Abrazif aşınma ile korozyon arasında her zaman bir sinerji mevcuttur. Abrazyon hızla korozyona uğrayan temiz yüzeyler oluşturur ve korozyon koruyucu tabaka aşınmayla ortadan kalkar.

1.4.2.2. Kayma ve adesif aşınma

Adesif aşınma bir yüzeyin diğer bir yüzey üzerinde kaymasıyla oluşan aşınmanın bir çeşididir. Erozyon, kavitasyon, yuvarlanmalı temas, abrazyon, oksidasyon aşınması, sürtünme ve korozyon gibi aşınma çeşitlerinde kayma olduğu halde kayma aşınmasının dışında tutulur. Adesif aşınma kayma aşınması olarak tanımlansa da tam karşılığı değildir. Adesif aşınma, aşınmaya neden olacak özel bir parametrenin olmadığı aşınma çeşididir. Adesif aşınmada abrazif aşınmada olduğu gibi abrazif madde yoktur. Ayrıca sürtünme aşınmasından daha fazla kayma genliğine sahip ve oksidasyonun neden olduğu malzeme kaybı oluşmamaktadır. Adezyon sistemde

malzeme kaybı oluşmaz. Bundan dolayı adezyon sadece aşınma nedeni olmayıp aynı zamanda temasın bir sonucu olarak meydana gelir. Adesif aşınma işlemini belirleyen birçok eşitlik bulunmasına rağmen en fazla bilinen eşitlik Archard ilişkisi olup (1.7) eşitliği ile verilmektedir.

$$Y = \frac{k(N.V)}{H} \quad (1.7)$$

Burada; Y birim zamandaki aşınma hacmi; N uygulanan yük; V kayma hızı; H sürtünen parça çiftinin yumuşak olan tarafının sertliği; k aşınma katsayısıdır. k değerleri literatürden elde edilmektedir. Bu rakamlar pratikte kabul edilemeyen aşınma oranları için 10^{-3} - 10^{-7} arasındadır.

Metallerde, seramikte ve polimer malzemelerde adesif aşınmanın önlenmesi için; özellikle metallerde benzer malzemelerin birbiri üzerinde kaymasına engel olunmalıdır. Ayrıca bunun yanında tekrarlanan yüksek temas basıncına bağlı olan yorulmanın mevcut olduğu ve bu durumun sorun olarak görülmediği şartlarda yüksek sertlik istenen bir özellik olsa da yağlamalı sistemlerde sert metal-sert metal teması engellenmelidir.

1.4.2.3. Oksitlenme aşınması

Yağlayıcılar aşınmayı azalttığı gibi korozyonu önlemek için de bir atmosfer oluştururlar. Oksitlenme aşınması kayma şartları altında yağlanmamış şartlarda meydana gelir. Her zaman olmasa da genellikle oksit film tabakası 3 veya 4 µm civarlarında olduğu zaman korozyon yararlı hal alır. Tribo elemanların yüzey pürüzlülük değeri yağ filmi tabakasından daha kalınsa, yağlanmış kayma şartlarında da oksitlenme aşınması gözlemlenebilir (Dowson,1998).

1.4.2.4. Korozyon Aşınması

Korozyon aşınması hem aşınma hem de korozyon mekanizmalarını içerir. Korozyon malzemelerde bozulmaya yol açan mekanizmadır. Korozyon aşınmasında korozyon ve aşınma mekanizmaları bir arada meydana geldiği için etkileri tek başlarına olan

etkilerinden daha fazladır. Korozyon ve aşınma bir arada olduğunda kimyasal işlemler, enerji üretimi, madencilik gibi endüstrinin birçok alanında önemli etkiler meydana getirir. Amerika’da öğütme ve parçalama endüstrisinde her yıl kullanılan enerjinin %12’si korozyon ve aşınmanın neden olduğu kayıplarda meydana gelmektedir. Madencilik sektörünün yanında birçok kimyasal işlemler sırasında da korozyon meydana gelir. Korozyon aşınması üzerinde çevresel faktörlerin de etkisi vardır. Bu faktörlerin başında çamur parçacıkların etkisi düşünülebilir. Çamur parçacıklarının kendi momentumlarının neden olduğu darbeler korozyon aşınmaya neden olur. Çevresel faktörler ve abrazif parçacık özellikleri de dikkate alınmalıdır. Abrazif parçacık şekli, parçacık yoğunluğu, parçacık boyutu, parçacık sertliğinin değişik etkileri mevcuttur. Parçacık sertliği malzeme sertliğini geçtiği şartlarda aşınma oranı artar. Aynı şekilde parçacık boyutu arttığında aşınma oranı artar (ASM, Volume 18).

1.4.2.5. Parlatma aşınması

Parlatma aşınması terimi iki yüzeyden en az birinin yüzeyinde parlak bir yüzey elde edilme esnasında malzemenin ayrıldığı iki katı arasındaki etkileşimi belirlemede kullanılır. Ancak bu tanımlama parlak yüzeyin tam olarak tanımlanamamasından dolayı kesin değildir. Bu terim gerçekte sadece yüzeylerin karşısındaki objeleri ayna gibi net göstermesi ve oldukça canlı bir yüzeye sahip olması durumunda kullanılır. Parlak ve parlak olmayan yüzeyler belli seviyede farklı olduğu için parlatma aşınması temel aşınma işlemlerin özel bir çeşidi olarak göz önünde bulundurulabilir. Parlatma aşınması karmaşık mühendislik sistemlerinde meydana gelir ve geniş olarak çalışılmamış bir aşınmadır. Abrazif parçacıklar parlatma aşınmasının oluşmasında en bilinen nedendir. Ayrıca yüzey akışı ve kimyasal-mekanik mekanizmalar da parlatma aşınmasına neden olur. Yüzey akışı pürüzün bir katı yüzeye teması sonucu sürtünmenin neden olduğu ısıdan kaynaklanmaktadır. Kimyasal-mekanik mekanizmalar parlatma aşınmasının oluşmasında birlikte etkilidir (ASM, Volume 18).

1.4.2.6. Darbe aşınması

Darbe aşınması darbenin neden olduğu bir katı yüzey üzerine tekrarlanan dinamik temaslar sonucunda meydana gelen aşınma çeşidi olarak tanımlanabilir. Endüstrinin değişik alanlarda darbe aşınmasının neden olduğu birçok sistem mevcuttur. Makine parçaları, dirsekler ve dişli gibi makine elemanları dinamik parçalarla birlikte çalışırlar. Elektromekanik yazıcılar bu aşınma çeşidine örnek verilebilir (ASM, Volume 18).

1.4.2.7. Yuvarlanma temas aşınması

Yuvarlanma temas aşınması bir yüzeyin diğeri üzerinde yuvarlanması sonucu tekrarlanan mekanik gerilmenin neden olduğu aşınma olarak tanımlanabilir. Yuvarlanma temas aşınması yuvarlanma şeklinde çalışan yataklar, dişli çarklar, tekerlek-ray temasları, merdaneler gibi elamanlarda hasara neden olan en önemli parametredir. Bu aşınma erken dönemde fark edilmesi güç bir aşınma çeşidi olup, erken teşhis yapılabilmesi için; yataklarda artan gürültü, yataklarda artan ısınma, hassas yataklarda titreşimin meydana gelmesi, yağ içinde aşınma miktarlarının artması ve ürünlerde bozuklukların meydana gelmesi gibi belirtilerin görülmesi gereklidir (ASM, Volume 18).

1.4.2.8. Sürtünme aşınması

Sürtünme temas halindeki yüzeylerin küçük genlikteki hareketlerin neden olduğu olaydır. Normal atmosferik şartlarda oksit kalıntılarının oluşması sürtünme aşınması teriminin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Sürtünme kavramı ilk kez 1911 yılında Eden, Roseve Cumingham tarafından çelik numuneyle temasta olan yorulma makinesinde kahverengi oksit atıklarının gözlemlenmesi sonucu ortaya çıkmıştır (Stachowiak, 2002).

1.5. Kaplama Malzemeleri

Kaplamaların tribolojik davranışları yük, hız, geometri, sıcaklık, çevre gibi parametreleri içeren temas şartları; kaplama, alt malzeme ve karşı yüzeyin kimyasal

ve fiziksel özelliklerini içeren temas malzemeleri; tane boyutu, yoğunluk ve porozite gibi parametreleri içeren temas içyapısı ve kaplama kalınlığı, kaplama ve altlık sertliği, elastikliği, yüzey pürüzlülüğü gibi parametreleri içeren kaplama / altlık sistemi gibi birçok parametreden etkilenmektedir. Kaplamaların aşınma ve sürtünme özelliklerinin belirlenmesinde deneysel çalışmalar yapılarak kaplama yüzeylerinin nasıl davranacağı incelenmiştir. Buna rağmen bu durum çok kolay değildir. Ölçümler değişik tip aparatlar, değişik temas geometrileri, değişik test parametreleri ve değişik şartlarda yapıldığı için tribolojik test yöntemlerinin standardına oturtulmamıştır. Bu durum sonuçların tartışılmasını sınırlandırmıştır. Sert bir malzeme üzerine yumuşak ince kaplamalar uygulanarak kayma sürtünmesi azaltılabilir. Aşınma ve ömür süresi ince yumuşak kaplamalar için çok önemlidir. Yumuşak kaplamalarda temasın doğru dizayn edilemediği şartlarda kaplama yüzeyden hızla ayrılır. Buna rağmen birçok yumuşak kaplanmış malzeme için düşük veya çok düşük aşınma ve uzun ömürler elde edilebilmiştir. Kaplama işleminde kaplama yöntemi kadar film kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü, kayma hızı, yük, çevre şartlarına karşı koyan malzeme gibi parametreler de önemli olduğu için bu parametrelerde en uygun hale getirilmiştir. Yumuşak kaplamalardan en fazla kullanılanı polimer kaplamalardır (Dowson,1998).

1.5.1. Polimer malzemeler

Polimerler; iyi aşınma ve korozyon direncine sahip olması, kendini yağlama özelliği, düşük ses iletmesi ve ayrıca ucuz malzeme olmasından dolayı önemli tribolojik malzemelerdir. Polimerler sert yüzeyler üzerine adesif bağ, vakum kaplama, elektrokimyasal yöntem ve basınç döküm gibi değişik yöntemleri kullanarak kaplama yapılabilir. Polimer kalınlığı birkaç mikrometreden birkaç mm'ye kadar değişmektedir (Dowson,1998).

Polimer malzeme ile çelik malzemenin temasıyla meydana gelen sürtünme katsayısı 0,1-0,5 arasında değişmektedir (Dowson,1998). Bu değer çelik – yağlanmamış çelik teması için meydana gelen 0,6 değerinden daha düşüktür. Polimerlerin aşınma direnci düşük ancak orta büyüklükteki yüklenmede ise gayet iyidir. Yüksek temas basınçlarında yüksek elastik ve plastik deformasyonlar ve sıcaklık artışları çok yüksek aşınmalara neden olur.

Polimerler için ana aşınma mekanizmaları deformasyon aşınması ve ara yüzey aşınması olarak sınıflandırılmıştır. Deformasyon aşınmasında deformasyon özelliklerinin ve hasar tiplerinin elastik veya visko-elastik yırtılma hasarı; plastik veya viskoz akışlı sarma hasarı ve kırılmayla beraber gevrek hasarı olmak üzere üç temel çeşidi meydana gelebilir. Bu hasar tipleri sırası ile elastomerler, sünek polimerler ve cam polimerler için tipiktir. Aşınma işlemi genelde sıcaklıktan ve deformasyon oranından etkilenir. Ayrıca bunlardan çoğu çevrenin kimyasal doğasına karşı hassastırlar.

Ara yüzey aşınması adesif ve transfer aşınma ile kimyasal aşınma olmak üzere iki temel aşınma mekanizmasını içerir. Bu aşınma deformasyon aşınmasıyla karşılaştırıldığında polimer yüzey ve yüksek gerinmenin, gerinme oranlarının ve sıcaklığın neden olduğu nispeten ince tabakalar içerir. Aşınma parçacıkların transferi ve transfer tabakanın oluşması genellikle tribolojik özellikler üzerinde önemli etkiye neden olur. Bu mekanizmaların önemli özellikleri şunlardır;

- i. Polimer ve ara yüzey arasındaki başlangıç adezyonun doğası,
- ii. Film transferi için kriterler ve bağlantıdaki hasarın tipi,
- iii. Transfer tabakasının kalınlığı ve yapısı
- iv. Transfer tabakası ve film arasındaki bağ
- v. Film kaldırma mekanizmasının ve temas bölgesinde oluşan atıkların ayrılması

Kimyasal aşınma ısı ile sertleşen reçine, bazı termoplastikler ve elastomerler için önemlidir. PTFE, HDPE, naylon, polipropilen gibi sünek polimerler ve polistiren ve PMMA gibi gevrek polimerler önemli kimyasal çözünme olmaksızın erirler ve yumuşarlar (Dowson,1998).

Çoğu uygulamalarda polimerlerin yağlanmış veya yağlanmamış metalleri yerine geçmesi tasarlanmıştır. Tribolojik uygulamalarda polimer kullanılmasının avantajlarını Evans ve Lancaster (1979) aşağıdaki şekilde açıklamışlardır;

1. Polimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri nedeniyle polimer tipinin, dolgusunun ve takviye elemanının seçimine bağlı olarak geniş oranda çeşitlilik elde edilebilir.
2. Özellikle termoplastik gibi bazı polimerler ucuz ve karmaşık yapılarda kolaylıkla üretilebilir.

3. Çoğu polimerler, özellikle florakarbonlar asit, alkolit gibi saldırgan kimyasal etkilere karşı dirençlidirler.
4. Metalle ve kendilerine karşı yağlanmamış haldeki sürtünme katsayısı düşük olup 0,1 – 0,4 arasında değerler olmaktadır.
5. Pürüzsüz metal yüzeylere karşı koyma sırasındaki aşınma oranları düşüktür ve polimerler normalde aşınmazlar.
6. Sıvılarla yağlama gibi periyodik bakım sıklıkla yapılmayabilir. Bu durum uzay uyduları veya nükleer işletmeler gibi rutin bakımı yapılamadığı uygulamalar için önemlidir.
7. Sıvı yağlama olması durumunda metallere göre polimerlerde ekstra hidrodinamik yağlama daha iyidir.

Tribolojik uygulamalarda polimerlerin kullanılmasının sınırlamaları şunlardır;

1. Polimerler visko-elastiktir ve metallere göre sürünmeye daha duyarlıdır.
2. Kaplama direnci ve elastisite modülü oldukça düşüktür.
3. Isıl genleşme katsayıları oldukça yüksektir (çeliklere göre on kat yüksektir). Bu durum boyutu korumada sıkıntıya neden olur.
4. Isıl iletkenlik çok düşüktür (çeliklerin %1'idir) ve sürtünme ısısının bölgeden uzaklaştırılması açısından dezavantaj oluşturur.
5. Yumuşama, ergime, oksidasyon ve termal bozunma ile ilgili sıcaklıklar genellikle 300 °C' den daha düşük sıcaklıklarla sınırlanmıştır (Dowson, 1998).

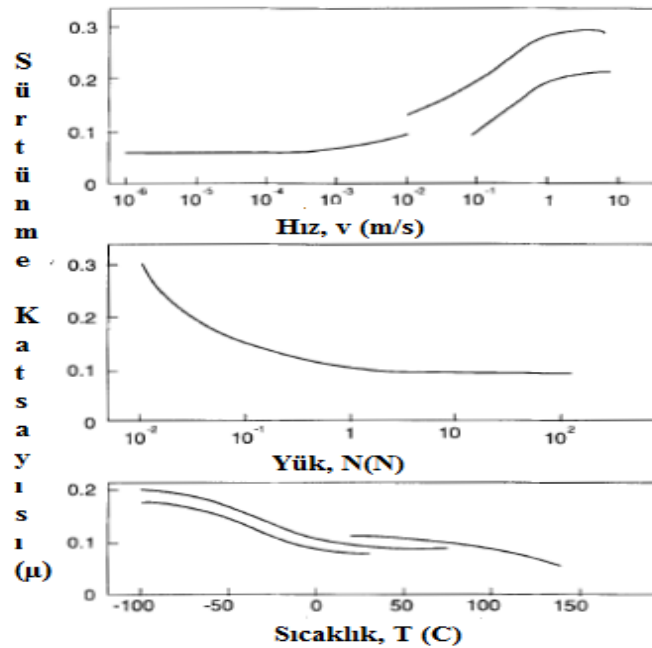
1.5.2. Polimer kaplamaların tribolojik özellikleri

Polimer kaplamaların tribolojik özelliklerini etkileyen birçok parametre vardır. Buna rağmen Bely ve diğ. (1982), polimer kaplamaların sürtünme özelliklerini etkileyen önemli iki adet parametre olduğunu savunmuşlardır. Bunlar polimerin yapısı (kaplama yöntemi) ve kaplamanın kalınlığıdır. Bu durum homojenlik, kohezyon gibi aşınma davranışını etkileyecek özelliklerin üzerinde etkilidir. Kaplama kalınlığı önemli bir parametredir. Eğer kalınlığı birkaç mikrometre olan çok ince kaplamalar veya birkaç yüz mikrometre olan ince kaplamalar dikkate alınırsa tribolojik mekanizmaları arasında fark olacaktır. Her iki durumda da Bely vd. (1982), minimum sürtünme katsayısını veren optimum bir değer olduğunu belirtmişlerdir.

PTFE' nin değişik bileşikleri için optimum kaplama kalınlığı 2 – 25 µm arasında değişmektedir. Poliamid reçineler için optimum kaplama kalınlığı yüksek olup 250 – 500 µm' dir ve düşük yükleme şartlarında 1000 µm' ye kadar çıkar.

1.5.3. PTFE kaplamalar

Fluoropolimerler; düşük yüzey gerilmesi, aşırı kimyasal durgunluk ve yüksek oksidatif ve termal direnç gibi birçok seçkin özelliklere sahiptir. PTFE aşırı düşük sürtünme katsayısından dolayı tribolojik malzeme olarak yaygın bir şekilde kullanılır. Bu malzeme orta sıcaklıklarda düşük hızlarda ve yüksek yüklerde $\mu=0,05$ veya daha düşük sürtünme katsayısı değerleri alır (Şekil 1.25). Şekildeki eğriler farklı deney şartları için elde edilmiştir (Dowson, 1998). Atmosferik şartlarda ve vakum ortamında PTFE' nin yağlama özelliklerinin benzer olması da bir avantajdır. PTFE' nin saf halde kullanımının sınırlı olmasının nedeni düşük aşınma direncine sahip olmasıdır.



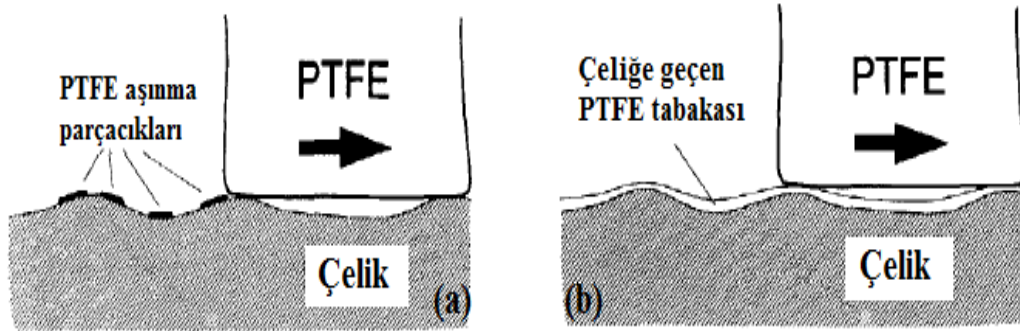
Şekil 1.25.PTFE' nin sürtünme katsayısına kayma şartlarının etkisi (Dowson,1998)

PTFE molekülleri aşırı yüksek kohezyon sergilerken moleküller arası gerilmesi çok yüksek değildir. Bu nedenle PTFE kesmede kolaylıkla akma gösterir. PTFE' nin yük taşıma kapasitesi düşüktür, bu nedenle Robert (1990)'a göre temas gerilmeleri 1200

MPa' ı aşan kaplama uygulamalarında kullanılamaz. Sürünme direnci ve akma dayanımı cam veya grafit fiberleri gibi takviye elemanlarıyla takviye edilerek artırılabilir.

PTFE aşınma direncini artırmak için yaygın olarak kompozit şeklinde kullanılan ham malzemedir. PTFE için hemen hemen her inorganik ve bazı organik dolgu maddeleriyle aşınma oranı azalır. PTFE ve PTFE 'nin kompozitlerinin sahip olduğu özellikle düşük kayma hızları ve orta sıcaklıktaki düşük sürtünme özellikleri transfer film mekanizmasıyla açıklanabilir. Polimer kayma hareketiyle deforme olduğunda, yüzeyin yakınındaki moleküller kayma yönünde yüzeye yakın yerde büyük kesme gerilmelerine bağlı olarak kayma doğrultusunda yönelirler.

Metaller veya camlar gibi yüksek adezyona göre düşük kohezyon nedeniyle polimerden elde edilen kalkmış malzeme karşı malzemeye transfer olur. Karşı malzeme üzerine geçer (Şekil 1.26). Eğer kayma yönü tersine çevrilirse, sürtünme katsayısı temastaki yönlenmeden dolayı artar. Yüksek sıcaklık ve yükleme durumunda karşı yüzeye transfer edilen tabaka miktarı artar.



Şekil 1.26. PTFE malzemenin çeliğe teması (a) PTFE aşınma parçacıklarının çelik yüzeye yapışması (b) Belli bir devirden sonra PTFE tabakasının çelik üzerinde oluşması (Dowson, 1998)

PTFE' nin tribolojik özellikleri çok geniş şekilde çalışılmıştır. Ancak PTFE'nin sürtünme ve aşınma özellikleri hakkında çok az bilgi vardır. Yaklaşık 1 μ m kalınlığa sahip olan ince PTFE tabakalar PVD teknikleri kullanılarak değişik yüzeyler üzerinde elde edilir. Beklenen durumun tersine ham PTFE' ye göre püskürtülen PTFE filmlerin sürtünme özellikleri daha kötüdür. Buna rağmen PTFE filmlerinin aşınma direnci ham PTFE'ye göre daha iyidir. 1 μ m kalınlığa sahip metal üzerine

püskürtme uygulanmış PTFE kaplamaların sürtünme ve aşınma özellikleri orijinal PTFE'yle değişik çevre ve sıcaklıklarda Nishimura vd (1998) tarafından karşılaştırılmıştır. Burada püskürtme PTFE kaplamaların sürtünme katsayısı azot ve vakum ortamında, kuru havada çelik üzerinde kayan PTFE plakasının diğerine göre iki kat daha yüksek olduğu belirlenmiştir. İlk aşamada 20-50 devirde sürtünme katsayısı 0,3 – 0,35 arasındadır. Daha sonra hız artıkça bu değer 0,4 olup tekrar ilk değere düşüş göstermektedir.

Püskürtülen PTFE filmleri amorf yapı gösterirler ve orijinal PTFE'ye göre kimyasal olarak daha aktif, daha sert ve gevrektiler. Püskürtülen PTFE'nin ısı kararlılığı ham PTFE'ye göre daha düşüktür. Film 60 °C civarında azar azar buharlaşır ve ağırlık kaybı 240 °C 'nin üzerine çıkılırken hızla artar. Oysa ham PTFE 500 °C'yi aşan sıcaklıklara kadar buharlaşma göstermezler.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yuan vd (2011) çalışmalarında; aşınma uygulamalarında kullanılan WC-Co'dan oluşan ve yağlayıcı olarak katı Cu ve MoS₂ kullanılan kaplamaların özelliklerini incelemişlerdir. Kaplama işlemi yumuşak çelik üzerine atmosferik plazma yöntemi kullanarak uygulanmıştır. Çalışmada kullanılan besleme tozları mekanik olarak karıştırılarak sinterlenmiştir. Yapılan kaplamaların tribolojik özellikleri ball-on-disk aşınma cihazı kullanılarak atmosfer şartlarında yapılmıştır. Ayrıca yapılan kaplamaların mikro yapı incelemeleri optik mikroskop, SEM, X-ray yöntemleri ile incelenmiştir. Çalışmada Sulzer Metco marka FU-MB HP plazma sprej tabancası kullanılmıştır. Kaplamadan önce yumuşak çelik alt malzemelerin silisyum karbür kumla yüzeyleri pürüzlendirilmiştir. Kaplama 300 µm kalınlığındadır ve aşınma deneyleri yağsız olarak yapılmıştır. WC-Co-Cu-MoS₂ kaplamaların sürtünme ve aşınma davranışları WC-Co kaplamalara göre daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır.

Sahu vd (2010) çalışmalarında; plazma sprej yöntemiyle metal malzeme üzerine metal-seramik kompozitlerin kaplanarak erozyon aşınması, karakterizasyonu ve işlemin yapılmasını incelemişlerdir. Kaplama işlemi farklı plazma torcu güçlerinde (9–18 kW DC) değişik oranlarda alüminyum üzerine yapılmıştır. Plazma sprej kaplamalar değişik DC güç seviyelerinde (9–18 W) ark plazma torcu kullanılarak yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir. Plazma yönteminde torç gücü arttıkça kaplama kalınlığı artmaktadır. 12 kW güçte adezyon gerilmesi artmıştır. Maksimum adezyon gerilmesi %15 Al karışımında 34,5 MPa elde edilmiştir. Çalışmada aşındırıcı boyutu ve mesafesi aşınma oranını en az etkileyen faktör olarak bulunmuştur.

Sun (2010) çalışmasında; 1M H₂SO₄ solüsyonunda düşük sıcaklık plazma karbürize işlemiyle üretilmiş 316L paslanmaz çelik üzerindeki sertleştirilmiş tabakanın elektrokimyasal davranışını ele almıştır. 316L paslanmaz çeliği 1M H₂SO₄ solüsyonunda iyi korozyon özelliğine sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Mindivan (2010) çalışmasında; AA2024-T6 alüminyum alaşımlarına plazma sprej ve HVOF yöntemleri kullanılarak ETFE (Etilentetrafloraetilen) kaplamalar uygulamış ve elde edilen kaplamaların mikroskobik incelemeleri, gözeniklik, temas

açısı, sertlik ölçümleri yapılmıştır. 25 mm çapında hazırlanan numune yüzeylerini kaplama öncesinde kum ile pürüzlendirmiş ve ara Ni-Cr kaplamasına tabi tutmuştur. Numunelere ASTM G133 standardına göre aşınma testi yapılmıştır. Kuru şartlarda HVOF sprej kaplamada plazma sprej kaplamaya göre daha düşük sürtünme katsayısı elde edilmiştir. HVOF sprej kaplama, plazma kaplamaya nazaran daha iyi aşınma direncine sahip olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çalışmada HVOF kaplama için daha iyi sonuçlar alınmıştır. HVOF sprej kaplama ile WC-12Co %6 EİFE kaplanması asit ve kuru ortamlarında mükemmel direnç, düşük sürtünme katsayısı, yüksek sertlik ve temas açısı elde edilmiştir. HVOF kaplamalardan asit ortamında olan aşınma dirençleri kuru ortama göre yarım kat daha büyük elde edilmiştir.

Kim vd (2010) çalışmalarında; 100 µm ve 200 µm kalınlıklarda paslanmaz levhalar dizilerek cıvata ile tutturulmuştur. Hazırlanan sandviçler basınç ve vakum altında tutulmuştur (125°C; 0,6 MPa). İki film arasına PE (polietilen) tozlar püskürtülmüştür. Bu tozlar 120°C, 40 MPA basınçta ısıtılmıştır. Çalışmanın aşınma deneyleri için pin on disk aşınma tezgâhı kullanılmıştır. Çelik disk 240 mm çap ve 12 mm kalınlıktadır. Lineer hız 0.06 m/s'dir. Çalışmada Pe ile kaplanmış malzemeler 10 dakika plazma işlem süresinde güvenilir, kendini yağlayan malzeme özelliği gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Fei vd (2010) çalışmalarında; M_6Si_2 kaplamalar atmosferik plazma püskürtme ve vakum plazma püskürtme yöntemleri kullanılarak yapılmıştır. Yapılan kaplamaların mikro sertlik değerleri, boşluk ve oksijen içerikleri incelenmiştir. Ayrıca kaplamaların yüksek sıcaklıktaki oksidasyon davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Kaplamadan önce alt malzemeyi etanol ile temizlemişlerdir. Ayrıca çalışmada gaz olarak argon ve hidrojen kullanılmıştır. Çalışmaların sonucunda 1500 °C'de yapılan vakum plazma püskürtme kaplamaların oksidasyon direnci atmosferik plazma püskürtme kaplamalara göre daha iyi elde edilmiştir.

Marcinauskas vd (2010) çalışmalarında; atmosferik plazma jeti kullanılarak karbon kaplamalar uygulamışlardır. Çalışmada plazma tabancasının çıkışı ile alt malzeme arasındaki mesafenin kaplama özelliklerine etkisi incelenmiştir. Çalışmada plazma

gazı olarak argon ve asetilen kullanılmıştır. Çalışmada altlık malzeme arasındaki mesafe 5-20 mm ve 1200 dk işlem süresi seçmişlerdir.

Vargas vd (2010) çalışmalarında; APS ve alev yöntemleri kullanılarak Al_2O_3 -13% O_2 (Al-13) ve Al_2 -43% O_2 (Al-43) kaplamalar uygulamışlardır. Çalışmada alt malzeme olarak AISI 304 paslanmaz çelik kullanılmıştır. Aşınma deneylerinde ball-on-disk yöntem uygulanmıştır. Çalışmada Al-13 kaplamaların aşınma direncinin Al-43 kaplamalara göre daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca çalışmada sprey parametrelerinin kaplama kalitesine etki etmediği sonucuna da ulaşılmıştır.

Dowling vd (2010) çalışmalarında; kâğıt üretimi ve gemicilik alanlarında büyük sorun olan organik ve inorganik kirlilik incelenmiştir. Çalışmada çelik alt malzeme yüzeylerine floropolimerin, florinli ve florinli olmayan silikon kaplamalar uygulanmış ve bunların kirlenme özellikleri incelenmiştir. Kaplama işleminde atmosferik plazma jet sistemi kullanılmıştır. Alt malzeme olarak AISI 316L paslanmaz çelik kullanılmışlardır. Yapılan kaplamalarda kirlenmezliği sağlamışlardır.

Samad vd (2010) çalışmalarında; takım çelikleri üzerine UHMWPE kaplamışlardır. Kaplama film kalınlığının yanında normal yük, kayma hızı gibi tribolojik özelliklere etki eden faktörlerin kaplama kalitesine olan etkisi incelenmiştir. Ayrıca değişik yük ve değişik hızlardaki aşınma ömrü ve sürtünme katsayısı özelliklerini incelemiştir. Numunelere 30W gücündeki RF vakum plazma 5 dk süresince uygulanmıştır. Yapılan plazma kaplama işlemi sonucunda kaplanan numunelerin aşınma ömürleri 10-12 kat artmıştır. En iyi aşınma ömrünün elde edildiği kalınlık değeri 2 μm olduğu belirlenmiştir.

İbrahim vd (2010) çalışmalarında; düşük karbonlu çelik üzerine hava plazma sprey yöntemi kullanarak alüminyum, 13% titanyum toz püskürtülerek kaplamıştır. Yapılan kaplamaların yorulma ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Aşınma deneyleri 70 rpm hızda, 500 g yükte ve 1000 m şartlarında gerçekleşmiştir. Çalışma sonunda yapılan kaplamalarda yüksek sertlik ve aşınma direnci elde edildiği Al_2O_3 -13% TiO_2 (AT- 13)'in mikro yapısının mekanik özelliklerin geliştirilmesinde ve kaplamaların abrasyon direncini arttırmada önemli rol oynadığı sonucuna varılmıştır.

Yugeswaran vd (2010) çalışmalarında; plazma sprey parametrelerinin kaplama özelliklerine etkisini ve plazma jet sıcaklığını ele alarak mikro yapı, kayma ve abrazif aşınma oranları, gözeneklilik ve mikro sertlik özellikleri incelemişlerdir. Çalışmada alt malzeme olarak AISI 4C26 kullanılmıştır. Numunelere kaplama öncesi kumlama işlemi yapılmıştır. Kayma aşınma deneylerinde pin-on-disk yöntemi kullanılmıştır. Bazı araştırmacılar plazma torç giriş gücü ve plazma gaz akış oranı parametrelerini birleştirerek kritik plazma püskürtme parametresini (CPSP) tanımlamışlardır. Çalışmada 833.33, 1000 ve 1166.66 olmak üzere üç farklı CPSP değeri kullanılmıştır. Çalışma sonunda Al %13 Ti kaplamaların en iyi kayma aşınması ve düşük gözenek elde edilmiştir. Al %13 Ti kaplamalar için en yüksek sertlik 1166,66 kritik plazma değerinde elde edilmiştir. Al %40 Ti kaplamalarda ise 1166,66 kritik değerde en düşük sertlik ve yüksek gözeneklilik elde edilmiştir.

ShunyanTao vd (2010) çalışmalarında; Al_2O_3 ve Cr_2O_3 kaplamalar atmosferik plazma sistemini kullanarak uygulamış ve yapılan kaplamaların tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Aşınma deneyleri kuru sürtünme şartları altında oda sıcaklığında yapılmıştır. Al_2O_3 /bakır alaşımları, Cr_2O_3 /bakır alaşımlarına göre daha düşük sürtünme katsayısı aşınma oranı sergiledikleri sonucuna varılmıştır.

Tekmen vd (2009) çalışmalarında; mekanik alaşımlanmış Al-12Si/TiB₂/h-BN kompozit tozları alüminyum alt malzeme üzerine atmosferik plazma püskürtme yöntemiyle kaplamışlardır. Çalışmada mekanik alaşımlamanın ve plazma püskürtme parametrelerinin kompozit tozuna ve kaplama yapısına olan etkisi incelenmiştir. Al-12Si/TiB₂/h-BN ve sterik asit argon atmosferinde 100rpm hızında 1,3,5,7,24,48 saat sürelerinde mekanik olarak alaşımlandırılmıştır. Al-12Si toz boyutu 32-106µm, TiB₂ ve h-BN tozlarının boyutları ise 73 µm ve 16 µm'dir. Plazma işlem parametreleri şu şekilde seçilmiştir; plazma akımı 400-500-600 A, primer gaz akış oranı 40 l/dk, sekonder gaz akış oranı 6-8-10l/dk, taşıyıcı gaz akış oranı 4 l/dk; toz besleme oranı 8 g/dk ve püskürtme mesafesi 100mm. Yapılan çalışmada mekanik alaşımlama süresi artırıldığında toz şekli yassı halden yuvarlak hale dönüştüğü sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca araştırmacılar ark akımındaki artışın Si parçacıklarının büyüyerek çökmesine neden olduğu ve böylece kaplama sertliğini artırdığı sonucuna da ulaşmışlardır.

Bertaux vd (2009) çalışmalarında; tekstil üreticilerinin önemli konularından olan giysi rahatlığını arttırmayı amaçlamışlardır. Bunun için farklı özellikte yapılmış iki çeşit çorap alınmıştır. Çalışmada çoraplar üzerine siloksan plazma kaplama işlemi yapılmıştır. Plazma işlemi 13,56 MHz RF uyarma özelliğine sahip CCP (capacitively coupled plasma) yöntemiyle yapılmıştır. Plazma uygulama süresi 1-10 dk arasında değişmektedir. Numuneler 15 W, 15 Pa, 1 dk Ar/O₂ ile aktivasyona tabi tutulmuşlardır. Kaplama işlemi yapıldıktan sonra 1 saat, 40 °C, deterjan kullanılarak 2 kg yükte yıkanmıştır. 10 yıkamadan sonra meydana gelen bozulma kaplanan numunelerde görülmemiştir. İncelenen numunelerin sürtünme katsayısı tekstil sürtünme analizi ile belirlenmiştir. Çalışmada kaplanan numunelerin sürtünme katsayısında %50 düşüş elde edilmiştir. Ancak beklenen sonuç tam olarak elde edilememiştir.

Guruvenkent vd (2009); AISI 410 martenzit paslanmaz çelik yüzeylerin performanslarının geliştirilmesini amaçlamıştır. Çalışmada AISI 410 levhalar 30 dk boyunca 1253 K sıcaklıkta beklenmiş ve numuneler havada sertleştirilerek 823 K'de 2 saat temperlenmiştir. Daha sonra numuneler ultrasonik olarak temizlenmiş ve 10 cm çapa sahip elektrotla 13,56 MHz RF plazmayla hazırlanmıştır. Numunelere yüzey nitrürleme işlemi nitrojen plazma 3 saat ve 26 Pa basınçta yapılmıştır. Nitrürleme işleminden sonra plazma destekli kimyasal buhar yöntemi kullanılarak işleme tabi tutulmuşlardır. Daha sonra numunelerin mekanik ve tribolojik özellikleri belirlenmiştir. Çalışmada plazma nitrürleme işlemi ile AISI 410 çelikte sert difüzyon tabakası oluşumu belirlenmiştir. Bunun yanında düşük alaşımlı çelik kaplama ara yüzey sisteminin tribolojik performansı ve adezyonu iyileştirilmiştir.

Dasalusca vd (2009) çalışmalarında; ticari olarak uygun olan PTFE tabanlı kaplamaların (C1;C2;C3) tribolojik özellikleri incelenmiştir. Kaplama işlemi için alt malzeme olarak gri dökme demir, sinterlenmiş demir ve Al₃90-T6 olmak üzere üç farklı malzeme kullanılmıştır. Kaplama işleminden önce numuneler kir, yağ gibi atıklardan temizlenmiştir. Kaplama işlemi için vakum çemberinin sıcaklığı -20°C ile 120°C arasındadır. Vakum çemberinin basıncı 27 Pa'dır. Deneyler CO₂ soğutucu çevrede ve 23°C'de yapılmıştır. Çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır. Yükleme şartları altında kaplamaların büyük çoğunluğu hızla aşınmıştır. Özellikle C1 ve C2 malzemelerin Al₃90-T6 üzerine kaplandığı numuneler yok olmuştur. Buna rağmen

aynı şartlarda C3 malzemesi daha üstün özellik göstermiştir. Yüksek basınçta çalışan CO₂ soğutucu kullanılan kompresörler için bu kaplamalar uygundur. Yüksek CO₂ basınçlarında (1378951,4 Pa=200 psi) her iki kayma yüzeyinde daha dirençli tabaka elde edilmiştir. CO₂ basıncının arttırılmasıyla uygun elektrik ve yapısal değişiklikler meydana gelmiştir.

Li ve Yan (2009) çalışmalarında; PTFE ve PI'nın kuru kayma şartları ve kum-toz şartlarındaki aşınma davranışlarını incelemiştir. Çalışmada 50 µm boyutundaki PTFE ve 250 µm boyutundaki PI tozlarından oluşan numuneleri kullanmışlardır. PTFE tozları 50 MPa basınçta 2 dk sürede kalıpta preslenmiştir ve arkasından 375 °C sıcaklıkta 4 saat fırında sinterlenmiştir. PI tozları ise 120 MPa basınçta 2 dk sürede kalıpta preslenerek 40 MPa basınçta ve 345°C'de 40 dk sürede fırında sinterlenmiştir. Her iki numunede 40 MPa basınçta oda sıcaklığında soğutulmuşlardır. Hazırlanan numunelerin kuru kayma deneyleri ve kum-toz abrasif aşınma testleri blok-on-ring yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Tüm aşınma deneyleri 0,42 m/s kayma hızında, 20°C ortam sıcaklığında, %50 bağıl nemde, 50 N; 100 N; 150 N; 200 N; 250 N; 280 N değişik yüklerde yapılmıştır. Çalışmada hem PTFE hem de PI malzeme için kum-toz boyutunun artmasıyla yüksek aşınma oranlarını oluştuğu belirlenmiştir. Bunun nedeni büyük tozların daha fazla güçte etki etmesidir. Kuru kayma şartlarında PTFE ve PI'nın aşınma oranları yükün artmasıyla artmaktadır. Bunun yanında kum-toz şartlarında yükün artmasıyla PTFE'nin aşınma oranı artarken PI'nın aşınma oranının düştüğü sonucuna varılmıştır.

Venkateswarlu vd (2009) çalışmalarında; elmas destekli kompozit (DRC) kaplamaları oksitasetilen (OA) ve yüksek hızlı oksit yakıt (HVOF) termal teknikleri kullanarak yumuşak çelik üzerine uygulanmasını ve yapılan kaplamaların abrasif aşınma davranışlarını incelemiştir. Çalışmalarda kullanılan kompozit karışım kompozisyonları şöyledir: %10 C, %25 WC ve %65 Bronz; %15 C, %25 WC ve %60 Bronz; %20 C, %25 WC ve %55 Bronz. Çalışmada kullanılan bronz %85 Cu ve %15 Sn içermektedir. Kullanılan tozlar 10 dk dişli top milinde karıştırılmıştır ve 120°C'de 1 saat uçucu madde ve nemi yok etmek için kurutulmuşlardır. Oksitasetilen işlemi için alt malzeme yüzeyini 120 mesh zımpara kâğıdıyla zımpara işlemine tabi tutmuşlardır. Yumuşak çelik yüzeyi ~250°C'ye kadar oksitasetilen tork kullanılarak ısıtılmış ve malzemeler ~10 cm mesafede püskürtülmüştür. Son olarak kaplanan

numuneler zımpara ile parlatılmıştır. HVOF termal püskürtme işleminden önce numunelerin yüzeyleri ultrasonik olarak temizlenmiştir. Karışma odasında oksijen, yakıt gazı ve taşıyıcı gaz (argon) karıştırılmıştır. Kaplanan numunelere aşınma deneyleri uygulanmıştır. Aşınma deneyi öncesinde numuneler 400 mesh SiC zımpara kâğıdıyla parlatılmıştır. Aşınma deneyinde kullanılan yük 7,5 N-15 N'dur. Deneyler 400 devirde ve 65 mm çizme mesafesi ile sınırlandırılmıştır. Çalışmada HVOF püskürtme yöntemiyle yapılan kaplamaların OA yöntemi kullanılarak yapılan kaplamalara göre daha geç aşındığı sonucuna ulaşmışlardır.

Yuan vd (2009) çalışmalarında; Cu elektrokimyasal emdirme ile modifiye edilmiş ve atmosferik plazma sistemiyle elde edilmiş WC-Co kaplamaların tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Kaplamaların tribolojik özelliklerini belirlemek amacıyla ball-on disk yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan WC-Co alaşım tozunun kimyasal kompozisyonu %88 WC ve % 12 Co olup 15-45µm boyutundadır. Aşınma deneyleri 0,5 m/s kayma hızı ve 600m kayma mesafesi, 10 N yükte, 25°C sıcaklık ve % 63 bağıl nemde yapılmıştır. Cu elektrokimyasal emdirme ile modifiye edilmiş kaplamaların aşınma oranlarının Cu elektrokimyasal emdirme ile modifiye edilmemiş kaplamalara göre daha düşük olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bunun nedeninin Co'nun bakıra kendi kendine yağlama özelliği kazandırmasıdır.

Yang ve Li (2009) çalışmalarında; 1Cr18Ni9Ti paslanmaz çelikten oluşan alt malzeme üzerine Fe-Ni-B kompozit metalin hava plazma sprey yöntemi kullanarak kaplanması incelenmiştir. Bu işlem ile alt malzemeye iyi mekanik ve radyasyon koruyucu özelliği sağlanması amaçlanmaktadır. Yapılan çalışma sonunda Fe-Ni-B kaplamaların mikro yapısı ve adezyon gerilmesi yeniden eritme prosesiyle önemli ölçüde etkilenmektedir. Ayrıca adezyon gerilmesi bu işlemle 36,6 MPa'dan 425 MPa'a çıkarılmıştır. Bu da işlemin etkisinin yüksek olduğu sonucuna varılmıştır.

İbrahim vd (2009) çalışmalarında; alümina titanyum (AT-T3) kaplamaları uygulamışlardır. Kaplanan yüzey 248nm dalga boyu ve 24ns vuruş süresince darbe süresinde ekzimer lazere tabi tutularak yüzey pürüzlülüğü 0,7mm yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir; Lazerle işlem görmüş numunelerin geliştirilmiş ve poroziteleri önemli ölçüde azaltılmıştır. Bunun yanı sıra lazer işlemi tane yapısında küçülmelere neden olduğu belirlenmiştir.

Tian vd (2009); plazma püskürtme yöntemiyle değişik besleme tozu kullanarak kaplama işlemi yapmışlardır. Daha sonra yapılan kaplamaların aşınma ve 3-body abrasif aşınma deneyleri yapılmıştır. Çalışmada kullanılan tozların kimyasal bileşimleri aynı olsa da üretim yöntemleri farklıdır. Kaplama işleminde 9 MB plazma torcu kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri 300 g yükte ve 5 farklı ölçüm alınarak yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre kaplama mikro yapısına besleme tozunun etkisi büyüktür. NP kaplamalar homojen ve yoğun yapıya sahiptirler.

Zhang vd (2009) yaptıkları çalışmada C7C kompozit alt malzeme üzerine çift alev plazma yöntemi kullanılarak tungsten kaplama işlemi uygulamışlardır. Plazma işlemi için 3 elektrot vakum çemberinde 2 negatif şarj edilmiş parça ve 1 anot olmak üzere dizayn edilmiştir. Plazma işlem parametreleri şu şekildedir; kaynak voltajı 950 V; katot gerilimi 500 V; tutma süresi 4 saat; çalışma basıncı 50Pa; yüzey ile uç arası mesafe 15 mm ve sıcaklık 1000°C'dir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir; Yoğun W tabakası C/C kompozit alt malzemeden dışarıya doğru dik sütunsal şekilde tanelerden oluşur. C/C alt malzeme ile W kaplama tabakası arasında petek şeklinde transfer tabakası oluşmuştur. W kaplama ve C/C altlık için adesif kuvvet 21N'dur.

Twomey vd (2009) çalışmalarında; nano ölçüde incelikte plazma yöntemiyle yapılmış kaplamaların mekanik deneyleri, pin-on-disk aşınma deneyleri ve parçalanma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Parçalanma deneyleri incelendiğinde plazma uygulama süresi arttırıldığında sünek kırılmadan gevrek kırılmaya geçiş görülmüştür. Çalışmada polimerik ve silika tip kaplamalar PDMS, HMDSO ve TMDSO silikon öncü malzemeler ile elde edilmiştir. Çalışmada bu üç öncü malzemenin kaplama özelliği öncü malzeme tipinden bağımsızdır. Ancak önemli ölçüde plazma seviyesinden etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca öncü malzemelerin aşınma dirençleri sıralandığında PDMS>TMDSO>HMDSO sonucuna da varılmıştır.

Mindivan (2009) yaptığı çalışmada; AA2024-T6 alüminyum alaşımının üzerine WC-12Co %6 ETFE kaplamalarını plazma sprey ve yüksek hızda oksijen yakıt (HVOF) yöntemlerini kullanarak uygulamışlardır. Mindivan çalışmasında ayrıca yaptığı kaplamaların aşınma davranışını incelemiştir. Aşınma deneyleri kuru (20°C ve %30

bağıl nem) ve asit ortamında 15N yük altında yapmıştır. Mindivan kaplama işleminden önce numune yüzeylerini kum püskürtme ile pürüzlendirmiştir. Çalışmada şu sonuçlar elde edilmiştir; HVOF püskürtülmüş WC-12Co%6 ETFE kaplamalar kuru ve asit ortamında aşınmaya karşı çok dirençli davranmışlardır. Ayrıca plazma kaplamalara nazaran düşük sürtünme katsayısı, yüksek sertlik ve temas açısı elde edilmiştir. HVOF püskürtülmüş WC-12Co%6 ETFE kaplamalar asit ortamında test edildiğinde plazmaya göre aşınma oranı,5 kat fazladır. Buna rağmen %5 hacimde H₂SO₄ solüsyonundaki plazma spreyle kaplanmış WC-12Co%6 ETFE numuneler kuru şartlara nazaran daha düşük aşınma direnci gösterirler.

Liang vd (2009) yaptıkları çalışmada; nano boyutta toz kullanarak ZrO₂ %15 Al₂O₃ (ZA15) ve ZrO₂ %30 Al₂O₃ (ZA30) kompozit kaplamaları hava püskürtme yöntemi kullanarak uygulamışlardır. Daha sonra yapılan kaplamaların kaplama yapısı, termal iletkenlik ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Kaplamaların aşınma davranışları ball-on-disk yöntemi ile kuru kayma şartları altında, değişik kayma hızlarında ve yüklerinde incelenmiştir. Liang ve arkadaşları yaptıkları çalışmalardan şu sonuçları elde etmiştir; ZA30 kaplamalar ZA15 kaplamalara göre düşük parazite ve yüksek termal iletkenlik göstermiştir, ZA30 kaplamaların ZA15 kaplamalara göre mekanik özellikler dikkate alındığında yüksek mikro sertlik, yüksek modüller ve alt malzemeye iyi yapışma gösterdiği belirlenmiştir. Tüm çalışma şartları için ZA30 kaplamaların aşınma direnci ZA15 kaplamalara göre daha iyi olduğu sonucu elde edilmiştir. Kaplamaların tribolojik davranışları kaplamaların fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. ZA30 kaplamaların ısı iletkenliği yüksek olduğu için temas sıcaklığı ve termal gerilmelerin düşmesiyle düşürerek aşınma direncini arttırmaktadır.

Touzin vd (2008) çalışmalarında; tıp sektöründe kullanılan stentlerin uzun ömür performansı ve güvenliğinin artırılması için metal ultra ince kaplamaları ele almışlardır. Çalışmada alt malzeme olarak 316 L paslanmaz çelik stent malzemesi kullanılmıştır. Alt malzemeye kaplama işleminden önce ultrasonik temizleme, elektro parlatma, aside daldırma işlemi uygulanmıştır. Plazma ile alt malzeme üzerine teflon, benzen kaplanmıştır. Çalışmada plazma kaplama işlem parametreleri şu şekilde seçilmiştir. RF tepe güç girişi 100W; gaz basıncı 0.93 bar (93 kPa); işlem

süresi 90dk. Yapılan çalışmada tıpta kullanılan stentlerin performansları kaplama işlemiyle özel kimyasal kompozisyon elde edilerek artırılmıştır.

Zhao vd (2008) çalışmalarında; ultra iyi yapıda (NZTA) ve mikro yapıda (MZTA) Al_2O_3 -% 40 ZrO_2 kaplamaları atmosferik plazma püskürtme yöntemiyle üretilmiştir. Yapılan kaplamaların sürtünme ve aşınma davranışları kuru sürtünme şartları altında ve oda sıcaklığında yapılmıştır. Çalışma sonunda Al_2O_3 -% 40 ZrO_2 ultra iyi tozlar parçalama sinterleme kullanarak atmosferik plazma için uygun olduğu NZTA kaplamaların MTZA kaplamalara nazaran daha iyi aşınma direnci gösterdiği sonucu elde edilmiştir.

Yin vd (2008) yaptıkları çalışmada plazma püskürtme yöntemi kullanılarak Al_2O_3 -AL kompozit kaplama uygulayarak kaplamaların mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir; Al_2O_3 -Al kompozit kaplamalar Al_2O_3 kaplamalarla kıyaslandığında düşük sertlik gösterirler. Al_2O_3 -Al kompozit kaplamalar Al_2O_3 kaplamaların aşınma direnci Al_2O_3 kaplamalara göre daha iyidir. Kompozitlerin anti aşınma özelliğini kazanabilmesi geliştirilmiş tokluk, mukavemet ve termal yayılma gücüyle sağlanmaktadır.

Kabayashi vd (2008) çalışmalarında; 304 paslanmaz çelik üzerine metalik cam tozu atmosferik plazma yöntemiyle püskürtülmüştür. Plazma işlemi için torç gücü 20 kW, ark akımı sırasıyla I=200, 300, 400 A olarak seçilmiştir. Argon gaz akış debisi 170 l/dk olup, alt malzeme ile torç arasındaki mesafe 50 mm'dir. Püskürtme süresi 30 saniyedir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir; Metalik cam kaplamanın sertliği HV_{50} 1000-1100'dür. Bu sertlik tozun sertlik değeri mertebesindedir. Vickers sertlik değeri plazma akımını arttırılmasıyla arttırmaktadır. Yüksek akımlarda yüksek sertlik elde edilmektedir. 400 A'de HV_{50} 1100 sertlik değeri elde edilmiştir.

Marks (2008) yaptığı çalışmada 304 paslanmaz çelik üzerine uygulanan %10-%20 HA silika oranında silika kaplamaların mekanik ve mikro yapı özellikleri incelenmiştir. Kaplama öncesi alt malzeme pürüzlendirilmiştir. Kaplama işlemi atmosferik çemberde yapılmıştır. Yapılan kaplamanın SEM sonuçları incelediğinde silika oranı artıkça gözenegin düşerek daha yoğun yapının oluştuğunu gözlemlemiştir. Gözenegin düşmesiyle HA/ SiO_2 kaplamaların sertliği saf HA

kaplamalara göre daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca HA/SiO₂ kaplamaların abrasif aşınma direncinin silika parçacık ilavesiyle arttığı bu artışın nedeninin silika parçacıkların kaplanmış malzemeye kendi kendini yağlama özelliği kazandırdığı sonucuna varılmıştır.

Evcin vd (2009) yaptıkları çalışmada; biyo uyumluluğu nedeniyle yaygın olarak tercih edilen hidroksiapatit (HA) malzemenin çelik alt malzeme üzerine atmosferik plazma püskürtme yöntemi kullanılarak yapılmasını incelemişlerdir. Çalışmada alt malzeme olarak 316 L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Kaplama işleminden önce numunelere kumlama işlemi uygulanmıştır. Çalışma sonunda şu sonuçlar elde edilmiştir; kaplama tabakasının yüzey pürüzlülük değerleri ve kumlama şartlarına göre 4,203-5,607 µm arasında elde edilmiştir. Kaplamaların mikro sertlik değeri 580 HV'dir. Metalin üstün mekanik özelliklerine ilave olarak kaplanan hidroksiapatitin biyo uyumluluğunun da katkısıyla fonksiyonel biyomalzeme üretilebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Demas ve Polycapou (2008) yaptıkları çalışmada; hava şartlarında kullanılan polimerik PTFE tabanlı kaplamalar incelenmiştir. Çalışmada kaplama malzemesi olarak PTFE tabanlı 3 farklı (Du-pont 958–303; Du-pont 958–414 ve Whitforxylon) malzeme kullanılmıştır. Kaplama işlemleri CO₂ ortamında, çevre şartlarında ve R410A ve bilinen hidroflorokarbon soğutucu ortamında yapılarak elde edilen sonuçlar DLC ile kıyaslanmıştır. Tribolojik deneyler için yüksek basınç tribometresi kullanılmıştır. Deney çemberi 27 Pa vakum basıncında olup 1,72 MPa kadar çıkabilmektedir. Tribolojik deneyler 111 N ve 445 N'da yapılmıştır. Tribolojik deneylerde 2;5;10;60 dakika sürelerle ölçüm yapılmıştır. Çalışma sonunda yaptıkları sürekli yükler altında mükemmel tribolojik karakteristiği, düşük sürtünme karakteristiği ve yüksek aşınma direnci gösterdikleri ve bu nedenle yapılan kaplamaların kompresörler için ekonomik ve basit bir çözüm olduğunu belirlemişlerdir.

Korsunsky vd (2008) yaptıkları çalışmada; uzay parçalarında meydana gelen sürtünme aşınmasının önlenmesi için düşük sürtünme kaplamalarının uygulanmasını ve kaplama özelliklerini çalışmışlardır. Çalışmada iki tip sürtünme önleyici kaplama (geleneksel termal püskürtmeli kuru film yağlayıcı (DFL) kaplamalar ve yeni katı

kaplamalar) çalışılmıştır. Ayrıca çalışmada sürtünme katsayısı (COF) ve artık bağlı kalınlık (RTS) olmak üzere iki temel parametrenin karakterizasyonu ele alınmıştır. Yapılan çalışmadan elde edilen sonuçlara göre mekanik kimyasal kaplanmış kaplamaların MO+S ve C-DLC kaplamalar iyi bağlanmış kuru film yağlama tabakaları oluşturularak tribolojik karakterde önemli ölçüde gelişmeler elde etmiştir.

Ageorges ve Ctibor (2008) çalışmalarında iyi aşınma direncine sahip alümina/titanyum kaplamalar için iki atmosferik plazma püskürtme yöntemini karşılaştırmışlardır. Çalışmada atmosferik plazma kaplama işlemi için gaz stabilize plazma tabancası (GSP) ve su stabilize yüksek püskürtme plazma tabancası (WPS) kullanılmıştır. Plazma gaz karışımı argon/hidrojen sırasıyla 45 ve 15 slm akış oranıyla karışmıştır. Toz 5 slm hızında ve 0,3 MPa basıncındaki taşıyıcı argon gazı ile plazma jetinde verilir. Plazma püskürtme süresi 10 dakikadır. Çalışmada alt malzeme olarak düşük karbonlu çelik kullanılmıştır. Ageorges ve Ctibor çalışmaları sonucunda en iyi aşınma direncini GPS yöntemini kullanarak yapılan kaplamalarda elde etmiştir. Bu durum yüksek mikro sertlik elde edilmesiyle desteklenmiştir. Ayrıca çalışmada kullanılan iki farklı torçtan benzer aşınma direnci özelliği %13 titanyum içeren alümina kaplamalarda elde edildiği sonucuna da ulaşılmıştır.

Barletta vd (2008) çalışmalarında; FR-FBM (Fast Regime Fluidized Bed Machining) yönteminin uygulanmasını ve geliştirilmesini ele almışlardır. Çalışmalarda AISI 1040 çelik üzerine atmosferik plazma yöntemi kullanılarak TiO_2 kaplamalar uygulanmıştır. Çalışmada abrazif boyu, jet basıncı ve işlem süresi gibi FBM işlem parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir; FR-FBM yöntemi üniform ve homojen bir yüzey eldesi geometrik toleranslara uygun olarak yapılır ve yüzey pürüzlükleri 3-4 kat iyileşmektedir. Abrazif mesh boyutu, jet basıncı ve işlem süresi deneylere önemli ölçüde etki etmektedir.

Morks ve Akimoto (2008) çalışmalarında; plazma püskürtülmüş Al_2O_3/TiO_2 kompozit kaplamaların mikro yapısına nozul çapının etkisini incelemişlerdir. Kaplama işlemi için Bay State plazma püskürtme ve SG seri plazma sistemleri kullanılmıştır. Çalışmada 7,5 mm ve 8 mm çapında nozullar kullanılmıştır. Plazma püskürtme işlemi çevre şartlarında yapılmıştır. Çalışmada nozul çapları

kıyaslanmıştır. 7,5 mm nozul çapıyla yapılan $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 8 mm'ye göre daha yoğun bir yapıya ve düşük gözenekliliğe sahiptir. 8 mm nozul çapı kullanılan kaplamalarda hızın azalmasından dolayı gözeneklilik artmıştır. Ayrıca 7,5 mm nozul çapındaki $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kompozit kaplamalar 8 mm nozul çapındaki $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplamalara nazaran yüksek yoğunlukta α - Al_2O_3 fazı elde edilmiştir. $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ kaplamaların Vickers mikro sertlik değeri nozul çapı artırıldığında düşer. Bu durum gözenek, boşluk gibi hatalara bağlıdır. Yoğun yapı ve düşük gözenekçe sahip 7,5 mm çapta nozul kullanılan kaplamalar yüksek abrazyon aşınma direnci gösterirler.

Özel vd (2008) çalışmalarında; Al_2O_3 ve $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ tozları AA2024-T4 alüminyum alaşım yüzeyine atmosferik plazma püskürtme yöntemi kullanarak kaplamışlardır. Çalışmada Al_2O_3 , Al_2O_3 içine %3, %13 ve %40 TiO_2 karıştırılarak 4 farklı kaplama uygulanmıştır ve TiO_2 'nin mikro yapı ile yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir; AA2024-T4 alüminyum alaşımı yüzeyine atmosferik plazma püskürtme tekniği kullanılarak Al_2O_3 ve $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2$ tozları ile kaplanabilmektedir. Kaplanan numunelerin ara yüzeylerinde herhangi bir çatlak oluşumu meydana gelmemiştir. Al_2O_3 içerisine ilave edilen TiO_2 oranının artmasıyla gözeneklilik miktarı azalmıştır. En düşük gözenek miktarı %40 TiO_2 ilaveli numunede elde edilmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülüğü 6,408 μm ; en düşük yüzey pürüzlülüğü ise 3,655 μm olarak elde edilmiştir. İlave edilen TiO_2 miktarının artmasıyla yüzey pürüzlülük değeri azalmıştır.

Gür ve Orhan (2008) yaptıkları çalışmada; St37 çelik yüzeyine yüksek kromlu FeCrC tozunu plazma tungsten ark (PTA) yöntemi kullanarak kaplamışlardır. Çalışmada alt malzeme olan St37 üzerine 0,3 ve 0,6 mm derinliğinde kanallar açılmıştır. Açılan kanallar aseton banyosunda yağ ve kirden arındırılmıştır. Daha sonra açılan kanallara FeCrC tozu konulmuş ve sodyum silikat yardımıyla numune yüzeyine yapıştırılmıştır. Sodyum silikatın yok edilmesi amacıyla 30 dk süresince fırında 50°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Yapılan kaplamaların abrazif aşınma deneyleri oda sıcaklığında pin-on-disk yöntemiyle yapılmıştır. Çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Aşınan numunelerin aynı yükler altındaki kütle kayıp miktarlarının değerleri yaklaşık olarak birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Fakat yüksek enerji girdisinin sağlandığı yani 120 A'lık kaynak akımında yapılan kaplama numuneleri başta olmak üzere alaşımlandırma amaçlı ilave edilen FeCrC tozunun miktarının

artmasına paralel olarak ilgili numunelerde aşınmaya karşı dayanımın daha iyi olduğu ortaya çıkmıştır. Kütle kayıp miktarının en az olduğu numune en iyi aşınma direncini göstermiştir.

Gür vd (2008) çalışmalarında; AISI 1020 düşük karbonlu çelik yüzeyine plazma tungsten ark yöntemini kullanarak Ni/Ti tozlarını kaplamışlardır. Çalışmada alt malzeme yüzeyine freze ile 0,3 mm derinliğinde kanallar açılmış ve kanallar asetonla temizlenmiştir. Açılan kanallara kaplama tozları doldurulmuştur. Kaplama tozlarının kanala yapışması için kullanılan sodyum silikat daha sonra 50°C sıcaklıktaki fırında 60 dk bekletilerek uçması sağlanmıştır. Kaplama işleminden sonra numuneler standart metalografi yöntemleri ile parlatılarak 80 ml etanol + 20 ml HNO₃ + 2 ml HF dağlayıcısıyla 5-10 s süreyle dağlanmıştır. Yapılan bu çalışmanın sonunda AISI 1020 çeliğine farklı enerji girdisi, sabit ilerleme hızıyla yapılan kaplamada 1-3 mm kalınlığında kaplama tabakaları elde edilmiştir. Yapılan kaplamalarda herhangi bir makro ve mikro çatlağa rastlanmamıştır.

Yamane vd(2007) yaptıkları çalışmada; PTFE depolarını kaplanan yüzeyler üzerine değişik şekiller deneyerek aşınma ve sürtünme mekanizmalarını incelemişlerdir. Kaplama işlemi atmosferik plazma yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmada üç farklı malzemeye üç farklı şekil uygulanmıştır. Deney numuneleri düşük karbonlu çelikten yapılmış olup %10 alüminyum veya molibden içeren bakır alaşımıyla kaplanmıştır. Çalışmada yuvarlak (RO), ok (AH) ve yan yatırılmış (SL) olmak üzere üç farklı şekil kullanılmıştır. Kaplanan numuneler pin-on-plate yöntemi kullanılarak aşınma deneyine tabi tutulmuşlardır. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre; Al-bronz kaplamalar düşük sürtünme kuvveti ve RO şeklinde düşük aşınma oranı ve düşük sürtünme gösterdiği belirlenmiştir.

Mark vd (2008) çalışmalarında; gaz tünel tip plazma püskürtme yöntemi kullanılarak hidroksiapatit (HA) kaplamaları ele almışlardır. Yapılan kaplamaların abrasif aşınma deneyleri hava atmosferinde, oda sıcaklığında ve yağlanmamış şartlar altında değişik ark akımlarında yapılmıştır. Kaplama yapılacak alt malzeme olarak 304 paslanmaz çelik seçilmiştir. Plazma püskürtme öncesi alt malzeme yüzeyi alümina tozları ile temizlenmiştir. Çalışmada seçilen ark değerleri I= 250-500 A'dir. Kaplama işleminden önce alt malzeme 600 K'e kadar ısıtılarak soğuma engellenmiştir.

Çalışmadan HA kaplamalarında yüksek ark akımı kullanıldığında yoğun bir yapı ve düşük gözenek elde edildiği; kaplama sertliğinin artmasına bağlı olarak; ark akımının artmasıyla HA kaplamaların abrazyon dirençlerinin arttığı ve HA kaplama kalınlığının 30 µm'den düşük olması durumunda kaplama sertliklerinin artmasına bağlı olarak abrasif aşınma direncinin arttığı sonuçlarına ulaşılmıştır.

Öner ve Can (2008) çalışmalarında; bilinen kaymalı yatak üretim yöntemlerine alternatif olması düşünülen alev faz püskürtme yöntemi ile kaymalı yatak üretmişlerdir. Çalışmada yöntemin etkin parametreleri ve yöntemin avantajları ile dezavantajları ele alınmıştır. Çalışmada kurşun, kalay, bakır ve zirkonyum oksit malzemelerinden oluşan yeni bir alaşımdan krank mili ana yatağı kaplanmıştır.

Orhan ve Buyloz (2007) yaptıkları çalışmada AISI 304 paslanmaz çelik yüzeyine yüksek kromlu FeCrC tozlarını kaplayarak kaplamaların aşınma performanslarını incelemişlerdir. Çalışmada kaplama malzemesi olarak ortalama 60 µm tane boyutuna sahip yüksek kromlu ferrokrom karbon tozuyla ortalama 60 µm tane boyutlu B₄C tozu kullanılmıştır. Elde edilen toz karışımların kaplama esnasında uçmaması için alt malzeme üzerine sırasıyla 1;1,5;2;2,5 mm derinliklerde kanallar açılarak alkol yardımıyla kanala tozlar yapıştırılmıştır. Aşınma deneyler pin-on-disk yöntemi kullanılarak oda sıcaklığında ve atmosfer şartlarında yapılmıştır. Yapılan çalışmada numunelerin üretim parametreleri şu şekildedir; S₁ numunesi; 1,366 gr toz; 75,680 cm/dk üretim hızında, 220 Volt gerilimde, 135 amper akımda, 85 mm kaplama boyundadır. S₂ numunesi; 1,961 gr toz; 67,503 cm/dk üretim hızında, 220 Volt gerilimde, 135 amper akımda, 86 mm kaplama boyundadır. S₃ numunesi; 2,383 gr toz; 72,621 cm/dk üretim hızında, 220 Volt gerilimde, 135 amper akımda, 87 mm kaplama boyundadır. S₄ numunesi; 2,833 gr toz; 63,400 cm/dk üretim hızında, 220 Volt gerilimde, 135 amper akımda, 88 mm kaplama boyundadır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir; Numunelerin aşınma direnci S₄>S₃>S₂>S₁ sıralanmış şekildedir. Aşınmanın kütle kayıplarıyla ilişkili sıralama ise S₁>S₃>S₂>S₄ şeklindedir. S₁'deki kütle kaybının yüksek olmasının nedeni kaplama toz miktarının az ve üretim hızının yüksek olmasıdır. Tüm bu sonuçlara bağlı olarak kaplama toz miktarının ve üretim hızının aşınma performansını etkileyen önemli parametreler olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Costil vd (2006) çalışmalarında; plazma püskürtme yöntemi kullanılarak seramik/flura polimer kompozit kaplamaları ele almışlardır. Çalışmada kaplama malzemesi olarak PFA malzemesi PTFE'ye benzer özelliklere sahip olmasına rağmen ergime durumundaki viskozitesi düşüktür. Çalışmada alt malzeme olarak ise ISO 2017 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Plazma kaplama parametreleri 20 kW güç; gaz akış hızları 40 l/dk argon ve 14 l/dk H şeklinde seçilmiştir. Kaplama işleminden sonra uygulanan aşınma deneyleri ball-on-disk sistemi kullanılarak oda sıcaklığında, 5 N yükte ve 0,5 m/s kayma hızında yapılmıştır. Yapılan kaplamalarla düşük sürtünme katsayısı elde edildiği sonucuna ulaşılmıştır.

Tran vd (2006) çalışmalarında; yüksek dengeli düşük sürtünmedeki ve yüksek abrazyon direnci olan çok ince plazma flura polimer kaplamaları uygulamayı hedeflemişlerdir. Plazma polimerizasyon yöntemi çalışmada kullanılmıştır. Çalışmada malzeme olarak EPDM kullanılmıştır. Malzemenin temiz olması için 150°C'de, 10 MPa basınçta, 25 dakika süre boyunca kükürtle işlenmiştir. Kaplanmış EPDM yüzeyinin daha kaliteli aşınma direncine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Ageorges ve arkadaşları (2006) çalışmalarında; paslanmaz çeliklerin ve krom oksit Sermet kaplamaların imalatı ve tribolojik testlerini içermektedir. Çalışmada kullanılan ham malzeme ergimiş ve ezilmiş 20-45 µm boyutundaki krom oksit (CrO₃) tozları ve 20-35 µm boyutundaki gaz atomize paslanmaz çelikten (demir esaslı %17 Cr ve %12 Ni) oluşur. Her iki tozlar eş zamanlı olarak iki ayrılmış enjektör tarafından atmosfer basıncında (AP) doğru akım (DC) plazma jeti ile enjekte edilmiştir. Çalışmada değişik paslanmaz çeliklerin krom oksit yüzdesinin kaplamanın mikro yapısal ve tribolojik özelliklere etkisi incelenmiştir. Sürtünme aşınmasına uyarlanmış aday malzeme atmosferik plazma sprey (APS) veya düşük basınç plazma sprey (LPPS) yöntemi ile 2-6 N oranlarındaki yük altında 1100-1600 HV sertlikleri elde edilmiştir. Çalışmada kompozit kaplamaların kuru ve yağlı abrazyon aşınması direnci detaylı olarak ele alınmıştır. Atmosferik plazma püskürtme sistemi olarak geleneksel iki toz enjektörü, bir dönen silindirik numune kabı, iki hava soğutma engeli ve numunenin püskürtme sırasındaki ortalama sıcaklığını gösteren tek renkli IR yüksek sıcaklık ölçerinden oluşan bilinen DC plazma tabancasını kullanmışlardır. Krom oksit ve paslanmaz çeliğin 2400°C ve 1370-1400°C arasındaki farklı ergime sıcaklıklarından dolayı iki malzeme için ayrı enjektörlerde püskürtülmüştür. Birinci

enjektör torcun içine yerleştirilmiş ve seramik tozlar için kullanılmıştır. İkinci enjektör ise metalik tozlar için kullanılmış ve dışarıya yerleştirilmiştir. Yapılan kaplamaların mikro sertlik ölçümleri 10s boyunca 5N'luk bir yük uygulanarak Vickers yöntemiyle yapılmıştır. Ayrıca yağlı abrazyon tepki (SAR) deneyleri Al_2O_3 solüsyonunda yapılmıştır. Çalışmada paslanmaz çelik (316L) ve krom oksit (Cr_2O_3) ham madde tozları atmosfer basıncında plazma püskürtme yöntemiyle aşınma direncine sahip kaplamalar üretilmiştir. Yapılan tüm kaplamalar lamelli yapı göstermişler, mikro sertlikleri ve kuru aşınma dirençleri paslanmaz çelik yüzdesinin azalmasıyla artmıştır. Aşınma deneyleri saf krom oksit kaplamaların katı alümina parçacıkları içeren süspansiyon içindeki yağlı aşınmada yüksek direnç oluşmadığını göstermiştir.

Chen vd (2006) yaptıkları çalışmada; bilinen zirkonyum kaplamalar ile nano yapıdaki zirkonyum kaplamaların yağlanmamış aşınma direncinin geliştirilmesini ele almışlardır. Nano malzemelerin üstün özelliklerinden dolayı alışılmış zirkonyum kaplamalarla karşılaştırmayı planlamışlardır. Bu amaçla 20-50N ve saf suyla yağlanmış koşullardaki aşınma özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada plazma kaplama işlemi için Metco A-2000 atmosferik plazma kaplama cihazı kullanılmıştır. Aşınma test cihazı kayan, titreşimli ve pistonludur. Numunelere 20, 30, 40 ve 50N'luk belirlenmiş yükler 25Hz'lik sıklıktaki titreşimler ve 1 mm genliğinde ve 15 dk periyodunda uygulanmıştır. Aşınma deneyleri %35 nem ve 25°C oda sıcaklığında yapılmıştır. Chen ve arkadaşları çalışmalarında şu sonuçları elde etmiştir; 20-50N'luk kuvvet etkisi altındaki sürtünme katsayısı sonuçları kararlı bir durum sergilemişlerdir. 30-40N'luk yükler altında nano yapıdaki plazma kaplanmış zirkonyum kaplamaların sürtünme katsayısı alışılmış zirkonyum kaplama yöntemine göre daha yüksektir. Nano yapıdaki zirkonyum kaplamaların yükleme miktarları 20N'dan 30N'a çıkmasıyla aşınma oranları 5×10^{-6} 'dan $11,8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$ 'ye kadar artmaktadır. Yük arttırılmaya devam edilirse aşınma oranları azalmaktadır. Nano yapıdaki zirkonyum kaplamaların aşınma oranları bilinen zirkonyum plazma kaplamaların yarısına eşittir. Saf su altındaki yağlama koşullarına göre kuru şartlardaki zirkonyum kaplamaların aşınma oranları oldukça yüksektir. Alışılmış zirkonyum kaplamaların kuru şartlardaki aşınma mekanizması gevrek kırılma ve abrazif aşınma şeklindedir.

Sarı ve Yılmaz (2006) çalışmalarında; AISI 1050 çelik üzerine Ni esaslı tozlar alev püskürtme + ergitme ve yüksek hızlı oksit yakıt püskürtme (HVOF) + ergitme yöntemlerini kullanarak kaplamışlar ve aşınma dirençlerini incelemişlerdir. Çalışmada alt malzeme olarak Ni esaslı-WC+Ni esaslı olarak iki farklı toz kullanılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir; yapılan kaplamaların aşınma miktarı AISI 1050 çeliğine göre daha düşüktür. WC ilaveli Ni esaslı kaplamanın HVOF yöntemiyle uygulanmasıyla en düşük aşınma oranı elde edilmiştir.

Liu vd (2004) çalışmalarında; DBD (yalıtkan engel boşaltma) ve RF (radyo frekans) yöntemleri kullanarak PTFE üzerine yapılan plazma işleminin etkilerini karşılaştırmışlardır. Çalışmada kullanılan numuneler 2X4 cm² boyutunda olup kaplamadan önce ultrasonik olarak temizlenmiştir ve oda sıcaklığında 2 saat kurutulmuştur. Çalışmada kullanılan plazma parametreleri şöyledir; DBD plazma: yüksek frekanslı güç uygulayıcı 43,7 kHz; A ve B elektrotları arasındaki boşluk 1,5 mm'dir. Plazma gücü 600-2000 W'dır. RF plazma: 13,56 MHz; 300mmX100mm dikey dengelenmemiş çok kısa radyo dalgaları veren bir lamba donanımı kullanılmıştır. Çalışmada oksijen plazma işlemi 4,5x10⁻³ mbar basınçta ve 100-500W arasında işlenebilirlik incelenmiştir. Çalışmadan şu sonuçlar elde edilmiştir; PTFE yüzeyler plazma işleminin çeşidine ve plazma işlem şartlarına göre etkilenmektedir. RF plazmada yüksek enerji çeşidinde PTFE yüzeyi oyulmuş ve en üst tabakada ayrışmalar oluşmuştur. Düşük aşınma yüzeyleri DBD plazma yüzeyinde elde edilmiştir.

Leiova vd (2004) çalışmalarında; PVDF, ECTFE, PFA ve FEP floropolimerlerin termal püskürtme ile kaplama özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada atmosferik plazma ve iki farklı alev püskürtme yöntemi kullanılarak fluropolimer kaplamalar elde edilmiştir. Yüksek kalitede kaplama, gözeneksiz ve pürüzsüz yapı sprey parametrelerini optimize ederek yapılabilir. Floropolimer kaplamalar toz püskürtmeye karşı iyi korozyon direnci gösterirler. İyi bir kaplama eldesi için sıcaklık kontrolü ve düşük sıcaklık ısı kaynakları ile elde edileceği belirlenmiştir.

Sarıkaya vd (2004) yaptıkları çalışmada; plazma püskürtme yöntemi kullanarak Al-%12Si ana malzeme üzerine Al-Si+B₄C kaplamayı incelemişlerdir. Kaplama işlemi

40 kW'lık bir güç ünitesine ve 3MB'lık bir plazma tabancasında yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şöyledir; Tozların partikül boyut özellikleri incelendiğinde B₄C tozlarının düzensiz ve keskin köşeli Al alaşım tozlarının ise küresel yada küresele yakın bir morfolojiye sahip olduğu ve her iki tozun geniş bir tane boyut aralığına sahip olduğu görülmüştür. Tane boyutunun dağılım aralığının geniş olması kaplama sisteminde gözenekliliği azaltma yönünde etki etmiştir. SEM incelemeleri ile B₄C partiküllerinin ıslatma kabiliyetinin yeterli olduğunu belirlemiştir. Numunelerin yüzey pürüzlükleri incelendiğinde kaplamaların yüzey pürüzlülüğünün ana malzemeye göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak B₄C miktarındaki artış ile pürüzlülük değeri azalmıştır. Bu durum kaplama sonrasında yüzey pürüzlülüğünün giderilmesi için yüzey işlemlerine ihtiyaç duyulacağının gösterdiği belirlenmiştir.

Erickson vd (2001) çalışmalarında; plazma püskürtülmüş seramik kaplamaların aşınma direnci ve mikromekanik özellikleri ile mikroyapı arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir. Çalışmada alt malzeme olarak yumuşak çelik kullanılmıştır. Alümina kaplamalar için 5, 10, 18, 30 µm parçacık boyutu kullanılmıştır. İşlem parametreleri mikroyapıyı çeşitlendirdiği için bu parametrelerin kaplama kalitesine etkisi çalışmada ele alınmıştır.

Kim ve arkadaşları (2001) çalışmalarında; plazma püskürtme yöntemiyle kaplanmış seramik kaplamaların işlemten önceki ve sonraki mekanik özellikleri incelenmiştir. Plazma kaplama işleminde Al₂O₃-%13 TiO kaplaması polimere bağlı olarak belirlenen üç ticari dolgu malzemesi kullanılmış ve sızdırmazlık sağlanmıştır. Alümina-titanyum kaplamalar Sulzer-Metco F₄ gun ile ve metalik bağ kaplamalar ise HVOF yöntemi ile yapılmıştır. Çalışmada Sugaru aşınma deneyi kullanılmıştır. Çalışmada ayrıca elastisite modülü ve gerilme-gerinme davranışlarını belirlemek amacıyla 3-noktadan eğme deneyi yapılmıştır. Nüfuziyet derinliklerinin dolgu malzemesine bağlı olarak 0,2-0,5 mm arasında değiştiğini belirlenmiştir. Yapılan kaplama işlemi sonunda mikrosertlik, abrasif aşınma direnci, bağ kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü dolgu malzemesine bağlı olarak iyileşmiştir.

Meerkam vd (2002) çalışmalarında; PVD ve PACVD kaplamaların mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada metal karbon filmler reaktif

püskürtücü kullanarak argon ve hidrokarbon gaz içeren atmosferde yapılmıştır. Deney sırasında ana malzeme yüzey sıcaklığı 100-210°C arasındadır. Çalışmada Vickers sertlik ölçümü kullanılmıştır. Yazarlar çalışmadan PVD uygulamalarının sert karbon kaplamalar için uygun olduğu ancak yöntemin maliyetinin yüksek olduğu ve geliştirilmesi gerektiği sonucuna ulaşmışlardır.

Wöhle ve arkadaşları (2002) çalışmalarında; polimer malzeme üzerine CVD plazma yöntemi kullanarak BCN kaplamaları uygulamışlardır. Deneylerde RF-PACVD yöntemi uygulanmıştır. Çalışmanın sonunda yapılan kaplamaların çevre şartlarına uyum sağladığı görülmüştür. Kaplamaların bor oranları %3, %42; karbon oranları ise %80-%16'dır. Kaplamaların saydamlık oranı %90 elde edilmiştir. Saydamlık oranı kaplama kalınlığının arttırılması ile düşmekte ve öncü malzemelere bağlıdır. Kaplamaların sertliği 1500 HK_{0,005} değerine kadar çıkmıştır.

Zhitomirsky vd (2002) çalışmalarında manyetik plazma kanala bağlı üçlü katot vakum ark plazma kaynağı kullanarak metal/seramik kaplamaları S2010 polisülfen üzerine uygulamışlardır. Yapılan kaplamaların tribolojik özellikleri ve yapısı incelenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar şöyledir; Zr/ZrN kaplamalarda düşük aşınma oranı ve sürtünme katsayısı elde edilmiştir. Saf Al kaplamalar yüksek aşınma oranı göstermişlerdir. ZrN Al üzerine kaplanırsa orta tabakadaki aşınma oranında anlamlı bir düşüş elde edilmiştir. Ancak yine de Al/ZrN'nin aşınma oranı Zr/ZrN ve Ti/TiN'den daha yüksek elde edilmiştir. Al üzerine ZrN kaplandığında Al kaplamalara göre değişken aşınma oranlarında 8-10 kat düşüş elde edilmiştir.

Gerçekçioğlu ve arkadaşları (1999) çalışmalarında; 90 µm çapındaki Ti tozu imalat çeliği üzerine kaplama işlemini ele almışlardır. Kaplama işlemi vakum altında plazma sprej yöntemiyle uygulanmıştır. Kaplama işlemine gaz bileşimi, işlem basıncı, plazma akımı, kullanılan toz boyutu ve püskürtme mesafesi gibi parametreler etki etmektedir. Çalışmada plazma işlemi 1000 A güce sahip Plazma Teknik AG vakum plazma sprej ile yapılmıştır. Kaplama için Ø22 mm ve 5 mm kalınlığında numuneler hazırlanmıştır. Çalışmada başlangıç için vakum basıncı 0,01 mbar (10⁶ Pa) iken daha sonra plazmanın başlatılabilmesi için 50 mbar'a kadar yükseltilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şu şekildedir; kaplama işlem başına gerek mikro yapı kesitindeki gözeneklerin azalmasına ve sertlik değerinde debi

miktar artışına neden olmuştur. Primer gaz olarak Ar kullanıldığında plazma alev boyu N₂ gazının plazma alev boyundan daha uzun olduğu ve partiküllerin plazma alevi içerisinde biraz daha kaldığı görülmüştür. Bu ise ergiyik damlacıklarının katılaşmadan yüzeye ulaşmasına neden olmaktadır. Optimum sprej mesafesinin 270 mm olduğu belirlenmiştir.

Lathabai vd (1998) çalışmalarında; termal püskürtülmüş, seramik, metalik ve polimer kaplamaların katı parçacıkların sertlik ve şekil gibi özelliklerinin çamur ve hava erozyonu incelenmiştir. Her bir kaplama için hava erozif akım oranında erozyon kaybı ve oranının değişik çarpma açılarının etkisi incelenmiştir. Çalışmada iki seramik, bir metalik, bir polimer olmak üzere dört termal püskürtme kaplama seçilmiştir. Kaplama yumuşak çelik üzerine 6 mm kalınlıkta yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar şunlardır; çamurlu erozyonda malzeme kaybı ve erozyon oranları aynı büyüklükteki köşeli SiC kullanılması yuvarlatılmış SiO₂ parçacıklara göre daha yüksektir. Polimer kaplamalar ve dökme paslanmaz çelik içinde bu böyledir. Hava erozyonunda yüksek parçacık hızı kaplama hasarının geliştirilmesinde kullanılır. Sert köşeli Al₂O₃ parçacıklar yüksek erozyon kayıplarına ve oranlarına neden olmaktadır. Seramik ve metalik kaplamalarda kaplama sertliği ile erozyon oranı arasında bağlantı yoktur. Kaplamaların mikro yapıları ve çatlak gibi kusurları erozyon sırasındaki malzeme kalkma mekanizmasıyla kontrol edilir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Günümüzde tüm sektörler fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri bakımından gelişmiş, ucuz, hafif ve güvenilir malzeme talebinde bulunmaktadır. Bu malzemelerde korozyon, dayanım ve yüzey kalitesi gibi özellikler önem kazanmaktadır. Kullanılan malzemeler istenilen özellikleri sağlamıyorsa farklı bir malzeme ile parçaların yüzeyleri kaplanarak daha iyi özellikler kazandırılmaya çalışılmaktadır.

Aşınma, kimyasal reaksiyon veya temas ara yüzeyinde oluşan mikro çatlama nedeniyle fiziksel ayrılma olarak malzemenin kaldırılması olayıdır. Aşınma olayı sadece malzeme seçiminden kaynaklanmamakta olup bunun yanında hız, kuvvet gibi çalışma şartları ile yağlayıcı, yüzey pürüzlülüğü gibi şartlar da aşınmaya neden olan faktörlerdir. Aşınma olayı makine elemanlarının yüzeylerinden malzeme kopması sonucu meydana gelen ve makine elemanlarının performans ve ömrüne negatif yönde etki eden zararlı bir olaydır. Bu nedenle özellikle birbirine göre izafi hareket yapan makine elemanlarının yüzeylerinin aşınmaya karşı yeterli dirence sahip olması istenir ve beklenir.

Makine elemanı olarak görev yapan birçok parçanın aşınma, fiziksel ve yüzey özellikleri ile çevre şartlarında çalışma performansları günümüzde birçok çalışmanın konusu olmuştur. Ancak metalik malzeme grubuna giren sade karbonlu çeliklerin bu amaçla kullanılması veya pahalı malzemelerden imal edilmiş makine elemanlarının aynı çalışma şartlarında ömürlerinin artırılması ile ekonomik çözüm elde edilmesini sağlayacaktır.

Bu çalışmada birbirlerine göre izafi hareket yapan makine elemanlarından olan yataklar ve aşınma altında çalışan elemanları temsil etmek üzere hazırlanacak numuneler plazma yardımıyla polimer malzeme ile kaplanmıştır. Yapılan kaplamaların aşınma, bozulma süreleri, yüzey özellikleri ile çalışma ömrü arasındaki ilişki incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda uygun kaplama işlemi parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır. Böylece aşınmaya karşı çalışacak makine

elemanlarının ve/veya bakım yapılması mümkün olmayan yerlerde çalışan makine elemanlarının aşınma direnci ile yüksek sıcaklık davranışlarına ekonomik açıdan çözüm elde edilmeye çalışılmıştır. Bulunan çözüm hem ekonomik malzeme seçiminde hem de çalışma şartlarının iyileştirilmesinde kullanılabilecektir.

Bu amaçla, çalışmada ekonomik malzeme seçiminin sağlanması amacıyla alt malzeme olarak AISI 1050 çelik malzemeden imal edilen numuneler kullanılmıştır. AISI 1050 çelik malzeme Alman DIN normuna göre DIN 1.1210; Japon normlarına göre JIS S 55 C ve TSE normuna göre ise Fe 50 şeklinde gösterilen ekonomik bir malzemedir. AISI 1050 malzemesinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge 3.1. AISI 1050 çelik malzemenin kimyasal kompozisyonu (www.efunda.com, 2012)

Malzeme / % Element (Ortalama)	C	Mn	P	S	Fe
AISI 1050	0.52	0.75	0.04	0.05	Kalanı

AISI 1050 yüksek karbon oranı ($\sim 0,5$ C) içeren bir çeliktir. AISI 1050 ısıtılma işlemi, su verme ve temperleme gibi işlemlerle dayanımı artırılabilen bir malzeme olarak bilinir. AISI 1050 çeliği krank mili, dişliler ve bağlantı elemanları gibi parçaların imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. AISI 1050 çelik malzemenin mekanik özellikleri Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2. AISI 1050 çelik malzemenin mekanik özellikleri (Hmwire, 2012)

Çekme dayanımı (MPa)	655
Akma dayanımı (MPa)	515
Çekme emniyet dayanımı (MPa)	177
Kayma emniyet dayanımı (MPa)	102
Elastisite modülü (E) (GPa)	210
Kayma modülü (G) (GPa)	81

AISI 1050 malzemesi soğuk çekilmiş halde piyasadan temin edilmiştir. Daha sonra malzemeler CNC freze tezgâhında talaşlı işleme tabi tutularak aşınma deney numunesi haline getirilmiştir.

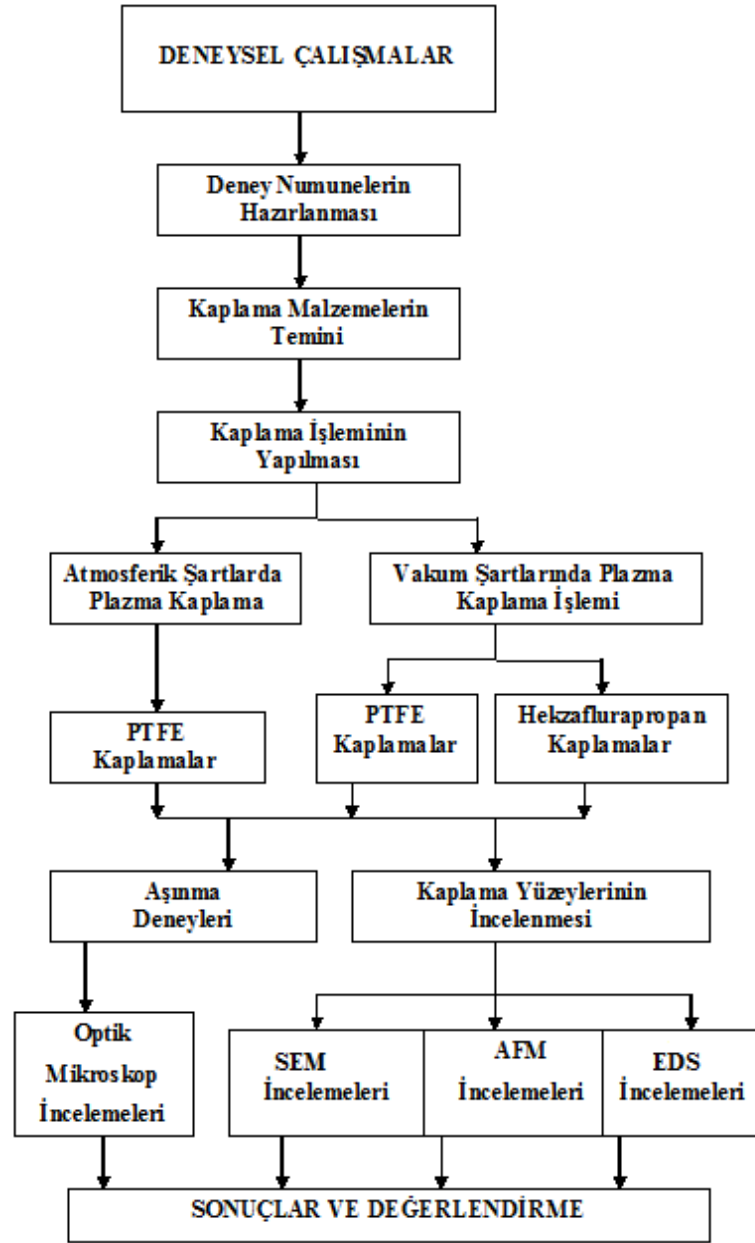
Polimerler iyi aşınma ve korozyon direnci, kendi kendini yağlama ve düşük ses iletme özelliği ile nispeten daha ucuz malzemeler olmasından dolayı önemli tribolojik malzemeler olarak genel kabul görürler. Bu nedenle tez çalışmasında kaplama malzemesi olarak Polytetrafluoroethylene (PTFE) ve Hekzafluoropropylene (C_3F_6) kullanılmıştır. Özel olarak PTFE ve C_3F_6 malzemelerin kaplama malzemesi olarak özellikle seçilmesinin nedeni kimyasal yapılarından dolayı metal malzemelerin yüzeylerine kolay tutunabilme özelliğidir.

Politetraflüoroetilen (PTFE) genellikle teflon adıyla bilinmektedir. PTFE metalik malzemelerin aşınma direncini geliştirmek amacıyla yaygın olarak kullanılan bir kaplama malzemesidir. PTFE kusursuz kimyasal, mekanik, elektrik ve ısı özellikleri nedeniyle çok geniş alanda uygulama alanı bulmaktadır. Bilinen tüm çözücülere, kimya sanayisinde kullanılan hemen her asit ve alkaliye dayanıklılığı, geniş sıcaklık aralığında kullanılabilmesi, teflonu gerçekten değerli bir malzeme haline getirmiş, teflonun kullanılmasıyla, başka türlü çözülemeyecek birçok teknik sorun ortadan kalkmıştır. Bu özelliklere ilave olarak ömrü uzun olduğundan, bakım yapma işlemlerini büyük ölçüde azaltmıştır. PTFE'nin çarpıcı elektriksel özellikleri de, elektrik ve elektronik sektöründe geniş ölçüde yer almasına yol açmıştır.

PTFE'nin düşük sürtünme katsayısı, onunla yapılan mekanik parçaların yağlanmasını gerektirmez. Yük altında şekil değiştirmesi, cam ve bronz gibi doldurucularla azaltılmaktadır. Mekanik alanda en önemli uygulamaları arasında yağlamasız yataklar, yatak contaları, kendiliğinden yağlanan yataklar, kompresörler için piston bilezikleri, dönen millerin salmastra kutuları, şaftlar, oluklar, lastik tutuculara bağlanmış PTFE plakaları, taşıyıcı bantlar, yağ bilezikleri, pullar, kutular, pnömatik alanda kullanılan makine elamanları, dişliler, musluk yatakları, kâğıt kıvrırma makineleri, zamlama makineleri için besleme kanalları, ölçü pistonları vb sayılabilir (Chattopadhyay, 2007).

3.2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmaların yapılma sırası ve iş akışı şematik olarak Şekil 3.1'de verilmektedir.

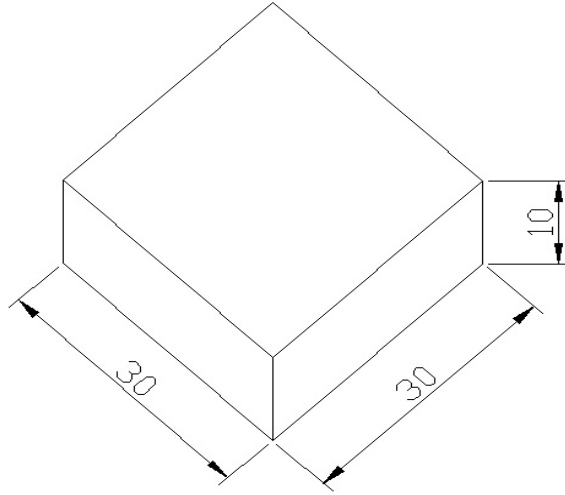


Şekil 3.1.Deneysel çalışmada iş akışı (şematik)

3.3. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Çalışmada makine elemanı olarak görev yapan miller, yataklar, bazı dişliler ile vida profillerinin aşınması, yağlama şartları ve bazı sıcaklık değerlerindeki davranışlarının teknolojik ve ekonomik açıdan incelenmesi ele alınmıştır. Bu amaçla ekonomik açıdan çözüm üretilmek için metalik malzeme grubuna giren sade karbonlu çeliklerden olan AISI 1050 malzemesi kullanılmıştır.

Çalışmada kaplama yapılan malzemeler daha sonra aşınma deneyine tabi tutulacağı için deney numune boyutları aşınma cihazına uygun boyutlarda hazırlanmıştır. Numune şekli ve boyutları Şekil 3.2’de verilmiştir. Numuneler CNC freze tezgâhında belirtilen şekil ve boyutlara getirilmiştir. Talaşlı şekillendirme esnasında kesme sıvısı kullanılmış ve işlem parametreleri numune üzerinde olumsuz etki oluşturulmayacak büyüklükte seçilmiş ve uygulanmıştır.



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan numunelerin şekli ve boyutları

Alt malzeme olarak hazırlanan numunelere ısıtma işlemleri ve mekanik yüzey işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemlerin uygulanma nedeni alt malzeme özelliklerinin kaplama kalitesine olan etkisini belirlemektir. Bu amaçla AISI 1050 malzemeye farklı ısıtma işlemleri ve mekanik yüzey işlemi uygulanarak dört farklı sertlik değerine ve yüzey kalitesine sahip alt malzeme elde edilmiştir. Alt malzemelere uygulanan işlemler Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Malzemelere uygulanan ısıtma işlemlerinden ilki tam yumuşatma işlemidir. Bu işlem için 20 adet numune kullanılmıştır. Tam yumuşatma işlemi 800°C’de 10dk süre ile bekletilerek yapılmıştır. Malzeme fırında soğumaya bırakılmıştır. İşlem sonunda malzemenin ortalama sertlik değeri HRB 87 olarak ölçülmüştür. Malzemelere uygulanan diğer ısıtma işlemleri su verme ve arkasından temperleme işlemidir. 870°C’de suda sertleştirilen numunelerden 20 adedi 210 °C’de 1 saat boyunca temperleme işlemine tabi tutulmuştur ve ortalama sertlik değeri HRC 59 olarak elde edilmiştir. Diğer 870°C’de suda sertleştirilen numunelerden 20 adedine ise 500 °C’de 1 saat

boyunca temperleme işlemi uygulanmış olup ortalama sertlik değeri HRC 37'dir. Mekanik yüzey işlemi olarak da bilyeli dövme işlemi uygulanmış olup sertlik değeri HRC 40'tır.

Çizelge 3.3. Alt malzemelere uygulanan işlemler

Çelik Cinsi	Numuneye Uygulanan İşlemler
AISI 1050	800°C 'de tam yumuşatma işlemi
AISI 1050	Su verme + 210 °C'de temperleme işlemi
AISI 1050	Su verme + 500 °C'de temperleme işlemi
AISI 1050	Bilyeli Dövme İşlemi

3.4. Kaplama Malzemesinin Temini ve Kaplama İşleminin Yapılışı

Kaplama malzemesi olarak seçilen Polytetrafluoroethylene (PTFE) ve Hekzafluoropropylene (C₃F₆) Aldrich firmasından gaz halinde ticari olarak temin edilmiştir.

Çalışmada Atmosferik Basınçta Plazma ve Vakum Plazma kaplama olmak üzere iki farklı yöntem kullanılmıştır. Atmosferik basınçta kaplama işleminde kaplama malzemesi olarak sadece Polytetrafluoroethylene (PTFE) kullanılmıştır. Atmosferik basınçta kaplama işlemi polimer kaplama malzemesinin numune yüzeyi üzerine atmosferik ortamda serbest elle sprey halinde püskürtülmesi şeklinde uygulanmıştır. Vakum plazma işleminde ise kaplama işlemi vakum ortamında yapılmıştır. Kaplama malzemesi olarak Polytetrafluoroethylene (PTFE) ve Hekzafluoropropylene (C₃F₆) malzemelerin her ikisi de ayrı ayrı kullanılmıştır. PTFE malzeme yüzeyine aynen atmosferik ortamda kaplanan numunelere uygulandığı şekilde uygulanmıştır. C₃F₆ malzeme ise tasarlanan vakum sistemine ilave edilerek cihaz kontrollü olacak şekilde pülverize halde yüzeye püskürtülmüştür. Her bir yöntem için plazma parametreleri üzerinde değişiklikler yapılarak farklı özellikte kaplamalar elde edilmeye çalışılmıştır. Atmosferik şartlarda plazma kaplama işleminde değişiklik yapılan plazma parametrelerinden ilki işlem süresidir. Çalışmada atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi için 5 dakika ve 10 dakika olmak üzere iki farklı işlem süresi seçilmiştir.

Atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi için değiştirilen diğer bir parametre ise gaz cinsidir. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi için Argon ve Helyum gazları kullanılmasının uygun olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle çalışmada atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi için gaz cinsi olarak Argon ve Helyum seçilmiştir(Venkateswarlu vd, 2009; Costil vd 2006).

Çalışmada atmosferik şartlarda plazma kaplama işleminde değiştirilen son parametre ise frekans olup çalışmada 10 kHz ve 15 kHz olmak üzere iki farklı frekans değeri seçilmiştir. Vakum şartlarında plazma kaplama işlemi için seçilen kaplama parametreleri kullanılan kaplama malzemesine göre değişmektedir. PTFE malzeme için değiştirilen vakum plazma parametresinden birisi güçtür. Çalışmada vakum şartlarında PTFE kaplama işlemi için 180 W ve 100 W olmak üzere iki farklı deşarj gücü değeri seçilmiştir. Bir diğer parametre ise basınç olup 100mtorr ve 50 mtorr (13.33 Pa ve 6.66 Pa) olmak üzere iki farklı değer çalışmada kullanılmıştır.

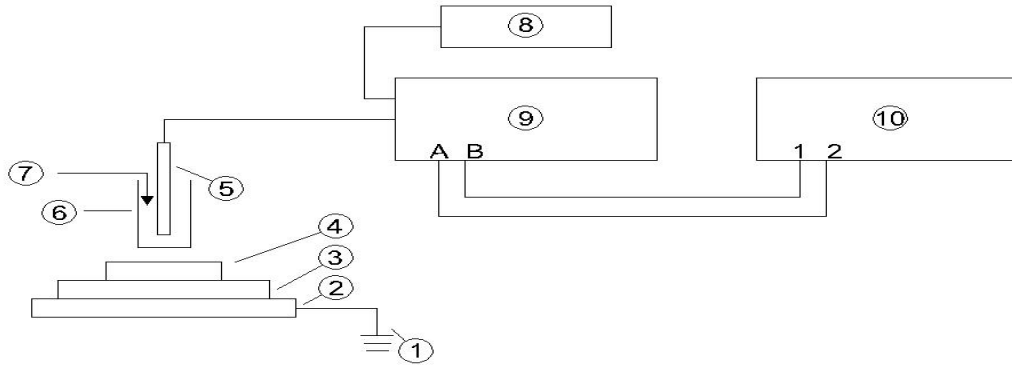
Atmosferik şartlarda plazma kaplama işleminde olduğu gibi PTFE vakum şartlarda PTFE malzeme kaplama işlemi için 7,5dakika ve 15dakika olmak üzere iki farklı işlem süresi ve Argon ve Helyum olmak üzere iki farklı gaz cinsi seçilerek değişik plazma parametreleri seçilmiştir. Hekzaflurapropan malzeme için değiştirilen vakum plazma parametrelerinden ilki deşarj gücüdür. Çalışmada Hekzaflurapropan malzeme için 50 W ve 100 W olmak üzere iki farklı güç değeri seçilmiştir. Ayrıca çalışmada Hekzaflurapropan malzeme için değiştirilen diğer vakum parametreleri ise işlem süresi (15 dakika ve 30 dakika) ve basınç (300 mtorr (39.99 Pa) ve 100 mtorr (13.33 Pa)) olarak belirlenmiştir.

3.4.1. Atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi

Atmosferik plazmalar açık hava basıncında meydana gelen plazmalardır. Atmosferik şartlarda plazma işleminin vakum şartlarda plazma işlemine göre en önemli avantajı vakum tertibatına gerek duyulmamasıdır. Ancak atmosferik plazma işleminde kaplama malzemesi elle püskürtüldüğü ve plazma yüzeye serbest elle uygulandığı için çok iyi kaplama kalitesi elde edilememektedir. Bu nedenle atmosferik plazma ile

elde edilen kaplamaların özellikleri vakum plazma ile elde edilen kaplamalara göre daha yetersizdir.

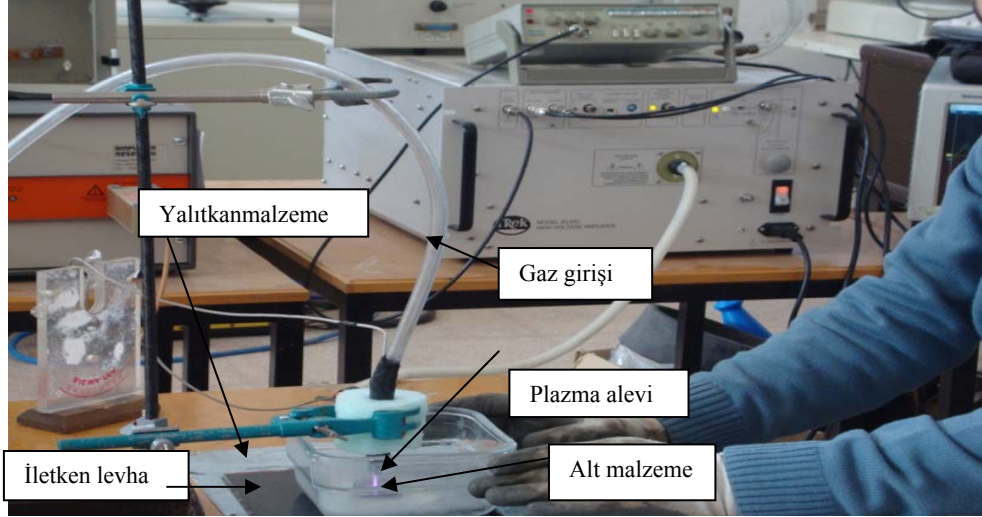
Atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi Süleyman Demirel Üniversitesi Teknokent'te Plazma Araştırma Laboratuvarında (PAL) tasarlanan kaplama düzeneğinde yapılmıştır. Kaplama düzeneği şematik olarak Şekil 3.3 'de verilmektedir.



Şekil 3.3. Atmosferik şartlarda plazma kaplama düzeneği (şematik gösterim)

Şekil 3.3'de verilen düzenekteki elemanlar şu şekildedir: 1. Topraklama; 2. İletken levha; 3. Yalıtkan malzeme; 4. Kaplanacak alt malzeme; 5. Yüksek gerilim uygulanan bakır elektrot; 6. Yalıtkan cam tüp; 7. Gaz girişi; 8. Sinyal üretici; 9. Yüksek gerilim yükseltici; 10. Osiloskop.

Plazma kalemi yalıtkan cam tüpten oluşmakta ve tüp içerisine yüksek gerilim uygulanan bakır elektrot yerleştirilmiştir. Plazma kalemi kaplanacak çelik numune üzerine dik bir şekilde tutturulmuş ve numune ile arasındaki mesafe 20mm olarak sabit ayarlanmıştır. Plazma işlemi uygulanacak olan çelik numune yalıtkan bir malzeme üzerine yerleştirilmiştir. Yalıtkan malzemenin altına konulan iletken bir levha ile topraklanma sağlanmıştır. Escort EFG – 3210 2 MHz sinyal üreticiden gelen sinüzoidal sinyal plazma kaleminin bakır elektrotuna bağlı Trek model 20/20C yüksek gerilim yükseltici ile 2000 kat arttırılmakta ve uygulanan akım-voltaj-frekans değerleri Tektronix TDS 7104 model dijital fosfor osiloskop aracılığıyla okunmuştur. Şekil 3.4'te atmosferik basınçta plazma kaplama düzeneğinde kullanılan plazma kaleminin genel görünüşü verilmektedir.



Şekil 3.4. Atmosferik şartlarda plazma kaplama düzeneğinde kullanılan plazma kaleminin genel görünüşü

Kaplama işleminden önce numune yüzeyleri alkolle temizlenmiş ve hemen arkasından plazma yardımıyla yüzey aktivasyonuna tabi tutulmuşlardır. Plazma ile yüzey aktivasyonu yüzeyin aktif hale gelerek kaplamanın yüzeye yapışma kuvvetini artırması açısından önemlidir. Yüzey aktivasyon işleminde Argon gazı kullanılmıştır. Yüzey aktivasyonu uygulama süresi tüm numuneler için 5 dakika olarak seçilmiş ve uygulanmıştır. Aktivasyon işlemi plazma parametreleri Çizelge 3.4’te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Yüzey aktivasyon işlem parametreleri

Süre (dk)	Gerilim (V)	Akım (mA)	Frekans (kHz)
5	14000	14	10

Numunelere yüzey aktivasyonu yapıldıktan hemen sonra argon gaz ortamında numune yüzeyine PTFE malzeme püskürtülmüştür. Malzeme püskürtme işleminin argon gazı ortamında yapılmasının en önemli nedeni yüzeyi aktif hale gelen numunenin havayla temasa geçerek oksitlenmesinin engellenmesidir (Samad vd., 2010). Malzeme püskürtüldükten sonra numunelere daha önce belirlenen parametrelerde plazma uygulanarak numuneler kaplanmıştır. Atmosferik plazma kaplama işlemi deney düzeneğinin genel görünüşü Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi deney düzeneğinin genel görünüşü

Kaplama kalitesine etki eden parametreler plazma uygulama süresi, gaz cinsi, nozul mesafesi ve frekanstır (Yugeswaran vd., Sahu vd.). Bu nedenle atmosferik plazma kaplama işlemi uygulanırken bu parametreler üzerinde değişiklikler yapılmıştır.

Atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi için önceden değişik işleme tabi tutulan alt malzemeler üzerine plazma uygulanmıştır. Çizelge 3.5’de 800°C’de tam yumuşatılmış alt malzeme numuneleri için belirlenen plazma parametreleri verilmiştir. Çizelge 3.6’da su verilmiş ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme numuneler için belirlenen plazma parametreleri verilmiştir. Su verilmiş ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme için belirlenen plazma parametreleri Çizelge 3.7’de ve bilyeli dövülmüş alt malzeme için belirlenen plazma parametreleri ise Çizelge 3.8’de verildiği şekilde belirlenmiş ve uygulanmıştır.

Çizelge 3.5. 800°C’de tam yumuşatılmış alt malzeme için plazma kaplama parametreleri

Numune No	Süre (dk)	Gaz Cinsi	Frekans (kHz)	Gerilim (V)	Akım (mA)
1	3	Argon	10	16000	14
2	3	Argon	15	11000	12
3	5	Argon	10	16000	14
4	5	Argon	15	11000	10
5	3	Helyum	10	15000	14
6	3	Helyum	15	11000	10,5
7	5	Helyum	10	15000	14
8	5	Helyum	15	11000	10

Çizelge 3.6. Su verilmiş ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme için plazma kaplama parametreleri

Numune No	Süre (dk)	Gaz Cinsi	Frekans (kHz)	Gerilim (V)	Akım (mA)
1	5	Argon	10	14000	12
2	5	Argon	15	11000	10
3	10	Argon	10	14000	12
4	10	Argon	15	12000	11
5	5	Helyum	10	14000	12
6	5	Helyum	15	12000	10
7	10	Helyum	10	14000	12
8	10	Helyum	15	11000	10

Çizelge 3.7. Su verilmiş ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme için plazma kaplama parametreleri

Numune No	Süre (dk)	Gaz Cinsi	Frekans (kHz)	Gerilim (V)	Akım (mA)
1	5	Argon	10	14000	12
2	5	Argon	15	12000	10
3	10	Argon	10	14000	14
4	10	Argon	15	12000	11
5	5	Helyum	10	14000	12
6	5	Helyum	15	11000	10
7	10	Helyum	10	14000	12
8	10	Helyum	15	12000	11

Çizelge 3.8.Bilyeli dövülmüş alt malzeme için plazma kaplama parametreleri

Numune No	Süre (dk)	Gaz Cinsi	Frekans (kHz)	Gerilim (V)	Akım (mA)
1	5	Argon	10	14000	14
2	5	Argon	15	12000	12
3	10	Argon	10	14000	14
4	10	Argon	15	12000	11
5	5	Helyum	10	15000	13
6	5	Helyum	15	11000	10
7	10	Helyum	10	14000	13
8	10	Helyum	15	11000	10

3.4.2. Vakum şartlarında plazma kaplama işlemi

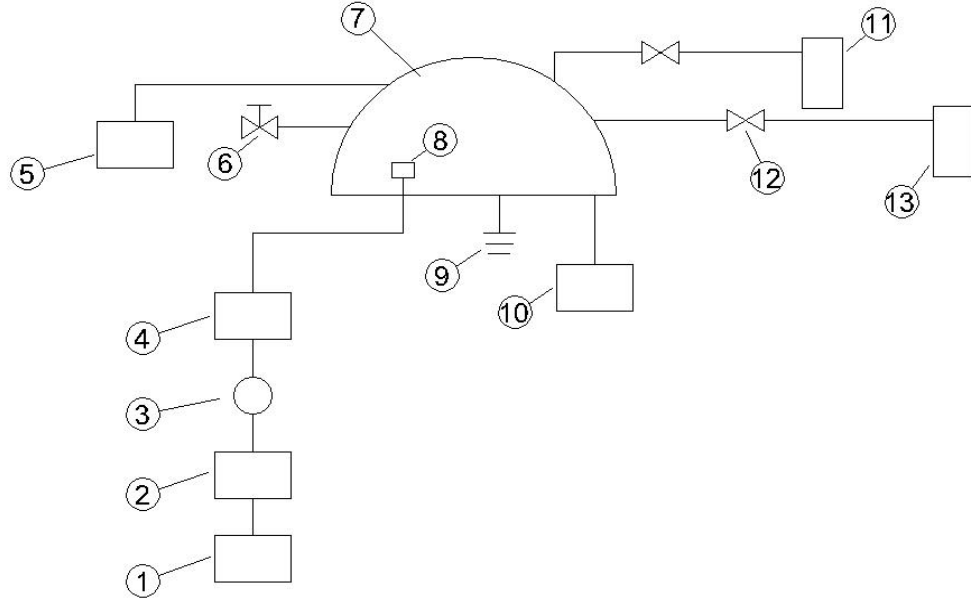
Vakum şartlarında plazma kaplama yöntemi kısaca kaplama işleminin vakum altında gerçekleştirilmesi olarak açıklanabilir. Vakum şartlarında plazma kaplama yönteminde en önemli sorun vakum oluşturmak ve oluşan vakumu işlem boyunca sabit tutabilmek için sızdırmazlığın sağlanmasıdır. Vakum çok karmaşık bir olay olup atmosfer basıncının altında bir basınçta kapalı bir çember içinde pompa yardımıyla daha düşük basınç değerlerine indirilmesiyle meydana gelir (Zhang vd., 2009).

Atmosferik basınçta gaz molekülleri birbirlerine çok yakındır ve sabit bir harekete sahip oldukları için çarpışmaları çok kısa mesafede olmaktadır. Bu mesafeye serbest yol adı verilir. Moleküller vakum pompası yardımıyla birbirlerinden uzaklaştırılarak aralarındaki mesafe artırılmış olur. Serbest yol basıncının fonksiyonu olarak değişmektedir. Basınç düştükçe moleküller arası mesafe artacak ve dolayısıyla çarpışma zorlaşacaktır. Bu durum vakum teknolojisini anlaşılmayı kolaylaştıracaktır (The Vacuum Lab, 2012).

Çalışmada numunelere atmosferik şartlarda plazma kaplamanın yanında vakum şartlarında plazma yöntemi kullanılarak kaplama işlemi yapılmıştır. Vakum ortamında kaplama işlemi için Radio Frekans(RF) plazma tekniği kullanılmış olup 13.56 MHz frekans seçilmiştir. Deşarj gücü, basınç, işlem süresi ve gaz cinsi gibi farklı plazma parametreleri kullanılarak elde edilen vakum şartlarında plazma ortamında PTFE ve C_3F_6 polimerik kaplama malzemeleri daha önceden hazırlanmış olan alt malzeme yüzeylerine kaplanmıştır.

Vakum şartlarında kaplama işlemi Süleyman Demirel Üniversitesi Teknokenti Plazma Araştırma Laboratuvarında (PAL) imkânlar doğrultusunda tasarlanıp hazırlanan RF vakum plazma deney düzeneğinde yapılmıştır. Deney düzeneği vakum reaktörü, mekanik pompa, basınçölçer, RF ünitesi, basıncı ayarlamakta kullanılan iğne vana, vent musluğu ve gaz giriş vanasından oluşmaktadır. Vakum şartlarında plazma kaplama deney düzeneğinin şematik görünüşü Şekil 3.6'da verilmektedir.

Şekil 3.6’da verilen düzenepteki elemanlar şu şekildedir: 1. Sinyal jeneratörü; 2. RF yükselteç; 3. Güç ölçer; 4. Empadans uyumlama ünitesi; 5. Basınç ölçer; 6. Vent musluğu; 7. Vakum çemberi; 8. Elektrot; 9. Topraklama; 10. Vakum pompası; 11. Propan gaz tüpü; 12. İğne vana; 13. Gaz Tüpü



Şekil 3.6. Vakum şartlarında plazma kaplama deney düzeneğinin şematik görünüşü

Vakum reaktörü metalden imal edilmiştir ve iç çapı 450 mm, yüksekliği ise 500 mm’dir. Reaktörün bir hattı vakum pompasına bağlanırken diğer hattı kaplama gazı tankına bağlanmıştır. Basınçölçer ile Ar ve He gaz girişi de reaktöre bağlanmıştır. RF ünitesi Agilent ESG vector sinyal jeneratörü, Henry Radio 8K Ultra Linear RF yükselteci, güç ölçer ve empedans uyumlama ünitesinden oluşmaktadır. Uyumlama ünitesi (P) tipidir ve manuel olarak kontrol edilmektedir. Agilent ESG vector sinyal jeneratörüne RF yükselteci bağlanarak üretilen sinüzoidal sinyallerin güçlendirilmesi sağlanmıştır. RF yükselteci empedans uyumlama ünitesi üzerinden reaktör içerisindeki elektroda bağlanmıştır. RF yükselteci ile empedans uyumlama ünitesi arasına güç ölçer bağlanarak sisteme yüklenen güç değeri okunmuştur. Agilent ESG vector sinyal jeneratörünün frekans değeri 250 kHz ile 4 GHz aralığındadır. Yüzey modifikasyon işlemlerinde 13,56 MHz frekans değeri ön değerler yardımıyla belirlenerek seçilmiştir. Tektronix P6015 yüksek voltaj probu ve Pearson elektronik geniş band akım transformeri tektronix TDS 7104 dijital fosfor osiloskobun sırasıyla 1.ve 2. kanalına bağlanarak plazma ile kaplama işlemi sırasında akım-voltaj değerleri

alınmıştır. Vakum şartlarında plazma kaplama işleminde vakum çemberinin genel görünüşü Şekil 3.7’de verilmektedir.



Şekil 3.7. Vakum şartlarında plazma kaplama işleminde kullanılan vakum çemberinin genel görünüşü

3.4.2.1. PTFE kaplamalar

PTFE ile vakum şartlarında kaplama işleminde 0,8 mm kalınlıkta ve 180 mm çapında disk şekilli çelik elektrot kullanılmıştır. Elektrot kaplanacak alt malzeme yüzeyine paralel yerleştirilmiştir ve reaktör topraklanmıştır. Elektrot ile alt malzeme yüzeyleri arasındaki uzaklık 20 mm olarak ayarlanmıştır. Yüzey aktivasyonu ve kaplama işlemi için yüksek saflıkta (%99,999) Ar ve He gazları kullanılmıştır. Agilent ESG vector marka sinyal jeneratöründen üretilen sinüsoidal sinyaller Henry Radio 8K Ultra Linear marka RF yükselteci ile güçlendirilmesi sağlanmıştır. Uygulanan RF deşarj gücü RF yükselteci ile empedans uyumlama ünitesi arasına bağlanan güç ölçer ile okunmuştur. Tektronix P6015 yüksek voltaj probu ve Pearson elektronik geniş band akım transformeri tektronix TDS 7104 dijital fosfor osiloskobun sırasıyla 1.ve 2. kanalına bağlanarak düşük basınç RF plazma ile kaplama işlemi sırasında akım-voltaj değerleri alınmıştır. PTFE vakum şartlarında plazma kaplama işlemi deney düzeneğinin işleme hazır halde genel görünüşü Şekil 3,8’de verilmiştir.



Şekil 3.8. PTFE vakum şartlarında plazma kaplama işlemi deney düzeneğinin işleme hazır halde genel görünüşü

Kaplama işlemi öncesi vakum reaktörü ve daha önceden hazırlanan alt malzemelerin yüzeyleri yağ, kir ve diğer katı atıklardan arındırılması için etil alkol ile temizlenmiştir. Temizlenen numuneler bir süre kurumaya bırakılmıştır. Kurutulan numuneler daha sonra vakum reaktöründe bulunan elektrotun tam altına gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Yüzey aktivasyonu için elektrot ile numune arasındaki mesafe 20mm olarak ayarlanmıştır. Daha sonra reaktör sızdırmaz bir şekilde kapatılarak vakum pompası ile sistem basıncı 1×10^{-3} torr ($133,322 \times 10^{-3}$ Pa)'a düşürülerek 60 dakika çalıştırılmıştır. Bu şekilde ortamın inert olması amaçlanmıştır. Numunelere PTFE malzemesi püskürtülmeden önce yüzeyin aktif hale gelerek kaplamanın yüzeye yapışma mukavemetini artırmak amacıyla yüzey aktivasyon işlemi uygulanmıştır. Yüzey aktivasyon işlemi Argon gaz ortamında yapılmıştır. Aktivasyon işlemi için reaktöre Ar gazı verilerek iğne vana yardımıyla basınç 10mtorr'a ayarlanmıştır. Sistem aktivasyon işlem basıncına ulaştığında reaktörden 30 dakika boyunca Ar gazı geçirilmiş böylelikle ortamdaki reaksiyona girebilecek oksijen ve azot uzaklaştırılmıştır. PTFE kaplama işleminde yüzey aktivasyon işlem parametreleri şu şekilde seçilmiştir; Süre: 10 dakika; Güç: 180 Watt; Voltaj: 1000mV; Basınç: 10mtorr ve RF frekansı: 13,56 mHz'dir.

Numunelerin yüzey aktivasyonu tamamlandıktan sonra vakum pompası kapatılarak reaktöre bir süre daha argon gazı verilerek sistem basıncı atmosfer basıncı düzeyine getirilmiştir. Böylelikle yüzeydeki radikallerin oksijensiz ortamda sönümü sağlanmıştır. Daha sonra reaktör kapağı açılarak argon gaz ortamında numune

yüzeyine PTFE malzeme elle püskürtülmüştür. PTFE malzeme püskürtme işleminden sonra numuneler elektrotun tam altına gelecek şekilde reaktöre yerleştirilerek reaktör kapağı yeniden kapatılmıştır. Vakum pompası çalıştırılarak ortam basıncı 1×10^{-3} torr'a düşürülmüştür. Bu basınç altında pompa 30 dakika çalıştırılarak ortamın inert olması sağlanmıştır. Çalışılmak istenen basınç iğne vana ile ortama helyum ya da argon gazı verilerek ayarlanmıştır. İşlem yapılacak basınçta kullanılacak plazma gazı reaktörden 5 dakika süresince geçirilmiştir. Böylelikle yüzeyler RF deşarj (13.56 MHz) uygulamasına hazır hale getirilmiştir. PTFE kaplama işlemi için önceden değişik yüzey sertleştirme işlemine tabi tutulan alt malzemeler üzerine vakum ortamda plazma işlem süresi, deşarj gücü, basınç ve gaz cinsi parametrelerinde değişiklik yapılarak RF plazma uygulanmıştır (Yugeswaran vd; 2010). Her bir alt malzeme tipi için farklı plazma parametreleri seçilmiştir. Yapılan gruplandırma ve plazma kaplama işlemi parametreleri Çizelge 3.9'da verilmektedir.

Çizelge 3.9. PTFE malzeme plazma kaplama işlemi için vakum şartları

Numune Grup No	Güç (W)	Basınç (mtorr)	Gerilim (mV)	Gaz cinsi	Süre (dk)
(a)	180	100	1100	Argon	7,5
(b)	180	50	1000	Argon	7,5
(c)	100	100	550	Argon	7,5
(d)	100	100	600	Helyum	7,5
(e)	100	100	600	Argon	15
(f)	180	50	1100	Argon	15

3.4.2.2. Hekzaflurapropan (C_3F_6) kaplamalar

Vakum şartlarında kaplama işleminde PTFE malzemenin yanında Hekzaflurapropan (C_3F_6) malzemesi de kullanılmıştır. Bu malzeme kullanılarak yapılan kaplama işlemi PTFE kaplama işlemine göre daha farklı olacak şekilde uygulanmıştır.

C_3F_6 vakum kaplama işlemi için 2mm kalınlıkta 100mm çapında ve 0,8mm kalınlıkta ve 180mm çapında olmak üzere iki farklı çelik elektrot kullanılmıştır. Numuneler elektrotun tam altına gelecek şekilde reaktöre yerleştirilmiştir. Her iki elektrotun numune yüzeyine olan mesafesi 20 mm'dir. Gaz halde alınan Hekzaflurapropan (C_3F_6) monomeri reaktöre sabitlenmiş ve bu şekilde kullanılmıştır.

C_3F_6 kaplama işlemi numunelerin yüzey aktivasyonuna tabi tutulması ile başlatılmıştır. C_3F_6 kaplama işlemi için yapılan yüzey aktivasyon işlem aşamaları ve parametreleri PTFE kaplama işlemi için yapılan yüzey aktivasyon işlemi ile aynı seçilmiştir. Argon gazı yüzey aktivasyonu sırasında kullanılırken; C_3F_6 kaplama işlemi sırasında gaz olarak sadece C_3F_6 gazı kullanılmıştır. Yüzey aktivasyon işleminden sonra Ar gaz moleküllerinin sistemden uzaklaştırılması amacıyla sistem basıncı 1×10^{-3} torr'a düşürülmüş ve bu basınç altında 30 dakika boyunca çalıştırılmıştır. Ortama C_3F_6 monomeri verilmiş ve ortam basıncı iğne vana ile ayarlanmıştır. Ortamın inertliğinin sağlanması amacıyla reaktöre 5 dakika boyunca gaz vermeye devam edilmiştir.

Vakum plazma işlemi için hazırlanan alt malzemelere değişik plazma parametreleri uygulanmıştır. Bu plazma parametrelerinde basınç, süre, güç değerlerinde değişiklikler yapılmış ve bu değerlerin kaplama kalitesine olan etkisi incelenmiştir. Çok düşük basınç seçilmesi durumunda atom ve molekül sayıları düşük olur ve ayrıca argon verildiğinde yüzeyden C atomları kopararak yapışma mukavemetine kötü yönde etki etmektedir (Sözlü görüşme; Sorin Manolache, 10.03.2012). Basınç parametresi seçilirken bu durum göz önüne alınmıştır.

Düşük basınç RF plazma ile kaplama işlemi sırasında Tektronix P6015 yüksek voltaj probu ve Pearson elektronik geniş band akım transformeri tektronix TDS 7104 dijital fosfor osiloskobun sırasıyla 1.ve 2. kanalına bağlanarak akım voltaj değerleri alınmıştır. Vakum plazma kaplama işlemi için belirlenen parametreler Çizelge 3.10'da verilmektedir.

Çizelge 3.10. C_3F_6 malzeme vakum plazma kaplama parametreleri

Numune grup no	Güç (W)	Süre (dk)	Basınç (mtorr)	Voltaj (mV)
(a)	50	15	300	100
(b)	100	15	300	550
(c)	50	15	100	250
(d)	50	30	300	350
(e)	100	30	100	530

Vakum şartlarında plazma kaplama işlemi için iki farklı elektrot kullanılmıştır. Bu durum elektrot yapısının (çap, kalınlık, elektrik iletkenliği) deşarj karakteristiği ve plazma yoğunluğunu etkilemesi şeklinde açıklanabilir. Çalışmada a, b ve c grupları için yapılan işlemlerde 2mm kalınlığında 100 mm çapında elektrot kullanılmıştır. Aynı elektrot d ve e grupları için de kullanılmış ancak işlem süresinin uzun olması nedeniyle çok ısındığı fark edilerek kaplamaya zarar verdiği ve kaplamanın yapışma mukavemetine negatif yönde etki yaptığı görülmüştür. Bu nedenle d ve e parametrelerinde kalınlığı 0,8mm, çapı 180mm olan elektrot kullanılarak deşarj yoğunluğu azaltılmıştır.

3.4.3. Aşınma deneyleri

Atmosferik şartlarda plazma kaplama ve vakum şartlarında plazma kaplama yöntemiyle kaplanmış numunelere aşınma deneyi uygulanmıştır. Aşınma deneyleri Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında yapılmıştır. Aşınma deneyleri Tribotechnic marka Oscillating Tribotest cihazında yapılmıştır. Çalışma için deneylerde kullanılan tribotester cihazı genel görünüşü Şekil 3.9 'da verilmektedir.



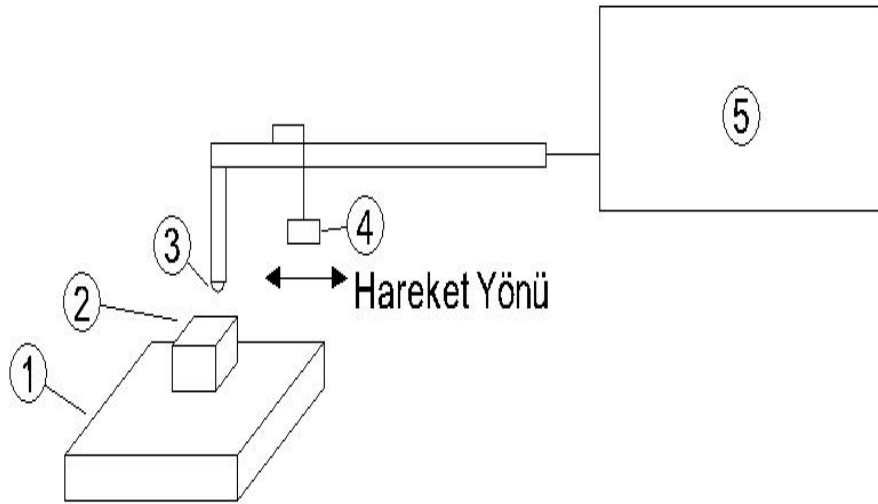
Şekil 3.9. Tribotester deney cihazının genel görünüşü

Tribotester cihazı 500 x 400 x 300 mm boyutlarında granit ve anotlanmış alüminyum gövde ve şeffaf kapaktan oluşmaktadır. Cihaz güç bağlantı değerleri 220- 110 V/ 50-60 Hz' dir. Tribotester cihazı kuru ortamda yapılan deneyler için 1 N -12 N; yağlama şartlarında ise 62 N standart yükte çalışmaktadır. Deney sistemi programlanabilir özelliktedir. Nem ve sıcaklık ölçümleri kaydedilebilir ve gerektiğinde rapor alınabilecek şekilde tasarlanmıştır. Tribotester cihazının uygulama alanları kaplamalar, seramik, metal ve polimer gibi malzemelerdir. Tribotester cihazı ISO 7148, ASTM G99-95a, ASTM G 133-95 standartlarına uygundur. Cihazda bulunan orijinal ve patenti alınmış bir kol yardımıyla sürtünme katsayısı ölçülebilmektedir. Profilometre yardımıyla disk aşınma iz profili ve mikroskop yardımıyla bilye üzerindeki aşınma iz çapı deney sonunda elde edilmektedir. Bu iki parametre Tribotester programına girildiğinde her bir bileşenin aşınma oranı otomatik olarak elde edilebilmektedir. Tribotester cihazına ait teknik özellikler ile deneylerde kullanılan numune özellikleri Çizelge 3.11'de verildiği şekildedir.

Çizelge 3.11. Tribotester cihazına ve numuneye ait teknik özellikler

Tribotester cihazı teknik özellikleri	Sürtünme kuvveti: 6 N maksimum
	Dönme hızı: 2- 300 rd/dak
	Sürtünme yarıçapı: 1-25 mm
Numune aşındırıcı sistem teknik özellikleri	Disk çapı: 10 – 60 mm
	Disk kalınlığı: 2-15 mm
	Bilye çapı: 6 veya 1,58 mm
	İğne çapı: 6 veya 12,7 mm

Kaplanmış malzemelere aşınma deneyleri uygulanmadan önce numunenin ve bilyenin yüzeyi alkolle temizlenmiştir. Temizleme işleminden sonra numune cihaza bağlanarak deney yapılmıştır. Aşınma deney düzeneğinin çalışma prensibi şematik olarak Şekil 3.10’da verilmektedir.



Şekil 3.10. Aşınma deney düzeneği çalışma prensibi (şematik)

Şekil 3.10’da verilen tribotester deney düzeneğinin elemanları şu şekildedir; 1. Numune tutucu mekanizma; 2. Kaplanmış ve aşınmaya zorlanan numune; 3. Bilye ucu; 4. Yük; 5. Bilgisayar.

Atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numuneler için seçilen aşınma parametreleri ile vakum plazma kaplama işlemi uygulanmış numuneler için farklı deney parametreleri seçilmiştir. Bu seçim için ön deneyler yapılmış ve her bir

kaplama yönteminde uygulanabilecek aşınma işlem parametreleri belirlenmiştir. Bu parametreler Çizelge 3.11 'de verilmektedir.

Çizelge 3.12. Aşınma deney parametreleri

Kaplama türü	Kayma hızı (mm/s)	Normal yük (N)	Kayma Mesafesi (m)
Atmosferik şartlarda plazma kaplama	8	1	2
Vakum şartlarında plazma kaplama	8	1	3

3.4.4. Kaplama yüzeylerinin incelenmesi

3.4.4.1. Optik mikroskop incelemeleri

Atmosferik basınçta kaplama ve vakum plazma ile kaplama yöntemleri kullanılarak kaplanan numuneler daha sonra aşınma deneyine tabi tutulmuşlardır. Aşınma iz genişliğinin ve iz tipinin belirlenebilmesi için Akdeniz Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarında bulunan Clemex marka Nikon Eclipse LV150 (Japan) tip optik mikroskobu kullanılmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Aşınma izi incelemelerinde kullanılan Optik Mikroskobunun genel görünüşü

3.4.4.2. SEM ve EDS incelemeleri

Süleyman Demirel Üniversitesi Teknokenti Plazma Araştırma Laboratuvarında (PAL) bulunan Tescan marka Vega II model Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) ve buna bağlı olarak çalışan enerji dağılımlı X-ışınları mikro analiz spektrometresi (EDS) ile kaplama işlemi öncesi ve sonrasında mikro boyutlarda morfolojik ve elementel analiz yapılarak AISI 1050 malzeme numune yüzeylerindeki gözenek incelenmesi, elementlerin tanımlanması ve bu elementlerin yüzey üzerindeki dağılımlarının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Böylece uygulanan parametrelerine bağlı olarak kaplama yüzey özelliklerinin nasıl değiştiği gözlenmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12. Kaplama incelemelerinde kullanılan Tarama Elektron Mikroskobunun genel görünüşü

3.4.4.3. AFM incelemeleri

Atmosferik basınçta plazma kaplama ve vakum plazma işlemiyle kaplanmış deney numunelerinin 3 boyutlu yüzey topografisini belirlemek amacıyla Süleyman Demirel

Üniversitesi Teknokneti Plazma Araştırma Laboratuvarında (PAL) bulunan Nanosurf Easyscan 2 marka güç mikroskobu (AFM) kullanılmıştır (Şekil 3.13).



Şekil 3.13. Kaplama yüzey topografisi incelemelerinde kullanılan AFM cihazının genel görünüşü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. Optik Görüntüler

Atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi ve vakum plazma kaplama işleminin numunelere uygulanmasından sonra numune yüzeylerinde meydana gelen değişimleri görebilmek amacıyla numune kesitleri incelenmiştir. Çalışmada atmosferik kaplanmış numunelerin kaplama kalınlık değerleri ölçülmüştür. Ölçülen kaplama tabaka kalınlık değerlerinin ortalaması alınmıştır. Alınan ortalama kalınlık değerleri Çizelge 4.1’de verilmektedir. Çizelge 4.1’deki kısaltmalar şu şekildedir; TY: Tam yumuşatma ısı işlemi uygulanmış; SV+210T: Suda sertleştirilmiş ve 210 °C’de temperlenmiş; SV+500T: Suda sertleştirilmiş ve 500 °C’de temperlenmiş; BD: Bilyeli dövme işlemi uygulanmış.

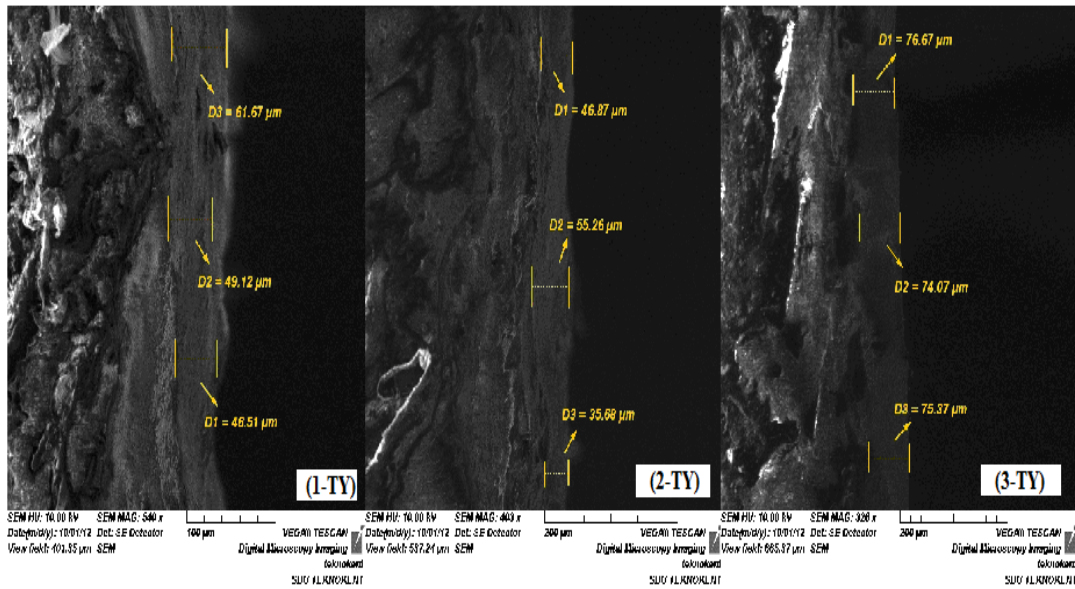
Çizelge 4.1. Atmosferik basınçta plazma kaplanmış bazı numunelere ait modifikasyon tabaka kalınlık değerleri

Numune No	İşlem Süresi (dk)	Frekans (kHz)	Gaz Cinsi	Kaplama Kalınlığı (µm)
1-TY	3	10	Argon	110.51
2-TY	3	15	Argon	32.33
3-TY	5	10	Argon	123.86
5-SV+210T	5	10	Argon	22.28
6- SV+210T	10	10	Argon	5.29
7- SV+210T	10	15	Argon	7.18
9- SV+500T	5	10	Argon	32.72
10-SV+500T	10	10	Argon	62.93
11-SV+500T	10	15	Argon	18.77
13-BD	5	10	Argon	52.43
14-BD	10	10	Argon	45.93
15-BD	10	15	Argon	75.37

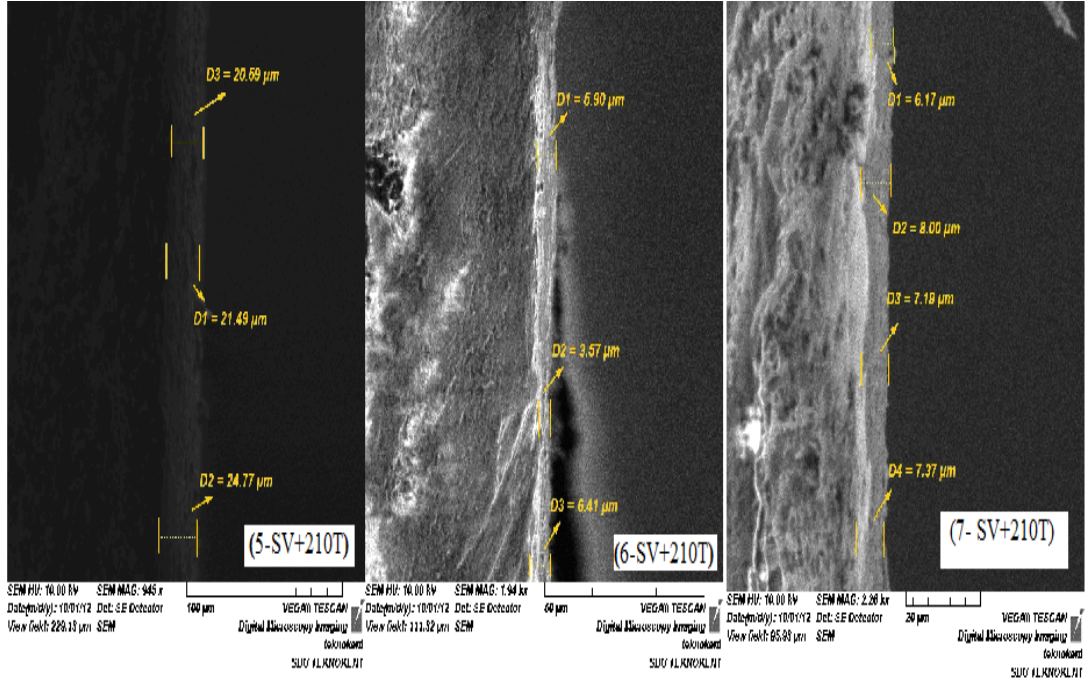
Şekil 4.1’de Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri verilmektedir. Numunelerin optik görüntüleri incelendiğinde yapılarıdaki kontrast farklılıkları sayesinde kaplama tabakası ile alt malzeme rahatlıkla ayırt edilerek; değiştirilen plazma parametreleri ile kaplama tabaka kalınlıklarının ölçümü yapılabilmektedir. Şekillerde verilen alt malzemeler üzerine yapılan kaplamalara ait optik görüntüler incelendiğinde işlem süresinin kaplama kalınlığına önemli ölçüde etkisinin olmadığı

sonucuna varılmıştır. Bunun yanında plazma kaplama işlemi parametrelerinden olan frekans artırıldığında kaplama kalınlığında önemli bir düşüş gözlemlenmemiştir. Çizelge 4.1’de 1,2, 6, 7, 10,11 numaralı numune çiftlerinde işlem süresi aynı kalırken frekans değiştirilmiştir. Bu numunelerde kaplama kalınlığının frekansla düştüğü görülmektedir. Bu durum frekans değerindeki değişimin kaplama kalınlığına etki ettiğini göstermektedir.

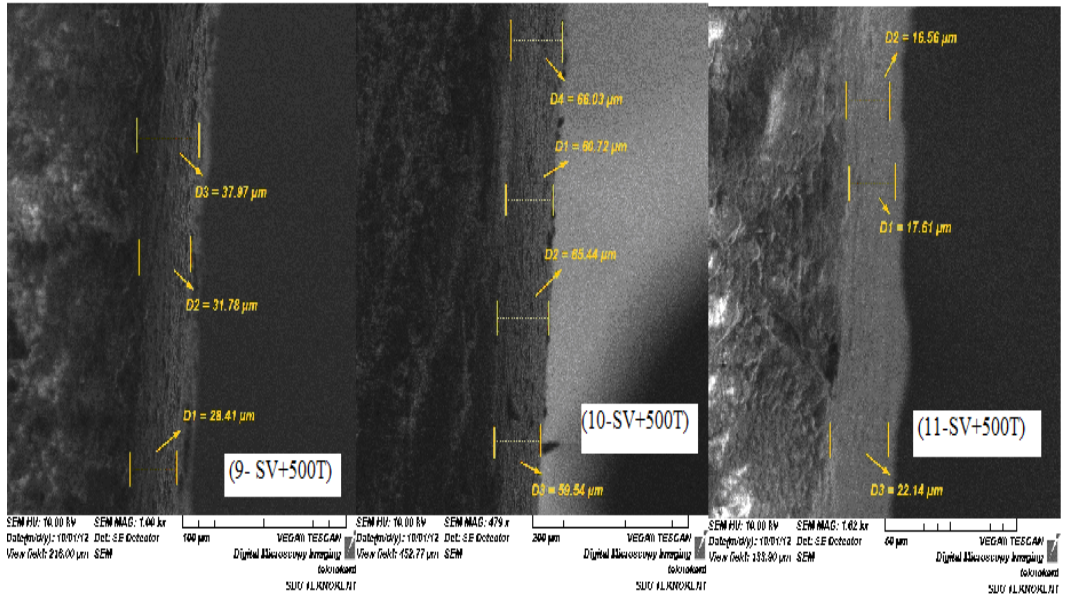
Şekil 4.2’de Su Verilmiş +210 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine; Şekil 4.3’te Su Verilmiş +500 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine ve Şekil 4.4’te Bilyeli Dövülmüş alt malzeme üzerine atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelere ait enine kesit optik görüntüler verilmektedir. Kontrast farklılıkları sayesinde kaplama tabakası kalınlıkları ölçülebilmektedir.



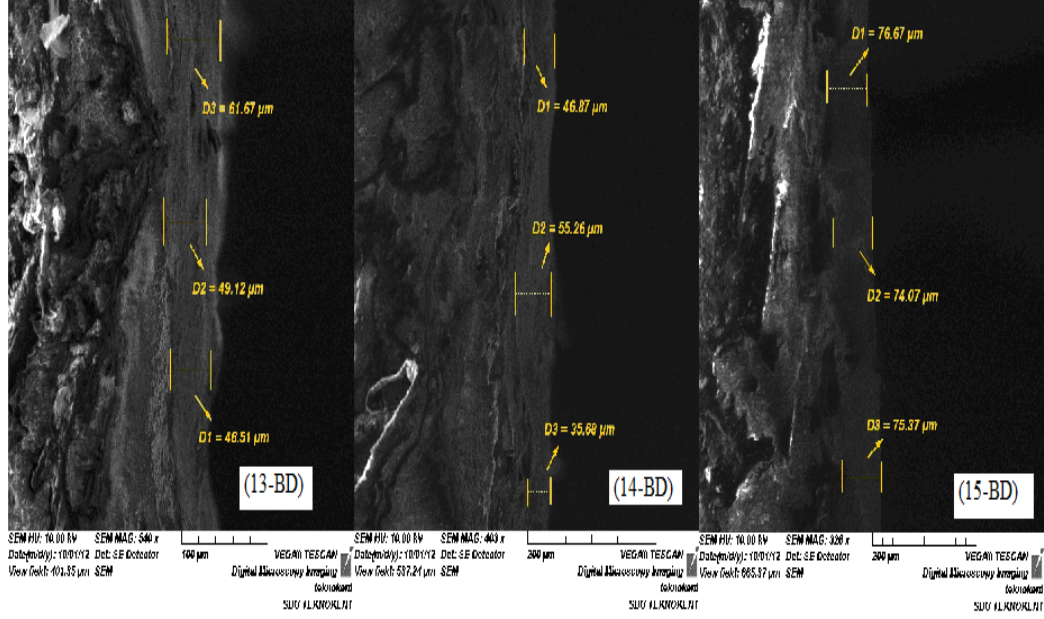
Şekil 4.1. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri (Plazma işlem parametreleri için bakınız Çizelge 4.1)



Şekil 4.2. Su verilmiş +210°C temperlenmiş alt malzeme üzerine atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri (Plazma işlem parametreleri için bakınız Çizelge 4.1)

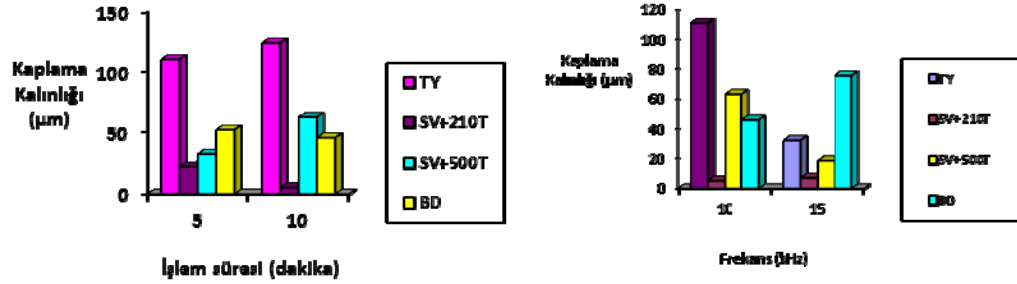


Şekil 4.3. Su verilmiş +500 °C temperlenmiş alt malzeme üzerine atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri (Plazma işlem parametreleri için bakınız Çizelge 4.1)



Şekil 4.4. Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine atmosferik basınçta plazma kaplama işlemi uygulanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri (Plazma işlem parametreleri için bakınız Çizelge 4.1)

Ayrıca atmosferik basınçta değişik işlem parametrelerinde PTFE kaplama işlemi sonrası ölçülen ortalama kaplama kalınlık değerleri Şekil 4.5'te verilmektedir.



Şekil 4.5. Atmosferik basınçta değişik işlem parametrelerinde PTFE kaplama işlemi sonrası ölçülen ortalama kalınlık değerleri

Çalışmada ayrıca aynı malzemeye farklı yüzey işlemleri uygulanmış halde hazırlanmış alt malzemelerden numunelere vakum şartlarında plazma kaplama işlemi uygulanmıştır. Çizelge 4.2'de vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış numunelere ait kaplama tabakası kalınlıkları verilmiştir. Vakum şartlarında plazma ile C3F6 kaplanmış numunelere ait kaplama kalınlıkları Çizelge 4.3'te verilmektedir.

Tabaka kalınlık değerleri büyütülmüş enine kesitlerden ölçülen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak bulunmuştur. Çizelge 4.2 ve izelge 4.3 karşılaştırmalı olarak incelendiğinde vakum şartlarında PTFE kaplama işleminde plazma gazı olarak Argon kullanılırken hekzafloropropan(C_3F_6)kaplanması esnasında gaz halindeki kaplama malzemesi olan hekzafloropropan(C_3F_6) kullanılmıştır.

İşlem parametrelerinden birisi olan g değerleri her iki kaplama malzemesi için farklı Watt değerlerindedir. Kaplamanın uygulanabilmesi için gereken güç değerleri n deneylerle belirlenmiştir. Bu değerlerden sapmalar olduğunda uygun kaplama yapılamamaktadır. Bundan dolayı g parametresi ancak kaplama malzemelerinin her birisi için kendisi içinde değerlendirilmiştir. PTFE kaplamalarda diğer parametreler sabit tutulduğunda g değeri dşke kaplama kalınlığı düşmektedir. Bu durum izelge 4.2’de ve şekil 4.6’da 1-a ve 3-c numunelerinde görülmektedir. C_3F_6 kaplamada da benzer durum edilmiştir. Bu durum izelge 4.3 ve şekil 4.7’de 1-P-a ve 2-P-b numunelerinde görülmektedir. Bu durum daha önceki çalışmalarla uyuşmaktadır (Yuan vd., 2011).

Vakum basınç değeri kaplama kalınlığını dolayısıyla kaplama kalitesini etkileyen bir başka işlem parametresidir. Kaplama malzemesine bağlı olmak, kaplamanın gereken kalitede yapılabilmesi için vakum basıncı değerlerinin belli aralıktta seçilmesi gerekmektedir. Yapılan n deneylerle basınç aralıkların izelge 4.2 ve izelge 4.3’te verildiği değerde olması gerektiği belirlenmiştir. Bu nedenle PTFE ve C_3F_6 kaplamalar için farklı basınç aralıkları uygulanmıştır. PTFE kaplanması durumunda diğer parametreler sabit tutulursa vakum basınç değeri dşke kaplama kalınlığı düşmektedir. Bu durum izelge 4.2 ve şekil 4.6’da 1-a ve 2-b numunelerinde görülmektedir. Benzer şekilde C_3F_6 kaplanması durumunda diğer parametreler sabit tutulursa vakum basınç değeri dşke kaplama kalınlığı artmaktadır. Bu durum izelge 4.3 ve şekil 4.7’de 3-P-c ve 4-P-d numunelerinde görülmektedir.

İşlem süresi kaplama malzemesi ve plazma gazının cinsine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. n deneylerle her bir kaplama malzemesi için bir süre aralığı belirlenmiş ve uygulanmıştır (izelge 4.2 ve izelge 4.3). Genel olarak her iki kaplama malzemesi için (PTFE ve C_3F_6) kaplama süresi arttıka kaplama kalınlığı artmaktadır.

Her bir kaplama malzemesi için elde edilen kaplama kalınlıkları genel anlamda karşılaştırıldığında PTFE malzemesinin kaplama kalınlığı daha yüksektir. Alt malzemeler, uygulanan yüzey işlemleri aynı olduğuna göre, kaplama işlem parametreleri kaplama malzemesinin kendi özelliklerine bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Tüm bunlar göz önüne alınarak PTFE ve C_3F_6 kaplama malzemeleri için kalınlık karşılaştırılması yapılmıştır (Çizelge 4.2 , Çizelge 4.3, Şekil 4.6 ve Şekil 4.7).

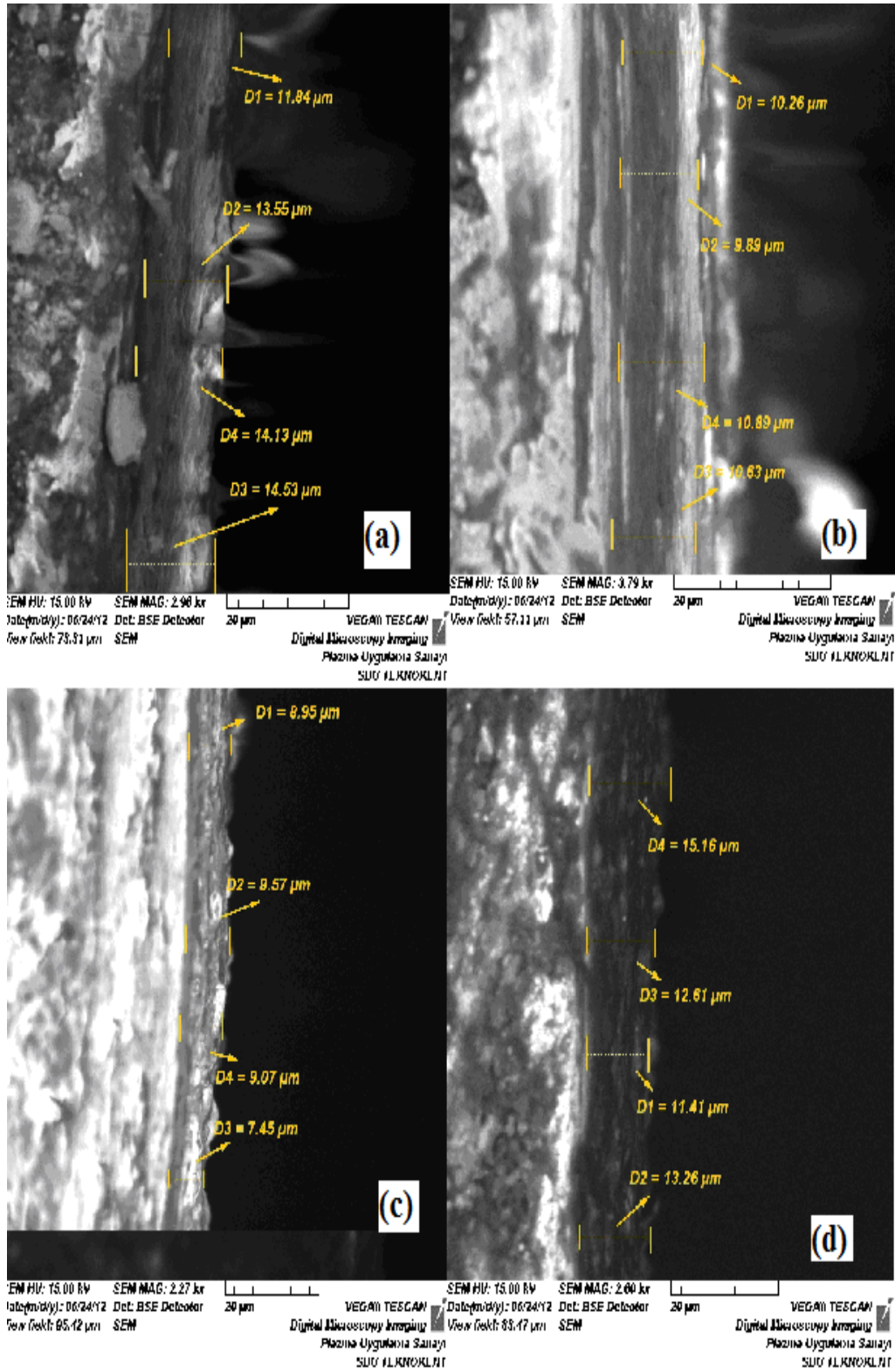
Çizelge 4.2. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin kaplama tabakası kalınlık değerleri

Numune No	Güç(W)	Basınç(mtorr)	Gaz cinsi	Süre(dk)	Kaplama kalınlığı (μm)
1-a	180	100	Argon	7,5	14,07
2-b	180	50	Argon	7,5	10,41
3-c	100	100	Argon	7,5	8,76
4-d	100	100	Argon	15	13,11

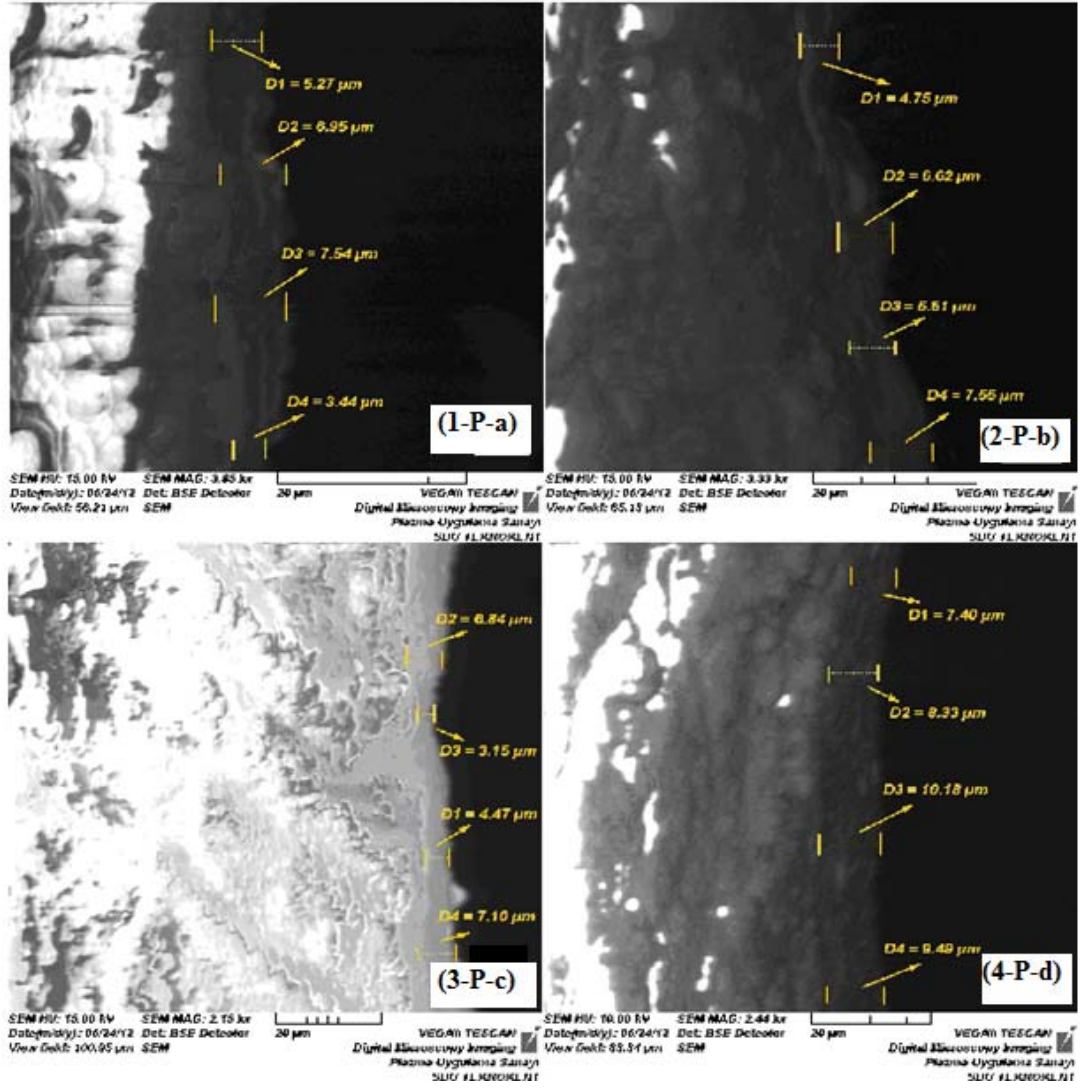
Çizelge 4.3. Vakum şartlarında plazma ile C_3F_6 kaplanmış numunelerin kaplama tabakası kalınlık değerleri

Numune No	Güç(W)	Basınç(mtorr)	Süre(dk)	Kaplama kalınlığı (μm)
1-P-a	50	300	15	5,56
2-P-b	100	300	15	6,10
3-P-c	100	300	30	5,39
4-P-d	100	100	30	8,85

Şekil 4.6’da vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunelere ait enine kesit optik görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.7’de vakum şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait enine kesit optik görüntüleri verilmektedir.

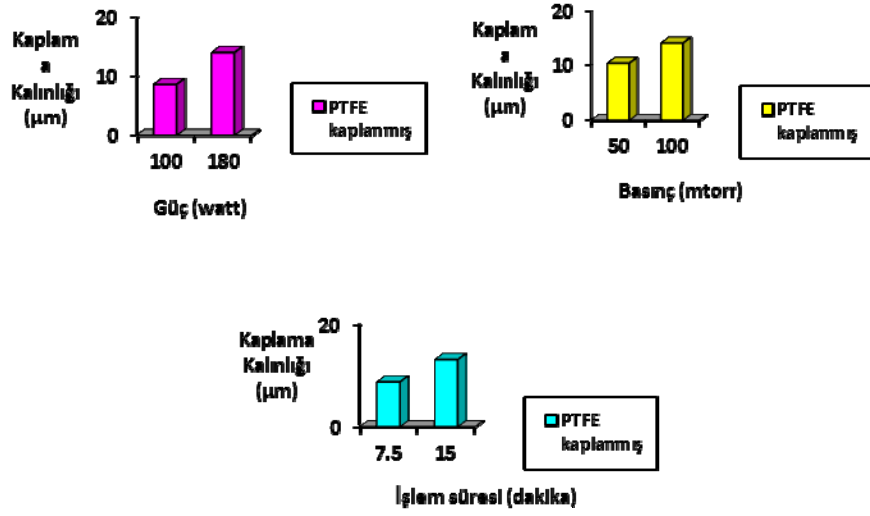


Şekil 4.6. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin enine kesit optik görüntüleri (Plazma işlem parametreleri için bakınız Çizelge 4.2)

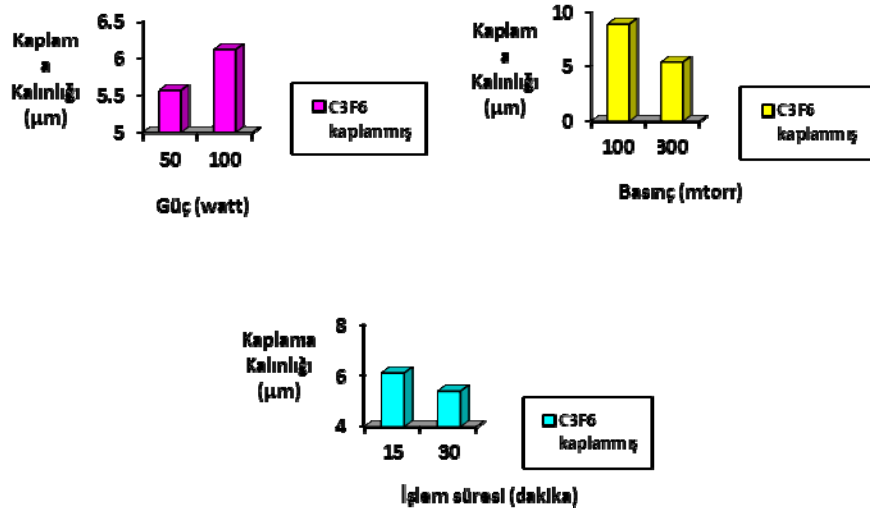


Şekil 4.7. Vakum şartlarında plazma ile C_3F_6 kaplanmış numunelerin optik görüntüleri (Plazma işlem parametreleri için bakınız Çizelge 4.3)

Ayrıca vakum şartlarında değişik işlem parametrelerinde PTFE kaplama işlemi sonrası ölçülen ortalama kaplama kalınlık değerleri Şekil 4.8’de verilmektedir. Vakum şartlarında değişik işlem parametrelerinde C_3F_6 kaplama işlemi sonrası ölçülen ortalama kaplama kalınlık değerleri Şekil 4.9’da verilmektedir.



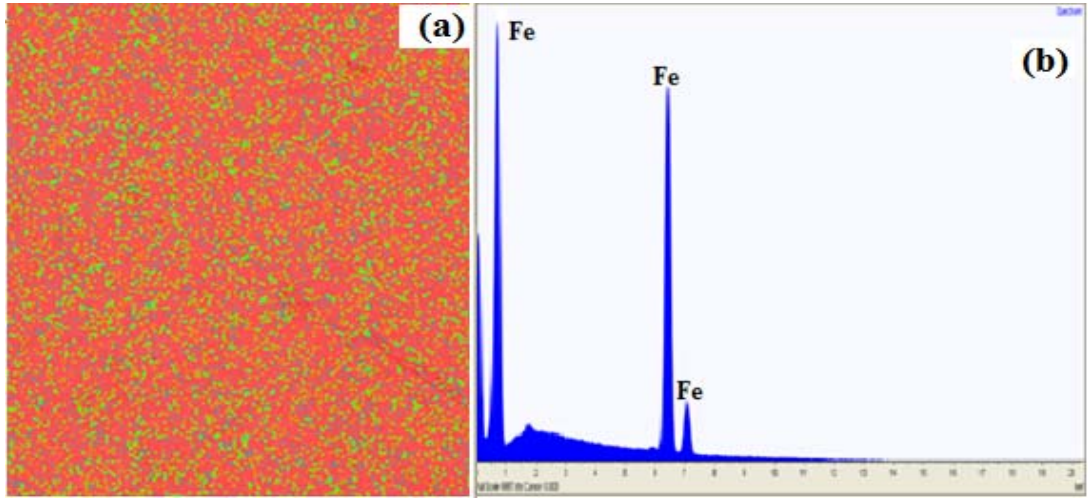
Şekil 4.8. Vakum şartlarında değişik işlem parametrelerinde PTFE kaplama işlemi sonrası ölçülen ortalama kalınlık değerleri



Şekil 4.9. Vakum şartlarında değişik işlem parametrelerinde C₃F₆ kaplama işlemi sonrası ölçülen ortalama kalınlık değerleri

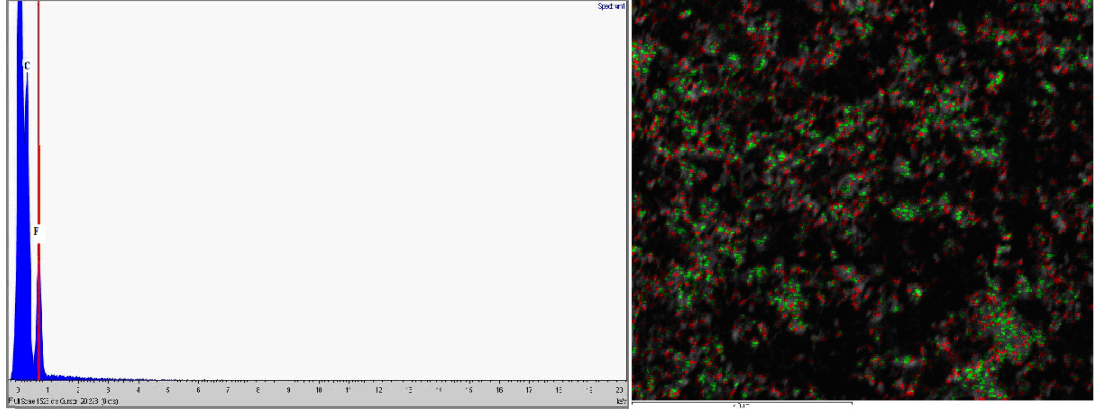
4.2. Kaplama İşlem Öncesi ve Sonrası EDS Analizleri

Çalışma için hazırlanan numunelerden seçilen bazı numunelerin kaplama öncesi ve kaplama sonrası EDS analizleri yapılmıştır. Çalışmada alt malzeme olarak AISI 1050 malzeme kullanılmıştır. AISI 1050 çelik malzemenin kimyasal kompozisyonu % 0,52 C, % 0,75 Mn, % 0,04 P, % 0,05 S ve kalanı Fe şeklindedir (www.efunda.com). Kaplama yapılmamış alt malzemenin EDS analizi Şekil 4.10'da verilmektedir. Şekil 4.10-a'daki EDS analizi incelendiğinde kırmızı rengin yoğun olduğu açıkça görülmektedir. AISI 1050 çelik malzeme olduğu için Fe ve C'dan oluşmaktadır. Bu nedenle şekildeki kırmızı olarak gösterilen element Demir (Fe)'dir.



Şekil 4.10. Kaplama yapılmamış alt malzemeye ait EDS analizi

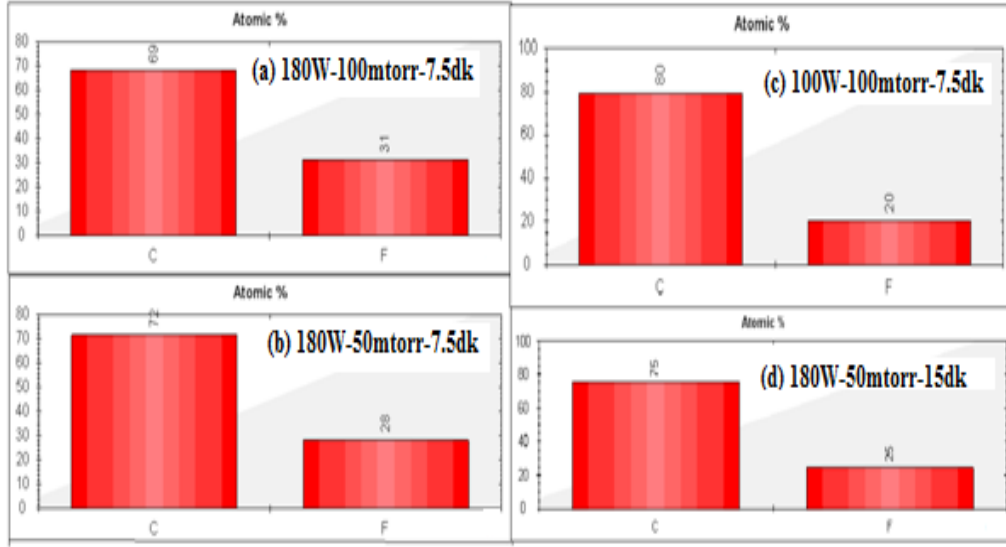
Şekil 4.11'de atmosferik şartlarda plazma ile PTFE kaplanmış numunelere ait EDS analizleri verilmektedir. PTFE malzemenin kimyasal yapısı flor ve karbon elementlerinin değişik bağlarla birleşmesi sonucu meydana gelen bir malzemedir. Şekil 4.11 incelendiğinde flor ve karbon atomları gözlemlenmiştir. Bu durum kaplamanın başarılı bir şekilde gerçekleştiğinin bir kanıtıdır.



Şekil 4.11. Atmosferik şartlarda plazma ile kaplanmış numunelere ait EDS analizi

PTFE (politetrafloroetilen)'nin kimyasal formülü $(-CF_2-CF_2-)_n$ olup, plazma işlemi uygulanmadan önce atomik ağırlık dağılımı %66.66 Flor (F) ve %33.33 Karbon (C) şeklindedir. Plazma işleminde kullanılan Argon gaz atomları ile CF_2 tepkimeye girerek C-F arasında bulunan bağ kırılır ve F atomları yüzeyden ayrılır. Yüzeyden ayrılan F atomları serbest radikalleri oluşturur ve diğer düşük enerji radikaller reaksiyona girerek polimer zincirinin büyümesine neden olurlar. Daha sonra ortamdaki radikaller ya başka bir radikalle reaksiyona girerek ya da yeni bağlar oluşturarak sönümlenir ve işlem tamamlanır(Sözlü görüşme; Ayşegül Uygun, 10.03.2012; Teke,2012).

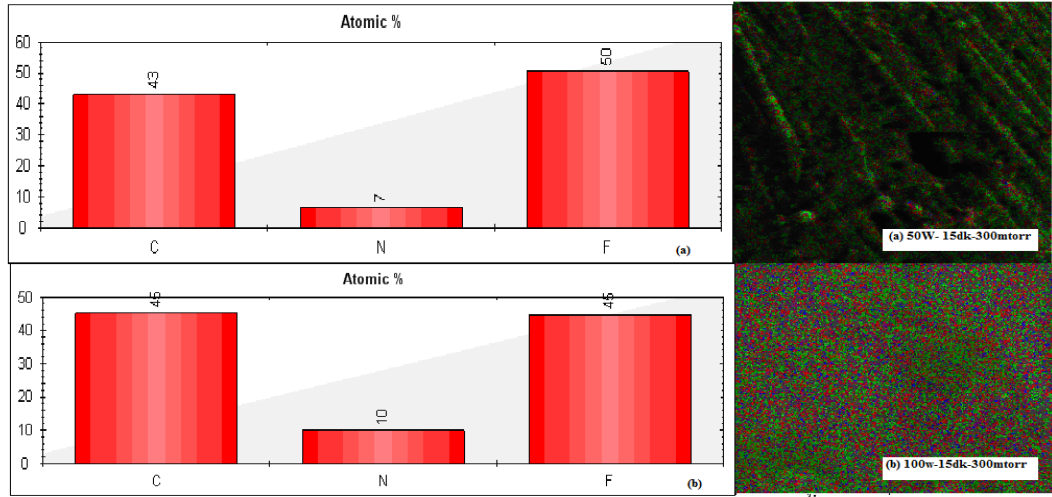
Şekil 4.12'de değişik alt malzemeler üzerine vakum şartlarında değişik plazma parametrelerinde yapılan kaplama işlemi sonrası elde edilen EDS analizleri verilmektedir. İşlem sırasında kullanılan plazma parametreleri Şekil 4.12'de verildiği gibidir. Kaplama için kullanılan deşarj gücü 180W değerinden 100W değerine düşürüldüğünde F/C oranında düşüş gözlemlenmiştir. Kaplama işlem süresi artırıldığında plazma ile yüzey arasındaki etkileşim artacağından dolayı kaplama yoğunluğu artmaktadır. Kaplama işlemi sırasında işlem süresi ve deşarj gücü sabit tutulup işlem basıncı düşürüldüğünde F/C oranı düşmektedir. Plazma kaplama vakum basınç değeri plazma enerji yoğunluğunu da etkilemektedir(Sözlü görüşme; Ayşegül Uygun, 19.03.2012; Teke,2012).



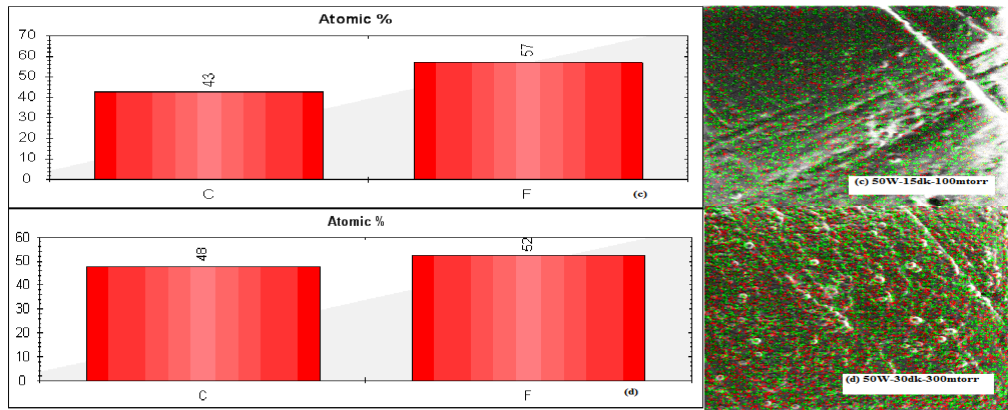
Şekil 4.12. Değişik alt malzemeler üzerine vakum şartlarında değişik plazma parametreleri kullanılarak PTFE kaplanan numunelere ait EDS analizleri

Çalışmada ayrıca vakum şartlarında plazma kaplama işlemi ile değişik alt malzemeler üzerine hekzafloropropen kaplanmış olup kimyasal formülü C_3F_6 şeklindedir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de değişik alt malzemelere üzerine vakum şartlarında değişik plazma işlem parametreleri kullanılarak yapılan kaplamalara ait EDS analizleri verilmektedir. Kaplama işlemi sırasında kullanılan Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’de verildiği gibidir. Şekil 4.13 ve 4.14’de C ve F atomların numune yüzeyindeki dağılımında Flor (F) atomlarını yeşil renkte, Karbon (C) atomları kırmızı renkte görülmektedir. Şekil 4.13 incelendiğinde süre ve basınç sabit tutulup güç değeri artırıldığında F/C oranında düşüş meydana geldiği belirlenmiştir. Deşarj gücünün yüksek seçilmesi C oranını F oranına yaklaştırarak F/C oranının düşmesine neden olmuştur. Bunun yanında güç ve basınç değerleri sabit tutulup işlem süresi artırıldığında ise yine F/C oranında düşüş meydana gelmiştir. Ayrıca şekiller incelendiğinde C ve F atomlarının homojen bir şekilde dağıldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, kaplanacak numunenin vakum odasına uygun yerleştirildiği ve kaplamanın homojen olarak yapıldığını göstermektedir.

Kaplama yapılan tüm numuneler vakum odasında bir aynı şekilde konumlandırılarak kaplama işleminin sağlıklı şekilde yapılmasına özen gösterilmiştir. Kaplanacak numunenin vakum çemberindeki konumu kaplama kalitesini etkilemektedir.



Şekil 4.13. Değişik alt malzemeler üzerine vakum şartlarında değişik plazma parametreleri kullanılarak C_3F_6 kaplanan numunelere ait EDS analizleri (a) ve (b)



Şekil 4.14. Değişik alt malzemeler üzerine vakum şartlarında değişik plazma parametreleri kullanılarak C_3F_6 kaplanan numunelere ait EDS analizleri (c) ve (d)

4.3. Aşınma Deney Sonuçları

Atmosferik şartlarında plazma kaplama ve vakum şartlarında plazma kaplama yöntemiyle farklı polimerik malzeme kaplanan numunelere tribotester lineer aşınma cihazı ile aşınma deneyleri uygulanmıştır. Deneyler oda sıcaklığında ve ortalama %60-70 nem oranında yapılmıştır.

Aşınma deneyi uygulanmadan önce deney için uygun parametreler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla atmosferik şartlarda ve vakum şartlarında plazma ile

kaplanmış numuneler farklı yük, kayma hızı ve kayma mesafesinde deneye tabi tutulmuşlardır. Yük değeri ve kayma hızı yüksek seçildiğinde aşınma hızla gerçekleşerek aşındırıcı seramik bilyenin alt malzemeye temas süresi kısalmıştır. Bunun yanında yatakların çalışma prensipleri göz önüne alınarak atmosferik şartlarda plazma kaplanmış numuneler için 8mm/s kayma hızı, 1N yük ve 2m kayma mesafesi parametreleri ile aşınma deneyleri uygulanmıştır. Vakum şartlarında plazma ile kaplanmış numunelere ise 8mm/s kayma hızı ve 1N yükte ve 3 m kayma mesafesi değerleri seçilerek aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir.

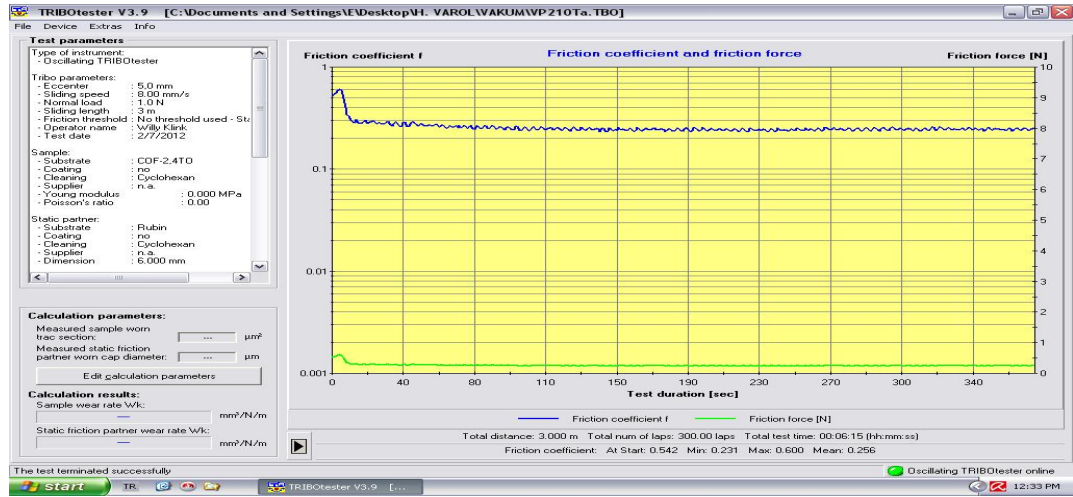
Tribotester lineer aşınma cihazından sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti değerleri elde edilebilmektedir. Aşınma deneyi uygulanan numunelerin aşınma izleri optik mikroskop yardımıyla incelenmiştir. Sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti ve aşınma iz görüntüleri kullanılarak yapılan kaplamanın aşınma davranışı analiz edilmeye çalışılmıştır.

4.3.1. Sürtünme katsayısı sonuçları

Aşınma deneyi sırasında tribotester cihazından her bir kaplama şartı için sürtünme katsayıları ölçülmüştür. Elde edilen sürtünme katsayısı değerleri incelenerek plazma işlem parametrelerinin, atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi, vakum plazma kaplama işlemi ve alt malzemenin yüzey karakteristiklerinin aşınma davranışına etkisi belirlenmeye çalışılmıştır.

4.3.1.1 Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayısı sonuçları

Plazma işlem parametrelerinin kaplama kalitesine etkisinin belirlenmesi için aynı alt malzeme üzerine farklı işlem parametreleri kullanılarak atmosferik şartlarda plazma kaplama işlemi yapılmıştır. Çalışmada değiştirilen işlem parametreleri, işlem süresi, frekans ve gaz cinsi değerleridir. Çizelge 4.5'teki verilen değerler Şekil 4.15'te verilen çıktılarından elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Aşınma deneyi sonucu elde edilen değerlerin elde edildiği çıktılar

Çizelge 4.4'te atmosferik şartlarda plazma kaplanmış numuneler için elde edilen sürtünme katsayıları verilmektedir. Çizelge 4.4'te verilen numune numaralarındaki numunelere uygulanan plazma işlem parametreleri Çizelge 3.3, Çizelge 3.4, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verildiği gibidir. Çizelge 4.4'te verilen sürtünme katsayısı değerlerini elde etmek için uygulanan aşınma deney parametreleri sabit olup aşağıdaki şekildedir; hız: 8 m/s; yük: 1 N ve yol: 2 m.

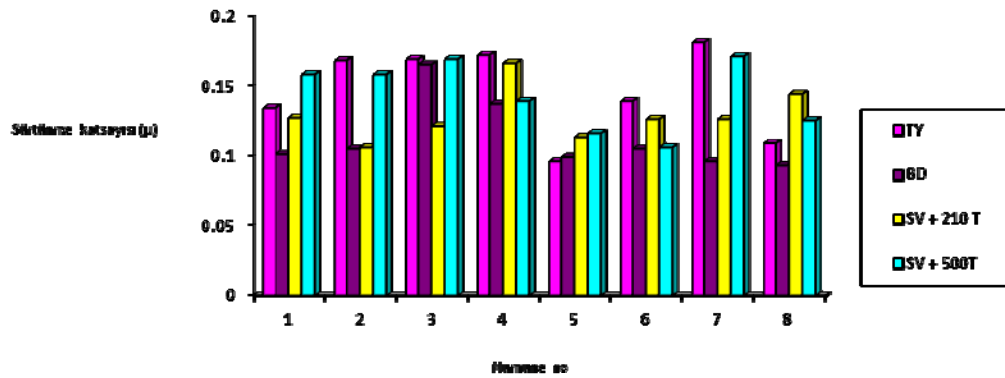
Çizelge 4.4. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları

Numune No	Sürtünme Katsayısı(μ)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama
ATY 11	0.112	0.172	0.134
ATY 12	0.142	0.183	0.168
ATY 13	0.150	0.189	0.169
ATY 14	0.125	0.202	0.172
ATY 15	0.089	0.129	0.096
ATY 16	0.122	0.171	0.139
ATY 17	0.128	0.194	0.181
ATY 18	0.101	0.276	0.109
ABD 21	0.091	0.110	0.101
ABD 22	0.095	0.119	0.105
ABD 23	0.156	0.171	0.165
ABD 24	0.128	0.164	0.137
ABD 25	0.091	0.109	0.099
ABD 26	0.097	0.116	0.105
ABD 27	0.088	0.107	0.096
ABD 28	0.083	0.104	0.093

Çizelge 4.4. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları (Devam)

Numune No	Sürtünme Katsayısı(μ)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama
ASV210T 31	0.114	0.176	0.127
ASV210T 32	0.099	0.131	0.106
ASV210T 33	0.112	0.149	0.121
ASV210T 34	0.145	0.192	0.166
ASV210T 35	0.104	0.134	0.113
ASV210T 36	0.113	0.196	0.126
ASV210T 37	0.116	0.165	0.126
ASV210T 38	0.128	0.184	0.144
ASV500T 41	0.147	0.202	0.158
ASV500T 42	0.122	0.198	0.158
ASV500T 43	0.130	0.207	0.169
ASV500T 44	0.122	0.198	0.139
ASV500T 45	0.106	0.159	0.116
ASV500T 46	0.094	0.152	0.106
ASV500T 47	0.143	0.216	0.171
ASV500T 48	0.107	0.146	0.125

Atmosferik şartlarda değişik plazma işlem parametrelerinde kaplanan numunelere ait sürtünme katsayısı sonuçları Şekil 4.16’da verilmektedir.



Şekil 4.16. Atmosferik şartlarda kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları

Diğer işlem parametreleri sabit kalırken işlem süresi artırıldığında her bir alt malzeme için sürtünme katsayısı değeri değişimleri Çizelge 4.5’de verilmiştir. Çizelge 4.5 incelendiğinde tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine atmosferik şartlarda yapılan plazma kaplama işlemi için seçilen 3 ve 5 dakikalık işlem süresi

birbirine yakın olduğu için sürtünme katsayıları birbirine yakın değerler elde edilmiştir. Diğer alt malzemeler üzerine yapılan kaplamalardan elde edilen sürtünme katsayısı değerlerinde önemli bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Böylelikle işlem süresinin sürtünme katsayısına önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Çizelge 4.5. Atmosferik Şartlarda plazma kaplama işlem parametrelerinden işlem süresinin sürtünme katsayısına etkisi

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı (μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	3dk- Argon-15kHz	0,168
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	5dk- Argon-15kHz	0,172
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	5dk- Argon-15kHz	0,106
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	10dk- Argon-15kHz	0,166
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	5dk- Argon-15kHz	0,158
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	10dk- Argon-15kHz	0,139
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	5dk- Argon-15kHz	0,105
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	10dk- Argon-15kHz	0,137

Kaplama parametrelerinden frekansın artırılması sonucu elde edilen her bir alt malzemeye ait sürtünme katsayı değerleri Çizelge 4.6’da verildiği gibidir. Çizelge 4.6 incelendiğinde frekansın artırılması durumunda kaplanmış halde sürtünen çiftler arasında ölçülen sürtünme katsayılarında önemli olmayacak oranda artış meydana gelmiştir. Bilyeli dövülmüş alt malzeme numunelerinde değişim olmamıştır denilebilir.

Çizelge 4.6. Atmosferik Şartlarda plazma kaplama işlem parametrelerinden frekansın sürtünme katsayısına etkisi

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı (μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	10kHz- Argon-5dk	0,134
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	15kHz- Argon-5dk	0,168
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	10kHz-- Argon-5dk	0,127
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	15kHz- Argon-5dk	0,169
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	10kHz- Argon-5dk	0,139
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	15kHz- Argon-5dk	0,158
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	10kHz- Argon-5dk	0,101
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	15kHz- Argon-5dk	0,105

Kaplama işlemi sırasında plazma alevi oluşturma sırasında kullanılan gaz cinsinin değiştirilmesinin sürtünme katsayısına etkisi Çizelge 4.7’de verilmektedir. Çizelge 4.7 incelendiğinde gaz cinsinin sürtünme katsayılarının değişmesine neden olduğu belirlenmiştir. Helyum gazının sıcaklığı 20000K iken argon gazının sıcaklığı 14000K mertebesindedir (<http://www.belgeler.com/blg/2vv0/coating-7>). Bunun yanında helyum gazının ısı iletkenlik katsayısı (0°C) 0,14363 W/mK iken argon gazının ısı iletkenlik katsayısı (0°C) 0,01633 W/mK’dir. Plazma kaplama işleminde plazma alevinin kalitesi kullanılan gaza göre değişmektedir. Helyum gazının meydana getirdiği plazma alevi argon gazına göre daha etkindir. Kaplama yüzeyinin topografyası Argon gazına göre daha az pürüzlülük ve süreksizlik gösterdiğinden helyum gazının kullanıldığı kaplamalarda daha düşük sürtünme katsayıları elde edilmesine neden olmaktadır.

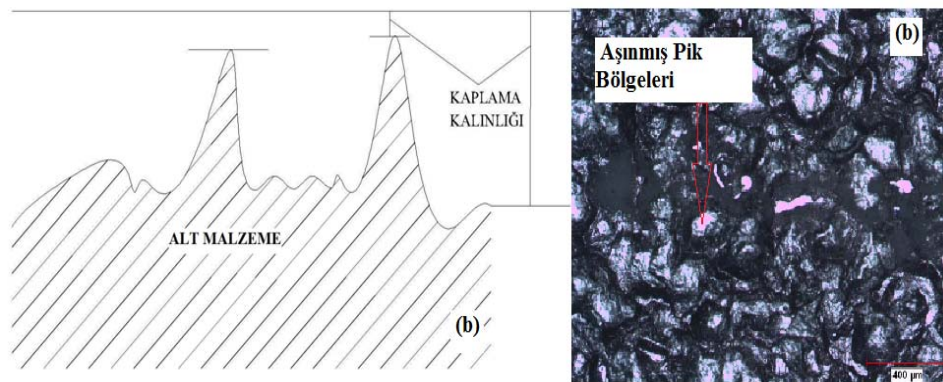
Çizelge 4.7.Atmosferik Şartlarda plazma kaplama işlem parametrelerinden gaz cinsinin sürtünme katsayısına etkisi

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	Argon-10dk-15kHz	0,172
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	Helyum-10dk-15kHz	0,109
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	Argon-10dk-15kHz	0,166
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	Helyum-10dk-15kHz	0,144
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	Argon-10dk-15kHz	0,139
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	Helyum-10dk-15kHz	0,125
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	Argon-10dk-15kHz	0,137
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	Helyum-10dk-15kHz	0,093

Çalışmada AISI 1050 malzeme üzerine tam yumuşatma işlemi,Suda sertleştirme + 210 °C’de temperleme işlemi ve Suda sertleştirme+ 500 °C’de temperleme ısı işlemleri uygulanarak yüzey sertlik değerlerinde değişiklik yapılmıştır. Bunun yanında bir grup numuneye bilyeli dövme mekanik yüzey işlemi de uygulanmıştır. Yapılan ısı işlemler sonunda tam yumuşatma ısı işlemi uygulanmış alt malzemenin sertlik değeri HRB 87 (HRC 5); Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemenin sertlik değeri HRC 87 ve Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemenin sertlik değeri HRC 37’dir. Bilyeli dövme işlemi sonrası yüzey sertlik değeri HRC 40 olarak ölçülmüştür.

Yüzey kalitesini değiştirmeksizin farklı ısı işlem şartları uygulanarak alt malzemenin yüzey sertlik değerleri değiştirilmiştir. Bilyeli dövme işleminde her durumda yüzey kalitesi değişmektedir (Yılmaz vd; 2008). Seçilen bilyeli dövme işlem parametreleri ile ısı işlemde elde edilen sertlik değerine yaklaşık olarak eşit elde edilmiştir. Böylece alt malzemenin yüzey sertlik değerinin kaplama sonrası aşınma özelliklerine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Aynı plazma işlem parametrelerini kullanarak farklı sertlik değerine sahip alt malzemeler üzerine plazma kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları Çizelge 4.8’de verilmektedir. Çizelge 4.8 incelendiğinde en düşük sürtünme katsayısı değeri ısıtılmış işlem uygulanmış alt malzemelerden Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış numunede elde edilmiştir. Bilyeli dövülmüş alt malzemenin sürtünme katsayısı değeri ise tüm alt malzemeler arasında en düşük değer olarak elde edilmiştir. Tam yumuşatılmış alt malzemenin sertliği çok düşük olduğundan sürtünme yükü altında bölgesel elastik şekil değişikliğine uğramaktadır. Kaplama malzemesi bundan farklı davranış gösterdiğinden yığılma meydana gelerek sürtünme katsayısının arttığı düşünülmektedir. En yüksek sertlik değerinin elde edildiği alt malzemede ise daha rijit bir davranış meydana gelmekte, sürtünme katsayısı açısından en iyi davranışın orta sertlik değerinin elde edildiği (HRC 37) alt malzemede elde edilmiştir. Bu üç alt malzemede yüzey pürüzlülük değerleri aynıdır. Böylece sadece alt malzemenin sertliğinin etkisinin incelenmesi sağlanmıştır. Bilyeli dövülmüş alt malzemede ise yüzey pürüzlülüğü farklı olmakla birlikte sertlik değeri Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemeye oldukça yakındır. Buna rağmen yüzey kalitesinin daha kötü olmasından dolayı sürtünme katsayısı değerleri farklılık göstermiştir. Şekil 4.17-a’da bilyeli dövülmüş yüzey topografyasının şematik şekli ve Şekil 4.17-b’de bilyeli dövülmüş alt malzemeye ait aşınma iz görüntüsü verilmektedir. Şekil 4.17-a incelendiğinde bilyeli dövülmüş malzemenin yüzeyinde bulunan piklerin üzerine yapılan kaplama ince olduğu için erken kalkarak alt malzemeye ulaşmıştır(Şekil 4.17-b). Kalkan kaplama malzemesi seramik bilye ile metal arasında yağlayıcı görevi görerek sürtünme katsayısında düşüşe neden olmuştur.



Şekil 4.17. Bilyeli dövülmüş alt malzemenin yüzey topografyası

Çizelge 4.8. Atmosferik Şartlarda aynı plazma kaplama işlem parametreleri kullanıldığında alt malzemenin sürtünme katsayısına etkisi

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	Argon-5dk-15kHz	0,172
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	Argon-5dk-15kHz	0,106
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	Argon-5dk-15kHz	0,158
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	Argon-5dk-15kHz	0,105

4.3.1.2 Vakum şartlarında plazma kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayısı sonuçları

Çalışmada vakum şartlarında numuneler üzerine PTFE ve C_3F_6 kaplama işlemi uygulanarak aşınma deneyleri yapılmıştır. Aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme katsayısı değerleri incelenerek plazma parametrelerinin, alt malzemenin ve kaplama malzemesinin aşınma davranışına etkisi belirlenmiştir. Çizelge 4.9’da vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayısı değerleri verilmektedir. Vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunelerin aşınma deney parametreleri sabit olup aşağıdaki şekildedir; Hız:8 m/s, Yük: 1N ve Yol:3 m.

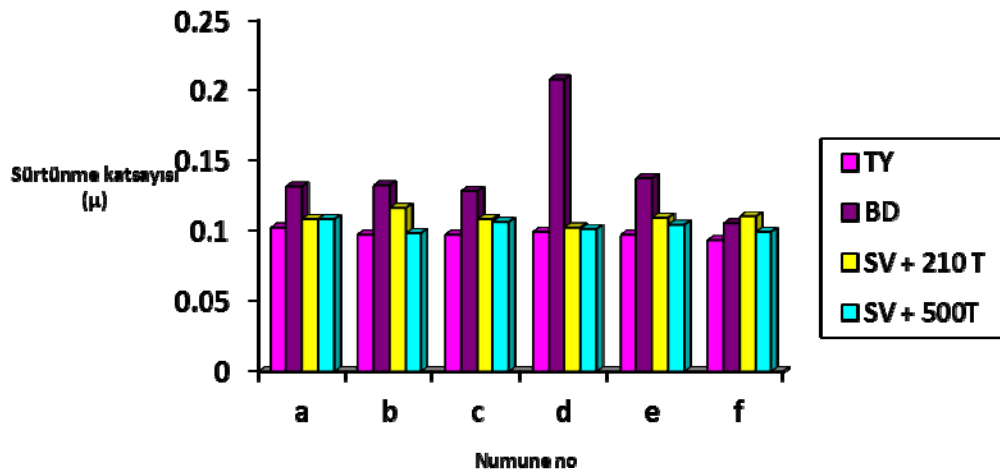
Çizelge 4.9. Vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları

Numune No	Sürtünme Katsayısı(μ)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama
VTY-a	0.095	0.144	0.102
VTY-b	0.093	0.125	0.097
VTY-c	0.089	0.152	0.097
VTY-d	0.092	0.123	0.099
VTY-e	0.091	0.124	0.097
VTY-f	0.081	0.155	0.093
VBD-a	0.104	0.166	0.131
VBD-b	0.097	0.175	0.132
VBD-c	0.102	0.153	0.128
VBD-d	0.096	0.283	0.207
VBD-e	0.097	0.183	0.137

Çizelge 4.9. Vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları
(Devam)

Numune No	Sürtünme Katsayısı(μ)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama
VBD-f	0.092	0.117	0.105
VT210T-a	0.102	0.128	0.108
VT210T-b	0.110	0.121	0.116
VT210T-c	0.103	0.143	0.108
VT210T-d	0.091	0.148	0.102
VT210T-e	0.100	0.215	0.109
VT210T-f	0.104	0.134	0.110
VT500T-a	0.099	0.145	0.108
VT500T-b	0.090	0.112	0.098
VT500T-c	0.091	0.118	0.106
VT500T-d	0.092	0.141	0.101
VT500T-e	0.088	0.123	0.104
VT500T-f	0.089	0.140	0.099

Vakum şartlarında değişik plazma işlem parametrelerinde PTFE kaplanan numunelere ait sürtünme katsayısı sonuçları Şekil 4.18’de verilmektedir.



Şekil 4.18. Vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları

Çalışmada vakum şartlarında PTFE kaplama işleminde plazma işlem parametrelerinin kaplama kalitesine etkisinin belirlenebilmesi için aynı alt malzeme

üzerine farklı işlem parametrelerinde (güç, basınç ve işlem süresi) kaplama işlemi yapılmıştır.

Değiştirilen plazma işlem parametrelerinden ilki güçtür. Çizelge 4.10'da güç değerinin 100W'dan 180W'a çıkarılmasıyla sürtünme katsayısındaki değişim verilmektedir. Çizelge 4.10 incelendiğinde deşarj gücü değiştirildiğinde sürtünme katsayısında önemli bir değişme ortaya çıkmamaktadır. Ancak Bilyeli Dövme işlemi uygulanmış alt malzemenin kaplanmış şartlarda ölçülen sürtünme katsayısı değerleri daha yüksek olmakla birlikte deşarj gücünden etkilenmediği belirlenmiştir.

Çizelge 4.10.Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden gücün sürtünme katsayısına etkisi (PTFE kaplanmış)

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	100W-100mtorr-7,5dk	0,097
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	180W-100mtorr-7,5dk	0,102
Suda sertleştirme ve 210 °C'de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	100W-100mtorr-7,5dk	0,108
Suda sertleştirme ve 210 °C'de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	180W-100mtorr-7,5dk	0,108
Suda sertleştirme ve 500 °C'de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	100W-100mtorr-7,5dk	0,106
Suda sertleştirme ve 500 °C'de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	180W-100mtorr-7,5dk	0,108
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	100W-100mtorr-7,5dk	0,128
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	180W-100mtorr-7,5dk	0,131

Kaplama işlemi parametrelerinden olan vakum basıncın 50mtorr'dan 100mtorr'a çıkartılması sonucu sürtünme katsayısındaki değişimler Çizelge 4.11'de verilmektedir. Çizelge 4.11 incelendiğinde basınç değeri artırıldığında tüm alt malzemelerin kaplanmış haldeki ölçülen sürtünme katsayılarında önemli bir değişme belirlenmemiştir. Ancak basınç değerinin artması ile iyonlaşma miktarı artmakta bu da plazma alevinin homojenliğini, düzgün formda olmasını ve etkinliğini artırmaktadır.

Çizelge 4.11. Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden basıncın sürtünme katsayısına etkisi (PTFE kaplanmış)

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	50mtorr-180 W-7,5dk	0,097
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	100mtorr-180 W-7,5dk	0,102
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	50mtorr-180 W-7,5dk	0,116
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	100mtorr-180 W-7,5dk	0,108
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	50mtorr-180 W-7,5dk	0,108
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	100mtorr-180 W-7,5dk	0,098
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	50mtorr-180 W-7,5dk	0,131
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	100mtorr-180 W-7,5dk	0,132

Kaplama işlem süresinin sürtünme katsayısı üzerine etkisi Çizelge 4.12’de verilmektedir. İşlem süresinin artırılması ile tüm alt malzemeden numunelerin kaplanmış haldeki sürtünme katsayısı değerlerinde önemli bir etkiye sahip olmadığını göstermiştir. Sürtünme katsayısı kaplanan malzeme karakteristiğine ve yüzey kalitesine bağlıdır. Bu nedenle işlem süresinin sürtünme katsayısına etki etmediği anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.12.Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden işlem süresinin sürtünme katsayısına etkisi (PTFE kaplanmış)

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	7,5dk-180W-50mtorr	0,097
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	15dk-180W-50mtorr	0,093
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	7,5dk-180W-50mtorr	0,116
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	15dk-180W-50mtorr	0,110
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	7,5 dk-180 W-50mtorr	0,098

Çizelge 4.12.Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden işlem süresinin sürtünme katsayısına etkisi (PTFE kaplanmış) (Devam)

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı (μ)
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	15 dk-180 W-50 mtorr	0,099
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	7,5 dk-180 W-50 mtorr	0,132
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	15 dk-180 W-50mtorr	0,105

Aynı işlem parametrelerinde farklı yüzey sertlik değerlerine sahip olan alt malzemelere ait sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 4.13’te verilmektedir. Çizelge 4.13 incelendiğinde aynı plazma işlem parametreleriyle kaplanmış tam yumuşatılmış, Suda sertleştirme+210°C’de temperleme işlemi uygulanmış ve Suda sertleştirme +500°C’de temperleme işlemi uygulanmış numunelerin sürtünme katsayıları birbirine çok yakın değerler elde edilirken, bilyeli dövülmüş alt malzemenin kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı daha yüksek ölçülmüştür. Bu durum vakum şartlarında PTFE kaplamanın yüzeye daha iyi kaplandığını göstermektedir. Alt malzemenin yüzey sertlik değerleri birbirinden çok farklı olmakla birlikte sürtünme katsayılarının benzerlik göstermesi kaplama malzemesi ile alt malzemenin davranış benzerliğini ortaya koyduğu düşünülmektedir.

Çizelge 4.13.Vakum şartlarında aynı plazma kaplama işlem parametrelerinde kaplanmış alt malzemelerin sürtünme katsayısına etkisi (PTFE kaplanmış)

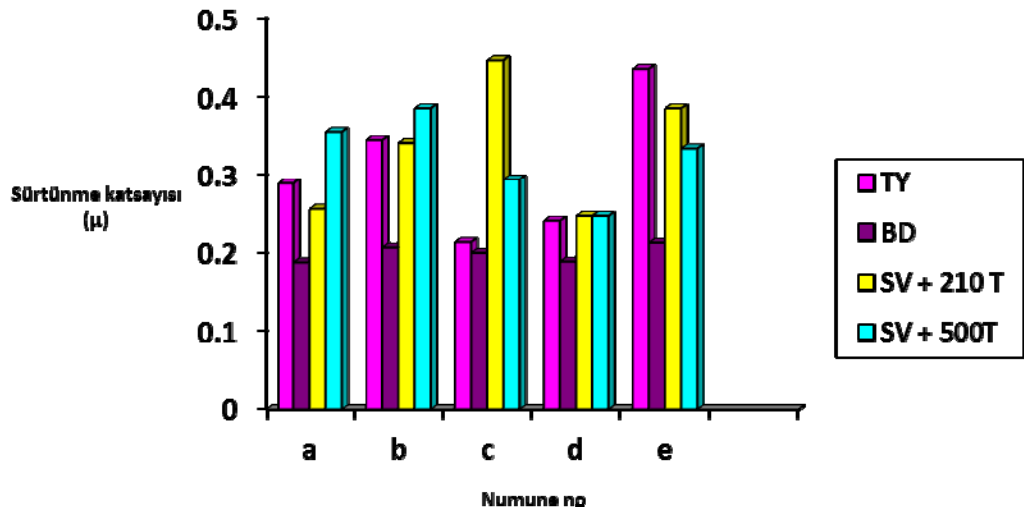
Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	180W- 100mtorr- 7,5dk	0,102
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	180W- 100mtorr- 7,5dk	0,108
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	180W- 100mtorr- 7,5dk	0,108
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	180W- 100mtorr- 7,5dk	0,131

Çalışmada ayrıca numuneler üzerine vakum şartlarında C_3F_6 malzeme kaplanmıştır. Kaplanan numunelerin aşınma deneyleri yapılarak sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. C_3F_6 kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayısı değerleri Çizelge 4.14'te verilmektedir. Vakum şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelerin aşınma deneylerinde kullanılan işlem parametreleri sabit olup aşağıdaki şekildedir; Hız: 8m/s; Yük:1N ve Yol: 3m.

Çizelge 4.14. Vakum şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları

Numune No	Sürtünme Katsayısı (μ)		
	Minimum	Maksimum	Ortalama
VTY-a	0.236	0.341	0.289
VTY-b	0.283	0.537	0.345
VTY-c	0.196	0.357	0.214
VTY-d	0.216	0.689	0.241
VTY-e	0.316	0.625	0.435
VBD-a	0.177	0.202	0.188
VBD-b	0.185	0.286	0.207
VBD-c	0.182	0.215	0.200
VBD-d	0.169	0.284	0.189
VBD-e	0.198	0.227	0.213
VT210T-a	0.231	0.600	0.256
VT210T-b	0.295	0.469	0.341
VT210T-c	0.339	0.523	0.446
VT210T-d	0.219	0.780	0.247
VT210T-e	0.281	0.552	0.385
VT500T-a	0.319	0.566	0.355
VT500T-b	0.347	0.580	0.385
VT500T-c	0.237	0.578	0.294
VT500T-d	0.217	0.786	0.247
VT500T-e	0.270	0.623	0.334

Vakum şartlarında değişik plazma işlem parametrelerinde C_3F_6 kaplanan numunelere ait sürtünme katsayısı sonuçları Şekil 4.19'da verilmektedir.



Şekil 4.19. Vakum şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait sürtünme katsayıları

Aynı alt malzeme üzerine plazma işlem parametrelerinden bazıları (güç, basınç ve süre) değiştirilerek sürtünme katsayısı değerleri elde edilmiştir. Böylelikle işlem parametrelerinin sürtünme katsayısı üzerine etkisi belirlenmiştir.

Vakum şartlarında C_3F_6 kaplama işleminde değiştirilen ilk plazma işlem parametresi güçtür. Çizelge 4.15’de değiştirilen deşarj güç değerlerine ait sürtünme katsayısı değerleri verilmektedir. Çizelge 4.15 incelendiğinde deşarj gücü artırıldığında tüm alt malzemelerin kaplanmış haldeki ölçülen sürtünme katsayıları artmaktadır. Bilyeli dövülmüş alt malzemenin kaplanmış haldeki sürtünme katsayısı değeri vakum şartlarında PTFE kaplanmış numunenin sürtünme katsayısında olduğu gibi yüksek ölçülmüştür.

Çizelge 4.15.Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden gücün sürtünme katsayısına etkisi (C₃F₆ kaplanmış)

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	50W-15dk-300mtorr	0,289
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	100W-15dk-300mtorr	0,345
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	50W-15dk-300mtorr	0,188
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	100W-15dk-300mtorr	0,207
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	50W-15dk-300mtorr	0,256
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	100W-15dk-300mtorr	0,341
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	50W-15dk-300mtorr	0,355
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	100W-15dk-300mtorr	0,385

Vakum şartlarında C₃F₆ kaplama işleminde değiştirilen plazma işlem parametrelerinden olan basınç değeri 100mtorr’dan 300mtorr’a çıkartıldığında sürtünme katsayısında meydana gelen değişim Çizelge 4.16’da verildiği gibidir. Basınç değeri artırıldığında Suda sertleştirme+500°C’de temperleme işlemi uygulanmış ve tam yumuşatılmış alt malzemelerin sürtünme katsayılarında artış gözlemlenirken Suda sertleştirme+210°C’de temperleme işlemi uygulanmış numunelerin kaplanmış haldeki sürtünme katsayısında düşüş gözlemlenmiştir. Bilyeli dövülmüş alt malzemelerin sürtünme katsayıları diğer parametrelere göre daha düşük ölçülmüştür. Bilyeli dövme sonrası yüzey kalitesindeki kötüleşmenin etkisi bu kaplama da da görülmektedir (Şekil 4.13). Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 incelendiğinde PTFE kaplamaların C₃F₆ kaplamalara göre daha homojen olduğu gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.16. Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden basıncın sürtünme katsayısına etkisi (C₃F₆ kaplanmış)

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	100mtorr-50W-15dk	0,214
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	300mtorr-50W-15dk	0,289
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	100mtorr-50W-15dk	0,269
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	300mtorr-50W-15dk	0,256
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	100mtorr-50W-15dk	0,294
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	300mtorr-50W-15dk	0,355
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	100mtorr-50W-15dk	0,200
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	300mtorr-50W-15dk	0,188

Değiştirilen plazma işlem parametrelerinden sonuncusu ise işlem süresi olup Çizelge 4.17’de işlem süresine bağlı olarak sürtünme katsayılarındaki değişim verilmektedir. Çizelge 4.17 incelendiğinde işlem süresinin tüm alt malzemelerin kaplanmış halde ölçülen sürtünme katsayısı değerlerine önemli ölçüde etki etmediği belirlenmiştir.

Çizelge 4.17.Vakum şartlarında plazma kaplama işlem parametrelerinden işlem süresinin sürtünme katsayısına etkisi (C₃F₆ kaplanmış)

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	15dk-50W-300mtorr	0,289
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	30dk-50W-300mtorr	0,241
Suda sertleştirme ve 210 °C'de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	15dk-50W-300mtorr	0,256
Suda sertleştirme ve 210 °C'de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	30dk-50W-300mtorr	0,247
Suda sertleştirme ve 500 °C'de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	15dk-50W-300mtorr	0,355
Suda sertleştirme ve 500 °C'de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	30dk-50W-300mtorr	0,247
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	15dk-50W-300mtorr	0,188
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	30dk-50W-300mtorr	0,189

Çalışmada aynı plazma parametrelerine sahip farklı yüzey sertlik değerlerinden oluşan alt malzemelerin sürtünme katsayısına etkisi Çizelge 4.18'de verilmektedir. Çizelge 4.18'e göre en düşük sürtünme katsayısı değeri bilyeli dövülmüş alt malzemede elde edilirken en yüksek değer tam yumuşatılmış alt malzemede elde edilmiştir. Bilyeli dövülmüş malzemenin pik yapan kısımlarından kalkan kaplama malzemesi; alt malzeme ile bilye arasında katı yağlayıcı görevi görmekte ve böylelikle sürtünme katsayısında düşüş meydana gelmektedir (Şekil 4.12).

Çizelge 4.18. Vakum şartlarında aynı plazma işlem parametrelerinde alt malzemenin sürtünme katsayısına etkisi(C_3F_6 kaplanmış)

Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	100W-30dk-100mtorr	0,435
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	100W-30dk-100mtorr	0,385
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	100W-30dk-100mtorr	0,334
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	100W-30dk-100mtorr	0,214

Çalışmada ayrıca vakum şartlarında yapılan kaplama işlemi için kullanılan kaplama malzemelerinin (PTFE ve C_3F_6) sürtünme katsayısına etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.19’da verilmektedir. Çizelge 4.19 incelendiğinde Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine PTFE kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı, C_3F_6 malzemeye göre yaklaşık 4,2 kat; Suda Sertleştirme+210°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine PTFE kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı, C_3F_6 malzemeye göre yaklaşık 3,5 kat; Suda Sertleştirme+500°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine PTFE kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı, C_3F_6 malzemeye göre yaklaşık 3 kat ve Bilyeli Dövülmüş alt malzeme üzerine PTFE kaplanmış numunenin sürtünme katsayısı ise C_3F_6 malzemeye göre yaklaşık 2 kat daha düşük çıkmıştır. Bu durum kaplama malzemesi olarak PTFE’nin daha uygun olduğu sonucunu vermiştir.

Çizelge 4.19.Vakum şartlarında kaplama malzemesinin sürtünme katsayısına etkisi

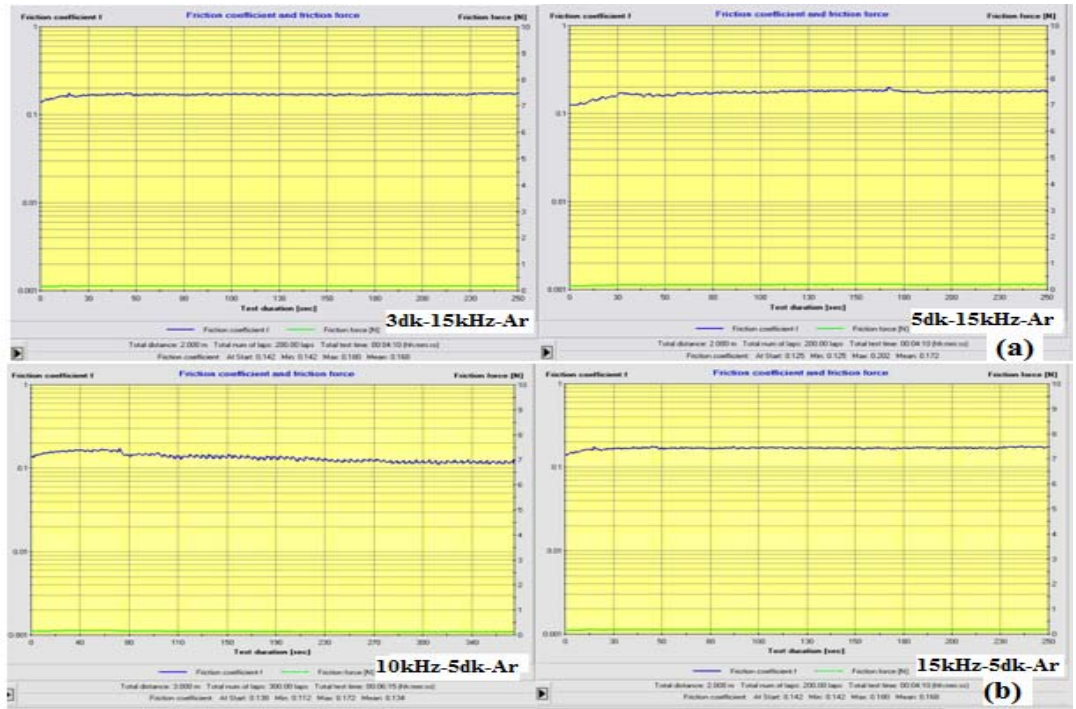
Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Kaplama Malzemesi	Plazma Parametresi	Sürtünme Katsayısı(μ)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	C ₃ F ₆	100W-100mtorr-30dk	0,435
Tam Yumuşatılmış işlemi uygulanmış	HRB 87	PTFE	100W-100mtorr-30dk	0,097
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	C ₃ F ₆	100W-100mtorr-30dk	0,385
Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	PTFE	100W-100mtorr-30dk	0,109
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	C ₃ F ₆	100W-100mtorr-30dk	0,334
Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	PTFE	100W-100mtorr-30dk	0,104
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	C ₃ F ₆	100W-100mtorr-30dk	0,213
Bilyeli Dövme İşlemi Uygulanmış	HRC 40	PTFE	100W-100mtorr-30dk	0,137

4.3.2. Sürtünme kuvveti sonuçları

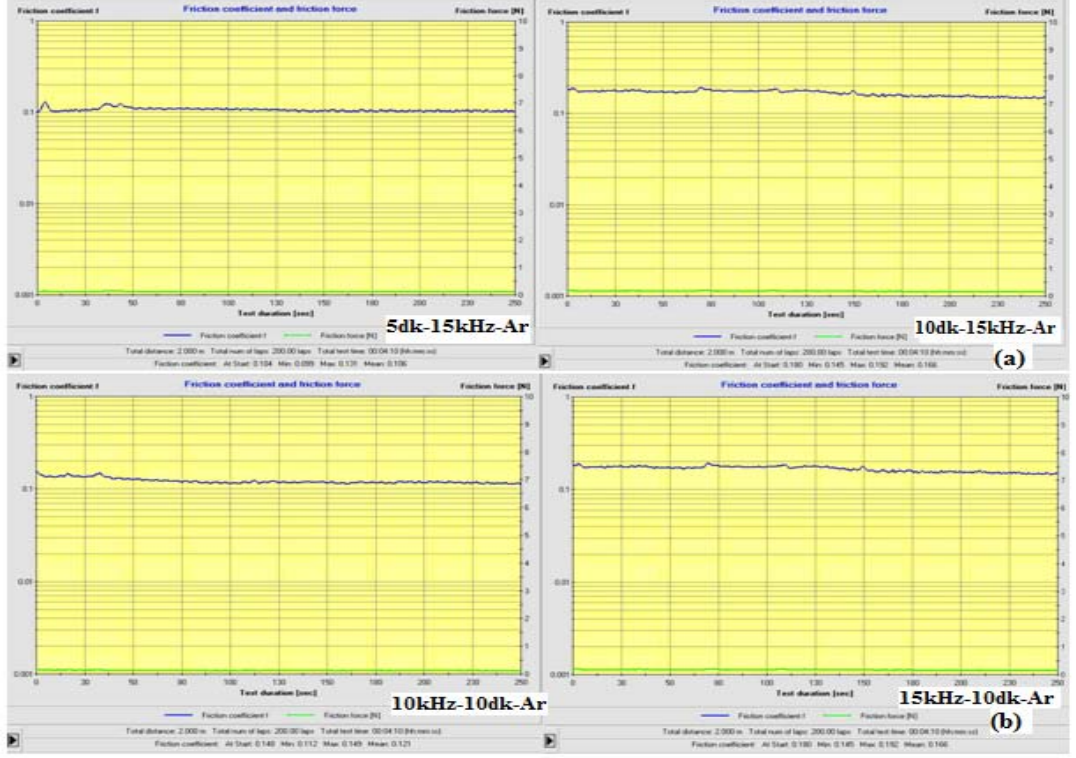
Aşınma deneyi esnasında tribotester cihazından; kaplanan numuneler ile seramik bilye arasındaki sürtünme katsayısının yanısıra aynı grafik çıktısı üzerinden “sürtünme kuvveti” değerleri de ölçülerek belirlenebilmektedir. Aşınma deneylerinde rejime girdikten sonra sürtünme katsayısının ve sürtünme kuvvetinin sabit kalması gerekmektedir. Ancak sürtünme katsayısında, ortaya çıkan değişmelere benzer şekilde değişimler sürtünme kuvvetinde de ortaya çıkmıştır. Atmosferik ve vakum basıncı altında plazma kaplanmış farklı alt malzemeler için işlem süresinin ve frekansın sürtünme etkisini gösteren grafikler karşılaştırmak amacıyla incelenmiştir. Şekil 4.20-Şekil 4.23’te atmosferik şartlarda plazma yardımıyla kaplanmış tam yumuşatılmış numunelerin farklı işlem parametreleri ile sürtünme kuvvetinin değişimi karşılaştırmalı olarak verilmektedir.

Şekil 4.20 ve Şekil 4.23 aralığında verilen grafikler farklı alt malzemelerin aşınma deneylerinden elde edilen sürtünme kuvvetlerinin büyüklüğünü ve sürtünme

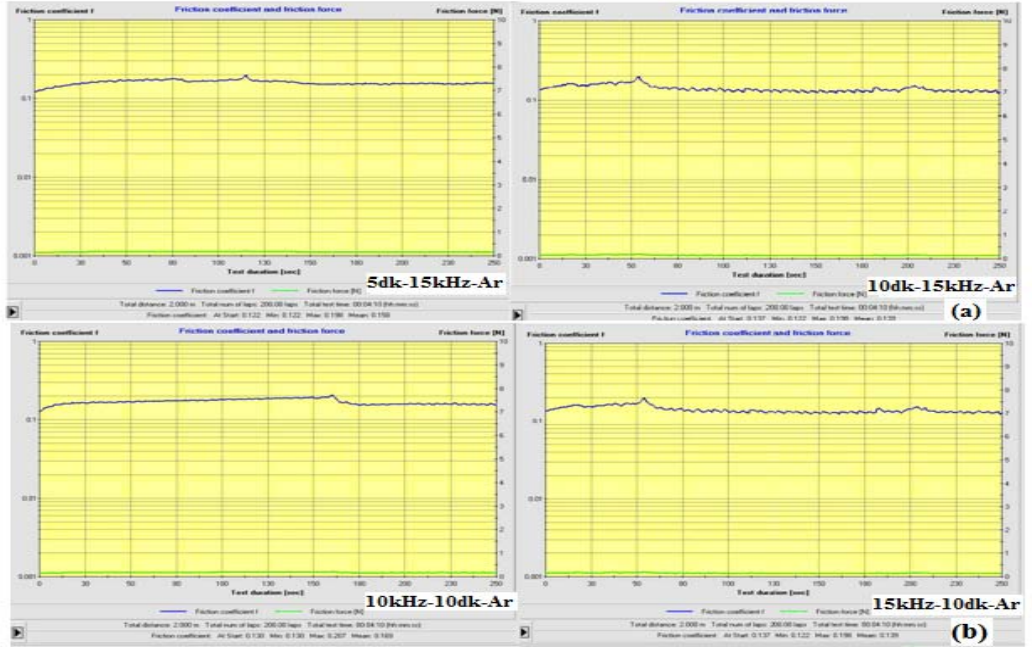
kuvvetinin sürtünme esnasındaki değişimini göstermektedir. Sürtünme kuvvetlerinin deney süresince sabit kalması beklenmektedir. Her grafikte deney başlangıçlarında rejime girme bölgesi olarak adlandırılabilcek kısımda bir değişim oluşmaktadır. Rejime erişildikten sonra sürtünme kuvvetinin sabit kaldığı gözlemlenmektedir. Sürtünme kuvveti değerlerinin işlem süresi ve frekansa bağlı olarak önemli değişikliğe neden olmadığı belirlenmiştir. Grafiklerde gözlenen yer yer zikzakların olması aşınmanın homojen olmadığını ve yüzeyden ayrılan malzemenin toparlanarak direnç oluşturduğunu ancak bu durumun kısa bir süre sonra ortadan kalkarak normale döndüğü anlaşılmaktadır. Sürtünme katsayısındaki değişimlere benzer değişimler ve zikzaklar gözlenmiştir.



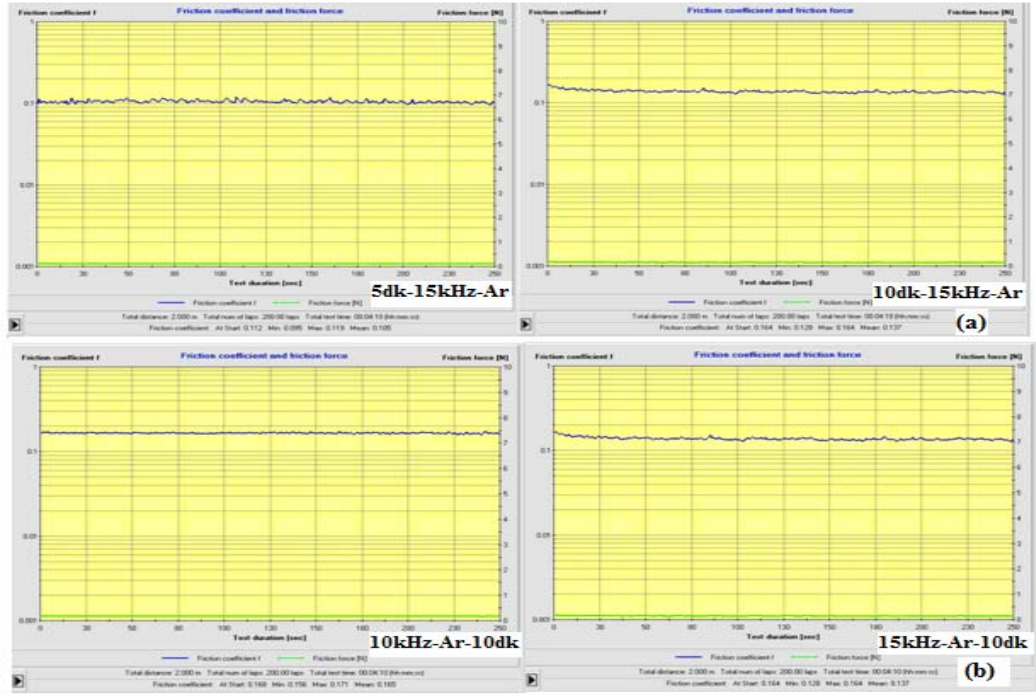
Şekil 4.20. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış Tam Yumuşatılmış alt malzeme için (a) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi (b) Frekansın sürtünme kuvvetine etkisi



Şekil 4.21. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a)İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi (b) Frekansın sürtünme kuvvetine etkisi

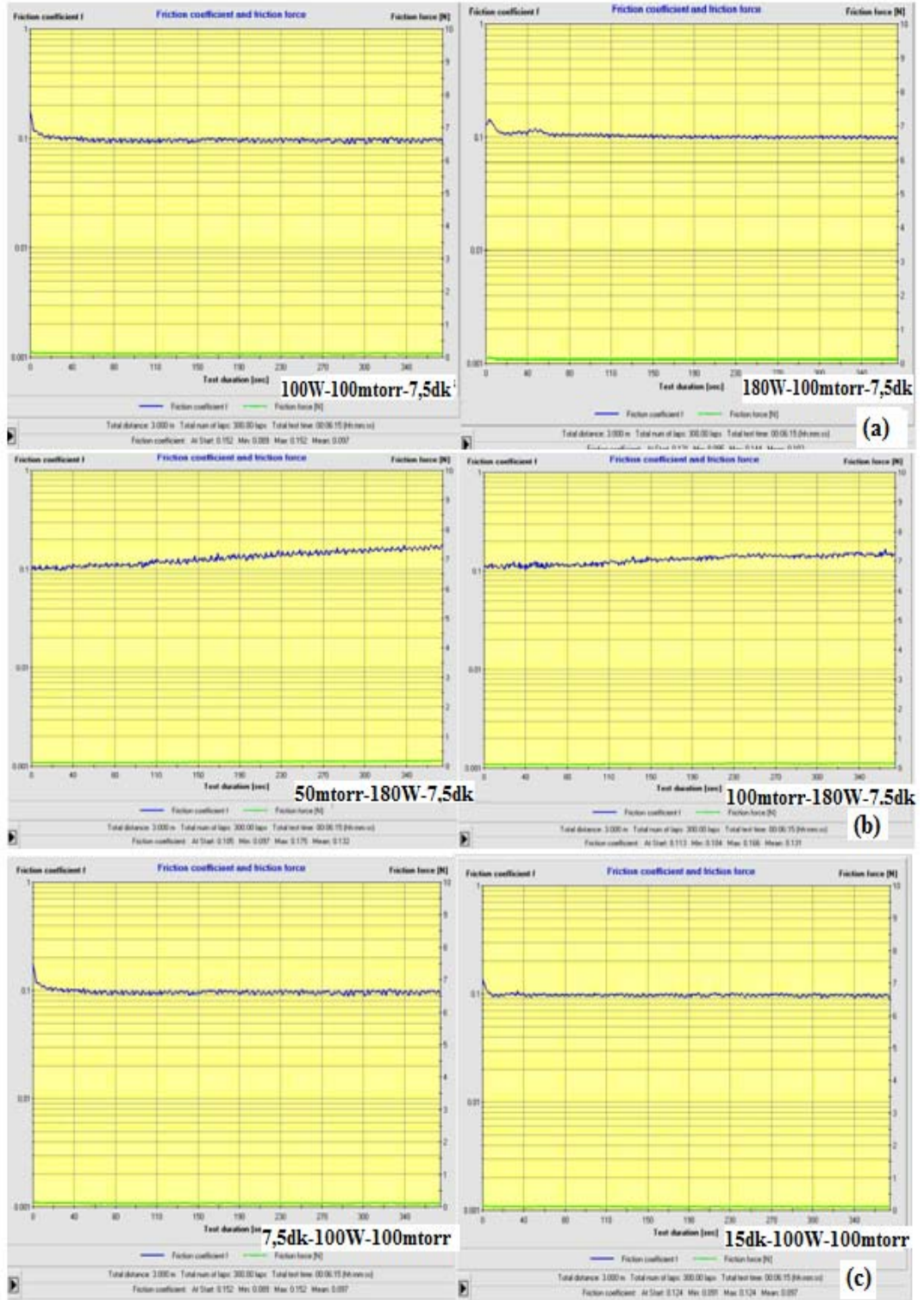


Şekil 4.22. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a)İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi (b) Frekansın sürtünme kuvvetine etkisi

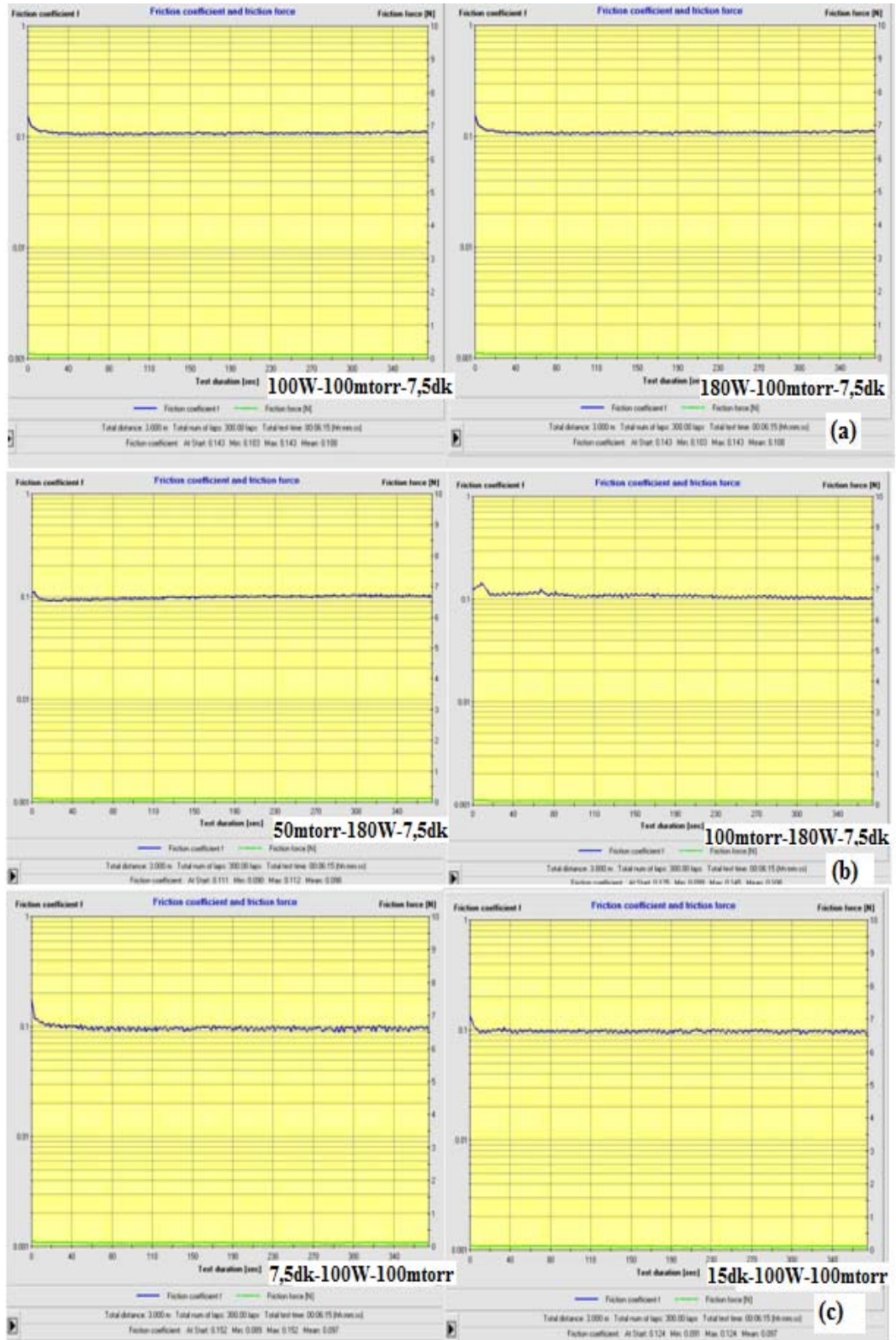


Şekil 4.23. Atmosferik şartlarda plazma kaplanmış Bilyeli Dövülmüş alt malzeme için (a) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi (b) Frekansın sürtünme kuvvetine etkisi

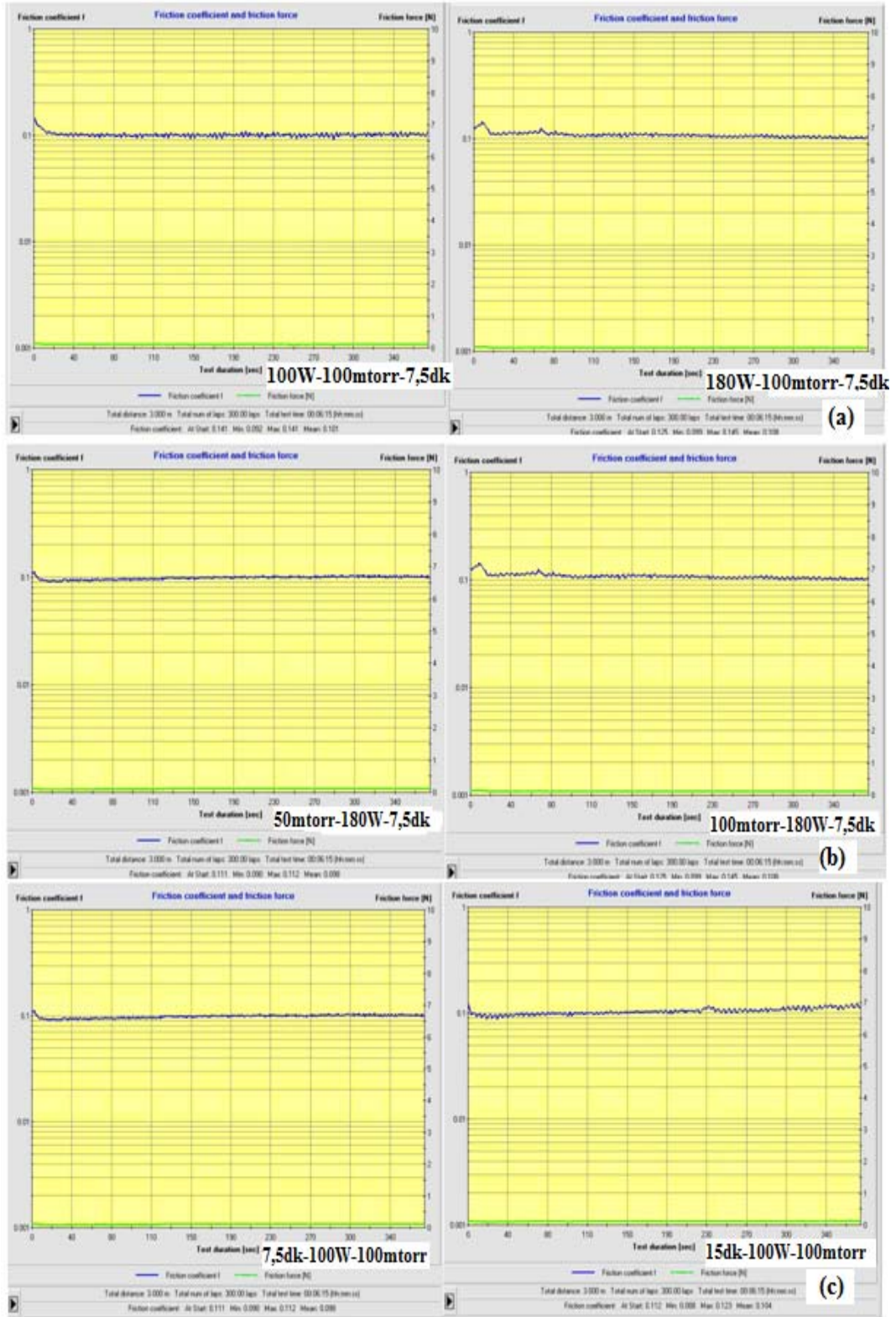
Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış farklı sertlik değerlerindeki alt malzemelerin aşınma deneylerinde ortaya çıkan sürtünme kuvvetinin güç, vakum basıncı değeri ve işlem süresi ile değişimi Şekil 4.24 ve Şekil 4.27 aralığında verilen grafiklerde gösterilmektedir. Genel olarak aşınma deneylerinin başlangıcında yüksek sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvveti değerleri gözlemlenirken, rejime erişildikten sonra değerlerin deney süresince sabit kaldığı gözlenmektedir. Şekil 4.24-b’de stabil bir eğri yerine deney süresince değişim ortaya çıkmıştır. Vakum basıncı değerinin etkisinin olmamasına karşın sürtünme kuvvetinin kısmen artarak devam ettiği gözlemlenmektedir. Bu durum kaplamanın çok iyi gerçekleşmediğinin bir göstergesidir. Şekil 4.27’de vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış Bilyeli Dövülmüş alt malzeme için sürtünme kuvvetine işlem parametrelerinin etkisi verilmektedir. Alt malzeme bilyeli dövüldüğünden dolayı Şekil 4.21’de verilen görüntülerdeki piklerin kısa sürede metal-seramik bilye temasına geçtiği ve deney süresi uzadıkça temas alanının büyüdüğü ve buna bağlı olarak sürtünme kuvvetinin arttığı gözlemlenmiştir. Buradan hareketle deney sonuçları birbirini destekleyecek tarzda ilişkilendirilebilmektedir.



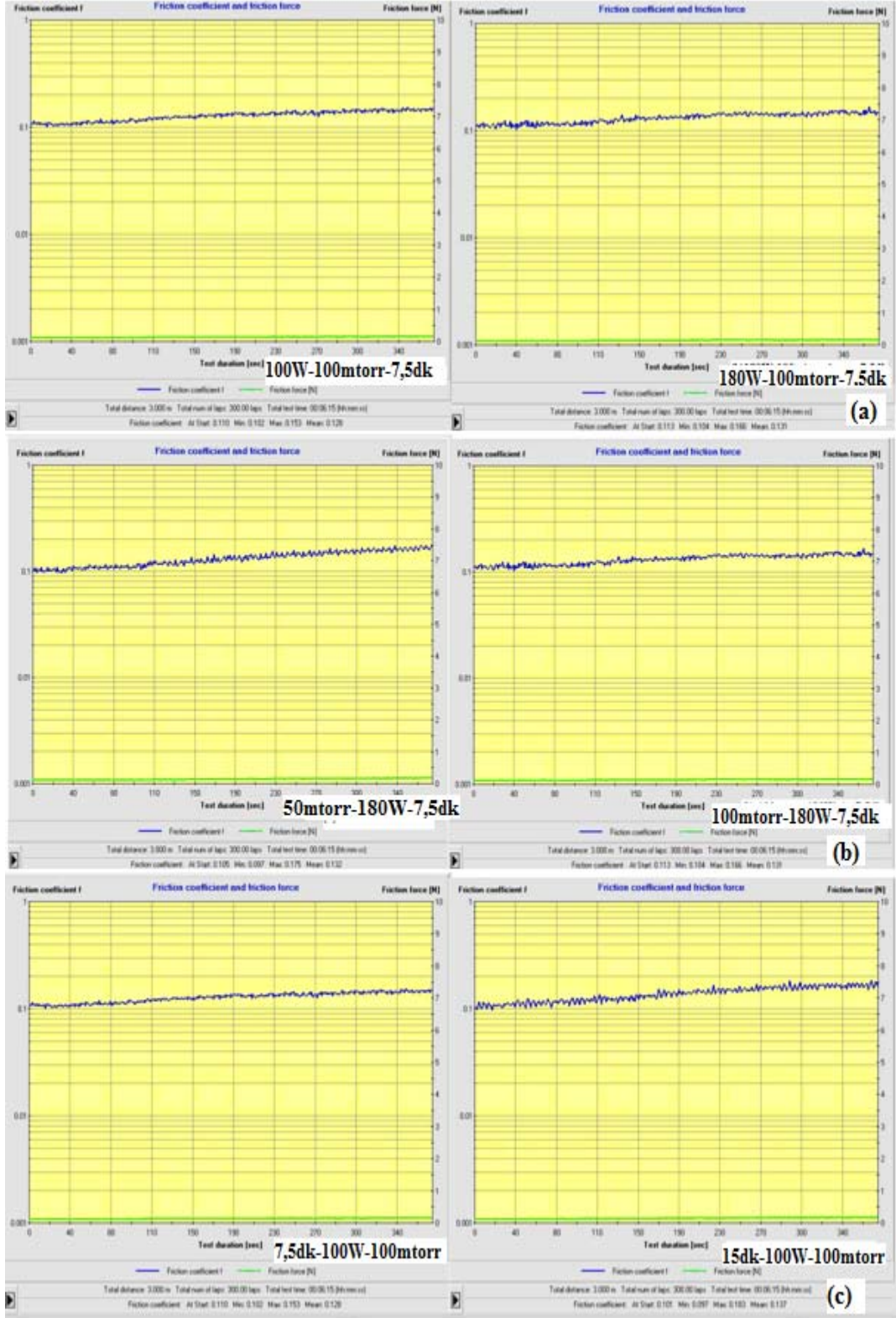
Şekil 4.24. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış Tam Yumuşatılmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi



Şekil 4.25. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi

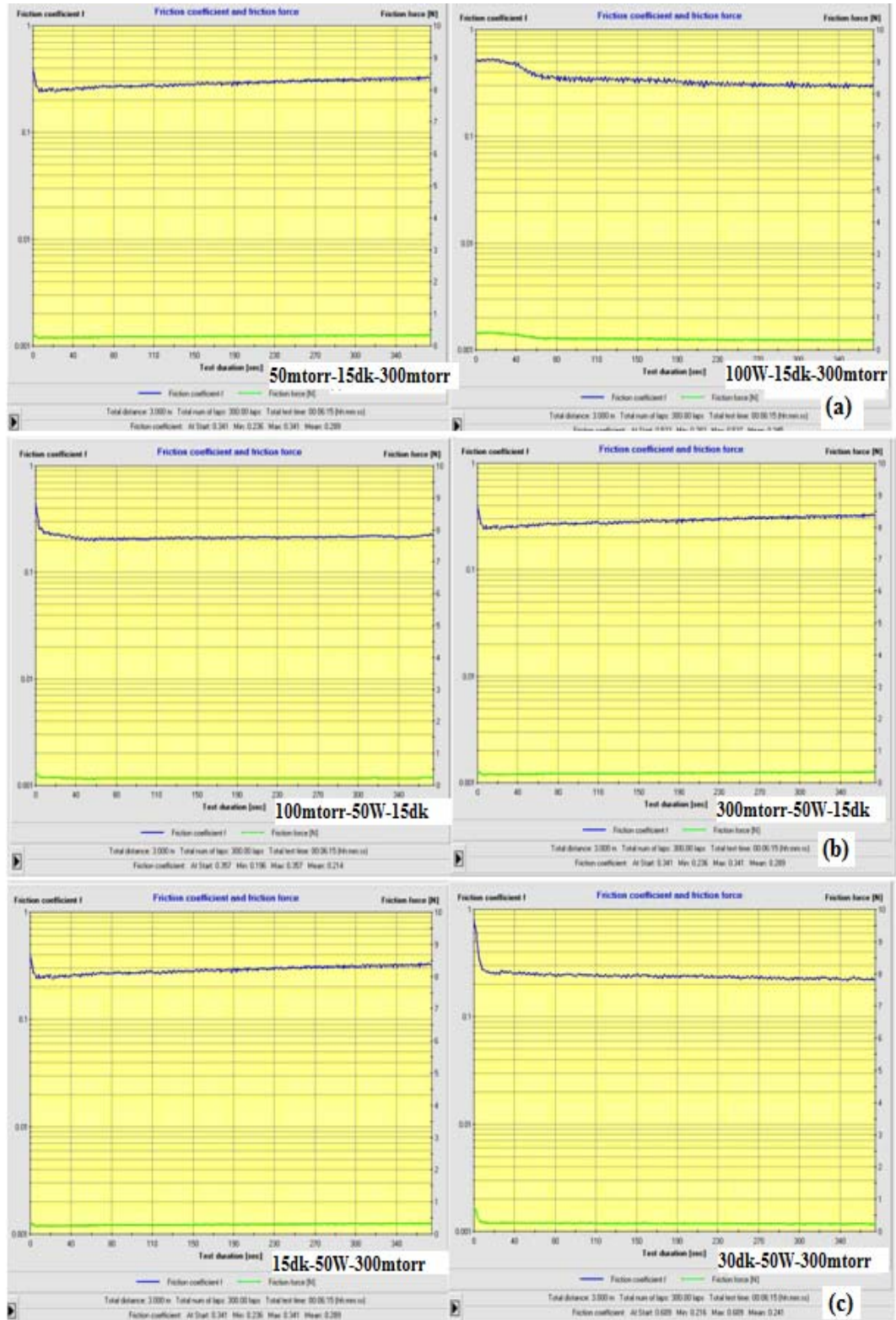


Şekil 4.26. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi

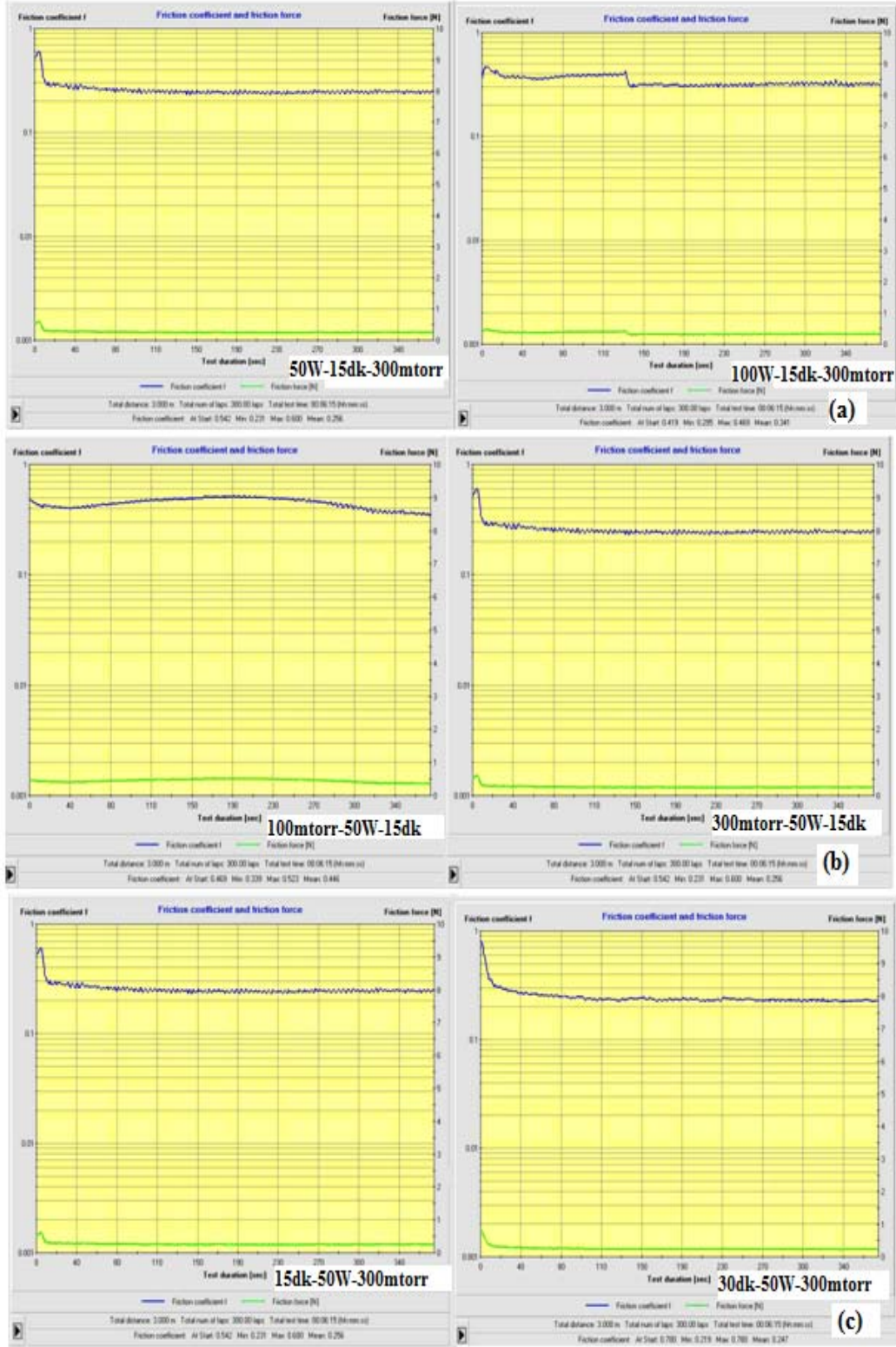


Şekil 4.27. Vakum şartlarında plazma ile PTFE kaplanmış Bilyeli Dövülmüş alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi

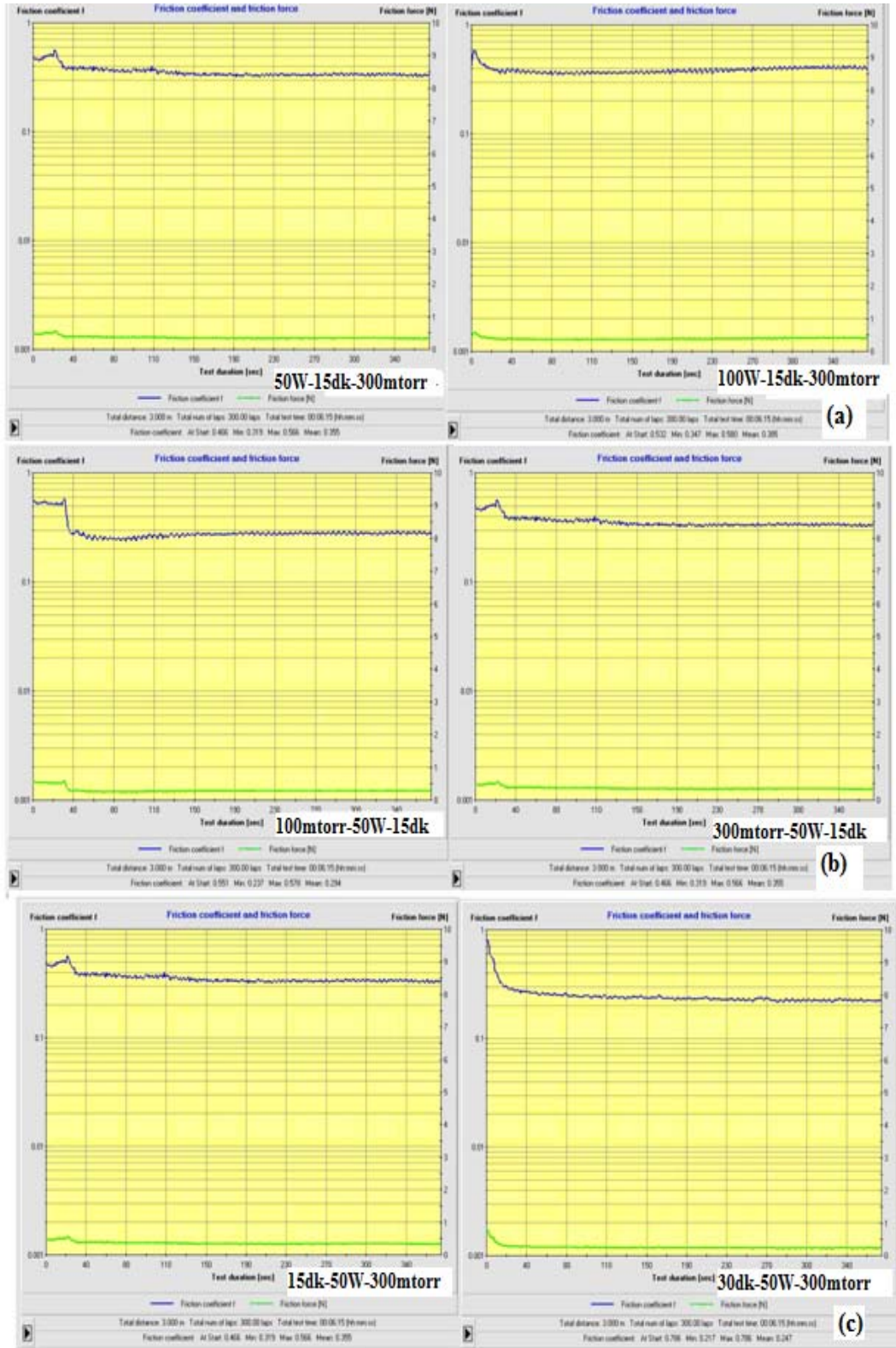
Vakum şartlarında plazma ile C_3F_6 kaplanmış farklı sertlik değerlerindeki alt malzemelerin aşınma deneylerinde ortaya çıkan sürtünme kuvvetinin işlem parametrelerine göre değişimi Şekil 4.28 ve Şekil 4.31 aralığında verilen grafiklerde gösterilmektedir. Genel olarak C_3F_6 kaplamada sürtünme katsayısı ve sürtünme kuvvetleri PTFE kaplamaya göre daha yüksek ortaya çıkmıştır. Sürtünme kuvvetinin deney süresi boyunca değişimi tüm malzemeler için benzerlik göstermesine rağmen deney başlangıcında C_3F_6 kaplamalarda sürtünme kuvveti değerleri çok daha yüksektir. Bilyeli dövülmüş alt malzemenin C_3F_6 kaplanmış haldeki sürtünme kuvvetinin değişim grafiklerinde çok zikzaklı bir görünüş elde edilmiştir. Bu durum yüzey kalitesinin fena ve pürüzlülüğün etkin olduğunun göstergesidir.



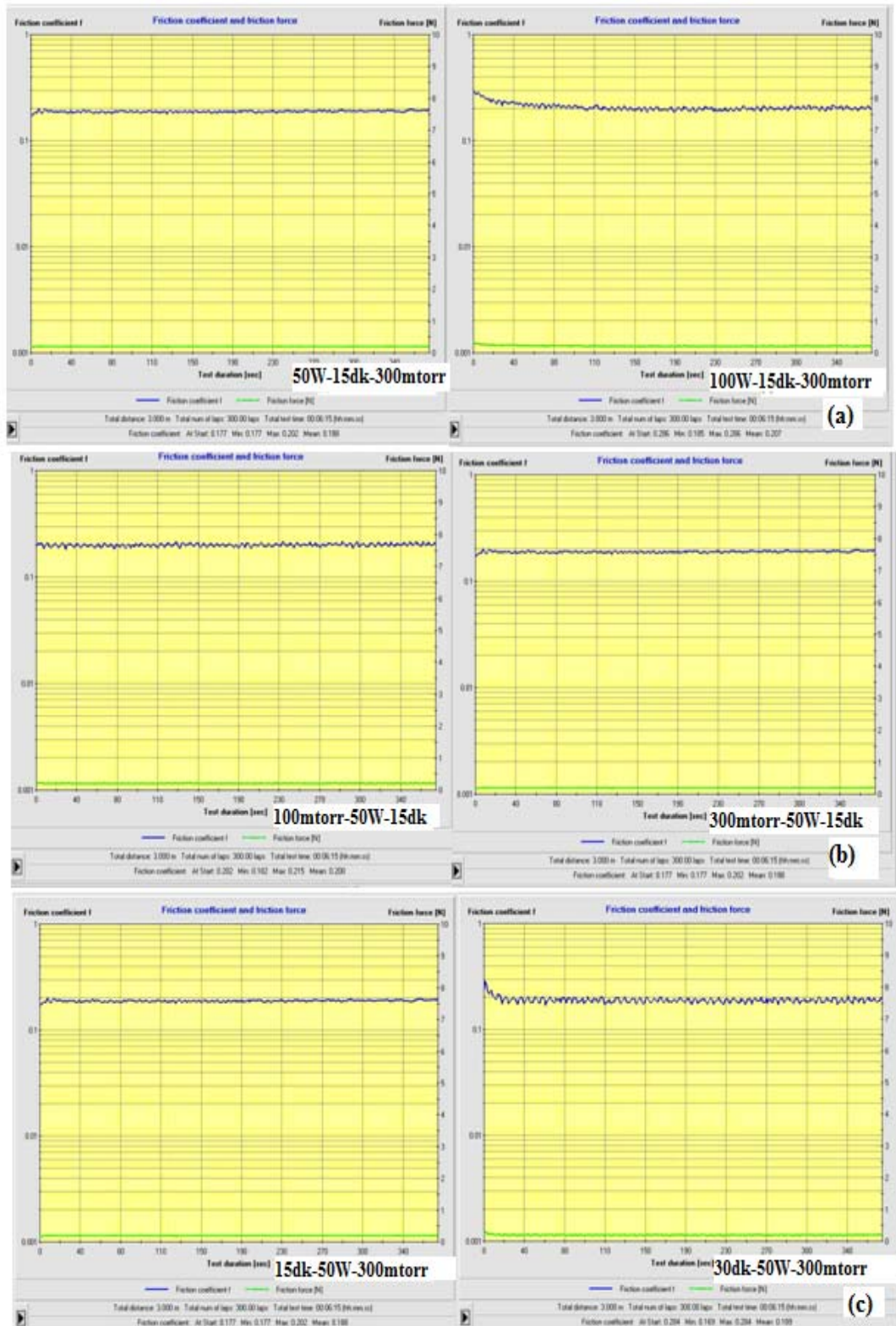
Şekil 4.28. Vakum şartlarında plazma ile C_3F_6 kaplanmış Tam Yumuşatılmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi



Şekil 4.29. Vakum şartlarında plazma ile C_3F_6 kaplanmış Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi



Şekil 4.30. Vakum şartlarında plazma ile C_3F_6 kaplanmış Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi



Şekil 4.31. Vakum şartlarında plazma ile C_3F_6 kaplanmış Bilyeli Dövlümüş alt malzeme için (a) Gücün sürtünme kuvvetine etkisi (b) Basıncın sürtünme kuvvetine etkisi (c) İşlem süresinin sürtünme kuvvetine etkisi

4.4. Aşınma Sonrası Yüzeylerin Aşınma İzlerinin Optik Mikroskopta İncelenmesi

Lineer aşınma cihazında aşınma deneyine tabi tutulan atmosferik şartlarda ve vakum şartlarında kaplanmış numunelerin aşınma deneyleri esnasında oluşan aşınma izleri optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Yapılan incelemelerde aşınma izleri görüntüleri üç farklı bölgeden alınmış ve aşınma iz genişlikleri olarak ölçülmüştür. Tez çalışmasında verilen aşınma iz görüntülerinde aşınma iz değerleri izlerin orta bölgesinden alınmıştır.

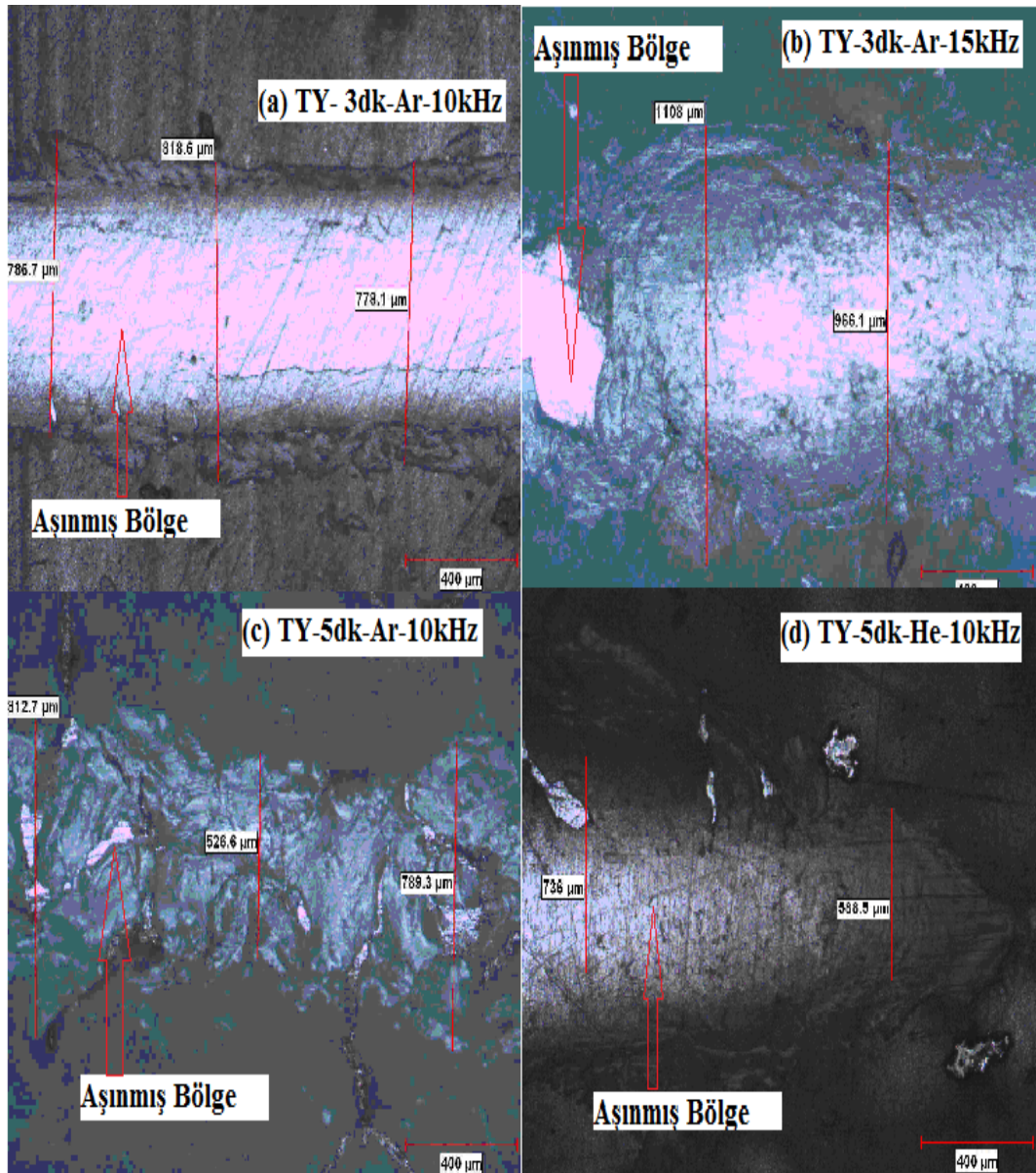
4.4.1 Atmosferik şartlarda kaplanmış numunelerin aşınma sonrası aşınma iz görüntüleri

Çalışmada atmosferik şartlarda PTFE malzeme kaplanarak aşınma deneyi uygulanmış, numunelerin aşınma iz görüntüleri optik mikroskopta incelenmiştir. Böylelikle yapılan kaplamaların aşınma karakteristikleri belirlenmiştir. Çizelge 4.20’de tam yumuşatılmış; suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemeler üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde ((a)5dk-Ar-10kHz; (b)5dk-Ar-15kHz; (c)10dk-Ar-10kHz ve (d) 5dk-He-10kHz) yapılan kaplamalara ait ölçülen ortalama aşınma iz genişlikleri verilmektedir.

Çizelge 4.20.Tam yumuşatılmış; suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemeler üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde ((a)5dk-Ar-10kHz; (b)5dk-Ar-15kHz; (c)10dk-Ar-10kHz ve (d) 5dk-He-10kHz) yapılan PTFE malzeme kaplanmış numunelere ait ölçülen ortalama aşınma iz genişlikleri

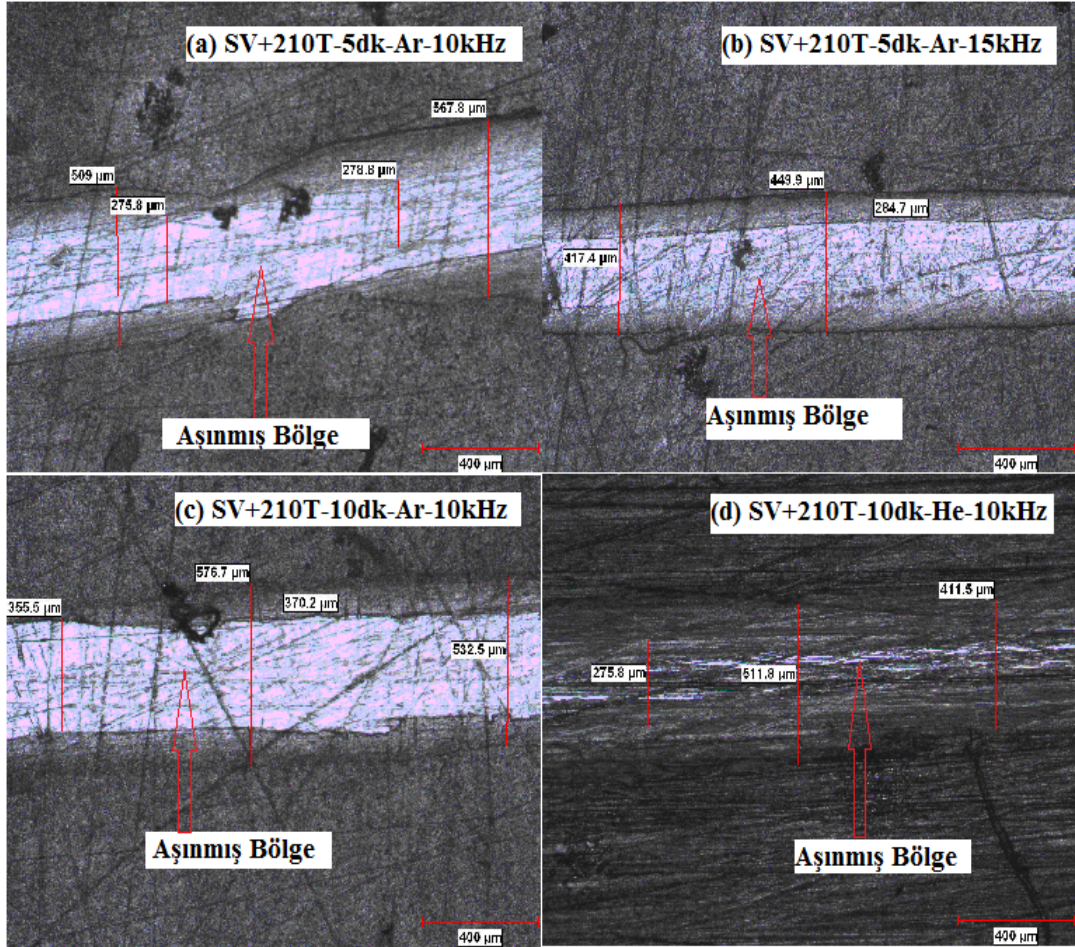
Alt Malzeme	Sertlik Değeri	Ölçülmüş Ortalama İz Genişliği (µm)			
		(a)	(b)	(c)	(d)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	595,85	1037,05	709,53	637,25
Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	407.87	384.01	458.25	399.70
Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	422,65	468,53	485,26	507,40
Bilyeli Dövme işlemi uygulanmış	HRC 40	759,60	1073,95	519,50	567,80

Şekil 4.32’de tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametreleri uygulanarak yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri verilmektedir. Aşınma iz şekilleri incelendiğinde bazı bölgelerde metale ulaşarak metalin aşındığı gözlemlenmiştir. Bu durum o bölgelerde kaplamanın tam olarak yapılmadığını ve metal-seramik temasının olduğunu göstermektedir. Ayrıca Şekil 4.32 incelendiğinde aşınma deneyi sonunda kaplama malzemesi kalkmış ve bir miktarı aşınma ürünü kaplama malzemesi aşınma izinin yan taraflarında toplanmıştır.



Şekil 4.32. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri

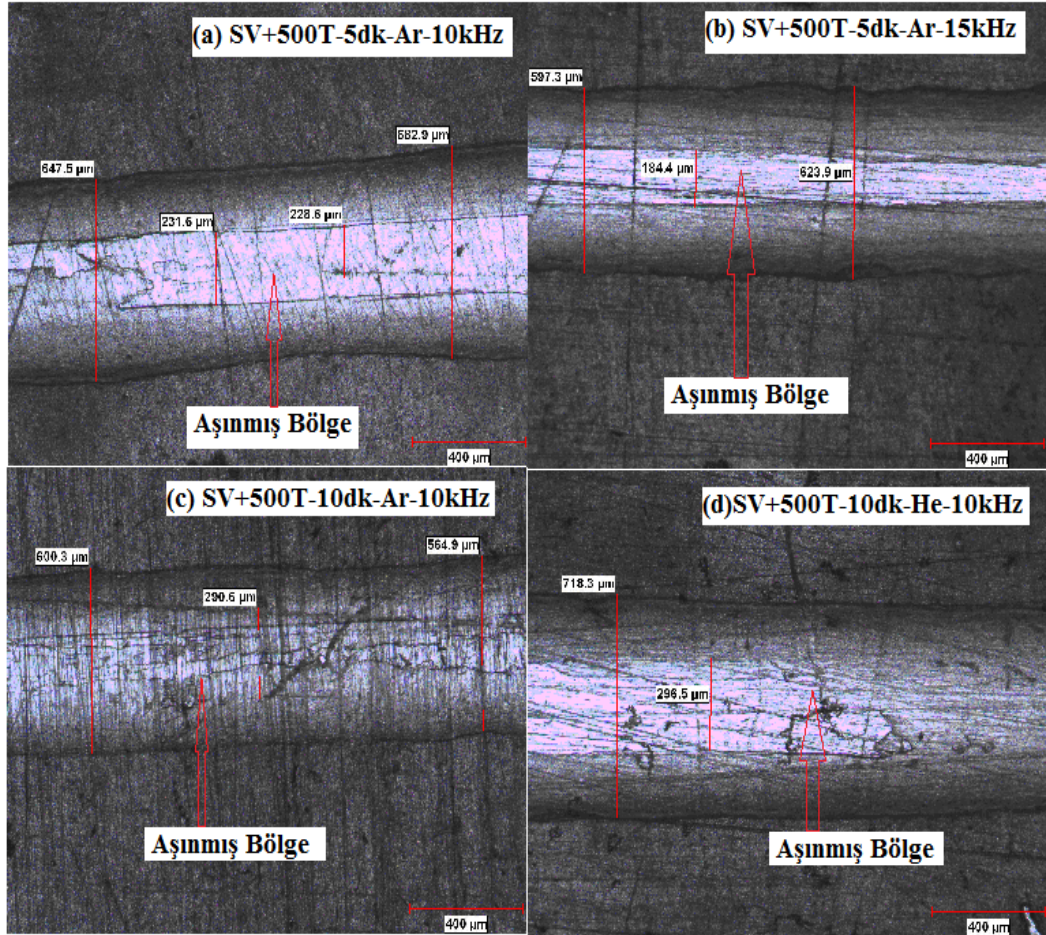
Şekil 4.33'te Suda sertleştirme ve 210°C temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde yapılan PTFE kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri verilmektedir. Aşınma iz genişlikleri incelendiğinde tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara nazaran daha belirgin ve dar aralıklarda aşınma izleri meydana gelmiştir. Ayrıca tam yumuşatılmış alt malzemedeki kaplama bölgesel olarak kalkarak, bilyenin metale teması meydana gelmemiştir.



Şekil 4.33. Suda sertleştirme ve 210 °C temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri

Şekil 4.34'te Suda sertleştirme ve 500°C temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma kaplama işlem parametreleri uygulanarak yapılan kaplamalara ait aşınma izi görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.34 incelendiğinde aşınma izi görüntüleri Şekil 4.33'te verilen Suda Sertleştirme ve 210°C'de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemenin aşınma izi görüntülerine benzerlik göstermektedir. Aşınma izi görüntüleri, iz boyunca homojen olduğu dikkat

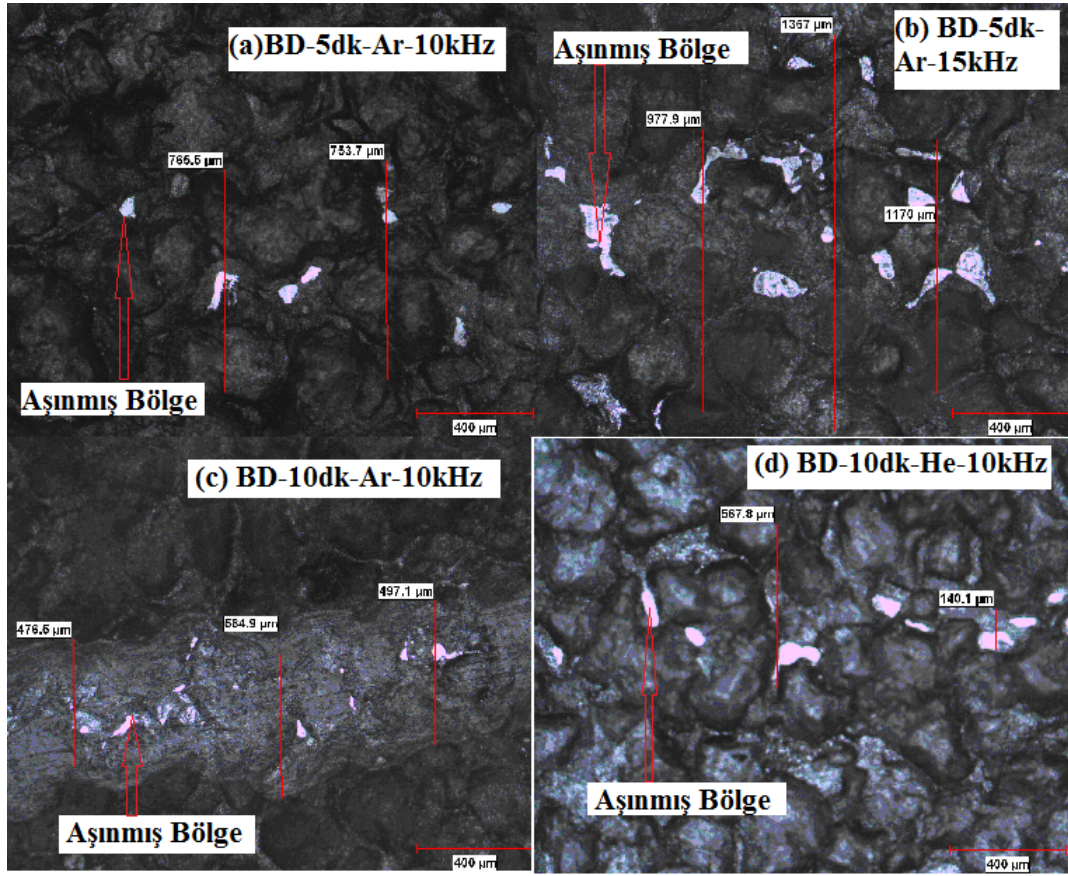
çekmektedir. Şekil 4.32’de verilen aşınma izlerinden önemli farklılık gözlenmektedir. Tam yumuşatılmış alt malzeme numunelerinde iz kenarlarında yığılmaların olması; homojen ve süreklilik gösteren aşınmadan daha çok, yüzeye tutunmanın yeterli olmadığını göstermektedir.



Şekil 4.34. Suda sertleştirme ve 500 °C temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma izi görüntüleri

Şekil 4.35’te ise bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine değişik plazma kaplama işlemi parametreleri uygulanarak yapılan kaplamalara ait aşınma izi görüntüleri verilmektedir. Aşınma izleri incelendiğinde bazı bölgelerde kaplama malzemesinin tamamen yüzeyden ayrıldığı ve seramik bilyenin alt malzemeye tam olarak temas ettiği belirlenmiştir. Bunun nedeni bilyeli dövülmüş alt malzeme yüzeyi morfolojisidir. Şekil 4.17’de şematik verildiği gibi bilyeli dövülmüş alt malzemenin yüzey kalitesi diğer numunelere göre oldukça pürüzlüdür ($R_a=4,6\mu m$). Bundan dolayı kaplama kalınlığı homojen elde edilememektedir. Yüzeyde piklerin olduğu

noktalarda kaplama kalınlığı çok ince olduğundan metal-seramik aşındırıcı bilye teması ortaya çıkmaktadır. Aşınma izlerinde bu durum açıkça görülmektedir.



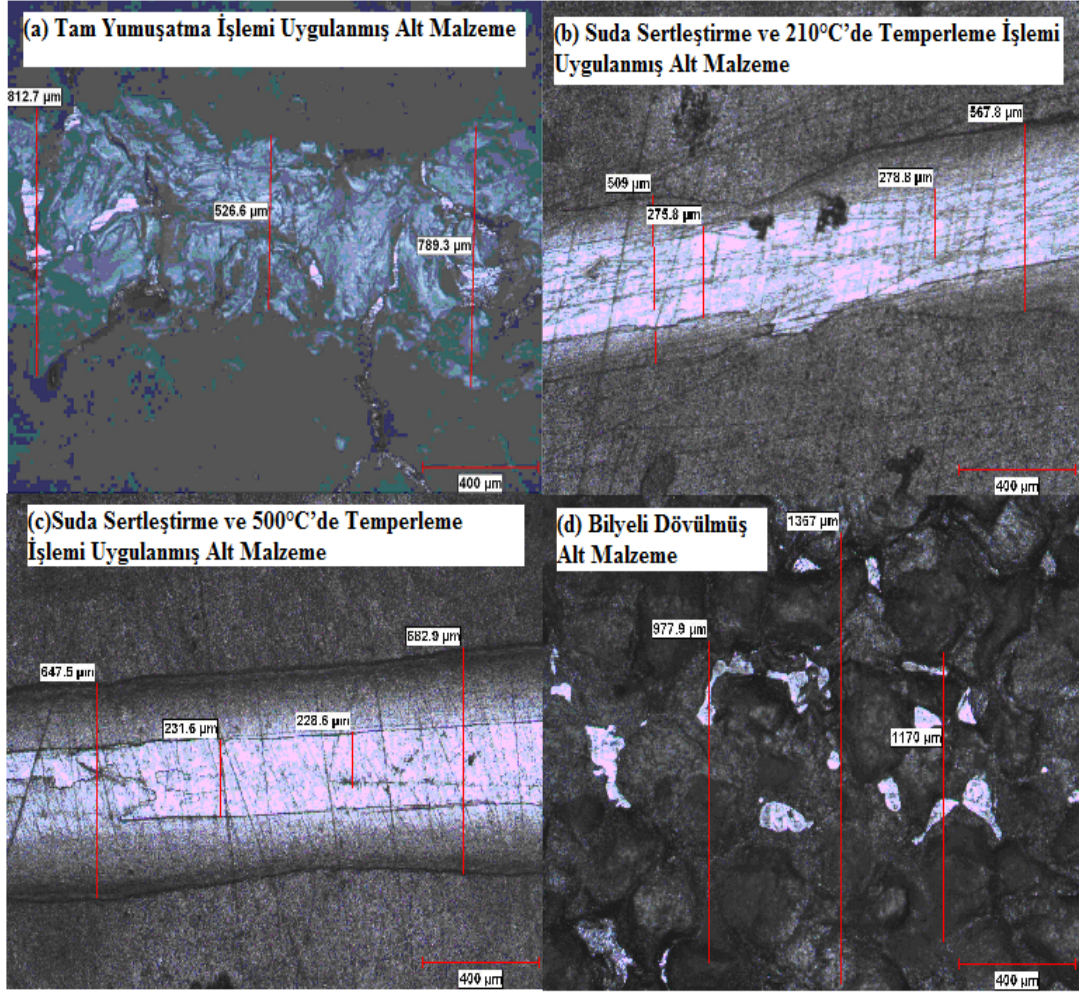
Şekil 4.35. Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri

Atmosferik şartlarda farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemeler üzerine 5dk-Ar-10kHz işlem parametreleri plazma ile PTFE kaplanmıştır. Böylelikle alt malzemenin kaplama kalitesine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Değişik alt malzemeler üzerine ((a)Tam yumuşatılmış ; (b) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; (c) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; d) Bilyeli dövülmüş) 5dk-Ar-10kHz işlem parametreleri kullanılarak yapılan kaplamalara ait aşınma iz grafikleri karşılaştırmak amacıyla Şekil 4.36’da verilmektedir. Çizelge 4.21’de ise atmosferik şartlarda farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemeler üzerine 5dk-Ar-10kHz işlem parametreleri plazma ile PTFE kaplanmış numuneler için elde edilen ortalama aşınma izi genişlikleri verilmektedir.

Çizelge 4.21. Atmosferik şartlarda farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemeler üzerine 5dk-Ar-10kHz işlem parametreleri plazma ile PTFE kaplanmış numuneler için elde edilen ortalama aşınma iz genişlikleri

Alt malzeme	Sertlik Değeri	Ölçülmüş Ortalama iz genişliği Değerleri (μm)
Tam yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	709,53
Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	407,85
Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	447,65
Bilyeli dövme işlemi uygulanmış	HRC 40	1171,63

Farklı sertlik değerindeki alt malzemeler üzerine aynı plazma işlem parametreleri kullanılarak yapılan kaplamaların aşınma izleri incelendiğinde tam yumuşatılmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemelerde kaplamaların kalktığı veya hızla aşınarak metal-seramik bilye temasının olduğu bölgeler açıkça görülürken suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme ile suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemenin aşınma iz görüntüleri birbirine benzerlik göstermekle birlikte iz genişlikleri farklıdır. Alt malzeme sertlik değeri en büyük olan numunelerde en küçük aşınma izi ortalama büyüklüğü ölçülmüştür.



Şekil 4.36. Değişik alt malzemeler üzerine 5 dk-Ar-10 kHz plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri ((a)Tam yumuşatılmış ; (b) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; (c) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; d) Bilyeli dövülmüş)

4.4.2 Vakum şartlarda kaplanmış numunelerin aşınma sonrası aşınma izi görüntüleri

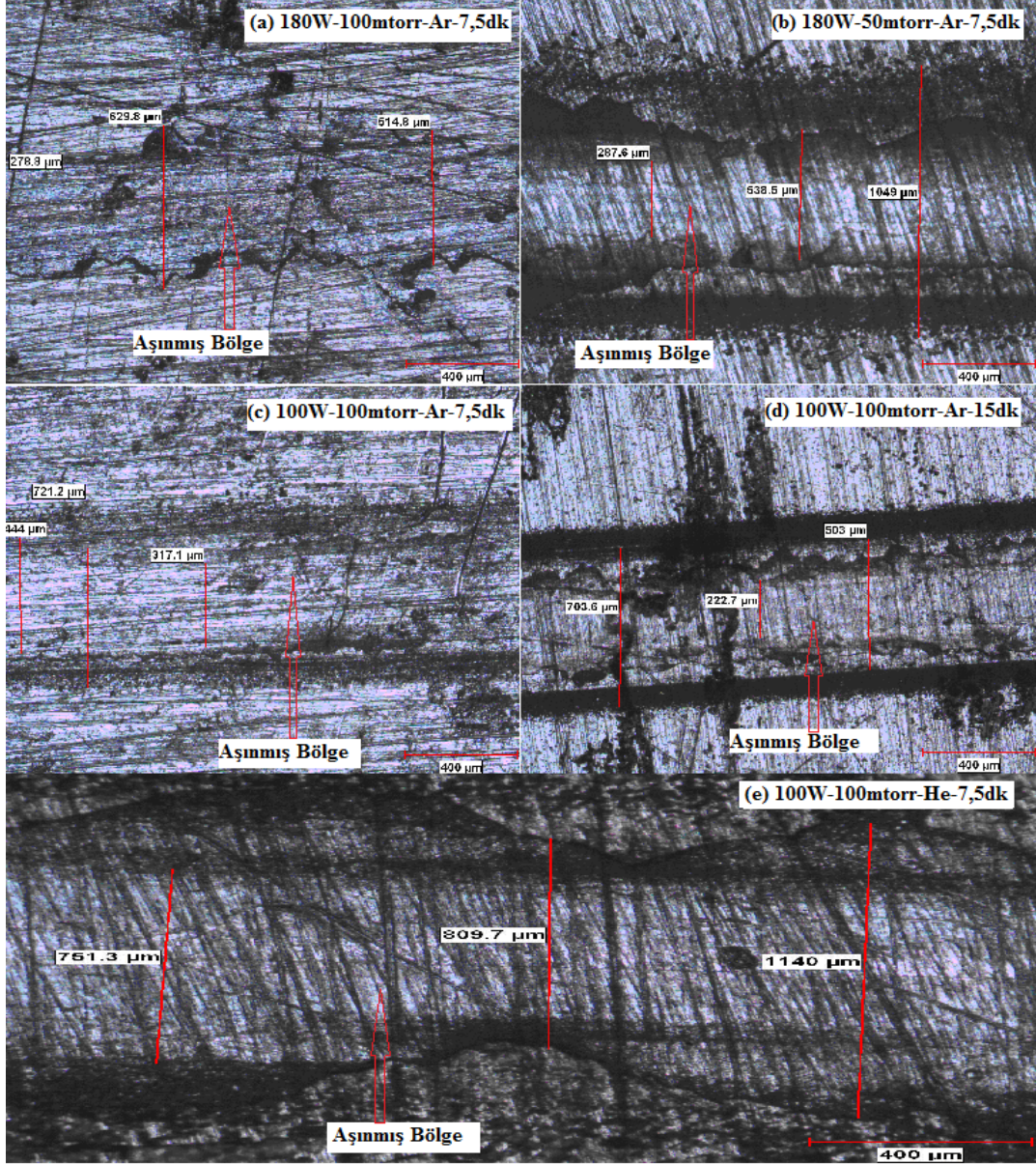
Çalışmada vakum şartlarda PTFE ve C_3F_6 kaplanmış numunelerin aşınma iz görüntüleri de optik mikroskopta incelenerek vakum şartlarında yapılan kaplamaların aşınma karakteristikleri belirlenmiştir. Çizelge 4.22’de tam yumuşatılmış; suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemeler üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde ((a)180W-100mtorr-Ar-7,5dk; (b) 180W-50mtorr-Ar-7,5dk; (c) 100W-100mtorr-Ar-7,5dk; (d) 100W-100mtorr-Ar-7,5dk ve

(e) 100W-100mtorr-He-7,5dk) vakum şartlarında yapılan PTFE kaplamalara ait ölçülen ortalama aşınma iz genişlikleri verilmektedir.

Çizelge 4.22. Tam yumuşatılmış; suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış; suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemeler üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde ((a)180W-100mtorr-Ar-7,5dk; (b) 180W-50mtorr-Ar-7,5dk; (c) 100W-100mtorr-Ar-7,5dk; (d) 100W-100mtorr-Ar-7,5dk ve (e) 100W-100mtorr-He-7,5dk) vakum şartlarında yapılan kaplamalara ait ölçülen ortalama aşınma iz genişlikleri

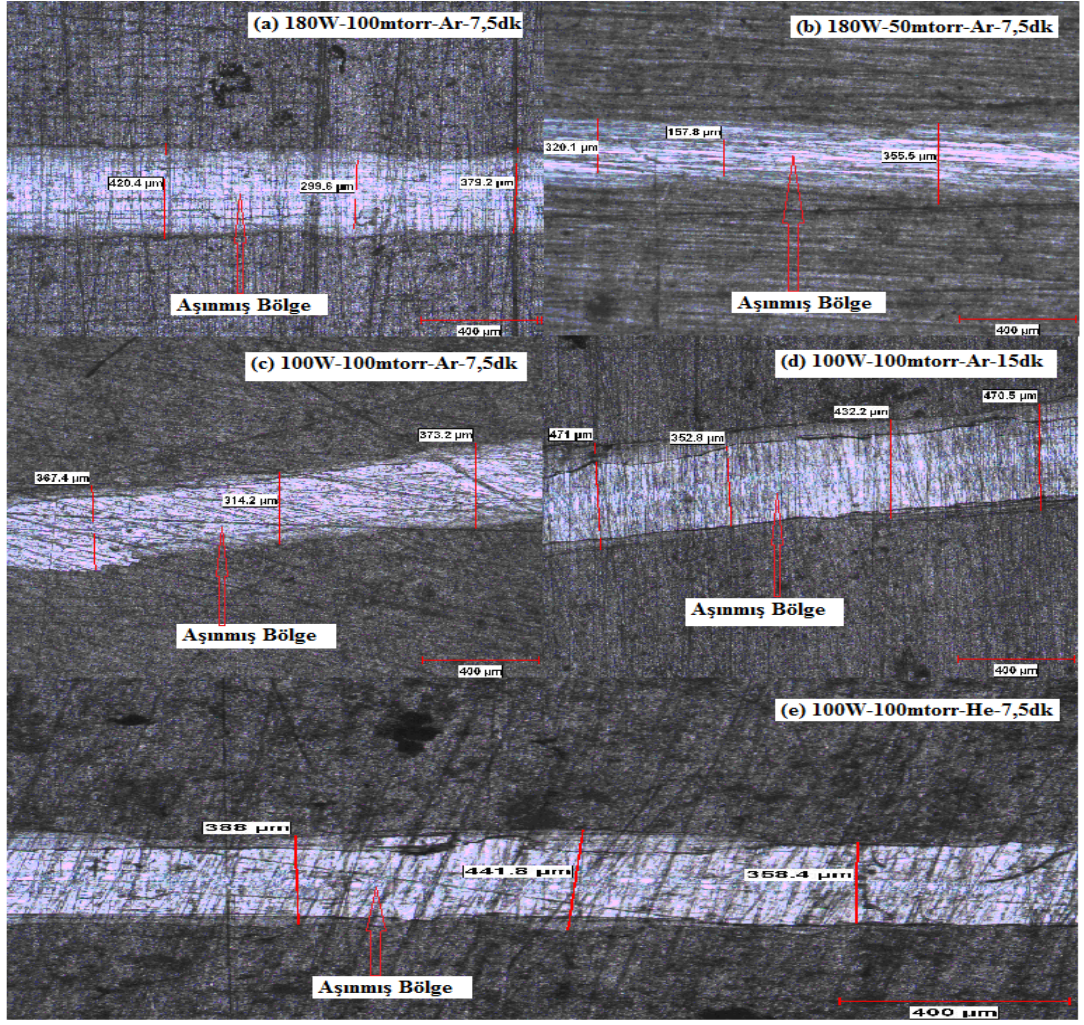
Alt Malzeme	Ortalama İz Genişliği (μm)				
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	474,46	658,36	494,10	476,43	900,33
Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış	366,40	277,8	351,63	431,62	396,06
Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış	332,86	263,32	368,87	274,45	308,26
Bilyeli Dövme işlemi uygulanmış	1110,50	1014,55	901,30	806,16	786,16

Şekil 4.37’de Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma izi görüntüleri verilmektedir. Aşınma iz genişlikleri incelendiğinde kalkan kaplama malzemesi yağlayıcı görevi görerek metal-seramik temasına engel olmuştur. Alt malzeme ile aşındırıcı sermaik bilye sürtünmesi oluşmamış, parlak aşınma izleri ortaya çıkmamıştır.



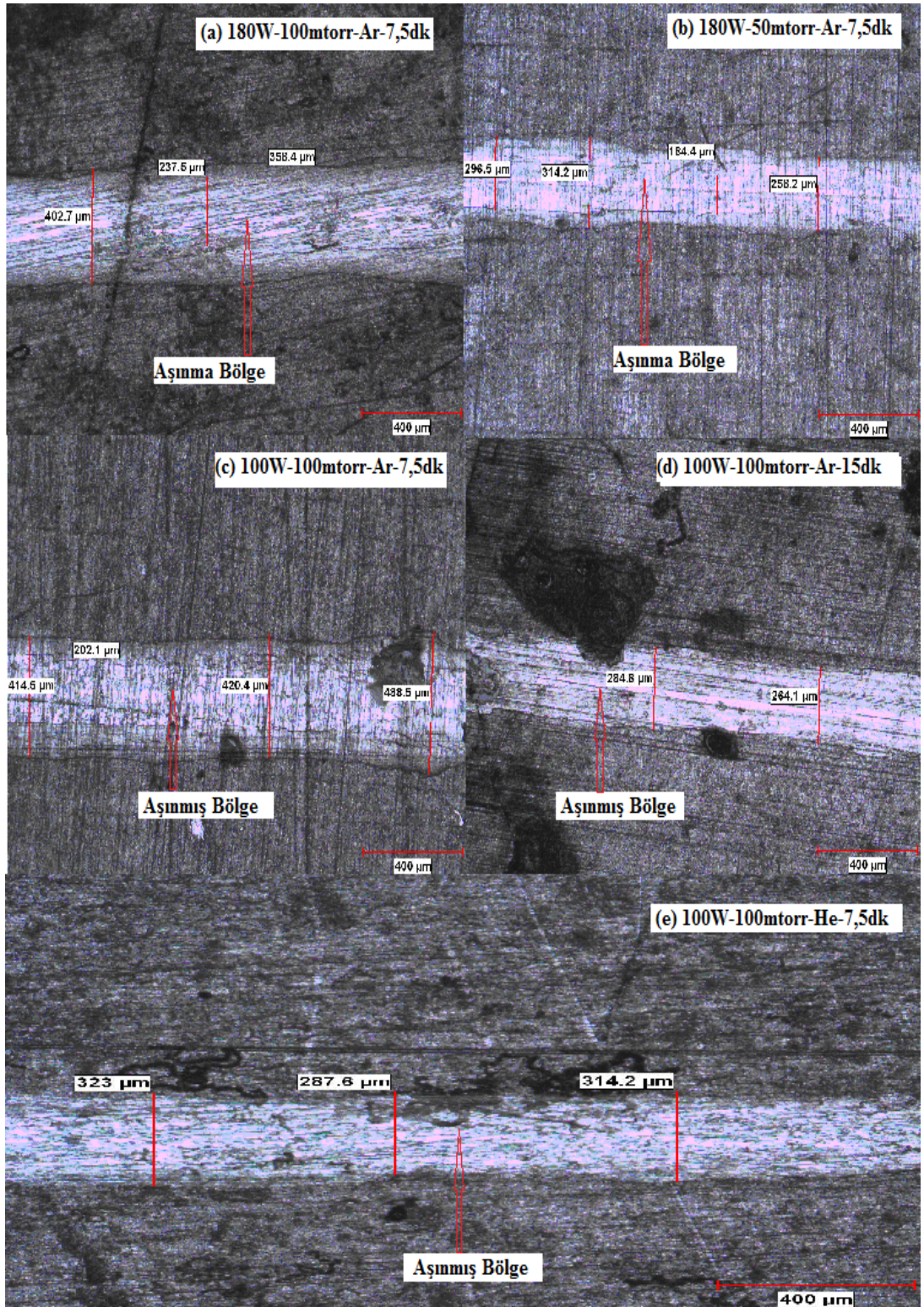
Şekil 4.37. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri

Şekil 4.38’de Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.38’de verilen aşınma iz görüntüleri incelendiğinde aşınma iz şekilleri daha belirgin, düzgün geometriye sahip ve homojen bir görünüş vermesinin yanı sıra tam yumuşatılmış alt malzemeye göre daha küçük iz genişliği gözlenmiştir.



Şekil 4.38. Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri

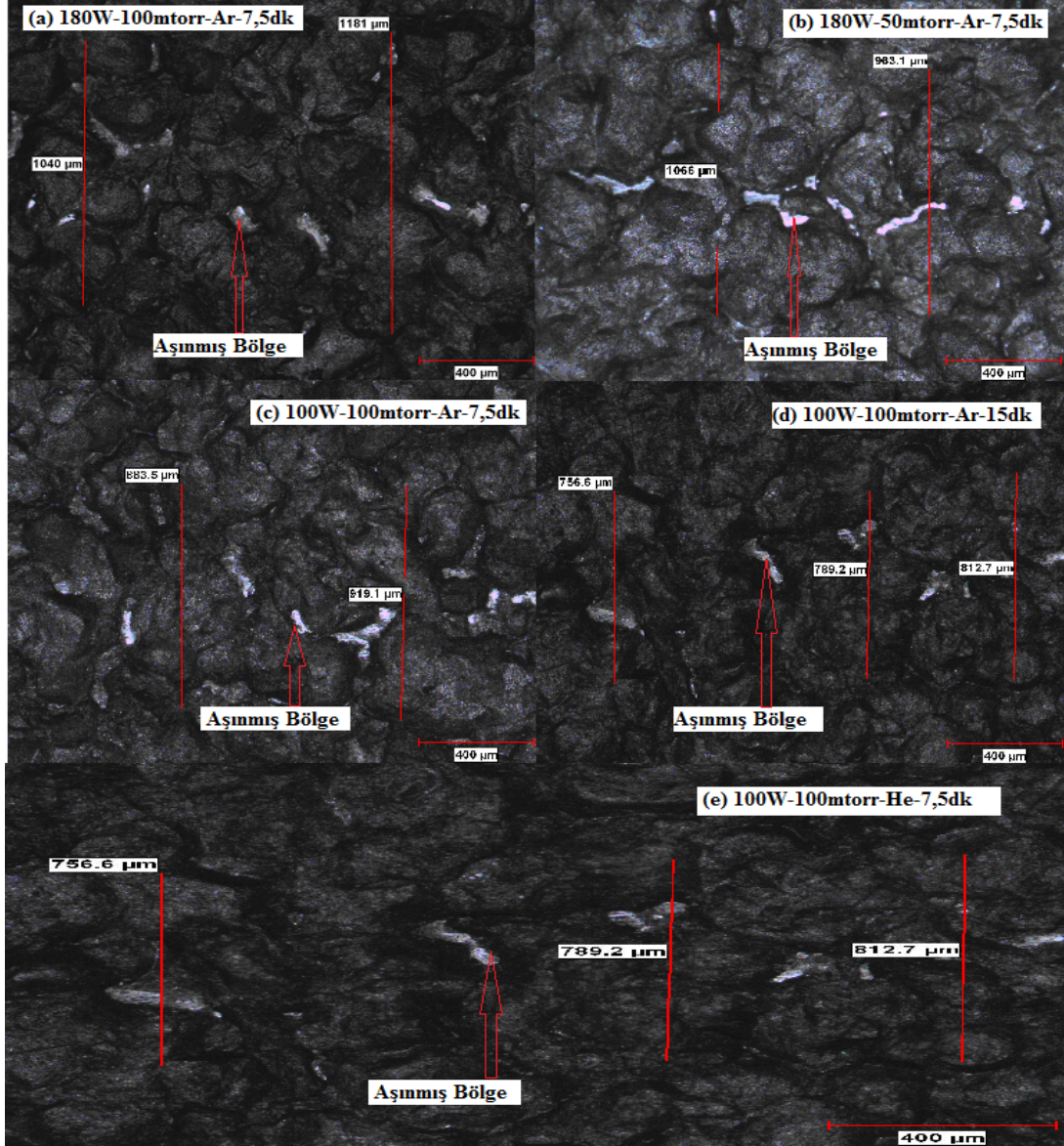
Şekil 4.39’da Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma izi görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.39 incelendiğine aşınma iz görüntüleri suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemeye ait aşınma iz görüntülerine benzer elde edilmiştir. Aşınma iz genişlikleri tam yumuşatılmış alt malzemeye göre daha dar olup aşınma izleri daha belirgindir.



Şekil 4.39. Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri

Şekil 4.40’ta ise bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma izi görüntüleri verilmektedir.

Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan kaplamaların aşınma iz görüntüleri incelendiğinde parlak kısımların varlığı dikkat çekmektedir. Bu durum atmosfer şartlarında yapılan kaplamaların aşınma karakteristiğine benzemektedir (Şekil 4.40).



Şekil 4.40.Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde PTFE kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri

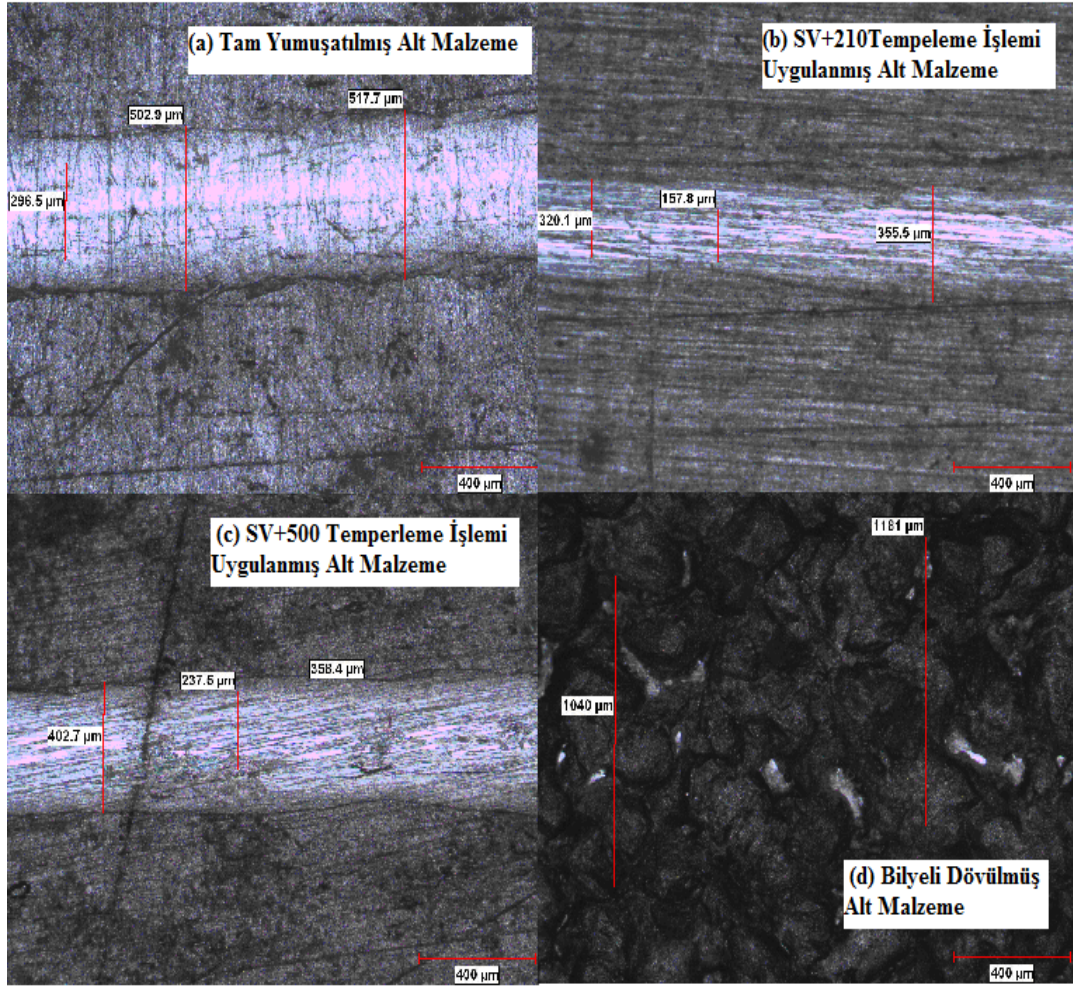
Vakum şartlarında farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemeler üzerine 180W-100mtorr- Ar- 7,5dk işlem parametreleri uygulanarak plazma ile PTFE kaplanmıştır. Böylelikle alt malzemenin yüzey kalitesi ve yüzey sertlik değerinin kaplama kalitesine etkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Değişik alt malzemeler üzerine ((a) Tam yumuşatılmış ; (b) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; (c)

Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; d) Bilyeli dövülmüş) 180W-100mtorr-Ar-7,5dk işlem parametreleri kullanılarak yapılan kaplamalara ait aşınma izi grafikleri Şekil 4.41’de karşılaştırılmak üzere verilmektedir. Çizelge 4.23’te vakum şartlarda farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemeler üzerine 180W-100mtorr-Ar-7,5dk işlem parametreleri kullanılarak plazma ile PTFE kaplanmış numunelerden ölçülen ortalama aşınma izi genişlikleri verilmektedir.

Çizelge 4.23. Vakum şartlarda farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemeler üzerine 180W-100mtorr-Ar-7,5dk işlem parametreleri plazma ile PTFE kaplanmış numuneler için elde edilen ortalama aşınma iz genişlikleri

Alt malzeme	Sertlik Değeri	Ortalama iz genişliği (µm)
Tam yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	439,03
Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	277,80
Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	332,90
Bilyeli dövme işlemi uygulanmış	HRC 40	1110,50

Tam yumuşatılmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemelere ait aşınma izleri incelendiğinde diğer alt malzemelere (Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış ve Suda sertleştirme; 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış) ait aşınma izi görüntülerine göre parlak bölgelerin varlığı dikkat çekmektedir. Bu durum bu numunelerde kaplama kalitesinin yetersizliğini göstermektedir. Kaplama malzemesinin yüzeyden hemen aşınarak ayrılması söz konusu olup işlem metal-seramik sürtünmesinin varlığını göstermektedir. Tribotester cihazında aşındırıcı olarak kullanılan seramik bilyenin sertliği alt malzemedan daha yüksek olduğundan aşınmaya zorlamaktadır. Böylece bu temas bölgelerinde aşınmış parlak noktalar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca tam yumuşatılmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemelerin aşınma iz genişlikleri diğer alt malzemelere göre daha büyük ölçülmüştür.



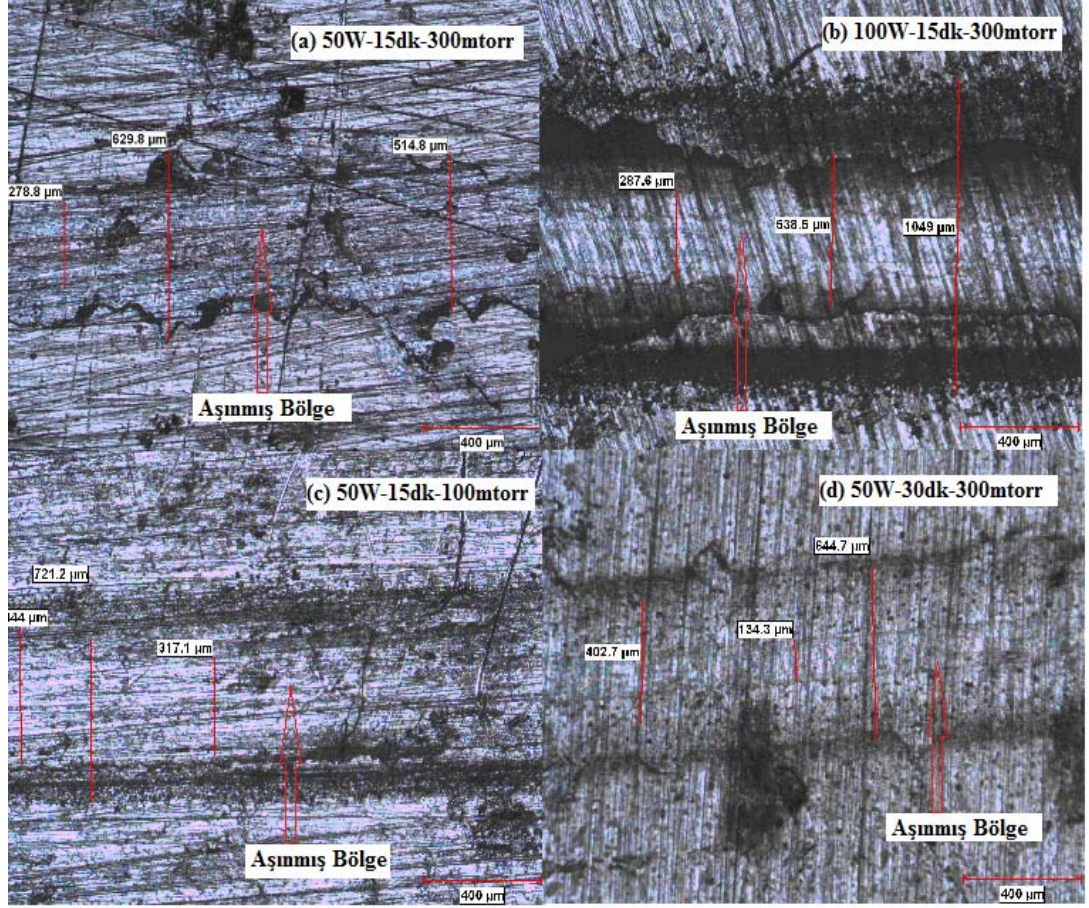
Şekil 4.41. Değişik alt malzemeler üzerine 180 W-100 mtorr-Ar-7,5 dk plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri ((a)Tam yumuşatılmış ; (b) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; (c) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; (d) Bilyeli dövülmüş)

Çalışmada bunun yanında vakum şartlarda PTFE kaplamaya alternatif olarak farklı bir kaplama malzemesi olarak C_3F_6 kaplanmıştır. Yapılan kaplamaların aşınma iz görüntüleri optik mikroskopta incelenerek aşınma karakteristikleri belirlenmiştir. Çizelge 4.24’te vakum şartlarında değişik kaplama işlemi parametrelerinde ((a)50W-15dk-300mtorr; (b) 100W-15dk-300mtorr; (c) 50W-15dk-100mtorr ve (d) 50W-30dk-300mtorr) tam yumuşatılmış; suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemeler üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait ölçülen ortalama aşınma izi genişlikleri verilmektedir.

Çizelge 4.24. Vakum şartlarında değişik işlem parametrelerinde tam yumuşatılmış; suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış ve bilyeli dövülmüş alt malzemeler üzerine yapılan C₃F₆ kaplamalara ait ölçülen ortalama aşınma iz genişlikleri

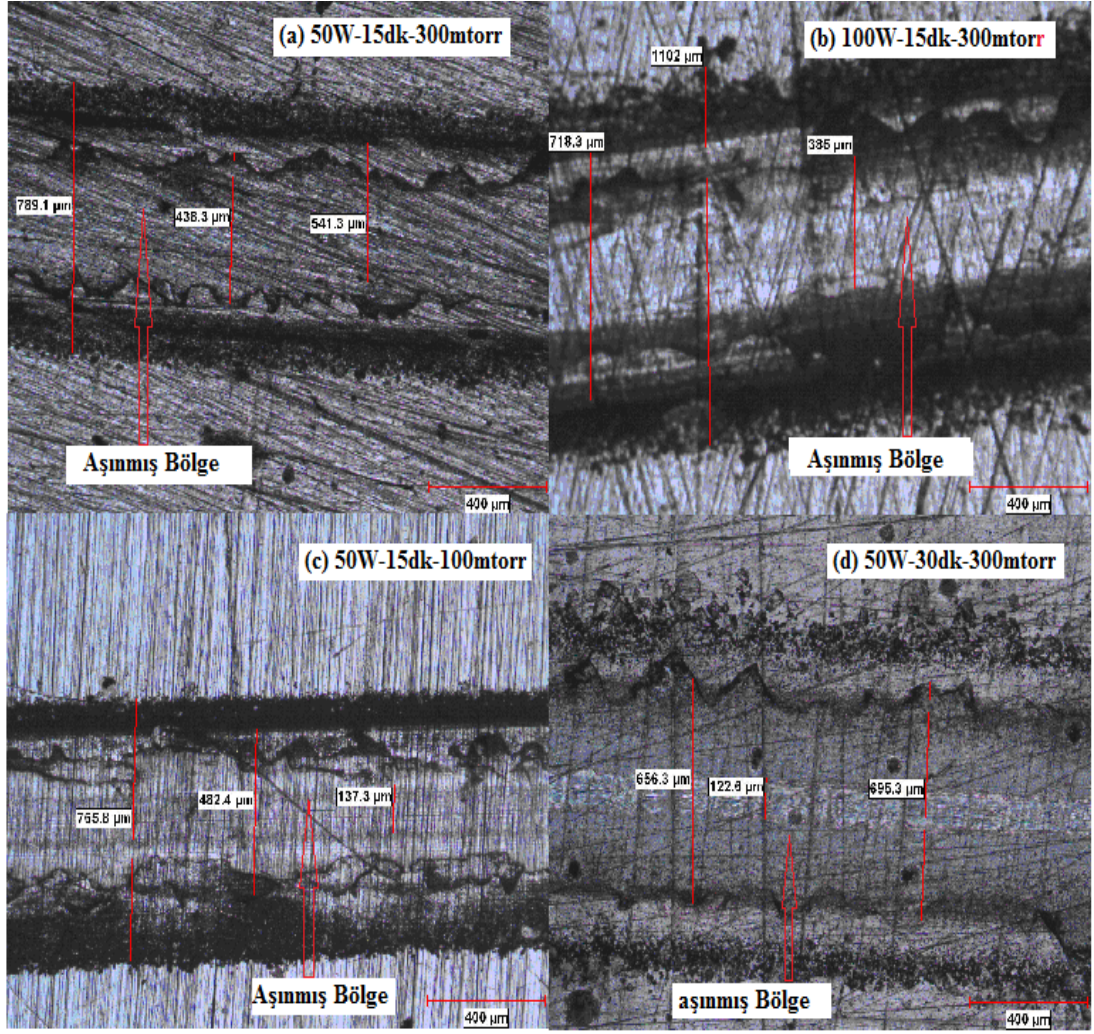
Alt Malzeme	Ortalama İz Genişliği (μm)			
	(a)	(b)	(c)	(d)
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	474,46	658,36	460,76	393,9
Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış	589,56	735,10	461,83	491,40
suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış	671,13	647,45	628,33	415,56
Bilyeli Dövme işlemi uygulanmış	709,45	949,90	1336,50	730,05

Şekil 4.42’de Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde C₃F₆ kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.42 incelendiğinde kaplanmış numunelerin aşınma izinden kalkan kaplama malzemesinin iz kenarlarında toplandığı gözlemlenmiştir. Bu durum kaplama tipi (atmosfer ve vakum şartları) ve kaplama malzemesi cinsine (PTFE ve C₃F₆) bağlı olmaksızın tüm tam yumuşatılmış alt malzeme numunelerin aşınma izi görüntülerinde belirlenmiştir. Bu numunelerde yumuşak alt malzeme ile kaplama malzemesinin aşındırma ucu ve yükü altındaki davranışlarının farklılığını göstermektedir. Sonuçta kaplama kalitesinin yetersizliği ortaya çıkmaktadır.



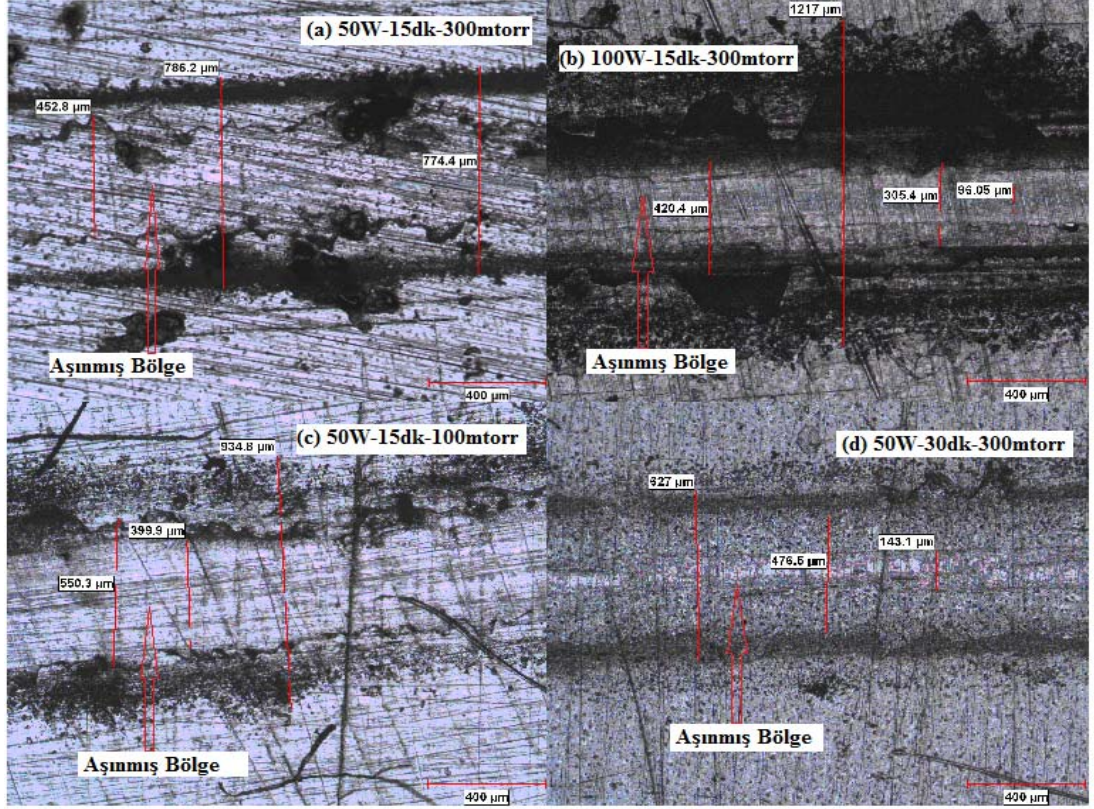
Şekil 4.42. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri

Şekil 4.43'te Suda sertleştirme ve $210^{\circ}C$ 'de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.43 incelendiğinde metale ulaşılmış parlak bölgeler tam yumuşatılmış alt malzemeye göre daha dardır. Bunun yanında suda sertleştirme ve $210^{\circ}C$ 'de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine farklı plazma kaplama işlemi parametreleri uygulanarak C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri kendi arasında incelendiğinde basınç değeri 100mtorr'dan 300mtorr'a çıkarıldığında elde edilen aşınma izinde metal-seramik teması gözlemlenmemiştir. Bu durum işlem vakum değerinin basıncı artırılmasıyla aşınma değerinin azaldığını göstermektedir.



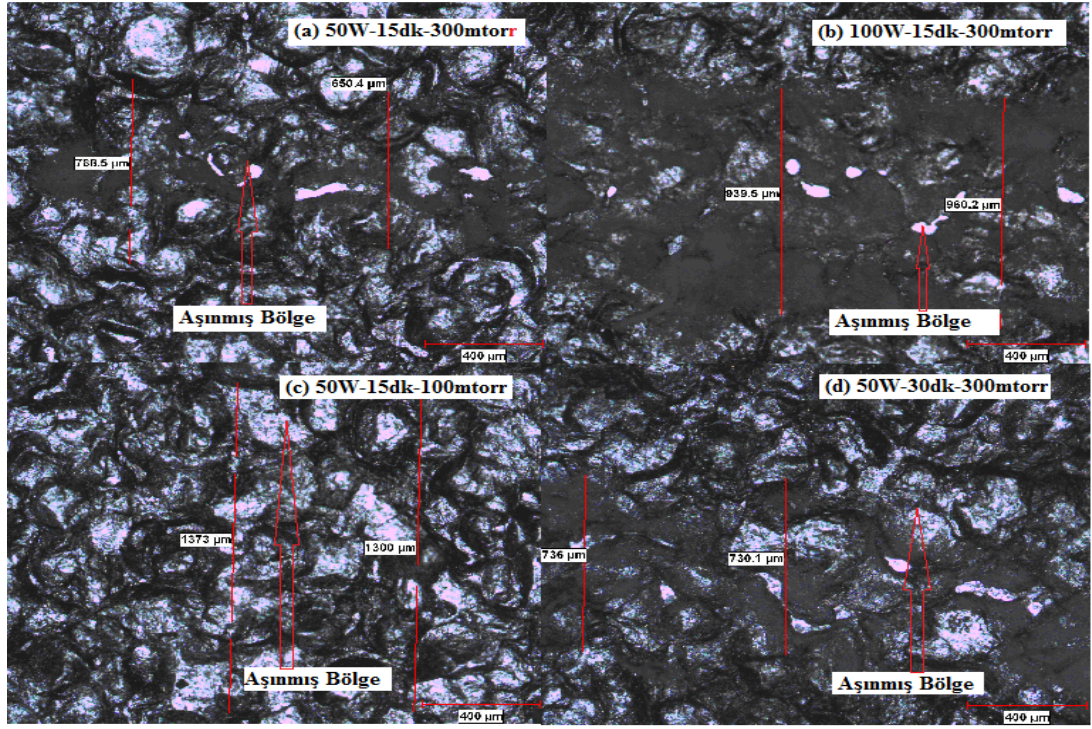
Şekil 4.43. Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri

Şekil 4.44’te Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.44’te verilen aşınma izler incelendiğinde vakum basınç değerinin 100mtorr’dan 300mtorr’a artırılması aşınma değerinin azalmasına neden olmaktadır. Bu durum suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemeye benzer davranışı göstermektedir.



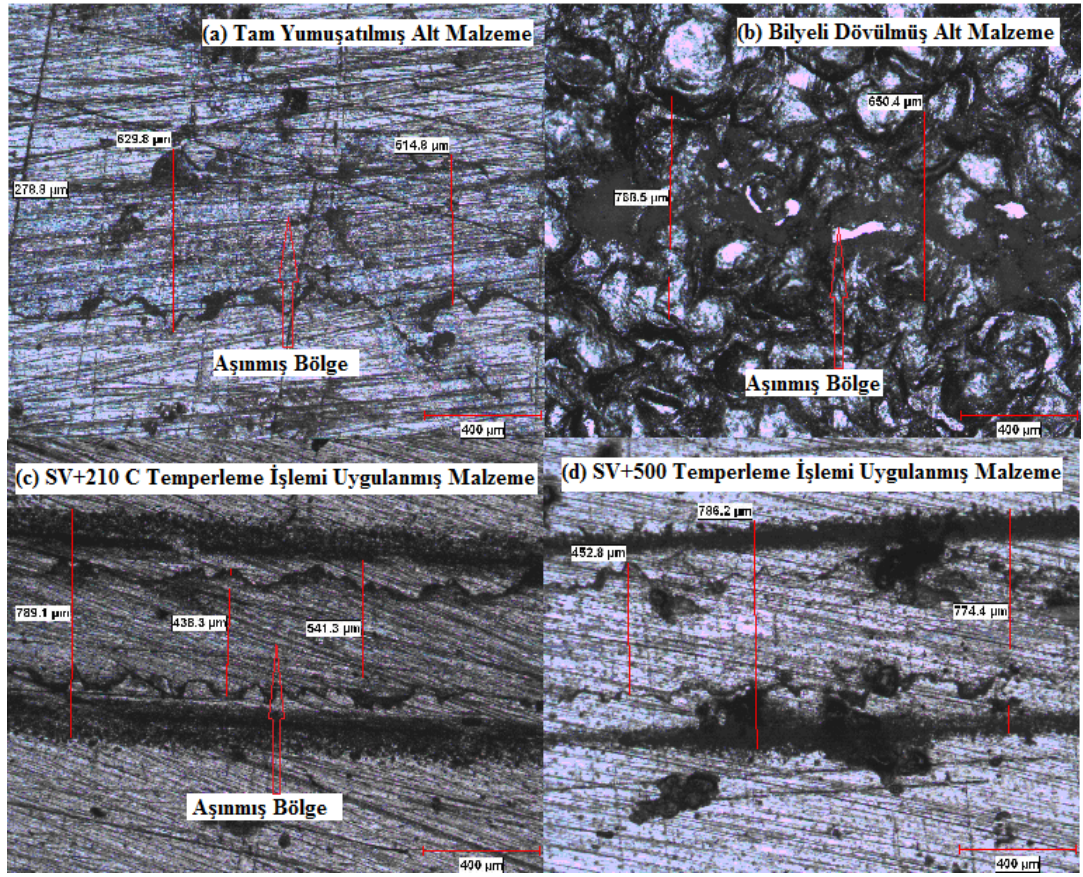
Şekil 4.44.Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerde C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri

Şekil 4.45’te Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine farklı plazma kaplama işlemi parametreleri uygulanarak C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.45’teki bilyeli dövülmüş alt malzemeye ait aşınma iz görüntüleri incelendiğinde parlak bölgelerin varlığı pik yapan bölgelerin diğer bölgelere göre daha erken aşındığını göstermektedir. Bu durum kaplama tipi (atmosfer ve vakum şartları) ve kaplama malzemesi cinsine (PTFE ve C_3F_6) bağlı olmaksızın tüm bilyeli dövülmüş alt malzeme numunelerin aşınma izi görüntülerinde belirlenmiştir. Bilyeli dövme sonrası yüzeyde oluşan pürüzlülük metalik malzeme üzerine yapılacak polimer malzeme kaplamada problem oluşturmaktadır. Eğer bilyeli dövme sonrası yüzey taşlanarak veya çok ince bir kalınlıkta talaş kaldırılarak yüzey kalitesi iyileştirilirse bu dezavantaj ortadan kaldırılmış olacaktır. Böylece orta sertlikte ve kısmen pürüzlü bir yüzeye kaplama yapılması söz konusu olabilecektir.



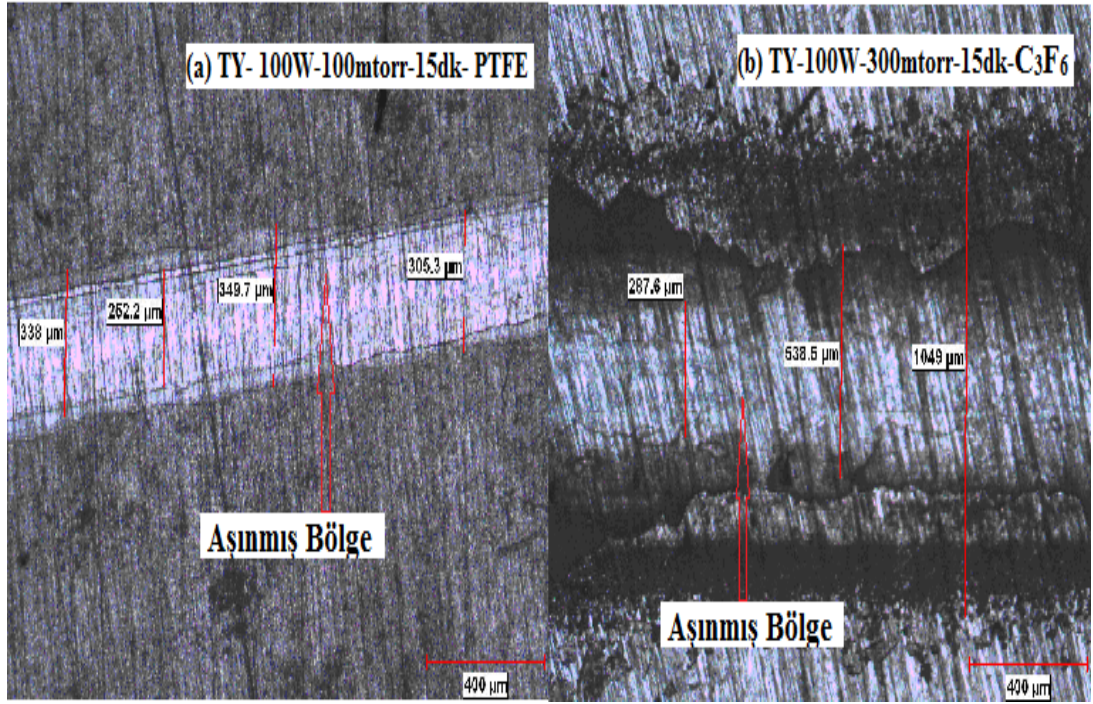
Şekil 4.45. Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine değişik plazma işlem parametrelerinde C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri

Vakum şartlarında farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemeler üzerine 50W-15dk-300mtorr işlem parametreleri uygulanarak plazma ile C_3F_6 kaplanmıştır. Böylece alt malzemenin kaplama kalitesine etkisini bir arada görmek ve karşılaştırma imkânı ortaya çıkacaktır. Değişik alt malzemeler üzerine ((a) Tam yumuşatılmış ; (b) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; (c) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; (d) Bilyeli dövülmüş) 50W-15dk-300mtorr işlem parametreleri kullanılarak yapılan kaplamalara ait aşınma izi görünüşleri Şekil 4.46’da verilmektedir. Farklı sertlikteki alt malzemelerin üzerine aynı plazma işlem parametreleri ile kaplanmış numunelere ait aşınma izleri incelendiğinde parlak bölgeler en fazla bilyeli dövülmüş alt malzemede gözlemlenmektedir. Bu durum bilyeli dövülmüş alt malzemenin bu haliyle kaplanabilirliğinin diğer alt malzemelere göre daha düşük olduğu sonucuna varılmaktadır.

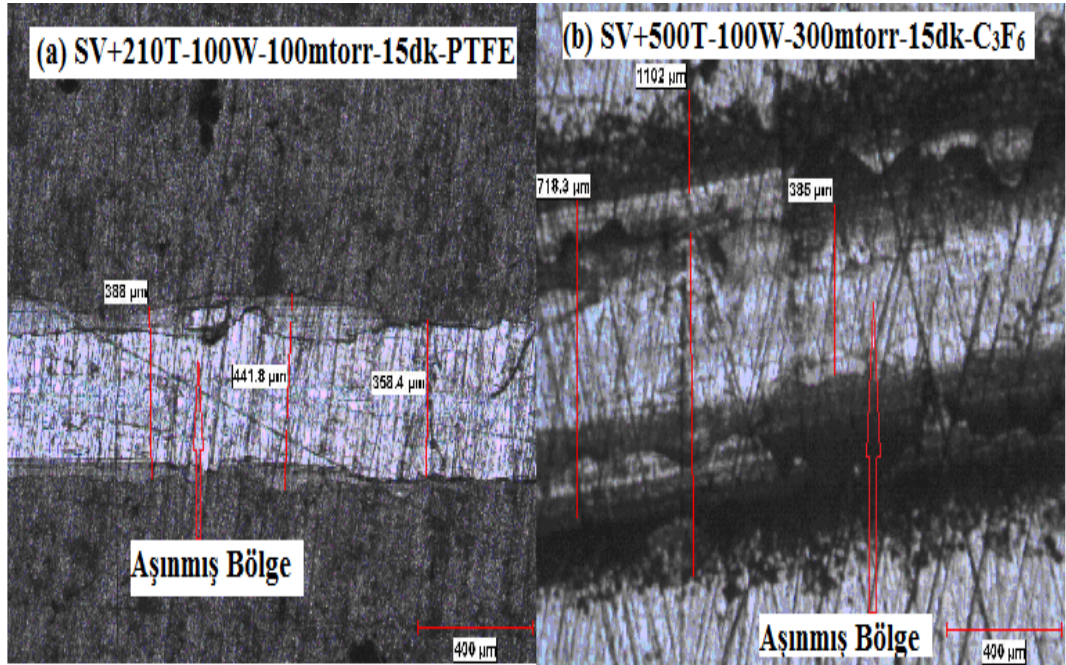


Şekil 4.46. Değişik alt malzemeler üzerine 50 W-15 dk-300 mtorr plazma işlem parametrelerinde yapılan kaplamalara ait aşınma iz görüntüleri ((a)Tam yumuşatılmış ; (b) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; (c) Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış; d) Bilyeli dövülmüş)

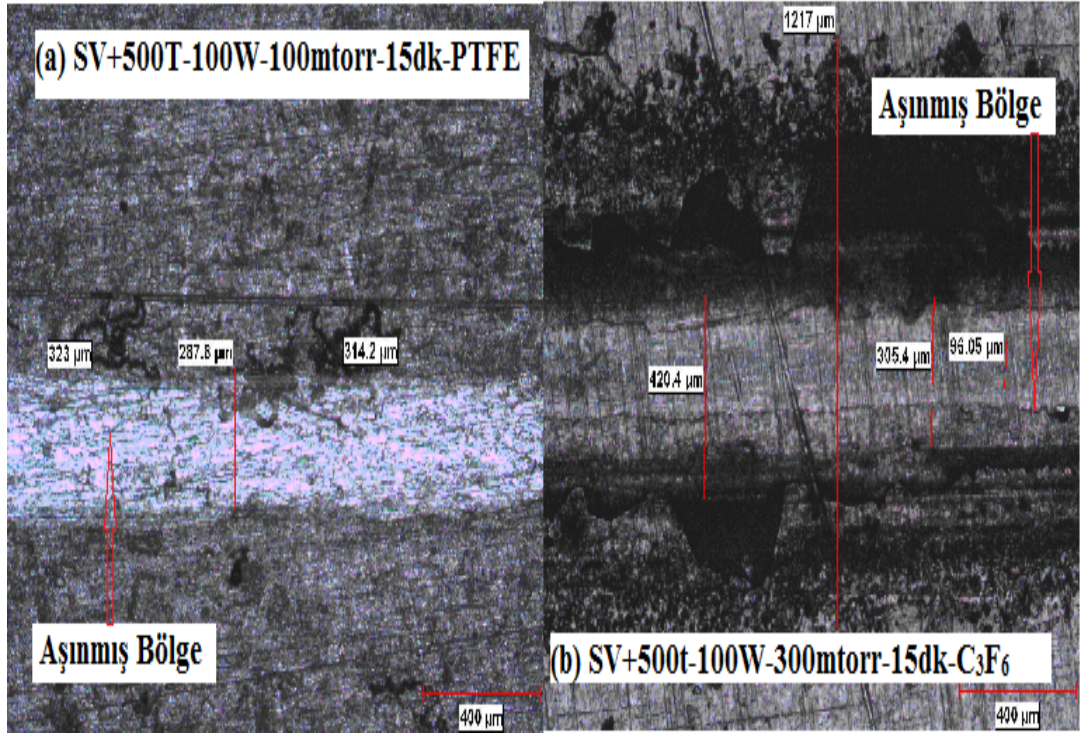
Vakum şartlarında Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine (a) 100W-15dk-100mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100W-15dk-300mtorr plazma işlem şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri Şekil 4.47’de; Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine (a) 100W-15dk-100mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100W-15dk-300mtorr plazma işlem şartlarında kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri Şekil 4.48’de; Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine (a) 100W-15dk-100mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100W-15dk-300mtorr plazma işlem şartlarında kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri Şekil 4.49’da ve Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine (a) 100W-15dk-100mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100W-15dk-300mtorr plazma işlem şartlarında kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri Şekil 4.50’de verildiği gibidir.



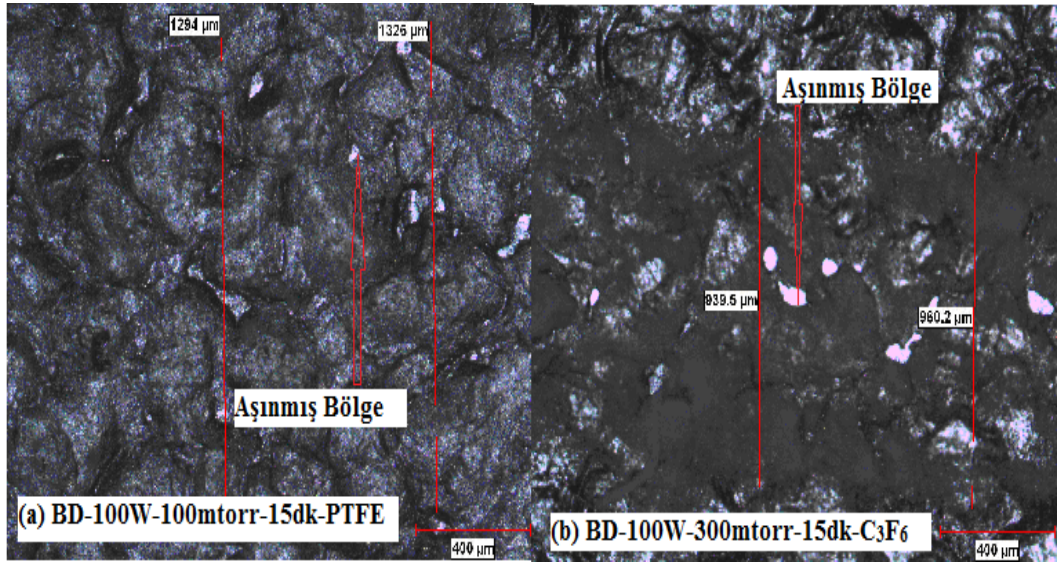
Şekil 4.47. Tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine (a) 100 W-15 dk-100 mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100W-15dk-300mtorr plazma işlem şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri



Şekil 4.48. Suda sertleştirme ve 210 °C'de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine (a) 100 W-15 dk-100 mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100 W-15 dk-300 mtorr plazma işlem şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri



Şekil 4.49. Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine (a) 100W-15dk-100mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100W-15dk-300mtorr plazma işlem şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri



Şekil 4.50. Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine (a) 100 W-15 dk-100 mtorr plazma işlem şartlarında PTFE ve (b) 100W-15dk-300mtorr plazma işlem şartlarında C_3F_6 kaplanmış numunelere ait aşınma iz görüntüleri

Çizelge 4.25’de atmosferik ve vakum şartlarında plazma yardımıyla PTFE ve C_3F_6 malzeme kaplanmış farklı yüzey kalitesi ve sertlik değerlerine sahip alt malzemedan

numunelerin tribotester aşınma deneyleri uygulanmasıyla ortaya çıkan aşınma izi büyüklüklerinin ortalama değerleri verilmektedir. Genel olarak değerlendirme yapıldığında atmosfer şartlarında yapılan kaplamalarda aynı aşınma deneyi parametrelerinin uygulanmasına rağmen ölçülen iz genişlik değerleri belirgin şekilde büyüktür. Yüzey kaplamalarının yapılmasının ilk amacı aşınma karakteristiklerinin iyileştirilmesidir. Yağlama yapılmayan çalışma durumlarında aşınma, malzeme transferi, uzun çalışma ömrü istenir. Bu açıdan bakıldığında atmosfer basıncı şartlarında yapılan PTFE malzeme kaplamalarının tercih edilmesinin uygun olamayacağı sonucuna varılmıştır (Fei vd., 2010). Vakum basıncı altında plazma yardımıyla yapılan PTFE ve C_3F_6 malzeme kaplamalarının kendi arasında karşılaştırılması gerekmektedir. Kaplama malzemesinin yüzey kalitesi ve sertlik değerlerinden bağımsız olarak PTFE malzeme kaplamaları C_3F_6 malzeme kaplamalarına göre daha küçük aşınma izi büyüklükleri vermektedir. C_3F_6 malzeme gaz halinde olup plazma gazı yerine kullanılırken, PTFE malzeme kaplanırken Argon ve Helyum gazları kullanılmıştır. PTFE kaplanmış numunelerin kendi arasında karşılaştırılmaları aşınma izi büyüklükleri açısından en uygun alt malzeme yüzey özelliklerini ortaya koyacaktır. Suda Sertleştirilmiş ve 210°C sıcaklıkta temperlenmiş AISI 1050 alt malzemenin vakum altında PTFE malzeme kaplanması halinde en küçük aşınma izi genişlik değeri ölçülmüştür. Bu alt malzemenin yüzey kalitesi tam yumuşatılmış ve Suda Sertleştirilmiş ve 500°C sıcaklıkta temperlenmiş alt malzemelerin yüzey pürüzlülük değerleriyle aynıdır. Böylece kaplanan malzemenin yüzey pürüzlülüğünün etkisi ortadan kaldırılmıştır. Kaplanan alt malzemelerin sertlik değerleri farklılık göstermektedir. Alt malzemenin yüzey sertlik değeri arttıkça aşınma izi genişliği küçülmektedir. Bu durum tribotester aşındırma cihazında aşındırıcı uç tarafından alt malzemeye uyguladığı noktasal yüke karşı gösterdiği direncin daha büyük olması ve böylece daha küçük elastik deformasyonla açıklanabilir. Alt malzemede daha küçük deformasyon ve buna uyumlu deforme olan malzemesi daha küçük aşınma izi verilmektedir. Bu durum kaplamanın daha düşük sürtünme katsayısı vermesini de ortaya çıkarmaktadır (Çizelge 4.9 ve Çizelge 4.14). Böylece kaplama sonrası belirlenen sürtünme katsayısı aşınma izi genişliği değerleri birbirini destekler niteliktedir.

Çizelge 4.25. Farklı sertlikteki alt malzemeler üzerine PTFE ve C₃F₆ malzemeleri kaplanmış numunelere ait ortalama aşınma iz genişlikleri

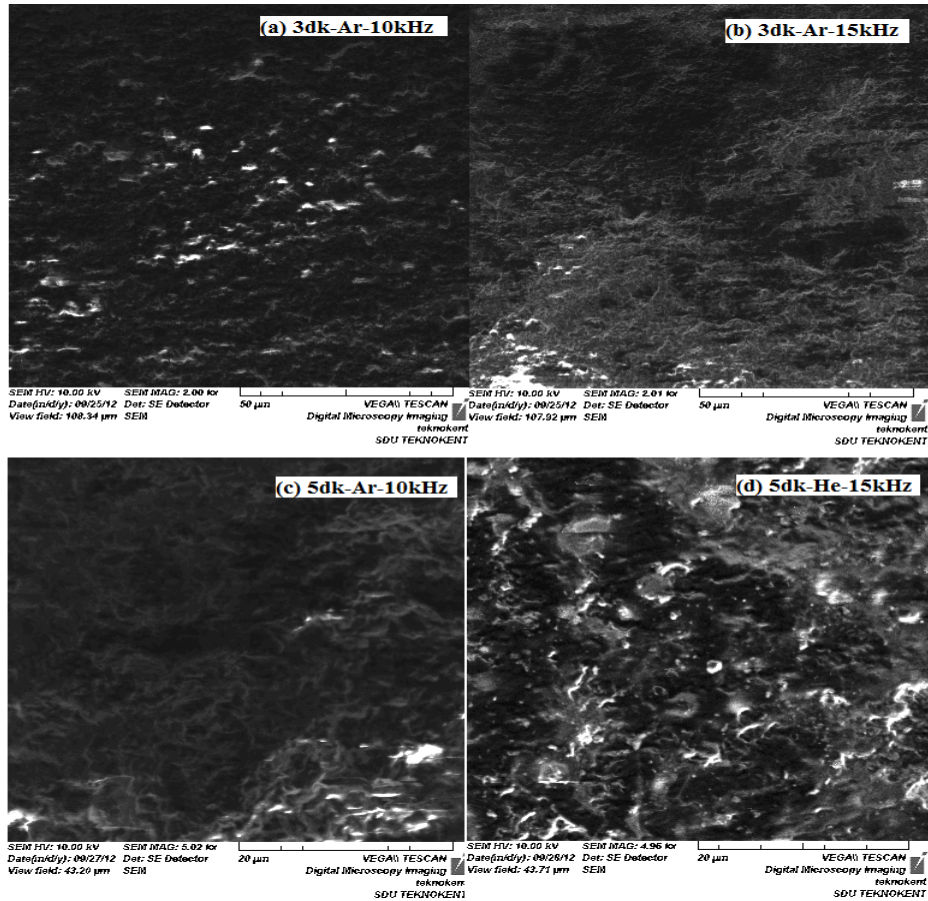
Alt Malzeme	Sertlik Değeri	ORTALAMA İZ GENİŞLİĞİ (μm)		
		Atmosferik Şartlarda PTFE Kaplanmış Numuneler	Vakum Şartlarında PTFE Kaplanmış Numuneler	Vakum Şartlarında C ₃ F ₆ Kaplanmış Numuneler
Tam Yumuşatma işlemi uygulanmış	HRB 87	709,53	313,8	658,36
Suda Sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 59	407,85	396,06	735,10
Suda Sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış	HRC 37	447,65	308,33	647,60
Bilyeli dövme işlemi uygulanmış	HRC 40	1171,63	1310,00	949,85

4.5. Aşınma Sonrası Yüzeylerin SEM Analizleri

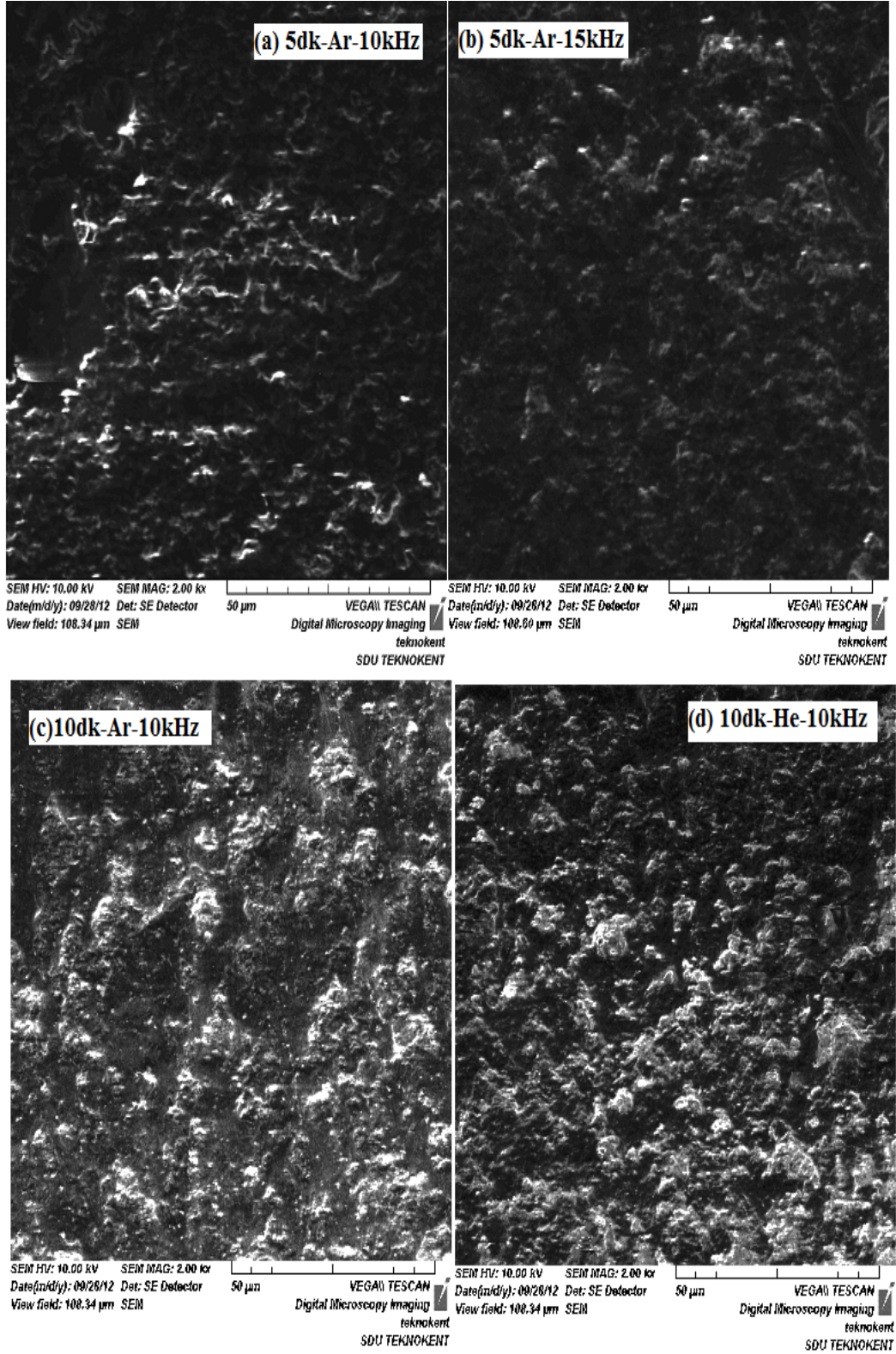
Çalışmada atmosferik şartlarda ve vakum şartlarında değişik plazma işlem parametreleri kullanılarak kaplama işlemi yapılan numunelere aşınma deneyi uygulandıktan sonra aşınma bölgelerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Aşınma iz görüntüleri, AFM ve SEM görüntüleri ile desteklenerek yapılan kaplamaların aşınma karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.51’de verilmektedir. Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.52’de verilmektedir. Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.53’de verilmektedir. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri ise Şekil 4.54’de verilmektedir.

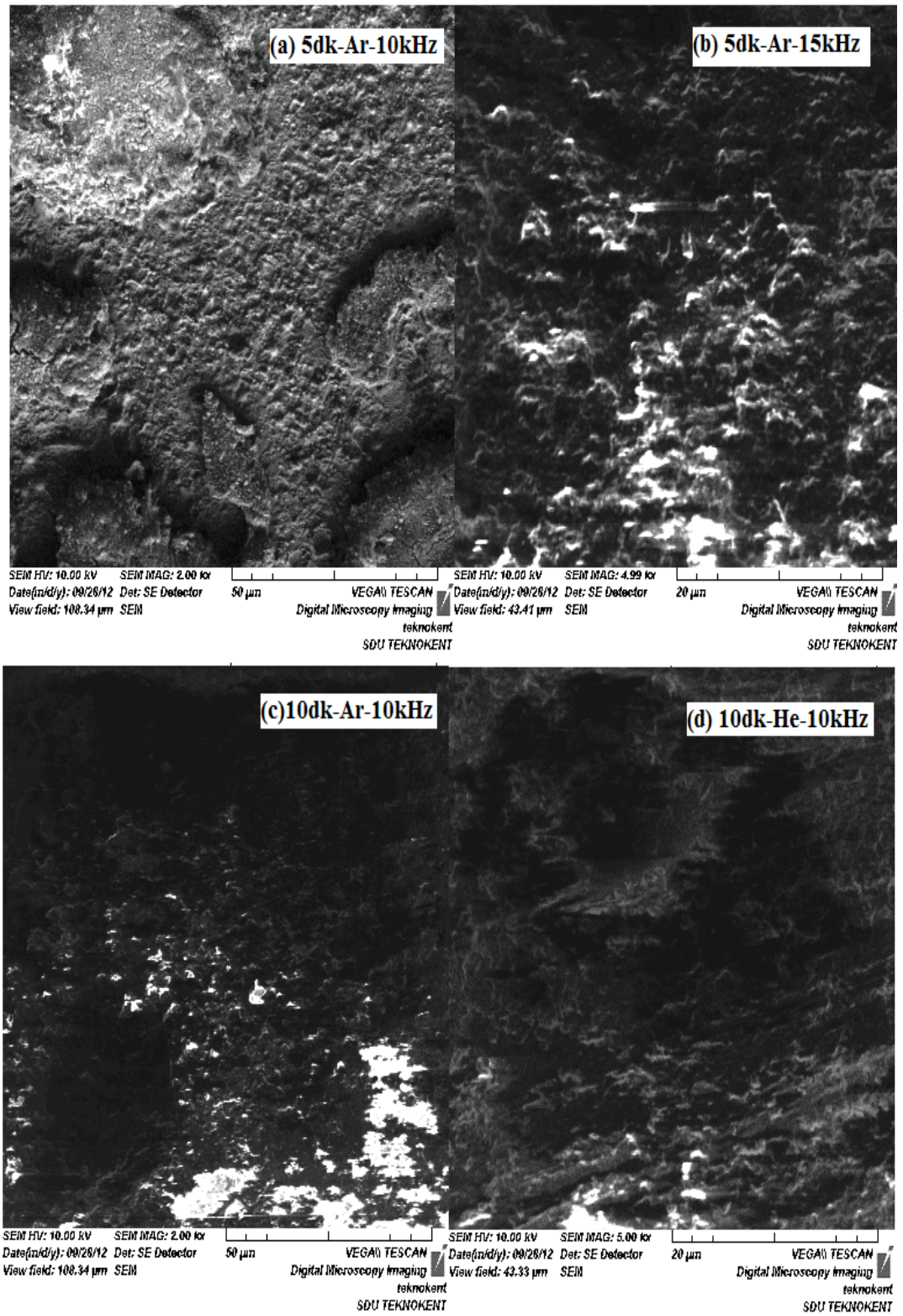
Aşınma izlerinin SEM görüntüleri aşınmanın yapısını, homojen aşınma olup olmadığını, yüzeyin aşınma sonrası değişimini gösterecek önemli bir gösterge olacaktır. Atmosfer basıncı şartlarında yüzeye PTFE kaplanmış alt malzemelerin aşınma izleri benzer görüntüler vermiştir. Yüzeyde aşınma artıkları belirgin olarak görülmemektedir. Ancak atmosfer basıncı şartlarında kaplama kalitesinin düşük olduğu açıkça görülmektedir. Daha kaba bir yapı görüntüsü ortaya çıkmıştır. Şekil 4.53 (a) ve (d)'de verilen görüntüler iri baloncuklu bir yüzey yapısını gösteren önemli resimlerdir. Yüzeylerde yer yer çukurcuklar görülmektedir. Bunlar kaplanan yüzeye baloncuklar şeklinde gelip kaplama tabakasına tutunan PTFE malzemeyi göstermektedir. Şekil 4.54'de bilyeli dövülmüş alt malzemenin aşınma izleri verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde parlak bölgeler metal piklerinin (Şekil 4.17'te gösterilen) varlığını açıkça göstermektedir. Yüzeyin belli bir kısmını bu tür parlak bölgelerin oluşturması farklı karakteristiğe sahip malzemeleri göstermektedir.



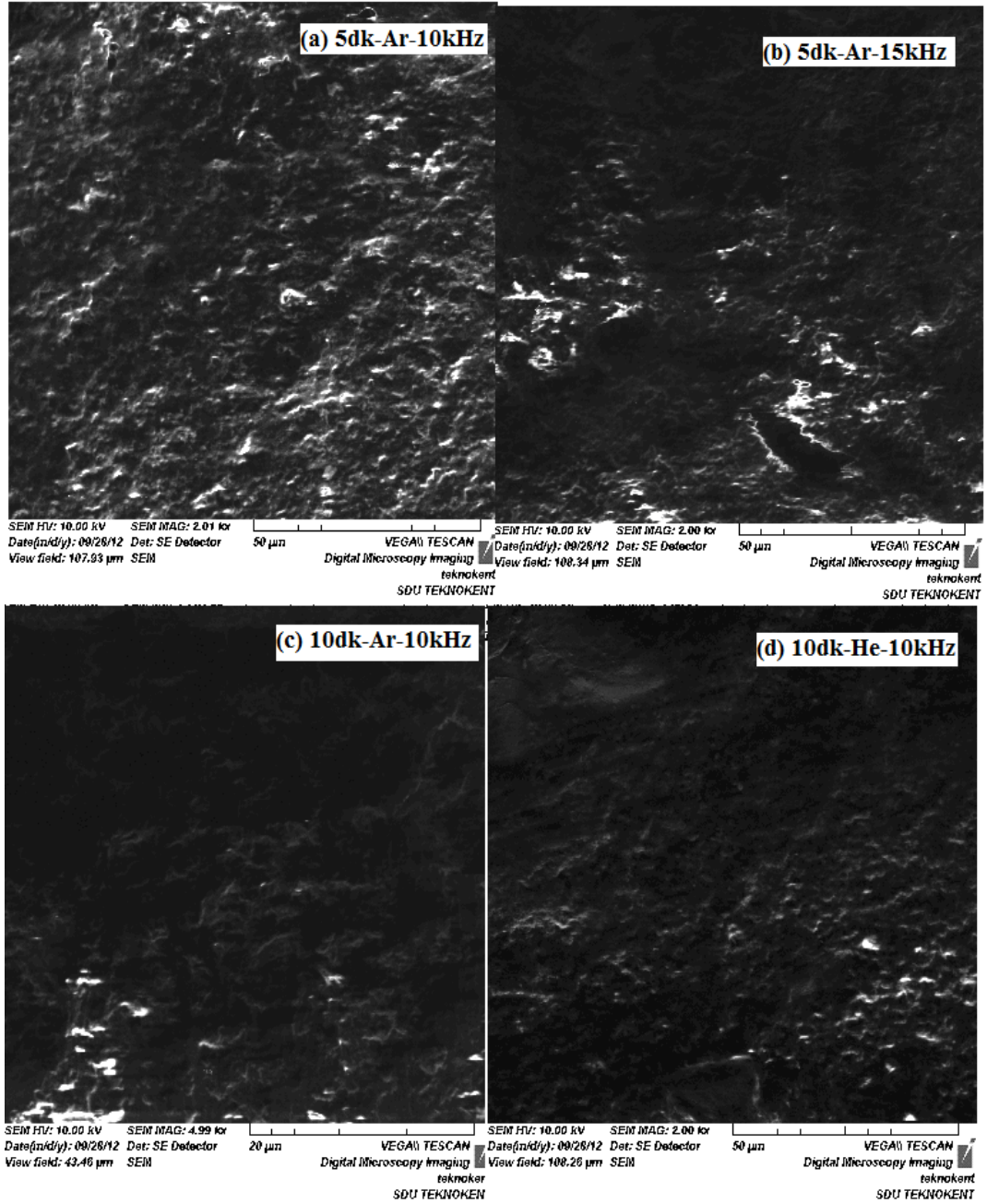
Şekil 4.51. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri



Şekil 4.52. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri



Şekil 4.53. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 500°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri

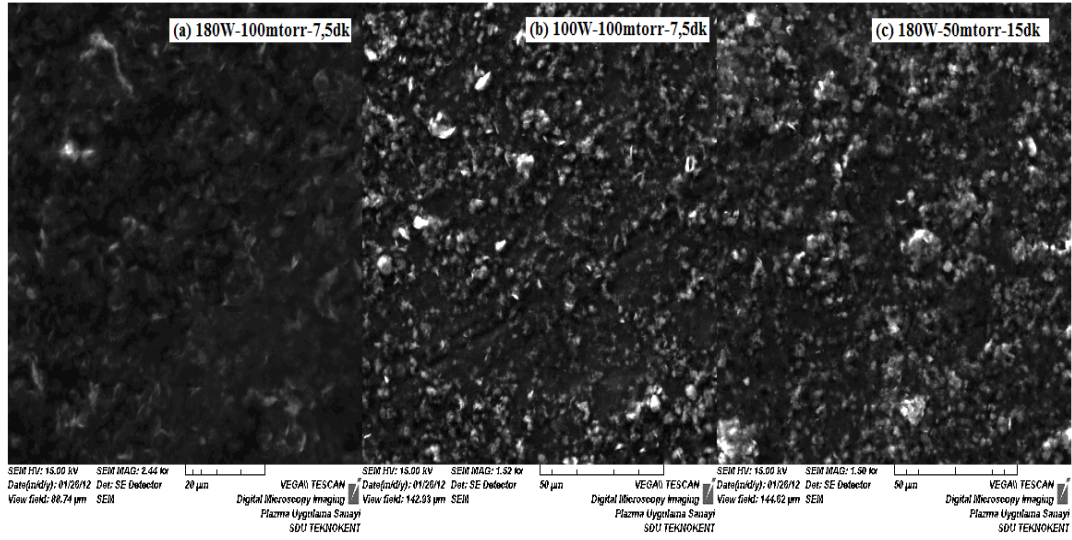


Şekil 4.54. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan kaplamalara ait SEM görüntüleri

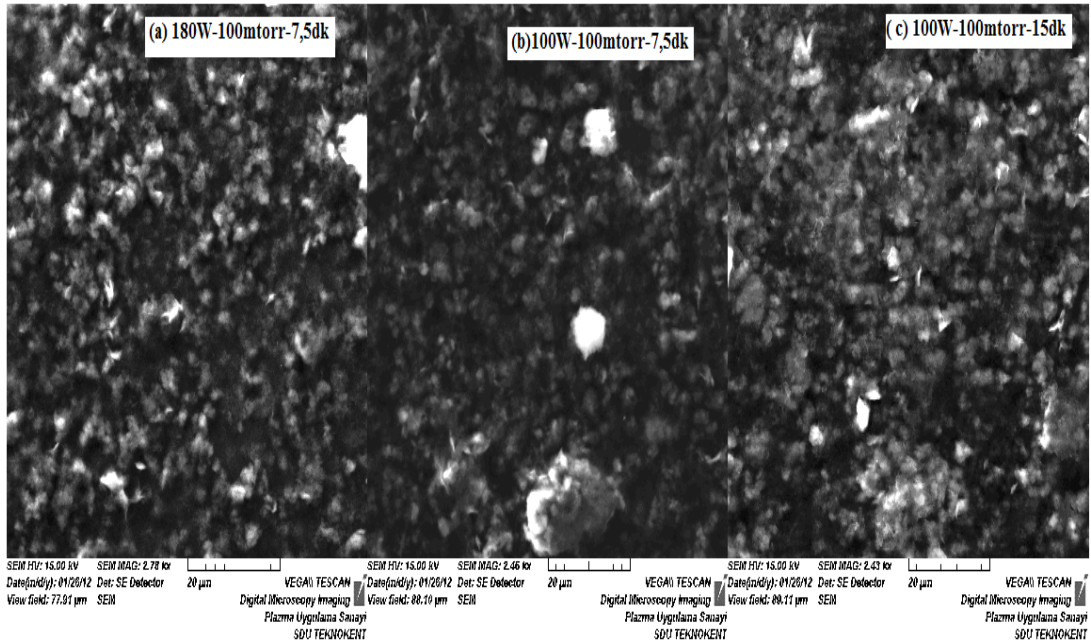
Çalışmada atmosferik şartlarda plazma kaplama işleminin yanında vakum şartlarında da plazma kaplama işlemi ile PTFE ve C_3F_6 kaplanmıştır. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.55'te verilmektedir. Suda sertleştirme ve $210^{\circ}C$ 'de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak yapılan PTFE kaplamalara ait SEM

görüntüleri Şekil 4.56'da verilmektedir. Suda sertleştirme ve 500°C'de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.57'de verilmektedir. Atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri ise Şekil 4.52'de verilmektedir.

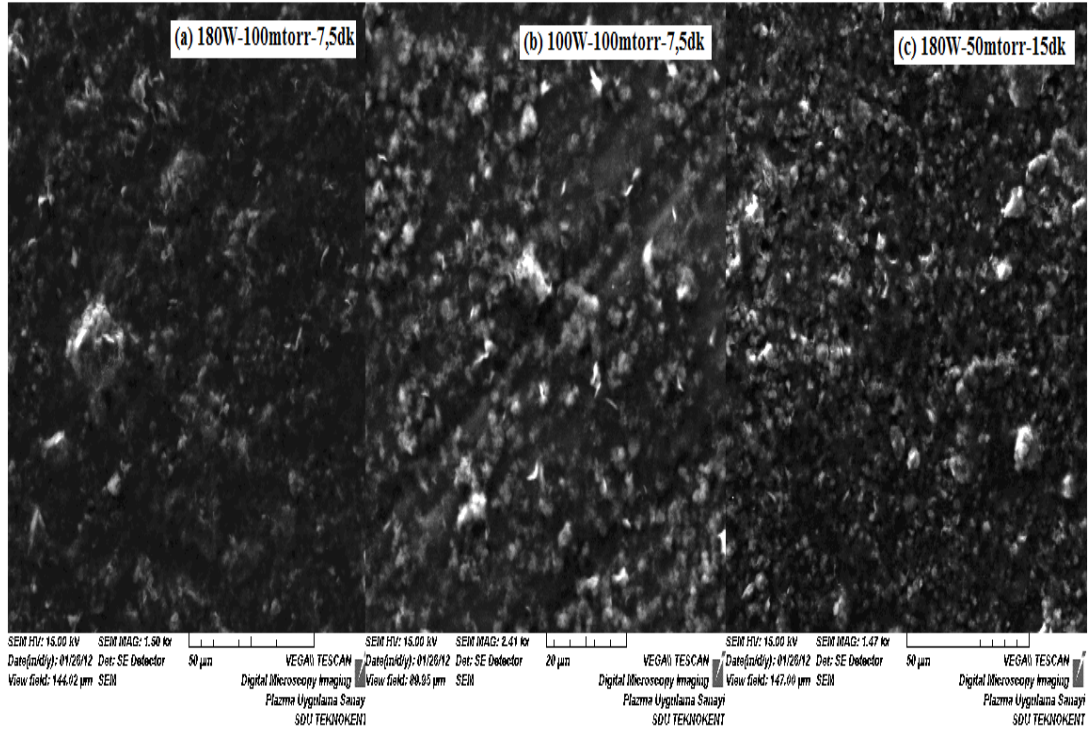
Vakum şartlarında aynı alt malzeme üzerine iki farklı (PTFE ve C_3F_6) malzeme kaplanmıştır. Kaplama malzemelerinin karakteristikleri farklılık göstermektedir. PTFE ve C_3F_6 malzemelerin SEM görüntüleri bu karakteristik farklılığını çok açık göstermektedir. Şekil 4.55 ve Şekil 4.58 arasındaki şekillerde verilen aşınmış bölge görüntüleri PTFE kaplanmış numunelere aittir. Bu görüntülerde aşınma bölgesinin homojen bir yapıya sahip olduğu, ince tanelere sahip kaplamanın üzerinde bazı daha iri aşınma artıkları görünmektedir. Alt malzemedan bağımsız olarak görüntülerin benzerliği dikkat çekmektedir. Bu durum daha homojen bir kaplamanın yapıldığını göstermektedir. Şekil 4.59 ve Şekil 4.62 arasındaki şekillerde verilen aşınmış bölge görüntüleri C_3F_6 kaplanmış numunelere aittir. Bu görüntülerde kaplama malzemesinin farklı karakteristiği çok açık farklılık göstermektedir. Küçük küresel formdaki taneciklerin varlığı dikkat çekmektedir. Bu görüntüler C_3F_6 malzemenin kendi karakteristiğidir. Bu tür kaplamada plazma gazı (Ar, He) kullanılmadan doğrudan C_3F_6 pülverize halde kullanılmıştır. Küresel şekli alan kaplama malzemesi bu formu koruyarak kaplama yüzeyine tutunmuştur. Yer yer tam yapışmamış taneciklerin varlığı Şekil 4.60.d'de görülmektedir. Bu yüzeye sahip kaplanmış malzemedan ölçülen sürtünme katsayılarını etkilemiştir. Çizelge 4.19'da verilen değerlerin ortaya çıkışını bu görüntüler desteklemektedir. PTFE kaplama malzemesine göre C_3F_6 kaplama malzemesi daha yüksek sürtünme katsayısı vermiştir. Bu durum yüzeyde kaplama malzemesinin kaplama yüzey kalitesine etkisi ile açıklanabilir. Şekil 4.63'de yüzeye kaplama işleminin son aşamasında yüzeye tutunan küre şekilli tanecikli yapı gösteren kaplama malzemesinin yaygın olduğu görülmektedir. Bu durum yukarıda söylenenleri toplu halde göstermesi açısından önemlidir.



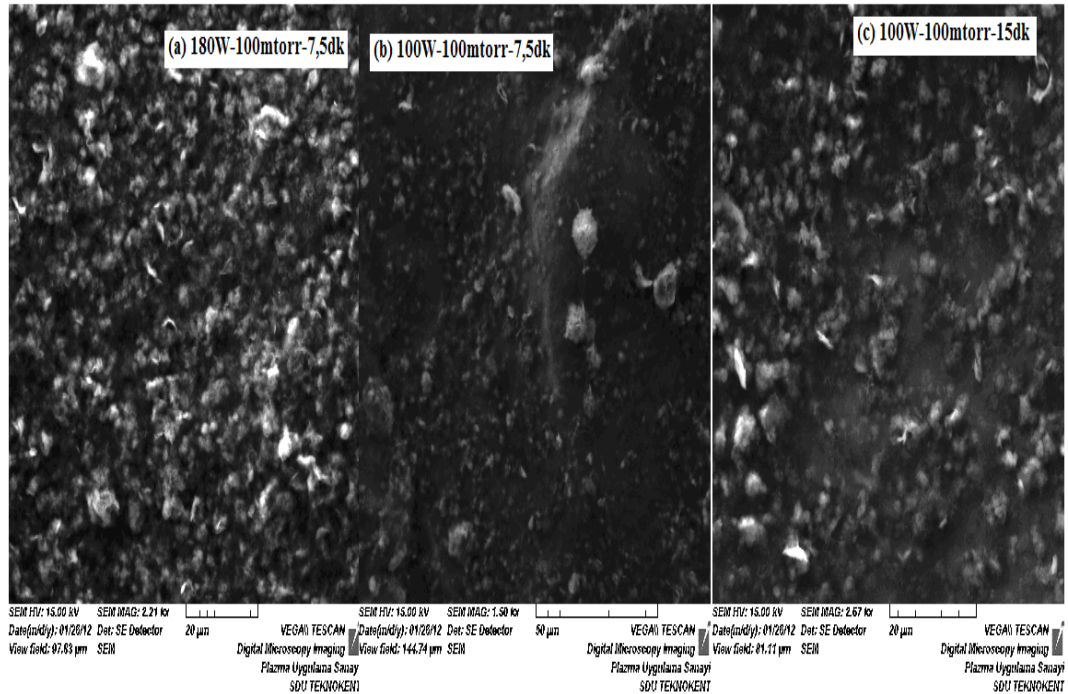
Şekil 4.55. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri



Şekil 4.56. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri



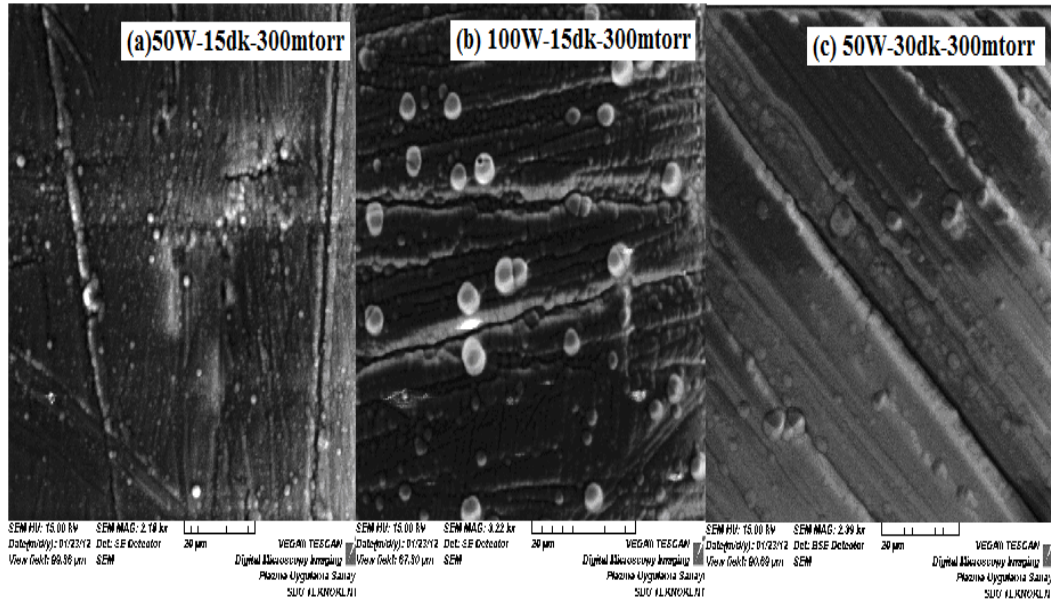
Şekil 4.57. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri



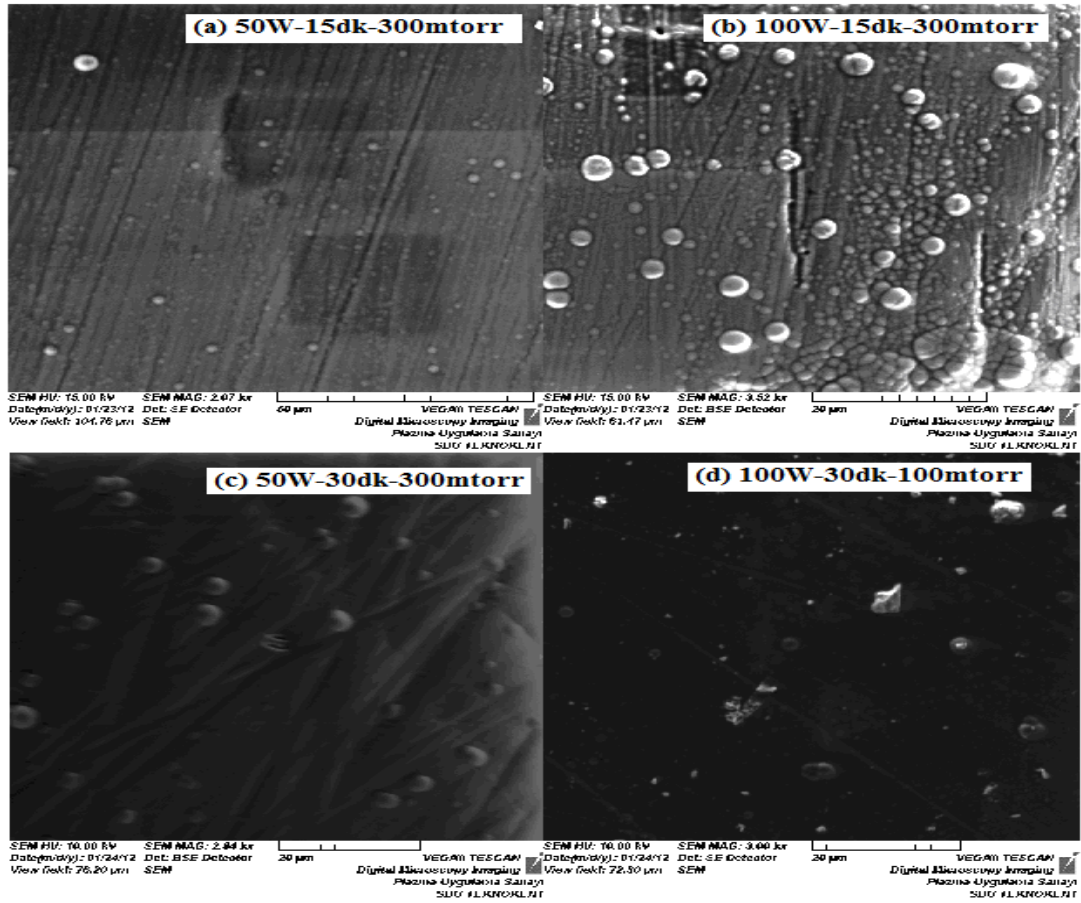
Şekil 4.58. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri

Vakum şartlarında PTFE kaplama malzemesinin yanında C_3F_6 kaplama malzemesi de kullanılarak kaplama işlemi yapılmıştır. Böylelikle kaplama malzemesinin kaplama kalitesine etkisi ve aşınma şartları açısından uygun kaplama malzemenin hangisi olduğu belirlenmiştir.

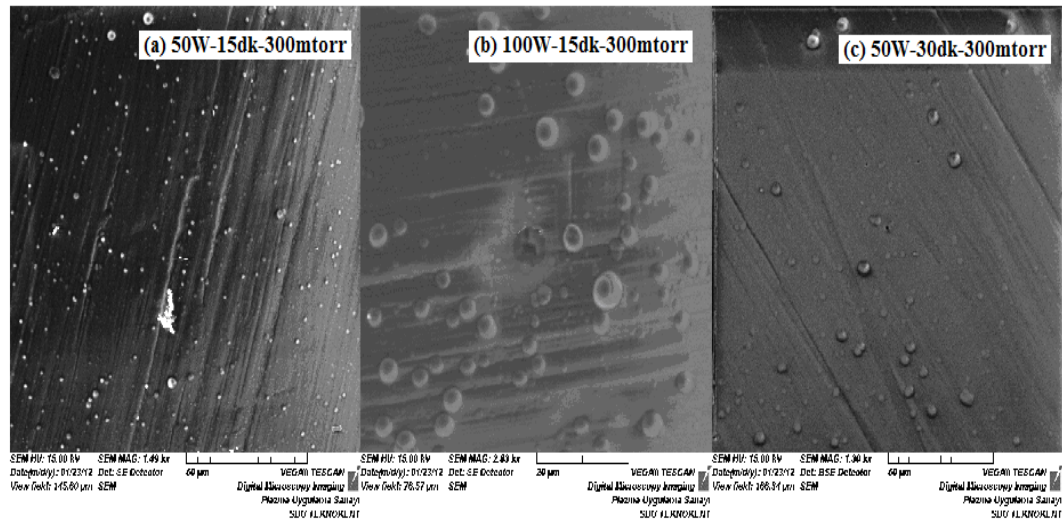
Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.59’da verilmektedir. Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.60’da verilmektedir. Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine atmosferik şartlarda değişik işlem parametreleri kullanılarak yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.61’de verilmektedir. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.62’de verilmektedir.



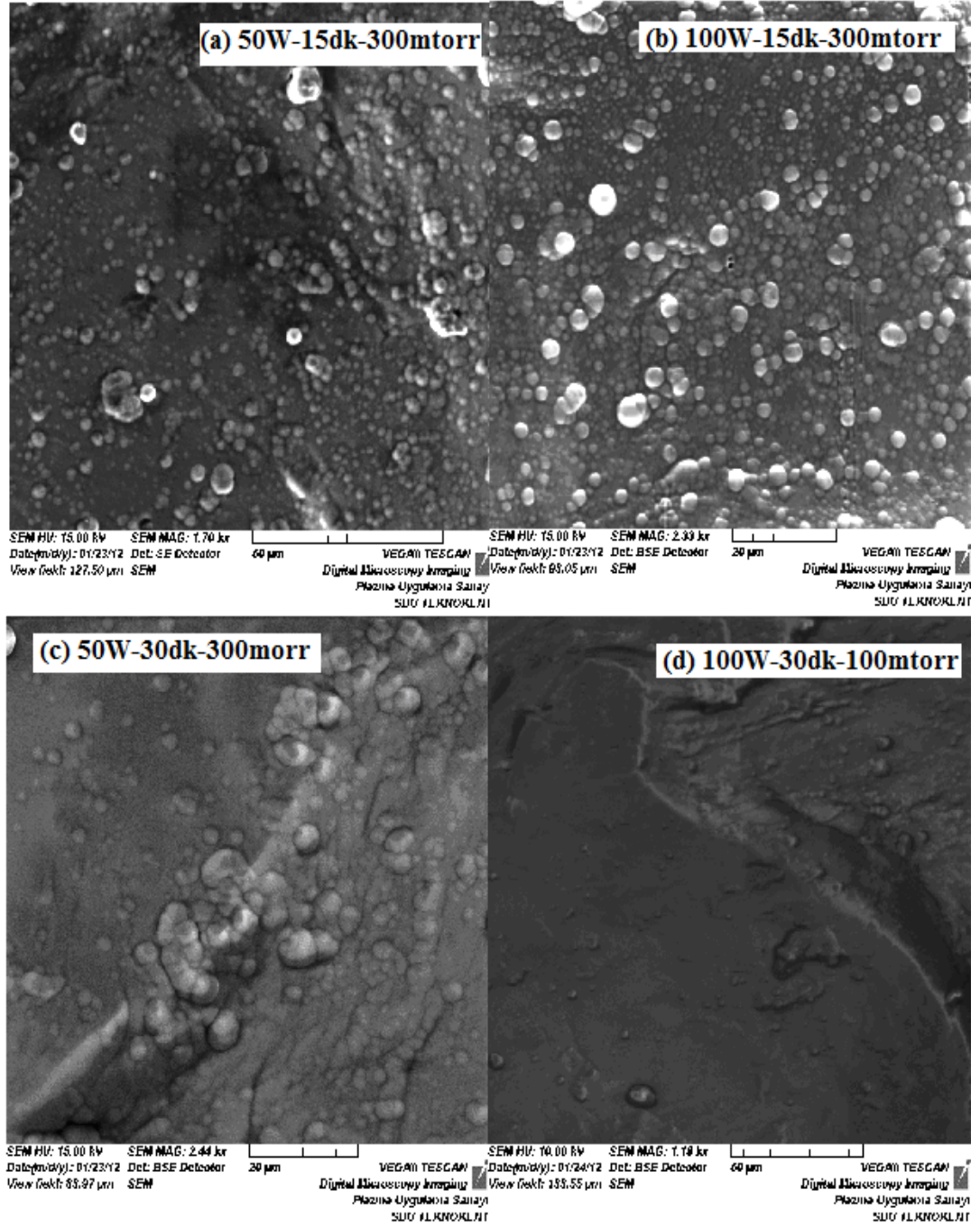
Şekil 4.59. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri



Şekil 4.60. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri

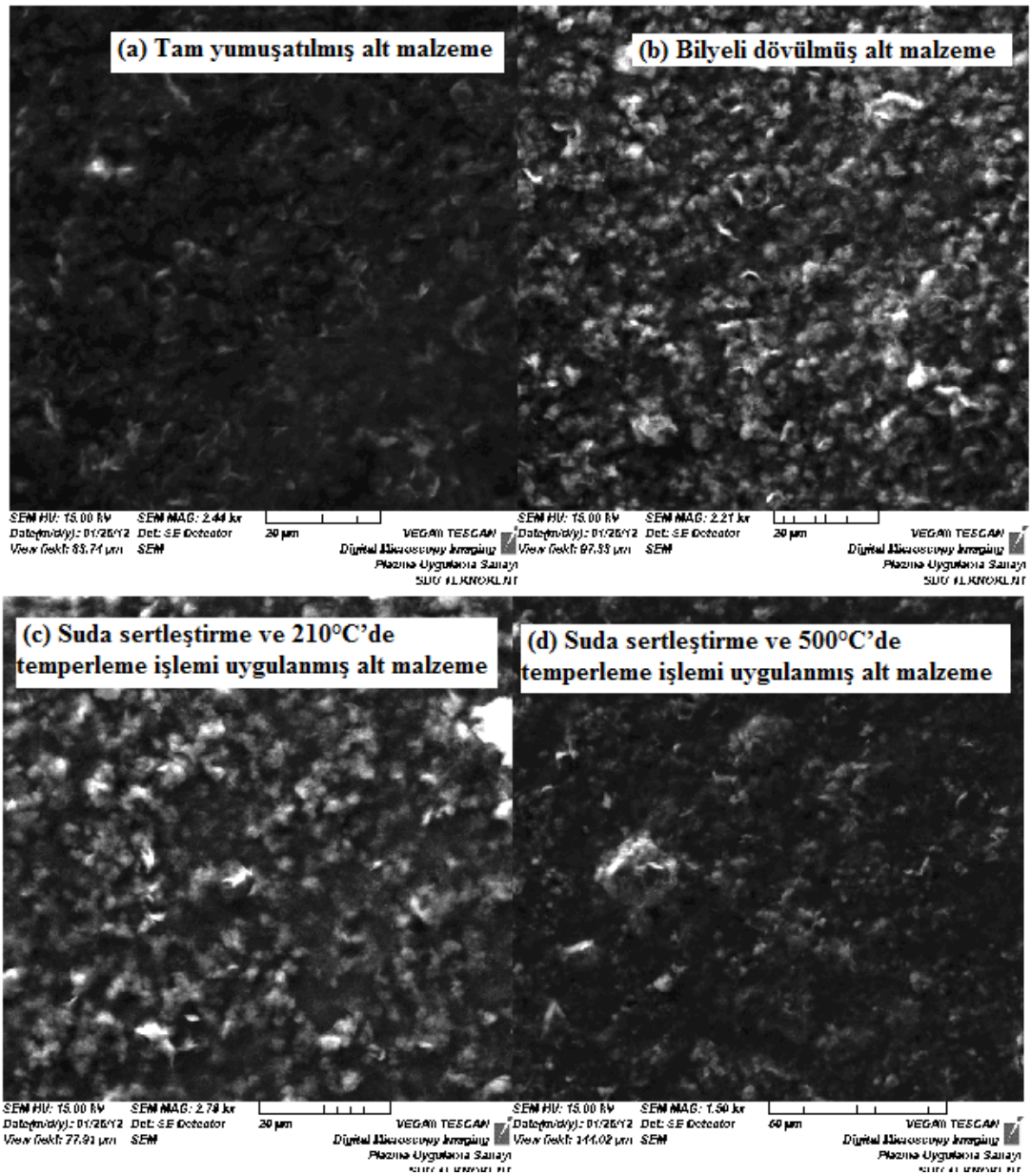


Şekil 4.61. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri



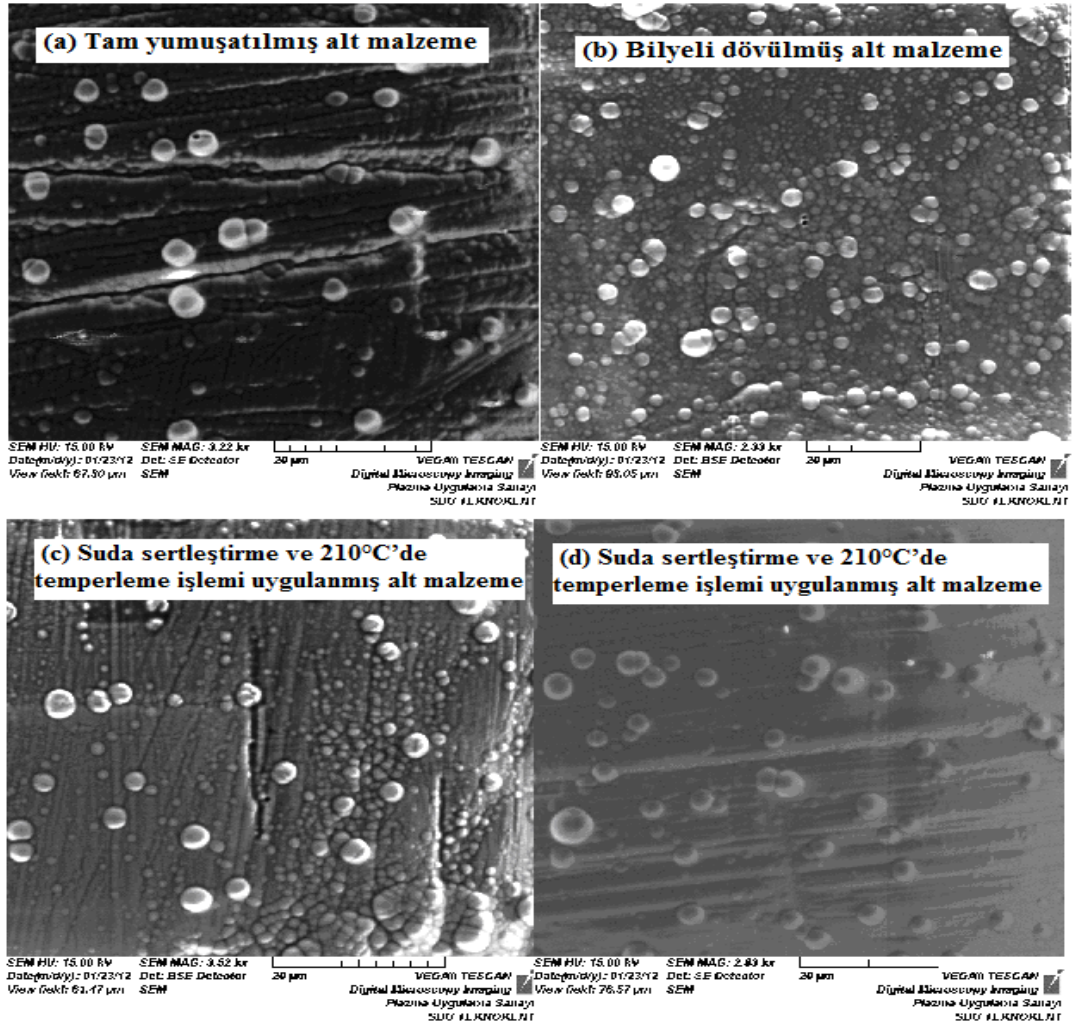
Şekil 4.62. Vakum şartlarında değişik işlem parametreleri kullanılarak Bilyeli dövülmüş alt malzeme üzerine yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri

Çalışmada ayrıca farklı sertlik değerlerindeki alt malzemeler üzerine vakum şartlarında 180W-100mtorr-7,5dk plazma işlem parametreleri kullanılarak yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri Şekil 4.63’de verilmektedir.



Ŗekil 4.63. Farklı sertlik değerlerindeki alt malzemeler ((a) Tam yumuşatılmış; (b) Bilyeli dövülmüş; (c) Suda sertleştirme ve 210 °C'de temperleme işlemi uygulanmış ve (d) Suda sertleştirme ve 500 °C'de temperleme işlemi uygulanmış) üzerine vakum şartlarında 180W-100mtorr-7,5dk plazma işlem parametreleri kullanılarak yapılan PTFE kaplamalara ait SEM görüntüleri

Ŗekil 4.64'te ise vakum şartlarında farklı sertlikteki alt malzemeler ((a) Tam yumuşatılmış; (b) Bilyeli dövülmüş; (c) Suda sertleştirme ve 210 °C'de temperleme işlemi uygulanmış ve (d) Suda sertleştirme ve 500 °C'de temperleme işlemi uygulanmış)  zerine 100W—300mtorr-15dk plazma işlem parametreleri kullanılarak C₃F₆ kaplanmış numunelere ait SEM görüntüleri verilmektedir.



Şekil 4.64. Farklı sertlik değerlerindeki alt malzemeler ((a) Tam yumuşatılmış; (b) Bilyeli dövülmüş; (c) Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış ve (d) Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış) üzerine vakum şartlarında 100W-300mtorr-15dk plazma işlem parametreleri kullanılarak yapılan C_3F_6 kaplamalara ait SEM görüntüleri

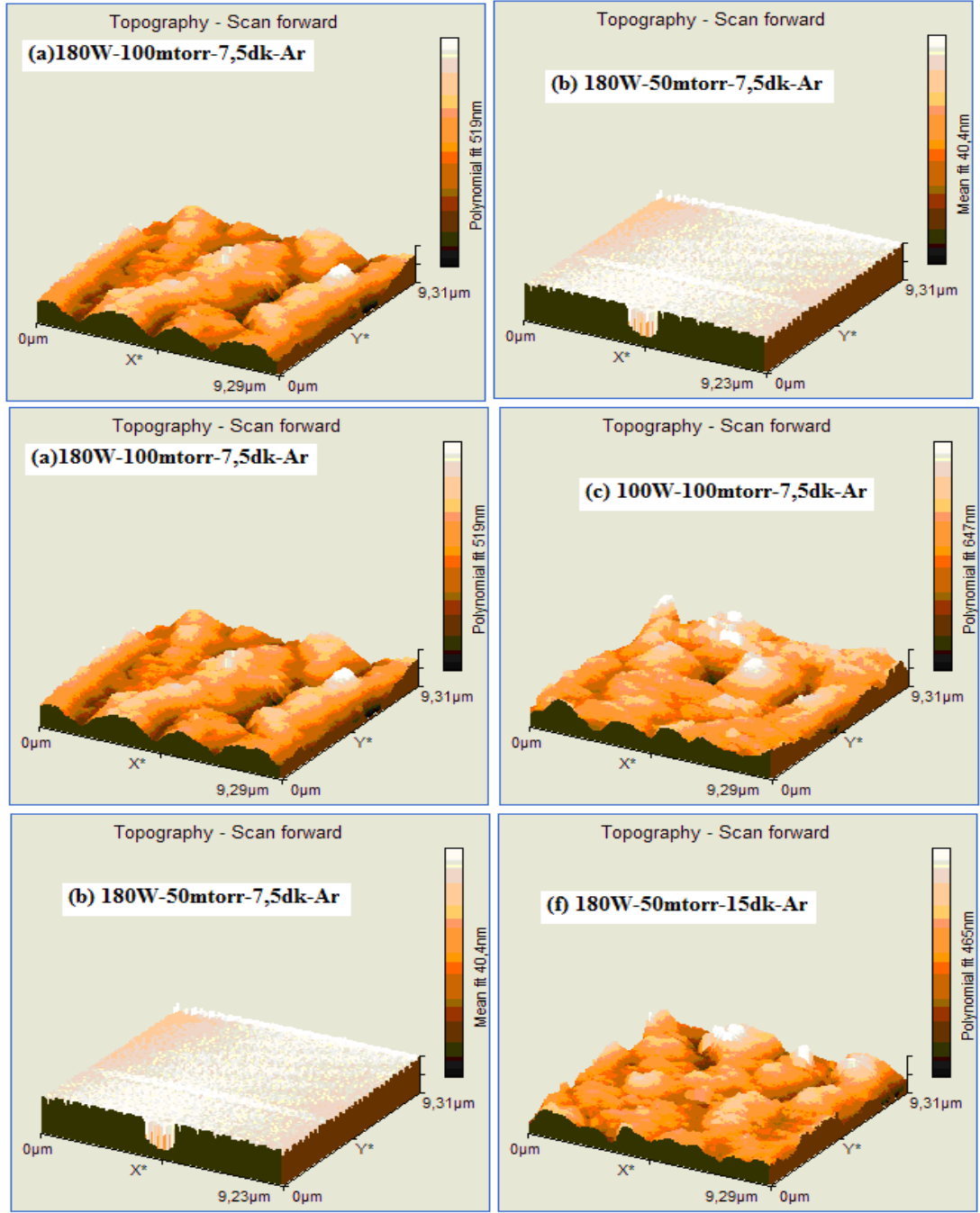
4.6. Aşınma Sonrası Yüzeylerin Atomik Kuvvet Mikroskobu İncelemeleri (AFM)

Çalışmada aşınma deneyi sonrası aşınma yüzey görüntüleri AFM kullanılarak alınmıştır. Böylelikle numunelerin aşınma karakteristikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

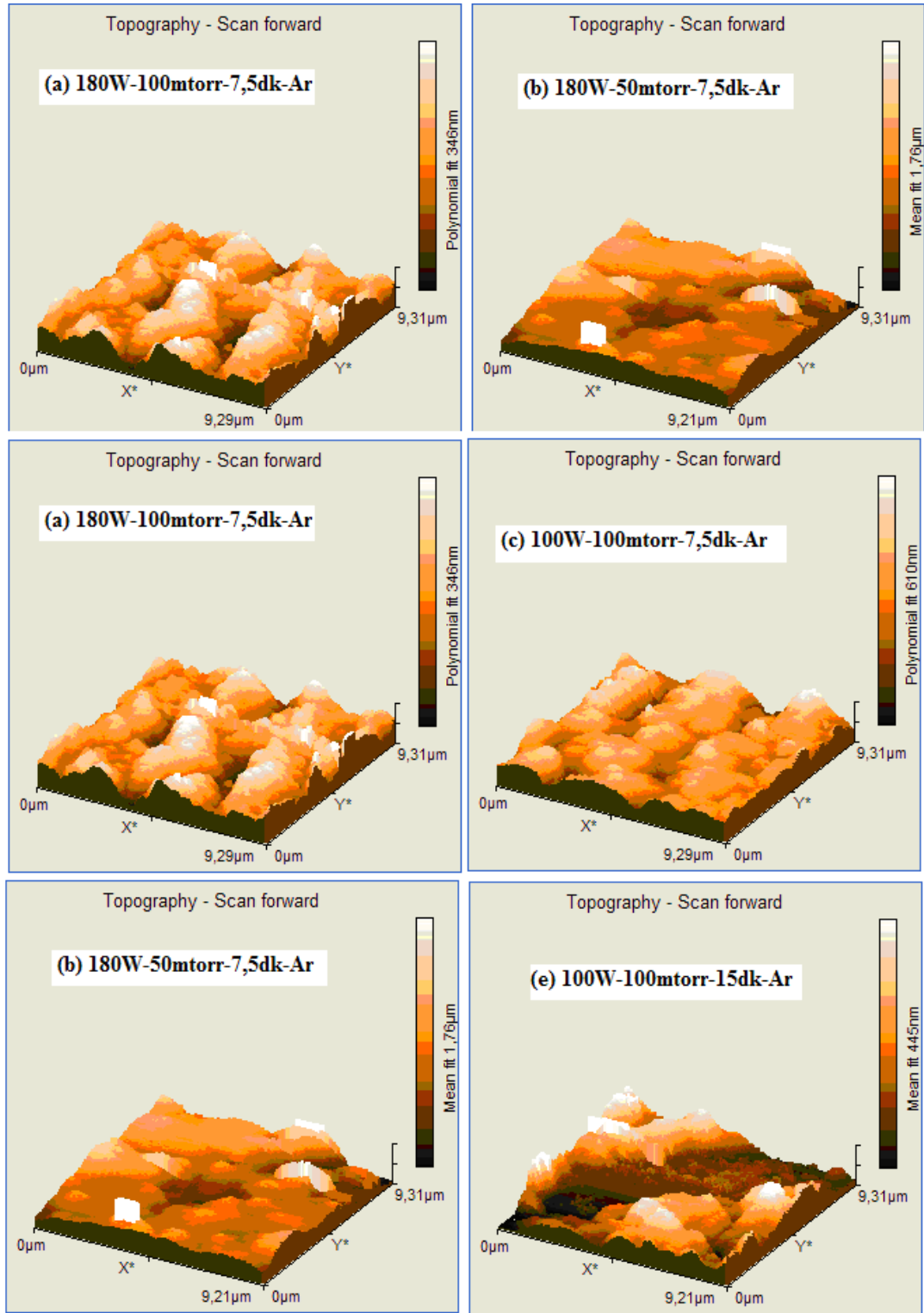
Şekil 4.65’de vakum şartlarında Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri verilmektedir. Şekil 4.66’da vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma

ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri verilmektedir. Vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri Şekil 4.67’de verildiği gibidir. Şekil 4.68’de vakum şartlarında Bilyeli Dövülmüş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri verilmektedir.

Farklı sertlik değerine ve yüzey kalitesine sahip alt malzemelere atmosfer basıncı şartlarında ve vakum altında plazma ile PTFE ve C_3F_6 malzeme kaplanmış numunelerin Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile yüzey yapıları incelenmiştir. C_3F_6 kaplamalar (Şekil 4.69) ile bilyeli dövülmüş alt malzemenin PTFE ve C_3F_6 kaplanmış haldeki görüntüleri (Şekil 4.69 ve Şekil 4.72) kaplama yüzeyinin düzgün homojen bir yapı göstermemesinden dolayı beklenen karakteristikleri göstermemiştir. Yumuşak bir alt malzeme ve pürüzlü bir yüzey uygun AFM görüntüsü alınmasına engel olmaktadır. Genel olarak vakum şartlarında PTFE kaplanmış yüzeylerin AFM görüntüleri daha homojen ve tabakalı bir yapıyı gösterirken (Şekil 4.67), C_3F_6 kaplanmış yüzeylerin AFM görüntüleri tanecikli bir yapıyı göstermektedir (Şekil 4.71). Bu durum Şekil 4.55 - Şekil 4.58 ve Şekil 4.59- Şekil 4.64 arasında verilen SEM görüntülerini desteklemektedir. Küresel tanecikli yüzey yapısı, yüzey pürüzlülüğünün artmasını ve bu tür yüzey ise yüksek sürtünme katsayısının oluşumuna neden olmaktadır. Bu durum Çizelge 4.19’da verilen sürtünme katsayısı değerleri ile uyum içindedir. Buradan hareketle sürtünme katsayısı ve yüzey topografyası arasında sıkı bir ilişki olduğu sonucuna varılmaktadır.



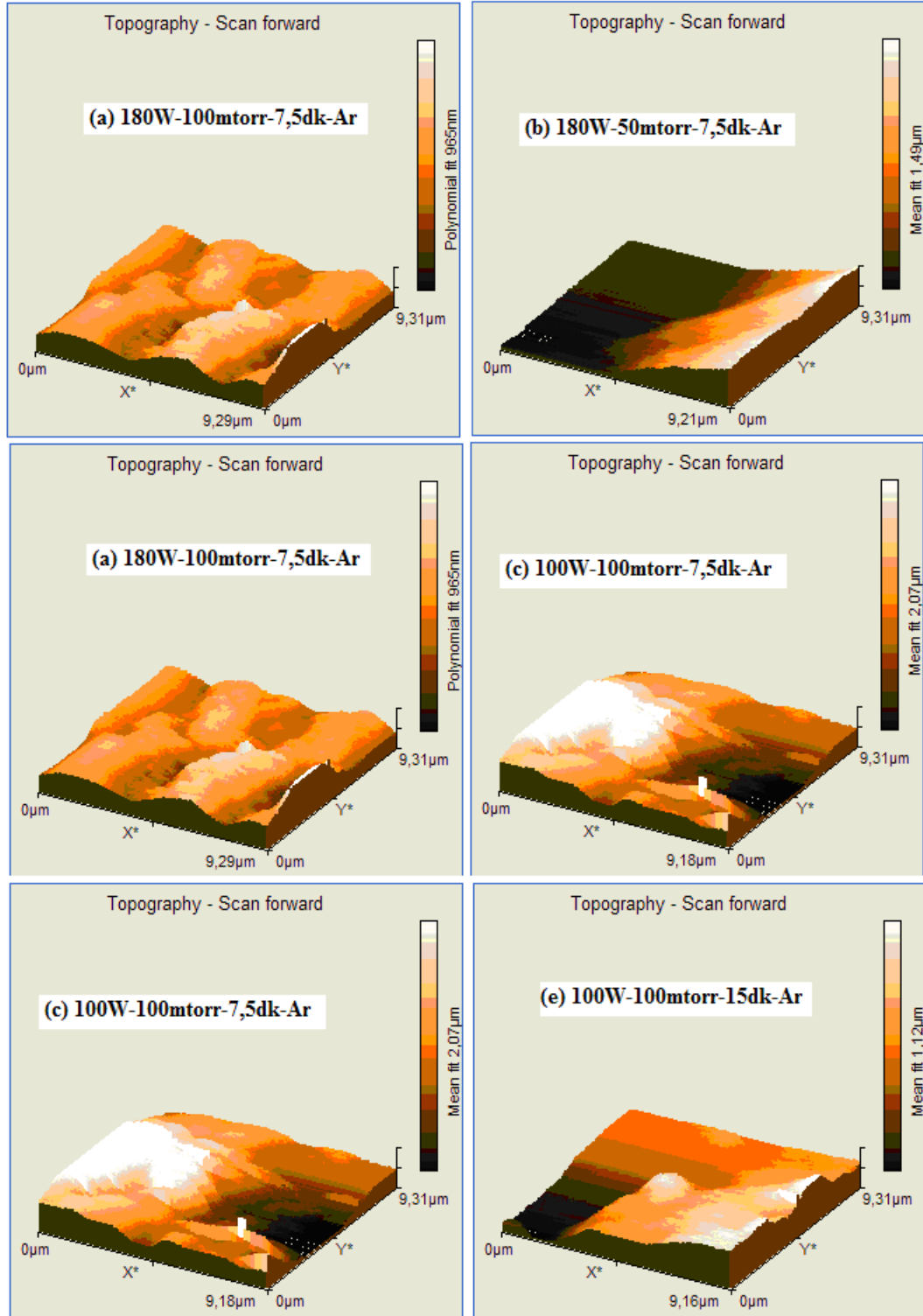
Şekil 4.65. Vakum şartlarında Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



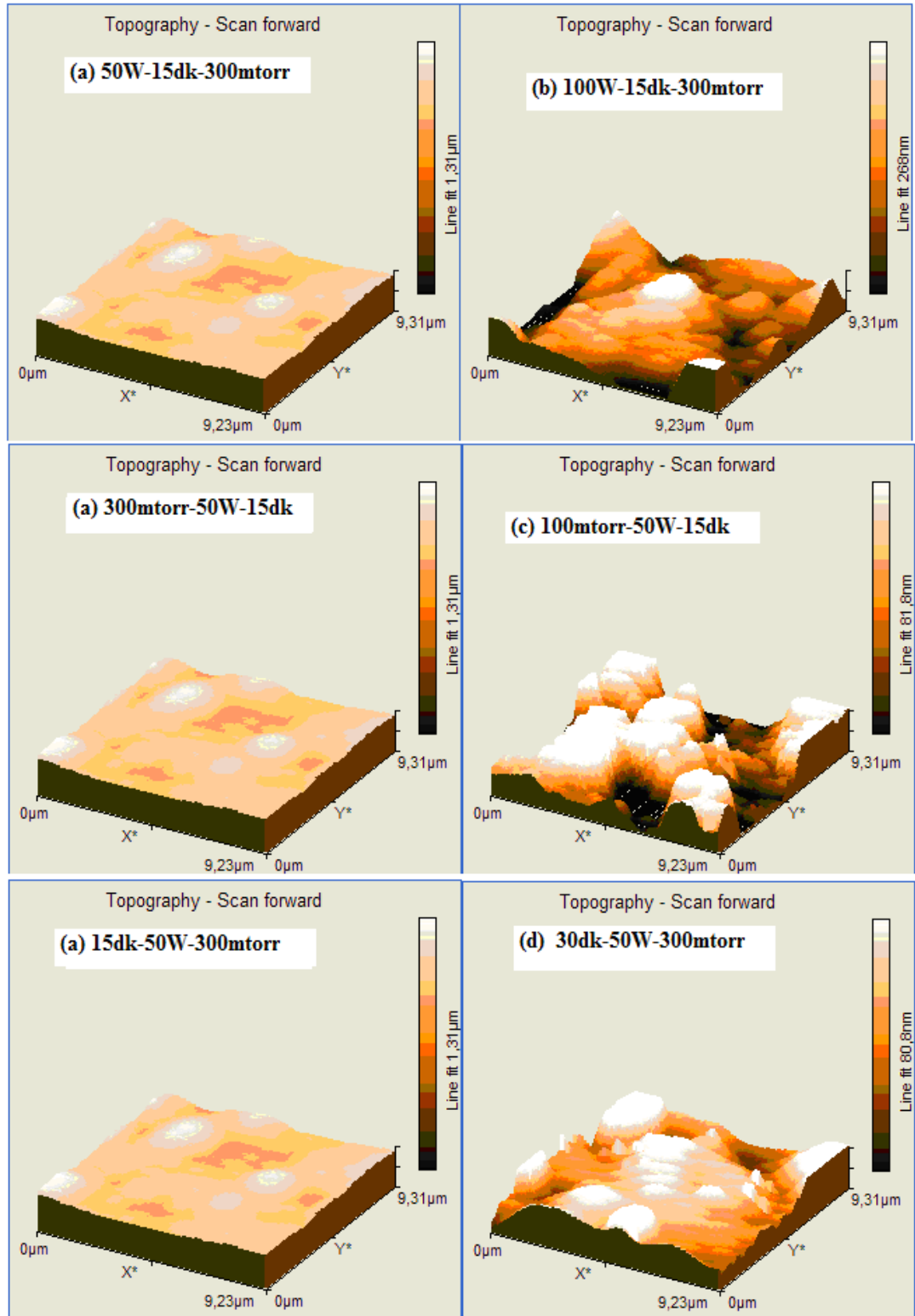
Şekil 4.66. Vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



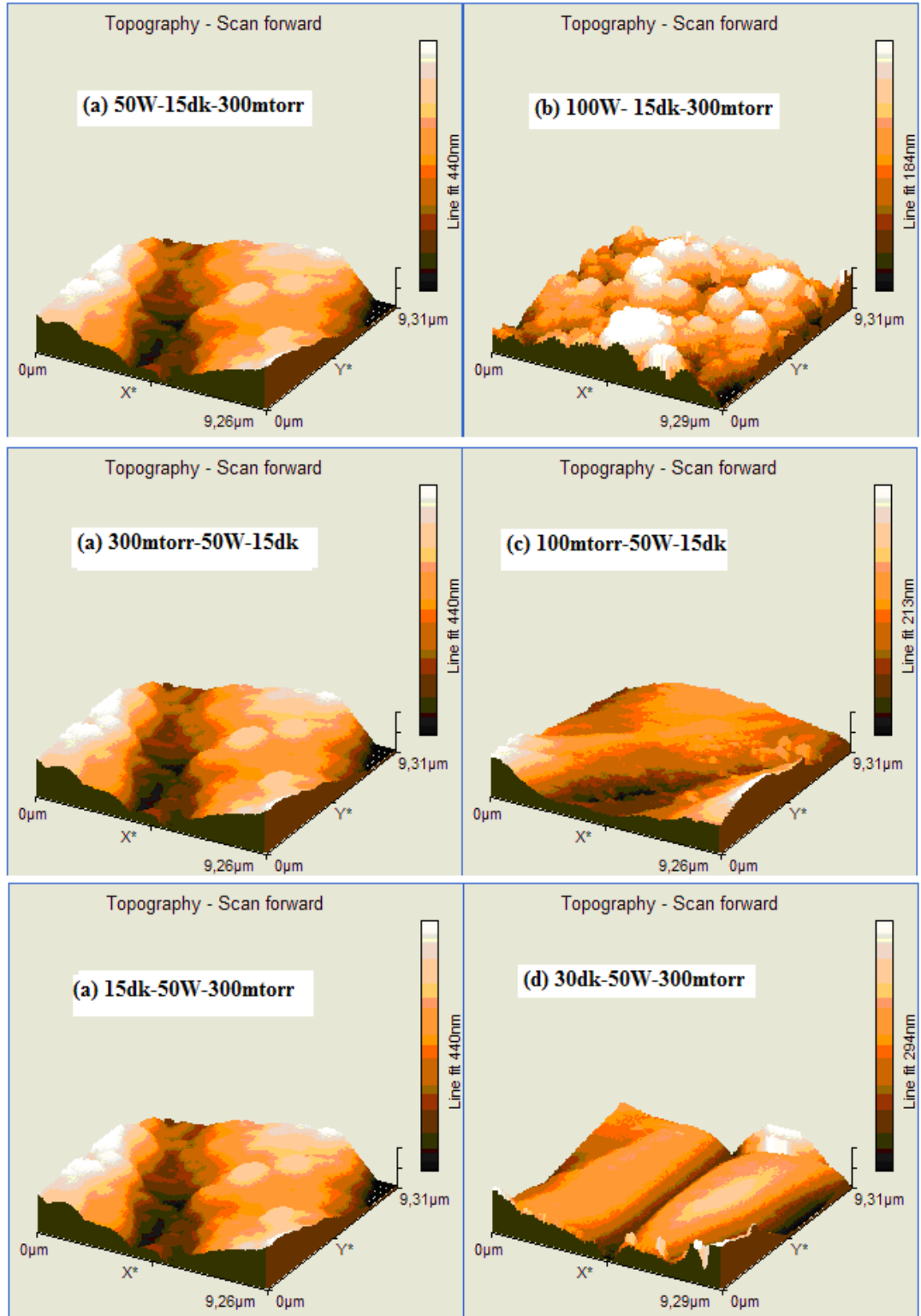
Şekil 4.67. Vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



Şekil 4.68. Vakum şartlarında Bilyeli Dövmüş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



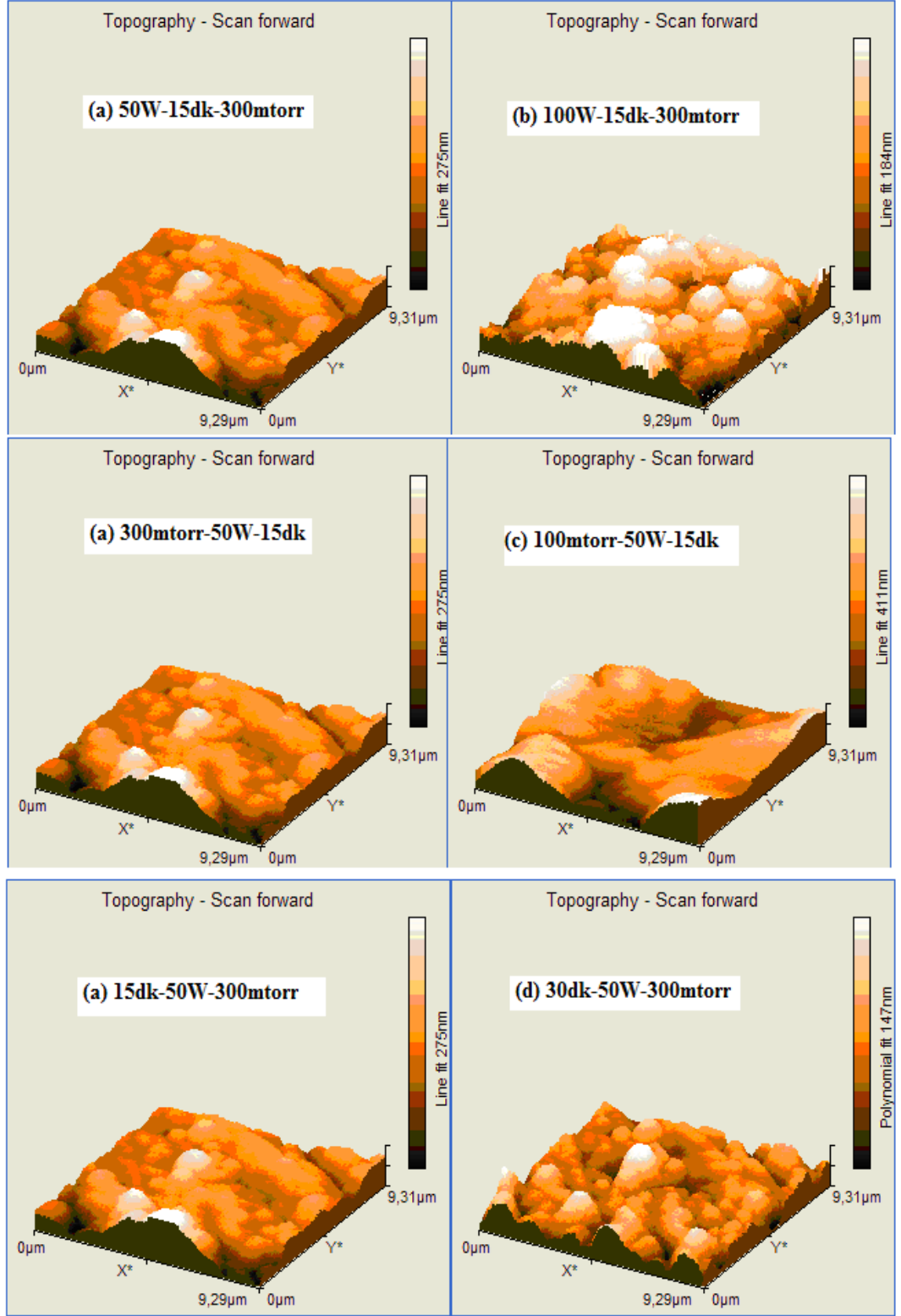
Şekil 4.69. Vakum şartlarında Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine plazma ile C_3F_6 kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



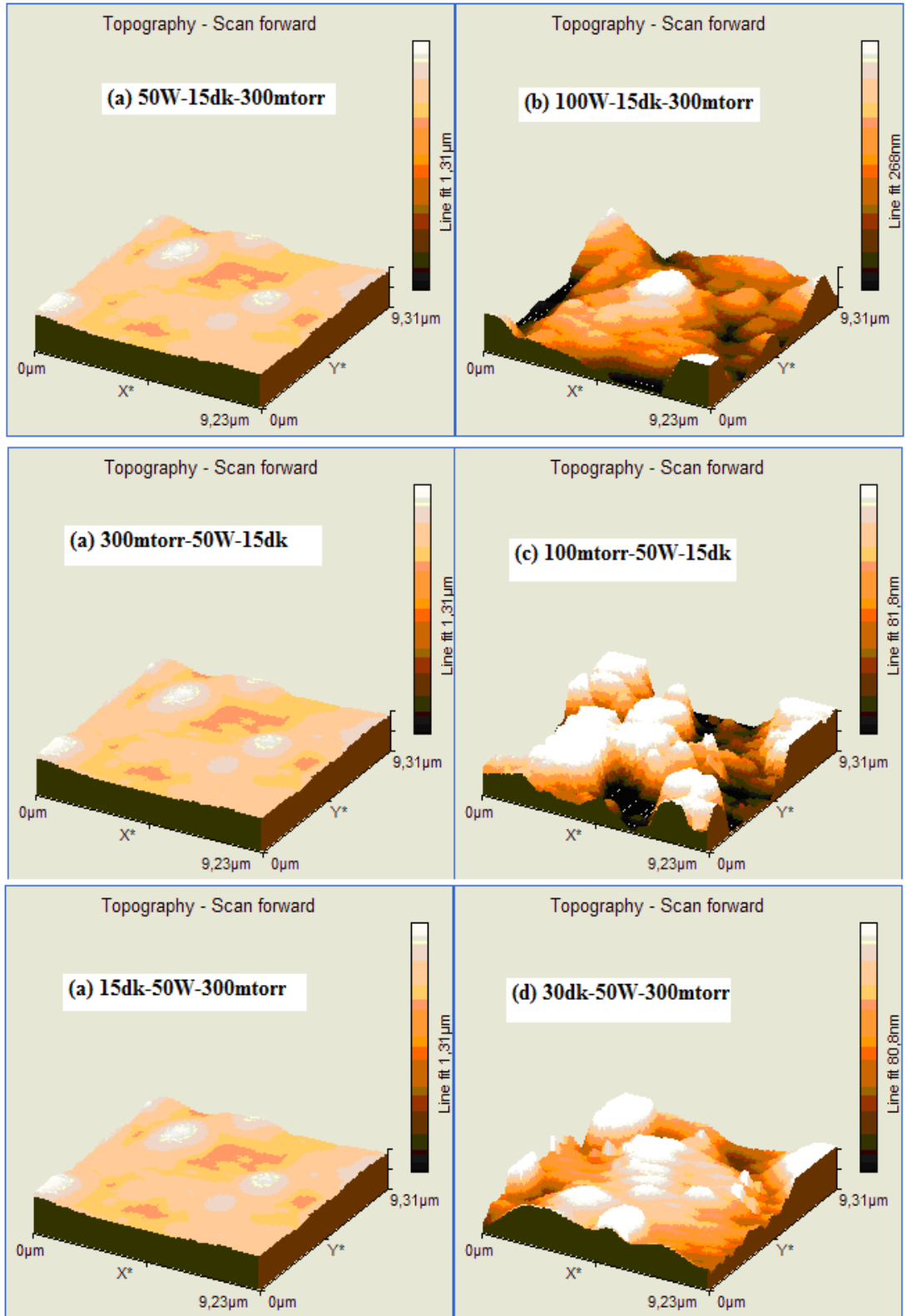
Şekil 4.70. Vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile C_3F_6 kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri

Atmosferik şartlarda plazma ile farklı ısıtım işlem uygulanmış alt malzemeden numunelere PTFE kaplanmış haldeki AFM görüntüleri kaplamanın homojen olmadığını, yer yer çok ince- vadi şekilli kaplamalar oluşturmuştur. Bazı numunelerde (Şekil 4.74) silindirik ve sivri şekilli yükseltiler oluşmuştur. Buna benzer heterojen kaplamaların tüm numunelerde olduğu gözlemlenmiştir. Alt malzemeye uygulanan ısıtım işlemin cinsinin kaplamanın kalitesine, homojenliğine ve yüzey topografyasına etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır.

Vakum şartlarda ve atmosfer basıncı şartlarında yapılan yüzey kaplamaları karşılaştırıldığında genel anlamda önemli farklar ortaya çıkmaktadır (Şekil 4.65- 4.68 ve Şekil 4.73- 4.76). Kaplama malzemesi PTFE olarak sabit tutulduğunda vakum şartlarında kaplanmış numunelerin yüzey kaplama kalitesinin atmosfer basıncı şartlarında yapılan kaplamaya göre daha iyi ve buna paralel olarak kaplama kalınlığı ve şeklinin daha homojen olduğu belirlenmiştir.



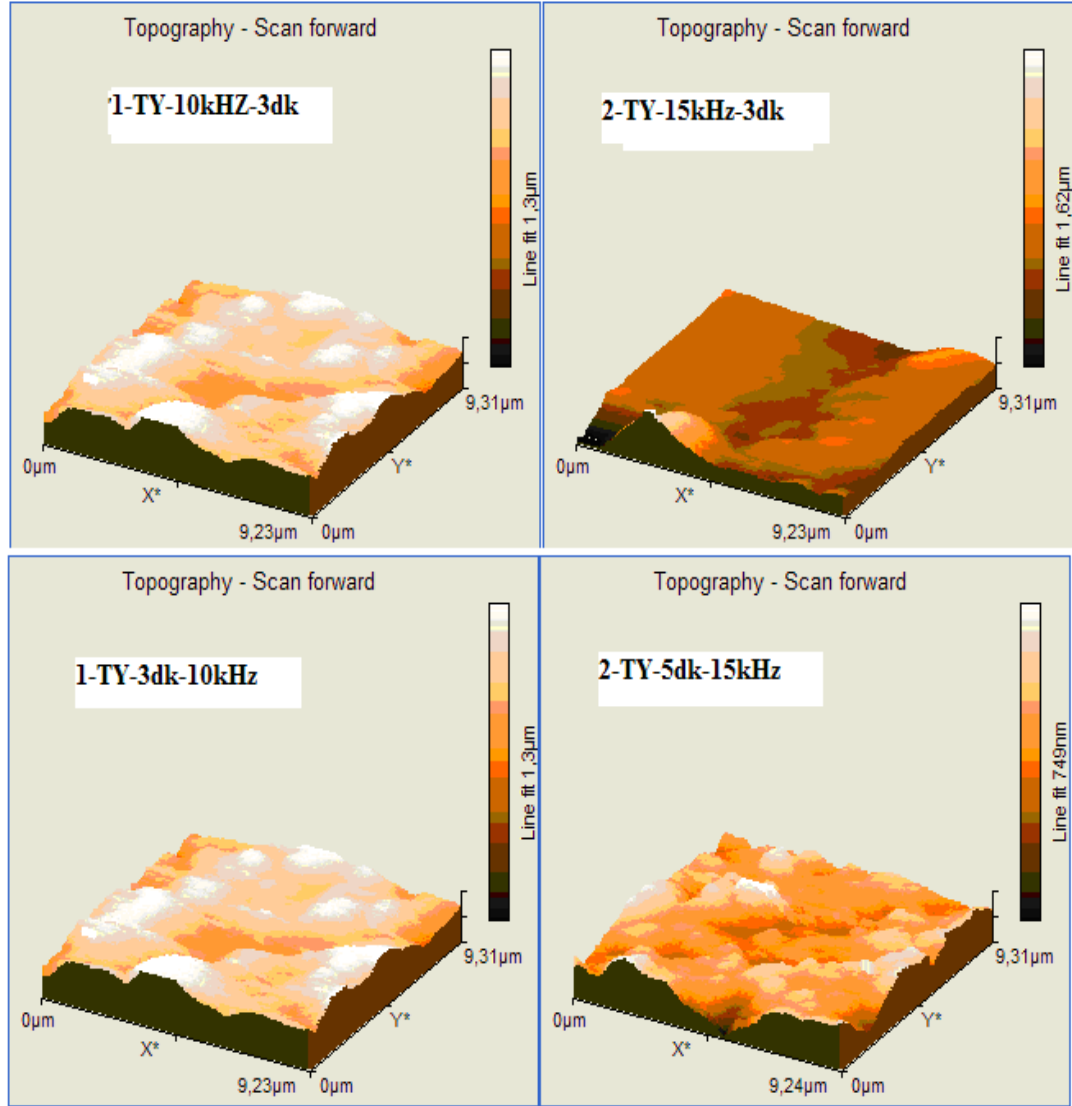
Şekil 4.71. Vakum şartlarında Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile C_3F_6 kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



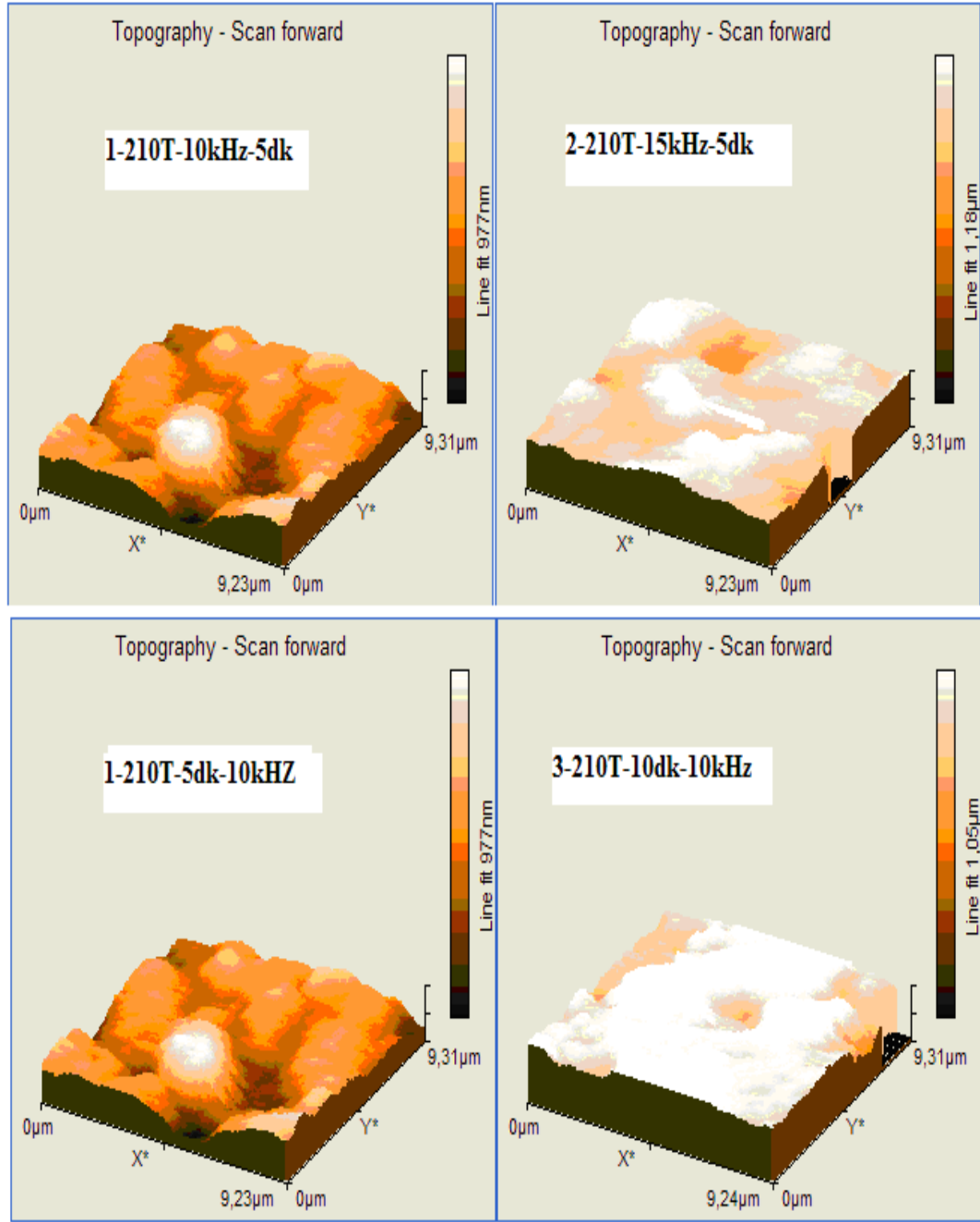
Şekil 4.72. Vakum şartlarında Bilyeli Dövülmüş alt malzeme üzerine plazma ile C_3F_6 kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri

Şekil 4.73’de atmosferik şartlarda Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri; 4.74’te atmosferik şartlarda Suda

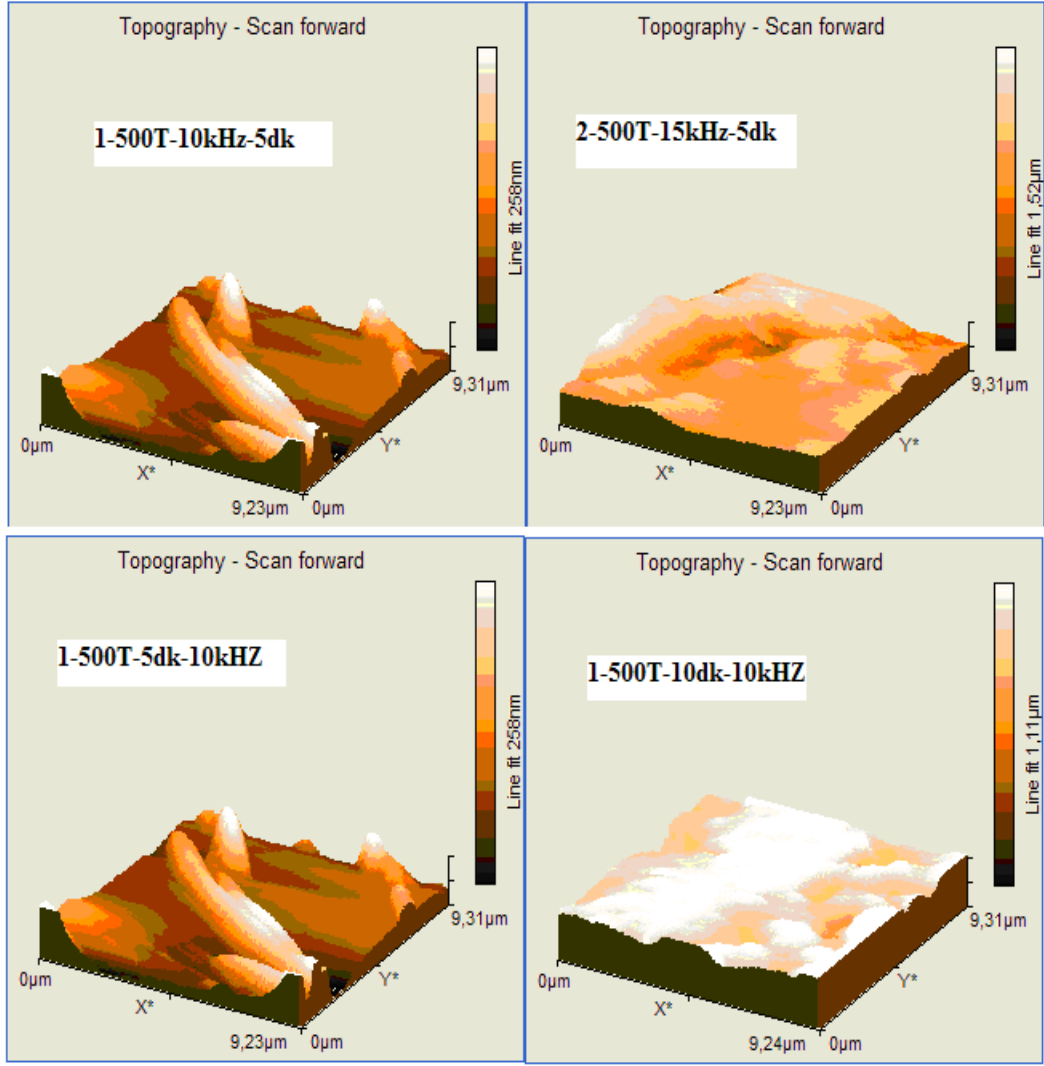
sertleştirme ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri; Şekil 4.75’te atmosferik şartlarda Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri ve Şekil 4.76’da atmosferik şartlarda Bilyeli Dövülmüş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri verilmektedir.



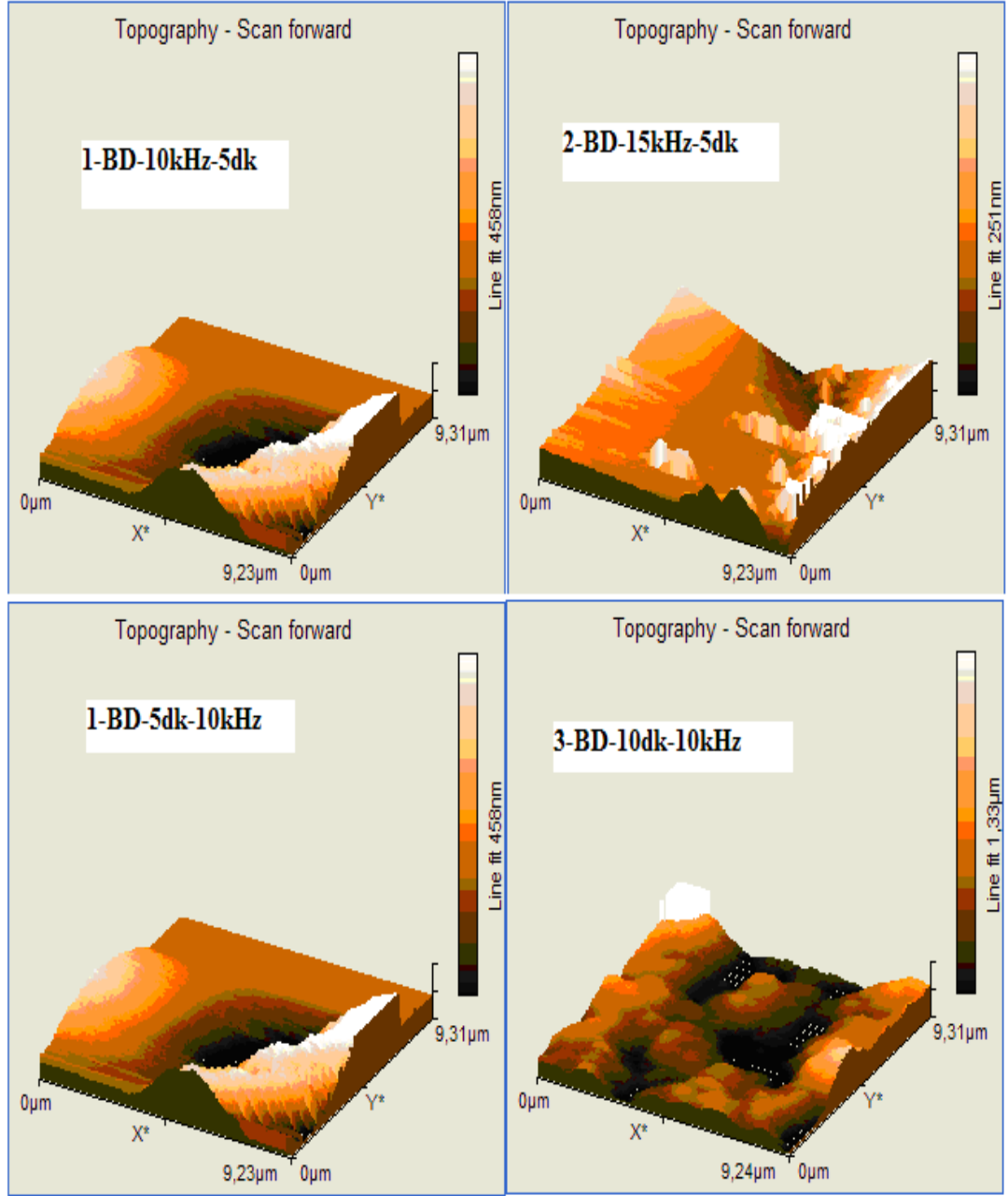
Şekil 4.73. Atmosferik şartlarda Tam Yumuşatılmış alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



Şekil 4.74. Atmosferik şartlarda Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



Şekil 4.75. Atmosferik şartlarda Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperlenmiş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



Şekil 4.76. Atmosferik şartlarda Bilyeli Dövülmüş alt malzeme üzerine plazma ile PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AISI 1050 sade karbonlu çelik malzemeden numunelerin yüzeyine atmosferik ve vakum şartlarında iki farklı polimer malzeme, PTFE ve C_3F_6 , plazma kaplanarak aşınma şartları ve yüzey özellikleri incelenmiştir. Plazma yardımıyla atmosferik şartlarda yüzeye sadece PTFE malzeme kaplanırken, vakum şartlarda yüzeye PTFE ve C_3F_6 malzemeler kaplanmıştır.

Atmosferik basınç şartlarında alt malzeme (AISI 1050 çelik) yüzeyine PTFE kaplanmış numunelerin incelenmesi sonucunda plazma kaplama işlemi süresinin kaplama kalınlığına önemli derecede etki etmediği ancak frekans değeri arttıkça kaplama kalınlığının azaldığı belirlenmiştir (Çizelge 4.1).

Alt malzemeden (AISI 1050 çelik) numunelerin yüzeyine vakum şartlarında plazma ile PTFE ve C_3F_6 polimer malzemelerin kaplanması esnasında uygulanan plazma güç değeri azaldıkça kaplama kalınlığının düştüğü belirlenmiştir. Bunun yanı sıra; bu şartlarda PTFE kaplanması durumunda basınç değeri düştükçe kaplama kalınlığı azalırken, C_3F_6 polimer kaplanması durumunda basınç değeri düştükçe kaplama kalınlığının arttığı belirlenmiştir. Vakum şartlarında, her iki polimer malzemenin kaplanması esnasında uygulanan işlem süresi uzadıkça kaplama kalınlığı artmaktadır. Genel anlamda PTFE ve C_3F_6 kaplama malzemelerinin yüzeyde oluşturulan kaplama kalınlıkları karşılaştırıldığında PTFE malzemenin daha büyük kaplama kalınlığı elde edilmiştir.

Metalik alt malzeme yüzeyine (AISI 1050 çelik) plazma ile PTFE ve C_3F_6 kaplanmış numunelere tribotester cihazı ile yapılan aşınma deneyleri sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir. Kaplanmış numunelerin aşınma deneyleri sonunda ölçülen sürtünme katsayıları kaplanmış numunelerin yüzey kalitesini göstermektedir. Atmosferik şartlarda PTFE kaplama işlemi uygulanmış numunelerin sürtünme katsayılarının kaplama işlem süresinin ve frekansın artmasıyla önemli ölçüde değişmediği belirlenmiştir. Ancak kaplama işleminde plazma gazı olarak Helyum gazının kullanılması durumunda, Argon gazı kullanımına göre daha küçük sürtünme katsayıları verdiği belirlenmiştir (Ageorges ve Ctibor, 2008). Alt malzemeye uygulanan ısıl işlemler, diğer bir ifade ile kaplanan malzemenin yüzey sertlik

değerinin etkisi incelendiğinde; atmosferik şartlarda plazma kaplama sonrası farklı sertlik değerlerine sahip alt malzemelerinin yüzey pürüzlülük değerleri aynı olmasına rağmen en düşük sürtünme katsayısı değeri suda sertleştirme ve 210 °C sıcaklıkta temperlenmiş numunelerde elde edilmiştir. Bu işlem uygulanmış alt malzemenin sertlik değeri (HRC 37)'dir. Bu sertlik değeri AISI 1050 çelik numunelerde farklı ısı işlemler ve mekanik yüzey işlemlerin sonucunda elde edilen yüzey sertlik değerlerinin orta seviyedeki sertlik değeridir. Bundan daha sert alt malzeme daha rijit bir davranış gösterdiğinden aşınma deneyinde daha yüksek sürtünme katsayısı vermiştir. Daha yumuşak alt malzemede ise daha fazla elastik şekil değiştirme, yığılma oluşturduğundan, sert alt malzemeye benzer şekilde daha büyük sürtünme katsayısı vermiştir. Kaplama malzemesi ile alt malzemenin farklı sertlik ve rijitlik özelliğine sahip olması aşınma deneyleri esnasında farklı davranış gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Yüzey sertlik değerleri aynı ancak kaplama öncesi yüzey pürüzlülük değerleri farklı numunelerin sürtünme katsayılarını karşılaştırmak daha karmaşık sonuç vermektedir. Aşınma deneylerinde bilyeli dövülmüş alt malzeme yüzey kalitesi düşük olmasına karşın daha küçük sürtünme katsayısı vermiştir. Bilyeli dövülmüş numunelerde yüzeyde oluşan metalik piklerin üzerindeki polimer kaplama kalınlığı daha ince olduğundan daha erken aşınarak metal-aşındırıcı seramik teması ortaya çıkmaktadır. Polimer aşınma artıkları katı yağlayıcı gibi davranarak sürtünme katsayısının düşmesine neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Vakum şartlarında tüm alt malzemeler üzerine PTFE kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları, güç, işlem süresi ve basınç kaplama işlemi parametrelerinin değişiminden önemli ölçüde etkilenmemiştir. Vakum şartlarında farklı alt malzemeler üzerine PTFE kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları incelendiğinde en yüksek sürtünme katsayısı değeri yüzeyi bilyeli dövülmüş numunede belirlenmiştir. Diğer numunelerin sürtünme katsayıları birbirine yakın elde edilmiştir.

Vakum şartlarında tüm alt malzemeler üzerine C_3F_6 kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları gücün artırılmasıyla büyük değerlere yükselmektedir. Basıncın artırılmasıyla tam yumuşatılmış, suda sertleştirme ve 500 °C'de temperleme işlemi

uygulanmış alt malzemeden numunelerin sürtünme katsayıları artarken Suda sertleştirme ve 210°C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemenin sürtünme katsayısı düşmektedir. Ancak en düşük sürtünme katsayısı Bilyeli dövülmüş numunede elde edilmiştir. Vakum şartlarında tüm alt malzemeler üzerine C₃F₆ kaplanmış numunelerin sürtünme katsayıları işlem süresinin değiştirilmesinden etkilenmemiştir.

Vakum şartlarında aynı alt malzemeden numunelere PTFE ve C₃F₆ polimer kaplanmış halde deneylerden elde edilen sürtünme katsayıları genel olarak kaplama malzemesi açısından karşılaştırıldığında; PTFE kaplanan numuneler C₃F₆ kaplanan numunelere göre daha küçük sürtünme katsayısı vermiştir. C₃F₆polimer malzeme yapısı incelendiğinde küçük küresel formda taneciklerin varlığı gözlemlenmiştir. Küçük küresel formdaki tanecik yapısı C₃F₆malzemenin kendi karakteristiğidir. C₃F₆kaplanmış numuneye ait SEM görüntülerinde yer yer tam yapışmamış tanecikler gözlemlenmiştir (Şekil 4.60). Bu durum C₃F₆ kaplama malzemesinin daha yüksek sürtünme katsayısı vermesine neden olmuştur. Sürtünme katsayısı açısından PTFE kaplama malzemesinin daha uygun olduğu belirlenmiştir.

Atmosferik şartlarda tam yumuşatılmış alt malzeme üzerine PTFE kaplanmış numunelerin aşınma iz görüntüleri incelendiğinde kaplama malzemesinin yanı sıra alt malzemenin aşındığı gözlemlenmiştir. Bu durum kaplamanın istenilen kalınlık ve homojenlikte olmadığı sonucuna varılmıştır. Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemelerin aşınma izi incelendiğinde tam yumuşatılmış alt malzemede olduğu gibi seramik bilye-metal teması meydana gelmemiş ve dar aşınma izleri oluşmuştur. Suda sertleştirme ve 500 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemelerin aşınma izleri Suda sertleştirme ve 210 °C’de temperleme işlemi uygulanmış alt malzemede ortaya çıkan aşınma izlerine benzemektedir. Bilyeli dövülmüş numunelerin belli bölgelerinde aşındırıcı seramik bilye-alt malzeme teması meydana gelmektedir. Bunun nedeni bilyalı dövülmüş alt malzemenin yüzey morfolojisindeki farklılıktır. Bu morfoloji yüzeye homojen kaplama yapılmasını engellemiştir. Aynı parametre farklı alt malzemenin aşınma iz görüntüleri incelendiğinde en küçük aşınma izinin en büyük sertlik değerine sahip alt malzemede olduğu belirlenmiştir.

Atmosferik ve vakum şartlarında aynı işlem parametreleri uygulanarak plazma ile PTFE kaplanmış aynı alt malzemeden numuneler kendi aralarında karşılaştırıldığında atmosfer şartlarında kaplanmış numunelerde, aynı aşınma deneyi parametreleri uygulanmış halde, ölçülen iz genişlikleri belirgin bir şekilde daha büyüktür. Aşınma hızının ve değerinin büyüklüğü atmosfer şartlarında PTFE kaplanmanın yetersizliğini göstermektedir. Atmosferik şartlarda kaplama malzemesi yüzeye homojen bir şekilde yayılmamakta ve kalınlık yer yer çok farklı değerlerde ortaya çıkmaktadır. Tutunma yetersiz ve yüzey düzgünlüğü vakum şartlarına göre daha düşüktür. Ayrıca atmosfer şartlarında yapılan kaplamada daha kaba bir görüntü meydana gelmiştir. Bu nedenle bu tür kaplamaların tercih edilmemesine neden olmaktadır.

Aynı alt malzemeler üzerine vakum şartlarda PTFE ve C_3F_6 polimerler kaplanmış haldeki numunelerin aynı aşınma deneyi parametreleri uygulanması sonrası elde edilen aşınma izi genişlikleri, kaplanan alt malzemenin yüzey kalitesi ve sertlik değerinden bağımsız olarak, kendi aralarında karşılaştırıldığında PTFE malzeme kaplanması durumunda daha küçük aşınma izi genişliği vermektedir. Kaplanmış numunelerin yüzeylerinden alınan SEM ve AFM görüntüleri; atmosfer şartlarında yapılan kaplamaların kalitesinin daha kötü olduğunu, homojen kalınlık elde edilemediğini ve vakum şartlarında PTFE ve C_3F_6 kaplanmış numunelerde ise PTFE kaplamaların daha homojen kalınlık ve yüzey kalitesi verdiğini göstermektedir. Bu görüntüler aşınma deneylerinde bulunan sonuçları destekler niteliktedir (Şekil 4.32-4.42). Atmosfer basıncı şartlarında daha kaba bir yapı elde edilmiştir. Bunun yanında Şekil 4.53'te verilen SEM görüntülerinde iri baloncuklu yüzey yapısı gözlemlenmektedir. Bu yapı homojen olmayan kaplamaya neden olmuştur. Vakum şartlarında yapılan kaplamaların Şekil 4.55-4.58'teki SEM görüntüleri incelendiğinde ince taneli yapı ve iri taneli aşınma artıkları gözlemlenmiştir. Bu yapı homojen kaplamanın kanıtıdır. Ayrıca vakum şartlarında C_3F_6 ve PTFE kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri incelendiğinde C_3F_6 kaplanmış yüzeylerde tanecikli yapı gözlemlenmiştir (Şekil 4.71). Küresel tanecikli yapı yüzey pürüzlülüğünün artmasına ve yüksek sürtünme katsayısının oluşmasına neden olur. PTFE kaplanmış yüzeylerde daha homojen ve tabakalı bir yapı elde edildiği Şekil 4.67'de verilen AFM görüntülerinde rahatlıkla görülmektedir. Bu durum genel anlamda PTFE malzemenin daha uygun kaplama malzemesi olabileceği sonucunu vermiştir.

Çalışmada yapılan kaplama işleminin en önemli katkısı ve yaygın etkisi alt malzemenin kalınlığının kaplama işlemi üzerine etkisinin olmamasıdır. Buradan hareketle tasarlanmış makine parçalarının şekli ve boyutlarından bağımsız olarak polimer malzeme kaplaması mümkün olacaktır. Buna ilave olarak makine elemanının boyut değişimi ile daha az maliyetli alt malzemenin kullanılması durumunda bu yöntemin kullanılması büyük avantaj sağlayacaktır. Özellikle ofis makineleri, küçük ev aletleri gibi uygulama alanlarında ortaya çıkan yağlama ve buna bağlı olarak görülen aşınma şartlarında uygulanması büyük kolaylık ve yüksek kullanım özelliği sağlayacaktır. Bu tür düşük hız ve yatak yüklerinde, bir başka deyişle düşük (p.v- yatak basıncı ve hızı) değerlerinde çalışan makine elemanlarında yağlama yapılmaksızın çalışması sağlanabilecektir. Ucuz malzeme üzerine polimer kaplanarak yağlama kısmen de olsa kaldırılabilir potansiyele sahip olabilecektir.

Yapılan bu çalışmada aynı parametreler kullanılarak birden fazla malzeme gurubu üzerine kaplama yapılmamıştır. Aynı kaplama şartlarında farklı ucuz alt malzemeler kaplanabilir.

Aynı parametreler kullanılarak daha fazla sayıda numuneye kaplama yapılarak istatistikî çalışmalarla sonuçlar değerlendirilebilir. Böylece çalışmanın sonuçlarının güvenilirliği artırılmış olabilir. Çalışmada kaplama malzemesi olarak kullanılan polimer malzemelerin kimyasal bağ yapıları değiştirildikten sonra kaplama yapılarak iki farklı kaplama kalitesi karşılaştırılabilir.

Kaplanmış alt malzeme belli işletme sıcaklıklarına ısıtılarak kaplanmış malzemenin davranışları incelenebilir. Aşınma deneyleri sırasında aşındırıcı değiştirilerek aşındırıcının etkisi incelenebilir. Ayrıca bu çalışmada aşındırıcı malzeme yüzeyi incelenmemiştir. Yapılacak çalışmalarda aşındırıcı malzeme yüzeyi de incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abdul Samad, M., Satyanarayana, N., Sinha, S.K.,2010. Tribology of UHMWPE film on air-plasma treated tool steel and the effect of PFPE overcoat. Surface & Coatings Technology, 204,1330–1338.
- Ageorges, H., Ctibor, P.,2008.Comprasion of the structure and wear resistance of Al₂O₃-13%TiO₂ coatings made by GSP and WSP plasma process with two different powders.Surface and Coating Techonology, 202,4362-4368.
- Ageorges, H., Ctibor, P., Medarhr, Z., Youimi, S., Fauchais, P.,2006. Influence of the metallic matrix ratio on wear resistance (dry and slury abrasyon) of plasma sprayed cermet(chromia/stainless steel) coatings. Surface and coating techonology, 201,2006-2011.
- Barletta, M., Rubino, G., Guarino, S., Bolelli, G., Lusuarghi, L., Gisanio, A.,2009. Fast regime –fluidized bed machining (FR-FBM) of atmospheric plasma spraying (APS) TiO₂ coatings. Surface and Coating Techonology, 203,855-868.
- Bellgeler.com, 2012. Erişim tarihi 01.03.2012.<http://www.belgeler.com/blg/2vv0/coating-7>).
- Bertaux, E., Marec,E.L., Rossi, R., Hegemann, D.,2009. Effects of siloxane plasma coating on the frictional properties of polyester and polyamide fabrics. Surface and Coatings Techonology,204, 165-171.
- Becker, W. T. , Shipley, R. J. , 2002. FailureAnalysisandPrevention.ASM Handbook Volume 11, ASM International, 1200. USA.
- Blau, P. J., 1992. Friction, Lubrication and Wear Technology. ASM Handbook Volume 18, 3000s. USA.
- Castil, S., Mateus, C., Coddet, C.,2007.Ceramic/fluoropolymer composite coatings by plasma spraying. Surface and coating techonology, 201,2020-2027.
- Chen, H., Lee, S., Zheng, X., Ding, C.,2007.Evaluation of unlubricated wear nanostructured and conventional zirconia coatings by SRV tester. Wear, 260, 1053-1060.
- Chattopadhyay, R., 2000. Advanced Thermally Assisted Surface Engineering Process. Mumbai, Kluwer Academic Publishers, 500.London.
- Corbella, C., Bialuch, I., Kleinschmidt, M., Bewilogua, K.,2009.Up scaling the production of modified a-C:H coatings in the framework of plasma polymerisation processes. Solid state science,11,1768-1772.

- Dascalascu, D., Polychronopoulou, K., Polycarpou, A.,2009. The significance of tribochemistry on the performance of PTFE-based coatings in CO₂ refrigerant enviroment. Surface and Coatings Techonology, 204,319-329.
- Demas, N.G., Polycapou, A.A.,2008. Tribological Performance of PTFE-based coatings for air conditioning compressors.Surface and Coatings Techonology, 203,307-316.
- Dowling, D.P., Nwankire , C.E., Riihimäki, M., Keiski, R., Nylén, U.,2010. Evaluation of the anti-fouling properties of nm thick atmospheric plasma deposited coatings. Thin Solid Films,205 (5),1544-1551.
- Dowson,D.,1998. Coatings Tribology.Amsterdam,Elsevier Science B.V, 457s,Nerherland.
- E-funda,2012. Efunda: The Ultimate Online Reference for Engineers. Erişim Tarihi: 12.12.2011.
http://www.efunda.com/materials/alloys/carbon_steels/carbon.cfm.
- Eroğlu, A., 2008. Alüminyum Matrisli Seramik Partikül Takviyeli Kompozit Kaplamaların Plazma Püskürtme Tekniği ile Üretilmesi ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 93, İstanbul.
- Erickson, L.C., Hawthorne, H.M., Troczynski,T.,2001. Correlations between microstructural parameters micromechanical properties and wear resistance of plasma sprayed ceramic coatings.Wear, 250,569-575.
- Evcin, A., Kepekçi, D. B.,Barut, İ.,2009. Hidroksiapatit Tozlarının Plazma Sprey Yöntemiyle Paslanmaz Çelik Üzerine Kaplanması.5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs, Karabük, Türkiye.
- Fei, X., Niu , Y., Ji,H., Huang,L., Zheng, X.,2010. A comparative study of MoSi₂ coatings manufactured by atmospheric and vacuum plasma spray processes.Ceramics International, 37 (3),813-817.
- Gerçekcioğlu, E., Kurban, A. O., Nair, F.,1999.Vakum Altında Plazma Sprey Yöntemi İle İmalat Çelikleri Üzerine Kaplama İşlemi Ve Buna Etki Eden Faktörler. Makina-İmalat Teknolojileri Sempozyumu, 14-15 Ekim, Konya, 167-174.
- Guruvenket,S., Li, D., Eklembergsapieho, J., Martiu, L., Szpuner, J.,2009. Mechanical and tribological properties of duplex treated TiN,nc-TiN/a-SiNx ve nc TiCN/a-SiCN coatings deposited on 410 low alloy stainless steel. Surface and Coatings Techonology, 203, 2905-2911.
- Gür, A. K., Orhan, A.,2008.PTA Yöntemiyle FeCrC Kaplanmış ST-37 Çeliğinin Aşınma Özellikleri.Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi, 7(11), 39-43.

- Gür, A. K., Orhan, A., Çaligülü, U., 2008. Ni/Ti Tozlarının Pta Yöntemiyle Aısı 1020 Yüzeyindeki Kaplamalarının Mikroyapı Özellikleri. Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları Dergisi, 6(2), 125-131.
- Heimann, R.B., 2006. Plasma Spray Coating. Münden, Wiley-VCH, 427s. Germany.
- HM Wire International, Inc., 2012. Erişim tarihi: 01.04.2012. http://www.hmwire.com/New%20PDFs/AISI_1050_Carbon_Steel_Wire_All_oy.pdf.
- Ibrahim, A., Abdel Hamid, Z., Aal, A., 2010. Investigation of nanostructured and conventional alumina–titania coatings prepared by air plasma spray process. Materials Science and Engineering A, 527, 663–668.
- Ibrahim , A., Salem , H., Sedky, S., 2009. Excimer laser surface treatment of plasma sprayed alumina–13% titania coatings. Surface & Coatings Technology, 203, 3579–3589.
- Kim, S.S., Yu, H.N., Lee, D.G., Muroyana, H., Kageyama, K., 2010. Tribological behaviours of plasma treated carbon composite grooved surfaces. Composite Structure, 92, 1039-1046.
- Kim, H., Lee, C., Kweon, Y., 2001. The effects of sealing on mechanical properties of the plasma–sprayed alumina–titania coating. Surface and Coating Techonology, 139, 75-80.
- Kobayashi, A., Yano , S., Kimura, H., Inoue, A., 2008. Mechanical property of Fe-base metallic glass coating formed by gas tunnel type plasma spraying. Surface & Coatings Technology, 202, 2513–2518.
- Korsunsky, A.M., Torosyon, A.R., Kim, K., 2008. Development and characterization of low friction coatings for protection against fretting wear in aerospace components. Thin Solid Films, 516, 5690-5699.
- Kurbanoğlu, C., 2006. Makine Elemanları Teori, Konstrüksiyon ve Problemler, Nobel yayıncılık, 582s, Ankara, Türkiye.
- Lathobi, S., Ottomüller, M., Fernandez, I., 1998. Solid particle erosion behaviour thermal sprayed ceramic, metallic and polymer coatings. Wear, 221, 93-108.
- Li, C., Yan, F., 2009. A comparative investigation of the wear behaviour of PTFE and PI under dry sliding and simulated sand dust conditions. Wear, 266, 632-638.
- Liang ,B., Zhang ,G., Liao ,H., Coddet ,C., Ding, C., 2009. Friction and wear behavior of ZrO₂–Al₂O₃ composite coatings deposited by air plasma spraying: Correlation with physical and mechanical properties. Surface & Coatings Technology, 203, 3235–3242.

- Leiovo, E., Wilenus, T., Kimos, T., Vuaristo, P., Möntlö, T., 2004. Properties of thermally sprayed fluoropolymer PVDF, ECTFE, PFA and FEP coatings. *Progress in organic coatings*, 49, 69-73.
- Liu, C.Z., Wu, I.Q., Ren, L.Q., Jong, J., Li, J.Q., Cui, N., Brown, N.M.D., Meenen, B.J., 2004. Comparative study on the effect of RF and DBD plasma treatment on PTFE surface modification. *Materials Chemistry and Physics*, 85, 340-346.
- Marcinauskas, L., Silinskas, M., Grigonis, A., 2010. Influence of stand off distance on the structure and properties of carbon coatings deposited by atmospheric plasma jet. *Applied Surface Science*, 257(7), 2694-2699.
- Mark, M.F., Kobayashi, A., Fahim, N.F., 2007. Abrasive wear behaviour of sprayed hydroxyapatite coatings by gas tunnel type plasma spraying. *Wear*, 262, 204-209.
- Meerkam, H., Fruth, W., Krumpegl, T., Schoufler, C., 2002. Mechanical and tribological properties of PVD and PACVD wear resistant coatings. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 351-357.
- Mindivan, H., 2010. Wear behaviour of plasma and HVOF sprayed WC-12Co+6% ETFE coatings on AA2024-T6 aluminum alloy. *Surface and coating technology*, 204, 1870-1874.
- Mindivan, H., 2009. Wear behavior of plasma and HVOF sprayed WC-12Co+6% ETFE coatings on AA2024-T6 aluminium alloy. *Surface & Coatings Technology*, 204 (12-13), 1870-1874.
- Morks, M.F., 2008. Fabrication and characterization of plasma-sprayed HA/SiO₂ coatings for biomedical application. *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, 105-111.
- Morks, M., Akimoto, K., 2008. The role of nozzle diameter on the microstructure and abrasion wear resistance of plasma sprayed Al₂O₃/TiO₂ composite Coatings. *Journal of Manufacturing Processers*, 10, 1-5.
- Orhan, A., Buytoz, S., 2007. GTA Yöntemiyle AISI 304 Paslanmaz Çelik Yüzeyine Kaplanan FeCrC/B₄C Tozlarının Abrasiv Aşınma Davranışları. *Doğu Anadolu Araştırmaları Dergisi*, 6-1, 147-151.
- Öner, C., Can, İ., 2007. Toz Puskurtme Yöntemi İle Krank Mili Ana Yatağının Yeni Bir Alasım İle Kaplanması. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 77-81.
- Özel, S., 2009. Alüminyum Alaşımı ve Bronzu Yüzeyine Oksit ve Karbür Bileşiklerinin Plazma Sprey Yöntemiyle Kaplanmasının Araştırılması. *Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi*, 164, Elazığ.
- Özel, S., Turhan, H., Sarsılmaz, F., 2008. AA2024 Alüminyum Alaşımı Yüzeyine Al₂O₃/Al₂O₃+TiO₂ Tozunun Plazma Sprey Yöntemiyle Kaplanması. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(3), 503-508.

Paker yapı,2012, Çelik Standartları. Erişim tarihi: 12.12.2011.
http://www.paker.com.tr/index_dosyalar/page4306.htm.

Sahu, S.P., Sctapothy,A., Patrick, A., Sreekumar, K.P., Ananthapadmanabhan, P.U.2010. Development characterization and erosion wear response of plasma sprayed fly-ash alüminium coatings. Materials and Design, 31, 1165-1173.

Sarı, N., Yılmaz, M.,2006.Ni- esaslı Kaplamaların Abrazif+Erozif Aşınma Direncine Isıl Püskürtme Yönteminin ve WC İlavesinin Etkisi. Mühendis ve Makine, 46,541.

Sarıkaya, Ö., Anık, S., Çelik, E., 2004. Plazma Püskürtme Yöntemiyle Al-%12Si Ana Malzemesi Üzerinde Al-Si+B₄C Kaplamaların Hazırlanması ve Kaplama Özelliklerinin İncelenmesi.10. Denizli Malzeme Sempozyumu ve Sergisi , 14-16 Nisan, Denizli,325-332.

Sert, Y., 2007. Plazma Püskürtme Tekniği ile Kaplanmış Tekstil Parçasının Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131,Sakarya.

Stachowiak, G.W., 2002. Wear-Materials, Mechanisms, and Practice. Southern Gate, 458,USA.

Sözlü görüşme; Prof. Dr. Ayşegül Uygun (Süleyman Demirel Üniversitesi FEF Kimya Bölümü), 10.03.2012.

Sözlü görüşme; Sorin Manolache(Wisconsin-Madison Univercity), 10.03.2012.

Sun, Y.,2010. Depth-profiling electrochemical measurements of low temperature plasma carburised 316L stainless steel in 1M H₂SO₄ solution. Surface and Coating Techonology, 204 (16-17),2789-2796.

Taktak, Ş., 2002. Plazmada Nitrülenmiş Ti-6Al-4V Alaşımının Difüzyon Kinetiği ve Aşınma Davranışının İncelenmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi, 222,Sakarya.

Tao , S., Yin , Z., Zhou , X.,Ding.C.,2010.Sliding wear characteristics of plasma-sprayed Al₂O₃ and Cr₂O₃ coatings against copper alloy under severe conditions.Tribology International,43, 69–75.

Teke, E., 2012. Vakum Ortamında Plazma Kaplama ve Plazma Parametrelerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, 75, Isparta.

Tekmen, Ç., Özdemir, İ., Fritsche, G., Tsunekawa, Y., 2009. Structural evolution of mechanically alloyed Al-12Si/TiB₂/h-BN composite powder coating by atmospheric plasma spraying. Surface and Coating Techonology,203, 2046-2051.

The Vacuum Lab, A Journal of Practical and Useful Vacuum Technology, Creating Vacuum, Erişim Tarihi: 10.07.2012.

<http://www.vacuumm.com/Articles/Creating%20A%20Vacuum.pdf>.

Tran, N.D., Dutta, N.K., Choudhury, N.R., 2007. Weatherability and wear resistance characteristics of plasma fluoropolymer coatings deposited on an elastomer substrate. *Polymer Degradation and Stability*, 91, 1052-1063.

Touzin, M., Chevallier, P., Lewis, F., Turgeon, S., Holvoet, S., Laroche, G., Mantovani D., 2008. Study on the stability of plasma-polymerized fluorocarbon ultra-thin coatings on stainless steel in water. *Surface & Coatings Technology*, 202, 4884-4891.

Twomey, B., Byrne, G., Hynes, A., O'Neill, L., Dowling, D., 2009. Evaluation of the mechanical behaviour of nanometre-thick coatings deposited using an atmospheric pressure plasma system. *Surface & Coatings Technology*, 203, 2021-2029.

Tian, W., Wang, Y., Yang, Y., 2009. Three body abrasive wear characteristics of plasma sprayed conventional and nanostructured Al₂O₃-13%TiO₂ coatings. *Tribology International*, 43 (5-6), 876-881.

Vargas, F., Ageorges, H., Fournier, P., Fauchais, P., López, M.E., 2010. Mechanical and tribological performance of Al₂O₃-TiO₂ coatings elaborated by flame and plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 205, 1132-1136.

Venkateswarlu, K., Rojinikanth, V., Noveen, T., Sinha, Atiquzzaman, D., Roy, A.K., 2009. Abrasive wear behaviour of thermally sprayed diamond reinforced composite coating deposited with both oxy-acetylene and HVOF techniques. *Wear*, 266, 995-1002.

Wöhle, J., Ahn, H., Rie, K., 2002. BCN coatings on polymer substrates by plasma CVD at low temperature. *Surface and Coatings Technology*, 116, 1166-1171.

Yamane, M., Stolarski, T.A., Tobe, S., 2007. Wear and friction mechanism of PTFE reservoirs embedded into thermal sprayed metallic coatings. *Wear*, 263, 1364-1374.

Yang, W., L., M., 2009. Effect of remelting process on characterization of air-plasma sprayed Fe_{67.5}Ni_{23.5}B₉ alloy coatings onto 1Cr18Ni9Ti stainless steel. *Journal of materials processing technology*, 209, 3256-3263.

Yeni forumuz, 2012. Erişim tarihi 01.03.2012.

<http://www.yeniforumuz.biz/showthread.php?1318467-Teflon>).

Yılmaz, S.S., Ünlü, B.S., Varol, R., 2008. Borlanmış ve bilyalı dövülmüş demir esaslı T/M malzemelerin aşınma ve mekanik özellikleri. *Makine ve Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 1, 7-16.

- Yin ,Z., Tao , S., Zhou , X.,Ding, X.,2008. Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃–Al composite coatings deposited by plasma spraying. *Applied Surface Science*, 254,1636–1643.
- Yuan, J., Zhu ,Y., Zheng, X., Ruan,Q., Ji., H., 2009.Improvement in tribological properties of atmospheric plasma-sprayed WC–Co coating followed by Cu electrochemical impregnation.*Applied Surface Science*, 255,7959–7965.
- Yuan, J., Zhu, Y., Zheng, X., Ji, H., Yang, T., 2011. Fabrication and evaluation of atmospheric plasma spraying WC-Co-Cu-MoS₂ composite coatings. *Journal of Alloys and Compounds*, 503-5,2576-2581.
- Yugeswaran, S., Selvarajan , V., Vijay , M., Ananthapadmanabhan, P.V., Sreekumar, K.P.,2010. Influence of critical plasma spraying parameter (CPSP) on plasma sprayed Alumina–Titania composite coatings. *Ceramics International* 36, 41–149.
- Zhang,Y., Chen, Z., Wang, L., Yan, B., Li, C., Fang, D., 2009. Phase and microstructure of tungsten coating on C/C composite prepared by double-glow plasma.*Fusion Engineering and Design*,84, 15–18.
- Zhao,X., An ,Y., Chena, J., Zhou,H.,Yin, B.,2008. Properties of Al₂O₃–40 wt.% ZrO₂ composite coatings from ultra-fine feedstocks by atmospheric plasma spraying. *Wear*, 265,1642–1648.
- Zhitomirsky, W., Grimberg, J., Joseph, M.C., Boxman, R.L., Matthew, A., Weiss, B.Z.,2002. Vacuum arc deposition of conductive wear resistant coating on polymer substrates. *Surface and Coatings Technology*,120- 121,373-377.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hatice VAROL ÖZKAVAK

Doğum Yeri ve Yılı : Isparta, 1984

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : haticevarol@sdu.edu.tr



Eğitim Durumu

Lise : Isparta Mürşide Ermumcu Anadolu Öğretmen Lisesi, 2002

Lisans : SDÜ, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği

Yüksek Lisans : SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi

Mesleki Deneyim

Cumhuriyet Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi 2006-2008

Pamukkale Üniversitesi Denizli MYO 2008-2012

Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler MYO 2012-..... (halen)

Yayınları

Öndürücü A., Varol H., 2009. Bilyalı Dövme İşleminin Yüzey Özelliklerine Etkisi. V. Makine Tasarımı ve İmalat Teknolojileri Kongresi, Konya.

Teke, E., Varol, H., Bozduman, F., Gulec, A., Oksuz, L., Manolache, S., Camurlu, E., Kurbanoglu, C., 2012. PTFE and C3F6 Deposition on the AISI 1050 Stainless Steel for Lubrication by RF Plasma. ICOPS, Edinburgh.