

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TİTANYUM ALAŞIMLARININ PARTİKÜL EROZYONU İLE
PÜRÜZLENDİRİLMESİ VE AŞINDIRILMASI İŞLEMLERİNİN
OPTİMİZASYONU

EGEMEN AVCU

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

TİTANYUM ALAŞIMLARININ PARTİKÜL EROZYONU İLE
PÜRÜZLENDİRİLMESİ VE AŞINDIRILMASI İŞLEMLERİNİN
OPTİMİZASYONU

EGEMEN AVCU

Prof.Dr. Tamer Sınmazçelik
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Muzaffer Zeren
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. A. Armağan Arıcı
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Şenol Yılmaz
Jüri Üyesi, Sakarya Üniv.

Doç.Dr. Erol Feyzullahoğlu
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.


.....

.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.09.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Katı partikül erozyonu, aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine yüksek hızlarda ve tekrarlı bir şekilde çarpmaları ile yüzeyde meydana gelen malzeme kaybı olarak tanımlanabilir. Katı partikül erozyonu mühendislik malzemelerine zarar veren bir süreç olarak düşünülebilir. Ancak, diğer yandan mühendislik malzemelerinin yüzeyleri katı partikül erozyonu ile talaş kaldırılarak işlenebilmektedir (kumlama ile yüzey temizliği, su jeti ile kesme ve işleme yöntemi, partikül erozyonu ile mikro yüzey işleme yöntemleri gibi). Bu durumda katı partikül erozyonu bir çok mühendislik uygulamasında malzemelere zarar veren istenmeyen bir süreç iken diğer yandan malzemelerin işlenmesi amacıyla kullanılan yararlı bir süreçtir. Bu noktada erozif aşınma ile ilgili çalışmaların bu iki süreç göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Partikül erozyonu birçok farklı parametrenin etkisi altında gerçekleşen karmaşık bir aşınma sürecidir. Operasyon parametreleri (partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül çarpma hızı, nozul numune arası mesafe vb.), hedef malzeme özellikleri (sertlik, kırılma davranışı, elastisite modülü vb.) ve aşındırıcı partikül özellikleri (boyut, sertlik, kırılma davranışı vb.) malzemelerin erozif aşınma davranışını etkileyen önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin mühendislik malzemelerinin erozif aşınma davranışına etkileri, literatürde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır.

Titanyum alaşımları özellikle havacılık ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan önemli bir malzeme grubudur. Titanyum alaşımları havacılık ve uzay uygulamalarında yoğun bir şekilde partikül erozyonuna maruz kalmakta ve hasara uğramaktadır. Bu noktada bu malzemelerin erozif aşınma davranışlarının karakterize edilmesi büyük önem arz etmektedir. Diğer yandan biyomedikal uygulamalarda ise partikül erozyonu titanyum alaşımlarının kaplama öncesi yüzeylerinin temizlenmesi ve pürüzlendirilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu noktada ise titanyum alaşımlarının yüzeylerinin biyomedikal uygulamalar öncesi doğru parametreler ile temizlenmesi ve pürüzlendirilmesi önemli bir konudur.

Bu tez çalışmasında havacılık ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının detaylı bir şekilde incelenmesi amaçlanmıştır. Tez çalışmasının çıktılarının yukarıda anlatılan her iki süreç ile ilgili çalışmalar için de kullanılması, akademik ve endüstriyel çalışmalara katkı sağlanması tez çalışmasının temel ilkesidir. Bu amaç ile tez çalışması kapsamında Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışı birçok farklı parametre altında, çok sayıda özgün yöntem kullanılarak derinlemesine incelenmiştir. Bu doğrultuda tez çalışmasının tüm akademisyenlere ve mühendislere yararlı olmasını temenni ederim.

Sivil Havacılık Yüksekokulu'nda gerçekleştirilen deneysel çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Alp Eren Şahin'e, lisans öğrencilerimiz Hürol Koçoğlu, Harun Arda Balyalı ve Ahmet Öztürk'e yardımlarından dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Deneysel Tasarım çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Arş.

Gör. Endüstri Yüksek Mühendisi Burcu Özcan' a teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmalarımın gerçekleşmesine katkıda bulunan Assan Alüminyum ARGE departmanında çalışmakta olan Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Onur Birbaşı' a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı'nda görev yapmakta olan değerli arkadaşım Arş. Gör. Metalurji ve Malzeme Yüksek Mühendisi Fatih Erdem Baştan'a değerli fikirleri ve katkıları nedeniyle çok teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük emeği olan, bana kılavuzluk eden ve sürekli cesaretlendiren değerli arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Sinan Fidan ve değerli danışmanım Prof. Dr. Tamer Sınmazçelik'e sonsuz şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca maddi ve manevi her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen, beni cesaretlendiren annem Meral Avcu, babam Sait Avcu, ağabeyim Güven Avcu ve tüm yakınlarıma çok teşekkür ederim. Tez çalışmam süresince her zaman yanımda olan ve hayatıma anlam katan değerli arkadaşım Yasemin Yıldırım'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ağustos - 2013

Egemen AVCU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	xiii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	xiv
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
GİRİŞ	1
1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI	9
1.1. Titanyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi	10
1.2. Titanyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri	11
1.3. Titanyum ve Alaşımlarının Kimyasal İçeriği	14
1.4. Titanyum ve Alaşımlarının İçyapı Özellikleri.....	16
1.5. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması	17
1.5.1. Saf titanyum	17
1.5.2. α titanyum alaşımları	19
1.5.3. α -yakın titanyum alaşımları.....	20
1.5.4. $\alpha+\beta$ titanyum alaşımları.....	20
1.5.5. β titanyum alaşımları	22
1.6. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları	23
1.6.1. Biyomedikal uygulamalarda titanyum ve alaşımlarının kullanımı.....	25
1.6.2. Titanyum ve alaşımlarının havacılık uygulamaları	27
1.6.3. Titanyum ve alaşımlarının otomotiv endüstrisi uygulamaları.....	31
1.6.4. Titanyum ve alaşımlarının diğer kullanım alanları	32
1.7. Titanyum ve Alaşımlarının Aşınma Davranışları	33
2. KATI PARTİKÜL EROZYONU	34
2.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı	35
2.2. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı	37
2.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debisi	37
2.4. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu	38
2.5. Aşındırıcı Partiküllerin Karışım Oranı	39
2.6. Aşınan Malzeme Özellikleri.....	40
3. TİTANYUM ALAŞIMLARININ EROZYON DAVRANIŞININ LİTERATÜR İNCELEMESİ	41
3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	42
3.2. Aşındırıcı Malzeme Özelliklerinin Etkisi.....	43
3.2.1. Aşındırıcı partikül boyutu etkisi.....	43
3.2.2. Partikül sertliği, şekil faktörü ve dönüş hızı.....	43
3.3. Operasyon Parametrelerinin Etkisi.....	44
3.3.1. Partikül çarpma açısının etkisi	44
3.3.2. Partikül çarpma hızının etkisi.....	45
3.4. Çevresel Etkenler	45

3.4.1. Sıcaklığın etkisi	45
4. GARNET MİNERALİ	46
4.1. Garnet Mineralinin Özellikleri	46
4.2. Kullanım Alanları.....	46
5. GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİ	49
5.1. Görüntü İşleme ile İlgili Literatür Çalışmaları.....	51
5.1.1. Görüntü işleme yöntemiyle korozyon hasarlarının tespiti	52
5.1.2. Kesici takım uçları geometrilerinin ve kesme işlemlerinin görüntü işleme yöntemiyle tespiti	56
5.1.3. Görüntü işleme yöntemiyle kompozit içyapılarının ve kompozit hasarlarının incelenmesi	61
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	67
6.1. Malzeme	67
6.1.1. Hedef malzeme.....	67
6.1.2. Aşındırıcı malzeme	68
6.2. Yöntem	70
6.2.1. Çift disk yöntemi ile aşındırıcı partiküllerin partikül çarpma hızlarının ölçülmesi	71
6.2.2. Aşındırıcı partiküllerin kütsel debilerinin hesaplanması	73
6.2.3. Taguchi deney tasarımı	74
6.2.4. Eroziyon aşınma deneyleri.....	78
6.2.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri.....	79
6.2.6. SEM ve EDS analizleri	80
6.2.7. Görüntü analiz yöntemleri ile aşındırılmış numunelerin yüzey görüntülerinin hazırlanması.....	81
7. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME	85
7.1. Aşındırıcı Partiküllerin Kütsel Debileri ve Hızlarının Değişimi.....	85
7.2. Taguchi Deney Tasarımı	88
7.3. Eroziyon Aşınma Deneylerinin Sonuçları	91
7.3.1. Eroziyon oranının partikül çarpma açısına göre değişimi	93
7.3.2. Eroziyon oranının partikül püskürtme basıncına göre değişimi.....	95
7.3.3. Eroziyon oranının partikül boyutuna göre değişimi.....	97
7.3.4. Eroziyon oranının partikül hızına göre değişim	101
7.3.5. Eroziyon oranının partikül karışımlarına göre değişim.....	104
7.4. Taguchi Deney Tasarımı ile Ti6Al4V Alaşımının Eroziyon Aşınma Davranışının Optimizasyonu.....	106
7.4.1. Literatür Özeti	106
7.4.2. Partikül çarpma açısının etkisi	109
7.4.3. Partikül püskürtme basıncının etkisi	111
7.4.4. Aşındırıcı partikül boyutunun etkisi.....	114
7.5. Aşınmış Yüzeylerin Pürüzlülük Değerlerinin Değişimi	118
7.5.1. Partikül çarpma açısının etkisi	118
7.5.2. Püskürtme basıncının etkisi.....	120
7.5.3. Partikül boyutunun etkisi	122
7.5.4. Partikül karışımlarının etkisi	125
7.6. SEM ve EDS Çalışmaları	127
7.6.1. Partikül çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi	128
7.6.2. Partikül püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkisi	134
7.6.3. Aşındırıcı partikül boyutunun yüzey morfolojisine etkisi.....	139

7.6.4. Aşındırıcı partikül karışımlarının yüzey morfolojisine etkisi	145
7.7. Görüntü Analiz Yöntemleri ile Aşındırılmış Numunelerin Yüzey Görüntülerinin İncelenmesi	150
7.7.1. Yüzey morfolojisinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi.....	151
7.7.2. Yüzey morfolojisinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi	156
7.7.3. Yüzey morfolojisinin aşındırıcı partikül boyutuna bağlı değişimi	164
7.7.4. Yüzey morfolojisinin partikül karışımlarına bağlı değişimi	169
7.8. Ti6Al4V Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışının Piksel sayısı-Grilik değeri Eğrileri Yardımıyla İncelenmesi	171
7.8.1. Partikül çarpma açısının etkisi	174
7.8.2. Püskürtme basıncının etkisi.....	178
7.8.3. Partikül boyutunun etkileri	184
7.8.4. Partikül karışımlarının etkileri	188
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	193
8.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Hızları ve Kütlesel Debileri	193
8.2. Parametrelerin Önem Derecelerinin Belirlenmesi	193
8.3. Eroziyon Aşınma Deneyleri	194
8.4. Taguchi Deney Tasarımı ile Ti6Al4V Alaşımının Eroziyon Aşınma Davranışının Optimizasyonu	195
8.5. Yüzey Pürüzlülük Değerleri	196
8.6. SEM ve EDS Çalışmaları	197
8.7. Görüntü İşleme Yöntemi ile Aşındırılmış Numunelerin Yüzey Görüntülerinin İncelenmesi	202
8.8. Eroziyon Aşınma Davranışının Piksel Sayısı-Grilik Değeri Eğrileri Yardımıyla İncelenmesi	203
KAYNAKLAR	205
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER	218
ÖZGEÇMİŞ	223

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Farklı metallerde spesifik mukavemetin (mukavemet/yoğunluk) sıcaklığa bağlı değişimi	13
Şekil 1.2.	Ti6Al4V'un a) 1050 °C' den c) 800 °C' den, e) 650 °C' den yavaş soğutma sonucunda, b) 1050 °C' den, d) 800 °C' den, f) 650 °C' den hızlı soğutma sonucunda oluşan mikro yapı görüntüleri	21
Şekil 1.3.	Dünyadaki titanyum tüketim oranları	24
Şekil 1.4.	Dokuların titanyum alaşımları ile uyumu	25
Şekil 1.5.	F22 savaş uçağında kullanılan malzemelerin oranları görülmektedir	29
Şekil 2.1.	Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler	35
Şekil 2.2.	Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri.....	36
Şekil 3.1.	Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışına etki eden parametreler	41
Şekil 5.1.	Ti6Al4V ve Al 7050 yüzeyinde oluşan korozyon çukurcuklarının görüntü işlemeyle elde edilen derinlik ölçümleri	53
Şekil 5.2.	Çatlak bölgesini foto-elastik teknikle inceleyen deneysel düzenek	54
Şekil 5.3.	Çatlak bölgesinin farklı korozyon süreleri sonrası foto-elastik girişim modeliyle elde edilen görüntüleri	54
Şekil 5.4.	Korozyon çukurcuk derinliklerinin termografik görüntüleri	55
Şekil 5.5.	Korozyona uğramış numunelerin sayısal ve renkli görüntülerinin görüntü işleme metoduyla işlenmesinde izlenen işlem basamakları	56
Şekil 5.6.	Kesici takım ucunun görüntü işleme ile algılanması	57
Şekil 5.7.	Kesici takım ucunun farklı bölgelerinde elde edilen grilik değeri profilleri (a)-(e)	58
Şekil 5.8.	Önemli aşınma ölçüm noktalarının gösterimi ve dikey yönde tarama sonrası elde edilen görüntü işleme noktaları	59
Şekil 5.9.	Kesici takım ucunda ortaya çıkan aşınmanın görüntü işleme ile değerlendirilmesi	60
Şekil 5.10.	Kesici takım ucu aşınma görüntüsü ve görüntüye ait grilik değeri bölgeleri	60
Şekil 5.11.	Yazılan görüntü işleme makrosuyla elde edilen aşınma parametrelerinin otomatik ölçümü	61
Şekil 5.12.	İncelenen alandaki grilik değeri dağılım histogramı	61
Şekil 5.13.	Enjeksiyonla kalıplama sonrası dikdörtgen kesitli bir parçada fiber yönlenmesini gösteren görüntü (ağırlıkça %50 fiber)	62
Şekil 5.14.	Farklı sürelerde dalga boylarından elde edilen delaminasyon görüntüleri	63

Şekil 5.15. Deneysel çalışması yapılan kompozitin (a) orjinal histogram ve (b) Otsu algoritması uygulandıktan sonra elde edilen histogram grafiği	63
Şekil 5.16. Fiber dağılımlarını gösteren grilik değerinden elde edilmiş derinlik haritaları (a) ortogonal görünüş (b) perspektif görünüş	64
Şekil 5.17. Farklı örgü biçimlerinde oransal fiber dağılımı görüntüsü	65
Şekil 5.18. Termal görüntülemeyle elde edilen delaminasyon hasarı ve görüntü işlemeyle elde edilen 3 boyutlu delaminasyon topografyası	65
Şekil 5.19. X-ışını tomografisiyle elde edilen karbon fiber takviyeli kompozit görüntüsü ve görüntüye ait grilik değeri histogramı	66
Şekil 5.20. Farklı eksenlerde yapışma bölgesinde ortaya çıkan gerilmelerin grilik değeri kontur dağılımları (a) x eksen (b) z eksen	66
Şekil 6.1. Ti6Al4V numunelerin boyutları.....	67
Şekil 6.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcılar.....	69
Şekil 6.3. Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması.....	70
Şekil 6.4. Döner disk partikül hızı ölçme sisteminin CAD ve gerçek resimleri.....	71
Şekil 6.5. Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler	72
Şekil 6.6. Döner disk hız ölçüm hız hesap formu.....	73
Şekil 6.7. Minitab programında yapılan Taguchi tasarımı	75
Şekil 6.8. Katı partikül erozyonu test düzeneği.....	79
Şekil 6.9. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik profilometre cihazı	79
Şekil 6.10. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı	80
Şekil 6.11. SEM çalışmasında kullanılan yöntemler	81
Şekil 6.12. Aşındırılmış Ti6Al4V numunelerin tarayıcıya yerleştirilmesinin şematik gösterimi	82
Şekil 6.13. Aşındırılmış Ti6Al4V numunelerin görüntü işleme işlem basamakları.....	84
Şekil 7.1. Ortalama partikül çarpma hızların püskürtme basıncı ve partikül boyutuna bağlı değişimi.....	85
Şekil 7.2. a) 20-40 mesh b) 80 mesh c) 120 mesh d)180 meshlik partiküllerin basınca bağlı hız dağılımları.....	86
Şekil 7.3. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi	87
Şekil 7.4. Eroziyon aşınma parametrelerinin aşınma miktarı üzerinde etkinliği (A: partikül çarpma açısı, B: partikül boyutu, C: püskürtme basıncı, D: Nozul numune arası mesafe).....	89
Şekil 7.5. Eroziyon aşınma parametrelerinin aşınma miktarı üzerinde etkinliği (A: partikül çarpma açısı, B: partikül boyutu, C: püskürtme basıncı, D: Nozul numune arası mesafe).....	89
Şekil 7.6. Erozyon oranının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar)	94

Şekil 7.7.	Erozyon oranının katı partikül püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi (partikül boyutu a) 20-40 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh, d)180 mesh).....	96
Şekil 7.8.	Erozyon oranının katı partikül boyutuna ve partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (partikül püskürtme basıncı a) 1,5 bar, b)3 bar, c) 4 bar).....	99
Şekil 7.9.	Erozyon oranının katı partikül boyutuna ve partikül çarpma açısı (30-90 derece için) bağlı olarak değişimi partikül püskürtme basıncı a) 1,5bar, b) 3 bar, c) 4 bar	100
Şekil 7.10.	Erozyon oranının partikül hızı ve partikül püskürtme açısına (30° ve 90°) göre değişimi Partikül boyutu: a) 20-40 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh, d) 180 mesh).....	102
Şekil 7.11.	Partikül karışımlarının erozyon oranına etkileri a) 1,5 bar, 30 derece, b) 1,5 bar, 90 derece, c) 4 bar, 30 derece, d) 4 bar, 90 derece	105
Şekil 7.12.	Partikül çarpma açısının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 80 mesh).....	109
Şekil 7.13.	Partikül çarpma açısının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 120 mesh).....	110
Şekil 7.14.	Partikül çarpma açısının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 180 mesh).....	111
Şekil 7.15.	Partikül püskürtme basıncının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması(Aşındırıcı Partikül boyutu: 80 mesh).....	112
Şekil 7.16.	Partikül püskürtme basıncının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 120 mesh).....	113
Şekil 7.17.	Partikül püskürtme basıncının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 180 mesh).....	114
Şekil 7.18.	Aşındırıcı partikül boyutunun etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Partikül püskürtme basıncı: 1,5 bar).....	115
Şekil 7.19.	Aşındırıcı partikül boyutunun etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Partikül püskürtme basıncı: 3 bar).....	116
Şekil 7.20.	Aşındırıcı partikül boyutunun etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması(Partikül püskürtme basıncı: 4 bar).....	117
Şekil 7.21.	Ra değerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi püskürtme basıncı: a)1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar.....	119
Şekil 7.22.	20-40 mesh boyutundaki aşındırıcı 1,5 bar püskürtme basıncı a)30 derece, b)60 derece,c)90 derece.....	120
Şekil 7.23.	Ra değerinin püskürtme basıncına bağlı değişimi aşındırıcı partikül boyutu: a) 80 mesh, b) 180 mesh.....	121

Şekil 7.24. 80 mesh boyutunda aşındırıcı 30 derece partikül çarpma açısında a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar	122
Şekil 7.25. Ra değerinin partikül boyutuna bağlı değişimi partikül püskürtme basıncı a) 3 bar, b) 4 bar	123
Şekil 7.26. 90 derece partikül çarpma açısı 4 bar partikül püskürtme basıncı a) 20-40 mesh b) 80 mesh c) 120 mesh d) 180 mesh.....	124
Şekil 7.27. Ra değerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Partikül püskürtme basıncı a) 1,5 bar, çarpma açısı b) 4 bar, çarpma açısı.....	125
Şekil 7.28. Partikül çarpma açısı 90 derece, püskürtme basıncı 4 bar, a) 20-40 mesh, b) %75 20-40 mesh+ %25 180 mesh, c) %50 20-40 mesh+ %50 180 mesh, d) %25 20-40 mesh+ %75 180 mesh, e) 180 mesh	126
Şekil 7.29. Tez çalışmasında gerçekleştirilen SEM çalışmaları.....	127
Şekil 7.30. Farklı çalışma açılarındaki gerçekleştirilen SEM analizlerinin şematik gösterimi	128
Şekil 7.31. a) 30°, b) 90°, c) 30°, d) 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh).....	130
Şekil 7.32. a) EDS Analizi x500 büyütme, b) x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)	131
Şekil 7.33. a) 30°, b) 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° dik bakış SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)	133
Şekil 7.34. a) 1,5 bar, b) 4 bar, c) 1,5 bar, d) 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)	135
Şekil 7.35. EDS Analizi x500 büyütme.....	136
Şekil 7.36. 2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)	137
Şekil 7.37. a) 1,5 bar, b) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x5000 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 30 derece, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh).....	138
Şekil 7.38. a) 20-40 mesh, b) 180 mesh, c) 20-40 mesh, d) 180 mesh aşındırıcı boyutu ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar)	139
Şekil 7.39. a) 20-40 mesh, b) 180 mesh, c) 20-40 mesh, d) 180 mesh aşındırıcı boyutu ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)	141
Şekil 7.40. a) 20-40 mesh, b) 180 mesh boyutundaki aşındırıcılar ile aşındırılmış numunelerin x1000 büyütmede aşınma yönüne	

	75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar)	142
Şekil 7.41.	a) 20-40 mesh, b) 180 mesh boyutundaki aşındırıcılar ile aşındırılmış numunelerin x5000 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)	143
Şekil 7.42.	a) %75 180 mesh- %25 20-40 mesh b) %50 180 mesh- %50 20-40 mesh c) %25 180 mesh- %75 20-40 mesh d) %100 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°,püskürtme basıncı: 1,5 bar)	146
Şekil 7.43.	a) %75 180 mesh- %25 20-40 mesh b) %50 180 mesh- %50 20-40 mesh c) %25 180 mesh- %75 20-40 mesh d) %100 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°,püskürtme basıncı: 4 bar)	147
Şekil 7.44.	a) %75 180 mesh- %25 20-40 mesh b) %50 180 mesh- %50 20-40 mesh c) %25 180 mesh- %75 20-40 mesh d) %100 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°,püskürtme basıncı: 4 bar)	148
Şekil 7.45.	a) %75 180 mesh- %25 20-40 mesh, b) %50 180 mesh- %50 20-40 mesh, c) %25 180 mesh- %75 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 4 bar).....	149
Şekil 7.46.	%25 180 mesh- %75 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar)	150
Şekil 7.47.	a)15°, b)30°, c)45°, d)60°, e)75°, f)90° çarpma açısı, 20-40 mesh partiküller ile 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	152
Şekil 7.48.	Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)	153
Şekil 7.49.	a)15°, b) 30°, c)45°, d) 60°, e) 75°, f) 90° çarpma açısı, 80 mesh partiküller ile 1,5 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	154
Şekil 7.50.	Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)	155
Şekil 7.51.	a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90° çarpma açısı, 180 mesh partiküller ile 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	156
Şekil 7.52.	Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Partikül çarpma açıları: 30° ve 90°, Aşındırıcı Partikül Boyutu: 180 mesh)	157

Şekil 7.53. 180 mesh partiküller ile 30° partikül çarpma açısı ve a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	158
Şekil 7.54. 180 mesh partiküller ile 90° partikül çarpma açısı a)1,5, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	159
Şekil 7.55. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı Partikül Boyutu: 80 mesh).....	160
Şekil 7.56. 80 mesh partiküller ile 45° partikül çarpma açısı a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	161
Şekil 7.57. 80 mesh partiküller ile 75° partikül çarpma açısı a)1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	161
Şekil 7.58. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)	162
Şekil 7.59. a)1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında, 120 mesh partiküller ile 30° partikül çarpma açısı aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	163
Şekil 7.60. a)1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında, 120 mesh partiküller ile 90° partikül çarpma açısı aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	163
Şekil 7.61. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül boyutuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 60°)	164
Şekil 7.62. a) 20-40 mesh, b)80 mesh, c) 120 mesh, d)180 mesh partiküller ile 60° partikül çarpma açısı ve 1,5 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	165
Şekil 7.63. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül boyutuna bağlı değişimi(püskürtme basıncı: 3 bar, partikül çarpma açısı: 90°)	166
Şekil 7.64. a) 20-40 mesh, b)80 mesh, c) 120 mesh, d)180 mesh partiküller ile 90° partikül çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi	167
Şekil 7.65. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül boyutuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 4 bar, partikül çarpma açısı: 75 °)	168
Şekil 7.66. a) 20-40 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh, d)180 mesh partiküller ile 75° partikül çarpma açısı ve 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi	169
Şekil 7.67. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin aşındırıcı partikül karışımlarına bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 4 bar, partikül çarpma açısı: 90°).....	170

Şekil 7.68. a) 20-40 mesh, b) %75, c) %50, d) %25, e) 180 mesh, 4bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi.....	171
Şekil 7.69. Görüntü işleme programı yardımıyla elde edilen işlenmemiş piksel sayısı-grilik değeri eğrileri	173
Şekil 7.70. Görüntü işleme verileri kullanılarak çizilen piksel sayısı- grilik değeri eğrileri.....	174
Şekil 7.71. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)	175
Şekil 7.72. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu 80 mesh)	176
Şekil 7.73. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)	177
Şekil 7.74. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)	178
Şekil 7.75. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)	179
Şekil 7.76. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)	180
Şekil 7.77. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)	182
Şekil 7.78. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)	183
Şekil 7.79. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül boyutuna bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 1.5 Bar)	184
Şekil 7.80. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül boyutuna bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 3 Bar)	184
Şekil 7.81. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül boyutuna bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 4 Bar)	187
Şekil 7.82. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 1,5 Bar, Partikül çarpma açısı: 30°).....	188
Şekil 7.83. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 4 Bar, Partikül çarpma açısı: 30°)	189
Şekil 7.84. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 1,5 Bar, Partikül çarpma açısı: 90°).....	191
Şekil 7.85. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 4 Bar, Partikül çarpma açısı: 90°)	191

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Titanyum, Alüminyum ve Demir' in bazı fiziksel özellikleri.....	12
Tablo 1.2.	Ti6Al4V alaşımının fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği	15
Tablo 1.3.	Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri.....	18
Tablo 6.1.	Çalışmalarda kullanılan titanyum alaşımının (Ti6Al4V) elementsel analizi	67
Tablo 6.2.	Ti.Gr.5 (Ti6Al4V) alaşımının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.....	68
Tablo 6.3.	Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları	68
Tablo 6.4.	Deneysel çalışmalarda kullanılan garnet minerallerinin özellikleri.....	69
Tablo 6.5.	Birinci aşama erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler.....	75
Tablo 6.6.	Deney tasarımı için belirlenen seviye ve faktörler	75
Tablo 6.7.	Gerçekleştirilecek deney parametreleri	76
Tablo 6.8.	İkinci aşama Taguchi deneylerinde kullanılan parametreler.....	77
Tablo 6.9.	L9 Deney planı için gerçekleştirilecek deney parametreleri.....	77
Tablo 6.10.	L18 Deney planı için gerçekleştirilecek deney parametreleri.....	78
Tablo 6.11.	Optik profilometre cihazının özellikleri	80
Tablo 6.12.	SEM cihazının özellikleri.....	80
Tablo 6.13.	HP Scanjet G2710 model yatay tarayıcıya ait teknik özellikler ve Ti6Al4V numunelerin tarama parametreleri	83
Tablo 7.1.	L9 Dizilimi ve S/N Oranları	88
Tablo 7.2.	S/N oranlarının davranışları (en küçük en iyi)	90
Tablo 7.3.	İkinci aşama erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler.....	92
Tablo 7.4.	Partikül karışımları	104
Tablo 7.5.	Partikül karışımlarının grafikte kullanılan renkleri	189

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

α	: Görüntülemenin gerçekleştirildiği açı (°)
θ	: İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı (°)
Δm_s	: Örnek numunenin kütle kaybı (mg)
E	: Erozyon oran (g/g)
L	: Diskler arası mesafe (m)
m_e	: Aşındırıcı kütlesi (mg)
n	: Disklerin dönüş hızı (ms^{-1})
Ra	: Ortalama pürüzlülük değeri
Ry	: Maksimum pürüzlülük değeri
t	: Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)
V	: Partikül çarpma hızı (ms^{-1})

Kısaltmalar

AFM	: Atomic Force Microscopy (Atomik Güç Mikroskobu)
BSE	: Back Scatter Electrons (Geri Saçılan Elektron)
EDS	: Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (Enerji Dağılım Spektrometresi)
HVOF	: High Velocity Oxi Fuel (Yüksek Hızla Kaplama)
SE	: Seconder Electrons (İkincil Elektron (Seconder Electrons)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TEM	: Transmission Electron Microscope (Transmisyon Elektron Mikroskobu)
XRD	: X- Ray Diffraction (X Işını Kırınım Yöntemi)

TİTANYUM ALAŞIMLARININ PARTİKÜL EROZYONU İLE PÜRÜZLENDİRİLMESİ VE AŞINDIRILMASI İŞLEMLERİNİN OPTİMİZASYONU

ÖZET

Katı partikül erozyonu hedef malzeme yüzeyine tekrarlı bir şekilde çarpan aşındırıcı partiküller nedeniyle malzeme yüzeyinde gerçekleşen malzeme kaybıdır. Katı partikül erozyonu genellikle birçok makine parçasında negatif etkilere yol açmaktadır. Diğer yandan kumlama, mikroişleme ve su jeti ile kesme gibi uygulamalarda katı partikül erozyon yararlı bir süreçtir. Titanyum alaşımları özellikle havacılık ve biyomedikal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılıkta kullanılan titanyum alaşımları katı partikül erozyonu nedeni ile ağır hasarlara uğrarken, biyomedikal uygulamalarda kullanılan titanyum alaşımlarının yüzeyleri ise kumlama yöntemi ile temizlenmekte ve pürüzlendirilmektedir. Bu yüzden titanyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışlarının incelenmesi ve anlaşılması her iki bakış açısı için de çok önemlidir. Bu çalışmada, yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışının farklı ve özgün yöntemler kullanılarak incelenmesi amaçlanmıştır. Ti6Al4V alaşımının erozyon oranları katı partikül erozyonu testleri gerçekleştirilerek hesaplanmış, ayrıca numunelerin erozyon oranları Taguchi Deney Tasarımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Aşınmış numunelerin yüzey morfolojileri ve pürüzlülük değerleri detaylı bir SEM analizi ve optik profilometre yardımı ile araştırılmıştır. Son olarak Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışının incelenmesi amacıyla özgün bir görüntü analiz yöntemi geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Bu özgün yöntemin Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışının incelenmesi ve karakterize edilmesi aşamasında verimli ve kolay bir şekilde uygulanabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Görüntü İşleme Yöntemi, Katı Partikül Erozyonu, Optik Profilometre, Taguchi Deney Tasarımı, Ti6Al4V.

OPTIMIZATION OF EROSION AND ROUGHENING OPERATIONS OF TITANIUM ALLOYS IMPLEMENTED BY PARTICLE EROSION

ABSTRACT

Solid particle erosion is the removal of material from the target surface due to the repeated impact of erodent particles. Particle erosion generally leads to negative effects in different machine parts. On the other hand, it is a useful phenomenon in some cases, as in blast cleaning, micromachining and high-speed abrasive water jet cutting. Titanium alloys have been widely used specifically in aerospace and biomedical applications. Titanium alloys used in aerospace applications are severely damaged due to particle erosion, while the surfaces of the titanium alloys used in biomedical applications are cleaned and roughened with blast cleaning. Hence, it is vitally important to examine and understand the solid particle erosion behaviour of titanium alloys for both aspects. In this study, solid particle erosion behaviour of the most commercially available Ti6Al4V alloy has been investigated by using various and novel methods. Erosion rates of the Ti6Al4V alloy were calculated by performing solid particle erosion tests and erosion rates of the samples were also evaluated by using Taguchi experimental method. Surface morphology and the surface roughness of the eroded samples were examined by performing a detail SEM analysis and by using an optical profilometer. Finally, a novel image analysis method was developed and implemented in order to investigate solid particle erosion behaviour of Ti6Al4V alloy. It is concluded that, this novel image analysis methodology can be effectively and easily applied in order to investigate and characterize solid particle erosion behavior of Ti6Al4V alloy.

Keywords: Image Analysis Method, Solid Particle Erosion, Optical Profilometer, Taguchi Experimental Design, Ti6Al4V.

GİRİŞ

Katı partikül erozyonu hedef malzeme yüzeyine yüksek hızlarda ve tekrarlı bir şekilde çarpan aşındırıcı partiküller nedeniyle malzeme yüzeyinde gerçekleşen malzeme kaybıdır. Uzay ve havacılık uygulamalarında, enerji dönüşüm sistemlerinde, jet motorlarında, helikopter rotor kanatlarında, türbinlerde özetle çalışma şartları altında katı partiküllerin etkisine maruz kalan tüm mühendislik uygulamalarında bu aşınma tipini yoğun olarak görmek mümkündür.

Partikül erozyonu literatürde çok çalışılan popüler konulardan biridir. Erozif aşınmaya ilişkin çalışmalar iki temel nedenle yürütülmektedir. Birincisi erozif aşınmaya maruz kalan makine parçalarının ya da malzemelerinin aşınma karakteristiklerinin belirlenmesi ve bu çıktılar ile mevcut aşınma riskleri göz önünde bulundurularak malzeme seçimi ve parça tasarımlarının yapılmasıdır. Bu amaçla literatürde mühendislik malzemelerinin erozif aşınma davranışları detaylı bir şekilde incelenmiş ve malzemelerin erozif aşınma dayanımlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Erozif aşınma, bir anlamda sistemlere zarar veren, onları aşındırıp kullanılamaz hale getiren bir faktör iken diğer yandan makine parçalarına ve mühendislik malzemelerine istediğimiz yüzey özelliklerini kazandırmak adına etkilerini bilerek kontrollü bir şekilde kullanmayı istediğimiz bir yöntemdir. Bu noktada partikül erozyonu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların ikinci amacı malzeme yüzeyinde istenilen pürüzlülüğün ve yüzey özelliklerinin elde edilebilmesi için malzemenin hangi parametreler altında aşındırılması gerektiğinin belirlenmesidir. Bu amaçla erozif aşınma endüstriyel uygulamalarda mühendislik malzemelerinin yüzeylerinin temizlenmesi, pürüzlendirilmesi ve istenilen özelliklerde yüzeylerin elde edilmesi amacıyla kullanılan alternatif bir yüzey işleme yöntemidir.

Diğer yandan erozif aşınma son yıllarda mühendislik malzemelerinin işlenmesi için kullanılan su jeti ile kesme işlemlerinin de temelini oluşturmaktadır. Bu noktada mühendislik malzemelerinin su jeti ile kesilmesi işlemlerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve geliştirilebilmesi amacıyla da erozif aşınma araştırmaları gerçekleştirilmektedir.

Son olarak erozif aşınma son yıllarda malzemelerin yüzeylerinin çok hassas bir şekilde şekillendirilmesi (malzemelerin yüzeylerine mikro kanalların açılması ve farklı geometrilerde hassas bir şekilde işlenmesi) amacıyla bir talaşlı şekil verme tekniği olarak da kullanılmaktadır.

Titanyum ve alaşımları yüksek dayanım/ağırlık oranı ve yüksek sıcaklık özellikleri ile başta havacılık ve uzay endüstrisinde çok geniş kullanım alanına sahiptir. Titanyumun mükemmel korozyon direnci bu metali kimya, gıda ve biyomedikal alanlarında tercih edilir. Bu malzemeler için yeni kullanım alanları sürekli araştırılmakta ve keşfedilmektedir. Tüm bu olumlu özelliklerine karşın titanyum, zayıf aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın gerçekleştiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Aşınma sonucunda, titanyum kullanılan uygulamalarda enerji ve malzeme kaybı olmaktadır. Aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan oksit yapı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Titanyum ve alaşımlarının katı partikül erozyonu karakteristikleri; kullanım emniyetleri ve ömürleri açısından da çok önemlidir. Diğer yandan titanyum alaşımları vücut ile olan yüksek uyumları neticesinde implant uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu noktada implant uygulamaları öncesinde titanyum alaşımının yüzey özellikleri ve pürüzlülüğü büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasında bir yandan titanyum alaşımlarının pekçok farklı parametre altında erozif aşınma dayanımları karakterize edilirken, diğer yandan titanyum alaşımlarının istenen yüzey özellikleri ve pürüzlülükte işlenmesine olanak verecek katı partikül erozyonu parametrelerinin optimizasyonunun gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Ti6Al4V hedef malzemesi farklı partikül açıları, püskürtme basınçları, püskürtme mesafeleri, partikül çarpma hızları ile farklı boyutlarda aşındırıcı partiküller ve bu partiküllerin birbirleri içerisinde farklı oranlarda karıştırılması ile hazırlanan aşındırıcı partikül karışımları kullanılarak test edilmiştir. Bu çalışmaların sonrasında tüm bu parametrelerin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına etkileri irdelenmiştir.

Katı partikül erozyonu ile mühendislik malzemelerin yüzeylerinin temizlemesi, pürüzlendirilmesi ve hazırlanması uygulamalarında genellikle silika kumu, kuru buz ve alumina gibi malzemeler kullanılmaktadır. Özellikle silika kumu ile gerçekleştirilen kumlama işlemi sırasında ortaya çıkan serbest silis insan sağlığına zarar vermektedir. Bu nedenle silika kumunun bu uygulamalar için kullanımı birçok ülkede yasaklanmış ve alternatif malzeme arayışına girilmiştir. Tez çalışmasında bu bilgiler ışığında insan sağlığına tamamen zararsız, aşındırma özelliği yüksek ve maliyeti düşük garnet minerali aşındırıcı partikül olarak kullanılmıştır. Garnet minerali su jeti ile işleme uygulamalarında da tercih edilen bir mineraldir. Bu noktada tez çalışmasında tüm bu nedenler göz önünde bulundurularak aşındırıcı partikül olarak garnet mineralinin kullanılmasına karar verilmiştir. Tez çalışması sonucunda katı partikül erozyonu ile yüzey temizleme ve hazırlama uygulamalarında garnet malzemesinin birçok parametre altında efektifliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çıktı tez çalışmasının bir diğer özgünlüğüdür. Literatürde garnet malzemesinin malzemelerin katı partikül erozyonu davranışına etkileri üzerine gerçekleştirilmiş az sayıda çalışma bulunmaktadır.

Gerçek hayatta erozif aşınmanın eşit boyutlara sahip partiküllerin etkisi altında gerçekleşmeyeceği açıktır. Ancak katı partikül erozyonu ile ilgili literatür çalışmalarının büyük bir kısmında, eleklerden geçirilerek partikül boyut dağılımı mümkün olduğunca homojen hale getirilmiş aşındırıcılar kullanılmıştır. Katı partikül erozyonunun anlaşılabilmesi için bu yaklaşımın çok yanlış olmadığı düşünülebilir. Ancak çölde esen bir rüzgar neticesinde katı partikül erozyonu ile aşınan bir helikopter pervanesi düşünüldüğünde, katı partikül erozyonunun tam olarak anlaşılabilmesi için farklı boyutlarda partiküllerden oluşan karışımların erozif aşınmaya olan etkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla tez çalışmasında 20-40 mesh ve 180 mesh boyutlarında garnet partiküllerinin birbirleri içerisinde farklı konsantrasyonlarda karıştırılması ile partikül karışımları hazırlanmış, böylece doğada görülen partikül erozyonun daha doğru bir yaklaşım ile simule edilmesi amaçlanmıştır. Partikül karışımların içeriğinin değişimine bağlı olarak erozif aşınmanın nasıl değiştiği belirlenmiştir. Bu çalışmalar da doktora tez çalışmasının özgün çıktılarından birini oluşturmaktadır.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar “erozif aşınma deneyleri” ve “karakterizasyon çalışmaları” olarak iki ana başlık altında toplanabilir.

İlk aşamada Ti6Al4V hedef malzemesi birçok farklı parametre altında özel olarak tasarlanan erozif aşınma test düzeneği ile aşındırılmıştır. Bu aşamada Ti6Al4V alaşımı 6 farklı partikül çarpma açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) ve 3 farklı püskürtme basıncı (1,5 bar, 3 bar ve 4 bar) ile 4 farklı boyutta aşındırıcı partikül (20-40 mesh, 80 mesh, 120 mesh ve 180 mesh) ve 3 farklı partikül karışımı kullanılarak (% 75 20-40 mesh - % 25 180 mesh, % 50 20-40 mesh - % 50 180 mesh ve % 25 20-40 mesh - % 75 180 mesh) kullanılarak aşındırılmıştır. Bu parametrelerin kombinasyonlarında çok sayıda erozif aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar da Taguchi deney tasarımı da kullanılarak bu parametrelerin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışı üzerindeki etkinliği de araştırılmış ve bu parametrelerin önem durumları belirlenmiştir. Bu çalışmalar ile kullanılması düşünülen test parametreleri önem durumları göz önüne alınarak azaltılmıştır.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların ikinci aşamasını “karakterizasyon çalışmaları” oluşturmaktadır. Bu aşamada farklı parametreler altında aşındırılan Ti6Al4V alaşımının çok sayıda karakterizasyon yöntemi kullanılarak erozif aşınma davranışının detaylı bir şekilde irdelenmesi ve anlaşılması amaçlanmıştır. Tüm bu parametrelerin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışı üzerindeki etkinliği farklı ve özgün metodolojiler kullanılarak incelenmiştir. Karakterizasyon çalışmalarının ilk aşaması erozyon oranının erozif aşınma test parametrelerine bağlı olarak değişiminin incelenmesidir. Bu çalışmalarda partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının erozyon oranına olan etkileri irdelenmiş ve açıklanmıştır. Karakterizasyon çalışmalarının ikinci aşamasında Taguchi Deney Tasarımı ile Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm içerisinde iki farklı deney deseni kurularak tahminlenen erozyon oranı değerleri ile deneysel erozyon oranı değerleri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve partikül boyutunun etkileri irdelenmiş ve Taguchi Deney Tasarımının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının incelenmesi amacıyla kullanılmasının uygunluğu belirlenmiştir. Karakterizasyon çalışmalarında bu çalışmalardan sonra farklı parametreler altında aşındırılan Ti6Al4V alaşımının yüzeyleri farklı yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Aşınmış yüzeylerin karakterizasyonu tez çalışmasının en önemli özgün değerini oluşturmaktadır. Kullanılan yöntemler ile ilgili bilgiler ve bu

yöntemler ile elde edilen sonuçlar tez çalışması içerisinde ayrıntılı bir şekilde verilmiştir. Bu bölüm içerisinde tez çalışmasında kullanılan yöntemler ile ilgili kısa bilgiler ve bu yöntemlerin özgün değerleri aktarılacaktır.

Malzemelerin erozif aşınma davranışlarının araştırılmasında taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları büyük önem arz etmektedir. Literatürde konu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir çoğunluğunda malzemelerin erozyon oranları ile birlikte aşınmış yüzeylerin morfolojileri SEM ile birlikte incelenmiş ve malzemenin yüzey morfolojisinin incelenen parametrelere (hedef malzeme özellikleri, operasyon parametreleri, aşındırıcı partikül özellikleri, sıcaklık, nem, çevresel özellikler vb.) bağlı olarak değişimi gözlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda malzemede görülen erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle tez çalışmasında birçok farklı parametrenin Ti6Al4V alaşımın erozif aşınma davranışına olan etkilerinin daha net anlaşılabilmesi, aşınan malzemelerin yüzey morfolojilerinin değişimi ve malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla çok detaylı bir SEM çalışması gerçekleştirilmiştir. SEM çalışmalarında aşınmış yüzeylerin farklı detektörler ile farklı modlarda (SE ve BSE) görüntüleri alınmış, malzeme yüzeyine saplanan partiküller enerji dağılım spektrometresi analizi (EDS) ile derinlemesine incelenmiş ve son olarak aşınmış yüzeyler farklı görüntüleme açılarında SEM fotoğrafları alınarak incelenmiştir. SEM çalışmalarında tüm bu çalışmaların sonuçları bir arada değerlendirilerek Ti6Al4V alaşımın erozif aşınma davranışı yorumlanmıştır. Özellikle aşınmış yüzeylerin farklı görüntüleme açılarında alınan SEM fotoğrafları büyük bir özgünlük taşımaktadır. Tez çalışmasında başarılı bir şekilde uygulanan açılı görüntüleme tekniği ile erozif aşınma mekanizmaları ve bu mekanizmaların oluşturduğu yüzey morfolojileri literatürde var olmayan bir görüntüleme ve açıklama ile ortaya konmuştur. Bu görüntülerin farklı modlarda çekilen görüntüler ve EDS analizi sonuçları ile bir arada değerlendirilmeleri ile malzemelerin erozif aşınma davranışlarının elektron mikroskobisi ile incelenmesine özgün bir bakış açısı kazandırılmıştır.

Tez çalışmasında optik profilometre yardımıyla aşınmış yüzeylerin yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Bu analizler kapsamında farklı parametreler altında aşındırılan numunelerin yüzeylerinin 2 ve 3 boyutlu topografik görüntüleri hazırlanmıştır. Bu

çalışmalarda özellikle bu görüntüler kullanılarak partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkileri başarılı bir şekilde ilişkilendirilmiş ve yorumlanmıştır. Literatür alışmaları incelendiğinde erozif aşınma ile aşındırılmış yüzeylerin bu metodoloji ile karakterizasyonu ile ilgili limitli sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatürde çalışmaların çoğunluğunda yüzey pürüzlülük değerleri temaslı profilometreler ile çizgisel olarak ölçülmüş ve sayısal sonuçlar verilmiştir. Tez çalışmasında ise aşınmanın gerçekleştiği bölgede seçilen kontrol alanını taranara 3 boyutlu yüzey topoğrafyaları elde edilmiş ve bu alana ait pürüzlülük değerleri hesaplanmıştır. Bu noktada tez çalışmasında çok sayıda parametrenin malzemenin yüzey morfolojisine ve pürüzlülüğüne olan etkileri geniş kapsamlı incelenmiş ve tez çalışmasına önemli bir özgünlük kazandırılmıştır.

Katı partikül erozyonu kompleks hasar mekanizmalarına sahip tribolojik bir süreçtir. Katı partikül erozyonuna maruz kalan malzemelerde oluşan hasar tipleri; aşındırıcı partikül boyutu, partikül çarpma açısı, partikül çarpma hızı vb. birçok parametreye bağlı olduğundan her bir faktörün sebep olduğu hasarın karşılaştırmalı görüntülerinin bir arada sunulması önem arz etmektedir. Katı partikül erozyonuna bağlı olarak ortaya çıkan hasarların değerlendirilmesinde tahribatlı ve tahribatsız malzeme muayene ve inceleme yöntemleri kullanılabilir. Doktora tezinde hedef çıktılardan önemli bir tanesi görüntü işleme yöntemleri ve algoritmaları kullanılarak farklı parametreler altında aşındırılmış malzemelerin yüzeylerinin görüntü işleme metodolojisi ile derinlemesine analiz edilmesidir. Görüntü işleme yazılımlarının yaygınlaşması ve algoritmaların gelişmesi, son yıllarda farklı disiplinlerde görüntü işleme tekniklerinin kullanılarak malzeme karakterizasyonu yapılmasının nn açmıştır. Görüntü işleme yöntemlerinde optik ve stereo mikroskoplar, optik profilometreler, 3 boyutlu tarayıcılar ve yüksek çözünürlüklü masaüstü tarayıcılar birçok farklı disiplinde kullanılmış ve başarılı sonuçlara ulaşılmıştır. Özellikle masaüstü tarayıcıların kullanımı son yıllarda ne çıkmıştır. Malzemelerde kaynak sonrası dikişlerin kontrolünden, talaşlı imalat sonrası köşe kalitesinin belirlenmesine, kompozit yapılarda fiber yönlenmelerinin tespitine kadar birçok farklı çalışmada masaüstü tarayıcılar ve görüntü işleme algoritmaları birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Tarayıcı kullanımıyla pahalı karakterizasyon cihazlarıyla

gerçekleştirilebilecek incelemeler çok daha ucuz maliyetlerle ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Yüksek çözünürlükte tarayıcılardan elde edilen görüntüler gelişmiş algoritma programları yardımıyla malzeme muayene yöntemi olarak güvenilir sonuçlar vermektedir. Tez çalışması kapsamında görüntü işleme programları ve yüksek çözünürlüklü masaüstü tarayıcılar kullanılarak bir erozif aşınma muayene metodu geliştirilmiş ve bu metodoloji ile Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışı karakterize edilmiştir. Bu noktada tez çalışmasında uygulanan görüntü işleme yöntemi erozif aşınma hasar bölgesinin makro boyutta incelenmesi amaçlanmıştır.

Görüntü işleme çalışmaları iki temel başlık altında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların birinci aşamasında görüntü işleme yöntemi ile aşındırılmış yüzeylerin üç boyutlu yüzey morfolojileri elde edilmiş ve yorumlanmıştır. Bu çalışmalarda partikül çarpma açısı, partikül boyutu, püskürtme basıncı ve partikül karışımlarının etkilerine bağlı olarak yüzey morfolojisinin değişimi karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır. Literatürde malzemelerin katı partikül erozyonu davranışlarının analiz edilmesine bugüne kadar doktora tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme yöntemlerine rastlanmamıştır. Bu bölüm içerisinde elde edilen görüntüler yardımıyla tez çalışmasında incelenen parametrelerin Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışına etkileri ve bu parametrelere bağlı olarak meydana gelen yüzey morfolojileri detaylı bir şekilde incelenmiş ve tartışılmıştır.

Görüntü işleme çalışmalarının ikinci aşamasını aşındırılmış yüzeylerin piksel sayısı – grilik değeri eğrilerinin elde edilmesi ve bu eğrilerin karşılaştırılmalı olarak incelenerek katı partikül erozyonunda etkin parametreler ile bu eğriler arasındaki korelasyonun kurulması oluşturmaktadır. Diğer bir ifade ile bu çalışmalarda görüntü analiz yöntemi ile elde edilen aşınmış yüzeylerin piksel sayısı–grilik değeri eğrilerinin yorumlanarak Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Bu noktada gerçekleştirilen çalışmalarda aşınmış yüzeylerin piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin tez çalışmasında incelenen parametrelere bağlı olarak önemli değişimler gösterdiği sonucuna varılmıştır. Elde edilen eğrilerin ortalama ve maksimum grilik değerlerinin, standart sapmalarının, sayılan maksimum piksel sayısı gibi bir çok değerin partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımlarının etkilerine bağlı olarak değiştiği net bir şekilde belirlenmiştir.

Eğrilerin bu parametreler bağılı olarak değışimleri ile malzemenin erozif aşınma davranışı arasında başarılı bir korelasyon kurulmuştur. Bu eğrilerin grilik değeriierinin, standart sapmalarının ve maksimum piksel sayılarının incelenen parametrelere bağılı olarak düzgün ve mantıklı bir şekilde uyumlu olmalarının tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme metodunun doğruluğunun ve hassasiyetinin yüksek olduğunu göstermiştir. Bu noktada kurulan korelasyonların görüntü işleme ile yüzey morfolojisi ile ilgili güvenilir ve özgün bilgiler sağlanabildiğini göstermiştir. Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmalar sonucunda, uygulanan görüntü işleme yöntemlerinin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının incelenmesine eşsiz bir karakterizasyon yeteneğı kazandırdığı sonucuna varılmıştır. Bu noktada bu çalışmaların bugüne kadar malzemelerin erozif aşınma davranışlarının incelenmesi için kullanılmamış olması tez çalışmasının özgün değeriini gözler önüne sermektedir. Diğer yandan tez çalışmasında bu özgün değeri partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımları gibi çok sayıda parametre ile geniş bir yelpazede çalışılmış incelenmiştir. Bu çalışmaların malzemelerin erozif aşınma davranışlarının incelenmesine önemli bir yenilik ve katkı sağlayacağı kaçınılmazdır.

1. TİTANYUM VE ALAŞIMLARI

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, düşük yoğunluk ve iyi korozyon direncini bir arada bulunduran ender mühendislik malzemelerindendir. Bir arada bulundurduğu bu özelliklerden dolayı günümüzde birçok endüstriyel uygulamalarda titanyum metali veya alaşımları kullanılmaktadır.

Titanyum, hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle özellikle havacılık alanında tercih edilmektedir. Titanyum yüksek sıcaklıkta ergiyen bir metal olmasından ve yüksek sıcaklıklardaki dayanımından dolayı nikel ve kobalt içerikli alaşımlara, özellikle askeri alanda alternatif bir malzeme olmuştur. Korozyona olan direnci ile de kimya endüstrisi ve denizcilik uygulamalarının vazgeçilmez bir parçasıdır. Ayrıca son yıllarda ortopedik ve dental uygulama alanlarında da kullanılmaya başlanmıştır [1].

Titanyum $4,54 \text{ gr/cm}^3$ yoğunluğa sahip hafif bir metaldir. Bu yoğunluk alüminyum ($2,71 \text{ gr/cm}^3$) ile demirin ($7,87 \text{ gr/cm}^3$) arasındadır. Titanyum demirden daha yüksek bir ergime noktasına ($1668 \text{ }^\circ\text{C} > 1536 \text{ }^\circ\text{C}$), demir ile alüminyumun arasında ortalama bir elastikiyet modülüne sahiptir. Hafif bir metal olarak bilinen alüminyumun iki katı, demir veya nikelin ise yarı özgül ağırlığına sahiptir [2].

Tüm olumlu özelliklerine karşılık titanyum, sürtünme ve aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın meydana geldiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Titanyum kullanılan uygulamalarda, sürtünme ve şiddetli aşınma sonucu malzeme ve enerji kaybı yaşanmaktadır. Aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan oksit yapı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Zayıf olan bu özellikleri geliştirmek için günümüzde çok çeşitli yüzey işlemleri uygulanmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir [3].

1.1. Titanyumun Tarihçesi ve Dünyadaki Önemi

Titanyumu, 1791 yılında İngiliz araştırmacı ve mineralojist William Gregor keşfetmiştir. Günümüzde ilmenit olarak bilinen ve titanyum metalinin elementi olan, kara tuz olarak adlandırdığı maddeyi Helford bölgesindeki bir nehirden elde etmeyi başarmıştır. Bu tuzu manyetik etki altında demirden ayırtırmayı ve HCl ile dağlayarak yeni bir elementin oksidini elde etmeyi başaran Gregor, buna mekanit ismini vermiştir. Bundan 4 yıl sonra, Alman kimyager Martin Heinrich Klaproth, titanyum oksidi rutil (titanyum oksiti) adı verilen bir mineralden tamamen bağımsız hale getirmiş ve adını Yunan Mitolojisi'nden esinlenerek titanyum koymuştur [4].

Titanyum, dünyada yapısal olarak kullanılan metaller arasında alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer alırken; en çok rezervi olan metaller sıralamasında da dokuzuncu sırada yer almaktadır. Ancak doğada titanyum saf olarak bulunmamakta ve saf hale getirme işlemleri bu metali pahalı kılmaktadır [4]. Oksijen ve azota olan ilgisinden dolayı titanyumun saf olarak elde edilmesi yüksek bir teknoloji gerektirmiştir ve bu sorun ancak 1938–1940 yılları arasında Dr. Kroll'un geliştirdiği ve "Kroll Yöntemi" adı verilen işlemle çözülebilmıştır. Bu işlem, titanyum tetra klorürün koruyucu atmosfer ortamında magnezyum ile indirgemesine dayanır. Bu yöntemle elde edilen titanyumun yapısı sünger gibi gözenekli olduğundan bu metale "titanyum süngeri" de denilmektedir.

Titanyumun ilk uygulamaya yönelik üretimi, ilk uçuşunu 1952'de yapan DC-7 tipi uçağın motorundaki yanma odası ve uçağın kanatlarındaki motor bağlantı yeri için yapılmıştır. İlerleyen zamanlarda geliştirilen titanyum alaşımları; kompresör disklerinde, askeri ya da ticari uçaklardaki jet motorlarının pervane kanatları ile bu uçakların iskeletinde kullanılmıştır.

1960'larda kimyasal madde pompaları ve vanaları için ilk kez dökme titanyum kullanılmıştır. Yaklaşık on yıl sonra bazı uzay uygulamaları için dökme titanyum eşsiz bir malzeme olmuştur. 1970'lerin sonunda dökme titanyum satışları titanyum endüstrisi ile paralel olarak büyümüştür.

1979 yılında, üretilen titanyum miktarının % 35'i ticari uçaklar için, % 28'i korozyona yönelik uygulamalar için, % 37'si de askeri uçak ve füzeler için

kullanılmıştır. Titanyum uçak uygulamalarında hem uçağın iskeletinde hem de jet motorlarındaki parçalarda kullanılmıştır. Boeing 747, Douglas DC-10, Airbus A 300 ve Lockheed L-1011 gibi ticari yolcu uçaklarının jet motorlarındaki bazı parçalar için, yüksek özgül dayanıma sahip malzemelerin dışında başka bir malzemenin kullanılmasının uygun olmadığı saptanmıştır.

Genel olarak titanyum kullanımı uzay, uçak ve deniz sanayi alanlarında yoğunlaşmış olsa da, son otuz yılda bu metalin işleme yöntemlerindeki gelişmelere paralel olarak biyomedikal aparatlardaki ve dental implantlardaki kullanımı da artmıştır [1].

Titanyum ve alaşımlarının en büyük kullanımı şüphesiz ki uzay sanayinde gerçekleşmektedir. Bunun yanında son on yıllık dönemde; kimya endüstrisinde, makine imalatında, gemi yapımında, otomotiv endüstrisinde, yağ ve gaz endüstrisi ekipmanlarının imalatında, gıda sanayinde, tıp uygulamalarında ve sivil mühendislik uygulamalarında titanyum ve alaşımlarının kullanım oranı hızla artmaktadır [4].

Titanyum alaşımlarının ticari uygulamalar bazında en büyük dezavantajı yüksek yarı mamul maliyetidir. Bu maliyet yüksekliğinin nedenleri arasında; çıkarılma ve ayrıştırılma sırasında karmaşık proseslere ihtiyaç duyulması, yoğun olarak bulunmaması ve bu nedenle tesis yatırımlarını yeteri kadar karşılayamaması, son olarak da işleme maliyetlerinin yüksekliği sıralanabilir [4].

Titanyum rezervlerinin önemli bir kısmını Avustralya'nın doğu ve batı kıyılarındaki sahiller oluşturmaktadır. Avustralya'yı ABD, Mozambik ve Yeni Zelanda izlemektedir [1]. Titanyum ve alaşımlarının günden güne üretimi artmaktadır [5]. Metalik titanyumu Rusya % 36, Japonya % 36, Kazakistan % 25 ve diğer devletler % 3 oranında dünya piyasalarına arz etmektedirler [5].

1.2. Titanyum ve Alaşımlarının Genel Özellikleri

Mühendislik uygulamalarında kullanılan metaller arasında doğadaki yaygınlığı bakımından alüminyum, demir ve magnezyumdan sonra dördüncü sırada yer alan titanyum, kömür küllerinde ve volkanik kayalarda yoğun olarak bulunan bir metaldir [6].

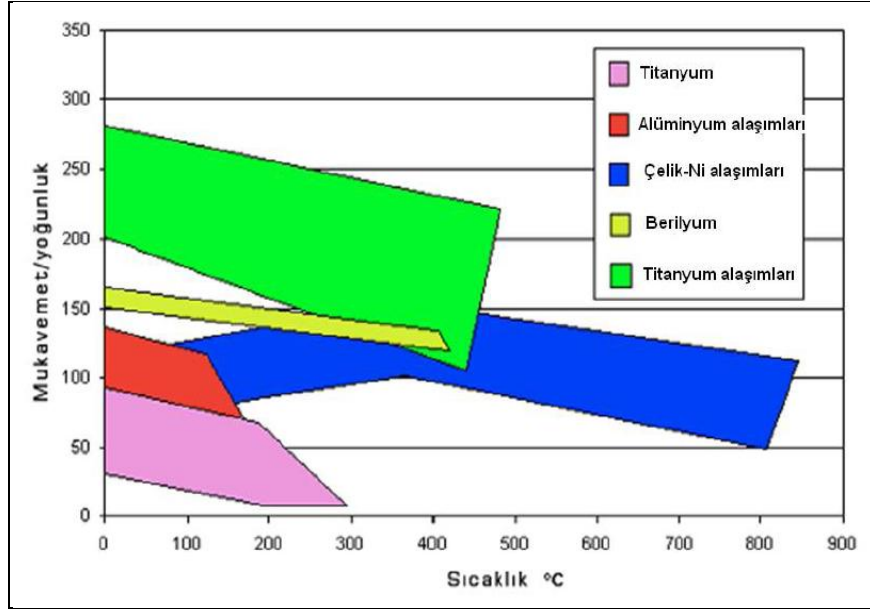
Titanyum, periyodik cetvelin 4. grubunda yer alan, çok sert, gümüşü beyaz, parlak bir elementtir. Ergime noktası 1668 °C, kaynama noktası 3287 °C, özgül ağırlığı 4,54 gr/cm³'tür. Metalik halde kuvarsı çizecek kadar serttir [7]. Tablo 1.1' de titanyum, alüminyum ve demirin bazı fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 1.1. Titanyum, Alüminyum ve Demir' in bazı fiziksel özellikleri

Özellikler	Titanyum	Alüminyum	Demir
Yoğunluk (gr/cm ³)	4,54	2,7	7,87
Elastiklik Modülü (GPa)	115	62	194
Ergime Noktası (°C)	1668	660	1536
Oda sıcaklığında kristal yapısı	SPH	YMK	HMK

Titanyum; çelik kadar dayanıklıdır ve çelikten % 45 daha hafiftir. Alüminyumdan ise % 60 daha ağır olmasına karşın dayanımı 2 kat daha fazladır (Tablo 1.1). Dayanımı ve asitlere karşı direnci nedeniyle, çeşitli alaşımların yapısına katılır. Deniz suyuna karşı üstün bir dayanım göstermesi nedeniyle deniz suyundan tatlı su elde edilen tesislerde ve tuzlu suya temas eden gemi donanım parçalarının yapımında kullanılır [8-10]. Aşağıda titanyumun üstünlükleri özetlenmiştir.

- Oksitlenmeye, ter asidine, korozyona, kimyasal maddelere karşı diğer alaşımlara göre 20 kat daha dayanıklıdır.
- Her biçimde mevcuttur. (Kütük, yuvarlak, altıgen, lama, çubuk, plaka, sac, tel vb).
- Kolaylıkla kaynak edilir.
- Yangına ve darbelere dayanıklıdır.
- Biyolojik uyumluluğa sahiptir ve toksit değildir.
- Fiyatı diğer yüksek performans malzemelerine yakındır.
- Uygun kriyojenik özellikleri (-150 °C' nin altındaki ortamlardaki davranışları) vardır [5].



Şekil 1.1. Farklı metallerde spesifik mukavemetin (mukavemet/yoğunluk) sıcaklığa bağlı değişimi [2, 3]

Titanyum ve titanyum alaşımları yüksek mukavemet, korozyon direnci ve düşük ağırlık gibi özellikleri bünyesinde bir arada barındıran önemli mühendislik malzemeleridir. Titanyum ve alaşımlarının spesifik mukavemetlerinin sıcaklığa bağlı değişimi ve farklı metaller ve alaşımlar ile karşılaştırması Şekil 1.1’de gösterilmiştir [3].

Endüstriyel olarak kullanımlarına 1952’li yıllarda başlanan titanyum ve alaşımları, nispeten yeni mühendislik malzemeleridir. Bu malzemeler, yüksek bir spesifik dayanıma (dayanım/yoğunluk oranı), yaklaşık 550°C’ ye kadar yüksek sıcaklık özelliklerine, oksitleyici asitlere ve kloritli (ClO_2) ortamlara karşı yüksek korozyon direncine sahiptirler [8].

Titanyum kimyasal yönden kuvvetli bir indirgeyicidir. Bu özelliği bazen olumlu bazen de olumsuz sonuçlar vermektedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda kimyasal ortamlara direnci oldukça yüksektir. Oksitleyici asitlere ve deniz suyuna karşı çok dayanıklı iken, göreceli olarak asitlere karşı direnci biraz daha düşüktür. Uygulamada asetik asit, sülfürik asit ve tartarın asit ortamlarında kullanılabilir. Diğer yandan klor gazı, hidroklorik asit, trikloro asetik asit ve fosforik asit içeren ortamlarda kullanılmamalıdır. Yükselen sıcaklıkla birlikte titanyumun yüzeyindeki koruyucu oksit tabakası parçalanmaya başlar ve

kullanılabilirliğini düşürecek derecede oksijen, azot ve hidrojen malzeme içerisine nüfuz eder. Metale nüfuz eden bu yabancı maddeler gevrekleşmeye ve çatlak oluşumuna sebebiyet verir [7].

Titanyum alaşımları iki belirgin özelliğiyle ön plana çıkmaktadırlar. Yüksek mukavemetleri ve üstün korozyon dayanımları, bu metal ve alaşımlarını havacılık sektörünün, kimya endüstrisinin ve medikal mühendisliğin vazgeçilmezi haline getirmiştir. Bu olumlu özelliklerine karşın titanyum, sürtünme ve aşınma özellikleri nedeniyle hareketli temasın gerçekleştiği mühendislik uygulamalarında yetersiz kalmaktadır. Titanyumun zayıf tribolojik özellikleri, yüksek ve değişken sürtünme katsayısı titanyum ve alaşımlarının kullanımını sınırlamaktadır. Bu nedenle titanyum ve alaşımları genellikle aşınmanın kritik olmadığı uygulamalarda tercih edilmektedir. Sürtünme ve aşınma sonucu titanyum kullanılan uygulamalarda enerji ve malzeme kaybı olmaktadır. Aşınma sonucunda korozyon direncini sağlayan koruyucu oksit yapı bozulmakta ve aşınmanın yanı sıra şiddetli korozyon da meydana gelmektedir. Titanyumun sürtünme ve aşınma özelliklerini geliştirmek için yüzey modifikasyon tekniklerinin uygulanması gerekliliği açıkça ortaya konmuştur. Zayıf olan bu özelliklerin geliştirilebilmesi için günümüzde çok çeşitli yüzey işlemleri uygulanmakta ve başarılı sonuçlar alınabilmektedir [9, 10].

1.3. Titanyum ve Alaşımlarının Kimyasal İçeriği

En önemli titanyum mineralleri rutil, ilmenit ve anatastır. Rutil, tetragonal sistemde kristallerin yapısına sahiptir ve özgül ağırlığı $4,2-4,4 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Rengi sarımsı kırmızı, siyah ve kızıl kahvedir ve kimyasal bileşimi " TiO_2 "dir [3]. İlmenit trigonal sistemde kristallerin özgül ağırlığı $4-4,5 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Rengi siyahtır ve kimyasal bileşimi FeTiO_3 'dir [7].

Saf titanyum, büyük oranda kullanıldığı çevrelerin gözüyle bakılırsa, çok değerli bir malzeme değildir. Tercih edilmesini sağlayan asıl özelliklerini düşük oranlarda eklenen alaşım elemanları ile kazanır [11].

Ticari saflıktaki titanyum içinde % 0,5-0,8 arasında yabancı madde bulunmaktadır. Titanyumu alaşımlandırmadaki esas amaç genellikle, korozyon dayanımını arttırmaktan çok mekanik özellikleri yükseltmektir. Alaşımlandırma ile titanyumun

çekme mukavemeti ve kopma uzaması değerleri yükseltilir. Alüminyum, oksijen, azot, karbon, kalay gibi elementler α -stabilizatör; hidrojen, gümüş, altın, krom, demir, vanadyum, magnezyum, molibden gibi elementler ise β -stabilizatör alaşım elementleri olarak adlandırılırlar. Katılan alaşım elementlerine bağlı olarak titanyumun mekanik, fiziksel ve kimyasal özellikleri de değişmektedir [7].

En çok kullanılan titanyum alaşım tipi Ti6Al4V sembolü ile anılan % 6 alüminyum ve % 4 vanadyum içeren alfa-beta alaşımıdır. Bu alaşımın endüstriyel uygulamalardaki oranı % 45'tir. Ti6Al4V alaşımların en önemli özellikleri; korozyona karşı yüksek direnci, sertliği ve dayanıklılığıdır. Bunların yanı sıra bu alaşımlar işlenebilirlik, fabrikasyon, üretim deneyimi ve ticari olarak elde edilebilirlik gibi özelliklerinden dolayı ekonomik olarak kullanışlı bir hale gelmişlerdir. Bu özelliklerinden dolayı tıbbi uygulamalar başta olmak üzere, hava araçlarında ve basınç tankları yapımında çok fazla tercih edilmektedirler. Ti6Al4V alaşımlarının kimyasal içeriği ve fiziksel özellikleri Tablo 1.2' de verilmiştir [6].

Günümüzde 100'den fazla titanyum alaşımı bilinmektedir. Bunların ancak 20-30 tanesi ticari kullanım sahasına sahiptir. Klasikleşmiş alaşımlar arasında Ti6Al4V tek başına, kullanılan toplam titanyum alaşımı miktarının yarısını oluşturmaktadır. Alaşımlandırılmamış titanyum ise kullanılan toplam miktarın % 20 ile % 30'unu teşkil eder [12].

Tablo 1.2. Ti6Al4V alaşımının fiziksel özellikleri ve kimyasal içeriği [12]

Fiziksel Özellikler	Değer	Kimyasal İçerik	Ti6Al4V
Yoğunluk (gr/cm ³)	4,42	Alüminyum, Al	6.00%
Erime Sıcaklığı (°C $\pm$ 15°C)	1649	Vanadyum, V	4.00%
Özgül Isısı (J/Kg °C)	560	Demir, Fe	0.10%
Hacimsel Elektrik direnci (ohm.cm)	170	Oksijen, O	0.15%
Isıl İletkenlik (W/m.K)	7,2	Nitrojen, N	0.01%
Isıl Yayılma Katsayısı (0-100 °C/°C)	8,6x10 ⁻⁵	Hidrojen, H	<0.003%
Isıl Yayılma Katsayısı (0-100 °C/°C)	9,2x10 ⁻⁵	Karbon, C	0.03%
Beta Dönüşüm Sıcaklığı (°C $\pm$ 15°C)	999	Titanyum, Ti	Denge

1.4. Titanyum ve Alaşımlarının İçyapı zellikleri

Titanyum allotropik karakterde bir malzeme olup, oda sıcaklığındaki sıkı paket hekzagonal (SPH) kristal yapıdaki α fazı, saf titanyum için yaklaşık 885 °C’de hacim merkezli kübik (HMK) yapıdaki β fazına dönüşmektedir. Bu sıcaklık “ β dönüşüm sıcaklığı” adını almaktadır. Oksijen, azot ve karbon gibi α fazını kararlı kılan elementlerin etkisiyle bu sıcaklık yükselirken; metalik kalıntılar veya alaşımların elementlerinin etkisiyle düşmekte ya da yükselebilmektedir [4].

Alaşımların elementlerinin ilavesi bu dönüşüm sıcaklığını ikiye bölmektedir. Tüm alaşımların α fazında olduğu sıcaklığa “ α dönüşüm sıcaklığı”; üstündeki sıcaklıklarda tüm alaşımların β fazında olduğu sıcaklığa “ β dönüşüm sıcaklığı” denilmektedir. Bu iki dönüşüm sıcaklığı arasında malzemenin mikro yapısında hem α hem de β fazı bulunmaktadır [4].

Alüminyumu, α fazını kararlı hale getiren ve dönüşüm sıcaklığını yükselten en önemli alaşımların elementidir. Ara yer elementlerden olan oksijen, azot ve karbon da α fazını kararlı hale getiren diğer elementlerdendir. Dönüşüm sıcaklığını düşürerek β fazını kararlı hale getiren iki grup element vardır. Bunlar β izomorf ve β ötektik elementleri olarak adlandırılırlar. İzomorf grup β fazı içinde tamamen cznebiyen molibden, tantal, vanadyum ve kolombiyum elementlerinden oluşmaktadır. Diğer grup olan β ötektik elementleri ise titanyumla ötektoid alaşımlar yapan elementlerdir. Bunlar manganez, demir, krom, silisyum, nikel, bakır ve kobalttır. Bu elementler α fazında düşük cznrlğe sahiptirler ve dönüşüm sıcaklığını düşürmektedirler. Gerek β fazını kararlı hale getirmek gerekse yüksek sıcaklıktaki kullanımlarda görülen metaller arası bileşiklerin oluşumunu azaltmak için, bu β izomorf grup elementleri alaşımların içerisine katılmalıdır [1].

Titanyum alaşımlarının özellikleri genel olarak , α ve β fazlarının yapıdaki hacimsel oranlarına ve dağılımlarına bağlılık göstermektedir. HMK β ile kıyaslandığında, SPH α daha yoğun paketlenmiştir ve anizotropik bir kristal yapıya sahiptir. α fazı β fazı ile karşılaştırıldığında, plastik deformasyona daha yüksek dayanım gösterdiği, sünekliğinin daha düşük olduğu, mekanik ve fiziksel özelliklerinin anizotropik olduğu, difüzyon hızının yaklaşık β difüzyon hızının iki katı olduğu ve daha yüksek sürünme dayanımı sergilediği söylenebilir. En önemli α kararlaştırıcı elementi olan

alüminyumun yoğunluğu titanyumun yaklaşık yarısıdır. Bu sebeple α alaşımlarında vanadyum ve molibden gibi daha ağır elementler kullanılsa da, α alaşımlarından daha hafiftirler. α alaşımları genelde orta derece mukavemete sahiptir. $\alpha+\beta$ alaşımları ve yarı kararlı β alaşımları ise, sırasıyla yüksek ve çok yüksek mukavemete sahip olabilirler. Ancak çok yüksek mukavemet değerlerine erişebilen β alaşımları bu özellik için sünekliklerinden taviz vermek durumundadırlar. Süneklik büyük ölçüde mikro yapıya bağlı olsa da, β alaşımlarına yaşlandırma sertleştirilmesi uygulanmadığı zaman sünekliği α ve $\alpha+\beta$ alaşımlarıninkine yakın olabilir [2].

Titanyumun yüksek oksijen afinitesi, oda sıcaklığında dahi yüzeyinde çok ince (nm mertebesinde) bir oksit tabakası oluşmasına sebep olur. Titanyum esaslı malzemelerin yüksek korozyon dayanımlarının sebebi yüzeyde oluşan bu oksit tabakasıdır. α alaşımlarının korozyon dayanımları, β alaşımlarından daha yüksektir [2].

1.5. Titanyum ve Alaşımlarının Sınıflandırılması

Titanyum alaşımları yapısında bulundurdıkları fazlara göre; α , $\alpha + \beta$ alaşımları ve β alaşımları olmak üzere başlıca üç gruba ayrılmaktadır. α alaşımının tüm yapısında α fazı bulunurken, β alaşımlarının yapısında büyük ölçüde β fazı bulunmaktadır. $\alpha + \beta$ alaşımları ise oda sıcaklığında yapılarında hem α hem de β fazı bulundurlar. Yapısında β fazından daha fazla α fazı içeren alaşımlara α' ya yakın alaşımlar denilmektedir [1].

Titanyum ve alaşımları;

- Alaşımlandırılmamış (Saf) Titanyum
- α alaşımları
- α -yakın alaşımları
- $\alpha+\beta$ alaşımları
- β alaşımları olarak da gruplandırılırlar [13].

1.5.1. Saf titanyum

Ticari saflıktaki titanyum (CP Ti), % 98,63-% 99,5 oranında titanyum içermektedir. CP Ti mikro yapısında oda sıcaklığında sıkı paket hegzagonal yapıdaki α fazında

bulunmakta olup 885°C’ de hacim merkezli kübik yapıdaki β fazına dönüşür. Ayrıca bu dönüşüm sırasında her iki fazın da bir arada bulunduğu küçük bir sıcaklık aralığı da vardır.

CP Ti, genellikle yüksek mukavemet gerektirmeyen ancak korozyon direncinin ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilir. Oda sıcaklığındaki alaşımsız titanyumun mikro yapısı % 100 oranında α fazındadır. Katkı elementlerinin, özellikle demirin, miktarı arttıkça mikro yapıda tane sınırlarında küçük fakat artan oranlarda β fazına rastlanır [8, 11].

Yaklaşık % 98-99,5 oranında Ti içeren alaşımsız ürünler, özellikle yüksek dayanımın gerektirmediği uygulamalarda, genellikle yüksek korozyon dirençlerinden dolayı tercih edilirler. Bu malzemeler, aynı zamanda yüksek şekillendirilebilirlik ve kaynak edilebilirliklerinden dolayı kullanılırlar. Saf titanyum alaşımlarının akma dayanımları ara yer ve empürite atomlarının oranına bağlı olarak 170-480 MPa arasında değişir. Tablo 1.3’ te alaşımsız titanyumun farklı ara yer elementi oranlarına sahip tipleri ve mekanik özellikleri görülmektedir [5].

Tablo 1.3. Ticari saflıktaki titanyum malzemelerin genel özellikleri [4]

ASTM standardı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Dönüşüm Sıcaklıkları (°C)		Katışkı Elementleri (ağırlıkça max %)				
			α	β	N	C	H	Fe	O
Grade 1	170	240	888	880	0,03	0,10	0,015	0,20	0,18
Grade 2	280	340	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25
Grade 3	380	450	920	900	0,05	0,10	0,015	0,30	0,35
Grade 4	480	550	950	905	0,05	0,10	0,015	0,50	0,40
Grade 7	280	340	913	890	0,03	0,10	0,015	0,30	0,25

Ticari saflıktaki titanyum, genellikle yüksek dayanım gerektirmeyen ancak korozyon dayanımının ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilir. Tablo 1.3' te görüldüğü gibi kimyasal içeriğine bağlı olarak akma dayanımı 170 MPa ile 480 MPa arasında değişen birçok saf titanyum malzeme vardır. Oksijen ve demir, bu malzemelerde öncelikli olarak bulunan katışkı elementleridir. Tablodan da görülebileceği gibi demir ve oksijen içeriği arttıkça malzemenin dayanımı da artmaktadır [4].

1.5.2. α titanyum alaşımları

Alüminyum, kalay veya zirkonyum içeren α alaşımları daha çok yüksek sıcaklık ya da çok düşük sıcaklıklarda tercih edilmektedir. α fazı zengin olan alaşımlar, β alaşımlarına göre yüksek sıcaklıklarda sürünmeye karşı genellikle daha dayanıklıdır. Çok düşük miktarda ara yer atomu içeren α alaşımları, sünekliğini ve tokluğunu çok düşük sıcaklıklarda dahi sürdürmektedir [2].

α alaşımları, $\alpha+\beta$ alaşımları ve β alaşımlarının aksine kararlı α fazına sahip olduklarından ısıtılma işlemi ile sertleştirilememektedir. Fakat soğuk işlem sonrası oluşan kalıntı gerilmeleri yok etmek için yeniden kristalleşme tavlama veya sadece tavlama işlemi yapılabilmektedir.

Bu alaşımların dövülebilme kabiliyeti çok düşüktür ve dövme sıcaklığı aralığı $\alpha+\beta$ alaşımları veya β alaşımlarından daha dardır. Dövme sırasında oluşan yüzey ve/veya göbek çatlakları bunu açıkça göstermektedir. Böyle bir oluşumu önlemek için dövme işleminde deformasyon miktarının daha küçük seçilmesi ve malzemenin sık sık tavlama işlemi gerekmektedir. Tek fazlı yapıya sahip α alaşımına Ti5Al12,5Sn alaşımı örnek olarak gösterilebilir [8, 11].

α alaşımları en çok kimya sanayi ve proses mühendisliğince kullanılır. Bu uygulamalarda gerekli olan çok yüksek korozyon dayanımı ve deformasyon kabiliyetine sahiptirler. CP-Titanyumun mukavemet gereksinimini karşılayamadığı yerlerde, en eski titanyum alaşımı olan ve uzun zaman önce kabul görmüş Ti5Al12,5Sn alaşımı tercih edilir. Düşük sıcaklıklı uygulamalarında (hidrojen depolama ve basınçlı araçlar) yaygın olarak kullanılmaktadır [8].

1.5.3. α -yakın titanyum alaşımları

α fazı sabitleyicileri olarak bilinen Al, O gibi elementleri fazla miktarda; Mo, V gibi β fazı sabitleyicilerini ise düşük miktarda içerirler. "Süper α " ya da " α -yakın alaşımlar" olarak bilinen bu alaşımların mikro yapısındaki α fazı yüksek kararlılığa sahiptir ve sınırlı miktarda β fazını kararlı kılan elementler içermektedir [8, 11].

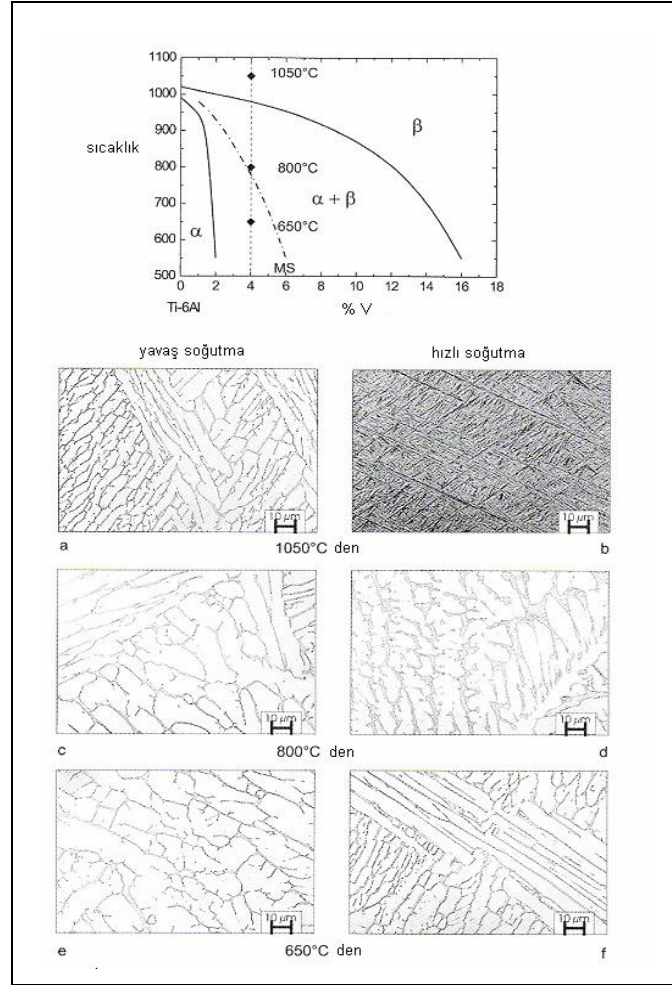
Klasikleşmiş biçimde, α -yakın alaşımlar yüksek sıcaklık gerektirecek uygulamalarda kullanılırlar. α alaşımlarının üstün sürünme dayanımı ve $\alpha+\beta$ alaşımlarının yüksek mukavemeti α -yakın alaşımlarda bir arada bulunur. Günümüzde çalışma sıcaklıkları 500-550 °C' ye kadar çıkmıştır. Ti8Al1Mo1V, yüksek sıcaklık için geliştirilmiş ilk titanyum alaşımıdır. Ancak yüksek alüminyum içeriği zayıf gerilmeli korozyon dayanımına sebep olur. Bu sebeple sonradan geliştirilen bütün titanyum alaşımları en fazla % 6'ya kadar alüminyum içeriğine sahiptirler. 1970'lerde yapılan bir çalışmada içerikte en fazla %0,1'e kadar olan silisyumun, Ti6Al2Sn4Zr2Mo'nin sürünme dayanımını çok arttırdığını ortaya koymuştur. Bugün en gelişmiş yüksek sıcaklık titanyum alaşımı Amerikan TIMETAL 834 olarak bilinir. Kullanım sıcaklığı üst limiti olan 600°C'de uzun süre kararlı davranmakta ve oksidasyona karşı koruma sağlamaktadır [14].

1.5.4. $\alpha+\beta$ titanyum alaşımları

Bu alaşımlar bileşimlerinde % 4-6 miktarı arasında β fazını kararlı hale getirecek alaşım elementleri içerirler. Bu alaşımların en önemlileri Ti6Al4V ve Ti6Al6V2Sn'dir [1]. Bileşimlerinde α ve β fazlarının kararlılığını arttıran bir ya da daha fazla kararlaştırıcı alaşım elementleri içerirler. α ve β fazını kararlaştırıcı elementlerin uygun bir şekilde ayarlanmasıyla oda sıcaklığında α ve β fazlarının karışımı olan bir mikro yapı elde edilebilmektedir. Tavlama sonrasında da yüksek süneklik, homojenlik ve yüksek dayanım sağlanmaktadır [11]. Şekil 1.2' de Ti6AlV alaşımında farklı sıcaklıklarda yavaş soğutma ve su vererek soğutma sonucunda oluşan mikro yapılar görülmektedir [1].

En yaygın kullanılan $\alpha+\beta$ alaşımı Ti6Al4V'dur. 1950'lerde geliştirilmiştir ve bilinen ilk titanyum alaşımları arasında gösterilmektedir. Yaygın kullanımı özellikle havacılık sanayinde önemli bir kriter olan en çok test edilmiş, denenmiş ve

geliştirilmiş titanyum alaşımı olmasını sağlamıştır. Diğer yaygın kullanıma sahip $\alpha+\beta$ alaşımları; yüksek mukavemet amaçlı geliştirilmiş Ti6Al6V2Sn, yüksek mukavemet ve yüksek tokluğa sahip Ti6Al2Sn4Zr6Mo, gaz türbin motorlarında 400 °C'a kadar olan sıcaklıklarda kullanılmak için geliştirilmiş Ti6Al2Sn2Zr2Mo2Cr alaşımlarıdır [8].



Şekil 1.2. Ti6Al4V'un a) 1050 °C' den c) 800 °C' den, e) 650 °C' den yavaş soğutma sonucunda, b) 1050 °C' den, d) 800 °C' den, f) 650 °C' den hızlı soğutma sonucunda oluşan mikro yapı görüntüleri [1]

Toplam titanyum üretiminin % 50'sinden fazlasını oluşturan Ti6Al4V alaşımından yüksek mukavemet değerleri elde etmek için ısıl işlem uygulanabilmektedir. Bu yüzden $\alpha+\beta$ alaşımları 350-400 °C arasındaki sıcaklıklarda ve özellikle yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılabilmektedir [2].

Mukavemet artışı için, alaşım ilk olarak yarı kararlı doymuş hale getirilmek üzere çözeltiye alma sıcaklığından hızla soğutulmakta ve daha sonra yaklaşık 500 °C’ de yaşlandırılmaktadır. Bu sırada mikro yapıdaki aşırı doymuş α ve β fazları çözünerek yapıya homojen bir şekilde dağılmakta ve sertlik artmaktadır [15].

1.5.5. β titanyum alaşımları

Bu alaşımlar bileşimlerinde önemli miktarda β fazını kararlaştırıcı alaşım elementleri içermektedir. Sertleştirilebilme, dövülebilirlik, soğuk şekillendirilebilme ve yüksek yoğunluk gibi özellikleriyle diğer titanyum alaşımlarından farklılık arz etmektedir. Bu alaşımlar oda sıcaklığında $\alpha+\beta$ alaşımları ile aynı mukavemet değerlerine sahip olmasına rağmen yüksek sıcaklıklarda bu değerler $\alpha+\beta$ alaşımlarından sonra gelmektedir [1].

β alaşımları kararsız alaşımlardır ve α fazının β matrisi içinde çökeltilmesi ile sertleştirilirler. Yüksek kırılma tokluğuna sahip olup molibden içermeleri bu alaşımların korozyona karşı direncini arttırmaktadır. $\alpha+\beta$ alaşımlarına göre daha iyi işlenebilirken ısıtılma daha yatkın olduğu bilinmektedir [14].

β alaşımları yüksek mukavemet, yüksek tokluk direnci, bazı alaşımlarda soğuk şekillendirilebilme, kolay ısıtılma işlemi, bazı alaşımlarda yüksek korozyon direnci gibi avantajlara sahip olmasına rağmen; yüksek yoğunluk, zayıf düşük ve yüksek sıcaklık özellikleri, segregasyon problemleri, bazı alaşımlarda düşük korozyon direnci gibi dezavantajlara da sahiptir [1].

β alaşımlarının sahip olduğu kırılma tokluğu karakteristiği, son yıllarda, uzay araçlarında kullanılması açısından önemini artırmıştır. Ayrıca Mo içeriğine sahip bazı β alaşımları iyi korozyon karakteristiğine de sahiptir.

Metastabil β alaşımları aynı zamanda;

- Oda sıcaklığında $\alpha+\beta$ alaşımlarından daha iyi şekillendirilebilirlik karakteristiği,
- Akma dayanımının kriter olarak alındığı sıcaklıklarda $\alpha+\beta$ alaşımlarından daha yüksek dayanımı,
- Kalın kesitli parçalarda ısıtılma işlemi $\alpha+\beta$ alaşımlarından daha iyi cevap vermesi, gibi özelliklere sahiptirler.

1.6. Titanyum ve Alaşımlarının Kullanım Alanları

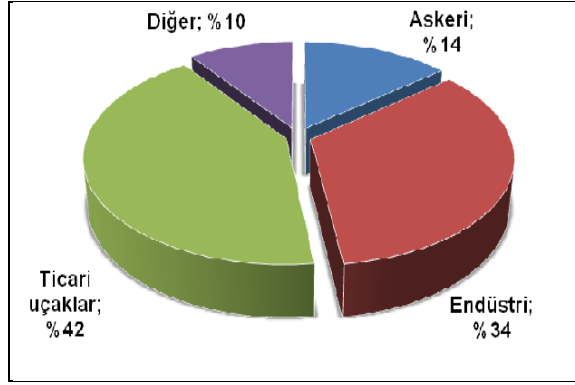
Titanyum kullanımını iki ayrı bölümde değerlendirmek gerekir:

A- Metal ve alaşımları

B- Oksit ve diğer bileşikleri

Metalik titanyum üstün fiziksel ve kimyasal özellikler gösterir. Bu nedenle; uzay aracı, uçak ve füze yapımında çok tercih edilen bir metaldir. Yüksek hız, titreşim ve yüksek ısının söz konusu olduğu araç kısımlarında, motor türbin kanatlarında ve benzeri aşırı yüklenen diğer araç bölümlerinde çok kullanılır. Kimyasal dayanıklılığı nedeniyle korozyon kimyasal madde üreten fabrikalarda sıkça kullanılır. Titanyum oksit şu anda bilinen en beyaz boya maddesidir. Titanyum beyazı adı altında boya endüstrisinde geniş çapta kullanılır. Bunun dışında; kozmetik endüstrisi, linolyum (muşamba), yapay ipek, beyaz mürekkep, renkli cam, seramik sıırı, deri ve kumaş boyanması, kaynak elektrotları yapımı ve kâğıt endüstrisi gibi pek çok alanda da kullanılmaktadır. Bu kadar çok kullanım alanı olmasına karşın; üretilen tüm titanoksidin % 60'ı boya endüstrisi tarafından tüketilir. Diğer bileşiklerinden titanklorit, kumaşların rengini ağartmada; tetraklorit yapay sis elde edilmesinde; titanyum karpit aşındırıcı olarak kullanılır [7].

Titanyum kullanımı ilk olarak havacılık ve uzay endüstrisiyle başlarken zamanla söz konusu üstün özellikleri nedeniyle birçok alana yayılmaya başlamıştır. Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle havacılık uygulamalarında kullanılırken, iyi korozyon direnci göstermesi ile kimya endüstrisinde ve denizcilik uygulamalarında vazgeçilmez bir malzeme olmuştur. Diğer yandan biyomedikal uygulamalarda (ortopedi ve dişçilik) her üç özelliği nedeniyle kabul görmüştür [16]. Şekil 1.3' te dünyadaki titanyum tüketiminin oranları görülmektedir.



Şekil 1.3. Dünyadaki titanyum tüketim oranları [2, 3]

Uzay roketlerinin en önemli parçalarını titanyum alaşımlar oluşturmaktadır. Sürtünme yüzünden yüksek sıcaklıklara ulaşan roket uçlarında, yakıtın yandığı motor bölümünde ve gazların egzoz çıkışlarında aşırı ısınma sorunu titanyum alaşımların yüksek erime sıcaklıkları (1677°C) sayesinde ortadan kaldırılmıştır. Titanyum alaşımların kullanımı geçmiş yıllarda yüksek maliyetleri açısından sadece yarış otomobillerinde ve özel üretim otomobillerde sınırlı kalırken, günümüzde üretim tekniklerindeki gelişmeler sayesinde otomotiv endüstrisinde kullanımı giderek artmıştır. Titanyum alaşımların otomotiv endüstrisinde kullanım amaçlarından en önemlisi; otomobil ağırlığını azaltarak, CO yayılımı ile ortaya çıkan küresel ısınma sorununu olabildiğince azaltmaktır [6].

Titanyum ve alaşımlarının; kimyasal, endüstriyel, denizcilik ve uzay ile ilgili uygulamaların geniş bir yelpazesinde üstün, oldukça güvenilir ve ekonomik olduğu teknik açıdan kanıtlanmıştır. Metalin kuvvetli ve rijit yapısı, düşük özgül ağırlığı ve göreceli hafif oluşu, yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı ve korozyona karşı direnci, kullanımının bu özel alanlarda yaygınlaşmasına neden olmuştur. Son otuz yılda metalin yeni işleme yöntemlerinin gelişimine paralel olarak biyomedikal aparatlardaki ve dental implantlardaki kullanımı artmaktadır [17].

Titanyumun genel kullanım alanları Türkiye için de geçerlidir. Ülkemizde; kaynak elektrotları endüstrisi, boya endüstrisi, tekstil endüstrisi başlıca kullanım alanlarıdır. Bunların yanı sıra deri, lastik, likit gaz, çelik ve seramik endüstrilerinde de kullanılır [7].

Titanyumun hala diğer yaygın kullanıma sahip metaller gibi kesintisiz üretim yöntemine sahip olmayışı ve cevherlerinin düşük zenginlikte oluşu nedeniyle pahalı bir malzemedir. Yine de diğer metallerin bir arada sunamadığı özelliklere sahip oluşu sayesinde çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır [17].

1.6.1. Biyomedikal uygulamalarda titanyum ve alaşımlarının kullanımı

Biyomalzemeler, insan vücudundaki organ ya da dokuların işlevlerini yerine getirmek veya desteklemek amacıyla kullanılan malzemeler olup; metaller, seramikler, polimerler ve kompozitler olmak üzere 4 gruba ayrılırlar. Biyomalzemelerde en önemli özellik biyouyumluluk olup, kendisini çevreleyen dokuların normal değişimlerine engel olmayan ve dokuda istenmeyen tepkiler (iltihaplanma, pıhtı vb.) oluşturmeyen malzemelerdir. Metalik biyomalzemelerden olan titanyum ve titanyum alaşımları, kemikle bağlanması iyi olan ve doku tarafından kabul edilirliliği yüksek olan biyomalzemelerdir [2]. Şekil 1.4' te vücuttaki dokuların titanyum alaşımları üzerinde gelişimi görülmektedir.



Şekil 1.4. Dokuların titanyum alaşımları ile uyumu [2]

Titanyum alaşımları yüksek korozyon dayanımı özellikleri nedeniyle insan vücudunda “İmplant” olarak kullanılan en önemli metallerdir. İnsan vücudunda bulunan asidik sıvının ph değeri 7,4’ tür. Titanyum alaşımları bu asit değerinden etkilenmedikleri için insan vücuduna adaptasyon bakımından en uygun metallerdir [6].

Nikel-titanyum alaşımları, deforme edildikten sonra, ısıtıldıkları zaman ilk şekillerine dönebilme özelliğine sahiptirler. Bu özellik, “şekil hafıza etkisi” olarak

adlandırılır. Bu alaşımın şekil hafıza etkisi, ilk olarak Buehler ve arkadaşları tarafından gözlemlenmiştir. Şekil hafıza etkisinin gerekli olduğu bazı biyomalzeme uygulamaları; diş köprüleri, kafatası içerisindeki damar bağlantıları, yapay kalp için kaslar ve ortopedik protezlerin üretiminde kullanılırlar [7]. Aşağıda titanyum ve alaşımlarının, biyomedikal uygulamalardaki avantajları özetlenmiştir;

- Uzun süreli implantasyonda (deri içine yerleştirme) iyi biyouyumluluğa sahiptirler.
- Enjekte edilen maddelerle birlikte, kimyasal reaksiyona girme olasılıkları azdır.
- Manyetik olmadığından, manyetik rezonans için uyumludurlar.
- Yoğunlukları düşük olduğundan hafiftirler.
- Hipoalerjiktir (alerjik özelliği az).
- Mekanik dayanımları bu uygulamalar için uygundur.
- Oksit tabakası, vücut içinde titanyumu korozyona karşı dirençli kılar.
- Titanyum alaşımının elastiklik modülü diğer tüm implant materyallerine nazaran kemiğe daha yakındır [2, 7].

Son yıllarda titanyum ve titanyum alaşımlarının, medikal ve dental uygulamasında ciddi bir artış görülmektedir. Yeni işleme yöntemlerinin gelişimine paralel olarak biyomedikal ürünlerdeki kullanımı artmaktadır. Bugün titanyum ve alaşımları protez eklem, cerrahi splint, damar stentler ve bağlayıcıları, dental implant, kuron köprü ve protez yapımında kullanılmaktadır [18].

Titanyum oksijenle çok çabuk reaksiyona girdiği için yüzeyinde daima koruyucu bir titanyum dioksit tabakası görülür. Bu sayede korozyona karşı yüksek direnç gösterir dolayısıyla doku uyumu en iyi olan metaldir. Günümüzde metal alerjisinin korozyon kaynaklı olduğu kanıtlanmıştır. Titanyum korozyona karşı dirençli olduğu için metal alerjisi olan hastalarda kullanılabilir. Titanyum alaşımları mikro cerrahinin hassasiyetine uygundur. Havacılık ve uzay sanayisinin ihtiyaçları ile gelişmiş olan titanyum, mikro cerrahi alanında vazgeçilmez hale gelmiştir. Yine çok önemli bir özellik olarak titanyumun bazı alaşımları aşınmaya dayanıklıdır ve uzun ömürlüdür. Sert oluşuyla ince uçları güçlü kullanıma imkân sağlamaktadır. Korozyona karşı çok yüksek dayanıma sahiptir. Titanyum alaşımlarının yorulma dayanımı da diğer

metallerin yorulma dayanımlarına göre önemli ölçüde üstündür. Son yıllarda en çok kullanılan metal implant, titanyumdur [2].

Titanyum 25 yıldan daha çok süreden beri kemik içi ve subperiostal implant (cerrahi yöntemle açığa çıkarılan kemik üzerinden ölçü alınarak hazırlanan implantlar) olarak kullanılmaktadır. Kemik içi implantlar çubuk, post ve blade şeklinde saf veya alaşımlı titanyumdan yapılır. İmplant yüzeyindeki oksit tabakasının inert etkisi fizyolojik sıvı, protein, sert ve yumuşak dokunun metal yüzeyini kavramasını sağlar. Canlı doku ve implantın statik ve fonksiyonel olarak bu birleşme işlemine “osseointegrasyon” denilmektedir. Titanyum ayrıca bio-uyumlu implant malzemesi olarak da başarıyla kullanılmıştır [18].

“Biyo-entegrasyon”, biyoaktif bir yüzeyde kemik gelişimini tetikler ve kemik ile implant arasındaki bağı direkt etkiler. Biyoaktivite, lifli doku arasına girmeksizin bir malzemenin canlı dokuya bağlanma özelliğidir. Kemikle bağlanması iyi olan ve doku tarafından kabul edilirliliği yüksek olan titanyum, yerleştirildikten sonra vücudun bir parçası haline gelir. Bu da implanta maksimum dayanım sağlamaktadır [7].

Titanyum; ticari saflıkta titanyum ve Ti6Al4V olmak üzere iki şekilde kullanılır. Saf titanyum mekanik özellikler açısından zayıftır ve protez üzerine poroz kaplama olarak kullanılır. Poroz kaplamalar kalça protezlerinde ve diş implantlarında, kaplamadaki porların içinde kemik büyümesini sağlamak amacıyla sık sık kullanılırlar. Yapay bağlantı ve yerleştirme tedavilerinde yaygın olarak kullanılan Ti6Al4V alaşımları, paslanmaz çelikler ve kobalt-krom alaşımlarının yaklaşık yarısı kadar bir elastik modüle sahiptir [2].

Sonuç olarak titanyum esaslı alaşımların biyolojik olarak uyumlu oldukları histolojik deneylerle kanıtlanmış olup tek dezavantajlarının oldukça pahalı olmalarıdır [2].

1.6.2. Titanyum ve alaşımlarının havacılık uygulamaları

Titanyum kullanımı ilk olarak uçak ve uzay endüstrisiyle başlarken zamanla, söz konusu üstün özellikleri nedeniyle birçok alana yayılmaya başlamıştır. Hafifliği ve yüksek mukavemeti nedeniyle havacılık uygulamalarında kendine yer bulmuştur. Titanyumun havacılık sanayinde yaygın kullanımının önemli sebepleri;

- Hafiflik,
- Çalışma sıcaklığı,
- Korozyon direnci,
- Polimer matrisli kompozitler ile galvanik uyumluluktur.

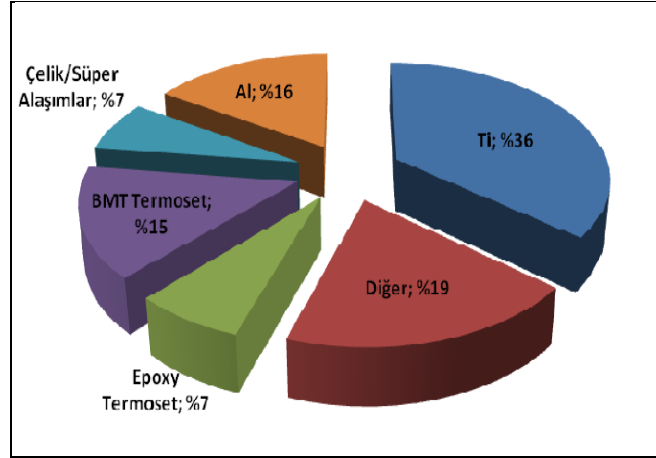
Günümüzde otomobil sanayi ürettiği bir aracın ağırlığındaki bir kilogramlık hafifletme için 15 dolar maliyeti tolere edebilirken, havacılıkta bu rakam atılan her bir kilogram fazladan ağırlık için 1500 dolara çıkmaktadır. Eğer üretim çok daha ileri teknoloji gerektiren uzay faaliyetleri ile ilgili ise bu rakam 15000 dolar civarına yükselmektedir. Bu durum titanyumun diğer üstün özellikleri dışında sadece düşük yoğunluğu sayesinde kendisine havacılık sanayinde önemli bir pazar yakaladığını açıklayan güzel bir örnektir [2, 3].

Uçakların yüksek korozyon direnci ve kısmi mukavemet gerektiren içindeki yaşam alanlarında sıkça ticari saflıkta titanyum kullanılır. Yüksek üretim maliyetlerine rağmen uçakların ana iniş takımları için dövme titanyum alaşımlarının kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Yüksek mukavemet çeliklerinden imal edilen ana iniş takımlarının kullanım ömürleri dolmadan sıkça gerilmeli korozyon şüphesi ile değiştirilmeleri bu malzeme yerine, yeterli mukavemete sahip dövme titanyum alaşımlarının tercih edilmesini sağlamıştır. Bu tercih aynı zamanda büyük bir ticari yolcu uçağının 270-300 kg civarında bir ağırlık azaltılmasını da sağlamaktadır. Ticari uçaklarda kullanımı ile kıyaslandığında askeri uçaklardaki titanyum kullanımının daha fazla olduğu görülmektedir. Askeri uçaklardaki yapısal parçaların maruz kaldığı termal ve mekanik yükler daha yüksek sürat ve zorlayıcı manevralar nedeniyle artmaktadır. Askeri uçaklarda gövde imalatında kullanılan titanyum oranı % 50'lere varmaktadır. Askeri uçaklarda kullanılan titanyum parçalar arasında en büyük olan ve kritik parça, kanatlardan maruz kaldığı tekrarlı ve yüksek yükleri taşıma görevindeki kanat kutusudur [2, 3].

Büyük ticari uçaklara bakıldığında, gövde yapısında ortalama % 5-9 arasında titanyum kullanılmaktadır. Ancak çalışma sıcaklığının, çok dikkate alındığı motorlarda ise titanyum kullanımı % 33-38 civarındadır. Uçak motorlarında hacimsel oranlara bakıldığında titanyum alaşımları en çok kullanılan malzemedir.

Havacılık sanayinde, mekanik özellikler kadar üretilen parçaların kullanım ömürleri de önemlidir. Titanyum alaşımlarının kullanıldığı parçaların uzun kullanım ömürleri, o parçaları fiyat-kullanım ömrü kıyaslamasında öne geçirmektedir. Uçak gövdelerinde yapısal eleman olarak titanyum kullanılmasındaki maksat, yorulma çatlağı ilerleyişini durdurmaştır [2, 3]. Şekil 1.5’ te F22 savaş uçağında kullanılan malzemelerin oranı verilmiştir.

1940’ların sonunda geliştirilen Ti6Al4V alaşımı hala havacılık uygulamalarında önemli bir yere sahiptir. Alüminyum alaşımlarının, yüksek mukavemet çeliklerinin veya nikel esaslı süper alaşımların yüksek sıcaklıktaki kararlılıklarının yetersiz kaldığı durumlarda titanyum alaşımları ön plana çıkmaktadırlar [2, 3].



Şekil 1.5. F22 savaş uçağında kullanılan malzemelerin oranları görülmektedir [2, 3]

Titanyumun havacılıkta ana kullanım alanlarından biri de gaz türbin motorlarıdır. Modern gaz türbin motorlarının ağırlıkça % 33’ü titanyum alaşımlardan oluşmaktadır. Titanyum alaşımların uçak motorlarında kullanımı 1950’li yıllarda başlamıştır. İlk olarak kompresör kanatçıkları titanyumdan imal edilmeye başlanmış, daha sonra kompresör disklerinin de titanyumdan üretimine geçilmiştir [2, 3]. Titanyum, 593 °C’ye kadarki operasyon sıcaklıklarında en yaygın kullanılan malzemedir.

Uçak sanayisinde en yaygın olarak kullanılan titanyum alaşımları ve bunların özellikleri şöyledir;

- % 99,0 Ti: İyi işlenebilirlik ve orta düzeyde mukavemet özelliklerine sahiptir. Uçaklarda yanma duvarları, kompresör kaplamaları, egzoz çıkış kaplamaları, gövde bölme duvarlarında geniş çapta kullanılır. 20°C' deki yoğunluğu 4,54 gr/cm³'tür. Tavlama sıcaklığı 590-732 °C'dir, gerektiğinde gerilme giderme tavlaması yapılır. Bu işlem 537°C' de 15-20 dakikadır. Bundan sonra havada soğutma uygulanır. Gaz altı koruyuculu ark kaynağı, direnç kaynağı ve nokta kaynağı uygulanır.
- Ti6Al4V α - β Tipi Alaşım: 315°C sıcaklıklara kadar yüksek mukavemete sahiptir. Uçakların gaz türbin kompresör kapakçıklarında ve disklerinde, dövme uçak bağlantılarında, preslenmiş uçak gövde yüzeylerinde, metal levha halindeki gövde parçalarında kullanılır.
- Ti5Al2,5Sn α Tipi Alaşımı: Uçak egzoz bağlantılarında ve diğer dövme levha bileşenlerinde 480 °C' ye kadar çalışır. Roket yakıt tanklarında, uçak gaz türbini kompresörlerinin yataklarında, kaynaklı statör bağlantılarında, içi boş kompresör kanatçıklarında ve kaynaklı borularda geniş çapta kullanılır. 20°C' deki yoğunluğu 4,46 gr/cm³ tür. Tavlama, 830°C' de 30 dakika ya da 880°C' de 10 dakikadır. 537 ya da 560°C' de 1-2 saat tavlamadan sonra gerilme giderme işlemi yapılmalıdır. Ticari saf titanyuma uygulanan kaynak işlemleri bu alaşıma da yapılabilir.
- Ti-8Mn Alaşımı: 93-315°C arasında çalışan uçak kaplama ve birincil yapı elemanlarında kullanılır. Tam tavlama, 680-700°C' de 1 saattir. Sonra havada soğutulur. Ergitme kaynağı uygulanamaz. Ancak nokta kaynağı dikkatlice yapılmış konstrüksiyonlarda kullanılabilir.
- Ti7Al4Mo Alaşımı: Uçak gaz türbin kompresör kanatçıklarında, disklerinde kullanılır. 20°C' deki yoğunluğu 4,48 gr/cm³ tür.
- Ti4Al4Mn Alaşımı: Uçak gövde elemanlarında kullanılır. 20°C' deki yoğunluğu 4,52 gr/cm³'tür. Tavlanırken 720°C' de 2 saat ısıtılır ve dakikada 2°C düşecek biçimde fırında soğutulur [7].

1.6.3. Titanyum ve alaşımlarının otomotiv endüstrisi uygulamaları

Titanyum otomotiv endüstrisinde ilk kez 1950'lerin ortalarında kullanılmaya başlanmıştır. General Motor firmasının "Titanium Firebird II" adlı deneysel aracının tüm dış yüzeyi titanyum kullanılarak tasarlanmıştır. Hiç üretilmeyen bu araç, hava sürtünmesi kaynaklı ısınmadan korunmaya ihtiyaç duyan hızlı yarış arabaları hariç titanyum dış yüzeyli tek araçtır.

Yakıt tasarrufu sağlayan ve çevreye daha az zarar veren araçlara olan talebin artması araçların ağırlığının hafiflemesi ve performansın arttırılmasını gerektirmiştir. Bu noktada yüksek korozyon direnci ve güce sahip titanyum alaşımları başlıca tercih maddesi olmuştur. Ancak titanyumun maliyeti arttırması otomotiv endüstrisinde daha yaygın olarak kullanılmasının önündeki en büyük engeldir ve kullanımını yarış otomobilleri, motorları ve Formula 1 araçları gibi yüksek performans ve dayanıklılık gerektiren araçlarla sınırlamıştır.

1990'ların sonunda "Altezza" modellerinde motor supabında titanyum kullanan Toyota, seri ve toplu üretimde ilk kez titanyum kullanan otomotiv firması olmuştur. Titanyum supapların üretiminde toz metalurjisi yöntemi kullanılmıştır. Giriş supaplarının üretiminde Ti6Al4V/TiB tozu, yüksek ısı çıkış supaplarında ise Ti-Al-Zr-Sn-Nb-Mo-Si/ITiB tozu kullanılmıştır. Altezza'nın motorunda 16 supap bulunmaktadır ve bunların ağırlığı çelik supaplarda yaklaşık 700 gram iken Altezza'da 400 gramdır.

Süspansiyon yayları çelik yerine titanyumun kullanımının oldukça ekonomik olduğu bir otomotiv elemanıdır. Özellikle titanyumun çeliğe oranla çok daha düşük elastik modüle ve düşük kayma modülüne sahip olması tercih sebebidir. Geleneksel süspansiyon yayı malzemesiyle karşılaştırıldığında düşük modül, artan süspansiyon sapmasına ve bir sarmal hareketinde daha az süspansiyon hareketine yol açmaktadır. Böylelikle ağırlık sadece titanyumun düşük yoğunluğundan değil aynı zamanda süspansiyon sarmallarının daha kısa olmasından da kaynaklanmakta ve hem artan taşıma kapasitesine hem de motor ya da yolcu alanının daha geniş olmasına katkıda bulunmaktadır.

Formula1 araçları uzun süre motosiklet yarışlarında da kullanılan titanyum yaylardan faydalanmıştır. Ancak dünyada ilk kez seri üretim araçta titanyum yay kullanan grup Volkswagen olmuştur. Lupo "FSI", 2000 yılından beri arka süspansiyonlarında titanyum kullanılan küçük bir otomobildir.

Titanyumun pahalı bir malzeme olması kullanım yaygınlığının önündeki en önemli engeldir. Yakın gelecekte titanyum fiyatlarının çok fazla düşmesi beklenmemektedir. Umut edilen yüksek hacimli otomotiv pazarında fiyatların havacılık alanındakinin yarısı ya da üçte biri oranında ucuzlayacağı ve böylece otomotiv endüstrisinde de titanyumun daha yaygın olarak kullanılmasıdır [2, 3].

1.6.4. Titanyum ve alaşımlarının diğer kullanım alanları

Titanyum asit yağmuru, volkanik serpinti, kentsel kirlilik gibi şiddetli atmosfer koşullarına maruz kalan parçalarda da kullanılmaktadır. Burada titanyum binanın atmosfer koşullarından en az hasar almasını sağlamaktadır [2, 3].

Titanyumun bir başka avantajı da paslanmaz çeliğin yarısı, alüminyum da üçte biri kadar bir ısı genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Bu durum inşasında fazla cam ya da beton kullanılan binalarda titanyum kullanımını ön plana çıkarmaktadır. Düşük ısı genleşme katsayısının bir sonucu olarak hareketli çatılar gibi büyük titanyum yapılarda gece gündüz ısı farkının neden olduğu gerilim en aza indirilebilmektedir [2, 3].

Titanyum alaşımları yüksek performanslı malzemeler olarak bilinmektedir. Yeni kullanım alanları araştırılırken yine yüksek performans gerektirecek alanların araştırılması gerekmektedir ve bu durum özellikle yüksek performans gerektiren spor dallarını öne çıkarmaktadır. Titanyum ve titanyum alaşımlarının kullanıldığı başlıca alanlar golf, tenis, bisiklet, su altı sporları, dağcılık, dağ yürüyüşü ve kış sporlarıdır. Örneğin golf oynarken ana amaç topu mümkün olduğunca uzağa atabilmektir ve bunu sağlamak için golf sopasının ucu en önemli elemandır. Önceleri ağaç kullanılarak üretilen uçlar daha sonra çelik kullanılarak üretilmeye başlanmıştır. 1990'ların ortalarında ise ilk kez titanyum kullanılarak üretilen uçlar pazara sürülmüştür. Düşük ağırlıklı metaller kullanmak üreticilere daha büyük uçlar üretip

ağırlığı hafif tutma şansını tanımaktadırlar. Üretimde genellikle Ti6Al4V kullanılmakla birlikte Ti3Al2,5V gibi diğer $\alpha+\beta$ alaşımlar da kullanılmaktadır [2, 3].

1.7. Titanyum ve Alaşımlarının Aşınma Davranışları

Titanyum ve alaşımları yüksek mukavemet düşük ağırlık ve iyi korozyon direnci gibi mükemmel mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olmasına rağmen sürtünme ve aşınmanın yer aldığı uygulamalarda yetersiz kalmaktadır. Titanyumun kayma sırasında karşı malzemeye çok güçlü yapışma özelliğinden dolayı kayma sırasında sürtünme katsayısı sabit değildir ve çok büyük değerlere ulaşabilmektedir. Titanyumun zayıf tribolojik özellikler sergilemesi; titanyumun elektron konfigürasyonundan, kristal yapısından ve yağlayıcıların yetersizliğinden kaynaklanmaktadır.

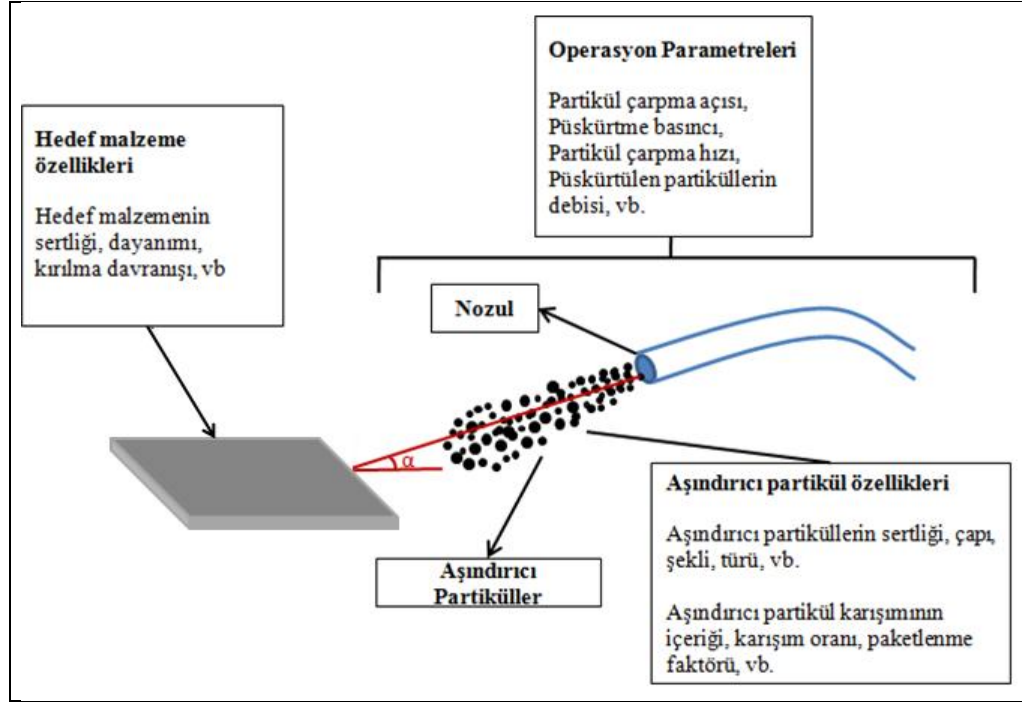
Titanyumun elektron konfigürasyonu düşük değerli bir d-band karakterine sahiptir. Bundan dolayı titanyumun yüzeyi aşırı reaktif özellik taşır. SPH yapısına sahip metaller iyi bir sürtünme özelliğine sahip olmasına rağmen bu durum titanyum için pek geçerli değildir. Bunun nedeni metallerde ideal sıkı paket oranı (c/a) 1,633 iken bu değer titanyumda 1,588'dir. Bu durum, taban düzlemlerinin yanı sıra prizmatik ve piramidal kayma düzlemlerini kaymaya teşvik eder. Kayma sistemlerinin artması, sünekliliği ve aşınmanın maruz kaldığı yüzeyde plastik deformasyonu artırır. Titanyumun zayıf tribolojik özellik göstermesinin diğer önemli nedenlerinden biri yağlayıcılardır. Çoğu metalde başarılı olan yağlayıcılar, titanyum alaşımlarında kullanıldığında yetersiz kalmaktadırlar. Ayrıca titanyumun düşük ısıl iletkenliği de yağlayıcıların etkisi azaltmaktadır. Yağlayıcıların kullanılmasının bir amacı yüksek ısıl iletkenliğe sahip yüzeyler arasındaki sürtünmeden kaynaklanan ısıyı önlemektir. Ama titanyumun ısıl iletkenliğinin düşük olması yağlayıcının bu işlevi yerine getirmesini önlemektedir [1].

2. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Malzemelerin aşınması, malzemelerin performansını belirleyen önemli parametrelerden biridir [19]. Aşınma genel olarak malzemelerin yüzeyinde izafi bir hareket ve mekanik bir etki ile meydana gelen malzeme kaybıdır [20]. Bir sıvı ya da gaz akımı tarafından taşınan farklı geometrik boyut ve yapıdaki taneciklerin, temasta bulundukları katı yüzeylerinde sürekli darbe etkisi yaparak oluşturdıkları hasar erozyon aşınması olarak tariflenmektedir. Katı partikül erozyonunda, malzeme yüzeyine belirli bir hızla hareket eden sert partiküllerin çarpması sonucunda yüzeyde malzeme kaybı gerçekleşir [21]. Uzay ve havacılık uygulamalarında, enerji dönüşüm sistemlerinde, jet motorlarında, helikopter rotor kanatlarında, türbinlerde ve kömür dönüştürme santrallerinde vb. bu aşınma tipini yoğun olarak görmek mümkündür. Aşındırıcı partiküller hareketli kanatlara, valf deliklerine, boru bağlantılarına, boru dirseklerine ve diğer yüzeylere çarparak şiddetli aşınmalar meydana getirmektedir [22].

Diğer tribolojik süreçlerde olduğu gibi katı partikül erozyonu da kompleks bir süreçtir. Erozyon mekanizmalarının temel ilkelerinin anlaşılabilmesi için yapılan çalışmalar 20. yüzyılın son yarısında başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. Bütün bu yıllar boyunca bilim adamlarının ilgileri geleneksel malzemelere, özellikle de metallere odaklanmıştır [23].

Katı partikül erozyonu sırasında meydana gelen değişimler birçok faktöre bağlıdır. Aşındırıcı partiküllerin çarpma açısı, hızı, debisi ve boyutu, aşındırıcı partiküllerin karışım oranı ve aşınan malzemenin özellikleri katı partikül erozyonunda etkin olan en önemli parametrelerdir [24]. Şekil 2.1' de katı partikül erozyonuna etki eden parametreler gruplandırılarak şematik olarak verilmiştir. Bu bölüm içerisinde malzemelerin katı partikül erozyonu davranışını etkileyen önemli parametreler kısaca açıklanacaktır. Bir sonraki bölümde ise literatürde Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmalar verilecektir.



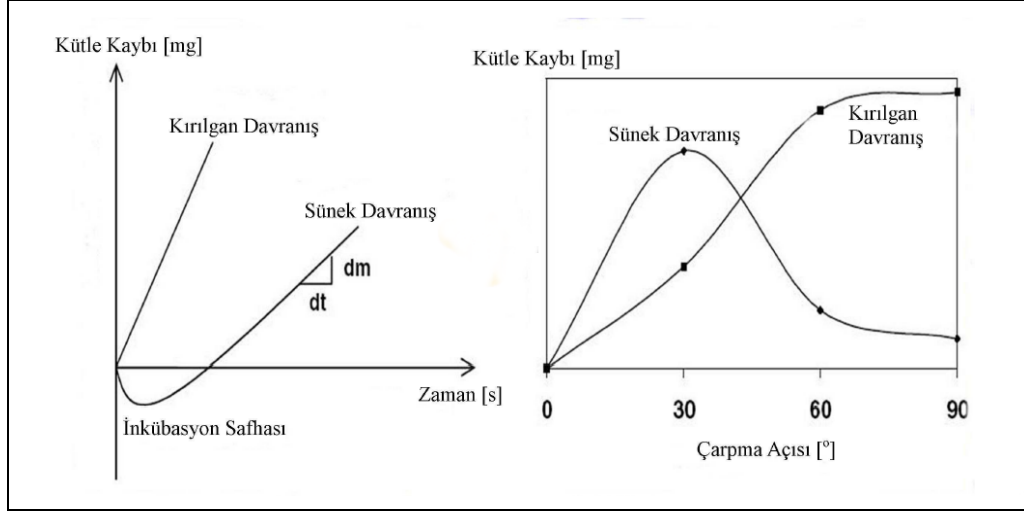
Şekil 2.1. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler

2.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı

Partikül çarpma açısı malzemelerin katı partikül erozyonu davranışlarını etkileyen önemli parametrelerden biridir. Partikül çarpma açısına bağlı olarak, katı partikül erozyonu iki şekilde incelenebilir [25]:

- Dik çarpma açılarındaki erozyon (açısı = 90°)
- Eğik çarpma açılarındaki erozyon ($0^\circ < \text{açısı} < 90^\circ$)

Partikül erozyonu, düşük çarpma açılarındaki iki cismin sürtünmesine benzer bir mekanizmaya sahiptir, çünkü partiküller etkileşim süresince malzeme yüzeyi boyunca bir yol izlerler. Yüksek çarpma açılarındaki ise aşınma mekanizması tipik çarpma şeklindedir.



Şekil 2.2. Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [25].

Şekil 2.2' de tasvir edildiği gibi kırılgen malzemelerde maksimum malzeme kaybı yüksek çarpma açılarında ortaya çıkarken, sünek malzemelerde malzeme kaybının en fazla düşük çarpma açılarında ($\sim 30^\circ$) ortaya çıktığı görülmektedir. Malzeme kaybının çarpma zamanıyla değişimi dikkate alındığında ise sünek davranış gösteren malzemelerde aşınma zamanla lineer orantılı hale gelmeden önce hedef malzeme ağırlığının arttığı gelişim safhasının (inkübasyon periyodu) varlığı söz konusu olabilmektedir. Bu periyot aşındırıcı partiküllerin sünek hedef malzemeye gömülmesiyle ortaya çıkar. Aşındırıcı partiküllerin ardışık olarak hedef malzeme yüzeyinden ayrılmasından sonra kararlı erozyon davranışı gözlemlenir [23, 26, 27]. Çarpma enerjisindeki kaybın büyük kısmı hedef malzeme yüzeyini pürüzlendirirken ortaya çıkar [28, 29].

Erozyon davranışlarındaki farklılıklar, kauçuklar için yırtılma ve yorulma; sünek metaller ve polimerler için kesme ve sürülme; seramikler, camlar ve gevrek polimerler için çatlak oluşumu ve gevrek kırılma gibi çeşitli malzeme taşınması mekanizmaları şeklinde ortaya çıkmaktadır [30].

Partiküllerin hareket hızı bileşenlerini yatay ve düşey bileşenler olarak ayırmak mümkündür. Sert partiküller özellikle sünek malzemeleri aşındırırken düşük çarpma açılarında daha az çarpma, ağırlıklı olarak yatay hız bileşeni ile malzeme yüzeyini çizme ve kesme mekanizmalarını harekete geçirmektedir. Açı büyüdükçe partikül hızının dikey bileşeni artmakta ve çarpma etkisine benzer bir etki mekanizması ağırlık kazanmaktadır. Bu mekanizmaların etkisi ile sünek malzemelerde çarpma

açısı küçük açılardan başlayarak giderek arttırıldığında orta dereceli çarpma açılarında aşınmanın maksimuma eriştiği gözlenmektedir. Partiküllerin malzeme ile temas etmeleri sonrası kaymaları ve dönmeleri de malzeme ile etkileşimde farklı sonuçlar doğurmaktadır.

Erozyon aşınmasındaki kütle kaybı çarpma açısının bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünde sünek ve kırılğan malzemeler farklı özellikler gösterir. Sünek malzemelerin karakteristik özelliği düşük çarpma açılarında (15° – 30°) maksimum erozyon göstermeleridir. Kırılğan malzemeler maksimum erozyon davranışını normal çarpma açılarında (90°) gösterirler. Fiber takviyeli kompozitler, maksimum erozyonun 45° – 60° arasında ortaya çıktığı yarı-sünek davranış gösterirler [31, 32].

2.2. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı

Aşındırıcı partikül hızı aşınma süreci üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir [33]. Eğer partikül çarpma hızı çok düşük ise, çarpma anındaki gerilmeler plastik deformasyon oluşumu için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder [31]. Hız arttığında, aşınan malzeme partikülün çarpmasına bağlı olarak plastik deformasyona uğrayabilir. Bu sistemde, aşınma tekrarlanan plastik deformasyonla oluşur. Kırılğan aşınma davranışında, aşınma alt yüzey kırılması şeklinde meydana gelir. Çok yüksek partikül çarpma hızlarında, darbeye maruz kalan yüzeyde lokal ergime ortaya çıkabilir.

Konu ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde aşınan malzemelerde partikül hızının arttırılması ile aşınma miktarının genellikle arttığı söylenebilir [34].

2.3. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debisi

Partikül akış debisi (birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı partikül kütlesi) erozyon aşınmasını yakından etkileyen parametrelerden biridir. Teorik olarak, bütün aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye eşit çarpma açısı ve hızda çarptıkları kabul edildiğinden aşınma miktarı aşındırıcı partiküllerin akış debisinden bağımsız olmalıdır. Ancak pratikte, ölçülen aşınma oranı üzerinde partikül debisinin önemli etkileri vardır [32, 35-37]. Belirli bir akış oranı eşik değerine kadar erozyon aşınma miktarının akış debisiyle doğru orantılı olduğu rapor edilmiştir. Bu limit değerın gelen ve geri seken aşındırıcı partiküller arasındaki etkileşimin bir sonucu olduğu

söylenbilir [27]. Her ne kadar aşındırıcı akış debisinin etkisi temelde yukarıda bahsedilen etkileşimlere bağlansa da, farklı mekanizmalar da oluşabilir ve erozyon aşınmasını etkileyebilir. Süreç, her çarpmadan sonra oluşan bir geçici reaksiyonlar dizisi olarak değerlendirilebilir. Akış debisi arttığında, ilgili yüzeydeki çarpmalar arası zaman azalır. Bundan dolayı bir sonraki çarpmadan önce bozulma reaksiyonu için daha az zaman kalacaktır ve böylece bozulmanın derecesi ve ona bağlı olarak da erozyon aşınması miktarı düşecektir [35]. Yukarıdaki analizlerden seçilen malzemenin erozyon davranışını etkilememesi için, partikül etkileşimi ve çevresel bozulma etkilerini ortadan kaldıracak bir özel debi miktarı seçilmesinin gerekli olduğu sonucu çıkarılabilir.

2.4. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu

Malzeme yüzeyine çarpan partiküllerin boyutları katı partikül erozyonunda önemli bir rol oynamaktadır [21, 33, 38, 39]. Son yıllarda aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda iki farklı görüş ileri sürülmüştür.

G. Sundararajan, D.P. Mondal, M. Dünder ve diğerleri aşındırıcı partikül boyutunun erozyon miktarı üzerinde güçlü bir etkisi olduğunu, ancak erozyon miktarının kritik bir değer üzerinde partikül büyüklüğünden bağımsız olduğunu ifade etmişlerdir. Deneyler sonucunda, bu kritik değere kadar partikül boyutunun arttırılması ile erozyon miktarının arttığını raporlamışlardır [21, 38, 40, 41].

Q. Chen ve D.Y. Li katı partikül erozyonunda aşındırıcı partikül boyutunun etkisini Newton'un hareket kanunlarına dayandırılmış dinamik bilgisayar modellemesi ile incelemişlerdir. Çalışmalar sırasında üç farklı aşındırıcı partikül boyutunun etkisi aşındırıcı partikül debisi eşit tutularak incelenmiştir. Böylece aşınan malzeme yüzeyine gönderilen toplam aşındırıcı partikül miktarı eşit tutularak, sadece partikül boyutları değiştirilmiştir. Deneyler sonucunda partikül boyutunun artışı ile aşınma oranının artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu artışın partikül boyutunun ve partiküllerin taşıdığı kinetik enerjinin artış göstermesi nedeniyle gerçekleştiği anlatılmıştır [42].

Tabakoff, Vittal, Heuer ve diğerleri ise aşındırıcı partikül boyutunun erozyon miktarını çok düşük oranda etkilediğini ifade etmişlerdir. Ancak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda partikül boyutunun arttırılması ile belirli bir partikül boyut aralığında aşınma mekanizmasının değişim gösterdiği ve bu aralıkta aşınma miktarının önemli ölçüde artış gösterdiğini tespit etmişlerdir. Aşınma mekanizmasının değişim gösterdiği partikül boyut aralığının altında ve üstünde ise partikül boyutunun arttırılmasının erozyon miktarını çok az miktarda arttırdığını belirlemişlerdir [33, 39, 43].

Aşınma mekanizmasının aşındırıcı partikül boyutlarına bağlı olarak gösterdiği değişim incelendiğinde; küçük partikül boyutlarında malzemede hasarın mikro kesme mekanizması ile gerçekleştiği, büyük partikül boyutlarında ise hasarın mikro çatlama ve mikro kırılma mekanizmaları ile gerçekleştiği belirlenmiştir. Küçük boyutlu partiküllerin kinetik enerjilerinin düşük olması sebebiyle aşınma oranının düşük olduğu görülmüştür. Büyük boyutlu partiküllerin yüksek kinetik ve darbe enerjileri ile malzemede çatlak oluşumuna yol açarak malzeme yüzeyinden büyük parçalar kopardığı ve yüksek aşınma oranlarına neden olduğu tespit edilmiştir [39, 44].

Eğik açılı partikül erozyonunda gevrek malzemelerin yüzeylerinde radyal çatlaklar oluşmaktadır [45]. Malzemelerde radyal çatlak oluşumu aşınmayı hızlandırır ve malzeme kaybını artırır. Aşındırıcı partikül boyutlarının arttırılması ile malzemede daha derin radyal çatlakların oluştuğu ve aşınma oranının arttığı gözlemlenmiştir [41].

Katı partikül erozyonu mekanik ve metalurjik faktörlerden etkilenen karmaşık bir yüzey hasar prosesidir [42]. Aşındırıcı partikül boyutlarının aşınma oranına etkilerinin hedef malzemeye göre değişiklik göstereceği açıktır. Özellikle malzemenin kırılma karakteri (gevrek, sünek veya yarı-sünek) aşınma oranını önemli derecede etkilemektedir.

2.5. Aşındırıcı Partiküllerin Karışım Oranı

Erozif aşınma davranışının incelenmesi hususunda ağırlıklı olarak tek boyutta partiküllerin etkisine dikkat edilmiştir. Ancak uygulamada erozif aşınmanın farklı

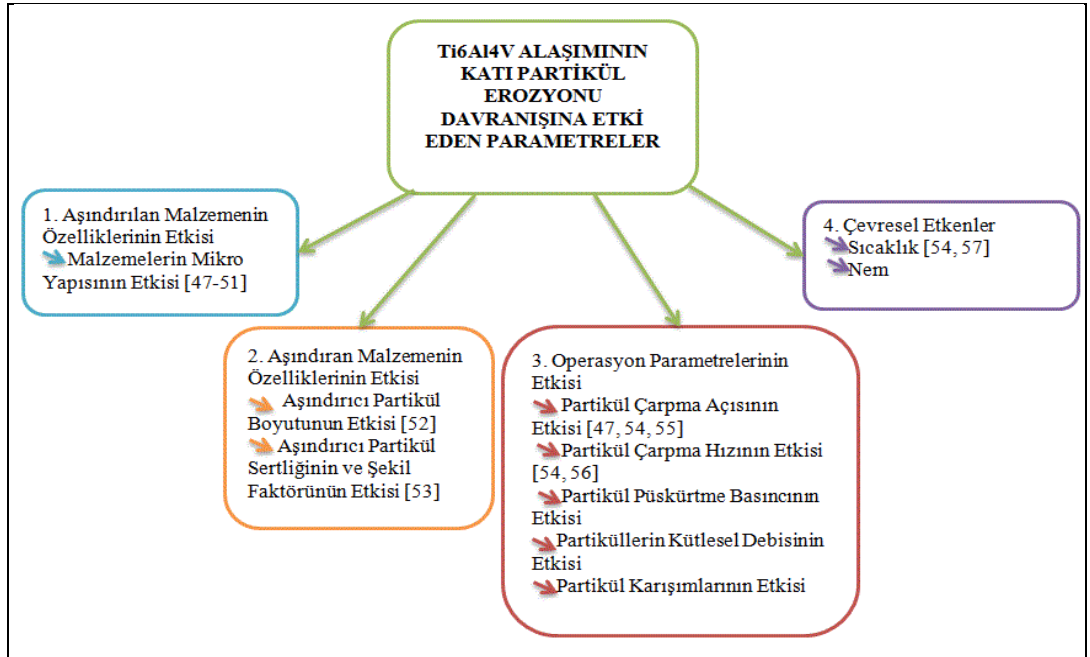
boyutta partiküllerin etkisi altında gerçekleşeceği açıktır. Literatür incelendiğinde, farklı boyutlarda partiküllerden oluşan karışımların etkilerinin anlaşılabilmesi için erozif aşınmanın bir türü olan çamur erozyonunda (slurry erosion) gerçekleştirilmiş çalışmalara rastlanmıştır. Ancak özellikle farklı boyutlara sahip partiküllerden oluşan karışımların, birbirleri ile karıştırılma yüzdelерinin fonksiyonu olarak hedef malzemeler üzerindeki katı partikül erozyonu davranışına etkisini inceleyen bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu sebeple literatürdeki bu eksiklik göz önüne alınarak tez çalışması kapsamında partikül karışımlarının etkisinin de çalışılmasına karar verilmiştir.

2.6. Aşınan Malzeme Özellikleri

Katı partikül erozyonunda, hedef malzeme özellikleri aşınma mekanizması ve aşınma oranı üzerinde etkin bir rol oynar. Aşınma olayı daha önce de değinildiği gibi kompleks bir süreçtir. Bu yüzden aşınan malzemelerin aşınma karakterlerinin net bir şekilde belirlenebilmesi için malzemelerin farklı parametreler altında (aşındırıcı partikülün çarpma açısı, hızı, debisi ve karışım oranı) aşındırılması gerekir. Katı partikül erozyonunda hedef malzemenin kırılma davranışı, aşınma sırasında görülen etkin aşınma mekanizmasını belirleyen önemli bir faktördür [46].

3. TİTANYUM ALAŞIMLARININ EROZYON DAVRANIŞININ LİTERATÜR İNCELEMESİ

Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışını birçok parametre etkilemektedir. Bu parametreler; aşındırılan malzemenin özellikleri (malzemenin mikro yapısı), aşındıran malzemenin özellikleri (partikül boyutu, partikül geometrisi, sertliği, şekil faktörü), operasyon parametreleri (partikül çarpma açısı, partikül çarpma hızı, partiküllerin kütleli debisi, partiküllerin karışım oranının etkisi) ve çevresel etkenler (sıcaklık, nem) olmak üzere dört ana başlık altında toplanabilir. Bu bölümde titanyum alaşımlarının katı partikül erozyonu davranışının bu parametrelere bağlı olarak değişimleri ile ilgili literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Şekil 3.1’ de Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışına etki eden parametreler verilmiştir.



Şekil 3.1. Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışına etki eden parametreler

3.1. Malzeme Özelliklerinin Etkisi

S. Yerramareddy ve S. Bahadur yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının erozyon davranışının, alaşımın mekanik özelliklerine ve mikro yapısına bağlı olduğunu saptamışlardır. En düşük erozyon oranı tavllanmış ve hava ile soğutulmuş durumlarda meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Erozyon oranının yaşlandırma sonucunda β fazı ve α fazı çökmesinden kaynaklanarak arttığını, aşırı yaşlanma sonucunda ise çökeltilerin yığılması nedeni ile de erozyon oranının azaldığını gözlemlemişlerdir [47].

K. C. Chen ve arkadaşları, yüksek hızla çalışan makine parçalarının sıvı ve katı partiküllerin etkisi ile kalitesinin azaldığını saptamışlar, makine parçalarının yüzeylerinin mutlaka korunması gerektiğini düşünmüşlerdir. Çalışmalarında S48C, Ti ve Ti6Al4V alaşımlarını kullanmışlardır. S48C, Ti ve Ti6Al4V malzemelerini aynı partikül çarpma açısı ile aşındırmışlar, en fazla malzeme kaybını S48C' de; en az malzeme kaybını ise Ti6Al4V alaşımında gerçekleştirdiğini görmüşlerdir. Fakat aynı malzemeleri iyon nitrülendiklerinde ise erozyon sonucu oluşan malzeme kaybının en fazla S48C' de azaldığını bulmuşlardır. Ti ve Ti6Al4V alaşımında erozyon sonucu oluşan malzeme kaybının iyon nitrülleme sonrasında etkili bir değişim gerçekleştirmediğini, ancak nitrülendirilmiş tabakanın çarpan aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjilerini düşürdüklerini gözlemlemişlerdir [48].

B.S. Mann, V. Arya ve B.K. Panti, nükleer ve çok önemli termal dayanım gerektiren bölgelerde kullanılan Ti6Al4V alaşımlı düşük basınçlı buhar türbin kanatlarında meydana gelen damlacık erozyonunu, yüksek güçlü diot lazer kullanarak erozyon direncini arttırmayı amaçlamışlardır. Yüksek güçlü diot lazer ile iki farklı sıcaklık aralıklarında (1700-1800°C ve 1475-1625°C) sertleştirme yapmışlardır. Çalışmalarının sonucunda yüksek güçlü diot lazer kullanılarak Ti6Al4V alaşımının damlacık erozyonu dayanımının önemli bir şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca farklı sıcaklıktaki diot lazer uygulamalarında 1700-1800°C aralıkta yapılan uygulamanın 1475-1625°C aralığında yapılan uygulamaya göre damlacık erozyonuna daha dayanıklı olduğunu saptamışlardır. XRD ile 1700-1800°C aralıkta ve 1475-1625°C aralıkta yapılan uygulamalarda yüksek sıcaklık aralığındaki numunede α fazının daha yüksek oranda bulunduğunu tespit etmişlerdir. Yükselen α

martenzitik fazının süneklilikten uzaklaşmadan malzemenin mekanik özelliklerine en iyi dayanımı sağladığını ve Ti6Al4V alaşımının damlacık erozyonu direncini arttırdığını gözlemlemişlerdir [49].

C. Gerdes, A. Karimi, H.W. Bieler yaptıkları çalışmada lazer nitrürlenmiş Ti6Al4V alaşımının damlacık erozyonu dayanımını incelemişlerdir. Ti6Al4V alaşımının lazer nitrüleme ile özellikle inkübasyon sürecinin artmasına karşılık damlacık erozyonu direncinin arttığını gözlemlemişlerdir [50].

J. Dehouve, P. Nardin ve M. Zeghami yaptıkları çalışmada düşük basınçlı buhar türbin kanadında meydana gelen erozyonu incelemişlerdir. Çalışmalarında buhar türbini kanadı malzemesi olarak titanyum alaşımı ve %12 krom içeren çelik kullanmışlardır. Titanyum alaşımının inkübasyon süresinin %12 krom içeren çelikten daha uzun olduğunu ancak titanyum alaşımında hasar başlamasından sonra yüksek hızla erozyonun etkili olduğunu gözlemlemişlerdir [51].

3.2. Aşındırıcı Malzeme Özelliklerinin Etkisi

3.2.1. Aşındırıcı partikül boyutu etkisi

G. Fowler, P.H. Shipway ve I.R. Pashby su jeti yöntemine etki eden parametrelerden aşındırıcı partikül boyutu ve jet-iş parçası dönüş hızının Ti6Al4V alaşımının yüzey karakteristiğine etkisini incelemişlerdir. Abrasif partikül olarak 80 ve 200 mesh boyutunda garnet kullanmışlar, erozyon oranının ve yüzey pürüzlülüğünün düşük boyutlarda daha az olduğunu gözlemlemişlerdir. Her iki aşındırıcı partikül boyutu için kesmenin aynı derinlikte olduğunu belirlemişlerdir. Küçük boyutlu partiküllerin yüzey pürüzlülük değerlerinin büyük boyutlu partiküllere göre % 55-%70 daha az olduğunu gözlemlemişlerdir [52].

3.2.2. Partikül sertliği, şekil faktörü ve dönüş hızı

G. Fowler, I.R. Pashby ve P.H. Shipway yüzey karakteristiklerine aşındırıcı parametrelerinin (abrasif partiküllerin dönüş hızı, şekli, sertlik) etkisini Ti6Al4V alaşımının farklı aşındırıcılarla aşındırılması ile incelemişlerdir. Deneylerinde farklı türde abrasif partiküller (cam boncuklar, garnet, beyaz alüminyum oksit, kahverengi alüminyum oksit, çelik bilya) için dönüş hızının malzeme kaldırma oranına ve yüzey

pürüzlülüğüne etkilerini incelemişlerdir. G. Fowler ve arkadaşları partikül sertliğinin artması ile malzeme kaldırma oranının ve yüzey pürüzlülüğünün arttığını belirtmişlerdir. Sert partiküller yumuşak partiküller ile karşılaştırıldığında, iş parçası ile abrazif parçacık arasındaki sertlik oranının önemli olduğu sonucuna varmışlardır [53].

3.3. Operasyon Parametrelerinin Etkisi

3.3.1. Partikül çarpma açısının etkisi

Partikül çarpma açısı erozif aşınmayı etkileyen en önemli parametrelerden biridir. S. Yerramareddy ve S. Bahadur yaptıkları çalışmada Ti6Al4V alaşımının tipik sünek erozyon davranışı sergilediğini ve maksimum erozyonun 30° çarpma açısında meydana geldiğini saptamışlardır [47].

J. Zhou ve S. Bahadur' un yaptıkları diğer bir çalışmada ise yüksek sıcaklıklardaki hava ortamında ısıtılmış Ti6Al4V alaşımının korozyon-erozyon davranışını incelenmişlerdir. Hedef numuneyi 10-90° çarpma açısı ve 55-110 ms⁻¹ çarpma hızında 120 mesh boyutlarda silikon karpit partikülleri ile aşındırmışlardır. Çarpma açısının 30° olduğu durumlarda maksimum erozyon oranını gözlemlemişlerdir. Yükselen sıcaklık değerlerinde erozyon oranının, 30° çarpma açısının olduğu durumda sıcaklık ile düzenli olarak arttığını ancak çarpma açısının 90° olduğu durumda ise erozyon oranının sıcaklık ile aşırı artış gösterdiğini gözlemlemişlerdir [54].

P.H. Shipway G. Fowler ve I.R. Pashby yaptıkları çalışmalarında Ti6Al4V alaşımının yüzey özelliklerinin yüzey işleme parametreleri (jet traversinin hızı, çarpma açısı, su jeti basıncı, aşındırıcı taneciklerin boyutu) ile bağlantılı olduğunu gözlemlemişlerdir. Deneyleri sonucunda Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülüğünün azalması yüksek hızlı travers hızı, küçük partikül boyutu, düşük su jeti basıncı ve düşük jet çarpma açısı ile sağlamışlardır. Ayrıca jet traversinin yüksek hızlı olduğu durumlarda ve çarpma açısının artması sonucunda oluşan darbenin de yüksek olması nedeni ile partikül saplanması arttığını incelemişlerdir [55].

3.3.2. Partikül çarpma hızının etkisi

Jianren Zhou ve Shyam Bahadur, yüksek sıcaklık değerlerinde erozyon oranının partikül çarpma hızına bağlı değişimi incelemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda partikül çarpma hızı arttıkça erozyon oranının da aynı oranda arttığı görülmüştür [54]. M. Ahmad, M. Casey ve N. Surken yaptıkları çalışmada buhar türbini kanatlarının yapımında kullanılan 5 farklı malzemenin (X20Cr13, X5CrNiCuNb 16-4, lazer tavlı X5CrNiCuNb 16-4, X5CrNiMoCuNb 14-5 ve Ti6Al4V) damlacık erozyonu davranışını incelemişlerdir. Damlacık erozyonunda hacim kaybının artışının damlacıkların çarpma hızının artışı ile arttığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca Ti6Al4V alaşımı incelemeye alınmış, diğer malzemeler içinde en yüksek erozyon dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir [56].

3.4. Çevresel Etkenler

3.4.1. Sıcaklığın etkisi

Ti6Al4V alaşımının erozyon davranışını etkileyen birçok değişken arasında sıcaklık önemli bir faktördür. Jianren Zhou ve Shyam Bahadur Ti6Al4V alaşımının erozyon-korozyon davranışının sıcaklığa bağlı olarak değişimini incelemek amacı ile 7 farklı sıcaklıkta deney yapmışlardır. 7 farklı sıcaklıkta kum püskürtülen malzemeye öncelikle tavlama, çözeltiye alma ve yaşlandırma işlemleri uygulamışlardır. Hedef numuneyi 10°-90° çarpma açısı, 55-110 ms⁻¹ çarpma hızında ve 120 mesh boyutlarda silikon karpit partikülleri ile aşındırmışlardır. Oda sıcaklığından 200°C'ye kadar olan sıcaklık artışındaki erozyon oranının sıcaklık değişimiyle bir miktar arttığı, 200°C'nin üzerinde artan sıcaklıkla beraber erozyon oranında yüksek artışın meydana geldiği, 650°C' den 800°C' ye kadar olan sıcaklık artışında ise erozyon oranında ani bir artışın meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [54]. Hiromi Mochizuki, Motohiro Yokota ve Shuji Hattori saf titanyum ve titanyum alaşımlarını (Ti6Al4V) döner disk metoduyla deniz suyunda 303, 318 ve 333 K' de kavitasyon erozyon davranışını incelemişlerdir. Herbir numunenin erozyon direncini Vickers sertliği ile ilişkilendirerek değerlendirmişlerdir. Erozyon direncinin yükselmesinin sertliğin yükselmesi ile bağlantılı olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca deniz suyunun sıcaklığının 289-316 K'e yükselmesi ile erozyon oranının arttığını gözlemlemişlerdir [57].

4. GARNET MİNERALİ

4.1. Garnet Mineralinin Özellikleri

Garnet demir-alüminyum silikat minerallerine verilmiş genel bir isimdir. Garnetler orta/yüksek sertlik, yüzeylerinde keskin çatlaklar, 1250°C de erime noktası, yarı yuvarlaktan yarı köşeliye değişen keskin kenarlı taneler, fiziksel ve kimyasal ayrışmalara karşı dirençli oluşları ve çoğunlukla serbest silis içermemeleri ya da çok az oranda bulundurmaları gibi özellikleri nedeniyle yüksek kaliteli aşındırıcılar sınıfına girer. Genel olarak aşındırıcılar doğal ve yapay olmak üzere iki farklı sınıfa ayrılır. Birçok endüstri dalında yaygın kullanım alanı bulan yapay aşındırıcılar, ham cevherin ya da metallerin termal veya kimyasal işlenmesi ile üretilmektedir. Garnetler, yüksek sertlik özelliği gösteren doğal aşındırıcılar sınıfına girmektedir.

Garnetler kimyasal bileşimlerinde silisyum ve oksijene ilave olarak kalsiyum, magnezyum, demir ve alüminyum da içerirler. İki ve üç değerli metal atomları 3'e 2 oranında yapıda yer alır. Genel formülleri R^{+2} kalsiyum, magnezyum, demir ya da manganez, R^{+3} ise alüminyum, demir, krom ya da manganez olmak üzere $(R^{+2})_3(R^{+3})_2(SiO_4)_3$ şeklindedir. Bununla birlikte az miktarda diğer metal atomları da içerir. Demirli olanların önemli bir özelliği 800°C' ye kadar ısıtılıp ani olarak soğutulduklarında sertliklerinin artması ve çatlaklarının derinleşmesidir.

4.2. Kullanım Alanları

Son derecede sert ve üzerinde keskin çatlaklar bulunan garnetler bu özellikleri nedeniyle ağaç, deri, cam, metal ve plastik malzemelerin işlenmesinde aşındırıcı olarak kullanılmaktadır. Kullanım çoğunlukla aşındırma kağıdı, aşındırıcı diskler, bileme taşları, parlatma ya da cilalama toz ve kumları şeklindedir.

Belirli bir tane boyutu dağılımı içeren garnetler kum basınçlı veya su basınçlı kesici ve aşındırıcılar olarak geniş kullanım alanı bulur. Su basınçlı kesmelerin en önemli avantajı hemen hemen hiç toz içermemeleri, yüksek kesme hızları, farklı şekillerde kesme yeteneği ve yüksek sıcaklıklardan kaynaklanabilecek bozulmaların

bulunmamasıdır. Kum basınçlı sistemlerin en önemli yönünü ise serbest silis içermemesi ya da az oranda bulunması nedeniyle silikosis gibi hastalıklara yol açmaması oluşturur. Diğer yandan, bu amaçla kullanılan silis kumuna göre daha yüksek olan yoğunluğu, aynı çaptaki kuvars tanesine oranla işlenen yüzeye daha etkili darbeler vurmasını sağlar [58, 59]. Kimyasal ayrışmaya karşı olan direnci, tane şekli ve boyut dağılımı ve yüksek yoğunlukları nedeniyle garnetler çeşitli filtrasyon sistemlerinde kullanılır ve bu amaçla kullanılan silis kumu ve antrasite kıyasla daha iyi özelliklere sahiptir. Bu tür kullanımlarda garnetlerin aşındırıcı kabiliyetinden çok yoğunluk ve tane şekil ve boyutu ön planda tutulur. En yaygın kullanım şehir içme suları filtrasyonudur.

Su kesme sistemlerinde yoğunlukla keskin kenarlı garnetler tercih edilir. Sahil kumlarında yaygınca görülen kenarları yuvarlaklaşmış tanelerin keskin taneler halinde kırılıp ufalanmaları bu tür garnetlerin de rahatlıkla kullanılmasını sağlar. Bunun başlıca nedeni oluşan ikincil kırıkların kesme işlemlerinde çok daha etkili olmasıdır. Genel olarak çelik alaşımlı ürünlerin kesilmesinde bu tür iri taneli garnetler kullanılmaktadır. Beton kesmelerde aşındırıcı olarak garnetlerin kullanıldığı kesme teknikleri yerine günümüzde daha çok elmas uçlu bıçkılar kullanılır. Gerek hava basınçlı kesim gerekse de su basınçlı tekniklerin en önemli problemi kullanılan aşındırıcıların yüksek maliyetidir. Bu nedenle de gelişmiş bazı ülkelerde, özellikle Batı Avrupa ülkelerinde garnet kullanımı istenilen boyutlarda gelişmemiştir.

Garnetler kaplama aşındırıcılar olarak ahşap, deri, sert kauçuk, plastik, cam yumuşak metallerin işlenmesinde kullanılır. Bu tür kaplama aşındırıcılar belirli boyutlara indirgenmiş olan garnetlerin kağıt veya bez dokumalar üzerine çimentolanması ile elde edilirler. Bu amaçla yakın yıllara kadar kullanılmış olan reçine bağlayıcılar yerlerini elektrostatik kaplamalara bırakmıştır. Kaplama aşındırıcı yapımında tanelerin etkisini yükseltmek amacı ile keskin kenarlar zemine dikey bağlanmaktadır. Bu alanda garnet ile birlikte alumina, silikon karbid, kuvars, ve zımpara gibi diğer bazı aşındırıcılar da kullanılmaktaysa da garnetli kaplama aşındırıcılar ahşap yüzeylerde daha iyi bir parlatma sağlar ve diğer aşındırıcılara oranla çok daha ucuzdur. Garnet kaplamalı kağıt ve bez dokumalı aşındırıcılar diğer tür aşındırıcılar içinde yaklaşık % 10–15’lik bir paya sahiptir. Yüksek kaliteli garnet tozları,

elektronik malzemeler, özel camlar ve diğ er ileri teknoloji ürünü malzemelerin parlatılmasında ve tesviyesinde kullanılmaktadır. Ancak bu tür pazar oldukça dardır ve esas olarak Batı Avrupa  lkeleri ve Japonya ile sınırlıdır. Bir aşındırıcı toz olarak garnetler cam ürünlerin, özellikle de optik camların taşlanması kullanılan korundumun sağlanmasıdaki zorluklar nedeniyle son yıllarda bu alanda yaygınca kullanılmaya başlanmıştır. Garnetlerin kullanılması ürün kalitesini arttırmış, parlatma ve cilalama zamanını azaltmıştır. İngiltere’de TV camı yapımında iyi bir televizyon tüpü yüzey parlaklığı elde edilmesinde 0,03 – 0,04 mm boyutlarında garnet tozu kullanılmaktadır.

Günümüzde aşındırıcı olarak kullanılan garnetler ısıtılmalara tabi tutulur. 1930 ve 1940’lı yıllarda yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmış olan garnetlerin aşındırıcı etkilerinin arttığına inanılmaktaydı. Ancak 1960’lı yıllarda yapılan çalışmalar bunun doğru olmadığını ortaya koymuş, çok yüksek sıcaklıkların garnet kalitesini bozduğu anlaşılmıştır. Genel olarak ısıtılmalara tane yüzeyinin temizlenmesini ve tane üzerinde aşındırıcı etkisini arttıran mikroskopik kırıkların meydana gelmesini sağlar.

Garnetlerin aşındırıcı kalitesini ortaya koymada kesin bir metod yoktur. Bununla birlikte bazı kaba test ve incelemelerden bahsedilebilir. Yapılan işlemler daha çok bir mikroskop altında yüzey kırıkları, tane şekli ve kenarlarının keskinliği, tane yapısı ve olası inklüzyonların tespitine dayanır. Tane sertliği ve sağlamlığı belirli bir kalitede, örneğin 60 mesh gibi iki cam mikroskop lamı arasına konarak ve bir arada ovalanarak saptanmaya çalışılır. Bu şekilde tanelerin relatif çizme sertliği ve parçalanabilme özellikleri test edilir [58-60].

5. GÖRÜNTÜ İŞLEME YÖNTEMİ

Mühendislik malzemeleri üretim esnasında, üretim sonrası soğuk ve sıcak şekil verme işlemleri sırasında, servis şartları altında görevlerini yerine getirirken farklı mekanik zorlamalara maruz kalmakta ve bu zorlamalar sonucu hasara uğramaktadırlar. Bu sebeplerle malzemelerin iç yapılarında ve yüzeylerinde ortaya çıkan değişimlerin gözlemlenebilmesi, hem üretim hem servis şartları altında performanslarını değerlendirme, yorulma ömürlerini belirleme vb. açılardan önem taşır. Malzeme iç yapılarını ve yüzeylerini görüntüleyebilen cihazların, bilgisayar teknolojisi ve yazılımları sayesinde son on yılda büyük işlerlik kazandığı görülmektedir. Bu cihazlar hızlı ve detaylı malzeme iç yapı görüntülerini elde edebilmekte, sonrasında matematiksel ve istatistiksel tabanlı algoritmaların yardımıyla hazırlanan görüntü işleme programları ile sonuçları ortaya koyabilmektedir. Tüm bu süreçlerin verimli sonuçlar ortaya koyması için görüntü işleme ile malzeme karakterizasyonu konusunda belirlenmiş uygun bir metodolojinin takip edilmesi gerekmektedir. Görüntü işleme ile malzemelerde karakterizasyon işlemi yapılırken aşağıdaki beş basamak sırasıyla uygulanarak bir sistematik inceleme prosesi elde edilmektedir.

- Görüntü elde etme
- Ön işleme
- Görüntüyü parçalara ayırma
- İncelenecek alanın detay görüntülerini elde etme
- Görüntü işleme sonrası incelenen hasarlı alanın detaylı yorumlaması

Görüntü elde etme yöntemleri, incelenecek malzeme türüne ve hasar bölgesinin boyutuna göre seçilir. Makro ve mikro boyutlu incelemelerde farklı görüntüleme cihazları kullanılarak çözünürlük ayarı gerçekleştirilir. Görüntülerin elde edildiği cihazların çözünürlük kabiliyeti bu basamakta etkin olmaktadır. Dijital fotoğraf makinelerinden taramalı elektron mikroskopuna (SEM) kadar birçok görüntüleme cihazı malzeme karakterizasyonunda etkin şekilde kullanılmaktadır. Görüntülerin

elde edilmesi aşamasında ortaya çıkan en büyük güçlük, malzemelerin hem makro hem mikro boyutlu incelemeleri gerçekleştirilmek istendiğinde; bu incelemelerin her ikisini birden gerçekleştirebilecek görüntüleri tek bir cihazdan elde etmenin zorluğudur. Bu yüzden makro ve mikro incelemeler için görüntüler farklı cihazlar kullanılarak elde edilmek zorunda olduğundan zaman kaybı ve yüksek inceleme maliyeti sorunları ortaya çıkabilmektedir.

Ön işleme safhasında karakterizasyon için elde edilen görüntülerin parlaklık değeri ayarlama, renk derinliği ayarlama, normal ve hasarlı bölgeler arasındaki geçişleri yakalayarak hasar bölgesi sınırlarını netleştirme, incelenecek bölge sınırlarını belirleme işlemleri gerçekleştirilir. Ön işleme safhası karakterizasyonda sonraki aşamada kullanılacak algoritmanın belirlenmesi açısından da önem arz etmektedir. İncelenecek malzeme görüntüleri elde ederken önem arz eden cihaz seçiminin bu evredeki etkisi, malzemenin ve hasar bölgesinin ışığı geri yansıtma özellikleridir. Malzeme yüzeyleri genellikle opak özelliğe sahiptir. Bu opak özellik ön inceleme esnasında renk, ton ve parlaklık eşik değerlerini belirlemede işlemi yapan kişinin hasarsız ve hasarlı bölge yapılarını iyi tanımasını gerektirir. Hasarsız ve hasarlı bölgeler arasında hatalı yapılacak ton ayarlamaları hasar sınırlarının olduğundan büyük ya da küçük gözükmesine sebep olabilir. Tez çalışmasında katı partikülü erozyonuna maruz kalan Ti6Al4V numunelerde hasarlı ve hasarsız bölgelerin arasında keskin bir renk, ton ve grilik değeri farkı ortaya çıktığından hasarlı ve hasarsız bölge arası geçişler net ve doğru şekilde ortaya konabilmektedir.

Görüntüyü parçalara ayırma evresinde incelenen numune yüzeyi ve her bir tabaka ayrı ayrı ele alınarak detaylı incelemelere maruz bırakılır. Her bir parçadaki hasar bölgeleri ayrı ayrı incelenerek malzemenin tamamında ortaya çıkan hasarla bu görüntüler arasında bağıntı kurulmaya çalışılır. Birbirine yakın bölgeler ya da tabakalar arasında hasar değişimleri net şekilde ve mikro boyutta ortaya konabilmektedir. Görüntüyü parçalara ayırma hasarın yayılımı hakkında detaylı bilgi elde etme açısından da önem arz etmektedir. Görüntü işleme için birinci basamakta malzemenin 3 boyutlu görüntülerini çekebilen bir cihaz kullanıldıysa (X-ışını tomografisi gibi) bu görüntüler dilimler şeklinde elde edilmiş olduğundan genelde görüntüyü parçalara ayırma işlem basamağı kullanılmaz.

İncelenecek alanın detay görüntülerini elde etme aşamasında parçalara ayrılmış her bir görüntü karesi üzerinde derinlemesine incelemeler yapılır. Bu aşamada görüntülere özel filtreleme yöntemleri uygulanır ve her bir filtrenin hasarın hangi detayı hakkında bilgi verdiği üzerinde durulur. Uygulanan filtrenin oluşturulduğu algoritmaya göre yüzeysel hasarlardan taneler arası hasarlara kadar farklı boyutlardaki hasarların görüntüleri elde edilir.

Görüntü işleme yöntemiyle hasar tespitinde son evre, farklı işlemler uygulanarak yukarıdaki işlem basamaklarında elde edilen bütün görüntülerin yorumlanmasıdır. Bu basamakta yapılacak hasarla ilgili yorumlar önceki basamaklarda görüntü işlemede gerçekleştirilen işlemlerin uygunluğuna doğrudan bağlıdır. Seçilen malzemeye uygun görüntüleme cihazının kullanımı, uygun tekniğin uygulanması ve hasar sınırlarının doğru tespit edilmiş olması büyük önem arz etmektedir.

5.1. Görüntü İşleme ile İlgili Literatür Çalışmaları

Görüntü işleme yazılımlarının yaygınlaşması ve algoritmaların gelişmesi, son yıllarda farklı disiplinlerde masaüstü tarayıcıları kullanarak karakterizasyon işlemlerinin yaygın kullanımına yol açmıştır. Malzemelerde kaynak sonrası dikişlerin kontrolünden, talaşlı imalat sonrası köşe kalitesinin belirlenmesine, kompozit yapılarda fiber yönlenmelerinin tespitine kadar birçok farklı çalışmada masaüstü tarayıcılar ve görüntü işleme algoritmaları birçok araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Tarayıcı kullanımıyla pahalı karakterizasyon cihazlarıyla gerçekleştirilebilecek incelemeler çok daha ucuz maliyetlerle ve pratik bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Yüksek çözünürlükte tarayıcıdan elde edilen görüntüler gelişmiş algoritma programları yardımıyla ölçüm yöntemi olarak güvenilir sonuçlar vermektedir. Farklı disiplinlerde tarayıcı ve görüntü işleme algoritmaları kullanılarak yapılan uluslararası bilimsel çalışmaların sayısı giderek artmaktadır. Malzeme bilimiyle ilgili görüntü işleme çalışmaları incelendiğinde çalışmaların şu başlıklar altında yoğunlaştığı görülmüştür.

- Korozyon hasarlarının tespiti
- Kesici takım uçlarının geometrilerinin ve kesme işlemlerinin tespiti
- Kompozit iç yapılarının ve kompozit iç hasarlarının tespiti

Görüntü işleme yöntemiyle gerçekleştirilen bilimsel çalışmalar hakkında detaylı bilgi bu bölümde çalışma alanlarına göre sınıflandırılarak verilecektir. Yapılan literatür taraması sonucu görüntü işleme yöntemleri kullanılarak katı partikül erozyonu yüzey hasarlarının incelenmesi ile ilgili çalışmaların olmadığı görülmüştür. Katı partikül erozyonu sonrası yüzey hasarlarının ortaya konması optik profilometre gibi cihazlarla mümkün olsa da, bu cihazlarla alınan görüntülerin mikron ve nano boyutta olmasından dolayı hasarın genel karakteristiği hakkında görüntü alınması mümkün olmamaktadır. Katı partikül erozyonuna maruz kalan malzemelerin makro hasar görüntülerini elde etmek amacıyla lokal görüntülemeler yapılarak daha sonra bu görüntülerin bir araya getirilmesine çalışılmış olsa da görüntülerin tek bir yapı haline dönüştürülmesi esnasında çekim parametrelerine bağlı değişkenlikler ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden doktora çalışmasında ortaya konan yöntemle diğer cihaz ve yöntemlerle elde edilemeyen makro hasar görüntüleri tek seferde ve efektif bir biçimde elde edilmiştir. Katı partikül erozyonu yüzey hasarlarının tespitinde ve 3 boyutlu yüzey hasar görüntülerinin ortaya konmasında görüntü işleme yönteminin efektif ve uygulanabilir bir yöntem olma potansiyeli göz önüne alınarak doktora çalışmasının özgün değeri bu inceleme yöntemi üzerine kurulmuştur.

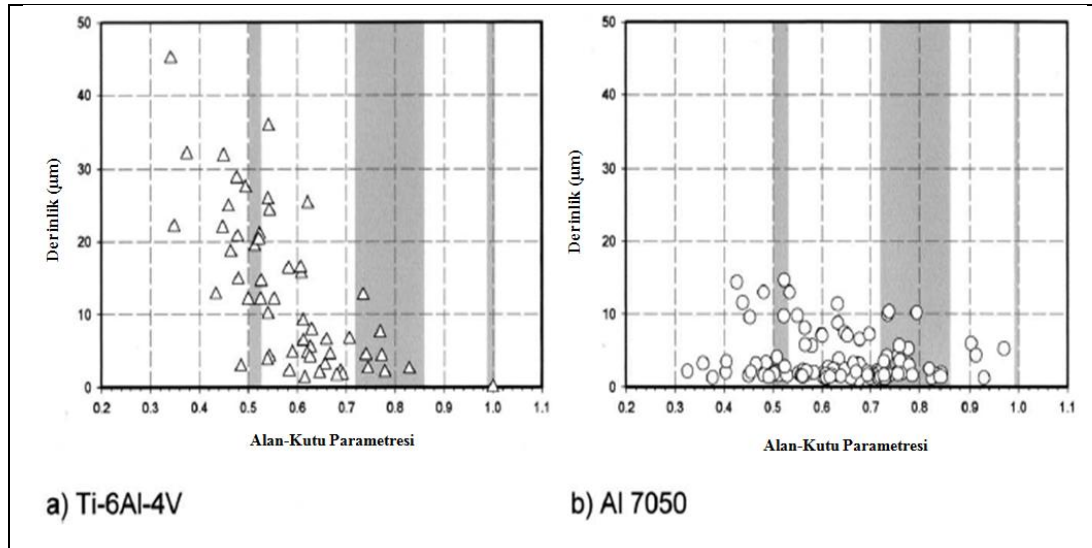
5.1.1. Görüntü işleme yöntemiyle korozyon hasarlarının tespiti

Metalik malzemelerin içinde bulundukları ortamdan etkilenecek elektrokimyasal bozunmaya girmesi sonucu ortaya çıkan bozunmaya korozyon denir. Metalik malzemelerde ağır hasarlara sebep olan korozyon havacılık, otomotiv ve makina gibi birçok sektörde yüksek mali kayıplara sebep olmaktadır. Diğer taraftan makine parçalarında ortaya çıkan korozyonun tespiti özel yöntemler gerektiren, incelemeyi yapan uzmanın tecrübesine bağlı, zor ve zaman alan bir süreçtir. Bu zorlukları ortadan kaldırmak, inceleme sürelerini kısaltmak ve malzemelere göre korozyon hasarlarının tespitini standartlar altında toplamaya olanak tanıyacak yöntemlerden bir tanesi görüntü işleme teknikleri kullanarak korozyon hasarlarını tespit etmektir. Korozyon hasarına bağlı olarak metalik yüzeylerde renk tonlarında farklı bölgeler ortaya çıkmakta, bu renk tonları korozyon hasarının görüntü işleme metotlarıyla tespit edilmesini olanaklı kılmaktadır. Ana metalden daha farklı grilik değerine sahip korozyon hasarı bölgesi bu yöntemin hasar tespitinde verimli bir şekilde

kullanılmasını olanaklı kılmaktadır. Bu bölümde korozyon hasarının tespitiyle ilgili farklı araştırmacıların yaptıkları bilimsel çalışmalara örnekler verilecektir [61-75].

Choi ve arkadaşları yaptıkları çalışmada elektrokimyasal yöntemler yerine dijital görüntü işleme tekniğini kullanarak beş farklı tipte korozyona uğramış malzemeyi incelemişlerdir. Korozyona bağlı yüzeyde oluşan hasarları ortaya koymak amacıyla HIS modelini kullanarak yüzey rengi, yapısı ve geometrisini incelemişlerdir. Geliştirdikleri korozyon hasar morfolojisini tanımlama algoritmasıyla görüntü işleme tekniğiyle hızlı bir korozyon tespitinin gerçekleştirilebileceğini savunmuşlardır [61].

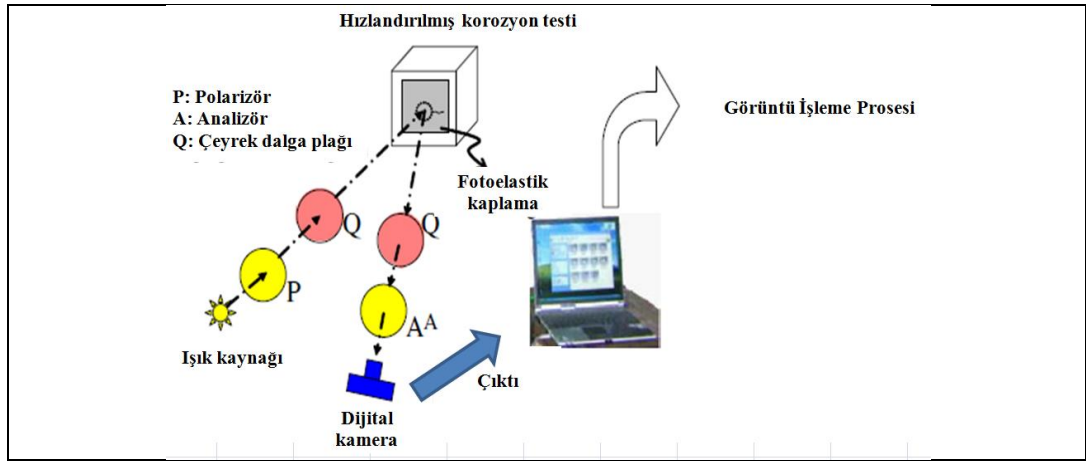
Codaro ve arkadaşları yaptıkları çalışmada alüminyum ve titanyum alaşımlarda ortaya çıkan korozyon hasarı çukurlarını incelemişlerdir. Korozyon çukurcuklarının yüzeyde oluşturdukları şekillerin ve morfolojilerin teorik ve deneysel sonuçları karşılaştırılarak irdelenmiştir. Işık mikroskopundan elde edilen görüntülerin yüzey korozyon hasarı tespitinde ve özellikle alüminyum ve titanyumun tuzlu su ortamında kalması sonucu oluşan yüzey korozyon çukurcuklarını incelemeye alternatif bir yöntem olduğu saptanmıştır. Korozyon çukurcuklarının zamanla değişimini ve yayılımını gözlemlemenin bu yöntemle mümkün olduğu belirtilmiştir. Şekil 5.1’ de görüntü işleme yöntemi ile elde edilen sonuçlar verilmiştir [62].



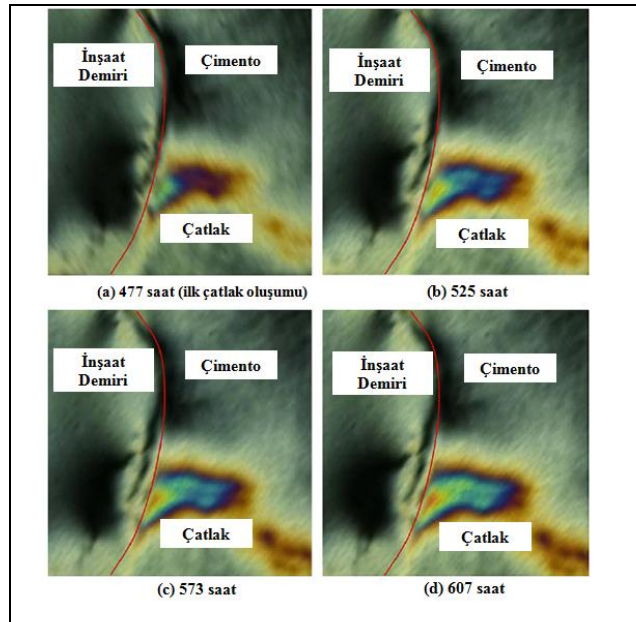
Şekil 5.1. Ti6Al4V ve Al 7050 yüzeyinde oluşan korozyon çukurcuklarının görüntü işlemeyle elde edilen derinlik ölçümleri [62]

Chang ve arkadaşları çalışmalarında korozyona bağlı ortaya çıkan çatlak bölgesini görüntü işleme metoduyla incelemişler; çatlağın ilerlemesini korozyon etkisine bağlı

olarak görüntülemişlerdir. Görüntü işleme metoduyla korozyonun farklı evrelerinde çatlak etrafında ortaya çıkan gerilim dağılımları ortaya konmuştur. Sonuçlar, deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılmasıyla irdelenmiştir. Takviyeli çelik çubukta korozyon ilerlemesine bağlı elde edilen çatlak bölgesi görüntülerinden gerilim dağılımları ortaya konmuştur [63]. Şekil 5.2’ de Chang ve arkadaşlarının kullandığı metodolojinin şematik gösterimi, Şekil 5.3’ te ise gerçekleştirdiği çalışmalar sonucunda elde ettikleri görüntülerden örnekler verilmiştir.

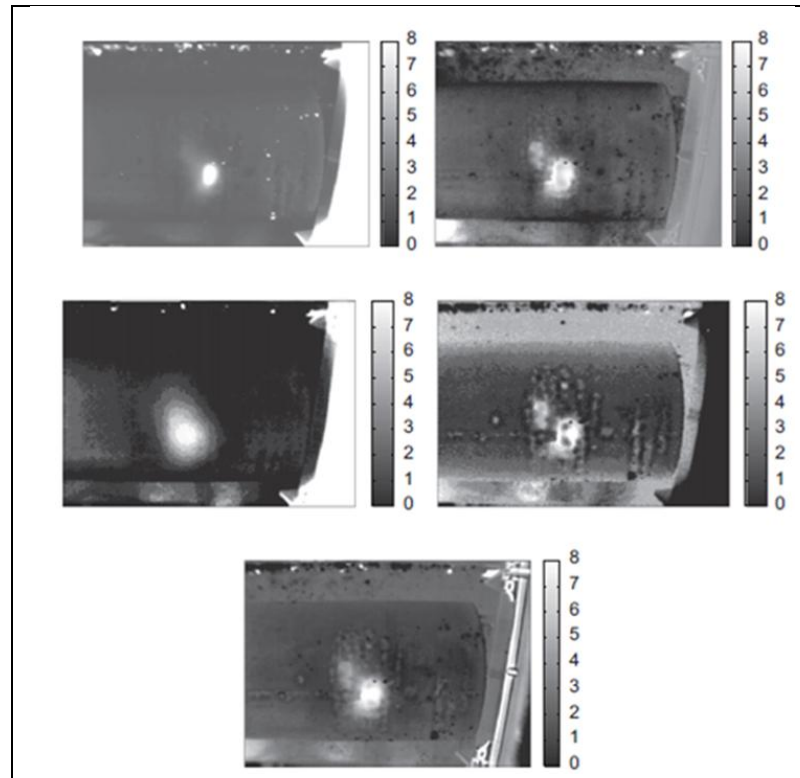


Şekil 5.2. Çatlak bölgesini foto-elastik teknikle inceleyen deneysel düzenek [63]



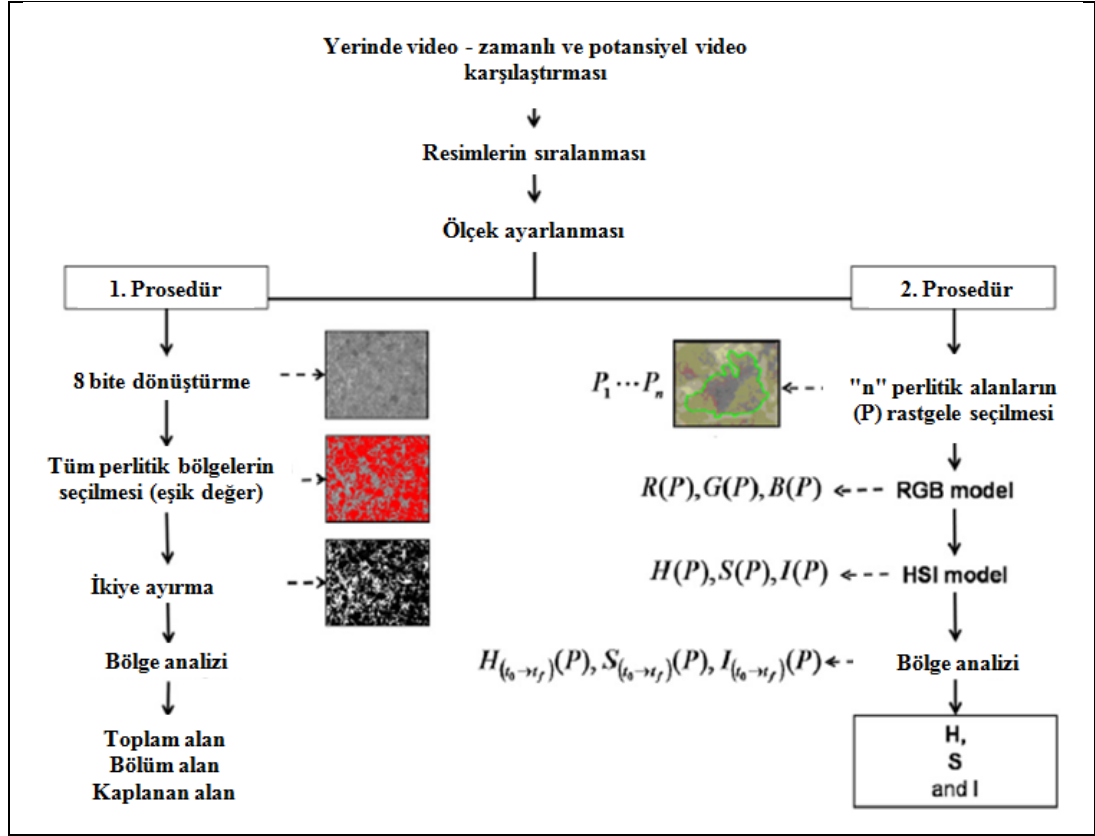
Şekil 5.3. Çatlak bölgesinin farklı korozyon süreleri sonrası foto-elastik girişim modeliyle elde edilen görüntüleri [63]

Liu ve arkadaşları demir esaslı bir boru içinde oluşan korozyon hasarlarını termografik görüntüleme metodolojisini kullanarak ortaya koymuşlardır. Termografik görüntü analiz yönteminde korozyon hasarına uğramış boru içine kumlama işlemi gerçekleştirilmiş, sonrasında koroyona bağlı hasarların tespiti tahribatsız olarak elde edilmiştir. Yöntemin özgünlüğü, bütün yüzeyin termografik görüntüsünden sadece korozyon çukur bölgelerinin renk ölçeğinde ayırt edilmesini sağlayan bir algoritmanın kullanılmış olmasıdır [64]. Şekil 5.4’ te Liu ve arkadaşlarının uyguladığı yöntem ile elde edilen görüntüler verilmiştir.



Şekil 5.4. Korozyon çukurcuk derinliklerinin termografik görüntüleri [64]

Zimer ve arkadaşları sodyum sülfür çözeltisi (Na_2S) içinde AISI 1040 çeliğine ait korozyon testlerini gerçekleştirmişler ve çözelti içinde %3,5 oranında NaCl bulunmasının ve bulunmamasının etkilerini mikroskop görüntülerini inceleyerek ortaya koymuşlardır. Görüntü işleme metoduyla tanecik sınırlarında ortaya çıkan korozyonun heterojen sülfür filmi yayılımıyla bağıntılı olduğunu söylemişlerdir [65]. Şekil 5.5’ de Zimer ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu görüntü işleme yönteminin akış şeması verilmiştir.



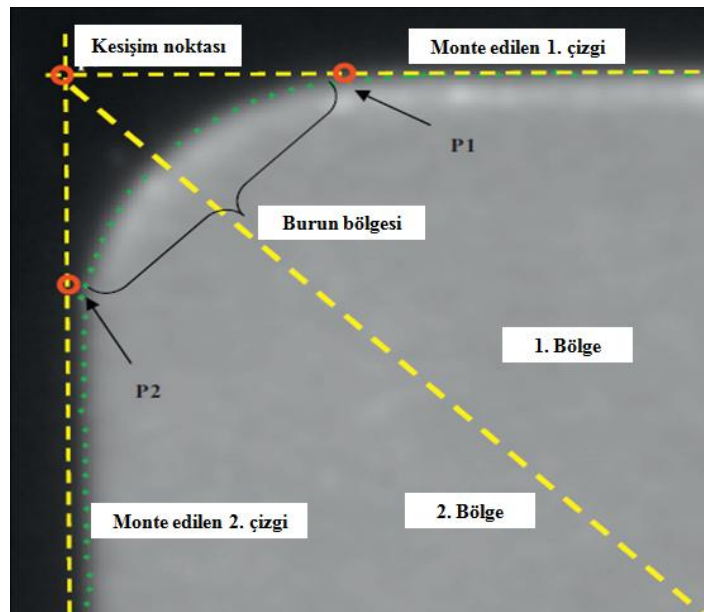
Şekil 5.5. Korozyona uğramış numunelerin sayısal ve renkli görüntülerinin görüntü işleme metoduyla işlenmesinde izlenen işlem basamakları [65]

5.1.2. Kesici takım uçları geometrilerinin ve kesme işlemlerinin görüntü işleme yöntemiyle tespiti

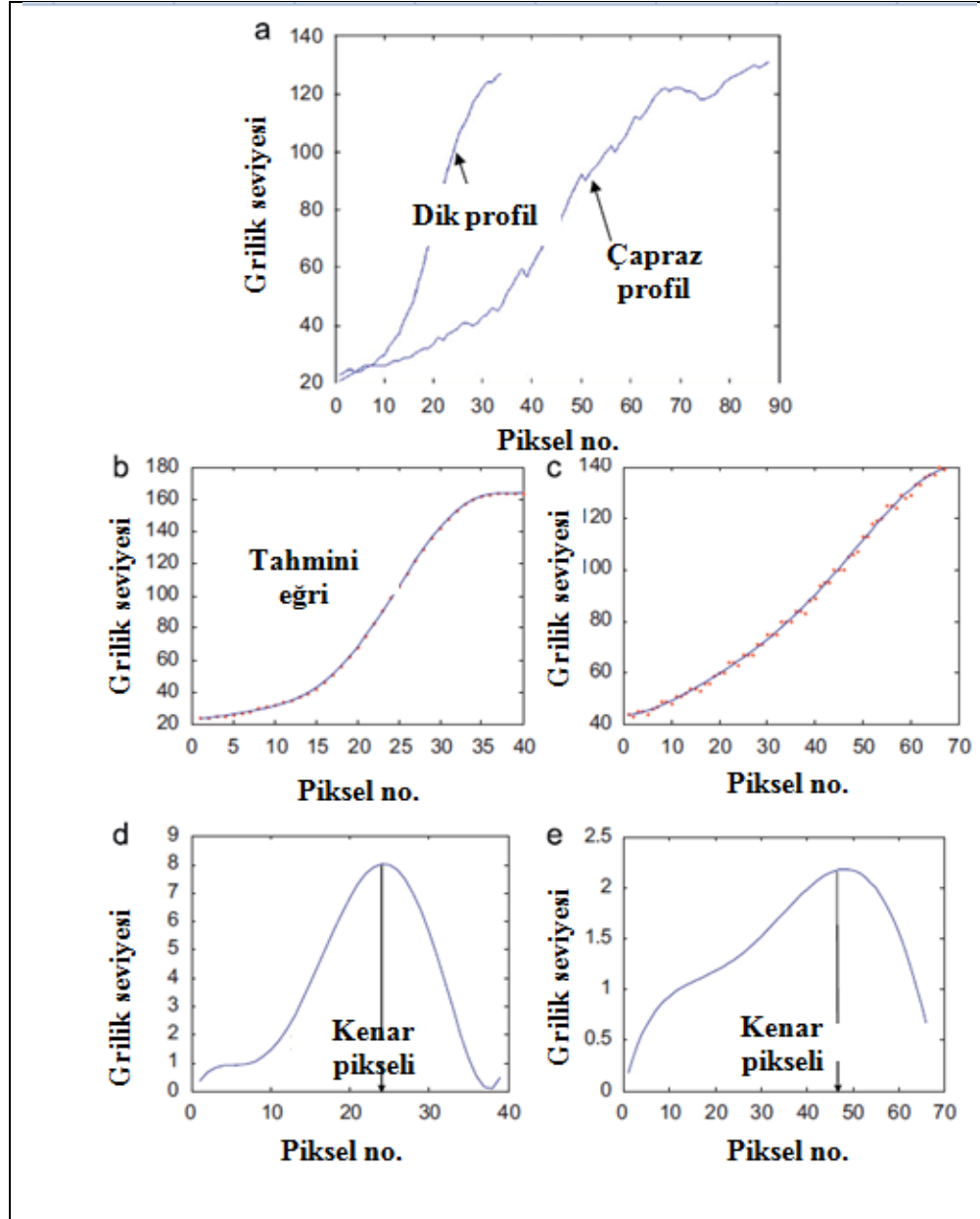
Kesici takım uçları ve bu uçlar ile oluşturulan talaş kaldırma, şekil verme işlemleri sonrası ortaya çıkan hem kesici takım ucundaki hem işlenen malzeme yüzeyindeki şekil değişimlerinin gözlemlenmesi günümüz makine endüstrisinde önem arz etmektedir. Kesici takım uçlarının ısı ve sürtünme altındaki anlık değişimlerini gözlemleyebilme, daha uzun ömürlü takım uçlarının üretilmesi için öngörülerde bulunmaya yardımcı olmaktadır. Takım uç geometrilerinin servis şartları altında gösterdiği anlık değişimler eşzamanlı görüntüleme tekniklerinin kullanımıyla mümkün olmaktadır. Diğer taraftan, bu kesici takım uçları ile işlenen malzeme yüzeyinde oluşturulmak istenen geometrilerin hassasiyetleri genellikle yüksektir. Çok az hata toleransına izin veren günümüz endüstrisi, kesici takım uçlarıyla işlenen parçaların kalite kontrolünü hızlı ve doğru şekilde yapmak zorundadır. Seri üretimle imal edilen bu parçaların tolerans kontrollerinin hızlı şekilde yapılabilmesi de yine görüntü işleme tekniklerini kullanımıyla mümkün olmaktadır. Görüntü işleme

teknikleriyle kesici takım uçları geometrilerinin ve kesme işlemlerinin tespiti konusunda yapılan bilimsel çalışmalar bu kısımda irdelenerek örnekler verilmiştir [76-90]. Yapılan bilimsel çalışmalar incelendiğinde hem kesici takım uçlarının geometrilerinin hem de işlenen malzemedeki değişimlerin aynı anda görüntü işleme yöntemleriyle incelendiğini gösteren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu tür çalışmaların özgünlük değeri taşıdığı yeni araştırmalar açısından yol gösterici olabilir.

T.Y. Lim yaptığı çalışmada kesici takım uçlarının köşe yarıçaplarını belirlemede görüntü işleme ve tarayıcı kullanmıştır. Kesici takım uçları yarıçaplarının; görüntülerden elde edilen grilik değerlerine bağlı olarak yüksek hassasiyette ve %5 hata toleransı ile belirlenebildiğini ortaya koyarak yöntemin gelişmiş görüntü işleme algoritmalarıyla nasıl uygulandığı konusunda detaylı açıklamalar yapmıştır. Kesici takım uçlarının görüntüleri elde edilirken kullanılan tarama tipine göre ışıklandırma seçiminin önem arz ettiği belirtilmiştir [80]. Şekil 5.6’ da T.Y. Lim’in çalışmasında yer alan taranan kesici uç bölgesi, Şekil 5.7’ de ise kesici uçların farklı bölgeleri için hazırlanan grilik değeri eğrileri verilmiştir.



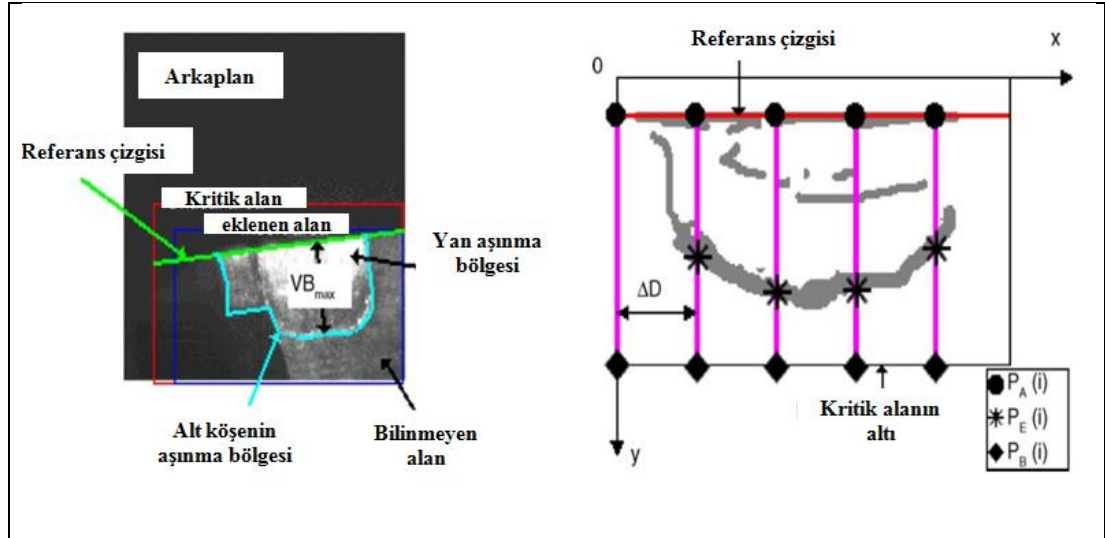
Şekil 5.6. Kesici takım ucunun görüntü işleme ile algılanması [80]



Şekil 5.7. Kesici takım ucunun farklı bölgelerinde elde edilen grilik değeri profilleri (a)-(e) [80]

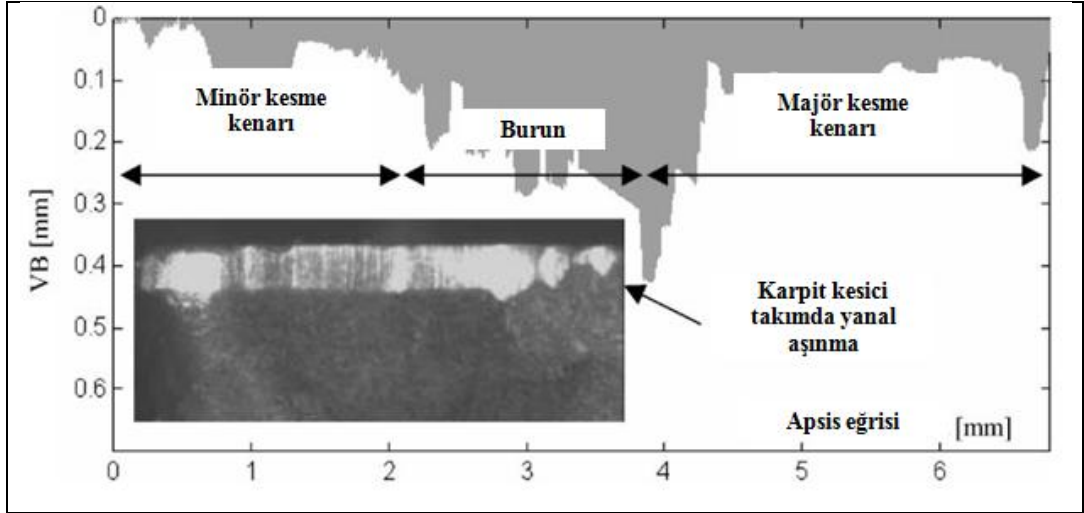
Wang ve arkadaşları yaptıkları çalışmada dönerek talaş kaldırma işlemi yapan bir kesici takım ucundaki talaş kaldırma sonrası aşınma miktarını ölçmek için görüntü işleme yöntemi kullanarak bir metot geliştirmişlerdir. Talaş kaldırma esnasında anlık aşınma görüntülerini elde etmek için yüksek hızlı kamera ve düşük dönüş hızı seçilmiştir. Bu yöntemle hareketli haldeki kesici takım ucu aşınması kontrol edilebildiğinden işlem esnasında makineyi durdurmaya ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu sayede üretim esnasında zaman kaybına sebep olmadan aşınma kontrolü mümkün

olmaktadır [81]. Şekil 5.8’ de Wang ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma ile ilgili görüntüler verilmiştir.

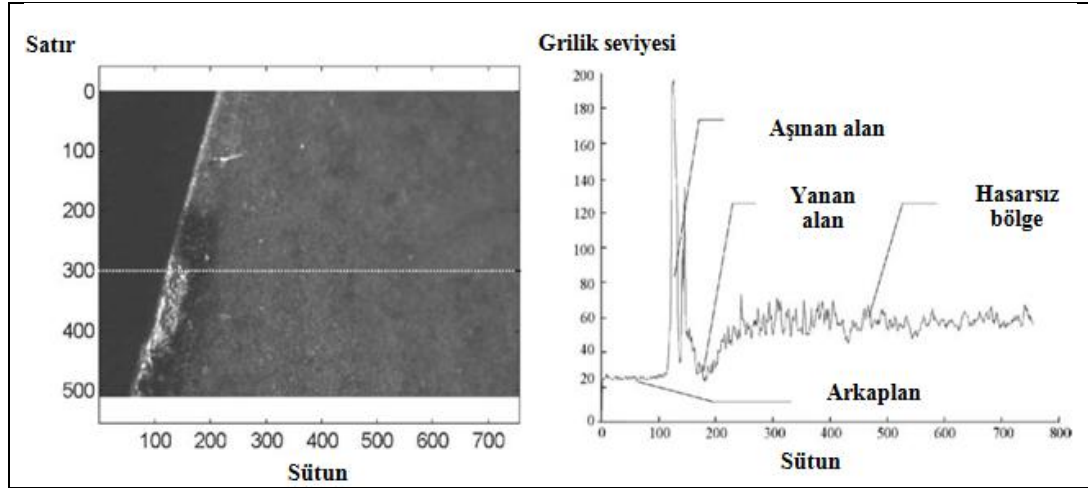


Şekil 5.8. Önemli aşınma ölçüm noktalarının gösterimi ve dikey yönde tarama sonrası elde edilen görüntü işleme noktaları [81]

Lanzetta yaptığı çalışmada kesici takım uçlarında aşınma hasarını görüntülemeye her yöntemin ortaya çıkan her hasar türü için verimli olmadığını ortaya koyarak bu sebeple farklı hasar türlerinin görüntü işleme yöntemleriyle elde edilmesi için uygun algoritmali görüntü işleme metodunun seçilmesi gerektiğini belirtmiştir. Çalışmasında öncelikle ortaya çıkan hasar türünü tanımlamış, sonrasında ise bu hasarı algılayabilecek ve aşınmayı ölçebilecek otomatik bir görüntüleme sensörü kullanmıştır. Farklı yapıdaki karpit kesici takım uçlarını kullanarak hasarlı ve hasarsız bölgeler arasındaki farkları ortaya koymuş, ayrıca görüntü işlemede kullanılan sensörü ve uygun ışıklandırma aparatını geliştirmiştir [82]. Şekil 5.9 ve 5.10’ da Lanzetta’ nın çalışmasında verilen aşınma ucu görüntüleri ve grilik değeri eğrileri verilmiştir.

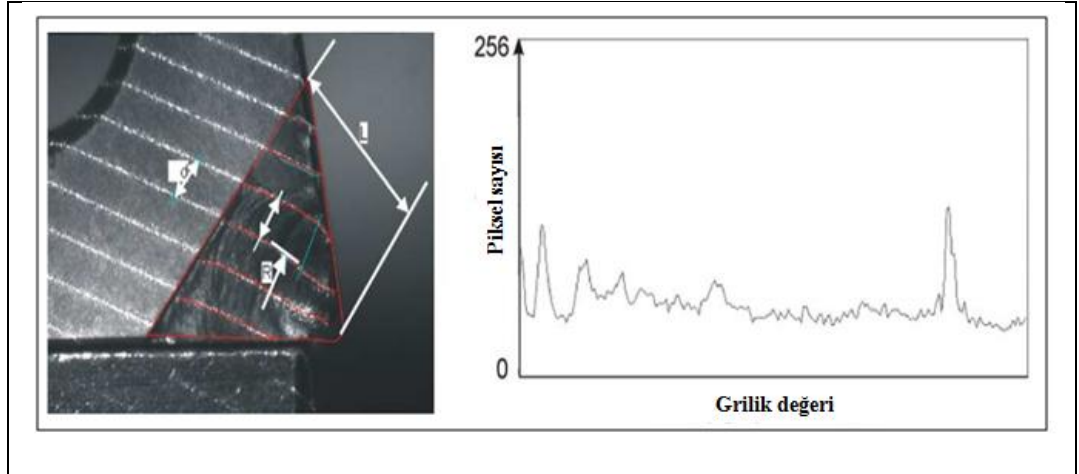


Şekil 5.9. Kesici takım ucunda ortaya çıkan aşınmanın görüntü işleme ile değerlendirilmesi [82]

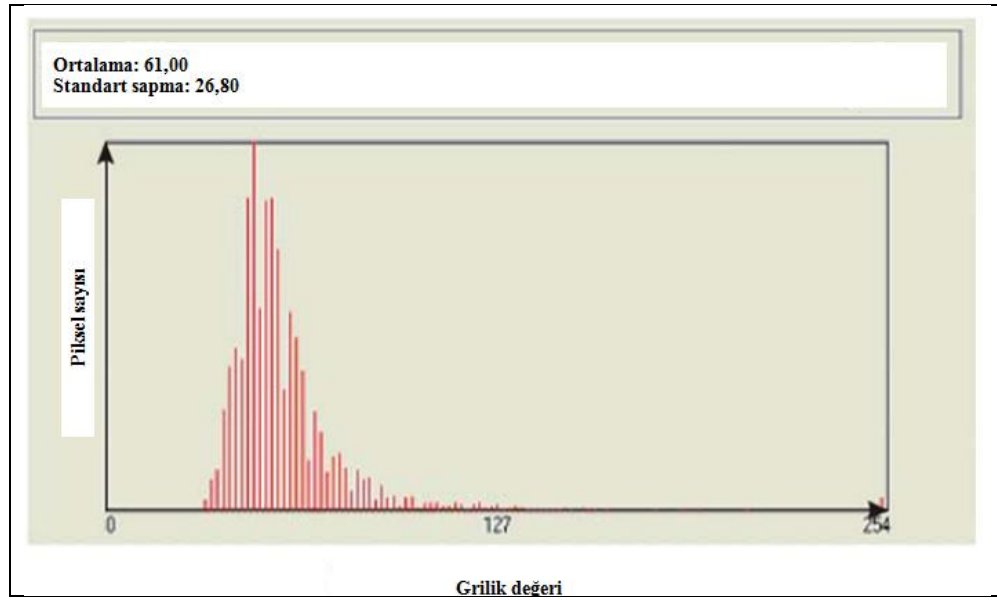


Şekil 5.10. Kesici takım ucu aşınma görüntüsü ve görüntüye ait grilik değeri bölgeleri [82]

J. Jurkovic kesici takımlarda aşınma hasarını gözlemlemek amacıyla lazerlerle birlikte kendi geliştirdikleri 3 boyutlu görüntü işleme kaynak kodunu kullanmıştır. Çalışmada yüzeyde oluşan aşınmaya bağlı yüzey topografyasının, görüntülerden elde edilen grilik değerleriyle ilişkili olduğu bildirilmiştir. Grilik derecesi ve aşınma miktarı arasında korelasyon kurularak geleneksel aşınma hasarlarının gözlemlenmesinde kullanılan sesle ölçüm (akustik emisyon) veya titreşim algılayıcıları gibi yöntemlerin zaman alıcı ve pahalı olmalarına vurgu yapılmıştır [90]. Şekil 5.11 ve 5.12’ de J. Jurkovic’ in çalışmasında yer alan hasar görüntüleri ve grilik değeri eğrileri verilmiştir.



Şekil 5.11. Yazılan görüntü işleme makrosuyla elde edilen aşınma parametrelerinin otomatik ölçümü [90]



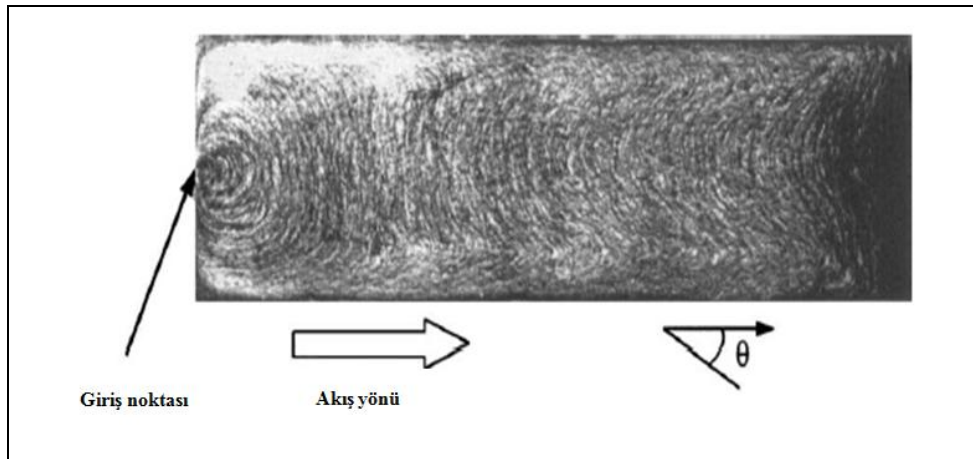
Şekil 5.12. İncelenen alandaki grilik değeri dağılım histogramı [90]

5.1.3. Görüntü işleme yöntemiyle kompozit içyapılarının ve kompozit hasarlarının incelenmesi

Kompozitler son otuz yılda geleneksel metal esaslı birçok mühendislik malzemesinin yerini almıştır. Birkaç farklı özelliğe sahip malzemenin istenen dayanım değerlerinde tek bir yapı altında birleştirilmesine ve böylece ağırlıktan kazanıma olanak sağlayan kompozitlerin üretim esansındaki parametrelerinin istenen değerlerde olup olmadığının gözlemlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu parametrelerden bazıları kompozit içerisindeki fiberlerin yönlenmelerinin tespiti, farklı tabakalar arasındaki yönlenme açılarının tespiti, özellikle ekstrüzyonla üretim sonrası matris-fiber arası

ıslatma ve yapışma kontrolüdür. Üretim aşamasında kompozitlerin içyapısında ortaya çıkan bu süreksizliklerin farklı görüntü işleme metotları kullanarak tespiti kompozitin servis şartları altındaki çalışma güvenliği açısından önem arz etmektedir. Diğer taraftan kompozitlerin servis şartları altında maruz kaldıkları normal ve anormal yüklemeler sonrası içyapılarında ortaya çıkan, özellikle delaminasyon ve fiber kırılması gibi hasarların tespitinde görüntü işleme metodu efektif ve etkili bir yöntemdir. Kompozitlerin doğası gereği içyapı hasarlarının tespiti konusundaki güçlük, detaylı iç görüntülerini tahribatsız olarak elde eden mikro tomografi, ultrasonik inceleme cihazların kullanımıyla ortadan kalkmıştır. Elde edilen bu içyapı görüntüleri görüntü işleme algoritmaları yardımıyla işlenerek delaminasyon boyu, derinliği gibi bilgilere mikron hassasiyetinde ulaşılabilmektedir. Bu bölümde görüntü işleme metoduyla kompozitlerde üretim ve kullanım esnasında ortaya çıkan hasarlarıyla ilgili çalışmalara örnekler verilmiştir [91-107].

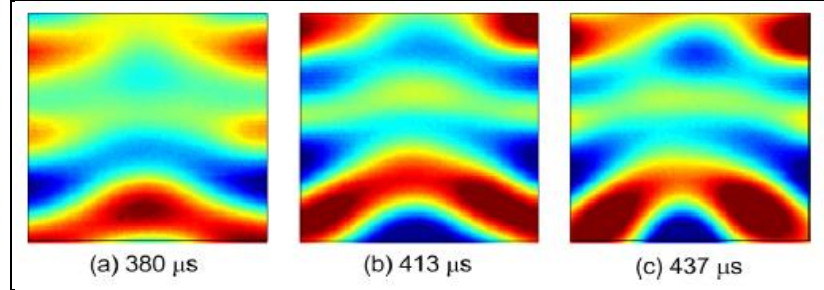
E.G. Kim, fiber takviyeli plastik kompozitlerde enjeksiyonla kalıplama esnasında fiberlerin yerleşimlerini incelemeye görüntü işleme yöntemi kullanmıştır. Görüntü işleme ile elde ettiği görüntüleri sayısal analiz yöntemiyle elde ettiği sonuçlarla karşılaştırmıştır [91]. Şekil 5.13' te görüntü işleme metodu ile elde edilen sonuçlara örnek verilmiştir.



Şekil 5.13. Enjeksiyonla kalıplama sonrası dikdörtgen kesitli bir parçada fiber yönelenmesini gösteren görüntü (ağırlıkça %50 fiber) [91]

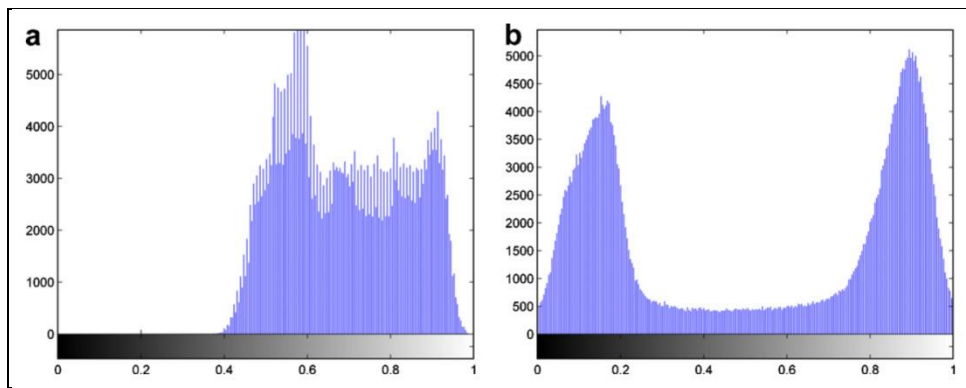
Sohn ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, tabakalı kompozitlerde Lamb dalgaları yöntemiyle elde ettikleri görüntüleri gizli delaminasyon hasarlarını ortaya çıkarmada kullanmışlardır. Lamb dalgalarını 1,8 mm kalınlıktaki tabakalı kompozitlere

gönderdikten sonra dalgaların yayılım hızından delaminasyon derinliği hesaplanarak görüntüler oluşturulmuştur [92]. Şekil 5.14’ te bu metodoloji ile elde ettikleri görüntüler verilmiştir.



Şekil 5.14. Farklı sürelerde dalga boylarından elde edilen delaminasyon görüntüleri [92]

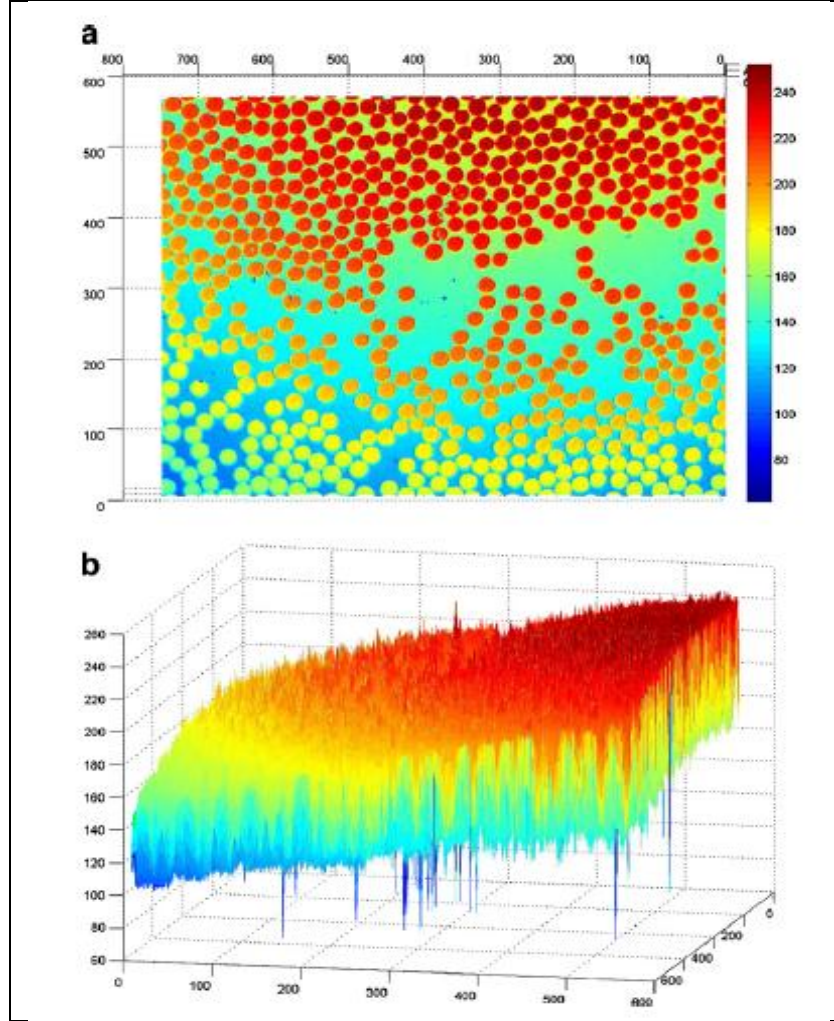
Trias yaptığı çalışmada karbon fiber takviyeli kompozitte fiberlerin dağılım istatistiklerini elde etmek amacıyla görüntü işleme metodunu kullanmıştır. 40 farklı numuneden elde ettiği görüntüleri işleyerek karbon fiberlerin dağılımlarını, yönlenmelerini ve hacimsel olarak dağılımlarını ortaya koymuştur. İstatistiksel analiz yöntemini kullanarak elde ettiği görüntülerden hacimsel olarak karbon fiberlerin kompozit yapı içinde dağılım yüzdesini elde etmiştir. Diğer taraftan görüntü işleme metodunun endüstriyel olarak da kullanılabilme potansiyeli olduğunu belirtmiştir [93]. Şekil 5.15 ve 5.16’ da bu çalışmalara ait histogram eğrileri ve grilik değerleri kullanılarak elde edilen derinlik haritaları verilmiştir.



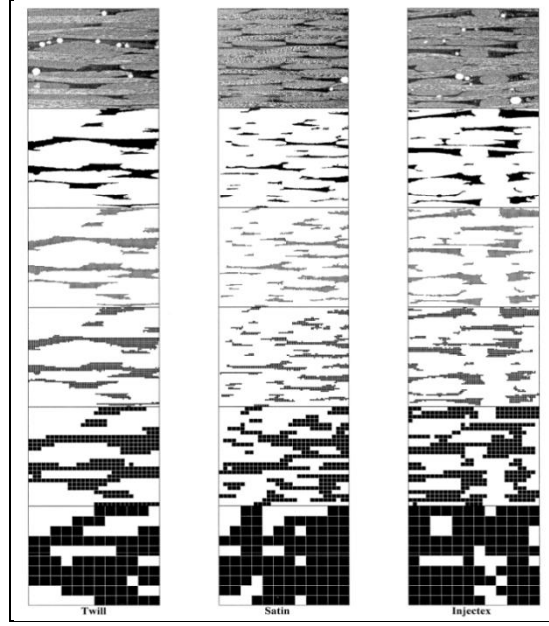
Şekil 5.15. Deneysel çalışması yapılan kompozitin (a) orjinal histogram ve (b) Otsu algoritması uygulandıktan sonra elde edilen histogram grafiği [93]

Pearce ve arkadaşları yaptıkları çalışmayla reçine transfer kalıplama yöntemiyle üretilen yüksek performanslı kompozitlerde reçine fiber ara bölgesinde ıslatma

yüzeylerini ve üç farklı fiber örgü yapısının bu ıslatma prosesine etkilerini görüntü işleme metoduyla incelemiştir. Şeffaf bir kalıp kullanarak üç farklı örgüye sahip karbon fiberlerin ıslatma yüzeyleri görüntülenmiştir. Şekil 5.17’ de üç farklı örgü biçimlerinde oransal fiber dağılımı görüntüleri verilmiştir. Her üç örgü şekli içinde kesilme, çekme ve basma testleri gerçekleştirildikten sonra mikro yapıdaki ıslatma bölgelerinin mekanik özelliklere etkisi ortaya konmuştur [94].

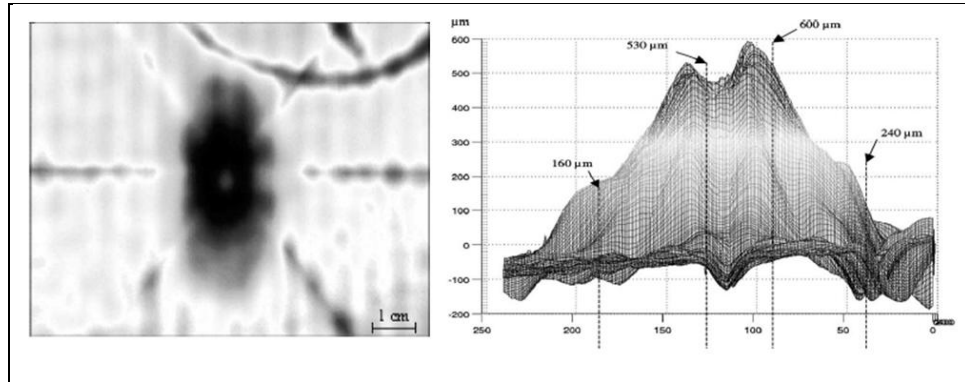


Şekil 5.16. Fiber dağılımlarını gösteren grilik değerinden elde edilmiş derinlik haritaları (a) ortogonal görünüş (b) perspektif görünüş [93]



Şekil 5.17. Farklı örgü biçimlerinde oransal fiber dağılımı görüntüsü [94]

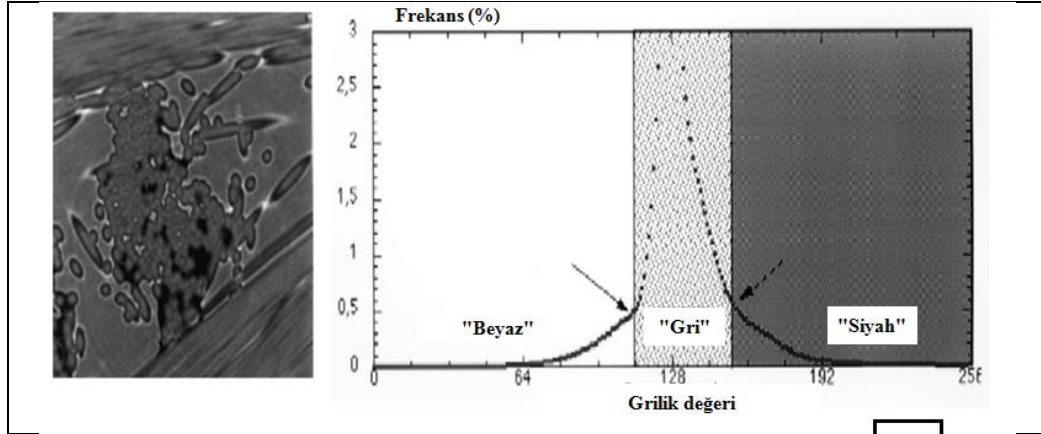
Guillaumat ve arkadaşları kızıl ötesi termal görüntüleri kullanarak cam fiber takviyeli epoksi kompozite ait delaminasyon hasarlarını görüntü işleme yöntemiyle incelemiştir. Bu yöntemle elde ettikleri görüntülerin aynı zamanda asimptotik ısı genleşme hakkında da bilgi verebileceğini söylemişlerdir. Elde edilen görüntüler fiziki olarak gözlemlenebilen delaminasyon hasarıyla birebir örtüştüğünü göstermişlerdir [95]. Şekil 5.18’ de Guillaumat ve arkadaşlarının gerçekleştirdikleri çalışmalar ile elde edilen görüntüler verilmiştir.



Şekil 5.18. Termal görüntülemeyle elde edilen delaminasyon hasarı ve görüntü işlemeyle elde edilen 3 boyutlu delaminasyon topografyası [95]

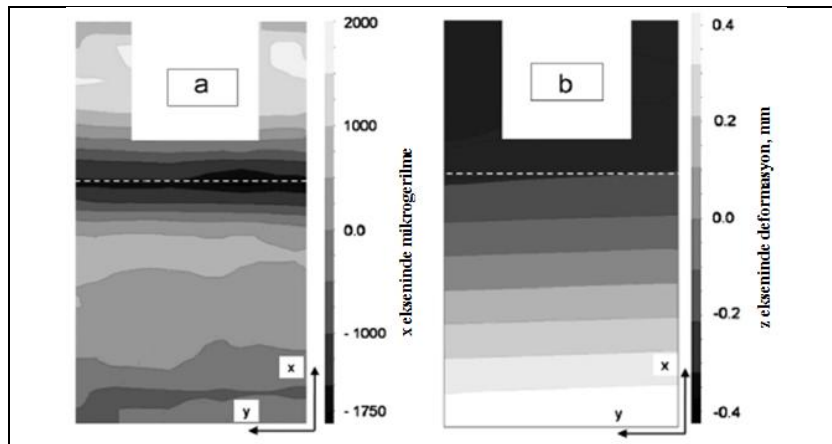
Vignoles yaptığı çalışmada gözenekli yapıdaki karbon takviyeli kompozitte X-ışını tomografisi yöntemiyle elde ettiği görüntüleri işleyerek değerlendirme yapmaya

çalışmıştır. Temelde karbonun zayıf X-ışını emme karakteristiği kullanılarak görüntüleme tekniği için bir algoritma geliştirilmiştir. Burada kullanılan görüntü işleme metodunun aynı zamanda gözenekli yapıya sahip birçok seramik esaslı kompozit iç yapısının da incelenmesinde kullanılabileceği öngörülmüştür [97]. Şekil 5.19’ da bu çalışmalar ile elde edilen görüntüler verilmiştir.



Şekil 5.19. X-ışını tomografisi ile elde edilen karbon fiber takviyeli kompozit görüntüsü ve görüntüye ait grilik değeri histogramı [97]

Kompozitlerde hasar tanımlanmasında görüntü işleme metodunun kullanılmasıyla ilgili ilginç bir çalışma Comer ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışmada havacılık yapılarında üst üste binen kompozitlerin yapıştırma yöntemiyle birleştirilmesi sonrası yük altında gerilmeye bağlı deformasyonlar görüntülenmeye çalışılmıştır [98]. Şekil 5.20’ de bu çalışmalar ile elde edilen görüntüler verilmiştir.



Şekil 5.20. Farklı eksenlerde yapışma bölgesinde ortaya çıkan gerilmelerin grilik değeri kontur dağılımları (a) x eksen (b) z eksen [98]

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Malzeme

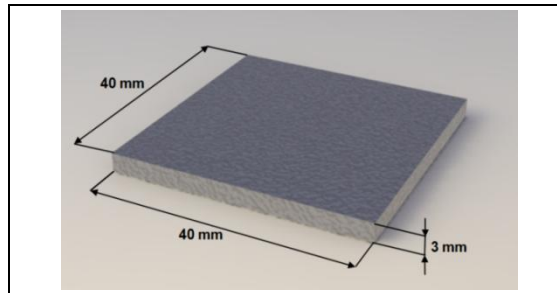
6.1.1. Hedef malzeme

Deneysel çalışmalarda ticari adı ile Ti.Gr.5 (Ti6Al4V) alaşımı kullanılmıştır. Titanyum alaşımı 1 m²'lik levhalar halinde Timet Titanyum Metal&Medical Firmasından temin edilmiştir. Deneysel çalışmalarda hedef malzeme (aşındırılan malzeme) olarak kullanılan levha halindeki Ti6Al4V alaşımının X-ışını floresan spektrometre ile alınan elementsel analizi Tablo 6.1' de verilmiştir.

Tablo 6.1. Çalışmalarda kullanılan titanyum alaşımının (Ti6Al4V) elementsel analizi

Element	% Ağırlık Oranı
Al	5,629
Fe	0,089
S	0,006
Si	0,052
Ti	91,455
V	2,769

Levha halindeki Ti6Al4V malzeme giyotin makas ile kesilerek, kare plakalar şeklinde numuneler hazırlanmıştır. Şekil 6.1' de hazırlanan numunelerin boyutları gösterilmiştir. Tablo 6.2' de ise Ti.Gr.5 (Ti6Al4V) alaşımının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri verilmiştir.



Şekil 6.1. Ti6Al4V numunelerin boyutları

Tablo 6.2. Ti.Gr.5 (Ti6Al4V) alaşımlarının kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

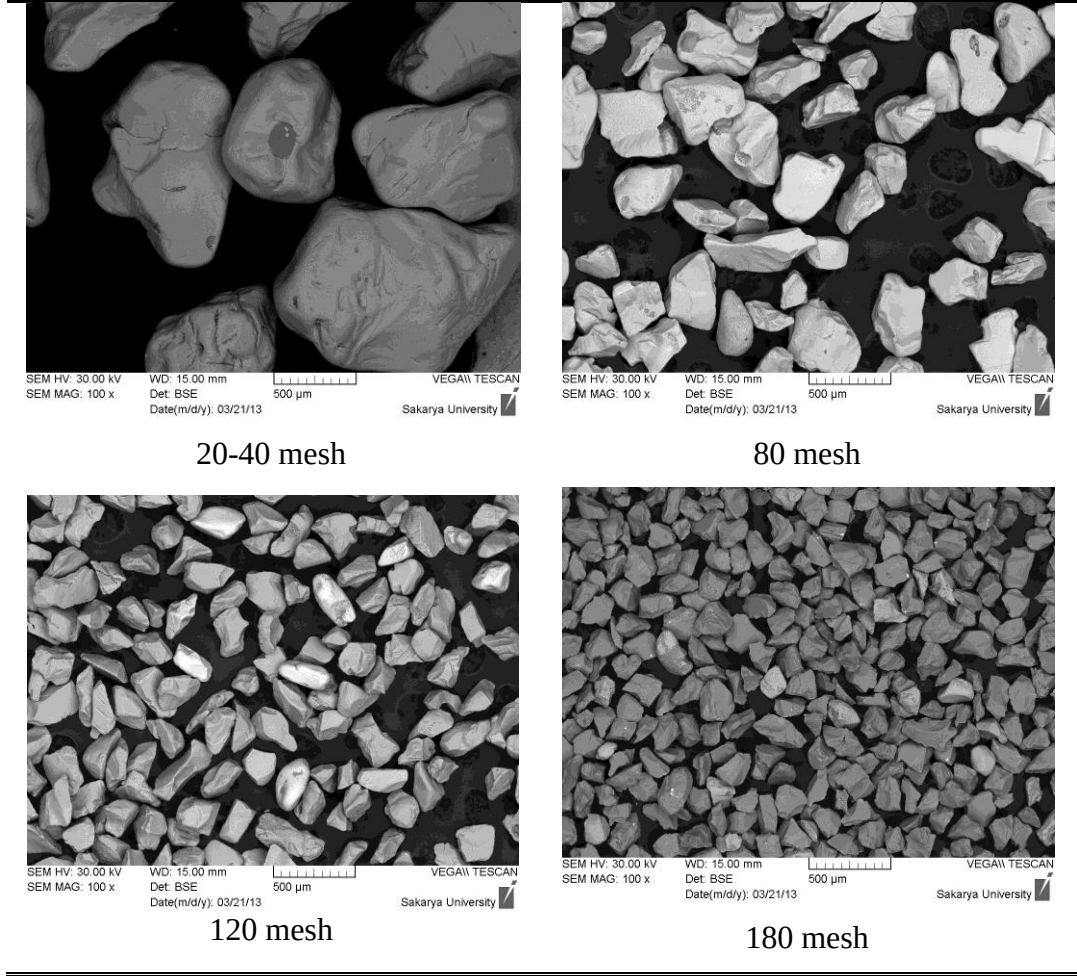
TİTANYUM ALAŞIMI	Ti - 6Al - 4V			
ASTM Sınıfı	Grade 5 (R56400)			
Kimyasal Kompozisyon (wt. %) (Maks. değerler eğer aralık verilmezse)	0,08C; 0,25Fe; 0,05N; 0,20O; 5,50-6,75Al; 3,5-4,5V; 0,0100H (kütük); 0,0125H (bar); 0,0150H (levha)			
ÇEKME ÖZELLİKLERİ	Oda Sıcaklığında Min. Değerler	Yüksek Sıcaklık Özellikleri		
		150°C	260°C	370°C
Kopma Mukavemeti MPa	896	845	758	690
Akma Mukavemeti Mpa	827	724	641	565
DİĞER MEKANİK ÖZELLİKLERİ				
Haddelenmiş-Tavlanmış Koşullarda				
Charpy V-Çentik Darbe Dayanımı	20 - 27 J			
Ortalama Sertlik	33 HRC			
FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ				
Yoğunluk	4,43 g/cm ³			
Ergime Sıcaklığı Ort. °C	1650 °C			
Elastisite Modülü (Çekme)	114 GPa			

6.1.2. Aşındırıcı malzeme

Deneyisel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak, dört farklı partikül boyutuna sahip garnet aşındırıcılar kullanılmıştır. Tablo 6.3'te deneyisel çalışmalarda kullanılan garnet aşındırıcıların partikül boyutları verilmiştir. Garnet mineralleri Saykar Metalurji ve Yüzey İşlem Ürünleri San. Tic. Ltd. Şti.'nden temin edilmiştir. Temin edilen firmadan alınan ürünlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri ile mineralojik yapısı aşağıdaki Tablo 6.4'te verilmiştir. Şekil 6.2'de deneyisel çalışmalar kullanılan aşındırıcı partiküllerin taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları verilmiştir.

Tablo 6.3. Deneyisel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları

Aşındırıcı Partikül Adı	Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
Garnet (20-40 Mesh)	300-850 mikron
Garnet (80 Mesh)	150-212 mikron
Garnet (120 Mesh)	90-125 mikron
Garnet (180 mesh)	53-90 mikron



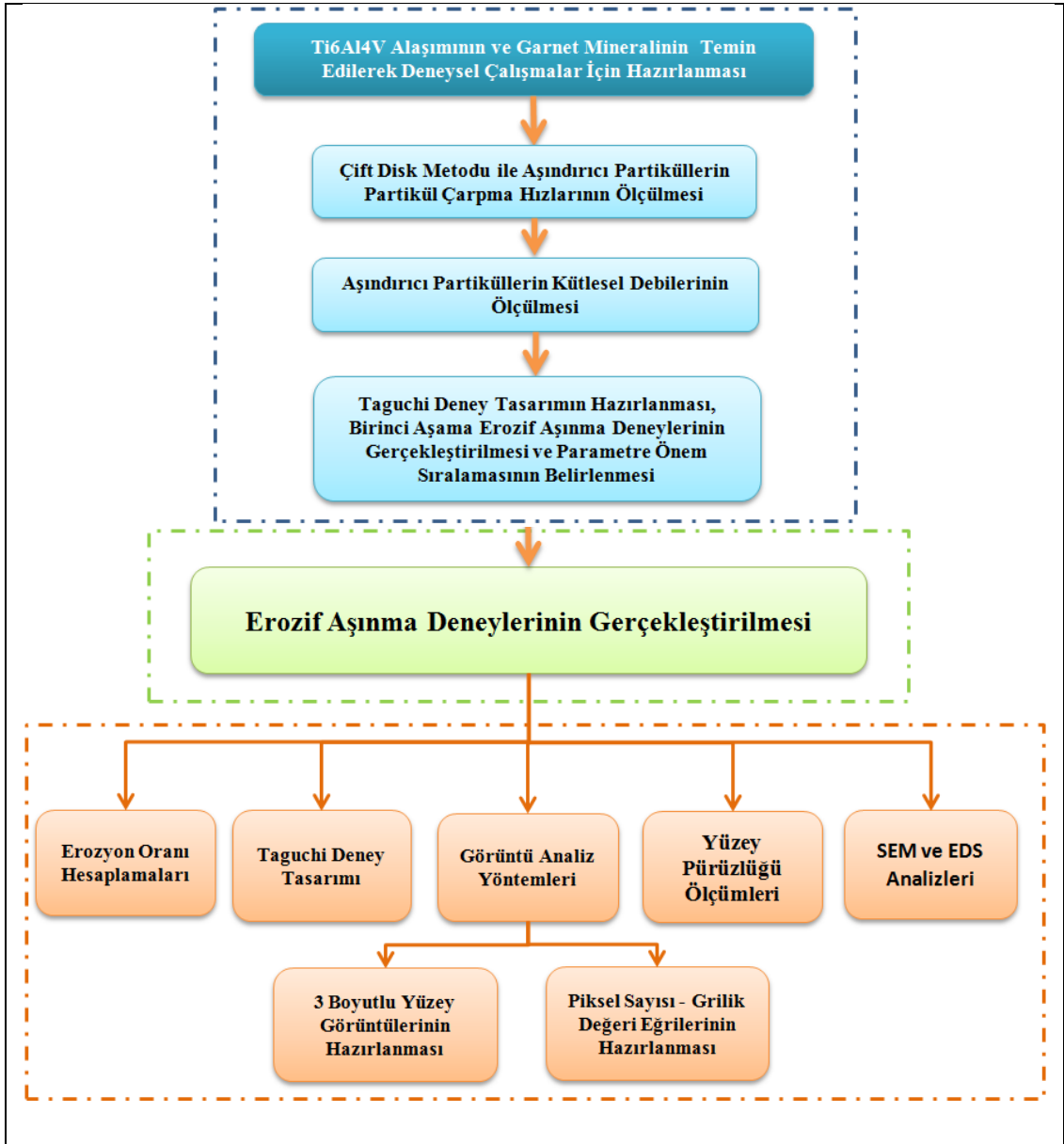
Şekil 6.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcılar

Tablo 6.4. Deneysel çalışmalarda kullanılan garnet minerallerinin özellikleri

GARNET MİNERALİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
Garnet 'in Özgül Ağırlığı	4,1 g/cm ³
Garnet 'in Ortalama Dökme Yoğunluğu	2,4 g/cm ³
Garnet 'in Sertliği	>8 (mohs skalası)
Garnet 'in Kristal Sistemi	Kübik
Garnet 'in Kırılması	Yarı-concoidal (midye kabuğu şekli)
Garnet 'in Nem Çekme Özelliği	Nem çekmez (higroskopik değildir)
Garnet 'in Patolojik Zarar Verme Özelliği	Yoktur
Garnet 'in Serbet Silika İçeriği	Yoktur
GARNET MİNERALİNİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	
Al ₂ O ₃ : 21%, Fe ₂ O ₃ : 31%, SiO ₂ : 35%, MgO : 8%, CaO : 1,5%, TiO ₂ : 1% P ₂ O ₅ : 0,05%, MnO : 0,5%, ZrO ₂ : Eser Miktarda	
GARNET MİNERALİNİN MINEROLOJİK YAPISI	
Garnet (Almandine)	97-98 %
Ilmenite	1-2 %

6.2. Yöntem

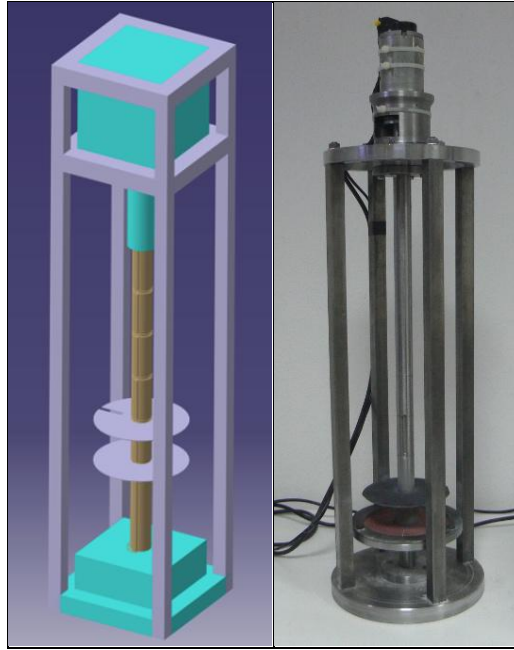
Doktora tez çalışmasında Şekil 6.3'te akış şemasında verilen deneysel çalışmalar sırası ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölüm içerisinde akış şemasında verilen yöntemlerin nasıl gerçekleştirildiği ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır. Deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi aşamasında kullanılan cihaz ve ekipmanlar akış şemasında verilen yöntemlerin anlatıldığı bölümler içerisinde verilmiştir.



Şekil 6.3. Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması

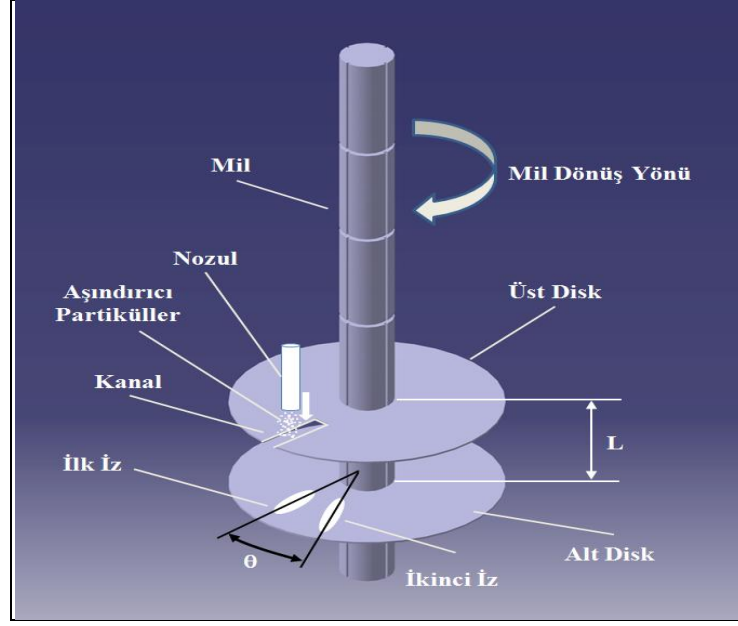
6.2.1. Çift disk yöntemi ile aşındırıcı partiküllerin partikül çarpma hızlarının ölçülmesi

Deneysel çalışmalarda çift disk metodu ile garnet aşındırıcıların üç farklı basınçta (1,5, 3 ve 4 bar) hızlandırılmış ve bu basınçlarda partikül hızları ölçülmüştür. Çift disk metodu ile gerçekleştirilen aşındırıcı partikül hız ölçümleri için kullanılan deneysel cihaz aşağıda açıklanan matematiksel hesaplamalara göre tasarlanarak imal edilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.4' te çift disk deney düzeneğinin CAD ve gerçek resmi verilmiştir.



Şekil 6.4. Döner disk partikül hız ölçme sisteminin CAD ve gerçek resimleri

Şekilde verilen döner disk partikül hız ölçme sisteminin temin edilmesinden sonra hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hız ölçümleri için gerekli formülasyonlar Microsoft Office Excel' de hazırlanmıştır. Aşınma izleri arası mesafe, diskler arası mesafe, disk merkezi ile iz arası mesafe ve disk devir sayısının hazırlanan excel formülasyonuna girilmesi ile her bir partikülün 1,5, 3 ve 4 bar basınç değerlerinde hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.5' de partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler cihazın CAD resmi üzerinde verilmiştir.



Şekil 6.5. Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler

Denklem (6.1)' de döner disk ile partikül çarpma hızlarının hesaplanması için kullanılan formülasyon verilmiştir. İlk aşamada disklerin dönüş hızı (n) ve aşınma izleri arasındaki açı (θ) ölçülerek partiküllerin birinci diskten ikinci diske ulaşmaları esnasında geçen süre (t) hesaplanır.

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (6.1)$$

t = partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)

θ = İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı ($^{\circ}$)

n = devir hızı (d/dk)

Daha sonra hesaplanan süre Denklem (6.2)' de yerine koyularak partiküllerin çarpma hızı bulunur.

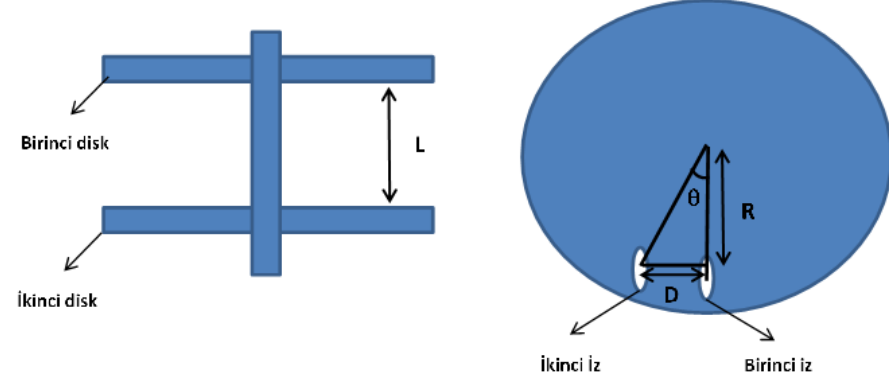
$$V = \frac{L}{t} \quad (6.2)$$

V = partikül çarpma hızı (m.s^{-1})

L = diskler arası mesafe (m)

t = partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre (s)

Şekil 6.6’ da döner disk partikül hız ölçme sistemi ile ölçülen partikül hızı form üzerinde görülmektedir.

DÖNER DİSK HIZ HESABI							Form No
							3
							Tarih
							03.12.2010
VERİLER							
Diskler Arası mesafe (m)	Devir Hızı (d/d)	Devir Hızı (d/s)	Disk merkezi ile iz arası mesafe (m)	İlk iz ile ikinci iz arası mesafe (m)	Açı (Derece)	Aşınan diskin devir sayısı	Çarpışma Süresi (s)
(L)			R	D	(θ)		
0,05	2000	33,3333	0,04	0,007	9,926245507	0,027572904	0,00082719
→ Girilmesi Gereken Veriler							
PARTİKÜL HIZI (m/s) 60,442							
							

Şekil 6.6. Döner disk hız ölçüm hız hesap formu

6.2.2. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin hesaplanması

Deneyisel çalışmalarda garnet aşındırıcılar üç farklı basınçta (1,5, 3 ve 4 bar) hızlandırılmış ve bu basınçlarda aşındırıcı partiküllerin kütleli debileri ölçülmüştür. Elde edilen debi değerleri daha sonra Ti6Al4V alaşımının farklı partiküller ile aşındırılması sonrasında erozyon oranlarının hesaplanması için kullanılmıştır.

Kütleli debilerin ölçülmesi için aşındırıcı partiküller 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basınçlarında 30 saniye süresince püskürtülmüştür. Bu süre içerisinde harcanan aşındırıcı partikül kütlelerinin püskürtme süresine bölünmesi ile her bir partikül boyutu ve basınç değeri için kütleli debi hesaplanmıştır.

6.2.3. Taguchi deney tasarımı

Tez çalışması kapsamında Taguchi deney tasarımı iki farklı amaç için kullanılmıştır. Bu nedenle Taguchi çalışmaları iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada Taguchi deney tasarımı kullanılarak Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışını etkileyen parametrelerin önem derecelerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının karakterize edilmesi için ilk başta kullanılması düşünülen parametreler ile deney tasarımı gerçekleştirilmiş ve bu parametrelerin etkinliği analiz edilerek hangi parametrelerin daha derinlemesine incelenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu çalışmalarda başlangıç parametrelerin azaltılması amaçlanmıştır. Bu aşamadan sonra tez çalışmasında önem derecesi yüksek olan parametrelerin etkileri üzerine çalışılmış ve önem derecesi daha düşük olan parametreler elemine edilmiştir.

İkinci aşamada ise farklı deney desenlerinde (L9 ve L18) Taguchi deney tasarımları kullanılarak az sayıda erozif aşınma deneyleri gerçekleştirilerek erozyon oranı verileri elde edilmiştir. Daha sonra bu veriler kullanılarak kurulan deney tasarımı ile deneysel olarak çalışılacak tüm parametrelerin erozyon oranı sonuçları tahmin edilmiştir. Sonraki aşamada bu tahminler ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak Taguchi deney tasarımının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının optimizasyonunda etkinliğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla iki farklı deney deseni kurularak deneysel çalışmalarda kullanılan tüm parametreler için erozif aşınma sonuçları Taguchi deney tasarımı ile hesaplanmış ve gerçek sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Taguchi deneysel çalışmaların birinci aşaması için Ti6Al4V numuneler üç farklı partikül boyutuna sahip garnet aşındırıcılar ile özel olarak hazırlanan kumlama düzeneği kullanılarak aşındırılmıştır. Kumlama düzeneği ve erozif aşınma deneyleri ile ilgili detaylı bilgiler bir sonraki bölümde verilecektir. Birinci aşama Taguchi deney tasarımının kurulması için Tablo 6.5’ de verilen parametrelerin farklı kombinasyonlarında toplam 27 adet erozif aşınma deneyi gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6.5. Birinci aşama erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler

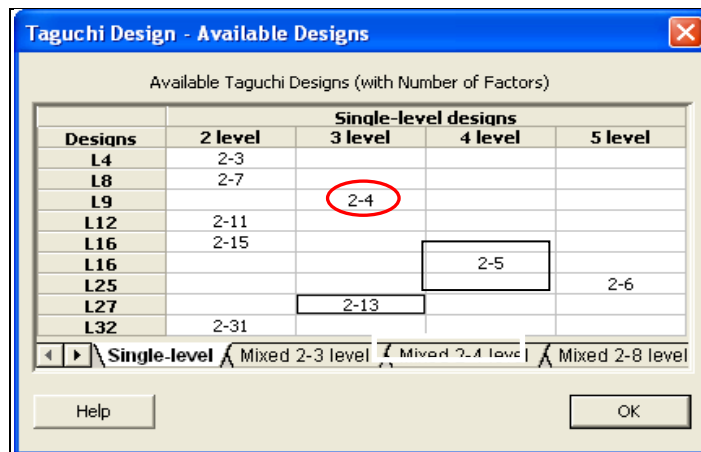
Aşındırıcı partikül boyutu	80, 120 ve 180 mesh
Partikül Çarpma Açısı	30°, 60°, 90°
Püskürtme Basıncı	1,5, 3 ve 4 bar
Nozul Numune Arası Mesafe	10, 15 ve 20 mm

Tablo 6.6’de tez çalışmasında incelenecek partikül çarpma açısı, partikül boyutu, püskürtme basıncı ve nozul numune arası mesafe parametreleri için deney tasarımına uygun olarak hazırlanan seviye ve faktörler verilmiştir.

Tablo 6.6. Deney tasarımı için belirlenen seviye ve faktörler

Parametreler	1. Seviye	2. Seviye	3. Seviye
Partikül Çarpma açısı (°)	30	60	90
Partikül Boyutu (mesh)	80	120	180
Püskürtme Basıncı (Bar)	1,5	3	4
Nozul numune arası mesafe (mm)	10	15	20

Tez çalışmasında 4 faktör ve 3 seviye için L9 Taguchi deseni kullanılmıştır. Şekil 6.7’ de Minitab programında 3 seviye ve 2-4 faktör sayısı olduğu zaman kullanılan L9 matrisin ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 6.7. Minitab programında yapılan Taguchi tasarımı

Tablo 6.6’ da verilen tüm parametrelerin kombinasyonları ile üç tekrar ile deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesi durumunda toplan 243 adet deney yapılması gerekmektedir. Buna karşın Taguchi deney tasarımı kullanılarak kısmi faktöriyel ile toplam 9 adet kombinasyon üç tekrar ile gerçekleştirilmiş ve toplam olarak 27 adet erozif aşınma deneyi yapılmıştır. Tablo 6.7’ de gerçekleştirilen deneylerin parametreleri verilmiştir.

Tablo 6.7. Gerçekleştirilecek deney parametreleri

Deney No	Partikül Çarpma Açısı (derece)	Partikül Boyutu (Mesh)	Püskürtme Basıncı (bar)	Nozul Numune Arası Mesafe (mm)
1	30	80	1,5	10
2	30	120	3	15
3	30	180	4	20
4	60	80	3	20
5	60	120	4	10
6	60	180	1,5	15
7	90	80	4	15
8	90	120	1,5	20
9	90	180	3	10

Deneysel sonuçlardan birçok sinyal-gürültü (signal-to-noise) (S/N) oranı hesaplanmıştır. Ti6Al4V alaşımının en düşük erozif aşınma değerlerini elde edilebilmesi için “en küçük en iyi” karakteristiği kullanılmıştır. Analizler için “en küçük en iyi” karakteristiğini tanımlayan aşağıdaki formül kullanılabilir:

$$\eta = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (6.3)$$

Bu eşitlikte “ η ” “en küçük en iyi” durumu için S/N oranını; “ y_i ” deneyde elde edilen değeri; “ n ” ise her bir test denemesi için tekrarlı numune sayısını ifade etmektedir.

S/N oranlarının yanı sıra hangi parametrenin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışını hangi derecede etkilediğini tespit edebilmek için varyans analizleri de “analysis of variance” (ANOVA) deneysel veriler üzerinde kullanılmıştır.

Taguchi Deney Tasarımının ikinci aşaması için ise farklı faktörlere ve seviyelere sahip L9 ve L18 deney desenleri kullanılmıştır. Tablo 6.8’ de L9 ve L18 deney planları için kullanılan parametreler verilmiştir. Tablo 6.8’ de verilen faktör ve seviyeler kullanılarak yukarıda anlatıldığı gibi bu deney desenleri için de deney planları hazırlanmış ve Taguchi deney tasarımı analizleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 6.9 ve 6.10’ da bu aşamada gerçekleştirilen erozif aşınma deneylerin parametreleri verilmiştir.

Tablo 6.8. İkinci aşama Taguchi deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı partikül boyutu	80, 120 ve 180 mesh
Partikül Çarpma Açısı	15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°
Püskürtme Basıncı	1,5, 3 ve 4 bar

Tablo 6.9. L9 Deney planı için gerçekleştirilecek deney parametreleri

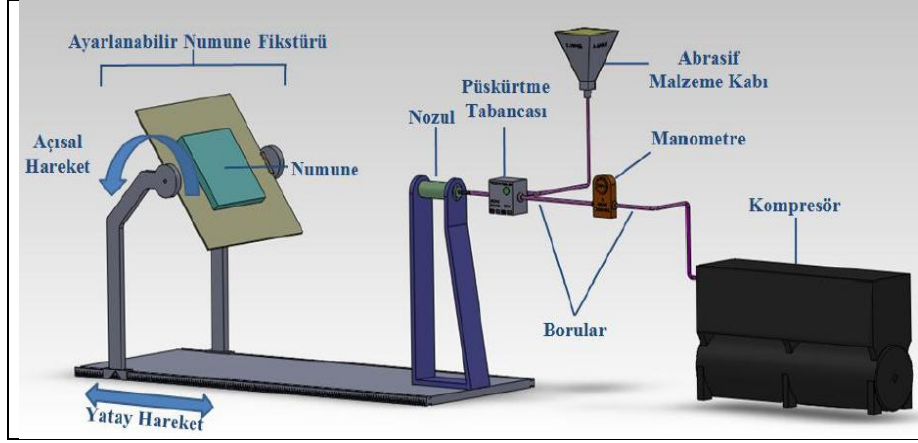
Deney No	Partikül Çarpma Açısı (derece)	Püskürtme Basıncı (bar)	Partikül Boyutu (Mesh)
1	30	1,5	80
2	30	3	120
3	30	4	180
4	60	1,5	120
5	60	3	180
6	60	4	80
7	90	1,5	180
8	90	3	80
9	90	4	120

Tablo 6.10. L18 Deney planı için gerçekleştirilecek deney parametreleri

Deney no	Partikül Çarpma Açısı (derece)	Püskürtme Basıncı (bar)	Partikül Boyutu (Mesh)
1	15	1,5	80
2	15	3	120
3	15	4	180
4	30	1,5	80
5	30	3	120
6	30	4	180
7	45	1,5	120
8	45	3	180
9	45	4	80
10	60	1,5	180
11	60	3	80
12	60	4	120
13	75	1,5	120
14	75	3	180
15	75	4	80
16	90	1,5	180
17	90	3	80
18	90	4	120

6.2.4. Erozif aşınma deneyleri

Erozif aşınma deneyleri özel olarak tasarlanan erozif aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Erozif aşınma test düzeneği basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, kumlama kabini, numune fikstürü ve kumlama tabancası elemanlarından oluşmaktadır. Kumlama tabancası kumlama kabini içerisine sabitlenmiştir ve kabin dışarısından bir pedal vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Kumlama basıncı da kabin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanabilmektedir. Kumlama kabini içerisine numunenin sabitlenmesi ve numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülmesini sağlayan özel bir numune fikstürü yerleştirilmiştir. Bu düzenek ile kabin içerisine sabitlenmiş kumlama tabancası, numunenin 15'er derece ile döndürülmesine olanak veren fikstürün hareketi ile numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtebilmektedir. Kumlama işlemleri sırasında numuneler bu fikstür kullanılarak kumlama tabancasından 20 mm uzaklıkta tutulmuştur. Şekil 6.8' de katı partikül erozyonu test düzeneği verilmiştir.

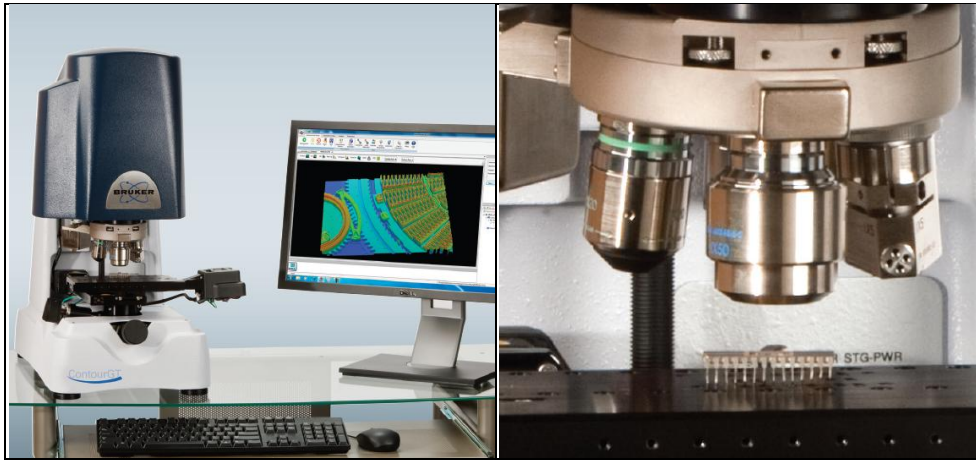


Şekil 6.8. Katı partikül erozyonu test düzeneği.

Şekilde verilen test düzeneği ile Ti6Al4V alaşımı farklı partikül çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) ve hızlarında, farklı püskürtme basınçlarında (1,5, 3 ve 4 bar) farklı partikül boyutlarında garnet mineralleri (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) kullanılarak aşındırılmıştır.

6.2.5. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri

Farklı parametreler altında katı partikül erozyonu ile aşındırılan numunelerin yüzeylerinden aşınma hasarının merkez bölgesinden Bruker ContourGT InMotion 3D optik profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Şekil 6.9' da deneysel çalışmalarda kullanılan optik profilometre cihazının fotoğrafı, Tablo 6.11' de ise bu cihazın önemli özellikleri verilmiştir.



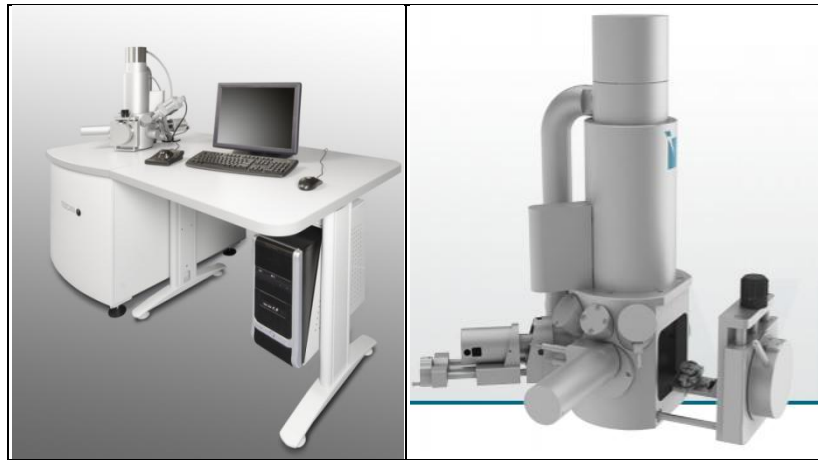
Şekil 6.9. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik profilometre cihazı

Tablo 6.11. Optik profilometre cihazının özellikleri

Aydınlatma aralığı (dinamik)	Beyaz Işık 11 Hz – 100 kHz Yeşil Işık 11 Hz – 2,4 MHz
Dikey Çözünürlük	0,1 nm (cihaza bağlı)
Yatay Çözünürlük	380 nm (objektife bağlı)
Yatay Yer Değiştirme Çözünürlüğü	0,1 piksel (geometriye bağlı)

6.2.6. SEM ve EDS analizleri

Farklı parametreler altında katı partikül erozyonu ile aşındırılan numunelerin yüzeyleri Tescan Vega2 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Şekil 6.10’ da deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazının fotoğrafı, Tablo 6.12’ de ise bu cihazın önemli özellikleri verilmiştir. Deneysel çalışmalarda EDS analizleri SEM cihazına ekli Bruker Quantax EDS dedektörü ile gerçekleştirilmiştir.

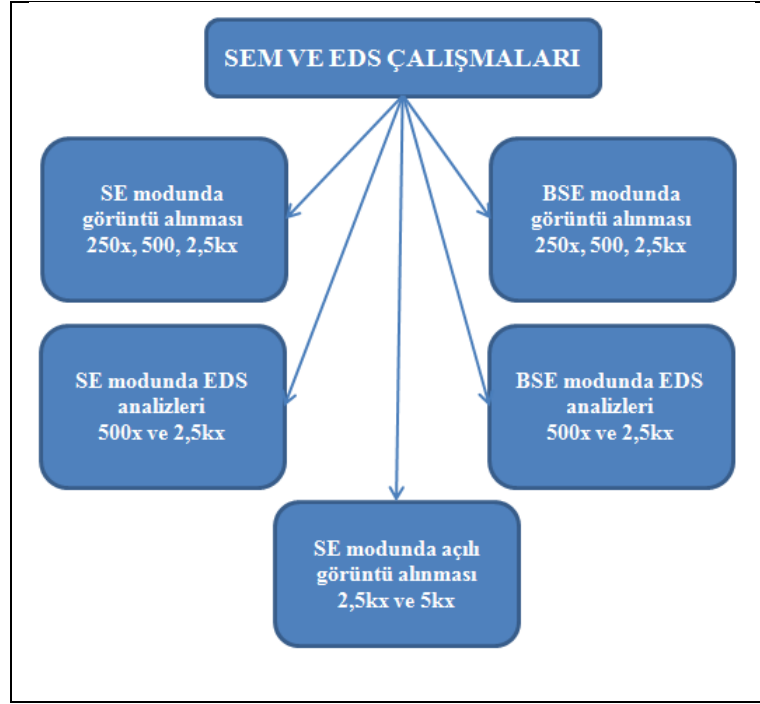


Şekil 6.10. Deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı

Tablo 6.122. SEM cihazının özellikleri

Çözünürlük	Yüksek vakum modunda 3nm, Düşük vakum modunda 3nm
Büyütme	6x – 1’000’000x
Hızlandırma Voltajı	200V - 30kV, 10V adımlı
Prob akımı	1pA - 2uA
Tarama	Tarama hızı: piksel başına 160ns - 10ms, adımlı veya sürekli
Resim boyutu	8192 x 8192 piksele kadar
Numune kabini	160 mm iç çap

Tez çalışması kapsamında farklı parametrelerde aşındırılan numunelerin yüzeyleri bu bölüm içerisinde verilen SEM cihazı ile derinlemesine incelenmiştir. SEM analizleri sırasında numunelerden farklı modlarda ve farklı büyütme oranlarında görüntüler alınmış, numune yüzeylerinde EDS analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.11' de SEM çalışmalarında gerçekleştirilen faaliyetler şematik olarak verilmiştir.



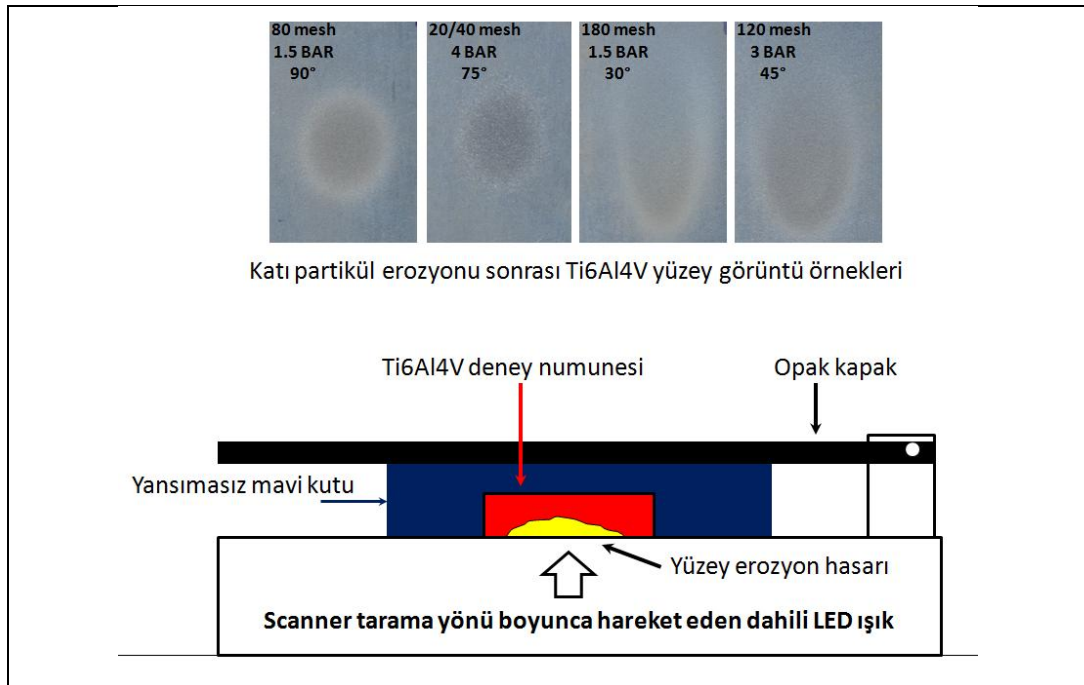
Şekil 6.11. SEM çalışmasında kullanılan yöntemler

6.2.7. Görüntü analiz yöntemleri ile aşındırılmış numunelerin yüzey görüntülerinin hazırlanması

Tez çalışması kapsamında 6 farklı partikül çarpma açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°), 3 farklı püskürtme basıncı (1,5, 3 ve 4 bar) ve 4 farklı boyutta aşındırıcı partiküller (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) ile aşındırılan numunelerin yüzey morfolojileri görüntü işleme programları yardımıyla analiz edilmiştir. Aşındırılmış yüzeylerin görüntü analizleri ile tez çalışmasında incelenen parametrelerin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına etkilerinin özgün bir metodoloji kullanılarak değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Katı partikül erozyonu sonrası Ti6Al4V numunelerin iki boyutlu yüzey görüntülerini elde etmek için HP Scanjet G2710 model yatay tarayıcı kullanılmıştır. Tarayıcı cam tarama yüzeyini tamamen örten ve dışarıdan sızacak harici ışık demetini engelleyici

opak bir kapağa sahiptir. Tarayıcı iç yapısında bir adet dahili yatay hareketli LED ışık kaynağına, CCD algılayıcıya ve görüntü işleme yazılımına sahiptir. Görüntü taraması yapılacak numuneler hasar gören yüzeyleri tarayıcının cam penceresine oturacak şekilde yerleştirilerek tarayıcıya ait opak kapak kapatılarak tarama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Tarama işlemi esnasında numune ile opak kapak arasına köşelerden sızabilecek dış ortam ışığını engellemek için mavi bir kutu kullanılmıştır. Mavi kutu boyutları numune boyutlarına uygun şekilde imal edilmiştir. Tarayıcının opak kapağı ile numune arasına yerleştirilen mavi kutu dışarıdan ışık sızmalarını engellemiştir. Katı partikül erozyonuna maruz kalmış Ti6Al4V numunelerinin tarayıcıda taranması için kurulmuş düzenek Şekil 6.12’ de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 6.12. Aşındırılmış Ti6Al4V numunelerin tarayıcıya yerleştirilmesinin şematik gösterimi

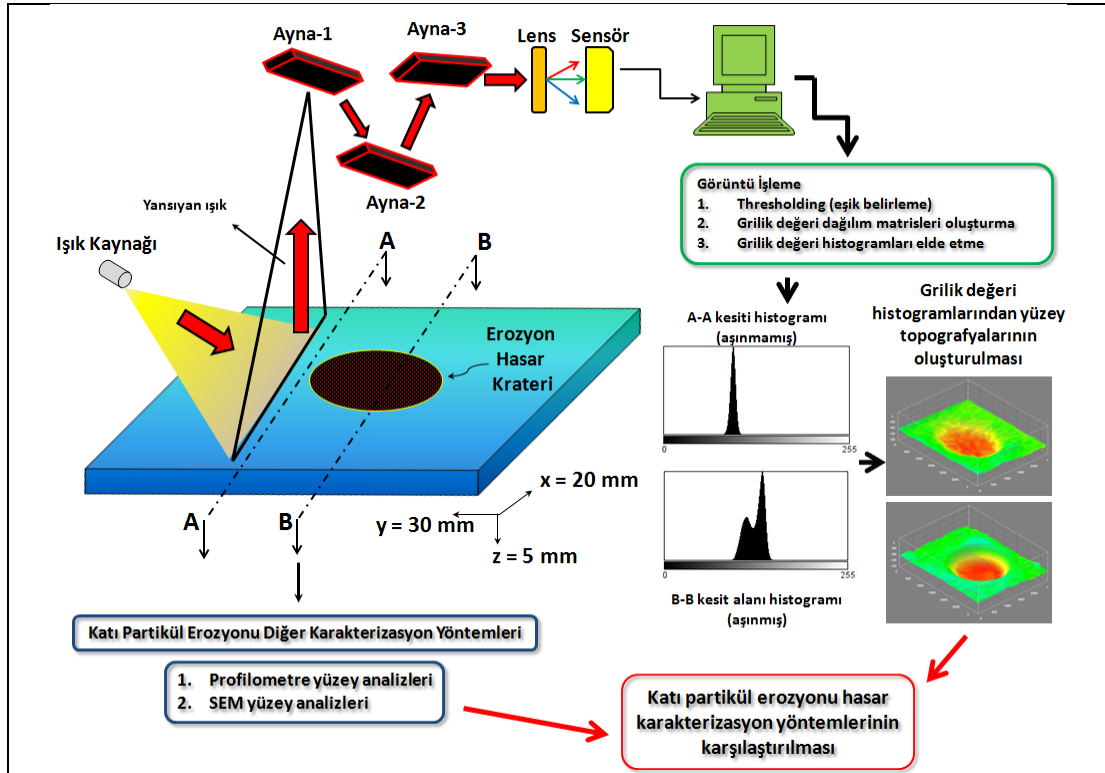
Tarayıcıda gerçekleştirilen görüntü elde etme işlemleri sırasında dahili LED ışık kaynağı ana aydınlatma elemanı olarak kullanılmıştır. LED ışık kaynağı tarayıcının cam penceresi boyunca taranacak yüzeye ışık demetlerini dik yönde göndererek ilerlemiştir. LED ışık kaynağından gelerek numune yüzeyine çarpan ışık geri yansarak CCD algılayıcılar tarafından yakalanmıştır. CCD algılayıcıların yakaladığı bu yansıyan ışın demeti işlenerek taranan numune yüzeyinin 2 boyutlu görüntüsü elde edilmiştir.

HP Scanjet G2710 model yatay tarayıcı 4800 dpi × 9600 dpi çözünürlükte görüntü elde etme kabiliyetine sahiptir. numune yüzey taramaları esnasında harici bir ışık kaynağı kullanılmamış, tarayıcının sahip olduğu LED ışık kaynağı kullanımı tercih edilmiştir. Harici ışık kaynağı kullanılmama sebebi taranacak yüzeyde oluşturduğu gürültü efekti denen yansıtıcı ışık yansımalarına sebep olmasıdır. HP Scanjet G2710 model yatay tarayıcıya ait teknik özellikler ve Ti6Al4V numunelerin tarama parametreleri Tablo 6.13' te verilmiştir.

Tablo 6.133. HP Scanjet G2710 model yatay tarayıcıya ait teknik özellikler ve Ti6Al4V numunelerin tarama parametreleri

Tarama Parametreleri	
Görüntü Pixel Boyutu (genişlik × yükseklik)	1890 × 2835 dpi (27,5 mm × 35 mm)
Bit Derinliği	24-bit
Görüntü Tipi	BMP
HP Scanjet G2710 Tarayıcı Özellikleri	
Çalışma Voltajı	220 V 50 Hz
Tarama çözünürlüğü, optik	4800 dpi
Bit Derinliği	48-bit
Gri renk seviyesi	256
Tarama Dalgaboyları	395, 450, 520, 590, 650, 850 nm
Geçirgenlik adaptörü	Dahili (TMA); iki 35 mm slayt

Numunelerin aşınmış yüzeylerinin görüntülerinin elde edilmesi sonrasında görüntü işleme aşamasına geçilmiştir. Şekil 6.13'te yüzey tarama, 2 boyutlu yüzey resimlerinin işlenmesi, 2 boyutlu yüzey resimlerinden grilik seviyesi histogramlarının oluşturulması ve sonrasında histogramlardan yüzey topografyasının elde edilmesini gösteren işlem basamakları şematik olarak gösterilmiştir.

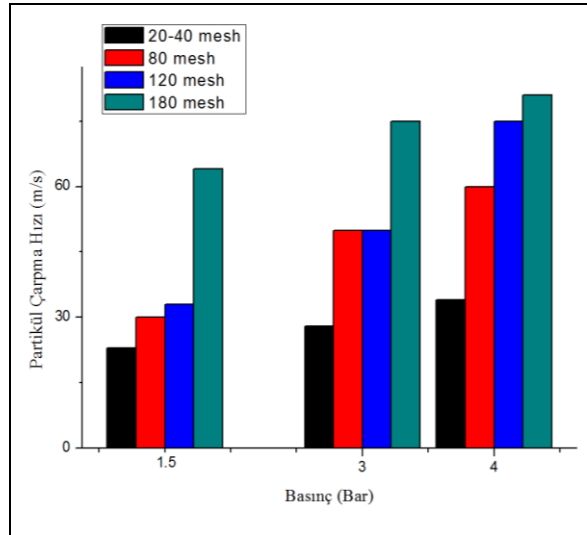


Şekil 6.13. Aşındırılmış Ti6Al4V numunelerin görüntü işleme işlem basamakları

7. DENEYSEL SONUÇLAR VE İRDELEME

7.1. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debileri ve Hızlarının Değişimi

Bu bölüm içerisinde aşındırıcı partiküllerin kütlesel debileri ve partikül çarpma hızları püskürtme basıncına bağlı olarak verilmiştir. Literatürde birçok araştırmacı aşındırıcı partiküllerin hızlarının hesaplanmasında çift disk metodunu kullanmıştır [108-112]. Tez çalışması kapsamında çift disk metodu ile dört farklı boyuttaki garnet partiküllerinin hızları ölçülmüş ve hesaplanmıştır. Şekil 7.1’ de 20-40, 80, 120 ve 180 mesh boyutunda garnet partiküllerinin 1,5, 3 ve 4 bar basınçlarda ölçülen hızları verilmiştir.

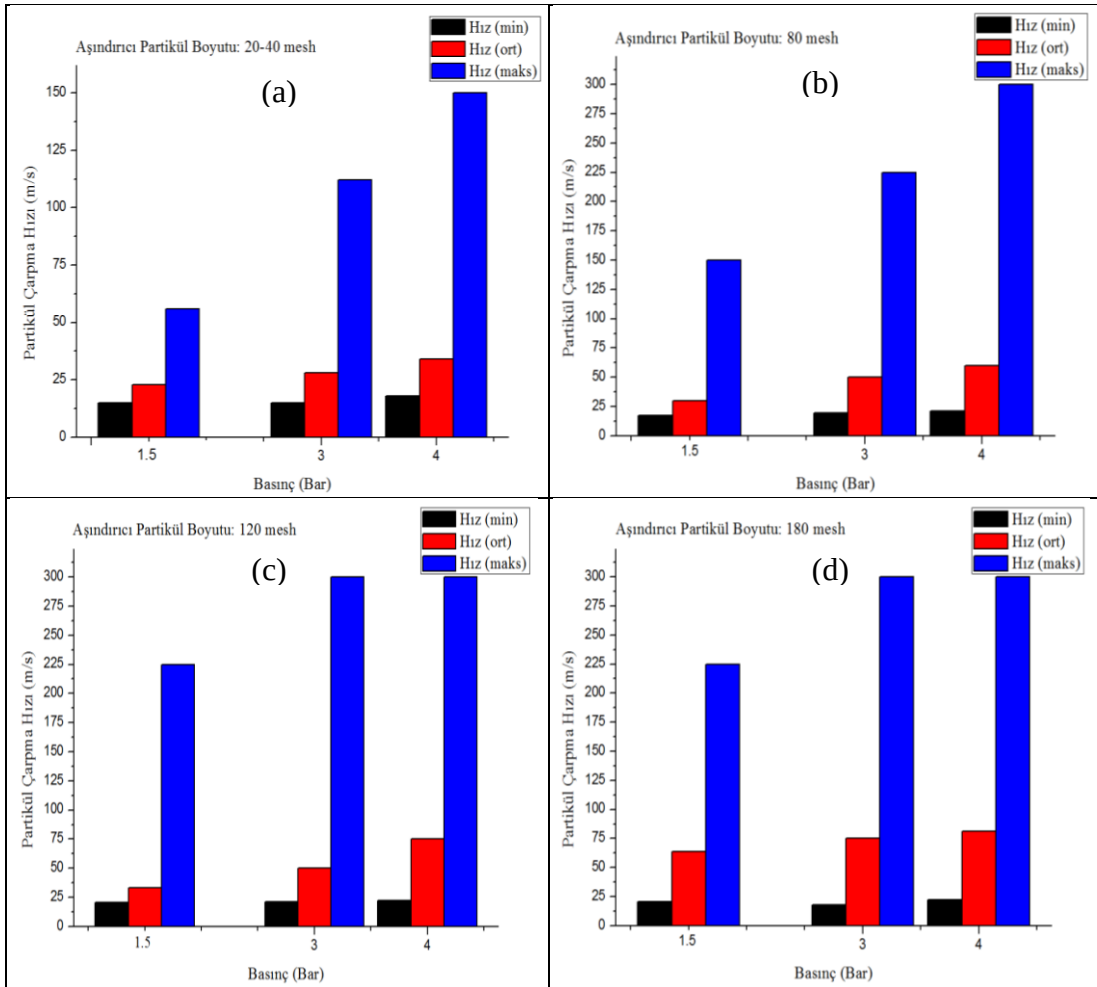


Şekil 7.1. Ortalama partikül çarpma hızların püskürtme basıncı ve partikül boyutuna bağlı değişimi

Şekil 7.1 incelendiğinde partikül boyutunun küçülmesi ile üç basınç değerinde de partiküllerin ortalama hızlarının artış gösterdiği görülmektedir. 20-40 mesh boyutunda garnet partikülleri tüm basınç değerlerinde diğer partiküllere kıyasla çok daha düşük hızlara ulaşabilmiştir. 180 meshlik garnet partiküllerin ise tüm basınç değerlerinde 20-40 meshlik partiküllerden yaklaşık olarak iki kat daha yüksek hızlara ulaştıkları görülmektedir. 80 ve 120 meshlik partiküllerin hızları ise bu iki partikül ortalama hızlarının aralığındadır. Diğer yandan tüm partiküllerin ortalama hızlarının basınç

artışına paralel olarak artış gösterdiği Şekil 7.1' de net bir şekilde görülmektedir. Buna karşın büyük partiküller (20-40 ve 80 mesh) en yüksek basınç değerinde dahi 180 meshlik partiküllerin en düşük basınçta ulaştıkları hızlara ulaşamamışlardır. Bu noktada partikül boyutunun erozif aşınmada partiküllerin hedef malzemeye çarpma hızları üzerinde çok etkin bir rol oynadığı söylenebilir.

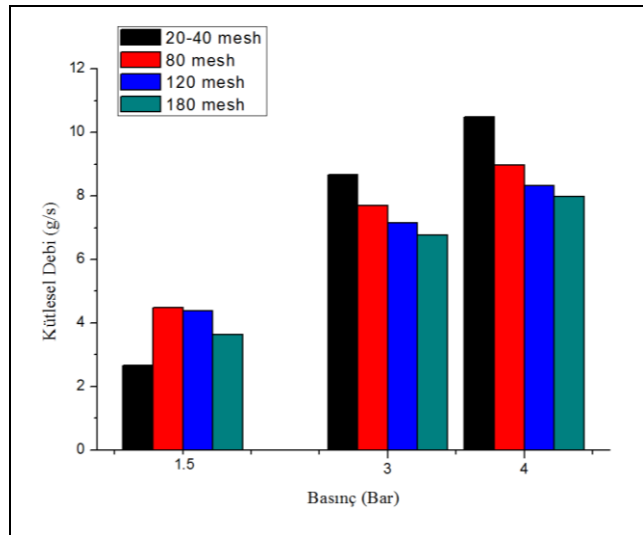
Deneysel çalışmalarda çift disk metodu ile partiküllerin ortalama hızlarının yanında en düşük ve en yüksek hızları da ölçülerek farklı boyutlardaki partiküllerin ortalama hız dağılımları da çıkarılmıştır. Aşağıdaki şekillerde sırasıyla 20-40, 80, 120 ve 180 meshlik partiküllerin 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basınçlarında hız dağılımları verilmiştir.



Şekil 7.2. a) 20-40 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh, d) 180 meshlik partiküllerin basınca bağlı hız dağılımları

Şekil 7.2 incelendiğinde tüm partikül boyutları için püskürtme basıncının artışına bağlı olarak partiküllerin minimum ve maksimum hızlarının artış gösterdiği görülmektedir. Ayrıca tüm partiküllerde hız dağılımının çok geniş bir aralıkta olduğu görülmektedir. Partiküllerin ulaşabildikleri minimum ve maksimum hızların ortalama hızların artışına ve azalışına paralel olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Diğer yandan tüm partiküller içerisinde tüm basınç değerlerinde çok yüksek ve çok düşük hızlarda partiküller bulunduğu görülmektedir. Bu durumun partiküllerin püskürtme sistemi içerisinde farklı oranlarda hızlandıkları ve sonrasında numune yüzeyine hareket ederek birbirlerine çarparak hızlanmaları veya yavaşlanmalarından kaynaklandığı söylenebilir.

Şekil 7.3'te aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde püskürtme basıncının artışına paralel olarak tüm partikül boyutlarında kütleli debinin artış gösterdiği söylenebilir. Diğer yandan partikül boyutunun etkisi incelendiğinde genel olarak partikül boyutunun artışı ile kütleli debinin artışı görülmektedir. Sadece 1,5 bar püskürtme basıncında 20-40 mesh boyutundaki partiküllerde bu ilişki saptanamamış ve 20-40 meshlik partiküllerin kütleli debisi bu basınç değeri için çok düşük çıkmıştır.



Şekil 7.3. Aşındırıcı partiküllerin kütleli debilerinin partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi

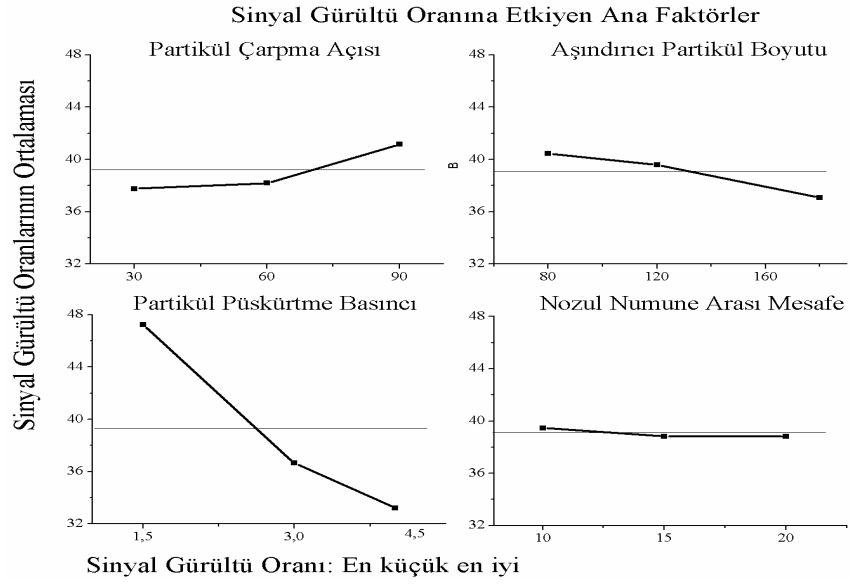
Bu durumun nedeni bu püskürtme basıncında kütleleri diğer partiküllere kıyasla çok büyük olan 20-40 meshlik partiküllerin erozif aşınma test düzeneğinde hızlandırılmamalarıdır. 1,5 bar püskürme basıncında bu boyuttaki partiküller efektif olarak hızlandırılmamakta ve bunun sonucu olarak kütleli debileri çok düşük çıkmaktadır.

7.2. Taguchi Deney Tasarımı

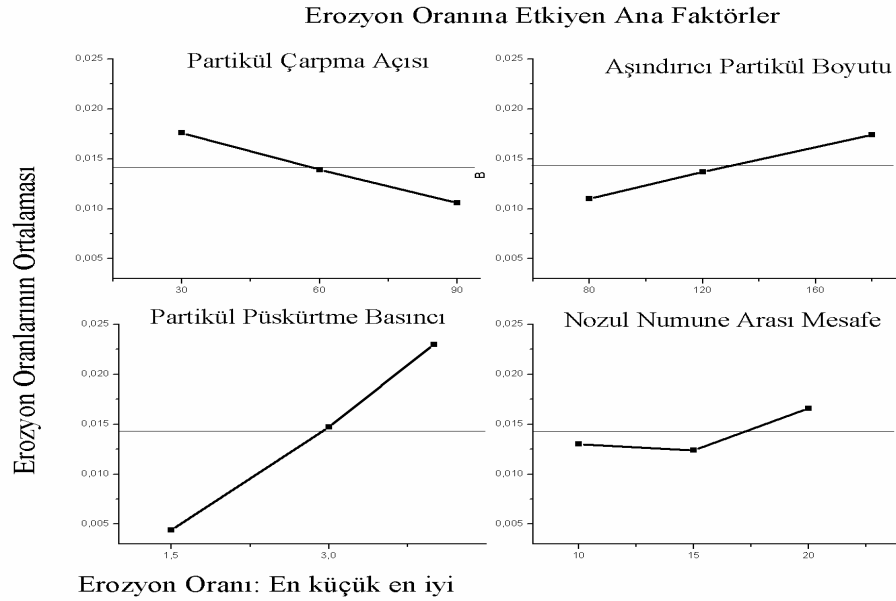
Deneysel çalışmaların başlangıç aşamasında partikül boyutu, partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve nozul numune arası mesafeye bağlı olarak Ti6Al4V alaşımının erozyon miktarının değişimi Taguchi deney tasarım yöntemi kullanılarak hesaplanmış ve bu parametrelerin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışı üzerindeki etkinlikleri araştırılmıştır. Tablo 7.1’de Taguchi deney tasarımı için hazırlanan ve gerçekleştirilen deneylerin sonuçları verilmiştir. Şekil 7.4 ve 7.5’ te ise partikül çarpma açısı, partikül boyutu, püskürme basıncı ve nozul numune arası mesafenin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma miktarına etkilerinin ve önem derecelerinin belirlenmesi için Taguchi sonuçları kullanılarak çizilen grafikler verilmiştir.

Tablo 7.1. L9 Dizilimi ve S/N Oranları

	AÇI	BOYUT	BASINÇ	MESAFE	1. TEKRAR	2. TEKRAR	3. TEKRAR	S/N
1	30	80	1,5	10	0,0038	0,0040	0,0044	47,863
2	30	120	3	15	0,0168	0,0159	0,0164	35,746
3	30	180	4	20	0,0310	0,0335	0,0332	29,764
4	60	80	3	20	0,0145	0,0136	0,0143	37,036
5	60	120	4	10	0,0221	0,0207	0,0217	33,361
6	60	180	1,5	15	0,0058	0,0064	0,0062	44,340
7	90	80	4	15	0,0148	0,0153	0,0147	36,530
8	90	120	1,5	20	0,0031	0,0030	0,0037	49,856
9	90	180	3	10	0,0132	0,0138	0,0141	37,286



Şekil 7.4. Eroziv aşınma parametrelerinin aşınma miktarı üzerinde etkinliği (A: partikül çarpma açısı, B: partikül boyutu, C: püskürtme basıncı, D: Nozul numune arası mesafe)



Şekil 7.5. Eroziv aşınma parametrelerinin aşınma miktarı üzerinde etkinliği (A: partikül çarpma açısı, B: partikül boyutu, C: püskürtme basıncı, D: Nozul numune arası mesafe)

Şekil 7.4 ve 7.5 incelendiğinde Ti6Al4V alaşımının eroziv aşınma miktarının partikül çarpma açısı, partikül boyutu ve püskürtme basıncı parametrelerinin değişimine bağlı olarak önemli derecede değişim gösterdiği görülmektedir. Buna karşın nozul numune arası mesafenin değişiminin eroziv aşınma üzerinde çok fazla etkisi olmadığı görülmektedir.

Taguchi sonuçları Ti6Al4V alaşımının 30° partikül çarpma açısı, 4 bar püskürtme basıncı ve 20 mm nozul numune arası mesafede 180 meshlik garnet partikülleri ile aşındırılması durumunda maksimum miktarda kütle kaybına uğrayacağını göstermiştir. Titanyum alaşımının 30° partikül çarpma açısında maksimum oranda aşındığı ve açının arttırılması ile aşınma miktarının azaldığı sonucuna varılmıştır. Püskürtme basıncının arttırılması ile aşınma miktarının artış gösterdiği ve malzemenin 4 bar püskürtme basıncında maksimum miktarda aşındığı tespit edilmiştir. Taguchi sonuçları titanyum alaşımının erozif aşınma miktarında partikül boyutunun da önemli bir rol oynadığını ortaya koymuştur. Partikül boyutunun artışı ile aşınma miktarının azaldığı ve maksimum aşınmanın en küçük partiküller olan 180 meshlik partiküllerin kullanılması durumunda gerçekleştiği ortaya çıkmıştır. Diğer yandan nozul numune arası mesafenin daha önce de belirtildiği gibi titanyum alaşımının aşınma miktarı üzerinde çok etkin bir rol oynamadığı gözlenmiştir.

Tablo 7.2' de tez çalışmasında incelenen parametrelerinin önem derecelerini elde etmek için gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları verilmiştir. Taguchi deney tasarımı ile gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları Ti6Al4V alaşımının erozyon miktarı üzerinde en önemli etkenin püskürtme basıncı olduğunu göstermiştir. Sonrasında titanyum alaşımının erozyon miktarı üzerinde partikül çarpma açısı ve partikül boyutunun birbirine çok yakın bir önem derecesi ile etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Nozul numune arası mesafenin ise diğer parametrelere kıyasla çok düşük bir önem derecesi ile titanyum alaşımının erozif aşınma miktarı üzerinde önemli bir etkinliğinin bulunmadığı belirlenmiştir.

Tablo 7.2. S/N oranlarının davranışları (en küçük en iyi)

Seviye	Açı	Boyut	Basınc	Mesafe
1	37,75	40,44	47,24	39,47
2	38,19	39,58	36,66	38,82
3	41,15	37,08	33,20	38,80
Fark	3,40	3,36	14,04	0,67
Önem derecesi	2	3	1	4

Deneysel çalışmalarda Taguchi deney tasarımı ile birlikte partikül çarpma açısı, partikül boyutu, püskürtme basıncı ve nozul numune arası mesafe parametrelerinin değişimine bağlı olarak Ti6Al4V alaşımının aşınma miktarının hesaplanmasını sağlayacak regresyon denklemi Denklem (7.1)' de çıkarılmıştır.

$$\text{Aşınma miktarı} = -0,0132 - 0,000117.\text{açı} + 0,000064.\text{boyut} + 0,00736.\text{basıncı} + 0,000354.\text{mesafe} \quad (7.1)$$

Deney tasarımı çalışmalarının son aşamasında Taguchi deney tasarımı ve regresyon denklemi kullanılarak Ti6Al4V malzemenin tüm parametrelerde aşınma oranları tahminlenerek hesaplanmıştır. Her iki hesaplama metodunda da (Taguchi ve Regresyon) maksimum aşınma miktarının titanyum alaşımının 4 bar püskürtme basıncı, 30° partikül çarpma açısı ve 20 mm nozul numune arası mesafede 180 meshlik garnet partikülleri ile aşındırılması durumunda elde edilebileceği görülmektedir. Bu sonucun yukarıda belirtilen parametre önem dereceleri ve gerçekleştirilen deneysel çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda doğru olduğu sonucuna varılabilir. Tez çalışmasında bu bölüm içerisinde verilen Taguchi deney tasarımı ile elde edilen çıktılardan yararlanılarak önem derecesi yüksek parametrelerin etkisi üzerinde durulmuştur.

7.3. Erozif Aşınma Deneylerinin Sonuçları

Bu bölüm içerisinde erozif aşınma deneylerinin sonuçları verilecektir. Bu aşamada Ti6Al4V alaşımı 6 farklı partikül çarpma açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°), 3 farklı püskürtme basıncı (1,5, 3 ve 4 bar) ile farklı boyutlardaki garnet aşındırıcılar ile (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) aşındırılmıştır. Bölüm içerisinde her bir parametrenin etkisi ayrı başlıklar altında grafikler yardımı ile detaylı bir şekilde irdelenmiştir. Tablo 7.3' te ikinci aşamada incelenen tüm parametreler verilmiştir. Tez çalışması kapsamında tabloda verilen parametrelerin tüm kombinasyonlarında erozif aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir ve tüm deneyler için Ti6Al4V alaşımının deneysel erozyon oranı hesaplanmıştır.

Tablo 7.3. İkinci aşama erozif aşınma deneylerinde kullanılan parametreler

Aşındırıcı partikül boyutu	20-40, 80, 120 ve 180 mesh
Partikül Çarpma Açısı	15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°
Püskürtme Basıncı	1,5, 3 ve 4 bar

Erozyon oranı; katı partikül erozyonu sonucunda aşınan numunedeki kütle kaybının, bu kaybı meydana getiren toplam aşındırıcı partikül kütlelerine oranı olarak tanımlanmaktadır. Bir önceki bölümde aşındırıcı partiküllerin kütsel debilerinin; partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değişim gösterdiği sonucuna varılmıştır. Bu durumda farklı basınçlarda ve boyutlarda partiküller ile aşındırılan numunelere aynı aşınma süresinde çarpan partikül miktarının (kütlelerinin) değişim göstereceği aşıkardır. Bu parametreler ile aşındırılan numunelerin erozyon davranışlarının karşılaştırılması istendiğinde doğrudan malzemede meydana gelen kütle kaybının (Δm) kullanılması doğru bir yöntem değildir. Malzemelerin erozyon miktarlarının erozyona neden olan aşındırıcı partikül kütlelerinden bağımsız olarak hesaplanması gerekmektedir. Özetle malzemelerin erozyon davranışı incelenirken birim aşındırıcının gerçekleştirdiği erozyon miktarı hesaplanmalıdır. Bu durumda parametreler ne olursa olsun malzemelerin erozyon davranışları karşılaştırılabilir. Bu nedenlerden dolayı tez çalışmasında daha önce de belirtildiği gibi tüm deneylerin sonuçları Denklem (7.2)' de kullanılarak erozyon oranı olarak ifade edilmiştir.

Çalışmada erozyon oranı hesabı aşağıda verilen formül ile hesaplanmıştır.

$$E = \frac{\Delta m_s}{m_e} \quad (7.2)$$

E = Erozyon oran

Δm_s = Örnek numunenin kütle kaybı

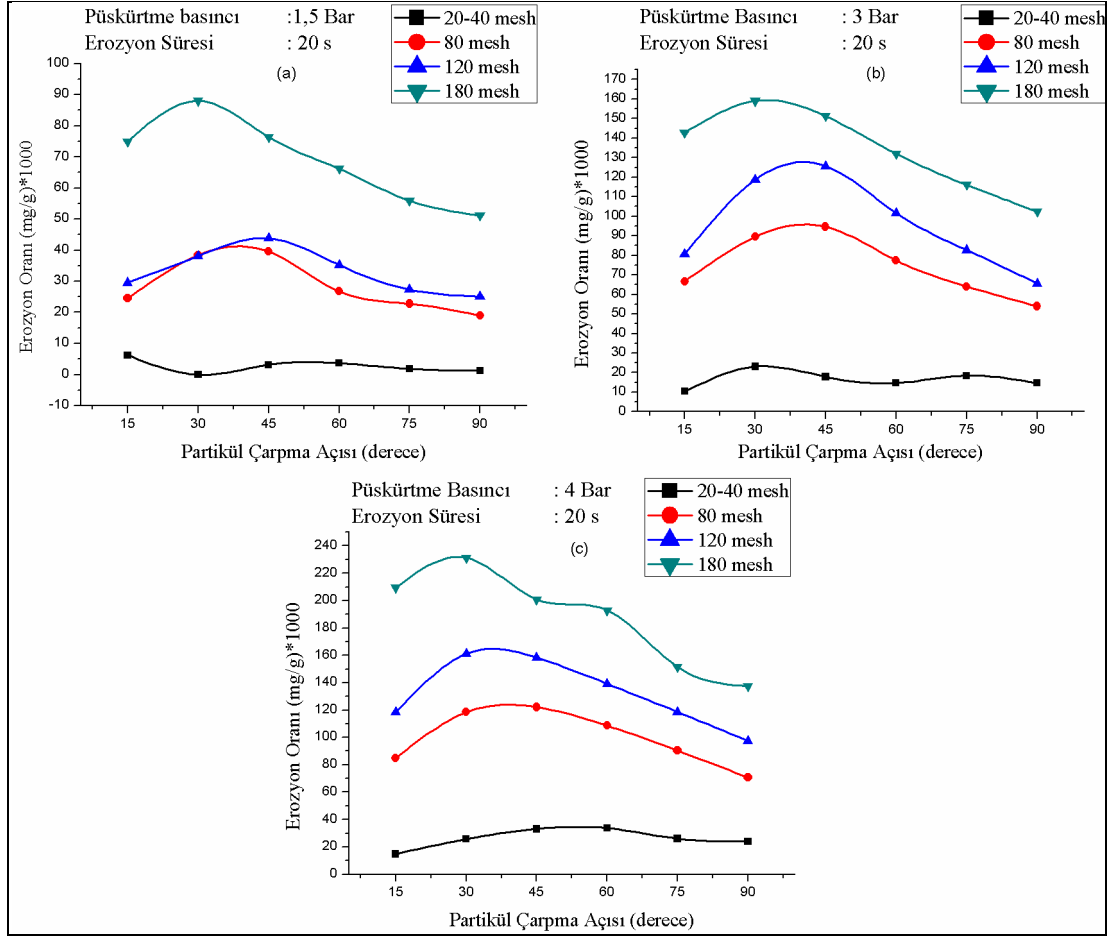
m_e = Aşındırıcı kütle

7.3.1. Erozyon oranının partikül çarpma açısına göre değişimi

Katı partikül erozyonunun partikül çarpma açısına bağlı değişimini literatürde birçok araştırmacı incelemiştir [23-32]. Ancak Ti6Al4V alaşımında partikül çarpma açısının etkisine yönelik çalışmalar sınırlıdır [47, 54, 55]. Bu bölümde Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışını etkileyen önemli bir parametre olan partikül çarpma açısının erozyon oranına etkisinin farklı parametreler altında (püskürtme basıncı ve aşındırıcı partikül boyutu) incelenerek literatürdeki bu boşluğun doldurulması amaçlanmıştır. Deneylerde farklı aşındırıcı partikül boyutları (20-40, 80, 120, 180 mesh) ve farklı partikül püskürtme basınçları (1,5, 3, 4 Bar) kullanılarak aşındırılan numunelerin erozyon oranlarının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi incelenmiştir. Bölüm içerisinde partikül çarpma açısının Ti6Al4V alaşımının erozyon oranına etkisi grafikler yardımı ile verilmiştir.

Şekil 7.6' da 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basıncında, 6 farklı açıda (15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°), 4 farklı boyutta (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) partikül ile aşındırılan Ti6Al4V alaşımının erozyon oranlarının değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm partikül boyutları için erozyon oranının partikül çarpma açısına bağlı olarak önemli bir şekilde değişim gösterdiği görülmektedir.

Şekil 7.6-a'da 1,5 bar püskürtme basıncında 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile elde edilen sonuçlarda 30° çarpma açısında erozyon oranının belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu artışın daha sonra 90° partikül çarpma açısına kadar doğrusala yakın bir şekilde azalmakta, bu basınç ve partikül boyutunda en düşük aşınma değerinin 90° partikül çarpma açısında görülmektedir. 80 ve 120 mesh boyutundaki aşındırıcılar için çizilen eğrilere bakıldığında maksimum erozyon oranının 30° - 45° partikül çarpma açıları arasında meydana geldiği görülmektedir. 20-40 mesh boyutundaki partiküller için çizilen eğride ise diğer üç eğriye benzer bir davranış gözlenmemiştir. Bu durumun en büyük nedeni 1,5 bar basınç için aşındırıcı partiküllerin kütleli debisinin ve partikül çarpma hızlarının çok düşük olmaları ve bunun sonucunda malzemede düzenli bir aşınma gerçekleşmemesidir. Sonuç olarak Şekil 7.6-a' nın geneline bakıldığında Ti6Al4V alaşımının 1,5 bar püskürtme basıncında sürekli bir erozif aşınma davranışı göstererek 30° - 45° partikül çarpma açıları arasında maksimum miktarda erozyona uğradığı söylenebilir.



Şekil 7.6. Erozyon oranının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (püskürtme basıncı: a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar)

Şekil 7.6-b' de 20-40 ve 180 mesh partiküller ile elde edilen sonuçlarda erozyon oranının 30° çarpma açısında belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. 80 ve 120 mesh boyutundaki aşındırıcılar için çizilen eğrilere bakıldığında ise maksimum erozyon oranının 30°-45° partikül çarpma açıları arasında meydana geldiği görülmektedir. Minimum erozyon oranının ise tüm partikül boyutları için 90° partikül çarpma açısında gerçekleştiği görülmektedir. Sonuç olarak Şekil 7.6-b' nin geneline bakıldığında Ti6Al4V alaşımının 3 bar püskürtme basıncında sürekli bir erozif aşınma davranışı gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 7.6-c' de 180 mesh boyutunda partiküller ile elde edilen sonuçlarda erozyon oranının 30° çarpma açısında belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir. Bu artışın daha sonra 90° partikül çarpma açısına kadar azaldığı ve malzemede bu basınç ve partikül boyutunda en düşük aşınma değerinin 90° partikül çarpma açısında görüldüğü anlaşılmıştır. 80 ve 120 mesh boyutundaki aşındırıcılar için ise maksimum erozyon

oranının $30^\circ - 45^\circ$ partikül çarpma açılarında meydana geldiği görülmektedir. 20-40 mesh boyutundaki aşındırıcılar için çizilen eğriye bakıldığında ise maksimum erozyon oranının $45^\circ - 60^\circ$ partikül çarpma açılarında meydana geldiği görülmektedir. Şekil incelendiğinde partikül çarpma açısının tüm partikül boyutları için erozyon oranının etkileyen kritik bir parametre olduğu sonucuna varılabilir. Ancak, maksimum erozyon oranının görüldüğü partikül çarpma açısının partikül boyutuna ve püskürtme basıncına bağlı olarak değiştiği dikkat çeken bir bulgudur.

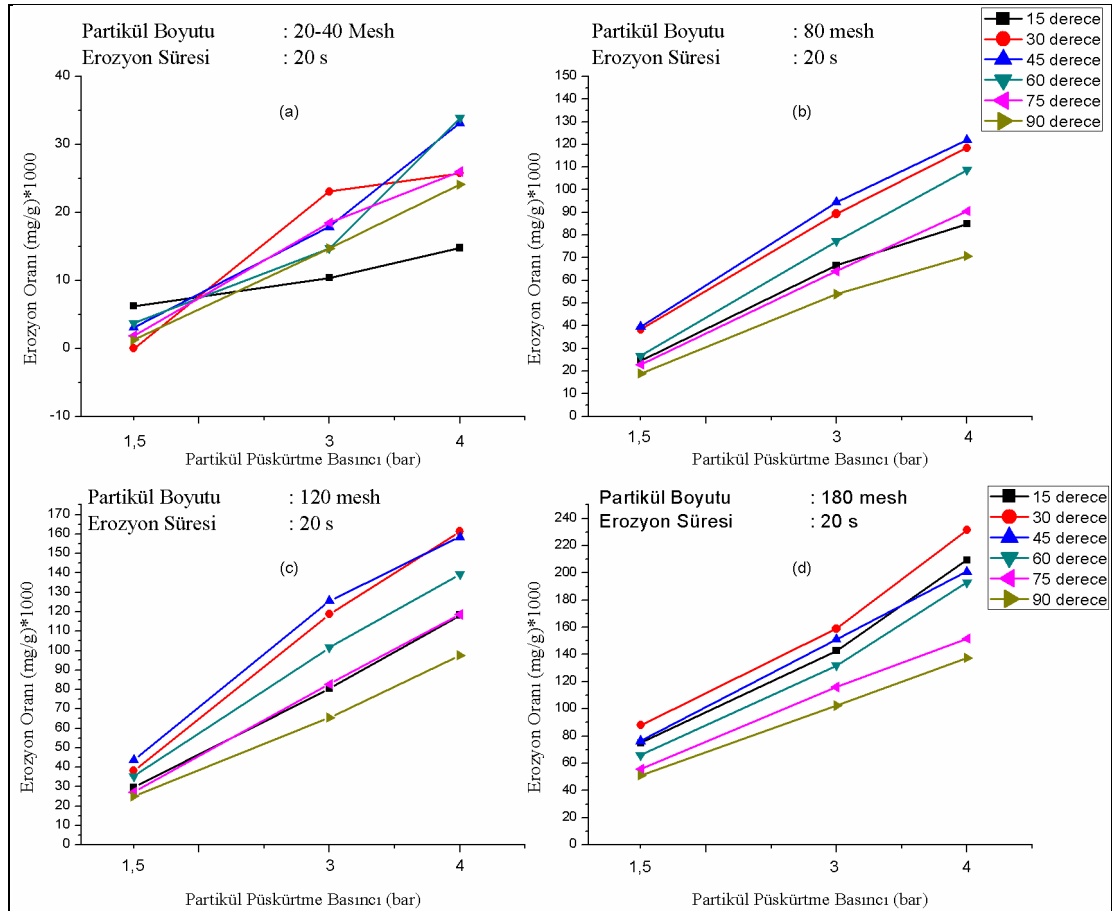
Genel olarak Şekil 7.6 incelendiğinde tüm partikül püskürtme basınçlarında ve tüm aşındırıcı partikül boyutlarında en yüksek erozyon oranının literatürde de belirtildiği gibi $30^\circ - 45^\circ$ partikül çarpma açısında gerçekleştiği ve Ti6Al4V alaşımının sünek bir erozyon davranışı sergilediği gözlemlenmiştir [47, 54, 55]. Buna karşın özellikle 20-40 mesh boyutunda partiküller ile gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarında tutarsızlıklar olduğu ve özellikle maksimum erozyonun farklı basınçlarda farklı partikül çarpma açılarında görüldüğü gözlenmiştir. Bu durumun bu partiküllerin boyutlarının çok büyük olması nedeniyle düşük basınçlarda efektif olarak püskürtülememesi, yüksek basınçlarda ise partiküllerin yüksek momentum ve kinetik enerjileri nedeniyle malzemede görülen aşınma mekanizmalarının farklılık göstermesi ile açıklanabilir. Bu konu ile ilgili daha detaylı bilgiler aşınma yüzeylerinin morfolojisinin incelenmesi ile daha net bir şekilde verilecektir.

7.3.2. Erozyon oranının partikül püskürtme basıncına göre değişimi

Bu bölümde Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına püskürtme basıncının etkisi irdelenecektir. Bölüm içerisinde partikül püskürtme basıncının Ti6Al4V alaşımının erozyon oranına etkisi Şekil 7.7' deki grafikler yardımı ile verilmiştir.

Şekil 7.7-a' da 20-40 mesh boyutundaki partikül ile aşındırılan Ti6Al4V alaşımının erozyon oranlarının değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm partikül çarpma açıları için erozyon oranının partikül püskürtme basıncına bağlı olarak önemli bir şekilde değişim gösterdiği görülmektedir. Şekil 7.7-a' da 20-40 mesh partiküller ile elde edilen sonuçlarda 4 bar partikül püskürtme basıncında tüm partikül çarpma açılarında (15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90°) erozyon oranının en fazla olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir. 20-40 mesh partikül boyutunda aşındırıcı ile aşındırılan Ti6Al4V numunede partikül püskürtme basıncının 1,5 bar olduğu durum

incelendiğinde erozyon oranının en yüksek 15° partikül çarpma açısında, partikül püskürtme basıncının 3 bar olduğu durumda en yüksek erozyon oranının 30° partikül çarpma açısında, partikül püskürtme basıncının 4 bar olduğu durumda ise 45° - 60° partikül çarpma açıları en yüksek erozyon oranı görülmektedir. Bir önceki bölümde partikül çarpma açısının etkisi incelenirken de belirtildiği gibi özellikle 20-40 mesh partiküller için Ti6Al4V alaşımın farklı basınçlarda farklı erozif aşınma davranışı gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.7. Erozyon oranının katı partikül püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi (partikül boyutu a) 20-40 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh, d)180 mesh)

Şekil 7.7-b' de 80 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül ile aşındırılan Ti6Al4V alaşımının erozyon oranlarının değişimi verilmiştir. Grafik incelendiğinde tüm partikül çarpma açıları için erozyon oranının partikül püskürtme basıncına bağlı olarak önemli bir şekilde değişim gösterdiği görülmektedir. Grafikte erozyon oranının 4 bar partikül püskürtme basıncında tüm partikül çarpma açıları (15° , 30° , 45° , 60° , 75° , 90°) en fazla olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir. Ayrıca

şekle genel olarak bakıldığında tüm partikül çarpma açıları için partikül püskürtme basıncının artması ile erozyon oranında doğrusala yakın bir artış meydana geldiği görülmektedir.

Şekil 7.7-c' de 120 mesh aşındırıcı partikül boyutunda partikül ile aşındırılan Ti6Al4V alaşımının erozyon oranlarının değişimi verilmiştir. Şekilde 7.7-c' de 120 mesh boyutunda partiküller kullanılarak elde edilen sonuçlarda erozyon oranının 4 bar partikül püskürtme basıncında tüm partikül çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) en fazla olduğu görülmektedir.

Şekil 7.7-d' de 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile aşındırılan Ti6Al4V alaşımının erozyon oranlarının değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm partikül çarpma açıları için erozyon oranının partikül püskürtme basıncına bağlı olarak önemli bir şekilde değişim gösterdiği görülmektedir. 180 mesh boyutundaki partiküller kullanılarak elde edilen sonuçlarda erozyon oranının 4 bar partikül püskürtme basıncında tüm partikül çarpma açılarında (15°, 30°, 45°, 60°, 75°, 90°) maksimum olduğu görülmektedir. Ayrıca şekilde tüm partikül çarpma açıları için partikül püskürtme basıncının artması ile erozyon oranında doğrusala yakın bir artış meydana geldiği görülmektedir. Şekilde ayrıca 180 mesh partikül boyutunda aşındırıcı ile aşındırılan Ti6Al4V numunede farklı partikül püskürtme basıncında (1,5, 3 ve 4 bar) en yüksek erozyon oranının tüm basınç değerlerinde 30° partikül çarpma açılarında meydana geldiği, 90° partikül çarpma açısında ise en düşük erozyon oranının gerçekleştiği açıkça görülmektedir.

Bölüm içerisindeki grafikler incelenerek Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma oranın püskürtme basıncına bağlı olarak büyük miktarda değişim gösterdiği anlaşılmıştır. Püskürtme basıncının etkisi daha sonraki bölümlerde aşınan yüzeylerin morfolojileri incelenerek tekrar ele alınacaktır.

7.3.3. Erozyon oranının partikül boyutuna göre değişimi

Katı partikül erozyonunun aşındırıcı partikül boyutuna bağlı değişimini literatürde birçok araştırmacı incelemiştir [21, 33, 38-44]. Ancak literatürde konu ile ilgili net bir bilgi bulunmamaktadır. Bazı araştırmacılar erozyon oranının partikül boyutuna bağlı olarak artış gösterdiğini, bazı araştırmacılar bu artışın belirli bir partikül

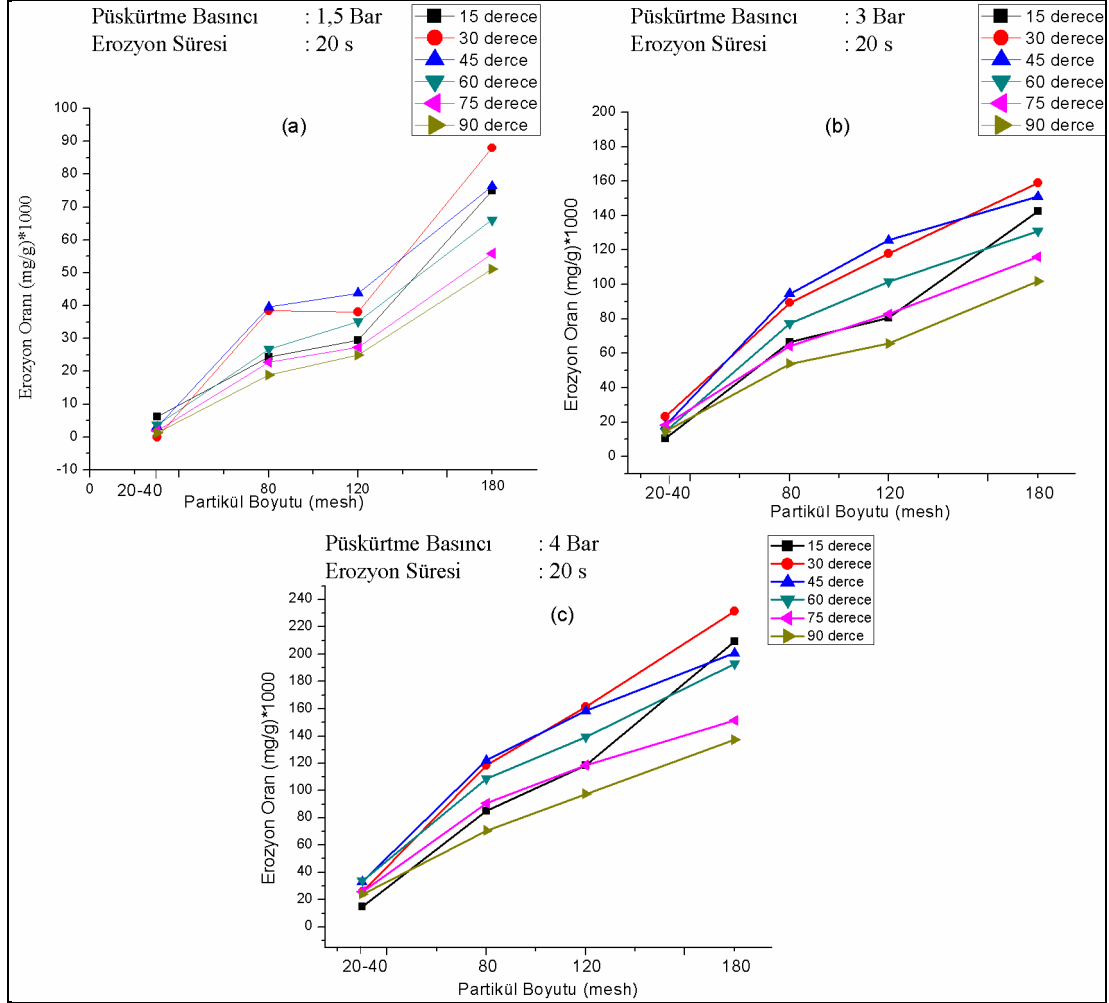
boyutundan sonra erozyon oranını etkilemediğini, diğer araştırmacılar ise erozyon oranının partikül boyutundan bağımsız olduğunu ifade etmektedirler. Diğer yandan Ti6Al4V alaşımında aşındırıcı partikül boyutu etkisine yönelik çalışmalar çok sınırlıdır [52]. Bu nedenle tez çalışmasında dört farklı partikül boyutuna sahip garnet aşındırıcılar kullanılmış ve partikül boyutunun Ti6Al4V alaşımın erozif aşınmasına olan etkisinin net bir şekilde anlaşılması sağlanmıştır. Bu bölümde Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışını etkileyen önemli bir parametre olan aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkisinin farklı parametreler altında (püskürtme basıncı ve partikül çarpma açısı) incelenmesi amaçlanmıştır. Deneylerde farklı partikül çarpma açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) ve farklı partikül püskürtme basınçları (1,5, 3 ve 4 bar) kullanılarak aşındırılan numunelerde aşındırıcı partikül boyutunun değişimi incelenmiştir. Bölüm içerisinde aşındırıcı partikül boyutunun Ti6Al4V alaşımının erozyon oranına etkisi Şekil 7.8' de grafikler yardımı ile verilmiştir.

Şekil 7.8-a' da 1,5 bar partikül püskürtme basıncında farklı boyuttaki aşındırıcı partiküller (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) kullanılarak yapılan Ti6Al4V numunedeki katı partikül erozyonu sonucu oluşan erozyon oranları değerleri verilmiştir.

Şekilde her bir aşındırıcı partikül boyutu için erozyon oranları değerleri değişen partikül çarpma açılara göre belirtilmiştir. Erozyon oranı değerlerine bakıldığında 1,5 bar püskürtme basıncında tüm açı değerlerinde (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) 180 mesh boyutlu aşındırıcı partikülün en yüksek erozyon oranına sahip olduğu görülmüştür. 20-40 mesh boyutundaki aşındırıcı partikülün ise tüm partikül çarpma açılarında en düşük erozyon oranlarına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca 180 mesh boyutlu aşındırıcı partikülün çarpma açısına bağlı erozyon oranı incelendiğinde ise en yüksek erozyon oranının 30°, en düşük erozyon oranının da 90° partikül çarpma açısında meydana geldiği saptanmıştır.

Şekil 7.8-b' de 3 bar basınçta erozyon oranının partikül boyutuna bağlı olarak değişimi verilmiştir. Erozyon oranı değerlerine bakıldığında 3 bar partikül püskürtme basıncında tüm açı değerlerinde (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°) 180 mesh boyutundaki aşındırıcı kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde en yüksek erozyon

oranı görülürken partikül boyutunun artmasına bağlı erozyon oranında azalma meydana geldiği görülmektedir.

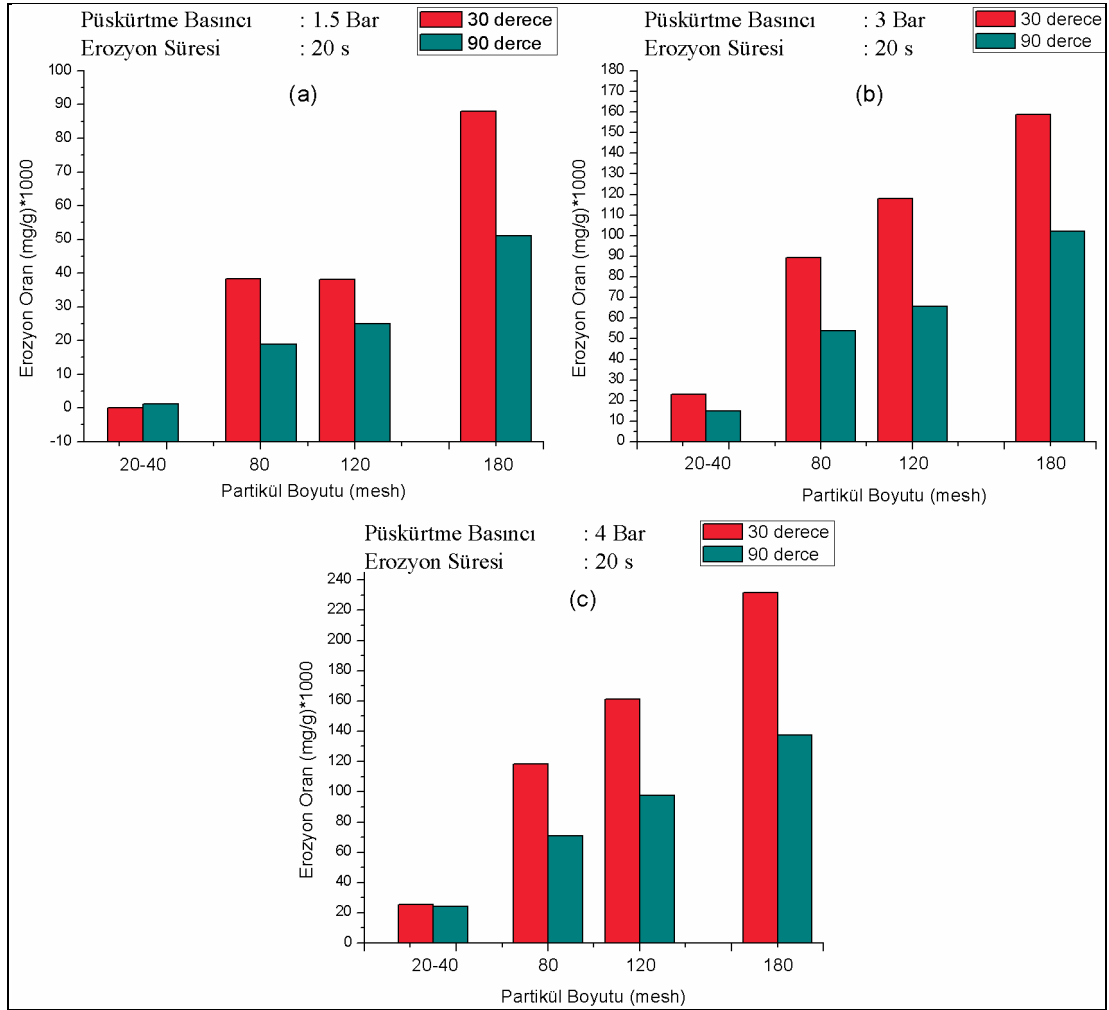


Şekil 7.8. Erozyon oranının katı partikül boyutuna ve partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi (partikül püskürtme basıncı a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar)

Şekil 7.8-c' de 4 bar püskürtme basıncında tüm açı değerleri için aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak erozyon oranının değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde Ti6Al4V alaşımında en yüksek erozyon oranının 180 mesh boyutunda partiküller kullanılması durumunda ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. 20-40 mesh boyutundaki aşındırıcı partikülde ise tüm partikül çarpma açıları en düşük erozyon oranları görülmüştür.

Aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkisinin açıya bağlı değişimini daha rahat incelemek amacı ile erozyon oranının maksimum (30°) ve minimum (90°) olarak gerçekleştiği partikül çarpma açıları Şekil 7.9'daki grafik çizilmiştir. Şekil

7.9-a' da farklı partikül boyutları (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) için iki farklı açı değerinde (30° - 90°), 1,5 bar partikül püskürtme basıncında aşındırılan numunelerde en yüksek erozyon oranının 180 mesh, en düşük erozyon oranının ise 20-40 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül kullanılarak gerçekleştiği görülmüştür. Şekil incelendiğinde her iki açı değeri için de aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile erozyon oranın arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7.9. Erozyon oranının katı partikül boyutuna ve partikül çarpma açısı (30-90 derece için) bağlı olarak değişimi partikül püskürtme basıncı a) 1,5bar, b) 3 bar, c) 4 bar)

Şekil 7.9-b incelendiğinde farklı partikül boyutları (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) için iki farklı açı değerinde (30° - 90°) de, 3 bar partikül püskürtme basıncında aşındırılan numunelerde en yüksek erozyon oranının 180 mesh, en düşük erozyon oranının ise 20-40 mesh aşındırıcı partikül boyutunda olduğu görülmüştür. Her iki açı değeri için

de aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile erozyon oranının arttığı gözlemlenmiştir.

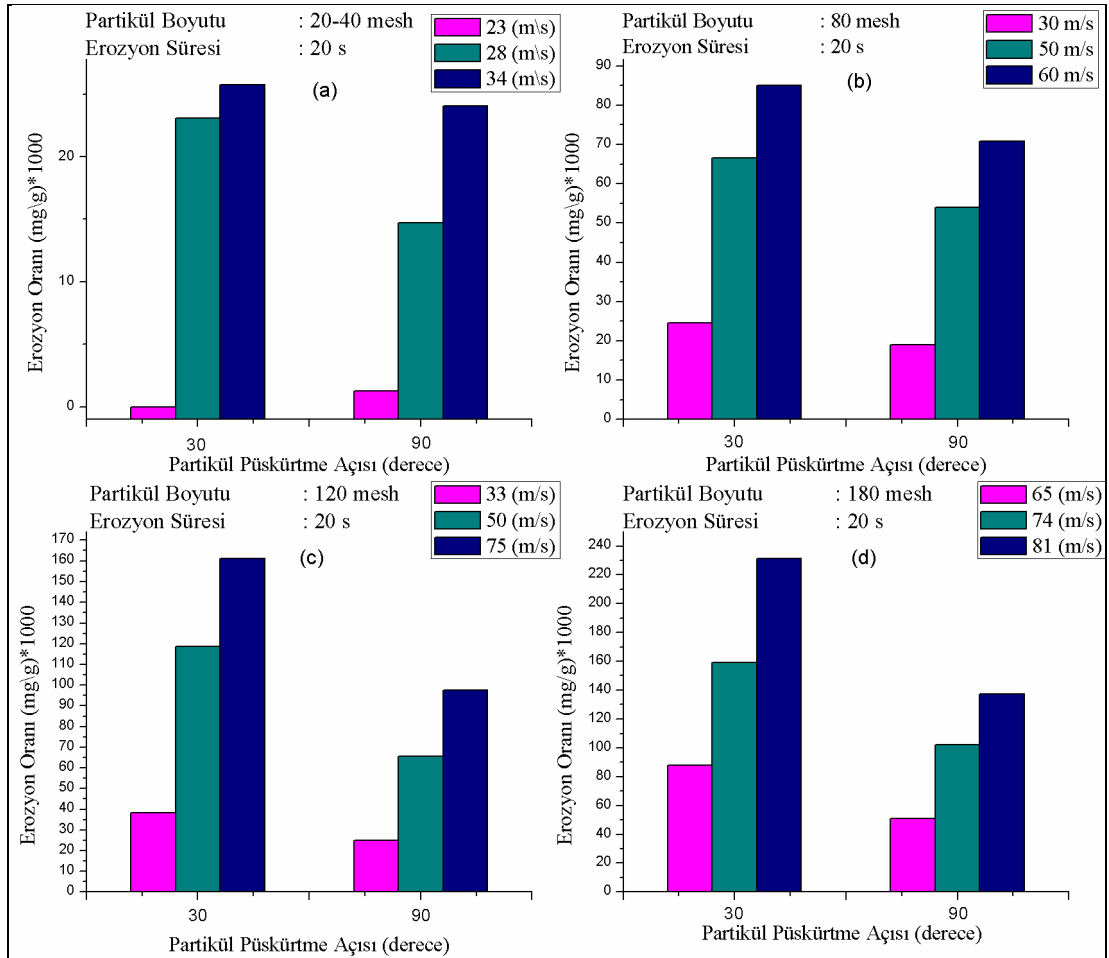
Şekil 7.9-c' de ise 30° ve 90° partikül çarpma açılarında ve 4 bar püskürtme basıncında partikül boyutuna bağlı olarak erozyon oranının değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde Ti6Al4V alaşımında en yüksek erozyon oranının 180 mesh boyutunda partiküller kullanılması durumunda ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. 20-40 mesh boyutundaki aşındırıcı partikülde ise tüm partikül çarpma açılarında en düşük erozyon oranları görülmüştür.

Farklı aşındırıcı partikül boyutunun (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) erozyon oranına etkisini incelemek amacı ile yapılan deneyler sonucunda, aşındırıcı partikül çarpma açısı ve partikül püskürtme basıncının sabit tutulması ile aşındırıcı partikül boyutunda meydana gelen değişimin erozyon oranına etkisi incelenmiş, partikül boyutunun küçülmesi ile erozyon oranının arttığı görülmüştür. Maksimum erozyon oranı 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküllerde görülürken, minimum erozyon oranı 20-40 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküllerde görülmüştür. Partikül boyutunun Ti6Al4V alaşımın erozif aşınma davranışına etkisinin daha net anlaşılabilmesi için tez çalışması kapsamında görüntü analiz işlemleri ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu çalışmaların sonuçları sonraki bölümlerde verilmiştir.

7.3.4. Erozyon oranının partikül hızına göre değişim

Katı partikül erozyonunun partikül çarpma hızına bağlı değişimini literatürde birçok araştırmacı incelemiştir [31, 33, 34]. Ancak Ti6Al4V alaşımında partikül çarpma hızının etkisine yönelik çalışmalar çok sınırlıdır [54, 56]. Deneylerde farklı aşındırıcı partikül boyutları (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) kullanılmış ve bu partiküller farklı püskürtme basınçlarında (1,5, 3 ve 4 bar) hızlandırılmış ve farklı partikül püskürtme açıları (15°-90°) kullanılarak aşındırılan numunelerde partikül çarpma hızının değişimi ile gerçekleşen erozyon oranı değişimi incelenmiştir. Partikül çarpma hızının hesaplanmasında çift disk metodu kullanılmıştır. Çift disk metodu ile partikül hızının hesaplanması önceki bölümde detaylı olarak anlatılmıştır. Bölüm içerisinde partikül çarpma hızının Ti6Al4V alaşımının erozyon oranına etkisi Şekil 7.10' daki grafikler yardımı ile verilmiştir.

Şekil 7.10-a’ da iki farklı açıda (30° ve 90°), 3 farklı püskürtme basıncı (1,5, 3 ve 4 bar) yardımı ile hızlandırılan 20-40 mesh partiküller ile aşındırılan Ti6Al4V alaşımının erozyon oranları verilmiştir. Şekil 7.10-a incelendiğinde farklı partikül çarpma açıları için erozyon oranının partikül çarpma hızına bağlı olarak önemli bir şekilde değişim gösterdiği görülmektedir. Şekil incelendiğinde 3 farklı partikül çarpma hızı (23, 28 ve 34 m/s) değeri için erozyon oranının en yüksek değerinin 34 m/s partikül çarpma hızında olduğu görülmüştür.



Şekil 7.10. Erozyon oranının partikül hızı ve partikül püskürtme açısına (30° ve 90°) göre değişimi Partikül boyutu: a) 20-40 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh, d) 180 mes)

Şekil 7.10-b’ de 80 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin Ti6Al4V numunenin aşındırılması sonucunda elde edilen erozyon oranları değerleri verilmiştir. En yüksek erozyon oranı en yüksek hız olan 60 m/s partikül hızında meydana geldiği görülmektedir. Partikül çarpma hızının artışı ile birlikte erozyon oranı artmıştır. Şekil incelendiğinde partikül çarpma açısının değişimine kıyas ile partikül çarpma hızının erozyon oranı üzerinde çok daha etkin olduğu söylenebilir.

Partikül çarpma açısının 30°' den 90°' ye getirilmesi ile erozyon miktarının gösterdiği değişimin partikül çarpma hızının 50 m/s' den 60 m/s' ye çıkarılmasına kıyasla çok daha düşük olduğu da açık bir şekilde görülmektedir.

Tablo 7.10-c' de 120 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin farklı partikül çarpma hızlarında (33, 50 ve 75 m/s) ve farklı partikül çarpma açılarında (30° ve 90°) Ti6Al4V numunenin aşındırılması sonucunda elde edilen erozyon oranları grafikte verilmiştir. Şekil incelendiğinde 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül ile aşındırılan Ti6Al4V numunenin erozyon oranının yüksek partikül çarpma hızında (75 m/s) diğer partikül çarpma hızlarına göre (33 ve 50 m/s) daha fazla olduğu, 120 mesh boyutundaki garnet taneciğinin hızının artması ile malzemeyi daha fazla aşındırdığı görülmüştür. Şekilde her iki partikül çarpma açısı değeri için de maksimum erozyon oranın 75 m/s partikül çarpma hızında gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 7.10-d' de 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküllerin farklı partikül çarpma hızlarında (64, 75 ve 81m/s) ve farklı partikül çarpma açılarında (30° ve 90°) Ti6Al4V numunenin aşındırılması sonucunda elde edilen erozyon oranları grafikte verilmiştir. Şekil incelendiğinde 180 mesh aşındırıcı partikül ile aşındırılan Ti6Al4V numunenin erozyon oranının, her iki açı değeri için yüksek partikül çarpma hızında (81m/s) diğer partikül çarpma hızlarına göre (64 ve 75 m/s) daha yüksek olduğu saptanmıştır. Partikül çarpma hızının artması ile erozyon oranında artmanın meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca tüm partikül çarpma hızlarında (64, 75 ve 81m/s) 30° partikül çarpma açısında, 90° partikül çarpma açısına göre daha fazla erozyon oranı olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışmalar sonucunda Ti6Al4V alaşımının erozyon oranının partikül çarpma hızının artması artışı görülmüştür. Yapılan literatür çalışmalarında da Jianren Zhou ve Shyam Bahadur [54], M. Ahmad, M. Casey ve N. Surken [56] aşındırıcı partikül çarpma hızının arttıkça erozyon oranının arttığını gözlemlemişlerdir. Bu noktada yapılan çalışmaların literatürde gerçekleştirilen çalışmalar ile uyumlu olduğu söylenebilir.

7.3.5. Erozyon oranının partikül karışımlarına göre değişim

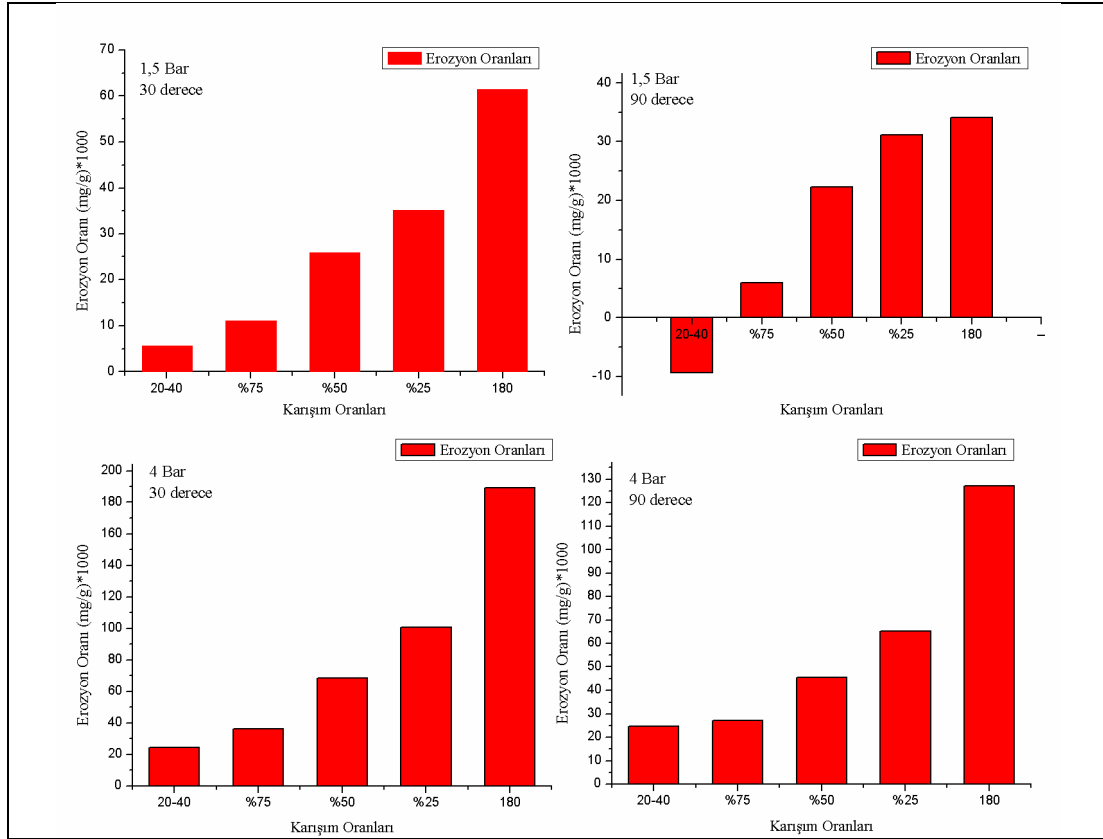
Katı partikül erozyonunda partikül karışımlarının etkileri ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında farklı boyutlara sahip partiküllerin birbirleri içerisinde farklı oranlarda karıştırılması ile hazırlanan karışımlar ile Ti6Al4V alaşımı katı partikül erozyon ile aşındırılmış ve karışımların erozif aşınma üzerindeki etkinliği irdelenmiştir. Çalışmalarda numuneler en yüksek erozif aşınmanın gerçekleştiği 30° ve en düşük erozif aşınmanın gerçekleştiği 90° partikül çarpma açılarında 1,5 ve 4 bar püskürtme basınçlarında aşındırılmıştır. Bu noktada Ti6Al4V alaşımında partikül karışımlarının etkilerinin iki farklı açı ve basınç değeri için anlaşılması amaçlanmıştır. Tablo 7.4' de hazırlanan partikül karışımları verilmiştir. Şekilde partikül karışımlarının etkisinin daha rahat incelenebilmesi amacıyla karışım içerisindeki partiküllerin bireysel erozyon oranları da verilmiştir.

Tablo 7.4. Partikül karışımları

Partikül karışımı
% 75 20-40 mesh - % 25 180 mesh
% 50 20-40 mesh - % 50 180 mesh
% 25 20-40 mesh - % 75 180 mesh

Şekil 7.11' de Tablo 7.4' te verilen partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına etkileri 1,5 bar basınç ve 30° partikül çarpma açısı için verilmiştir. Şekil 7.11-a' da en solda 20-40 meshlik partiküllerin tek başlarına kullanılması durumunda elde edilen erozyon oranı verilmiştir. Karışım için verilen % değeri karışım içerisindeki 20-40 mesh boyutlu partiküllerin kütlece oranının belirtmektedir. Grafiğin en sağında ise 180 meshlik partiküllerin bireysel olarak kullanılmaları durumunda elde edilen erozyon oranı verilmiştir. Tüm grafikler bu formatta çizilmiştir. Şekil 7.11-a incelendiğinde partikül karışımlarının erozif aşınma üzerinde etkin bir rol oynadığını sergilemektedir. Ayrıca partikül karışımlarının erozyon oranlarının partiküllerin bireysel kullanılması durumunda elde edilen erozyon oranlarının arasında yer aldığı görülmektedir. Partikül karışım oranına bağlı

olarak erozyon oranı partikül içerisinde kütlece daha fazla bulunan partikülün erozyon oranına yaklaşmaktadır.



Şekil 7.11. Partikül karışımlarının erozyon oranına etkileri a) 1,5 bar, 30 derece, b) 1,5 bar, 90 derece, c) 4 bar, 30 derece, d) 4 bar, 90 derece

Şekil 7.11-b' de partikül karışımlarının 1,5 bar basınç ve 90° partikül basıncında erozif aşınmaya olan etkisini vermektedir. Şekil 7.11-b incelendiğinde Şekil 7.11-a için ulaşılan sonuçların geçerli olduğu söylenebilir. Partikül karışımları içerisindeki partiküllerin oranına bağlı olarak artmış veya azalmış ve partiküllerin bireysel kullanılmaları durumunda elde edilen erozyon oranı değerlerine yaklaşmıştır.

Şekil 7.11-c' de 4 bar ve 30° partikül çarpma açısında, Şekil 7.11-d' de aynı basınç değerinde 90° partikül çarpma açısında partikül karışımlarının erozif aşınmaya olan etkileri verilmiştir. Her iki şekil de incelendiğinde karışımların bu parametreler için de şekil 7.11-a ve 7.11-b' de gözlenen sonuçlara benzer bir davranış gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 7.11 incelenerek partikül karışımlarının malzemelerin erozif aşınma davranışını önemli bir şekilde etkiledikleri sonucuna varılabilir. Özellikle erozif aşınma oranı

yüksek olan küçük boyutlu partiküllerin (180 mesh) içerisine % 25 oranında büyük partiküllerin (20-40 mesh) katılması durumunda erozyon oranında büyük bir düşüş gözlenmektedir. Bu noktada büyük partiküllerin içerisine aynı oranda küçük partiküllerin katılması durumunda ise erozyon oranında aynı oranda artış gözlenmemektedir. Bu iki bulgu ile partikül karışımlarının partiküllerin bireysel kullanılmaları durumuna daha düşük verimlilikte bir erozif aşınma meydana getirdikleri söylenebilir. Bu durumun partiküllerin karıştırılarak malzeme üzerine gönderilmeleri durumunda aşındırıcı partiküllerin kütlelerine ve yüzey alanlarına bağlı olarak farklı hızlara sahip olmaları ve bu nedenle malzeme yüzeyine ulaşmadan birbirleri ile çarpışarak kinetik enerjilerinin bir kısmını kaybetmelerinden kaynaklanmaktadır.

7.4. Taguchi Deney Tasarımı ile Ti6Al4V Alaşımının Erozif Aşınma Davranışının Optimizasyonu

Erozif aşınma çalışmalarında Taguchi deney tasarımının kullanılması son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Literatürde çok sayıda araştırmacı Taguchi deney tasarımını kullanarak birçok farklı malzemenin erozif aşınma davranışlarını incelemiştir [113-137]. Bu bölüm içerisinde kısa bir şekilde Taguchi deney tasarımı ile ilgili gerçekleştirilen erozif aşınma çalışmalarının özetleri verilecek literatürde konunun önemi vurgulanacaktır. Literatür özetlerinden sonra deneysel çalışmalar bölümünde anlatılan ikinci aşama Taguchi deneylerinin sonuçları ile erozif aşınma sonuçlarının karşılaştırılmaları verilerek, Ti6Al4V alaşımın erozif aşınma davranışının Taguchi deney tasarımı ile optimizasyonu ve bu işlemin verimliliği tartışılacaktır. Bölüm içerisinde grafikler yardımıyla bir önceki bölümde verilen deneysel erozyon oranları ile Taguchi deney tasarımından iki farklı deney desenleri kullanılarak (L9 ve L18) hesaplanan erozyon oranları karşılaştırılacak ve partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkisi irdelenecektir. Bölüm içerisinde bu parametrelerin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına etkileri ayrı başlıklar altında verilecektir.

7.4.1. Literatür Özeti

Sandhyarani Biswas ve Alok Satapatyhy yapmış olduğu çalışmada alümina dolgulu cam epoksi kompozit malzemenin katı partikül erozyonu davranışını Taguchi deney

tasarımı ile incelemişler, teorik erozyon modelini oluşturmuşlardır. Yaptıkları literatür çalışmalarında polimer matrisli kompozitlerin erozyon davranışına altı kontrol faktörünün etkili olduğunu, bunların partikül çarpma hızı, dolgu oranı, aşındırıcı sıcaklığı, çarpma açısı, nozul numune arası mesafesi ve aşındırıcı boyutu olduğunu belirlemişlerdir. Taguchi metodunda, sinyal gürültü oranı performans ölçümlerinde kullanılmış, optimizasyonların yapılması için en küçük en iyi yöntemini kullanmışlardır. Çalışmalarında bu altı faktörün etkisini incelemişler ve $L_{27}(3^{13})$ orthogonal desenini kullanmışlardır. Böylelikle $3^6=729$ deney yapmaları gerekirken sadece 27 deney yaparak hem deney için yapılan harcamalardan hem de zamandan avantaj sağlamışlardır. Taguchi deney tasarımı ile cam epoksi kompozitin erozyon karakteristiğinin başarı ile analiz etmişlerdir. Öncelik sırasına göre alümina birleşimi, aşındırıcı sıcaklığı, nozul numune arası mesafe, aşındırıcı partikül boyutu, çarpma hızı, alümina birleşimi x aşındırıcı sıcaklığı etkileşimi ve çarpma hızı x aşındırıcı sıcaklığı etkileşiminin erozyon oranına önemli katkılar sağlamakta olduğunu bulmuşlardır [113].

R. Sahoo ve arkadaşları mikro yapıdaki çeşitliliğin katmanlı, çift modlu ve eş eksenli Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışına olan etkisini çeşitli test parametrelerinde (farklı partikül çarpma hızı, farklı çarpma açısı, farklı mikroyapı ve farklı boyutta aşındırıcı) ve Taguchi ortogonal dizi kullanarak incelemişlerdir. Çalışmaları sonucunda Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu aşınma davranışına çarpma hızının en önemli kontrol faktörü olduğunu, bunu sırası ile çarpma hızı, mikroyapı çeşitliliği ve aşındırıcı partikül boyutunun izlediğini belirlemişlerdir [114].

M. Bağcı ve H. İmrek yaptıkları çalışmada geliştirdikleri borik asit partiküllü cam fiber epoksi kompozitlerin katı partikül erozyonu davranışına operasyon parametrelerinin etkisini Taguchi deney tasarımı kullanarak incelemişlerdir. Taguchi metodunun aşınma parametrelerinin optimizasyonunda kolay, sistematik ve etkin bir metod olduğu bulmuşlardır [115].

S. Mantry arkadaşları atık bakır ve alüminyum malzemelerin plazma spray kompozit kaplamalarının katı partikül erozyonu davranışlarına beş operasyon parametresinin (çarpma hızı, aşındırıcı boyutu, aşınma sıcaklığı, çarpma açısı, alüminyum bileşeni

oranı) etkisini Taguchi L_{16} ortogonal dizisi kullanarak incelemişlerdir. Partikül çarpma hızının, erozyon oranına etki eden bu beş parametreden en etkilisi olduğu bulunmuştur [116].

S. Biswas ve A. Satapathy yaptıkları çalışmada bambu fiber takviyeli epoksi matris kompozitlerin erozif aşınma davranışını Taguchi ortogonal deney tasarımı kullanarak incelemişler. Taguchi deney tasarımı baz alınarak gerçekleştirdikleri bu metodolojide erozif aşınma prosesinin parametrik analizini yapmışlardır. Kompozitin erozyon karakteristiği Taguchi deney deseni ile başarılı bir şekilde analiz edilmiştir [115].

Yapılan çalışmalarda araştırmacılar, Taguchi ortogonal deney deseninin kullanımının erozif aşınmada hangi parametrelerin daha etkili olduğu belirlenmesinde yarar sağladığını göstermişlerdir. Ayrıca Taguchi deney deseni yardımı istenilen sonuçlara kolay bir şekilde ulaşılabildiği, gerçekleştirilen deney sayısının az olması ile hem vakitten hem de harcanan sarf malzemelerden büyük avantaj sağlandığı belirtilmiştir [117].

A. Satapathy ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada balık pulu takviyeli epoksi matrisli kompozitin erozif aşınma davranışını Taguchi L_{27} deney deseni kullanarak incelemişlerdir. Taguchi deney tasarımı ile zamandan ve maliyetten kazanca geçileceğini, sistematik bir şekilde deneylerden optimum sonuçlar elde edileceğini savunmuşlardır [118].

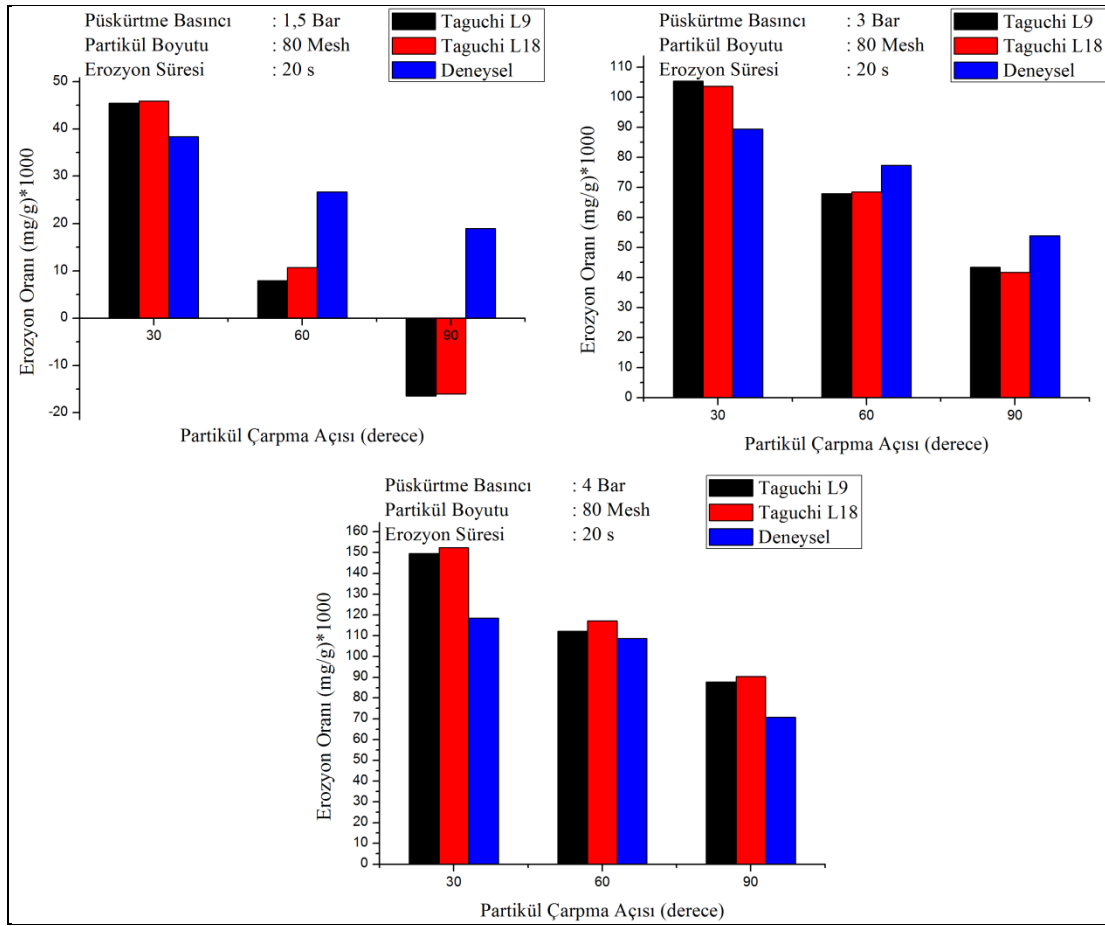
S. P. Sahu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada uçucu kül-alüminyum tozu ile plazma spreyl kapladıkları alüminyum malzemenin erozif aşınma davranışını Taguchi deney deseni kullanarak incelemişlerdir. Erozyon oranına etki eden parametrelerden partikül çarpma hızı, çarpma açısı, nozul numune arası mesafe, aşındırıcı boyutu ve alüminyum bileşeninin erozyon oranına etkisi ortogonal dizi ve sinyal gürültü oranı kullanılarak araştırılmıştır. Partikül çarpma hızının erozyon oranına etki eden en önemli faktör olarak bulmuşlardır [122].

S. C. Mishra ve arkadaşları uçucu kül-ilmenit kaplamalarının erozif aşınma davranışını incelemişlerdir. Taguchi metodu baz alınarak deney planı hazırlamışlardır. Partikül çarpma açısı, çarpma hızı, partikül boyutu ve nozul numune arası mesafenin erozyon oranına etkisi ortogonal dizi ve sinyal gürültü oranı

kullanılarak araştırılmıştır. Partikül çarpma açısının erozyon oranına etki eden en güçlü faktör olduğunu bulmuşlardır [124].

7.4.2. Partikül çarpma açısının etkisi

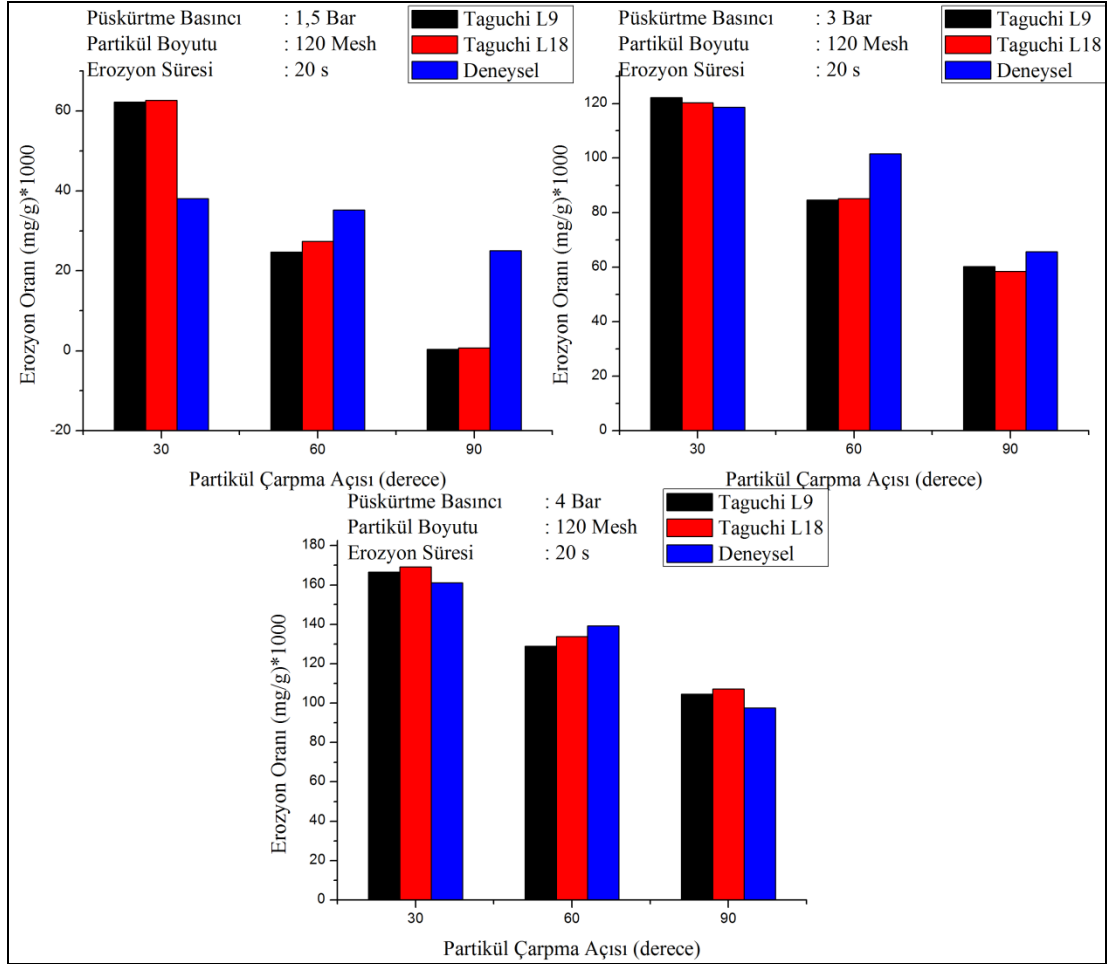
Bu bölümde Ti6Al4V alaşımının eroziv aşınma davranışına etkisi Taguchi deney tasarımı ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak incelenmiştir. Aşağıdaki şekillerde her bir partikül boyutu için (80, 120 ve 180 mesh), tüm püskürtme basıncı değerlerinde (1,5, 3 ve 4 bar) ve 3 farklı partikül çarpma açısında (30°, 60° ve 90°) L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 7.12. Partikül çarpma açısının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 80 mesh)

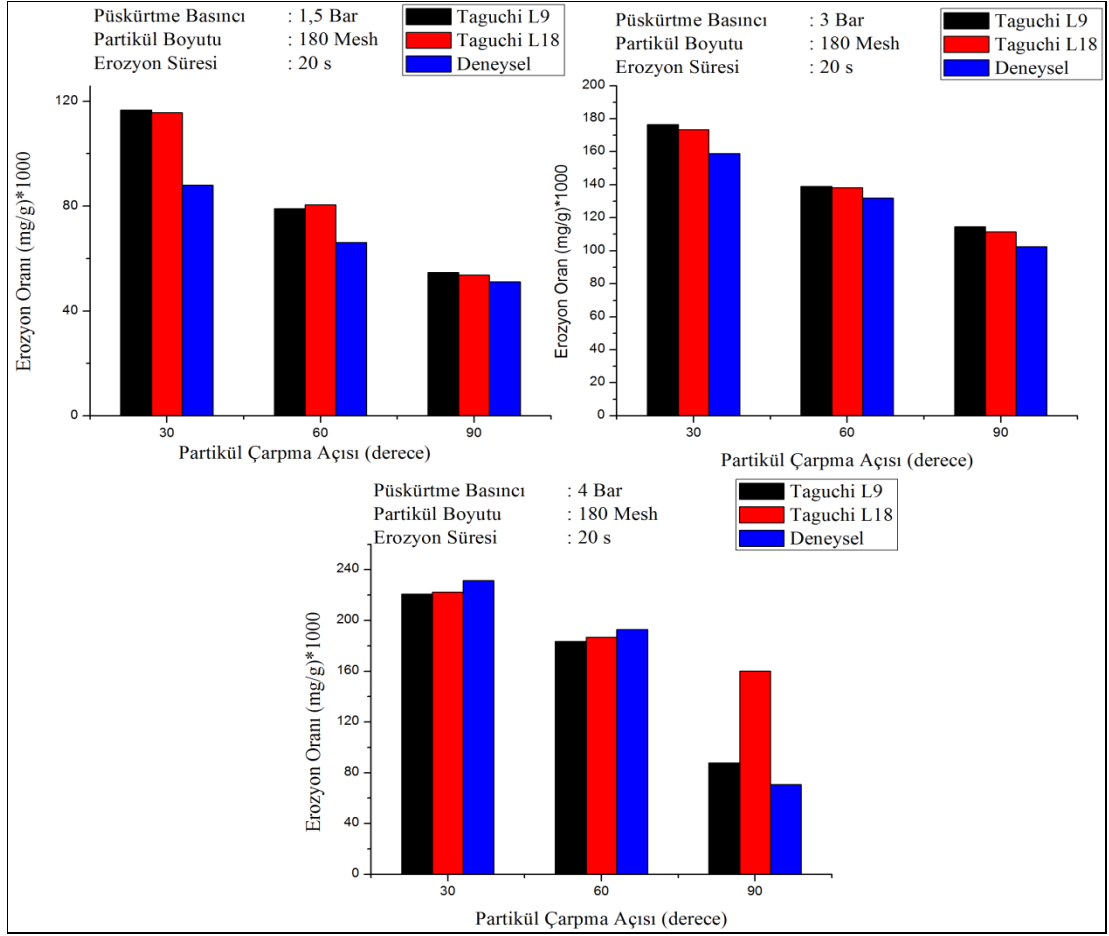
Şekil 7.12' ye genel olarak bakıldığında 80 mesh boyutunda, tüm partikül püskürtme basıncı değerlerinde, partikül çarpma açılarına bağlı olarak erozyon oranının önemli değişim gösterdiği ve en düşük erozyon oranının 90°, en yüksek erozyon oranının ise 30° partikül çarpma açısında gerçekleştiği görülmektedir.

L9 ve L18 deney desenlerinin sonuçlarının deneysel sonuçlar ile uyumluluğu karşılaştırıldığında ise L9 deney deseninin L18' e göre deneysel verilere daha fazla yakınlığı söylenebilir. Ancak her iki deney deseninde de başarılı tahminler yapıldığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.13. Partikül çarpma açısının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 120 mesh)

Şekil 7.13' de 120 mesh partiküller ile gerçekleştirilen deneyler için, L9, L18 desenleri ve deneysel sonuçların karşılaştırılmaları verilmiştir. Taguchi deney tasarımı ile tahmin edilen değerlerin deneysel değerlere uyumlu sonuçlar verdiği söylenebilir. Ancak 1,5 bar basınç için çizilen diyagrama bakıldığında 30° ve 90° partikül çarpma açılarında Taguchi değerlerinin deneysel değerlerden önemli bir miktarda saptığı görülmektedir. Bu durumun nedeni bölüm sonunda genel değerlendirmelerde açıklanacaktır.



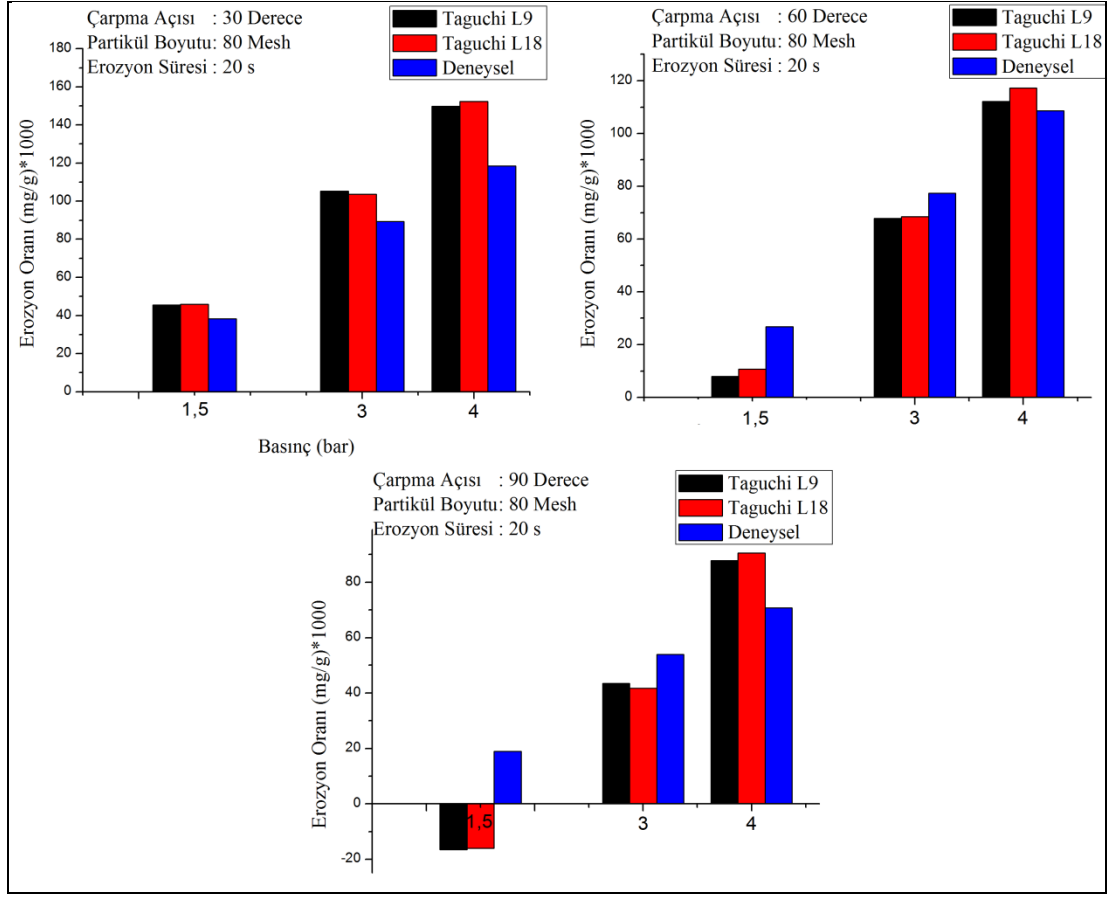
Şekil 7.14. Partikül çarpma açısının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 180 mesh)

Şekil 7.14’ de 180 mesh partiküller ile gerçekleştirilen deneyler için, L9, L18 desenleri ve deneysel sonuçların karşılaştırılmaları verilmiştir. Şekil 7.14 incelendiğinde 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller, 4 bar püskürtme basıncında, 90° çarpma açısı dışında tüm grafiklerde 30°, 60° ve 90°’ de L9, L18 ve deneysel sonuçların birbirine çok yakın değerlerde gerçekleştiği görülmektedir. Deneysel sonuçlara L9 deney deseninin L18 deney desenine göre daha yakın yaklaşımlarda bulunduğu söylenebilir.

7.4.3. Partikül püskürtme basıncının etkisi

Bu bölümde partikül püskürtme basıncının L9 ve L18 deney desenleri ile incelenmiş, bu desenlerin deneysel sonuçlar ile uyumluluğu karşılaştırılmıştır.

Aşağıdaki şekillerde partikül püskürtme basıncının erozyon oranına etkisi her bir aşındırıcı partikül için çizilen grafiklerde farklı açılarda ayrı ayrı incelenmiştir.



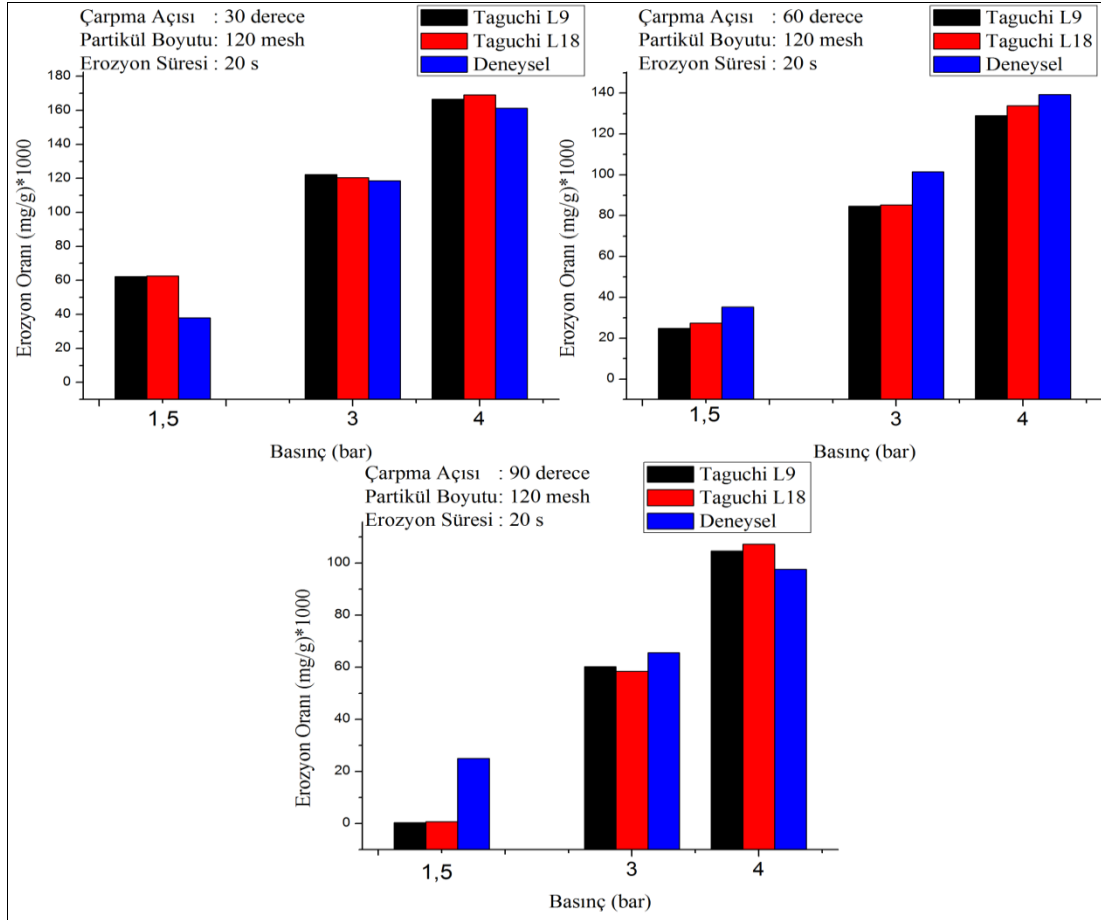
Şekil 7.15. Partikül püskürtme basıncının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması(Aşındırıcı Partikül boyutu: 80 mesh)

Şekil 7.15’ te 80 mesh boyutunda her bir partikül çarpma açısı için tüm basınç değerlerinde L9, L18 ve deneysel sonuçlar kıyaslanmıştır. Şekil genel olarak incelendiğinde erozyon oranının L9, L18 ve deneysel sonuçlarda partikül püskürtme basıncının artması ile artış gösterdiği tüm grafiklerde görülmektedir.

3 bar partikül püskürtme basıncında tüm partikül çarpma açılarında L9 ve L18 desenlerince tahmin edilen erozyon oranlarının deneysel çalışmalar sonrasında elde edilen sonuçlara daha yakın olduğu görülmektedir. Ayrıca aynı operasyon parametreleri için L9 ve L18 desenlerinin deneysel sonuçlara uyumluluğu kıyaslandığında L9 deseninin sonuçlarının deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmektedir.

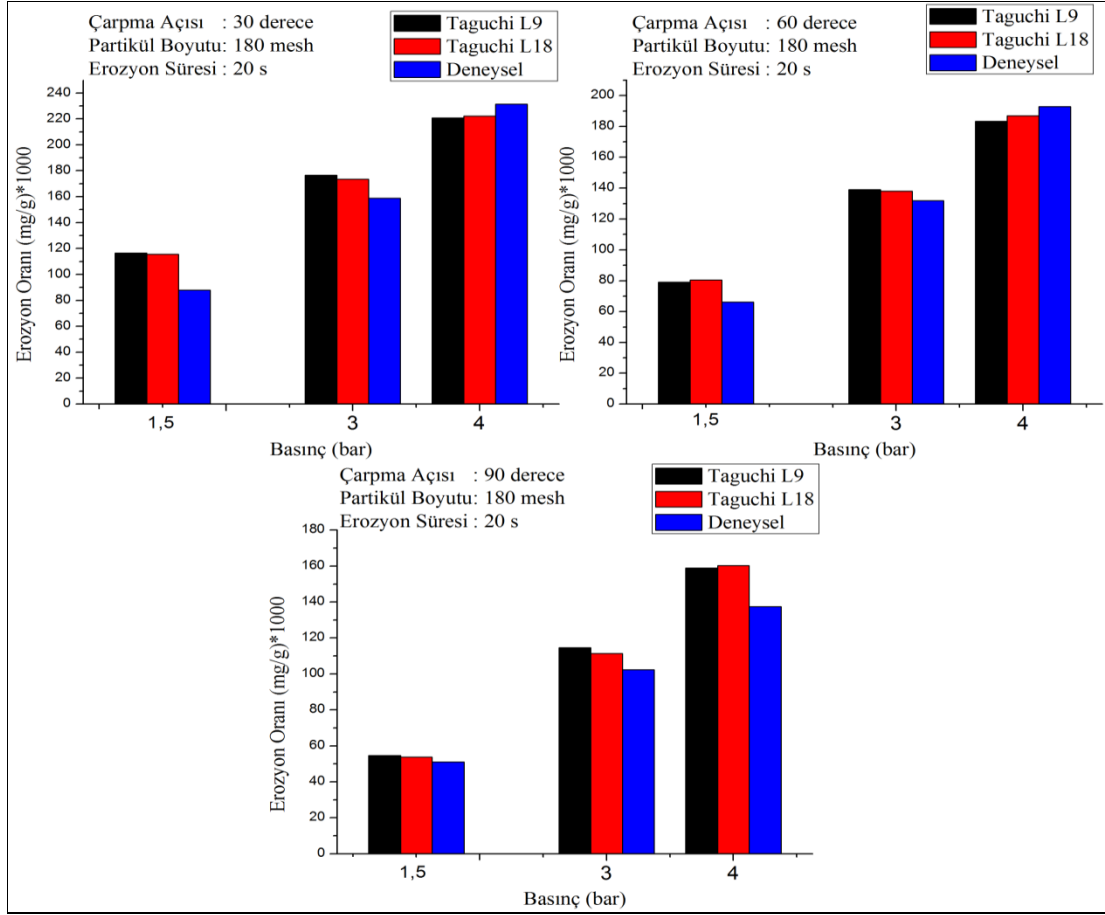
Şekil 7.16 incelendiğinde 120 mesh boyutunda aşındırıcı partiküllerle gerçekleşen deneylerde tüm açı değerlerinde 3 bar ve 4 bar püskürtme basıncı değerinde gerçekleşen erozyon oranının L9, L18 ve deneysel sonuçların 1,5 bar püskürtme

basıncında gerçekleşen eroziv aşınma sonuçlarının göre birbirine daha yakın gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 7.16. Partikül püskürtme basıncının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 120 mesh)

Şekil 7.17 incelendiğinde 180 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller ile gerçekleştirilen deneylerde tüm partikül çarpma açısı değerleri için 4 bar püskürtme basıncında 30° ve 60° çarpma açıları arasında gerçekleştirilen deney sonuçları ile L9 ve L18 desenleri kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamaların sonuçlarının birbirine daha yakın değerlerde olduğu gözlenmiştir. Ancak 4 bar basınçta 90° partikül çarpma açısında gerçekleştirilen deneylerin sonuçlarının L9 ve L18 desenlerinin sonuçları ile uyumunun daha az olduğu görülmektedir. Buna ek olarak 4 bar basınçta, 30° ve 90° partikül çarpma açıları arasında gerçekleştirilen deneysel sonuçlara L18 deseninin Daha uyumlu olduğu söylenebilir.



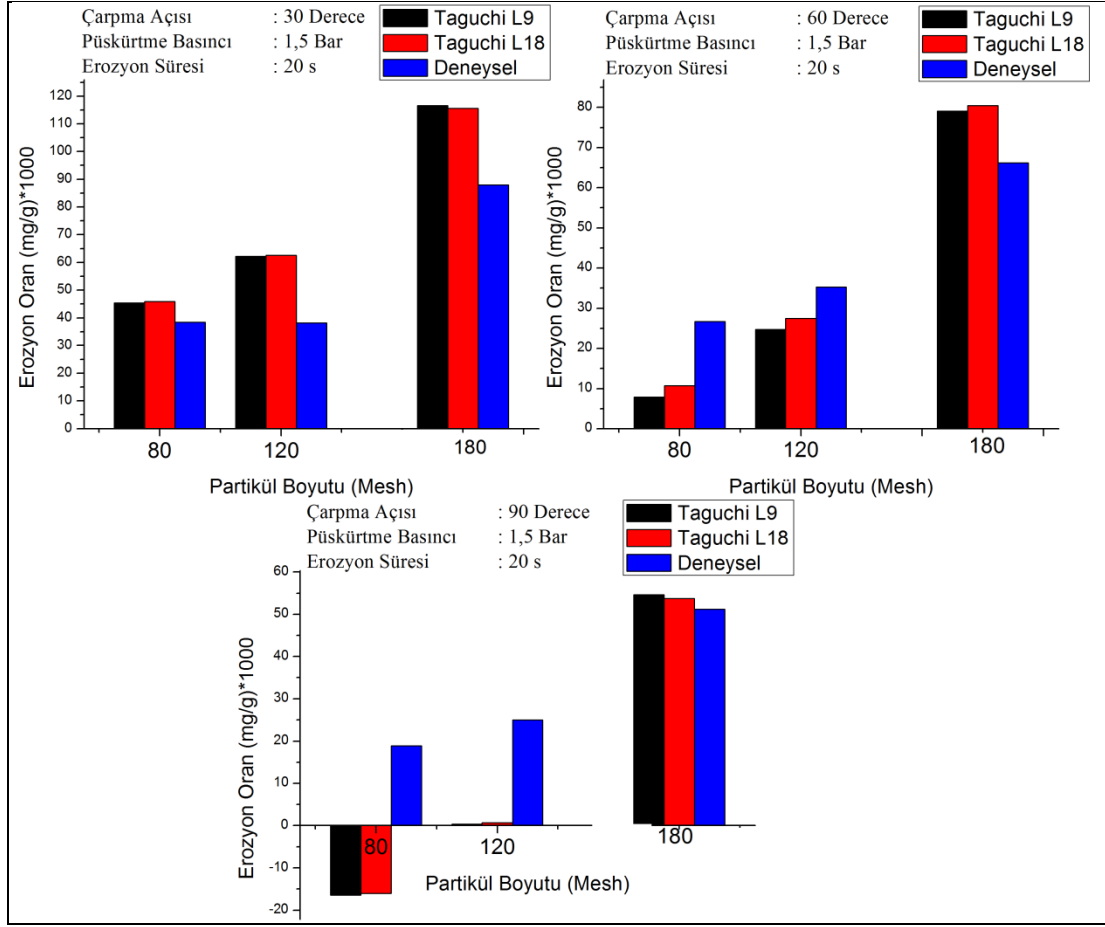
Şekil 7.17. Partikül püskürtme basıncının etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Aşındırıcı Partikül boyutu: 180 mesh)

7.4.4. Aşındırıcı partikül boyutunun etkisi

Bu bölümde aşındırıcı partikülün boyutunun etkisi incelenmiş, şekillerde deneysel sonuçlar ile L9 ve L18 desenleri ile karşılaştırılmış, desenlerin sonuçlara uygunluğu tartışılmıştır.

Aşağıdaki şekillerdeki grafiklerde partikül boyutunun etkisi tek basınç değerinde ayrı ayrı çizilmiş açı değerlerinde verilmiştir. L9, L18 ve deneysel sonuçların erozyon oranı grafiklerde her bir partikül boyutu için verilmiştir.

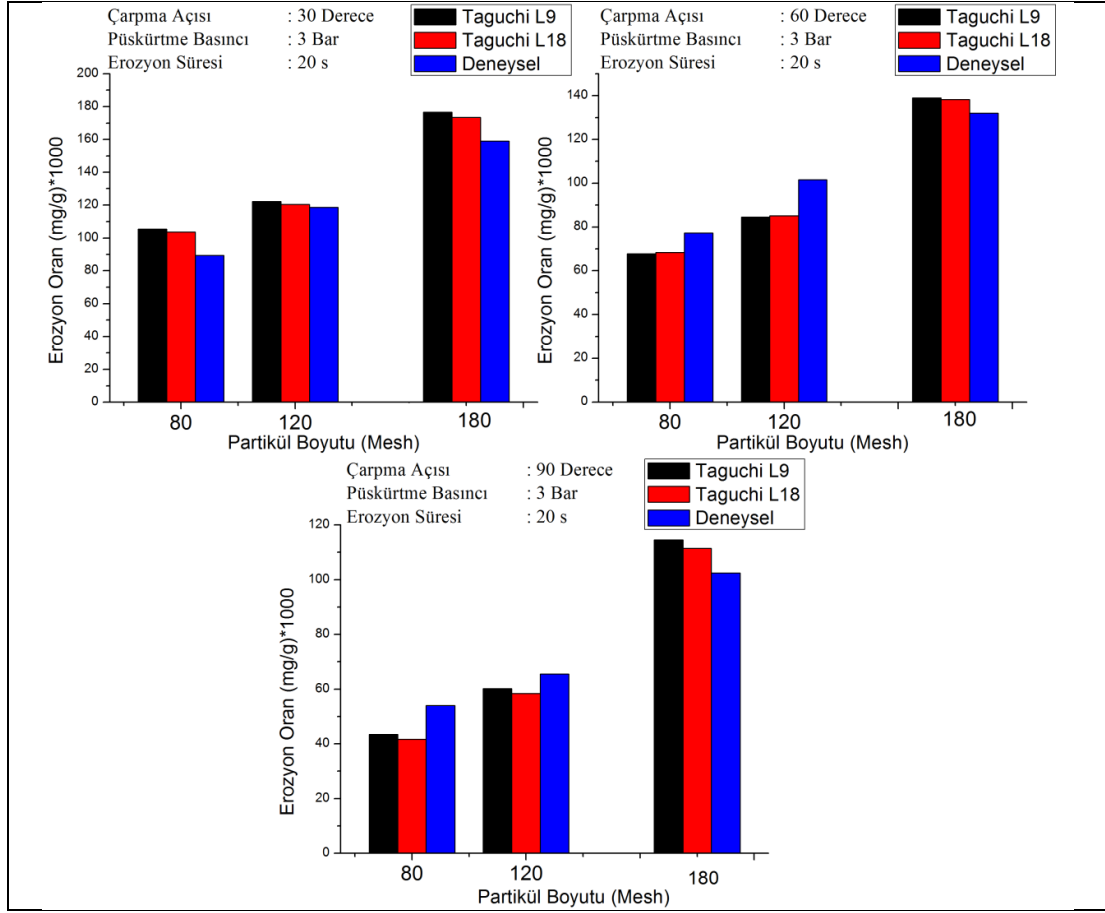
Genel olarak incelendiğinde aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile erozyon oranında artış meydana geldiği tüm açı değerlerinde ve tüm basınç değerlerinde deneysel sonuçlarda, L9 ve L18 desenleri kullanılarak hesaplanan tahminlerde görülmektedir.



Şekil 7.18. Aşındırıcı partikül boyutunun etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Partikül püskürtme basıncı: 1,5 bar)

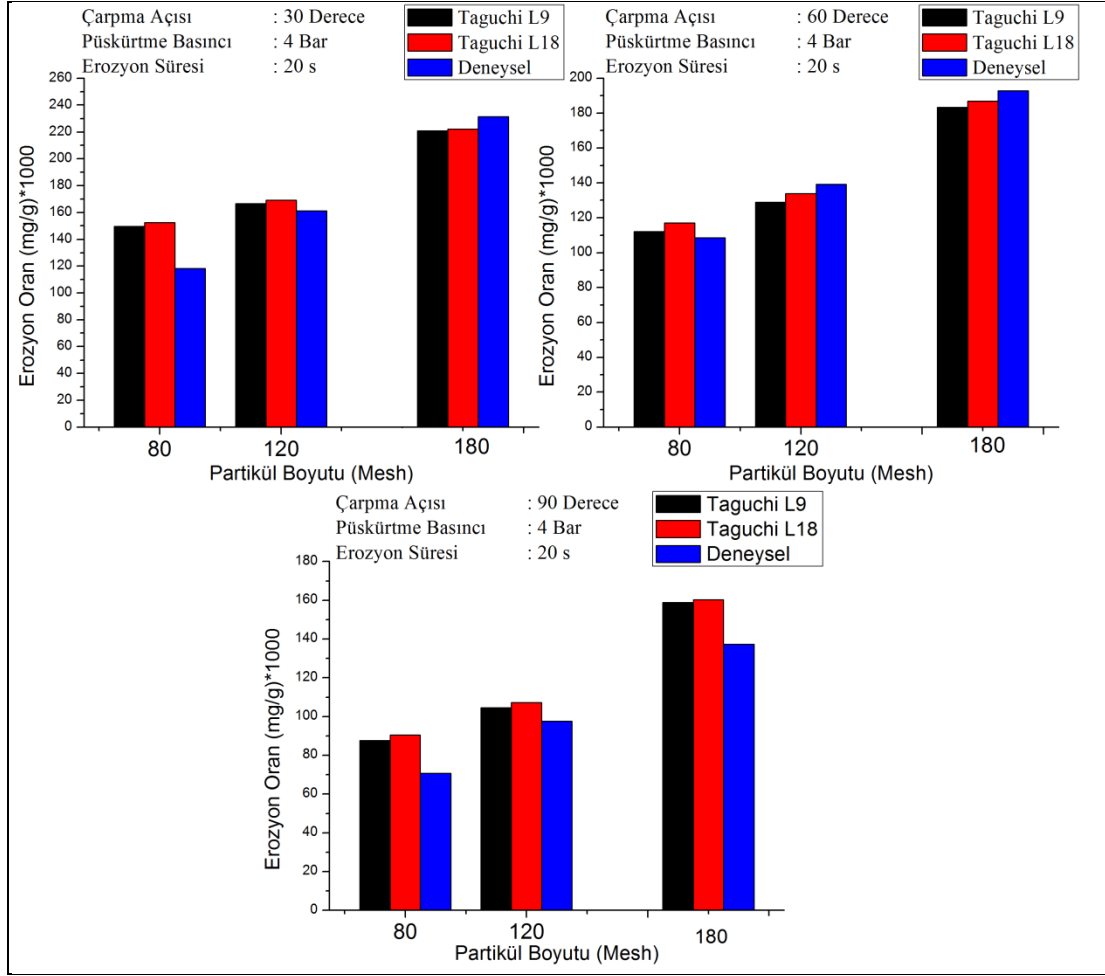
Şekil 7.18 incelendiğinde 1,5 bar partikül püskürtme basıncında 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül kullanılarak gerçekleştirilen deneyler ve hazırlanan L9 ve L18 desenlerinin erozyon oranı sonuçlarının birbirine daha yakın değerlerde olduğu görülmektedir. L9 ve L18 deseninin sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırılması ile L18 deseninin deneysel sonuçlara daha yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

Şekil 7.19 incelendiğinde erozyon oranlarının 3 bar püskürtme basıncında 30°, 60° ve 90°'de gerçekleştirilen deneyler ve hazırlanan L9 ve L18 desenleri kullanılarak hesaplanan erozyon oranlarının 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller kullanılması ile birbirine en yakın değerlerde olduğu görülmüştür. Deneysel olarak hesaplanan erozyon oranı değerine L18 deseni kullanılarak daha yakın değerler elde edildiği görülmüştür.



Şekil 7.19. Aşındırıcı partikül boyutunun etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması (Partikül püskürtme basıncı: 3 bar)

Şekil 7.20 incelendiğinde 120 mesh boyutunda kullanılan aşındırıcı partiküle ait erozyon oranı sonuçlarının birbirine daha yakın sonuçlarda olduğu görülmektedir. Bu sonuçların deneysel olarak elde edilen erozyon değerine yakınlığı incelenecek olursa L9 deseninin sonuçlarının daha yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 7.20. Aşındırıcı partikül boyutunun etkisinin L9, L18 ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması(Partikül püskürtme basıncı: 4 bar)

Bu bölüm içerisinde verilen grafikler incelendiğinde L9 ve L18 deney desenleri kullanılarak tahminlenen erozif aşınma oranı verileri ile deneysel çalışmalar ile elde edilen erozif aşınma verilerinin incelenen tüm parametreler için yakın sonuçlar verdiği sonucuna varılabilir. Özellikle 180 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller ile gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ile Taguchi tahminleri çok düşük sapmalar ile uyum gösterdiği görülmektedir. Taguchi deney tasarımı ile tahminlenen değerlerin özellikle 30° ve 60° partikül çarpma açılarındaki 90° partikül çarpma açılarına göre daha tutarlı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu durumun nedeninin 90° partikül çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin sünek Ti6Al4V alaşımının yüzeyine saplanarak efektif bir erozif aşınma gerçekleştirememeleri ve inkubasyona yol açmaları gösterilebilir. Bu durum tahminlenen değerlerde de tutarsızlıklara yol açmıştır. Ancak genel sonuçlar incelendiğinde çok az sayıda deney gerçekleştirilerek, Taguchi deney desenleri ile tahminlenen değerlerin partikül çarpma açısı, püskürtme

basıncı ve partikül boyutunun Ti6Al4V alaşımının eroziv aşınma davranışına etkilerinin incelenmesi ve bu parametrelerin optimizasyonu aşamasında son derece etkili olduğu söylenebilir.

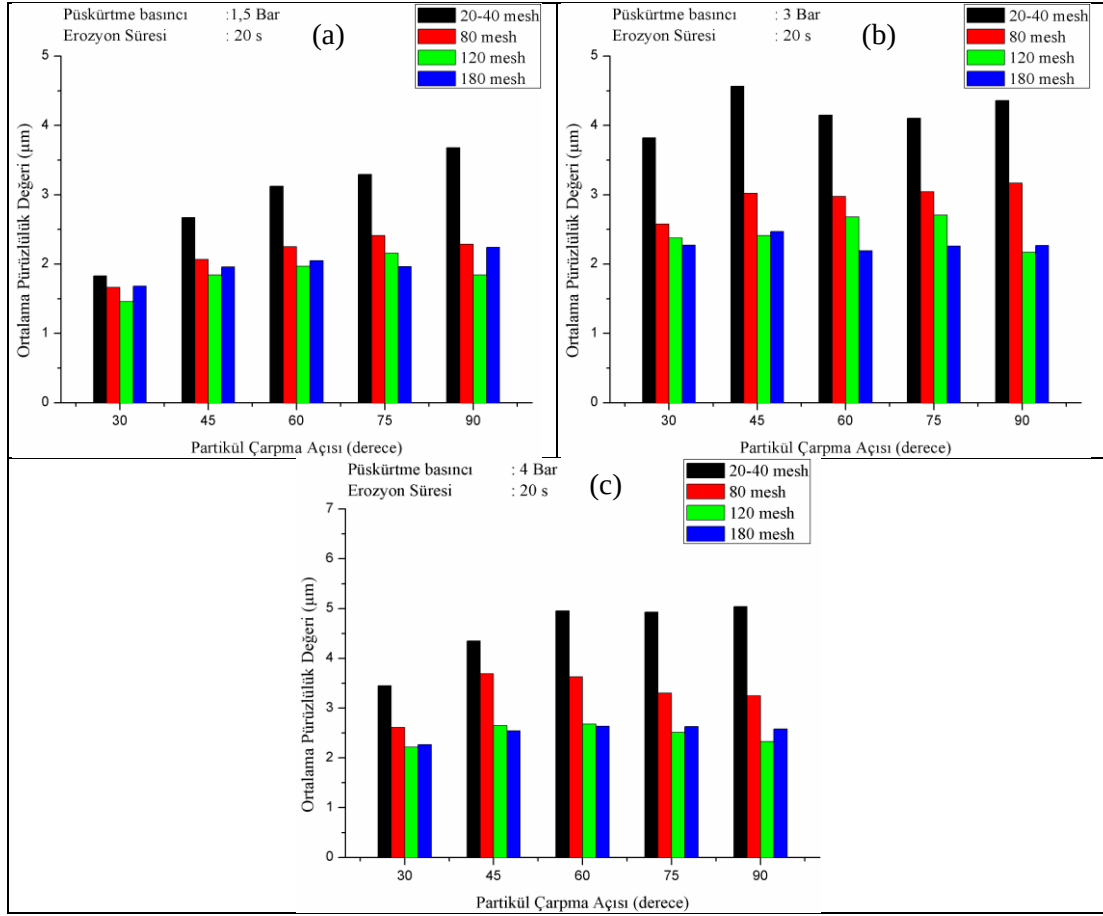
7.5. Aşınmış Yüzeylerin Pürüzlülük Değerlerinin Değişimi

Tez çalışması kapsamında farklı parametreler ile aşındırılan numunelerin (partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, aşındırıcı partikül boyutu ve partikül karışımları) yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Literatürde birçok araştırmacı yaptıkları çalışmalarda malzemelerin yüzey pürüzlülük değerlerini ölçmüşler ve 3 boyutlu yüzey topografisi almışlardır [138-158]. Literatürde 3 boyutlu yüzey morfolojisi elde edebilmek için optik profilometre [138-145] ve atomik güç mikroskobu [146-158] gibi cihazların kullanıldığı belirlenmiştir. Bu bilgiler doğrultusunda farklı parametrelerde aşındırılan numunelerin yüzeylerinin pürüzlülük ölçümü optik profilometre yardımı ile gerçekleştirilmiş. Her bir numune için ortalama pürüzlülük değerleri (R_a) hesaplanmış ve yüzey görüntüleri 2 ve 3 boyutlu olarak verilmiştir. Bu bölüm içerisinde Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimleri irdelenmiştir.

7.5.1. Partikül çarpma açısının etkisi

Şekil 7.21’ de tüm partikül boyutları ve basınç değerlerinde aşındırılan numunelerin ortalama pürüzlülük (R_a) değerlerinin partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde tüm basınç ve boyut değerlerinde numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin partikül çarpma açısına bağlı olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Buna karşın bu değişimin çok önemli oranlarda olmadığı dikkat çekmektedir. Aynı partikül boyutunda aşındırılan numunelerin pürüzlülük değerleri kendi içlerinde karşılaştırıldıklarında, en yüksek pürüzlülük değerinin genellikle 60° , 75° ve 90° partikül çarpma açılarında, en düşük pürüzlülük değerlerinin ise genellikle 30° partikül çarpma açısında görüldüğü sonucuna varılmıştır. Şekil 7.21 incelendiğinde partikül çarpma açısının pürüzlülük değerleri üzerindeki etkinliğinin aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişim gösterdiği görülmektedir. Özellikle 20-40 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin çarpma açısına bağlı olarak küçük

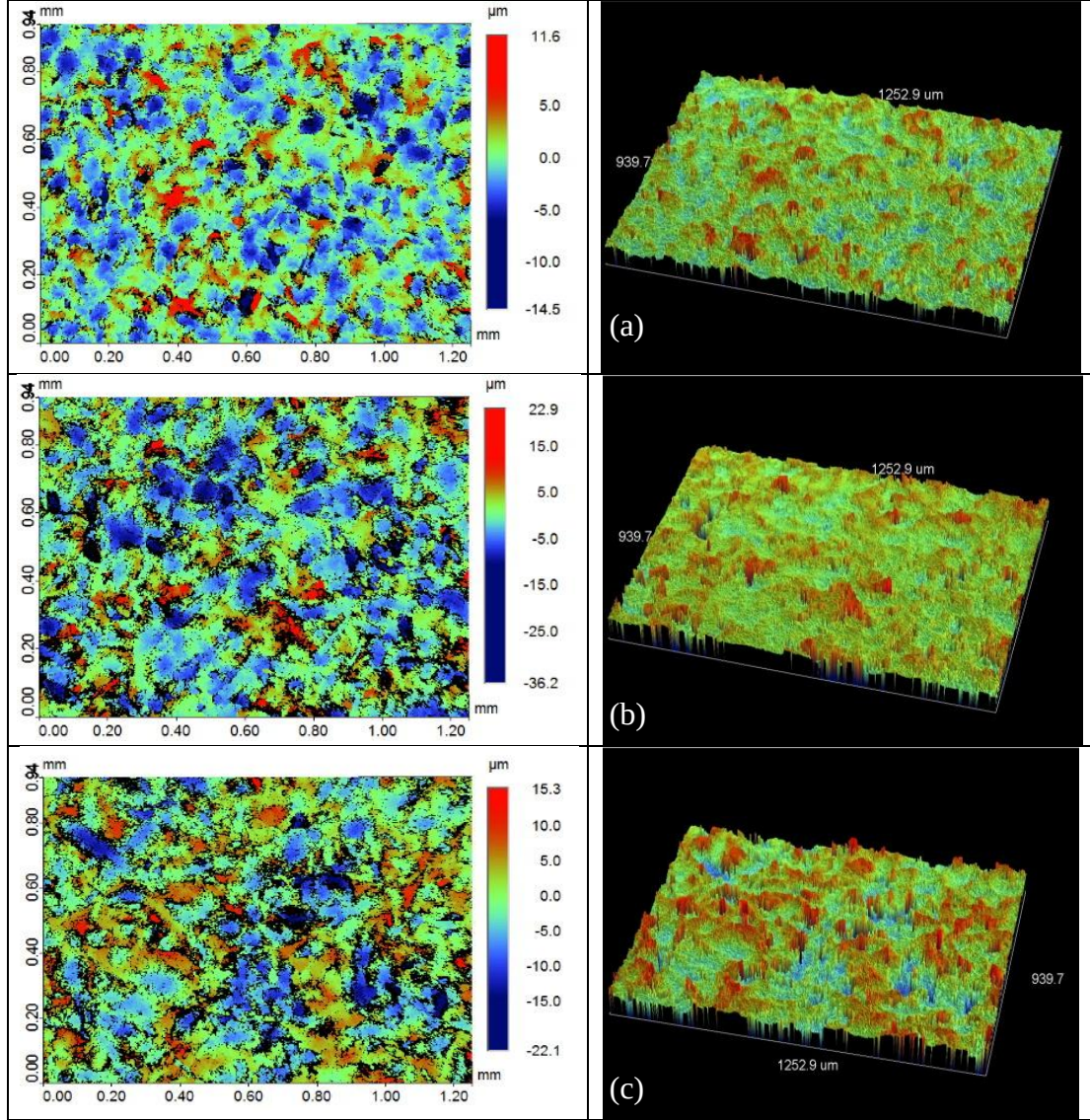
partiküllere kıyasla daha fazla değişim gösterdiği söylenebilir. Partikül boyutunun yüzey pürüzlülük değerleri üzerine etkisi ilerleyen bölümlerde verilecektir



Şekil 7.21. Ra değerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi püskürtme basıncı: a)1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar

Şekil 7.22' de 20-40 mesh partikül boyutunda 1,5 bar püskürtme basıncında 30°, 60° ve 90° çarpma açılarında aşındırılan malzemelerin yüzeylerinin optik profilometre ile elde edilen görüntüleri verilmiştir. Şekilde aşınmış yüzeylerin 2 boyutlu ve 3 boyutlu görüntüleri yüzeylere ait pürüzlülük değerlerinin skalaları ile birlikte verilmiştir. Şekil incelendiğinde partikül çarpma açısının değerinin artması ile görüntülerdeki tepecik sayısında (kırmızı bölgeler) artış meydana geldiği görülmüştür. Diğer taraftan yüzeye çarpan iri tanecikler düşük açılarda homojenize bir dağılım göstermemesi nedeniyle hasarlı yüzey topografyası da değişkenlik göstermektedir. Yüzeye paralel gelen aşındırıcı taneciklerin (düşük çarpma açılarında) yüzeyde sıyırma etkisi göstererek belirli bölgelerde plastik malzeme yığılmaları yaptığı optik profilometre görüntüsünde algılanabilmektedir (Şekil 7.22-a). Çarpma açısı

dikleştikçe aşındırıcı partiküllerin penetrasyon derinliği artmış, kalınlık ekseninde penetrasyona bağlı derin hasar vadileri oluşmuştur. Normal ve normale yakın çarpma açılarındaki aşındırıcı partiküllerin malzeme kalınlık eksenine doğru olan yüksek kinetik enerjileri bu derin hasar vadilerinin oluşmasına neden olmaktadır.

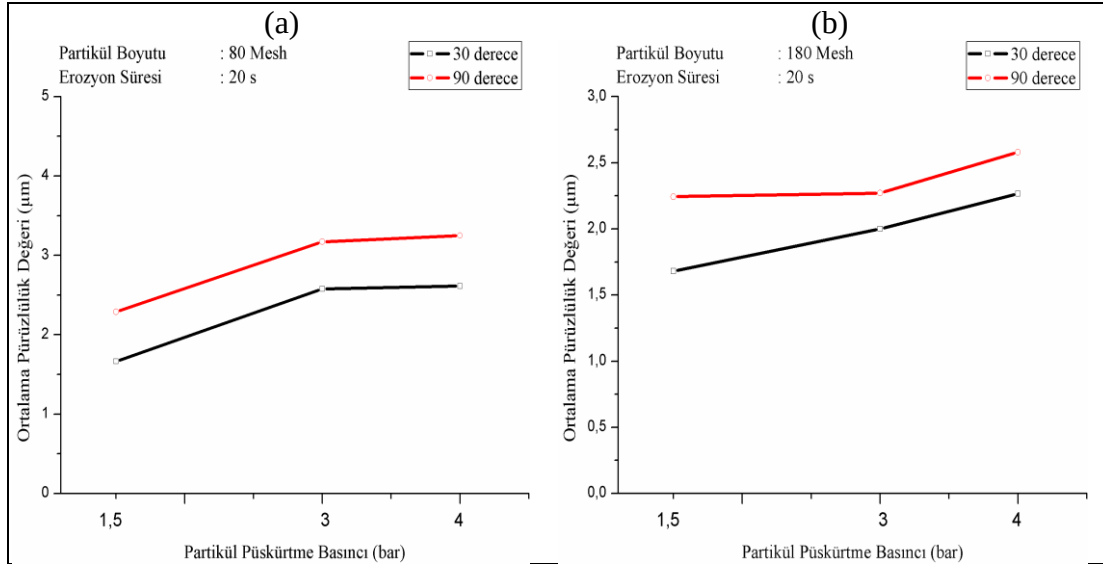


Şekil 7.22. 20-40 mesh boyutundaki aşındırıcı 1,5 bar püskürtme basıncı a) 30 derece, b) 60 derece, c) 90 derece

7.5.2. Püskürtme basıncının etkisi

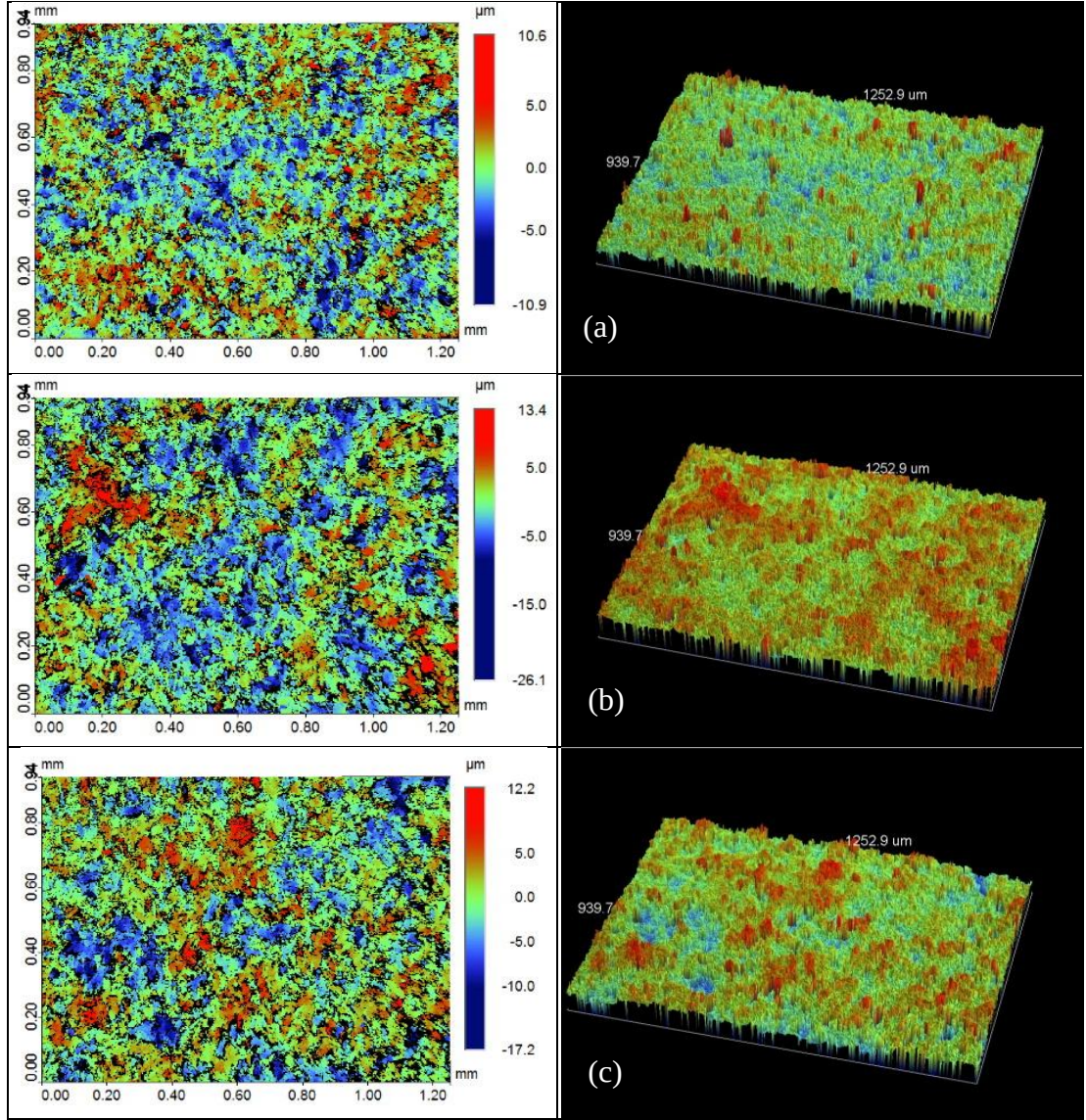
Şekil 7.23' te 80 ve 180 mesh boyutunda partiküller ile 30° ve 90° partikül çarpma açılarındaki aşındırılan numunelerin aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde Ra değerlerinin püskürtme basıncına bağlı olarak her iki açı ve boyut değerlerinde artış gösterdiği görülmektedir. Tez çalışması

kapsamında diğer tüm açı ve boyut değerlerinde de benzer bir ilişki belirlenmiş ve püskürtme basıncının artışı ile birlikte yüzey pürüzlülük değerlerinin artış gösterdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.23. Ra değerinin püskürtme basıncına bağlı değişimi aşındırıcı partikül boyutu: a) 80 mesh, b) 180 mesh

Şekil 7.24' de 80 mesh boyutunda partiküller ile 30° partikül çarpma açısında 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basıncında aşındırılan numunelerin görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.24 incelendiğinde püskürtme basıncının özellikle 1,5 bar basınçtan 3 bara yükseltilmesi ile görüntülerdeki tepciklerde bariz bir şekilde artış gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 7.23' de verilen grafikler incelendiğinde de püskürtme basıncının 1,5 bar basınçtan 3 bar'a yükseltilmesi ile Ra değerinde belirgin bir artış görüldüğü gözlenmiştir. 1,5 bar ile 3 bar püskürme basıncı arasında ortaya çıkan radikal değişim, aynı artış trendini 3 bar ve 4 bar arasında sürdürmemiştir. Buna karşın optik profilometre görüntüleri ile çok net ve özgün bir şekilde püskürtme basıncının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkisi gözlemlenebilmektedir.

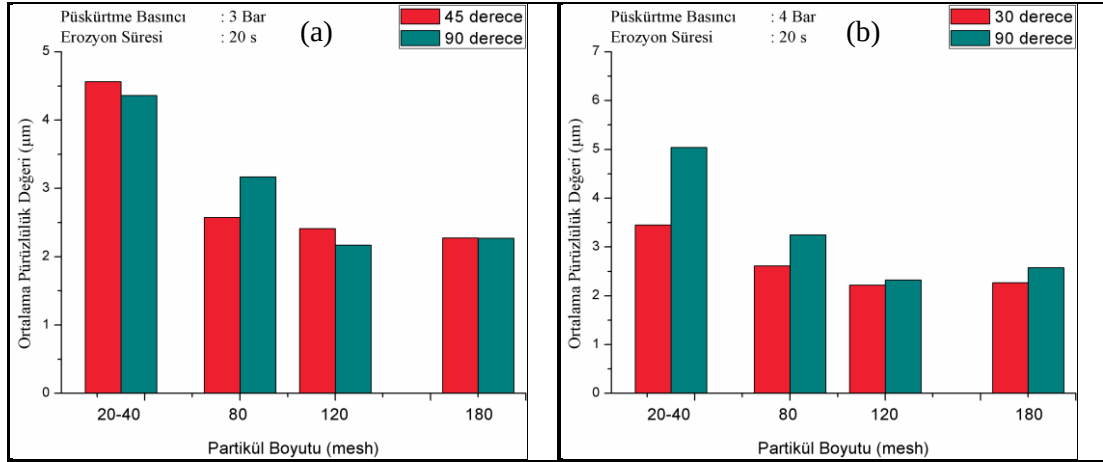


Şekil 7.24. 80 mesh boyutunda aşındırıcı 30 derece partikül çarpma açısında a)1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar

7.5.3. Partikül boyutunun etkisi

Şekil 7.25’ de 3 ve 4 bar püskürtme basıncı ile 45° ve 90° partikül çarpma açılarında aşındırılan numunelerin aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde Ra değerlerinin partikül boyutuna bağlı olarak önemli derecede değişim gösterdiği görülmektedir. Her iki basınç ve açı değerinde de en yüksek Ra değerlerinin en büyük partiküller (20-40 mesh) ile aşındırılan numunelerde görüldüğü belirlenmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülükleri partikül boyutunun küçülmesine paralel olarak azalmış ve en düşük pürüzlülük değerleri 180

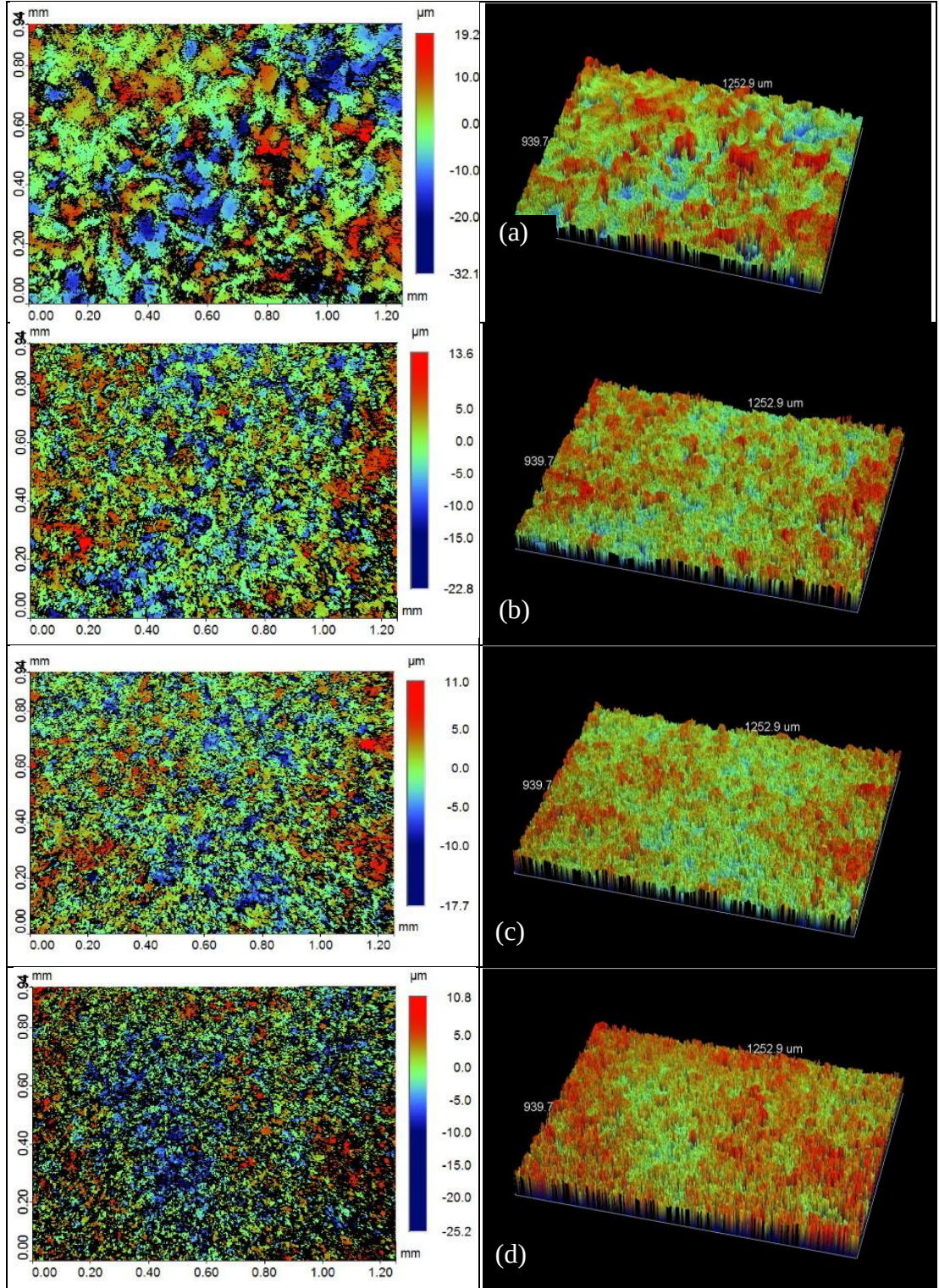
mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numunelerde görülmüştür. Diğer açı ve basınç değerleri için aynı korelasyonun sağlandığı belirlenmiştir.



Şekil 7.25. Ra değerinin partikül boyutuna bağlı değişimi partikül püskürtme basıncı a) 3 bar, b) 4 bar

Şekil 7.26' da 90 derece partikül çarpma açısında, 4 bar püskürtme basıncında farklı boyutlarda aşındırıcı partikül (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde partikül boyutunun yüzey pürüzlülüğüne etkisi incelenmiştir. Şekil incelendiğinde aşındırıcı partikül boyutunun artması ile yüzey pürüzlülüğünde de artış meydana geldiği, kaba taneciklerin daha pürüzlü bir yüzeyin oluşumuna yol açtıkları görülmektedir.

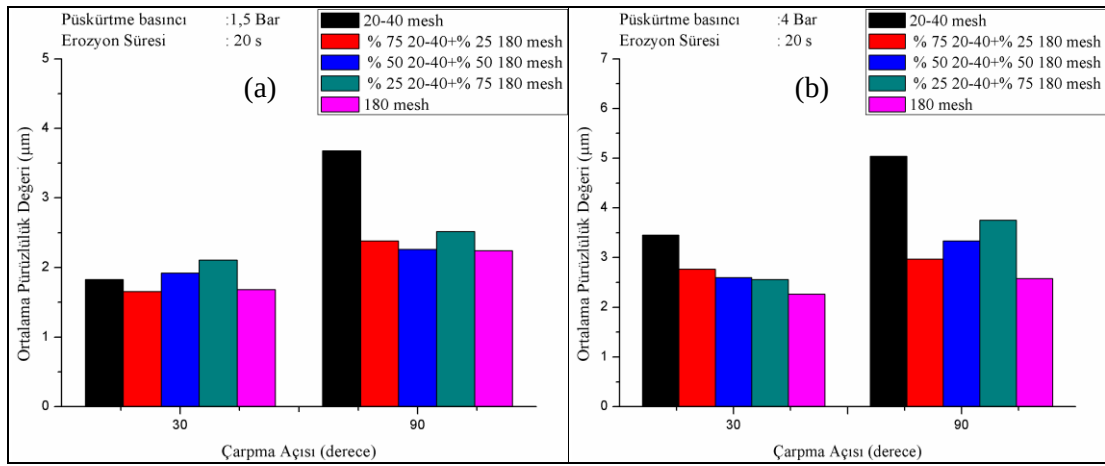
Şekil 7.26 incelendiğinde partikül boyutunun küçülmesi ile yüzeydeki deformasyonun azalması ve daha homojen bir hale gelmesi dikkat çekicidir. Büyük partiküller (Şekil 7.26-a) yüzeyde derin vadi ve yüksek tepelere neden olurken, küçük partiküller (Şekil 7.26-d) derinliği ve yüksekliği düşük plastik deformasyonlara yol açmaktadır. Optik profilometre ile elde edilen 2 ve 3 boyutlu yüzey görüntülerinde bu sonuçlar çok net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 7.26. 90 derece partikül çarpma açısı 4 bar partikül püskürtme basıncı a) 20-40 mesh b) 80 mesh c) 120 mesh d) 180 mesh

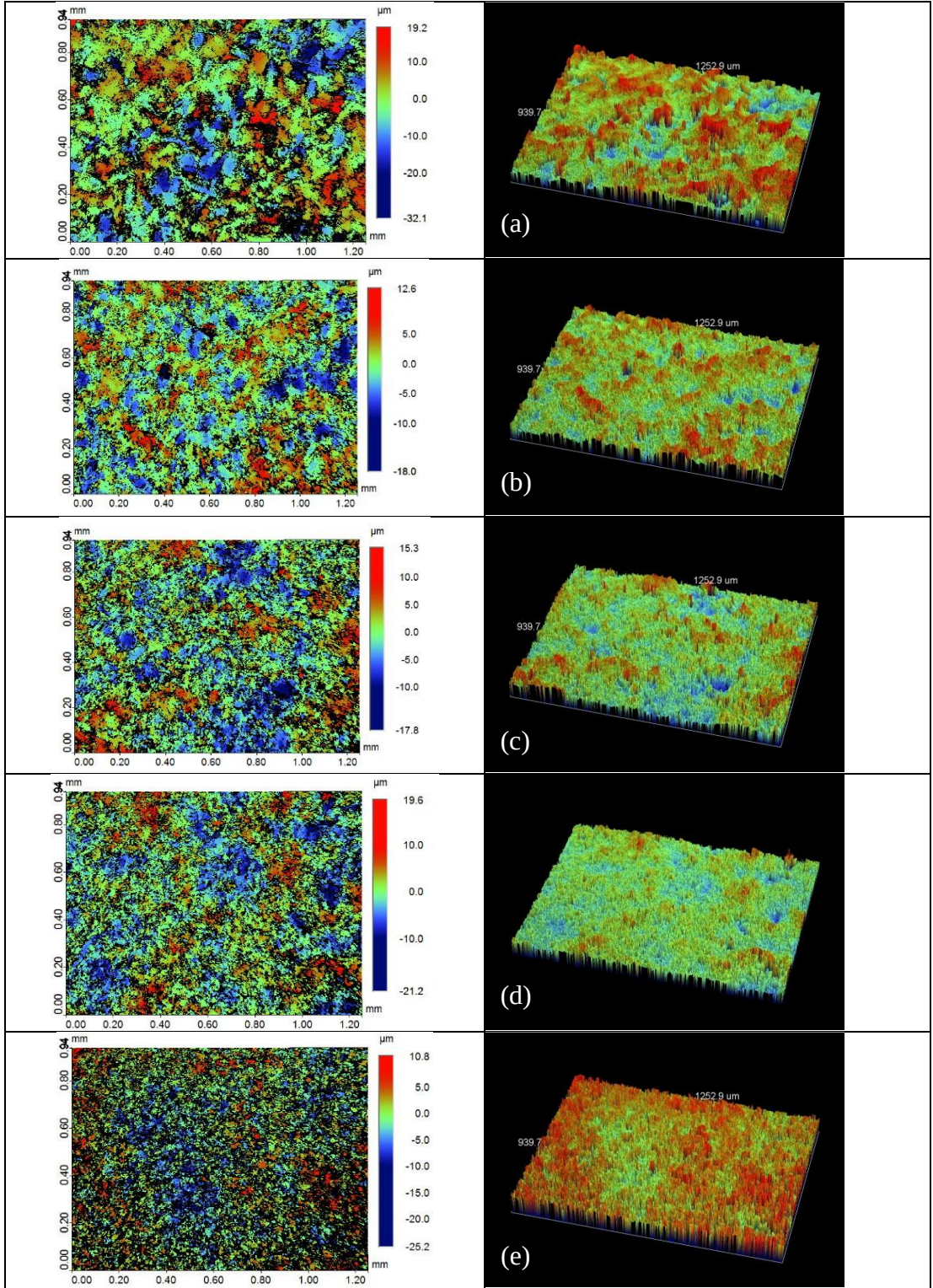
7.5.4. Partikül karışımlarının etkisi

Şekil 7.27’ de farklı oranlarda (%75 20-40 mesh+%25 180 mesh, %50 20-40 mesh+%50 180 mesh, %25 20-40mesh+%75 180 mesh) hazırlanan aşındırıcı karışımlar ile 20-40 mesh ve 180 mesh boyutundaki aşındırıcılar kullanılarak; 1,5 bar ve 4 bar püskürtme basıncı ile 30° ve 90° partikül çarpma açılarında aşındırılan numunelerin aşınma sonrası yüzey pürüzlülük değerleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde Ra değerlerinin partikül boyutuna bağlı olarak önemli derecede değişim göstermediği görülmektedir. Ancak Ra değerinin belirli bir korelasyon sağlamadığı belirlenmiştir.



Şekil 7.27. Ra değerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Partikül püskürtme basıncı a)1,5 bar, çarpma açısı b) 4 bar, çarpma açısı

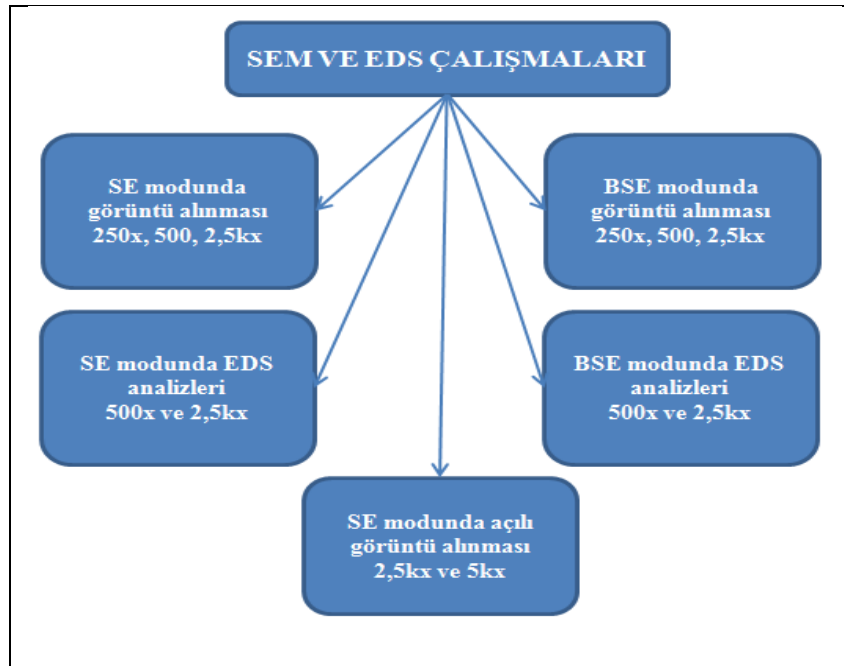
Şekil 7.28’ de aşındırıcı partikül karışımları ile aşındırılmış malzemelerin yüzey pürüzlülüğü 2 boyutlu ve 3 boyutlu görüntüler ile incelenmiştir. Aşındırıcı partikül karışımlarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi korele bir şekilde ortaya çıkmamıştır. Bunun muhtemel sebebi farklı boyutlardaki taneciklerin akış içinde birbirleriyle etkileşimleridir. Farklı boyutlardaki partiküller hedef malzemeye çarpmadan önce ve çarpma esnasında tanecikler arasında rastgele etkileşimler nedeniyle düzenli bir aşınma gerçekleştirememektedir. Bu rastgele dağılımların malzeme yüzeyine çarparken de aynı karakteristiği devam ettirmesi, hedef malzeme yüzeyinde karışıma bağlı bir hasar modeli oluşturmayı da çok zor kılmaktadır. Diğer taraftan büyük partiküllerin karışım içersindeki yüzdesinin fazla olması daha önce açıklanan büyük partikül davranışından ötürü yüzey pürüzlülüğünü artırıcı etki yapmıştır.



Şekil 7.28. Partikül çarpma açısı 90 derece, püskürtme basıncı 4 bar, a)20-40 mesh, b) %75 20-40 mesh+ %25 180 mesh, c) %50 20-40 mesh+ %50 180 mesh,d) %25 20-40 mesh+ %75 180 meshe), e) 180 mesh

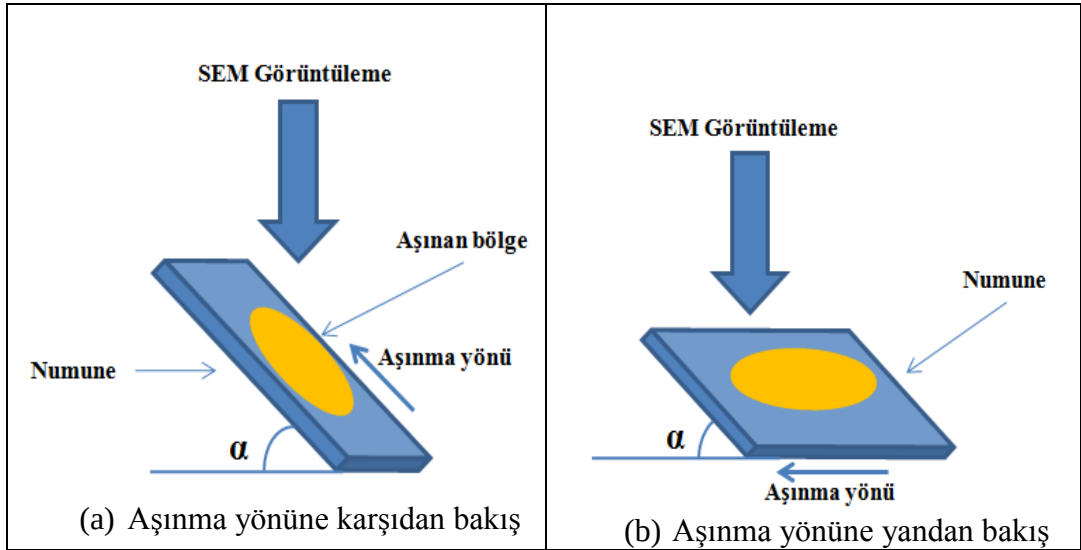
7.6. SEM ve EDS Çalışmaları

Malzemelerin erozif aşınma davranışlarının araştırılmasında taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları büyük önem arz etmektedir. Literatürde konu ile ilgili gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir çoğunluğunda malzemelerin erozyon oranları ile birlikte aşınmış yüzeylerin morfolojileri SEM ile birlikte incelenmiş ve malzemenin yüzey morfolojisinin incelenen parametrelere (hedef malzeme özellikleri, operasyon parametreleri, aşındırıcı partikül özellikleri, sıcaklık, nem vb çevresel özellikler vb.) bağlı olarak değişimi gözlenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda malzemede görülen erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle tez çalışmasında birçok farklı parametrenin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkilerinin daha net anlaşılabilmesi, aşınan malzemelerin yüzey morfolojilerinin değişimi ve malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla çok detaylı bir SEM çalışması gerçekleştirilmiştir. SEM çalışmalarında aşınmış yüzeylerin farklı detektörler ile farklı modlarda (SE ve BSE) görüntüleri alınmış, malzeme yüzeyine saplanan partiküller enerji dağılım spektrometresi analizi (EDS) ile derinlemesine incelenmiş ve son olarak aşınmış yüzeylerden farklı görüntüleme açılarında SEM fotoğrafları alınarak incelenmiştir. Şekil 7.29’da Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının incelenmesi amacıyla gerçekleştirilen SEM çalışmaları özetlenmiştir.



Şekil 7.29. Tez çalışmasında gerçekleştirilen SEM çalışmaları

Bu bölüm içerisinde tüm bu çalışmaların sonuçları bir arada değerlendirilerek Ti6Al4V alaşımın eroziv aşınma davranışı yorumlanmıştır. Bölüm içerisinde özellikle farklı görüntüleme açılarında alınan aşınmış yüzey fotoğrafları büyük bir özgünlük taşımaktadır. Bu görüntülerin farklı modlarda çekilen görüntüler ve EDS analizi sonuçları ile bir arada değerlendirilmeleri ile malzemelerin eroziv aşınma davranışlarının elektron mikroskopisi ile incelenmesine özgün bir bakış açısı kazandırılmıştır. Şekil 7.30’da farklı görüntüleme açılarında gerçekleştirilen SEM analizlerinin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 7.30’ da verilen “ α ” simgesi görüntülemenin gerçekleştirildiği açıyı ifade etmektedir. Tez çalışması kapsamında aşındırılmış numuneler SEM numune kabini içerisinde 60° ve 75° görüntüleme açılarında (α) Şekil 7.30-a ve 7.30-b’ de gösterildiği gibi döndürülmüş ve aşınma yönüne karşıdan ve yandan bakılarak fotoğraflar alınmıştır.



Şekil 7.30. Farklı çalışma açılarında gerçekleştirilen SEM analizlerinin şematik gösterimi

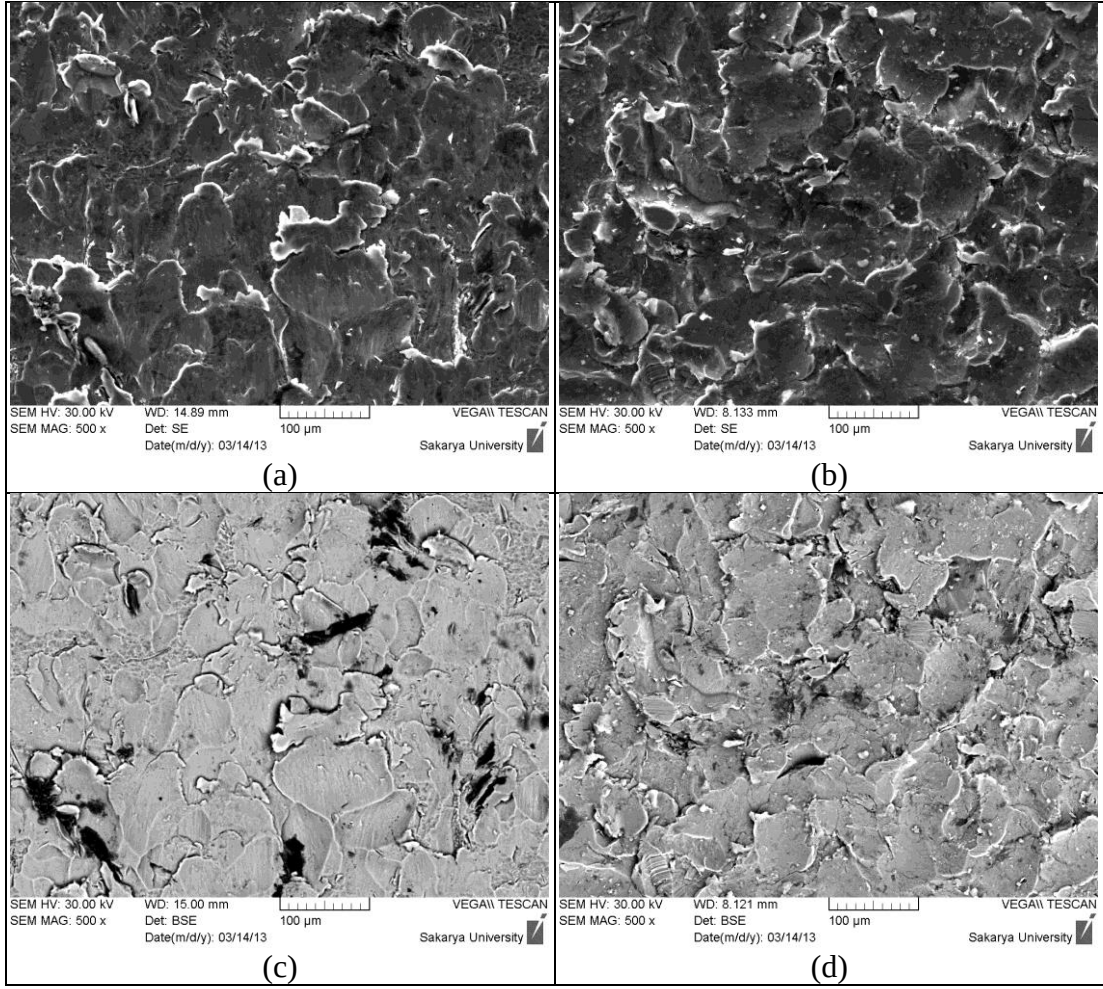
Bu bölüm içerisinde partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, aşındırıcı partikül boyutu ve partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının yüzey morfolojisine ve malzemede görülen eroziv aşınma mekanizmalarına olan etkileri ayrı başlıklar altında açıklanacaktır.

7.6.1. Partikül çarpma açısının yüzey morfolojisine etkisi

Partikül çarpma açısı malzemelerin eroziv aşınma davranışlarını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Partikül çarpma açısının Ti6Al4V alaşımının erozyon oranı

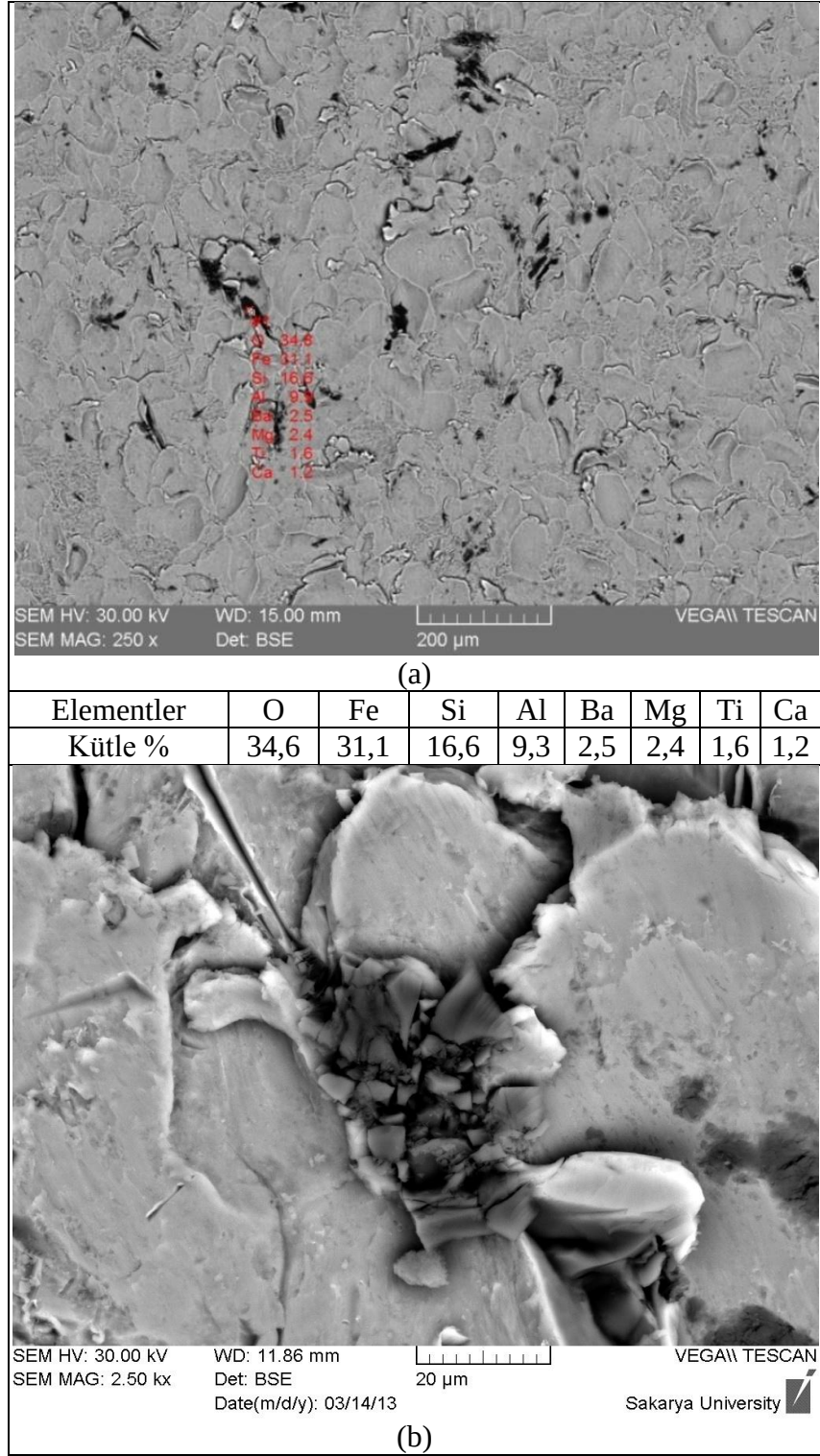
ve yüzey pürüzlülük değerlerine olan etkisi tez çalışması içerisinde önceki bölümlerde verilmiştir. Bu bölüm içerisinde partikül çarpma açısının Ti6Al4V alaşımının yüzey morfolojisine etkisi, bu morfolojinin oluşumuna neden olan erozif aşınma mekanizmaları ele alınarak açıklanacaktır. Diğer yandan malzemenin yüzey morfolojisi ile erozyon oranı ve yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki ortaya konacaktır. Bölüm içerisinde sırasıyla karşılaştırmalı olarak SE, BSE farklı büyütme ölçeklerinde çekilmiş görüntüler, EDS analizi sonuçları ve farklı görüntüleme açılarındaki farklı büyütme ölçeklerinde çekilmiş görüntüler verilecektir.

Şekil 7.31'de 1,5 bar püskürtme basıncında 20-40 mesh boyutunda partiküller ile 30° ve 90° partikül çarpma açılarındaki aşındırılan numunelerin SE ve BSE modunda yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde yüzey morfolojisindeki keskin değişimler dikkat çekmektedir. Şekil 7.31-a ve 7.31-c incelendiğinde 30° partikül çarpma açısında malzemede aşınma yönüne paralel aşınma izlerinin oluştuğu görülmektedir. Bu izlerin aşındırıcı partiküllerin çok yüksek boyutta olmaları nedeniyle yaklaşık olarak 100µm genişliğinde oldukları söylenebilir. Ancak iz derinliğinin püskürtme basıncının düşük olması nedeniyle çok yüksek olmadığı gözlenmektedir. Püskürtme basıncının ve aşındırıcı partikül boyutunun malzemenin yüzey morfolojisine etkilerinin incelenmesi aşamasında bu ilişkiler daha detaylı bir şekilde yorumlanacaktır. Şekil 7.31-b ve 7.31-d incelendiğinde 90° partikül çarpma açısında malzeme yüzeyinde 30° çarpma açısında gözlenen aşınma izlerine benzer yönelmiş aşınma yollarının oluşmadığı görülmektedir. Bu açı değerinde malzemede aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine dik bir açıyla çarpması sonucunda oluşan vadi ve tepelikler dikkat çekmektedir. Şekil 7.31-c ve 7.31-d' de malzeme yüzeyinde siyaha yakın renkte bir faz görülmektedir. Bu fazın ne olduğunun anlaşılabilmesi amacıyla EDS analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 7.31.a) 30°, b) 90°,c) 30°, d) 90° çarpma açısı ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)

Şekil 7.32' de 1,5 bar püskürtme basıncında ve 30° partikül çarpma açısında 20-40 mesh boyutunda partiküller ile aşındırılmış numune yüzeyinde siyah renkte görülen fazlar üzerinde gerçekleştirilen EDS çalışmasının sonucu verilmiştir. Şekil 7.32-a' da düşük büyütmede EDS analizinin gerçekleştirildiği nokta ve Şekil 7.32-a' nın hemen altında EDS analizinin sonuçları verilmiştir. Şekil 7.32-b' de ise EDS analizi yapılan noktanın görüntüsü çok yüksek büyütmede (2,5 kx) verilmiştir. Şekil 7.32-a ve EDS analiz sonuçları incelendiğinde analizi gerçekleştirilen siyah faz içerisinde yüksek oranlarda Fe, O ve Si elementlerinin bulunduğu belirlenmiştir. Bu elementler deneysel çalışmalarda aşındırıcı olarak kullanılan garnet mineralinin içeriğinde bulunan elementlerdir. Dolayısıyla EDS çalışmaları sonucunda BSE modunda Ti6Al4V matrisi (beyaza yakın renkli faz) içerisinde görülen siyaha yakın renkli fazın garnet minerali olduğu söylenebilir.



Şekil 7.32. a) EDS Analizi x500 büyütme, b) x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)

Şekil 7.32-a incelendiğinde numune yüzeyinde çok sayıda garnet minerali bulunduğu görülmektedir. Deneysel çalışmalar öncesinde sünek Ti6Al4V matrisi üzerine erozif

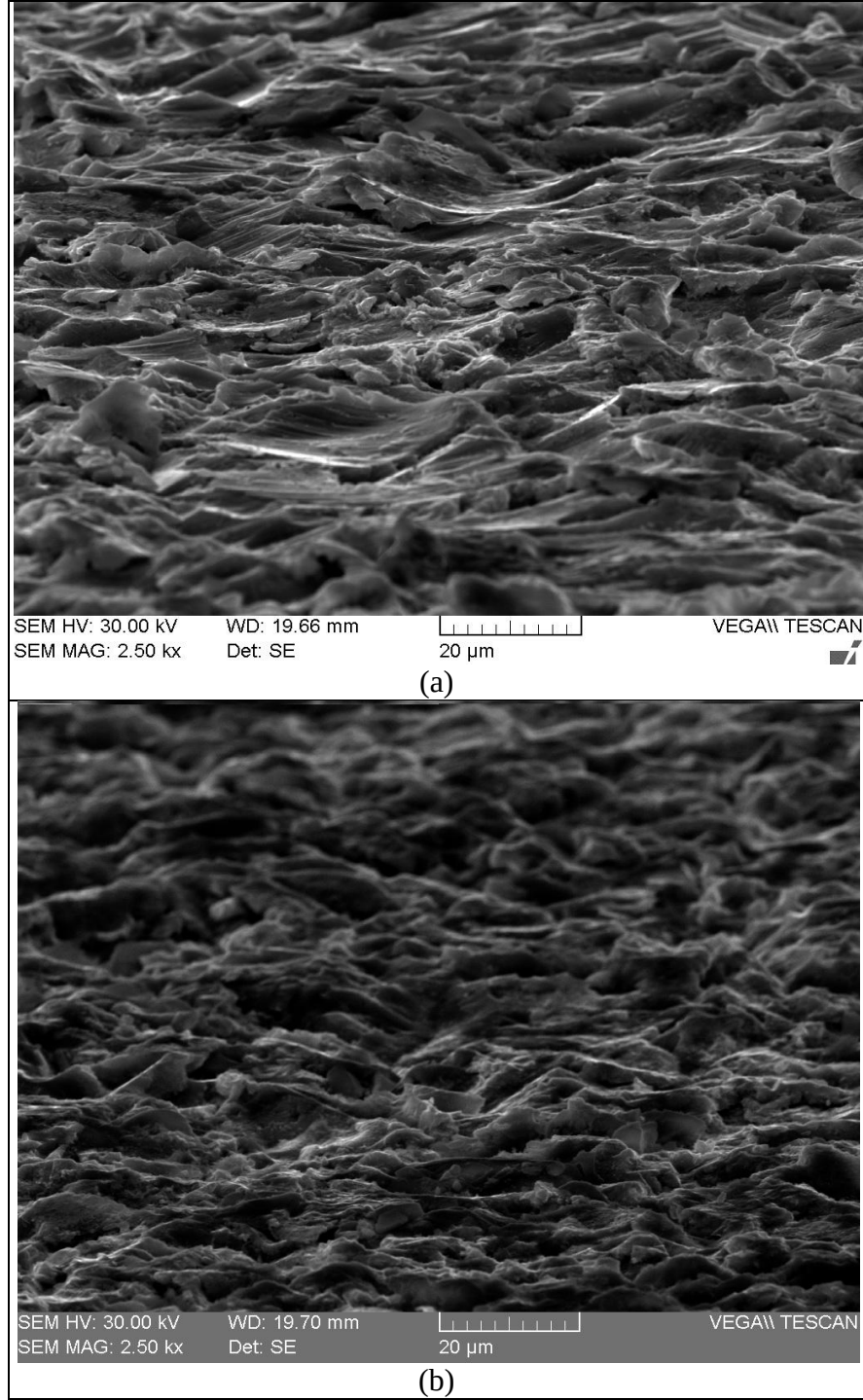
aşınma esnasında özellikle normale yakın çarpma açılarında garnet mineralinin saplanabileceği öngörülmüştür. SEM çalışmalarında bu durum göz önünde bulundurularak EDS çalışmalarına büyük önem verilmiştir.

Şekil 7.32-b' de malzeme yüzeyine saplanan garnet mineralinin görüntüsü yüksek büyütmede verilmiştir. Şekil incelendiğinde aşındırıcı partikülün malzeme yüzeyini deforme ederek yüzeye saplandığı çok net bir şekilde görülmektedir. Erozif aşınma ile ilgili gerçekleştirilen araştırmalar incelendiğinde özellikle Ti6Al4V alaşımı ve diğer metal malzemeler için erozif aşınma esnasında malzeme yüzeyine saplanmış partiküller ile ilgili çok fazla bilgi bulunmamaktadır. Bu noktada tez çalışmasında aşındırıcı partiküllerin belirlenmesi ve bu kadar yüksek netlikte fotoğraflanması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 7.32-b' de malzeme yüzeyine saplanan aşındırıcının irili ufaklı çok sayıda parçaya ayrıldığı görülmektedir. Bu durumun aşındırıcının malzeme yüzeyine saplandıktan sonra arkasından gelen diğer aşındırıcıların saplanan aşındırıcıya çarparak tahribata yol açmaları nedeniyle gerçekleştiği düşünülebilir. Şekil 7.32-b' de aşındırıcı partikülün yüksek sertliği ve gevrek kırılma karakteristiği nedeniyle aşındırıcı partiküllerin darbeleri ile çok sayıda ufak parçalara ayrıldığı görülmektedir.

Şekil 7.33' de 1,5 bar basınçta 180 meshlik partiküller ile 30° ve 90° partikül çarpma açılarında aşındırılan numunelerin $\alpha = 75^\circ$ görüntüleme açısında aşınma yönüne yandan bakılarak çekilmiş fotoğrafları verilmiştir. Görüntüleme açısının fotoğraflara bir derinlik etkisi kazandırdığı ve görüntülerin 3 boyutlu izlenimi verdiği dikkat çekmektedir. Şekil 7.33 incelendiğinde erozif aşınma sonucunda malzeme yüzeyinde meydana gelen hasar çok net bir şekilde görülmektedir. Şekil 7.33-a' da 30° partikül çarpma açısında aşınma yönüne paralel olarak oluşmuş aşınma izleri görülmektedir. Görüntüleme açısı ile birlikte klasik SEM çekimlerine kıyasla erozif aşınma nedeniyle oluşan hasarın çok daha net bir şekilde gözlemlendiği sonucuna varılabilir. Aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine çarptıktan sonra düşük çarpma açısı nedeniyle malzemeyi sürerek ve keserek aşındırdıkları ve daha sonra malzeme yüzeyini terk ettikleri görülmektedir. Şekil 7.33-a' da bu süreç esnasında yüzeyde eş yönlü oluşan konveks geometrik izler dikkat çekmektedir. Şekil 7.33-a incelendiğinde bu görüntüleme açısı normal görüntülemeye kıyasla (90° görüntüleme

açısı) aşındırıcı partiküllerin oluşturduğu hasarın geometrisinin çok daha net bir şekilde görüntülediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.33.a) 30°, b) 90 çarpma açısı ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° dik bakış SEM fotoğrafı (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)

Şekil 7.33-b 90° partikül çarpma açısında aşındırılan numunenin 75° görüntüleme açısında alınmış SEM fotoğrafı verilmiştir. Şekil 7.33-b incelendiğinde 90° çarpma açısında 30° partikül çarpma açısına göre daha farklı bir yüzey morfolojisinin olduğu görülmektedir. Bu partikül çarpma açısında malzeme yüzeyinde 30° partikül çarpma açısına kıyasla daha derin, ancak daha kısa konik geometrili izlerin olduğu söylenebilir. Bu açı değerinde aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyine çarpmakta ve plastik deformasyona yol açarak yüzeyde vadiler ve tepecikler meydana getirmektedir. Bu görüntüleme metodu ile yüzeyde oluşan vadi ve tepecikler çok net bir şekilde gözlenebilmektedir.

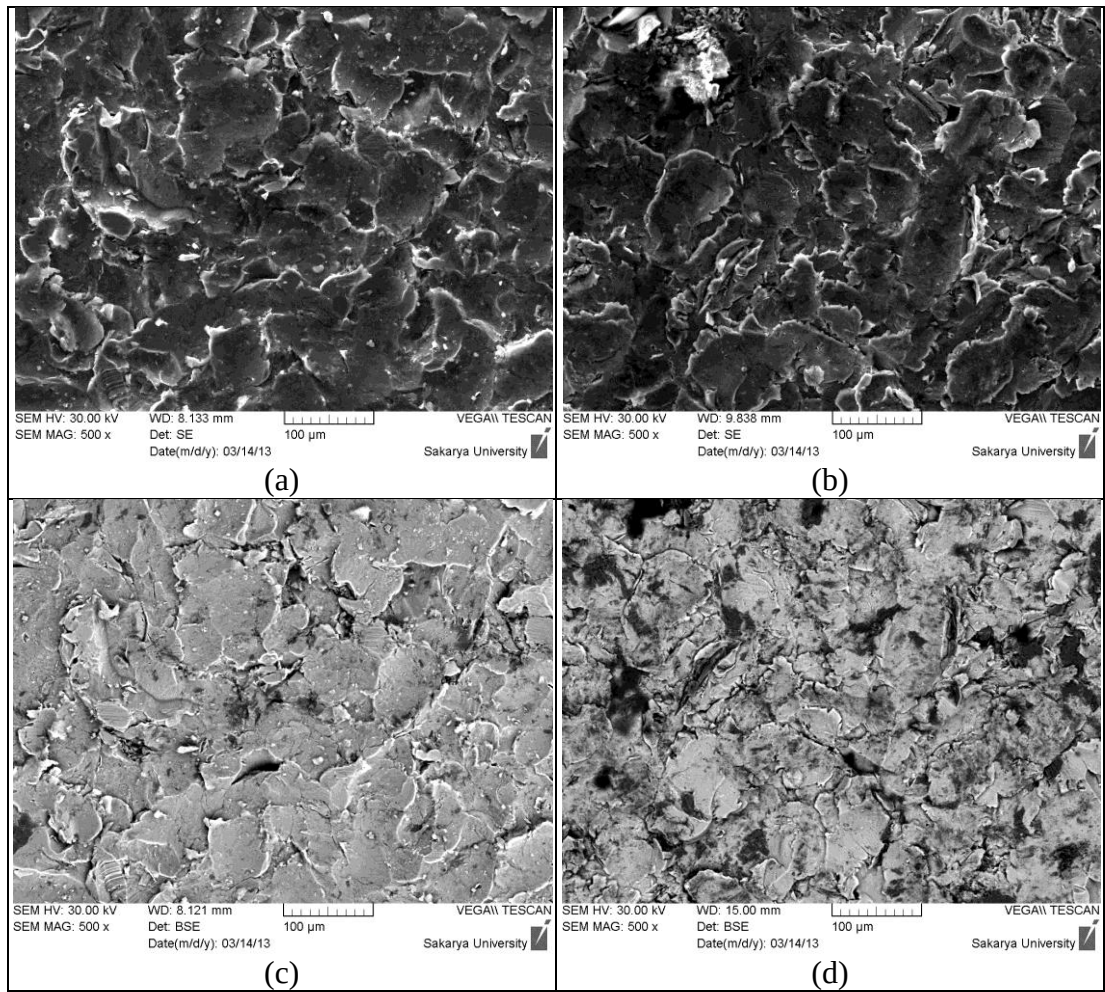
Daha önceki bölümlerde verilen erozyon oranı ve yüzey pürüzlülük değeri çalışmalarında 90° partikül çarpma açısında Ti6Al4V alaşımının erozyon oranının 30° partikül çarpma açısına göre azaldığı, ortalama pürüzlülük değerinin ise artış gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 7.33 incelendiğinde bu sonuçların nedenleri açık bir şekilde anlaşılmaktadır. Düşük çarpma açısında aşındırıcı partiküller sünek Ti6Al4V matristen Şekil 7.33-a’ da görülen mikrokesme ve mikrosürme mekanizmaları ile malzeme koparmakta ve malzemede önemli bir kütle kaybına sebep olmaktadır. Buna karşın 90° partikül çarpma açısında malzeme yüzeyine dik açıda çarpan partiküller sünek matristen efektif bir şekilde malzeme koparamamakta buna karşın Şekil 7.33-b’ de görülen derin vadi ve yüksek tepecikleri oluşturmaktadır. Bu durum sonucunda 90° partikül çarpma açısında Ti6Al4V alaşımında düşük erozyon oranına rağmen yüksek ortalama pürüzlülük değerleri ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçların nedenleri Şekil 7.33’ de açılı görüntüleme ile alınan SEM fotoğraflarında çok net ve özgün bir şekilde görülmektedir.

7.6.2. Partikül püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkisi

Partikül püskürtme basıncı aşındırıcı partiküllerin partikül çarpma hızlarını ve buna bağlı olarak sahip oldukları toplam kinetik enerjiyi etkilemektedir. Tez çalışmasında daha önceki bölümlerde püskürtme basıncının artışı ile tüm partikül boyutlarında aşındırıcı partiküllerin hızlarının artış gösterdiği belirlenmiştir. Yine daha önceki bölümlerde püskürtme basıncının artışına paralel olarak tüm açı ve boyutlarda erozyon oranının ve yüzey pürüzlülük değerlerinin artış gösterdiği detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Bu bölüm içerisinde püskürtme basıncının aşınmış yüzeylerin

morfolojilerine ve malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarına olan etkileri irdelenecektir.

Şekil 7.34'te 90° partikül çarpma açısında 20-40 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerin SE ve BSE modda çekilen görüntüleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde püskürtme basıncı artışı ile birlikte malzeme yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyonların artış gösterdiği görülmektedir. Yüksek basınç ile hızlandırılan aşındırıcı partiküller sahip oldukları yüksek kinetik enerji nedeniyle malzeme yüzeyinde daha derin ve geniş aşınma izleri oluşturmuşlardır.

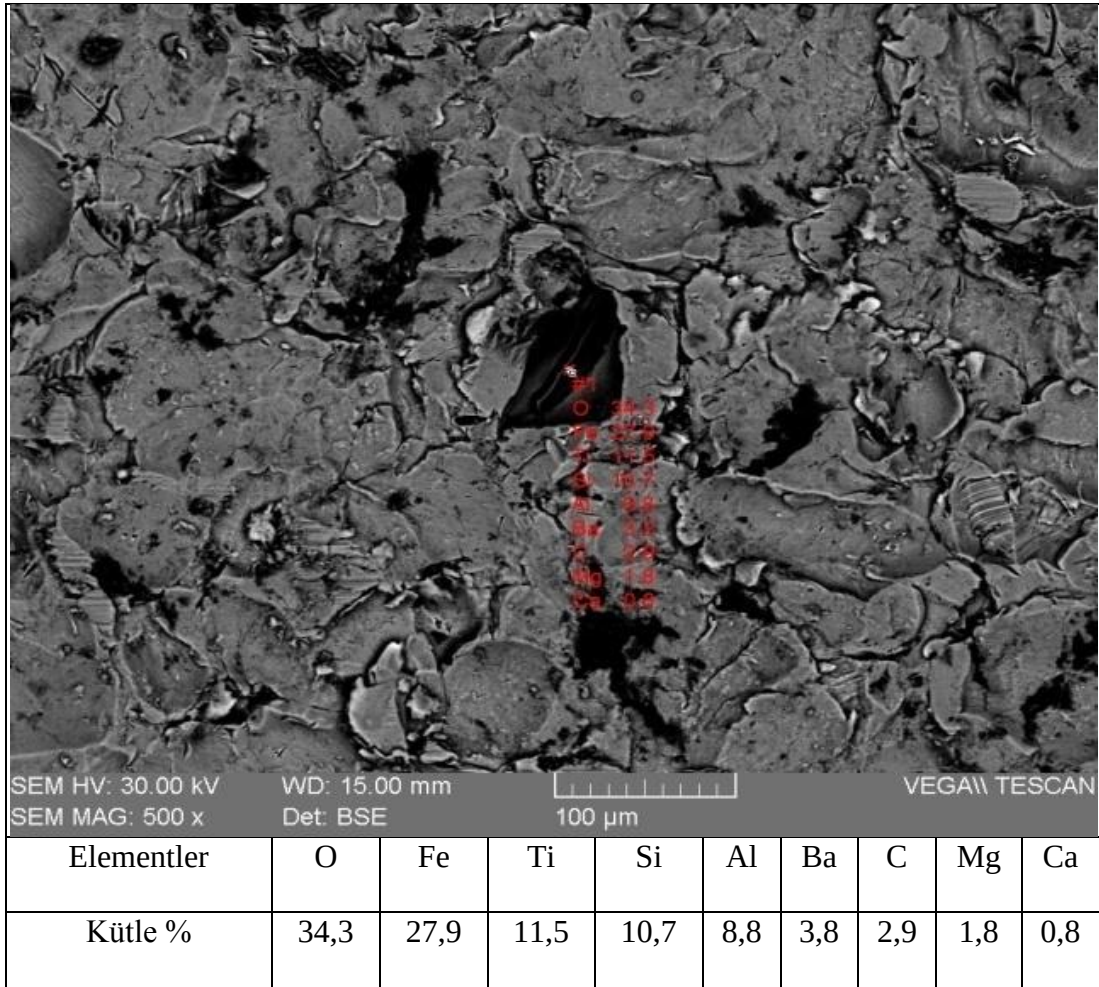


Şekil 7.34. a) 1,5 bar, b) 4 bar, c) 1,5 bar, d) 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)

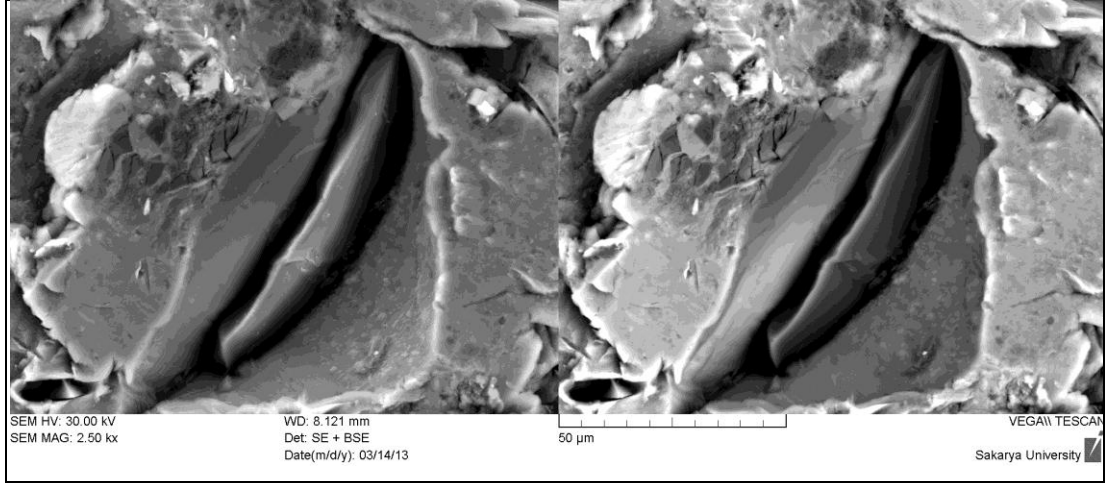
Diğer yandan bir önceki bölüm içerisinde BSE modda çekilen SEM fotoğraflarında siyah renkte görünen fazın yüzeye saplanan garnet minerali olduğu belirlenmiştir.

Bu bölüm içerisinde de aynı faz üzerinde EDS çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu fazın garnet minerali olduğu teyit edilmiştir. Şekil 7.35'te bu amaçla gerçekleştirilen EDS analizi, Şekil 7.36' da ise malzeme yüzeyine saplanan aşındırıcı partikülün BSE ve SE modda çekilen görüntüleri verilmiştir.

Şekil 7.34 incelendiğinde püskürtme basıncının artışı ile birlikte malzeme yüzeyine saplanan aşındırıcı partikül miktarının artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum basınç artışı ile birlikte hızları ve kinetik enerjileri artan partiküllerin malzeme yüzeyine daha rahat penetre edebildikleri ve saplanabildiklerini göstermektedir.



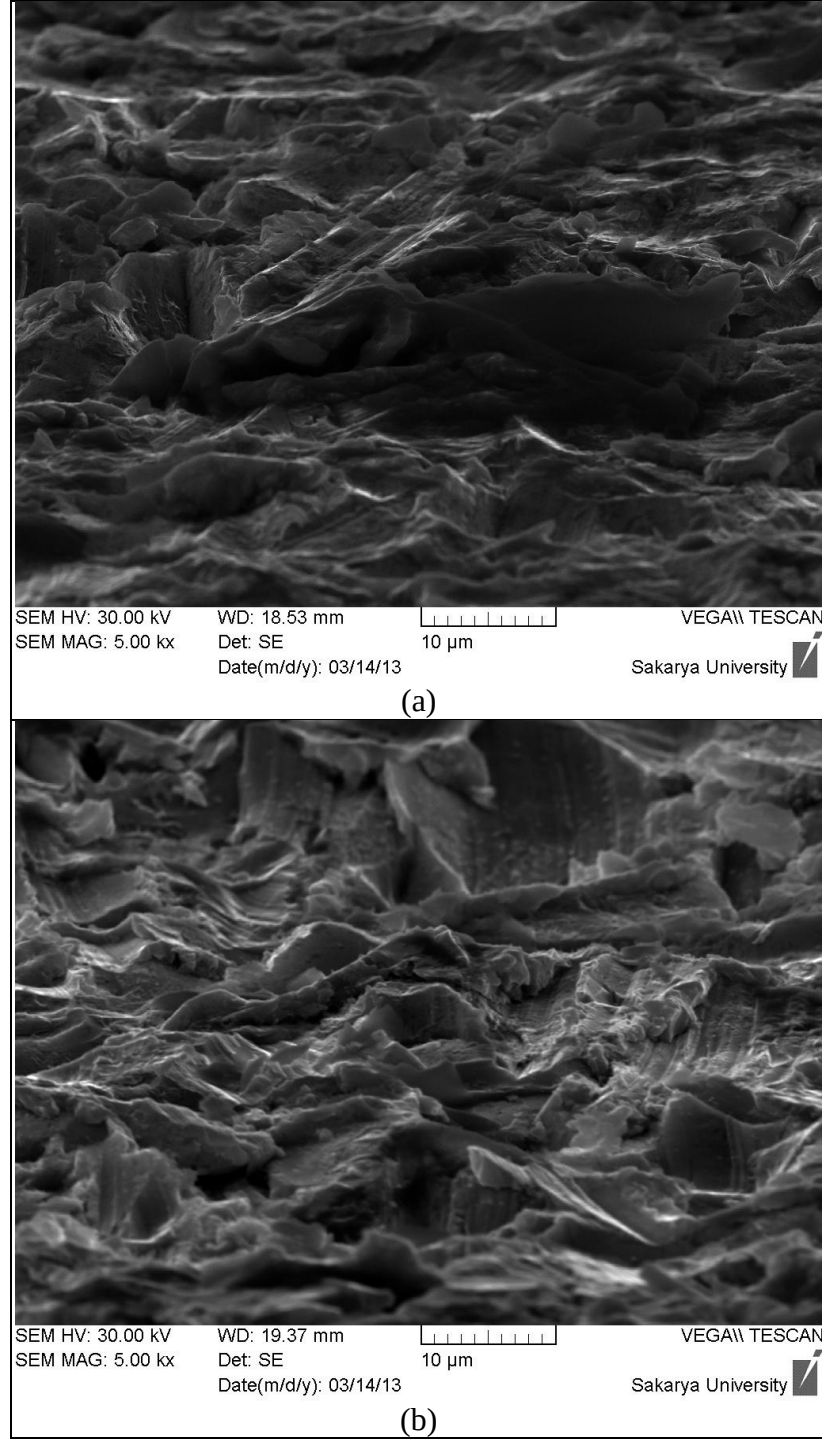
Şekil 7.35. EDS Analizi x500 büyütme



Şekil 7.36. 2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)

Şekil 7.37' de 30° derece partikül çarpma açısında 180 mesh boyutunda partiküller 1,5 ve 4 bar ile aşındırılmış numunelerin 75° görüntüleme açısında alınmış görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde basınç artışı ile erozyon hasarının arttığı görülmektedir. Şekil 7.37-a' da sık ve dar aşınma izleri görülürken, Şekil 7.37-b' de ise basınç artışı ile birlikte derin ve geniş aşınma izlerinin oluştuğu gözlenmektedir. Artan basınç değeri ile birlikte 30° partikül çarpma açısında aşındırıcı partikülün malzeme yüzeyine bir miktar penetre ettikten sonra yüzeyi plastik şekil verme ile sıvayarak terk ettiği dikkat çekmektedir. Bu durum Ti6Al4V alaşımının sünek kırılma davranışı ve yüksek tokluğu nedeniyle yüksek oranda plastik deformasyona uğradığını göstermektedir. Aşındırıcı partiküllerin titanyum alaşımının bu karakteri nedeniyle düşük açılarda dahi malzeme yüzeyinden malzeme koparmakta zorlandığını göstermektedir. Ti6Al4V alaşımının erozif aşınması sırasında mikrosürme erozif aşınma mekanizması ile sürülen ve sıvanan aşınma bölgesinde pekleşme nedeniyle sert, kırılgan ve ince kesitli bir geometriye sahip tepeliklerin oluştuğu söylenebilir. Şekil 7.37-b' de malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküllerin oluşturduğu bu oluşumlar dikkat çekmektedir. Erozif aşınma sürecinde yüzeye daha önce çarpan partiküllerin oluşturduğu bu morfolojinin bu partikülleri takip eden ve yüzeye daha sonra çarpan partiküller ile mikrokesme mekanizması ile rahat bir şekilde kesilerek yüzeyden malzeme koparıldığı söylenebilir. Erozif aşınmanın Ti6Al4V alaşımında bu sürecin sürekli olarak tekrarlanması ile düşük çarpma açılarında yüksek miktarda malzeme kaybına yol açtığı sonucuna varılabilir. Tez çalışması kapsamında farklı görüntüleme açıları ile çalışılması, Ti6Al4V

alaşımında görülen erozif aşınma sürecinin ve mekanizmalarının daha net anlaşılabilmesini sağlamıştır.

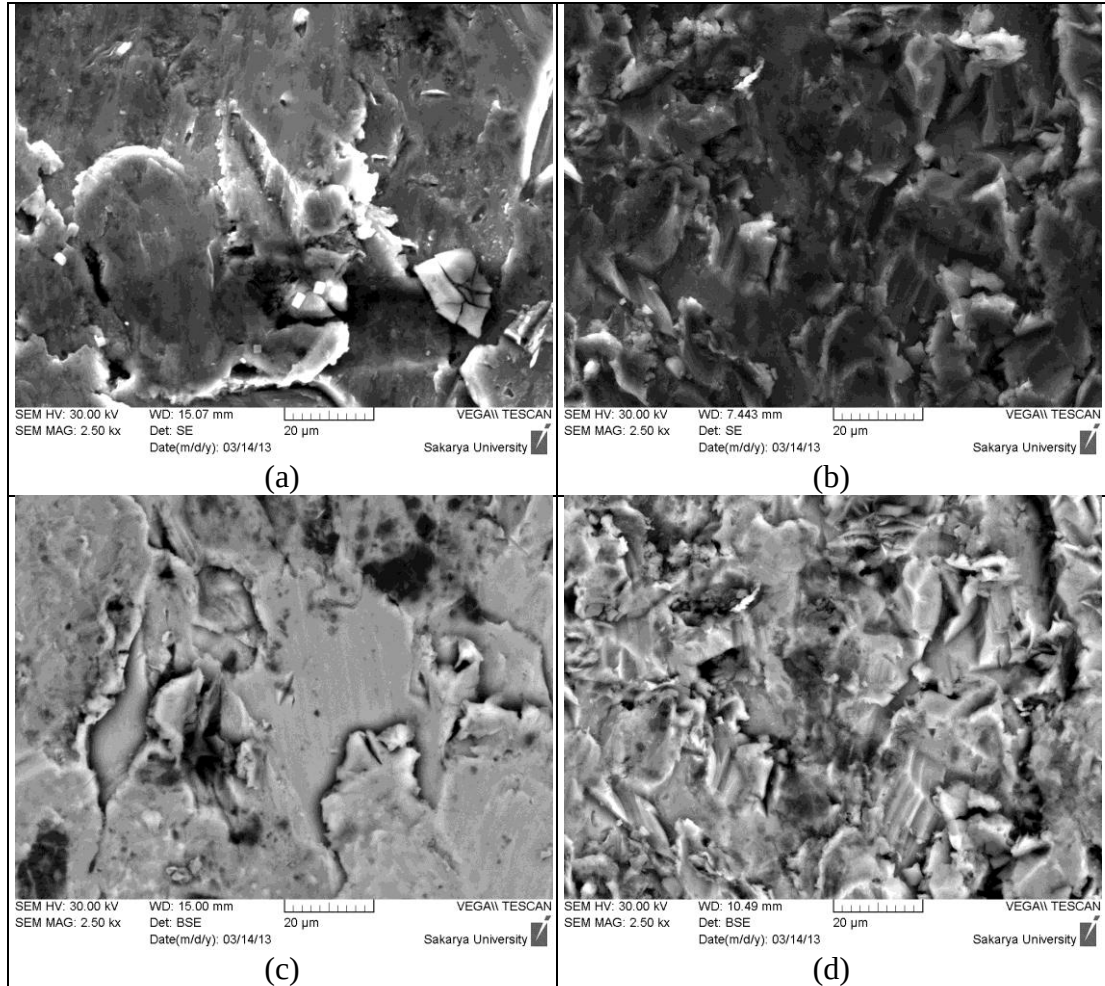


Şekil 7.37. a) 1,5 bar, b) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış numunelerin x5000 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı:30 derece, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)

7.6.3. Aşındırıcı partikül boyutunun yüzey morfolojisine etkisi

Aşındırıcı partikül boyutu Ti6Al4V alaşımının erozyon oranını ve yüzey pürüzlülük değerini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Bu bölüm içerisinde farklı boyutlarda partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey morfolojileri değerlendirilerek aşındırıcı partikül boyutunun Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyon davranışı üzerindeki etkinliği tartışılacaktır.

Şekil 7.38’ de aynı partikül çarpma açısı ve püskürtme basıncında deneysel çalışmalarda kullanılan en büyük (20-40 mesh) ve en küçük (180 mesh) partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey morfolojileri verilmiştir.

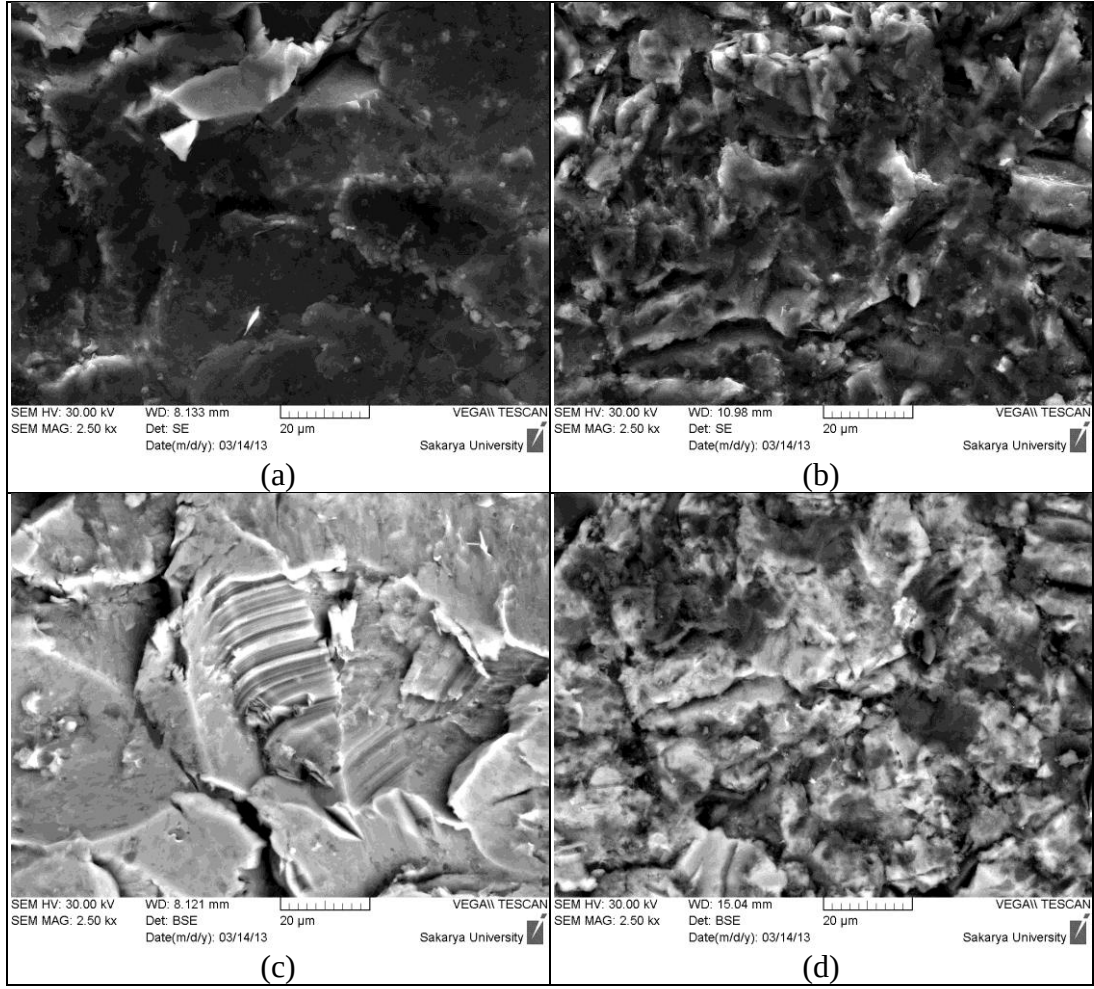


Şekil 7.38. a) 20-40 mesh, b) 180 mesh, c) 20-40 mesh, d) 180 mesh aşındırıcı boyutu ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar)

Şekil 7.38-a ve c incelendiğinde büyük partiküllerin malzemede geniş ancak derinliği düşük erozyon hasarlarına yol açtığı görülmektedir. Diğer yandan küçük partiküllerin ise dar ancak derin aşınma izlerine neden oldukları şekil 7.38-b ve 7.38-d’ de net bir şekilde gözlenebilmektedir. Her iki partikülde malzemeyi mikrosürme ve mikrokesme erozif aşınma mekanizmaları ile aşındırmışlardır. Bu noktada aşındırıcı partikül boyutunun malzemede görülen baskın erozyon mekanizması üzerinde önemli bir rol oynamadığı söylenebilir.

Şekil 7.39’ da 90° partikül çarpma açısında 1,5 bar basınçta büyük ve küçük boyutlu partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzey morfolojileri velmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde partikül boyutunun küçülmesi durumunda yüzeyde daha ağır bir tahribat meydana geldiği görülmüştür. Şekil 7.39-c’ de BSE modda malzeme yüzeyinde aşındırıcı partikülün meydana getirdiği vadi ve bu vadi içerisinde aşındırıcı partikülün keskin köşeleri ile oluşmuş aşınma izi çarpıcı bir şekilde görülmektedir.

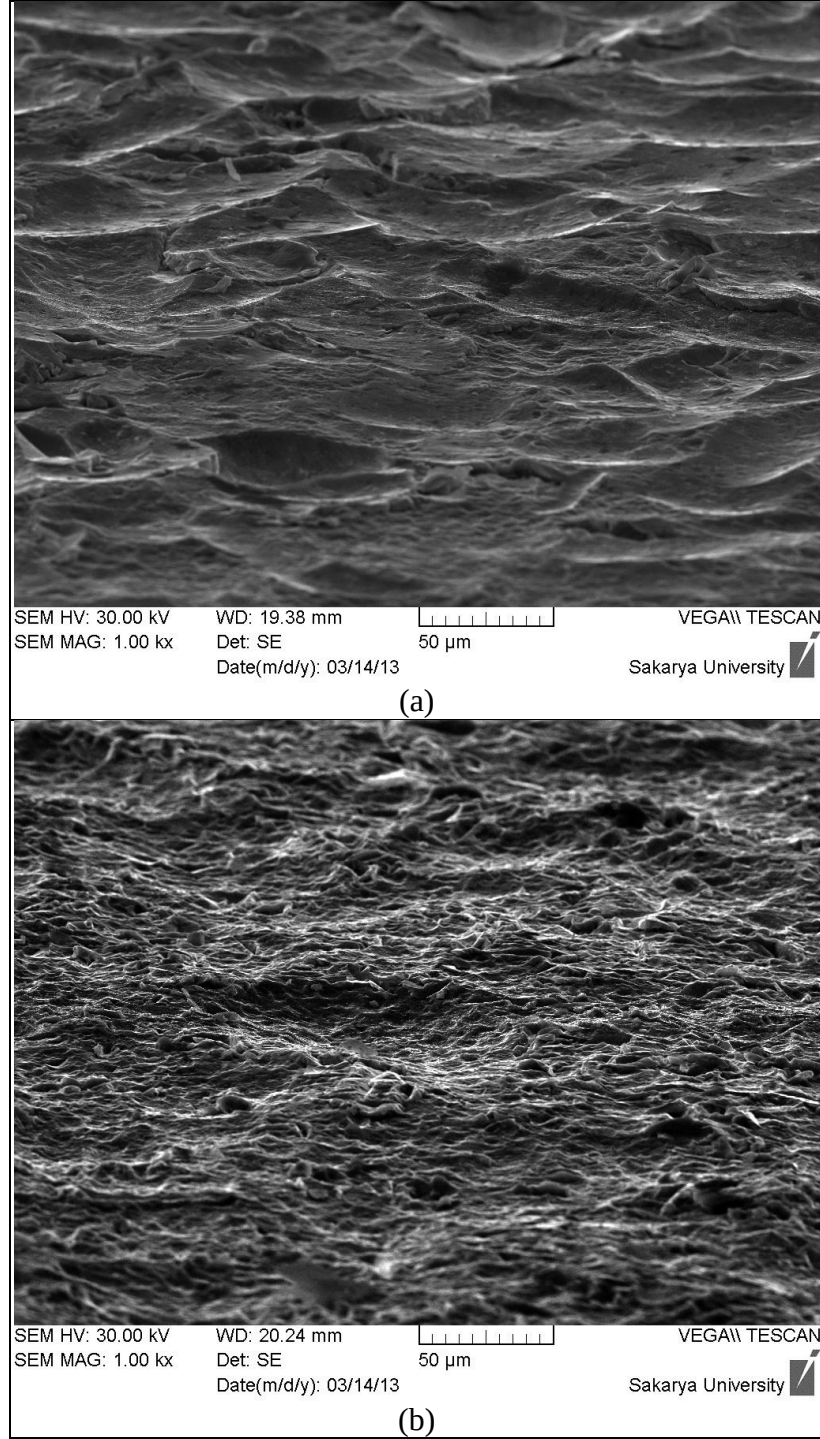
Şekil 7.38 ve 7.39 incelendiğinde aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile malzemede görülen erozyon hasarının arttığı sonucuna varılabilir. Bu durum malzemenin erozyon oranı ile yüzey morfolojisi arasındaki korelasyonu da gözler önüne sermektedir. Diğer yandan partikül boyutunun artışı ile özellikle 90° partikül çarpma açısında daha derin vadilerin ve tepeliklerin oluştuğu, ancak bu durumun malzemenin efektif aşınmasına yol açmaması şaşırtıcı bir gerçektir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri esnasında büyük partiküller ile birlikte malzemenin ortalama pürüzlülük değerinin artış göstermesi bu sonucu desteklemektedir. Büyük partiküller malzeme yüzeyini heterojen bir karakterde aşındırmakta ve malzeme yüzeyinde derin çukur ve tepelikler oluşturarak malzemenin yüzey pürüzlülük değerini arttırmaktadır. Diğer yandan küçük partikülleri ise yüzeyde daha homojen bir aşınma meydana getirmekte, yüzey yoğun miktarda hasara uğramakta ve bu durum yüksek bir erozyon oranına karşın düşük bir pürüzlülük değerine yol açmaktadır. Bu durumda küçük partiküllerin malzeme yüzeyinden büyük partiküllere kıyasla çok daha efektif bir şekilde malzeme kaldıracabildikleri söylenebilir. Büyük partiküller ise yüzeyden malzeme kaldırmaktan ziyade yüzeyi plastik olarak şekillendirmekte ve pürüzlendirmektedir.



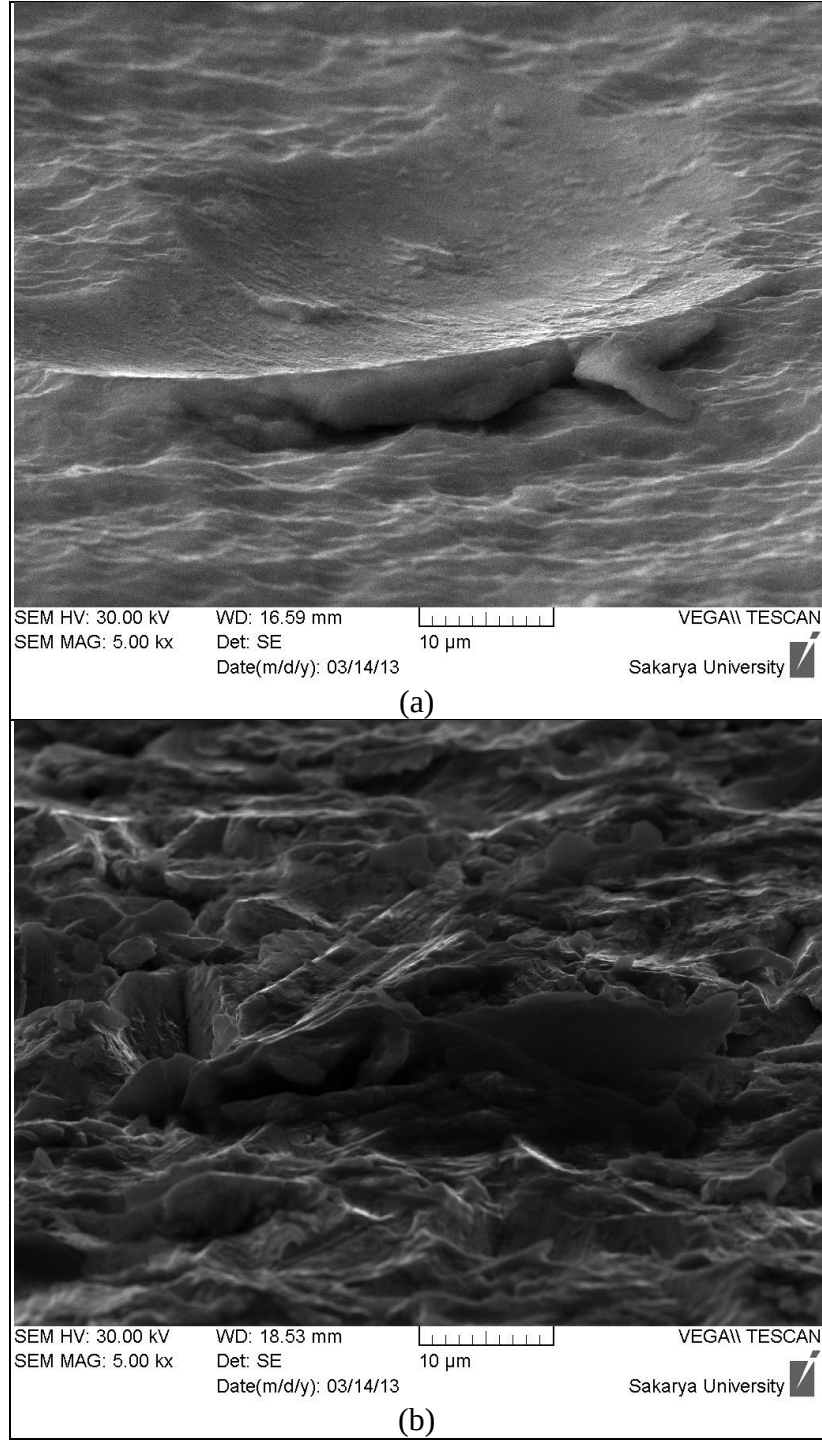
Şekil 7.39. a) 20-40 mesh, b) 180 mesh, c) 20-40 mesh, d) 180 mesh aşındırıcı boyutu ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)

Şekil 7.40' da 30° partikül çarpma açısında 4 bar püskürtme basınçta 20-40 mesh ve 180 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerin yüzeylerinin 75° görüntüleme açısında çekilmiş SEM fotoğrafları verilmiştir. Fotoğraflar incelendiğinde küçük partiküllerin oluşturduğu küçük aşınma çukurcukları ile tepecikleri ve büyük partiküllerin oluşturduğu kaba çukurcuklar ile tepecikler çok yüksek bir netlikte görülmektedir. Açılı görüntüleme modunun erozif aşınma sonrası malzemelerin yüzey morfolojilerinin incelenmesi aşamasında ne kadar etkin bir yöntem olduğu Şekil 7.40 ile tekrar doğrulanmaktadır. İki fotoğraf arasındaki farklılık küçük ve büyük partiküllerin meydana getirdiği hasarı gözler önüne sermektedir. Büyük partiküller yüzeyde dalgalı ve pürüzlülüğü yüksek bir morfolojiye neden olmaktadır. Bu durum büyük partiküller ile aşındırılan numunelerde ortaya çıkan yüksek pürüzlülük değerlerine açıklık getirmektedir. Küçük partiküller ise malzemede

peteksi bir hasara yol açmakta (şekil 7.40-b) ve büyük partiküllere kıyasla (Şekil 7.40-a) yüzeyde küçük ancak çok sayıda dalgalıklar oluşturmaktadır.



Şekil 7.40.a) 20-40 mesh, b) 180 mesh boyutundaki aşındırıcılar ile aşındırılmış numunelerin x1000 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar)



Şekil 7.41. a) 20-40 mesh, b) 180 mesh boyutundaki aşındırıcılar ile aşındırılmış numunelerin x5000 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)

Şekil 7.41' de Şekil 7.40' ta verilen yüzey morfolojisinin daha net incelenmesi için aynı yüzeylerin çok yüksek büyütmelerde fotoğrafları verilmiştir. Şekil 7.41-a'da tek bir aşındırıcı partikülün (20-40 mesh boyutunda) malzeme yüzeyinde oluşturduğu

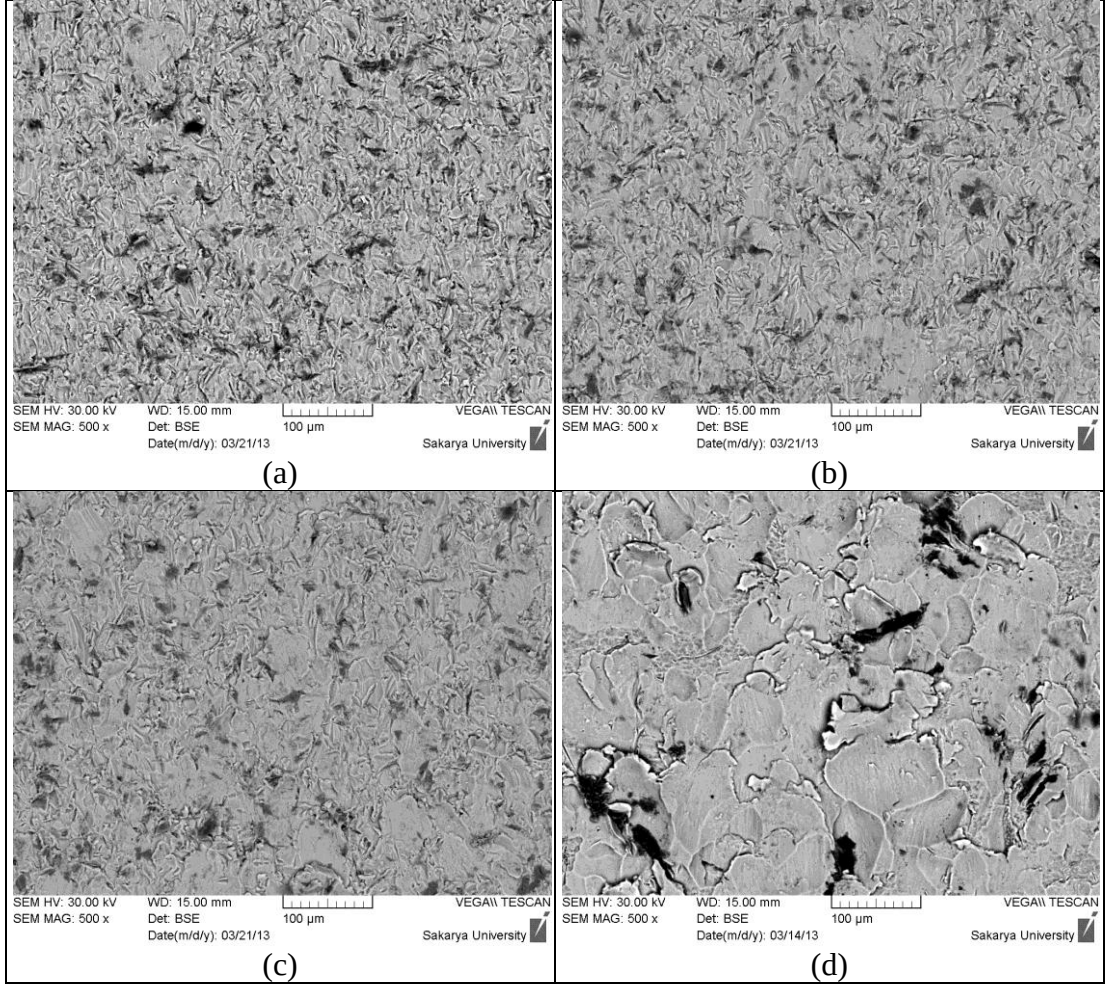
hasar verilmiştir. Şekil 7.41-a' da boyutu büyük kaba partikülün malzeme yüzeyine çarpması ile darbenin etkisiyle malzemede görülen plastik deformasyon görülmektedir. Malzeme yüzeyde derin bir çukur oluşturmuş ve çukur içerisindeki malzeme aşınma yönü doğrultusunda yığılmıştır. Bu durum Ti6Al4V alaşımının daha önce de bahsedilen sünek kırılma davranışı ve yüksek tokluğundan kaynaklanmaktadır. Yığılan malzeme ile hasar görmemiş yüzey arasında oluşan delaminasyon dikkat çekicidir. Bu noktada literatürde çok fazla yer almayan bir durum ortaya çıkmaktadır. Farklı görüntüleme açılarında aşınma yönüne karşıdan bakılarak gerçekleştirilen SEM çalışmaları ile erozif aşınma sırasında sünek erozif aşınma davranışına sahip Ti6Al4V alaşımında yüzeyde delaminasyonların meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Malzemenin aşındırıcı partiküller ile plastik şekil verme ile orijinal yüzeye adeta sıvanması çok çarpıcıdır. Bu süreç esnasında malzeme yüzeyinde delaminasyon kusurlarına sahip tepeciklerin oluştuğu ve bu tepeciklerin diğer aşındırıcı partiküller ile kesilerek yüzeyden malzeme uzaklaştığı söylenebilir. Bu mekanizma ile malzemedan önemli bir miktarda kütle kaybı gerçekleşmektedir.

Literatürde malzemelerin erozif aşınmaları esnasında malzeme yüzeyinde görülen mekanizmalara yönelik bu şekilde bir açıklama bulunmamaktadır. İncelenen araştırmalarda fiber takviyeli kompozit malzemelerin erozif aşınması ile ilgili yayınlarda partiküllerin çarpması ile fiberlerin matristen delamine olarak uzaklaştıkları anlatılmıştır. Ancak homojen malzemelerde malzemenin partiküllerin darbesi nedeniyle plastik şekil verme ile malzeme yüzeyinde oluşan delaminasyon kusurlarından hiç bahsedilmemiştir. Tez çalışması kapsamında Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının karakterizasyonu için çok sayıda özgün ve klasik yöntem kullanılmıştır. Ancak özellikle açılı görüntüleme ile malzeme yüzeyinde görülen erozif aşınma sürecine ilişkin özgün sonuçların belirlendiği söylenebilir. Tez çalışması kapsamında bu mekanizmalar üzerine daha detaylı bir araştırma gerçekleştirilmeyecektir. Ancak bu bölüm içerisinde verilen bu sonuçların erozif aşınmada etkin mekanizmaların belirlenmesi ve aşınma süreçlerinin incelenmesi aşamasında gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalara yardımcı olacağı düşünülmektedir.

7.6.4. Aşındırıcı partikül karışımlarının yüzey morfolojisine etkisi

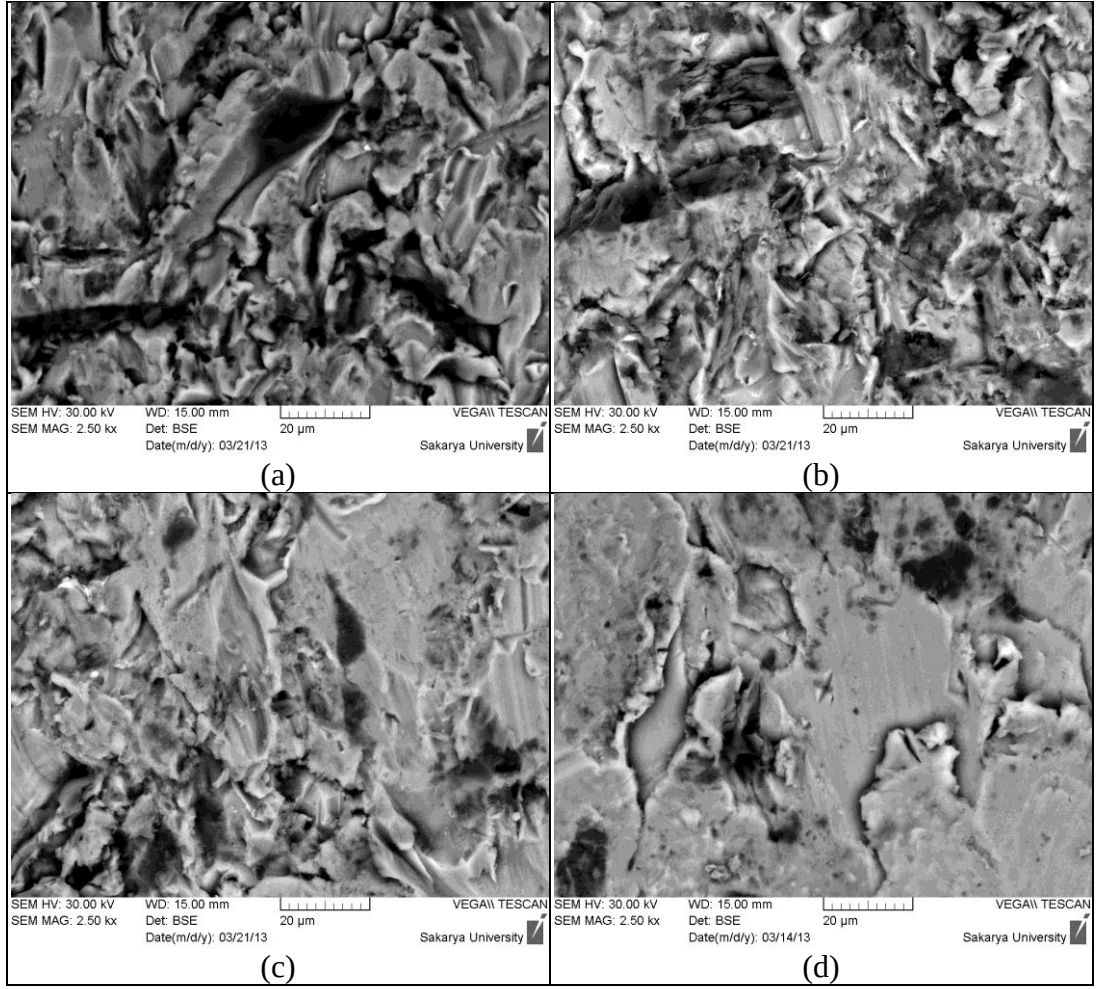
Bu bölümde partikül karışımlarının malzemenin yüzey morfolojilerine etkileri irdelenecektir. Şekil 7.42' de 30° partikül çarpma açısı ve 1,5 bar püskürtme basıncında partikül karışımları ile aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri verilmiştir. SEM fotoğrafları incelendiğinde partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışı üzerinde etkin bir rol oynadığı söylenebilir. Şekil 7.42-a, 7.42-b ve 7.42-c' de malzeme yüzeyinde büyük partiküllerin oluşturduğu geniş aşınma izler ve küçük partiküllerin oluşturduğu dar aşınma izler bir arada gözlenebilmektedir. Diğer yandan geniş ve dar aşınma izlerinin sayısı karışım içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Daha açık bir ifade ile karışım içerisindeki büyük partikül oranının artması yüzeyde gözlenen geniş aşınma izlerinin artmasına, küçük partikül oranının artması ise yüzeyde gözlenen dar aşınma izlerinin artmasına yol açmaktadır. Benzer sonuçlar yüzey pürüzlülük ölçümleri sırasında alınan 3 boyutlu yüzey görüntülerinde de ortaya çıkmıştır. Bu görüntülerde malzeme yüzeyinde büyük partiküllerin yüzeye çarpması nedeniyle pürüzlülüğü yüksek bölgeler ile küçük partiküllerin neden olduğu düşük pürüzlülüklü bölgeler bir arada gözlenmiştir. Bu durumda partikül karışımlarının malzeme yüzeyinde düzensiz bir morfolojiye yol açtıkları söylenebilir. Partikül karışımları hem pürüzlülük değerinde hem de yüzey morfolojisinde bölgesel farklılıklara neden olmakta ve heterojen bir yüzey meydana getirmektedirler.

Partikül karışımlarının erozyon oranlarının karışım içerisindeki partiküllerin bireysel kullanılmaları durumunda elde edilen erozyon oranı değerlerinin arasında yer aldıkları ve karışım oranına bağlı olarak partiküllerin bireysel kullanılmaları durumunda ortaya çıkan erozyon oranı değerlerine yaklaştıkları daha önceki bölümlerde belirtilmiştir. Şekil 7.42' de verilen SEM fotoğrafları incelendiğinde belirlenen bu sonucun nedeni açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Karışım içerisindeki büyük ve küçük partiküllerin oranlarının değişimine bağlı olarak yüzey morfolojisi değişim göstermektedir. Karışım içerisinde büyük partiküllerin oranının artması durumunda (Şekil 7.42-c) yüzey morfolojisi büyük partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumunda (Şekil 7.42-d) ortaya çıkan yüzey morfolojisine benzemektedir. Aynı ilişki küçük partiküller için de geçerlidir. Bu sonuçlar erozyon oranı ile yüzey morfolojisi arasındaki korelasyonu göstermektedir.



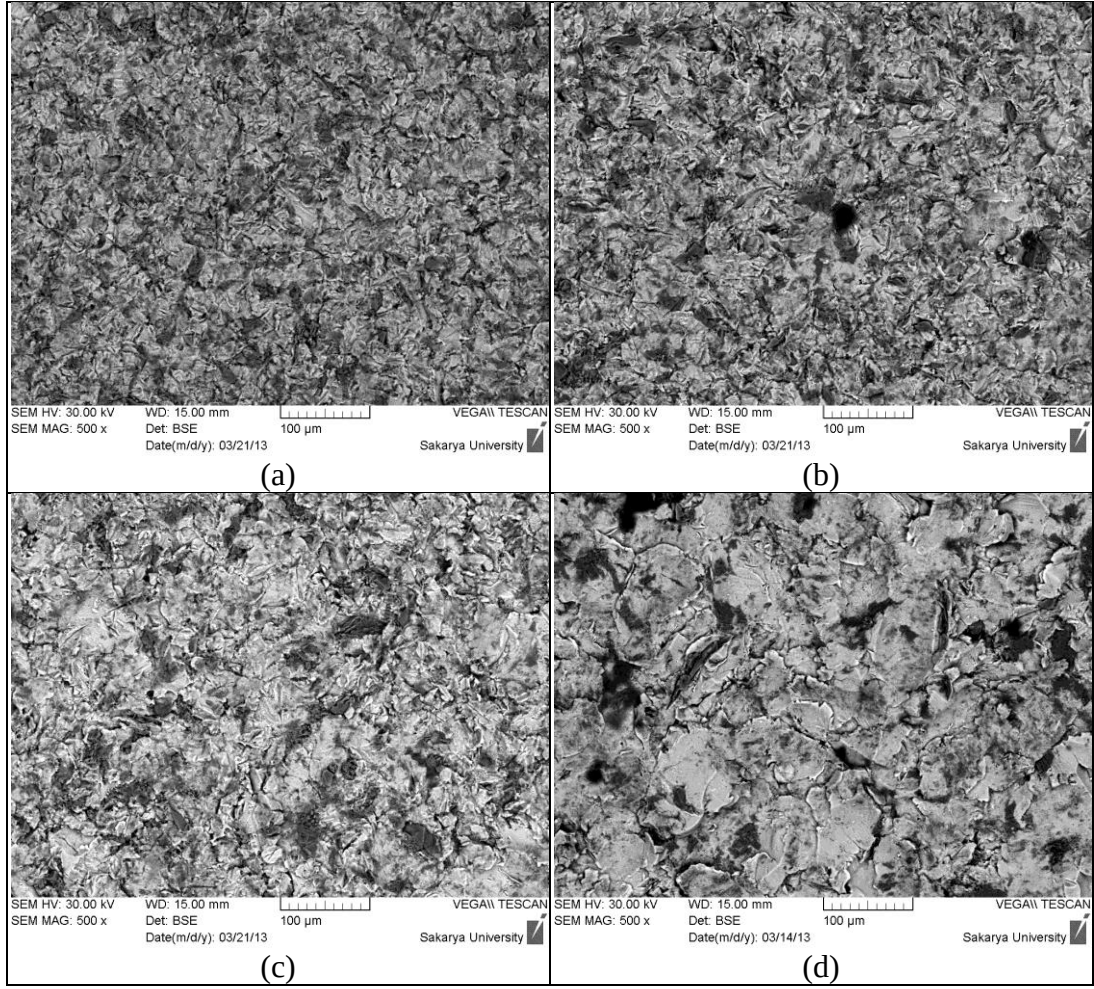
Şekil 7.42.a) %75 180 mesh- %25 20-40 mesh b) %50 180 mesh- %50 20-40 mesh c) %25 180 mesh- %75 20-40 mesh d) %100 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 1,5 bar)

Şekil 7.43' de 30° partikül çarpma açısı 4 bar püskürtme basıncında partikül karışımları ile aşındırılan yüzeylerin görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.43 incelendiğinde yukarıda açıklanan sonuçların 4 bar püskürtme basıncı için de geçerli olduğu söylenebilir. Şekil 7.42 ve 7.43 incelendiğinde tüm partikül karışımlarında yüzey çok sayıda aşındırıcı partikülün saplandığı görülmektedir. Saplanan partiküllerin boyutlarındaki farklılıklar dikkat çekmektedir. Genel olarak malzeme yüzeyine saplanan partiküllerin boyutlarının küçük partiküllere (180 mesh) yakın oldukları görülmektedir. Bu durumun küçük partiküllerin büyük partiküllere kıyasla yüzey daha rahat nüfuz edebilmeleri ve büyük partiküllerin yüzeye saplandıktan sonra arkadan gelen diğer partiküller ile kırılmaları nedeniyle ortaya çıktığı söylenebilir.



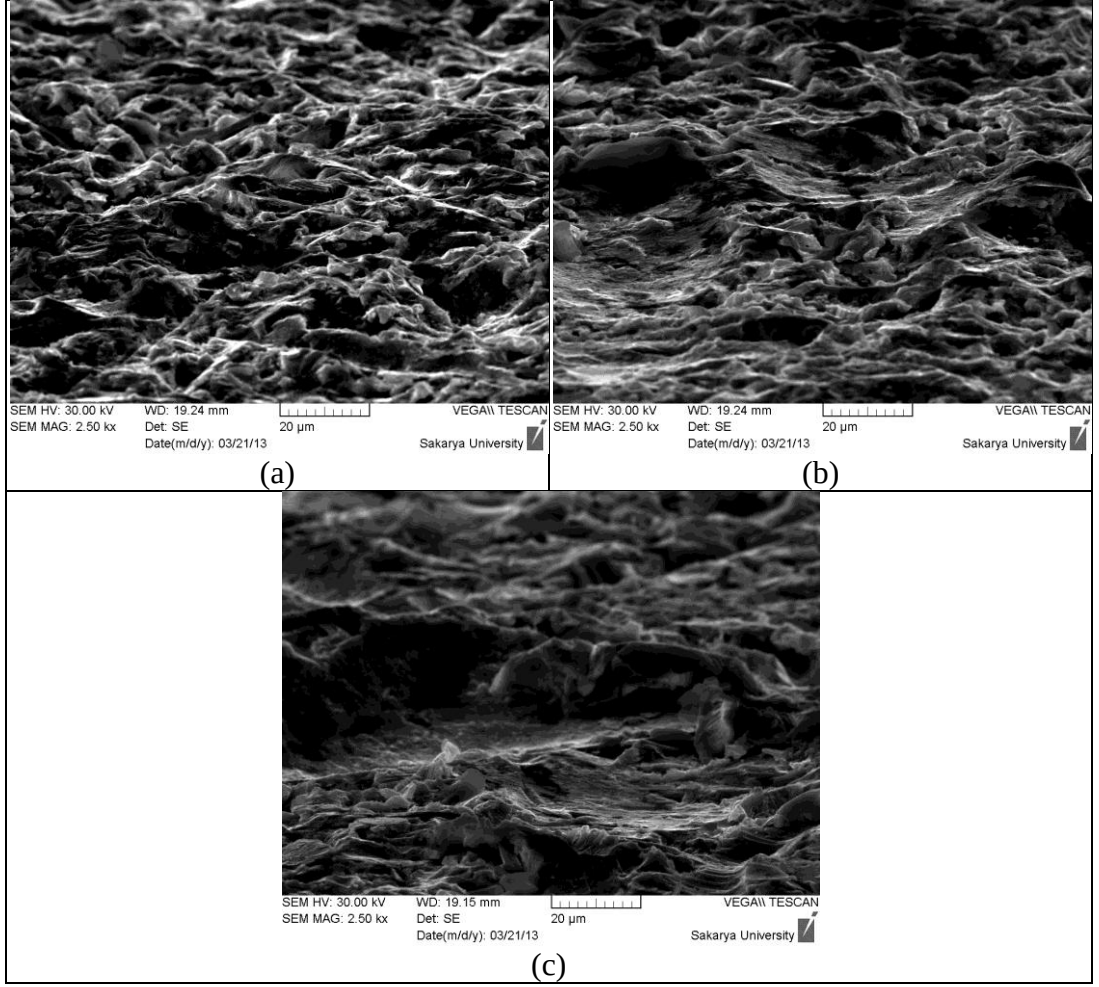
Şekil 7.43.a) %75 180 mesh- %25 20-40 mesh b) %50 180 mesh- %50 20-40 mesh c) %25 180 mesh- %75 20-40 mesh d) %100 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar)

Şekil 7.44'te 90° partikül çarpma açısı 4 bar basınçta partikül karışımları ile aşındırılan numunelerin SEM fotoğrafları verilmiştir. 30° partikül çarpma açısında aşındırılan numunelere benzer sonuçların bu fotoğraflar için de geçerli olduğu görülmektedir. Ancak bu açı değerinde malzeme yüzeyine çok sayıda aşındırıcı partikül saplandığı görülmektedir.



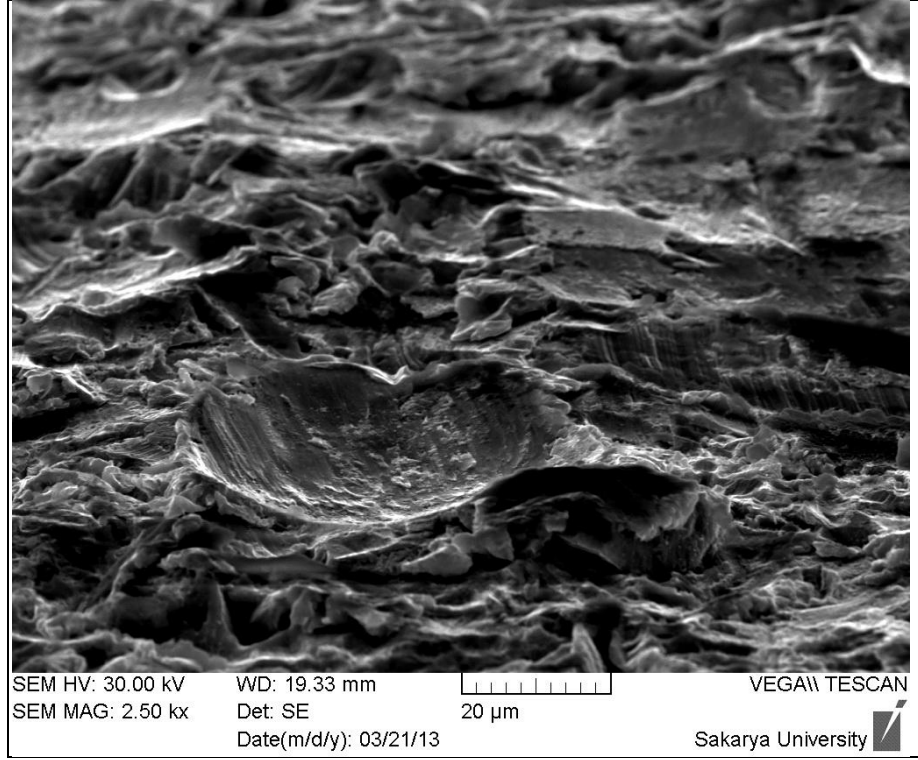
Şekil 7.44.a) %75 180 mesh- %25 20-40 mesh b) %50 180 mesh- %50 20-40 mesh c) %25 180 mesh- %75 20-40 mesh d) %100 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x500 büyütmede SEM fotoğrafı (çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 4 bar)

Şekil 7.45'te partikül karışımları ile aşındırılan numunelerin 75° görüntüleme açısında çekilen SEM fotoğrafları verilmiştir. Şekil incelendiğinde karışım oranına bağlı olarak yüzey morfolojisinin önemli oranda değişim gösterdiği görülmektedir. Malzeme yüzeyinde büyük partiküllerin oluşturduğu derin ve geniş aşınma izleri ile küçük partiküllerin meydana getirdiği küçük boyutlu aşınma izleri gözlenmektedir. Partikül karışımlarının malzemede meydana getirdiği düzensiz yüzey morfolojisi bu görüntüleme metodu ile farklı bir bakış açısı ile araştırılabileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.45. a) %75 180 mesh- %25 20-40 mesh, b) %50 180 mesh- %50 20-40 mesh, c) %25 180 mesh- %75 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 90°, püskürtme basıncı: 4 bar)

Şekil 7.46' de 30° partikül çarpma açısı ve 4 bar püskürtme basıncında %75 20-40 mesh %25 180 meshlik partiküllerden oluşan karışımın meydana getirdiği erozyon hasarı verilmiştir. Şekilde büyük bir partikülün mikrosürme aşınma mekanizması ile oluşturduğu yüzey morfolojisi ilgi çekmektedir. Diğer yandan tek bir büyük partikülün meydana getirdiği hasarın etrafında küçük partiküllerin etkileri ile oluşmuş farklı aşınma hasarları görülmektedir.



Şekil 7.46. %25 180 mesh- %75 20-40 mesh aşındırıcı karışımlar ile aşındırılmış numunelerin x2500 büyütmede aşınma yönüne 75° tersten bakış SEM fotoğrafı (partikül çarpma açısı: 30°, püskürtme basıncı: 4 bar)

7.7. Görüntü Analiz Yöntemleri ile Aşındırılmış Numunelerin Yüzey Görüntülerinin İncelenmesi

Katı partikül erozyonu kompleks hasar mekanizmalarına sahip tribolojik bir süreçtir. Katı partikül erozyonuna maruz kalan malzemelerde oluşan hasar tipleri; aşındırıcı partikül boyutu, partikül çarpma açısı, partikül çarpma hızı vb. birçok parametreye bağlı olduğundan her bir faktörün sebep olduğu hasarın karşılaştırmalı görüntülerinin bir arada sunulması önem arz etmektedir. Katı partikül erozyonuna bağlı olarak ortaya çıkan hasarların değerlendirilmesinde tahribatlı ve tahribatsız malzeme muayene ve inceleme yöntemleri kullanılabilir.

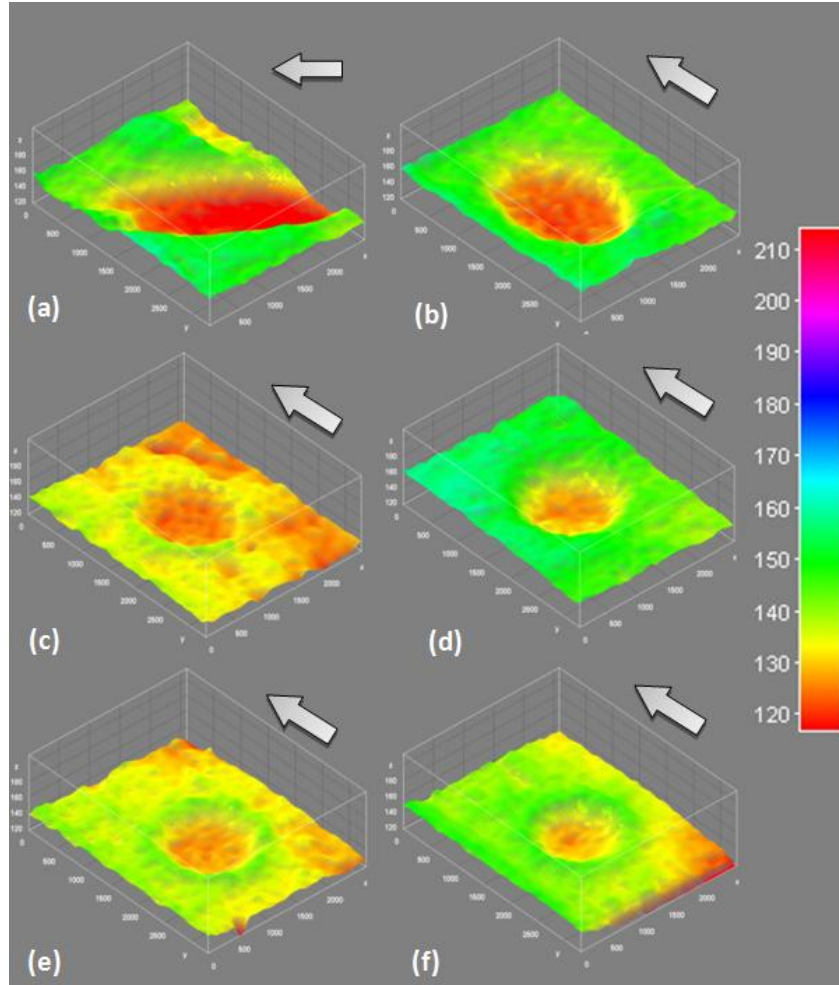
Doktora tezinde hedef çıktılardan önemli bir tanesi görüntü işleme yöntemleri ve algoritmaları kullanılarak farklı parametreler altında aşındırılmış malzemelerin yüzeylerinin üç boyutlu yüzey morfolojilerinin elde edilmesi ve yorumlanmasıdır. Bu bölüm içerisinde partikül çarpma açısı, partikül boyutu ve püskürtme basıncı ve partikül karışımlarına bağlı olarak malzemeye yüzey morfolojisinin değişimi

karşılaştırmalı olarak açıklanacaktır. Literatürde malzemelerin katı partikül erozyonu davranışlarının analiz edilmesine bugüne kadar doktora tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme yöntemlerine rastlanmamıştır. Bu noktada tez çalışmasında bu bölüm içerisinde farklı parametrelerde aşındırılan Ti6Al4V alaşımının görüntü işleme yöntemleri ile hazırlanan üç boyutlu yüzey morfolojileri verilecektir. Deneysel çalışmalar bölümünde bölüm içerisinde verilen görüntülerin nasıl elde edildiği detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Tez çalışması kapsamında 6 farklı partikül çarpma açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90°), 3 farklı püskürtme basıncı (1,5, 3 ve 4 bar) ve 4 farklı boyutta aşındırıcı partiküller (20-40, 80, 120 ve 180 mesh) ile aşındırılan numunelerin yüzey morfolojileri görüntü işleme programları yardımıyla analiz edilmiştir. Bu bölüm içerisinde elde edilen görüntüler yardımıyla bu parametrelerin Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışına etkileri irdelenecek ve farklı parametrelerin malzeme yüzeyinde meydana getirdiği aşınma izleri detaylı bir şekilde incelenecektir.

7.7.1. Yüzey morfolojisinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi

Şekil 7.47' de 3 bar püskürtme basıncında, 20-40 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller ile farklı partikül çarpma açılarında aşındırılan numunelerin yüzeylerinin görüntüleri verilmiştir. Şekil üzerinde numunelerin aşınma yönleri beyaz oklar ile gösterilmiştir. Şekil üzerinde sağ tarafta gösterilen renk skalasında malzeme yüzeyinde aşınmaya bağlı oluşan aşınma derinliğinin ölçüsü izafi olarak verilmiştir. Bu cetvele göre yeşil renkte görülen yüzeyler numunenin az miktarda aşınan ve derinliği düşük alanlarını ifade ederken, kırmızı renkteki alanlar ise en fazla aşınan ve derinliği yüksek alanları göstermektedir. Şekil 7.47 incelendiğinde ise partikül çarpma açısının 90°' ye yaklaşması ile oluşan aşınma izinin geometrisinin dairesel olarak yaklaştığı görülmektedir. Bir önceki bölümde verilen Ti6Al4V alaşımının erozyon oranlarının partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi incelendiğinde malzemenin erozyon oranının partikül çarpma açısının artışı ile azaldığı görülmektedir. Şekil 7.47' de verilen yüzey morfolojileri incelendiğinde de aşınma izlerinin alanlarının partikül çarpma açısının artışıyla bağlı olarak küçüldüğü net bir şekilde görülmektedir. Şekillerde malzemenin yüzey morfolojisinin partikül çarpma açısına bağlı olarak şiddetli bir değişim gösterdiği ve bu durumun malzemede görülen erozyon oranı üzerinde doğrudan etkili olduğu söylenebilir. Bu bölüm içerisinde

malzeme yüzeyinden alınan makro boyutta görüntüler ile partikül çarpma açısının malzemenin yüzey morfolojisine olan etkisi derinlemesine irdelenecektir.

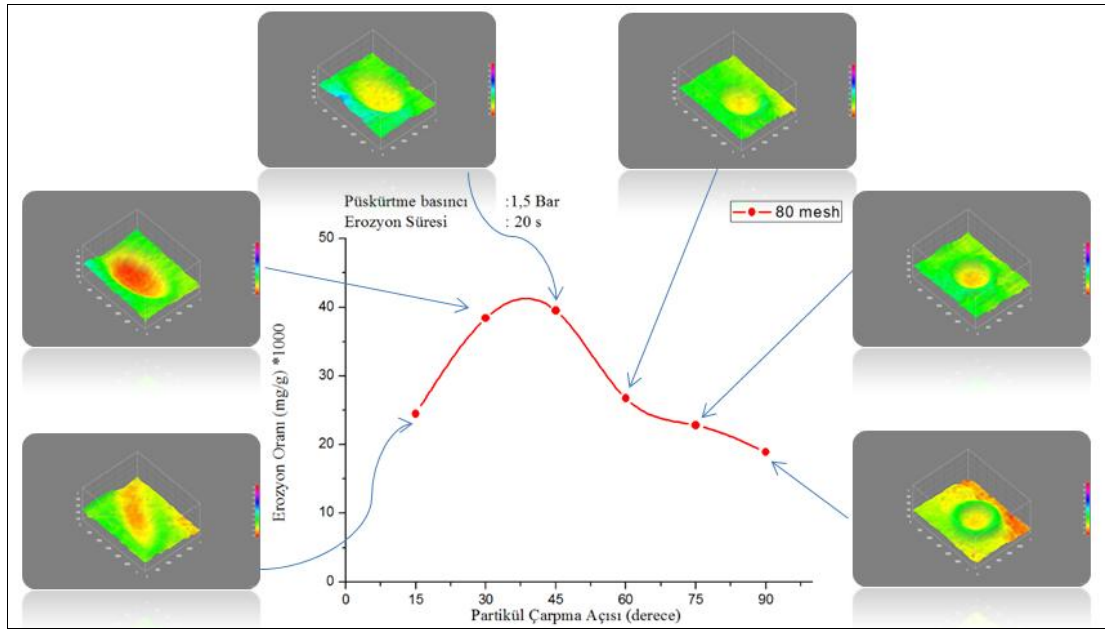


Şekil 7.47. a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 5°, f) 90° çarpma açısı, 20-40 mesh partiküller ile 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

Şekil 7.47’ de 3 bar basınçta 20-40 mesh boyutunda partiküller ile farklı açılarda (15°-90°) aşındırılan numunelerin görüntü işleme yöntemleri ile elde edilen morfolojileri verilmiştir. Şekil incelendiğinde partikül çarpma açısına bağlı olarak malzeme yüzeyinde meydana gelen aşınmanın büyüklüğünün, derinliğini ve geometrisinin değiştiği çarpıcı bir şekilde görülmektedir. Düşük çarpma açılarında (15°-30°) malzeme yüzeyinde boydan boya alev konisi şeklinde bir aşınma meydana geldiği görülmektedir. Bir önceki bölümde grafikler ile verilen erozif aşınma oranları ile görüntü işleme ile elde edilen yüzey morfolojilerinin bir uyum gösterdiği görülmektedir. Düşük çarpma açılarında erozif aşınma oranının daha

yüksek olduğu ve Ti6Al4V alaşımının daha yüksek miktarda aşındığı bir önceki bölümde gerçekleştirilen çalışmalar ile anlaşılmıştır. Bölüm içerisinde verilen şekiller incelendiğinde malzemenin bu açılarda daha fazla hasara uğradığı açık bir şekilde görülmektedir.

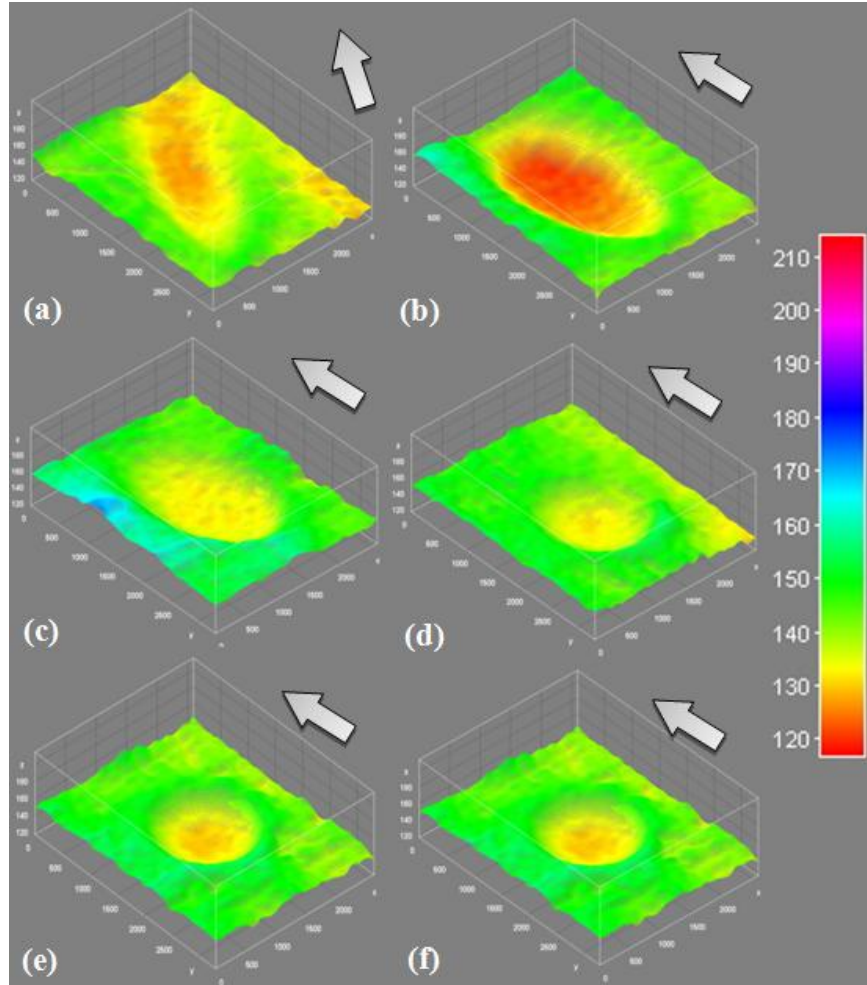
Şekil 7.48’ de 80 mesh boyutundaki partiküller ile 1,5 bar püskürtme basıncında 6 farklı açıda aşındırılan numunelerin görüntüleri bu parametreler için çizilen partikül çarpma açısı – erozyon oranı grafiği ile birlikte verilmiştir.



Şekil 7.48. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)

Şekil 7.48 incelendiğinde Ti6Al4V alaşımının yüzeyinde oluşan aşınma izinin geometrisinin, kapladığı alanın ve derinliğinin partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi çok net bir şekilde görülmektedir. Şekil 7.48’de 15° partikül çarpma açısında iz alanı maksimum durumda iken partikül çarpma açısının artışı ile birlikte erozyon hasarının kapladığı alanın azaldığı görülmektedir. Tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme yönteminin malzemelerin katı partikül erozyonu davranışının görsel olarak incelenmesinde başarılı ve özgün bir metot olduğu anlaşılmaktadır. Bu bölüm içerisine malzemenin diğer parametreler altında aşındırılması ile elde edilen görüntülerin değişimi de incelenerek bu sonuçlar

pekiştirilecektir. Şekil 7.49’ da 7.48’ de toplu olarak verilen yüzey görüntülerinin daha rahat incelenebilmesi için büyütülmüş halleri verilmiştir.

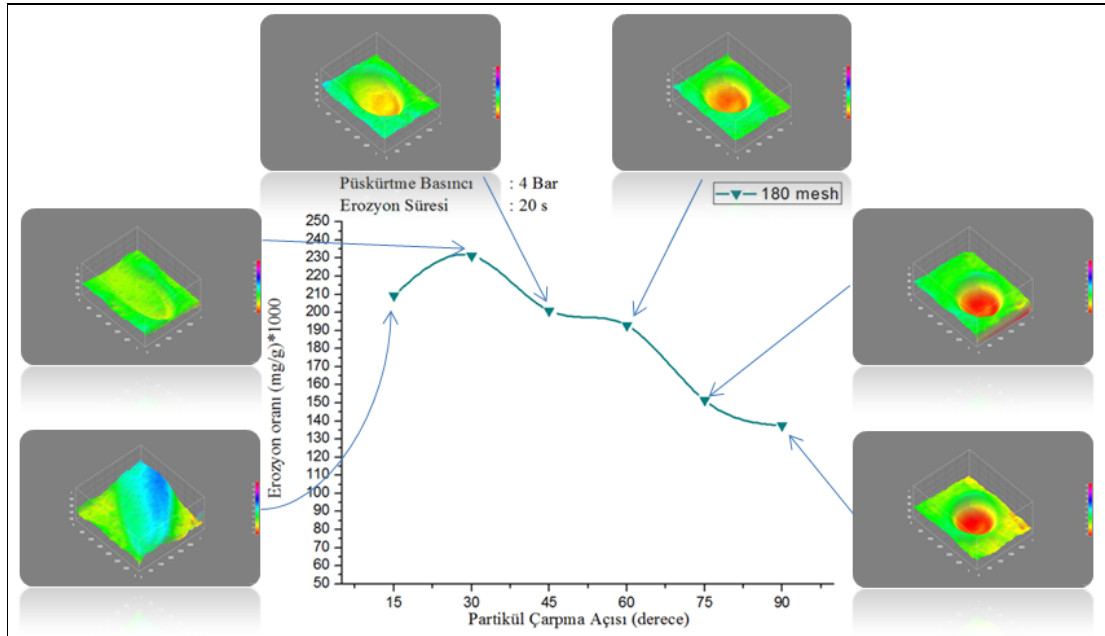


Şekil 7.49. a)15°, b) 30°, c)45°, d) 60°, e) 75°, f) 90° çarpma açısı, 80 mesh partiküller ile 1,5 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

Şekil 7.50’ de 4 bar püskürtme basıncında 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partiküller ile aşındırılan Ti6Al4V alaşımının yüzey görüntülerinin partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi verilmiştir.

Şekil 7.50 incelendiğinde malzemede oluşan aşınma hasar konisinin alanının, geometrisinin ve derinliğinin değişimi görülmektedir. Düşük partikül çarpma açılarında malzemede geniş ve alev konisine benzer bir aşınma izi olduğu, partikül çarpma açısının artışı ile birlikte ise oluşan hasar izinin geometrisinin dairesele dönüştüğü gözlenmektedir. Yüzeyde görülen hasar alanının ve derinliğinin de partikül çarpma açısına bağlı olarak büyük bir değişim gösterdiği söylenebilir.

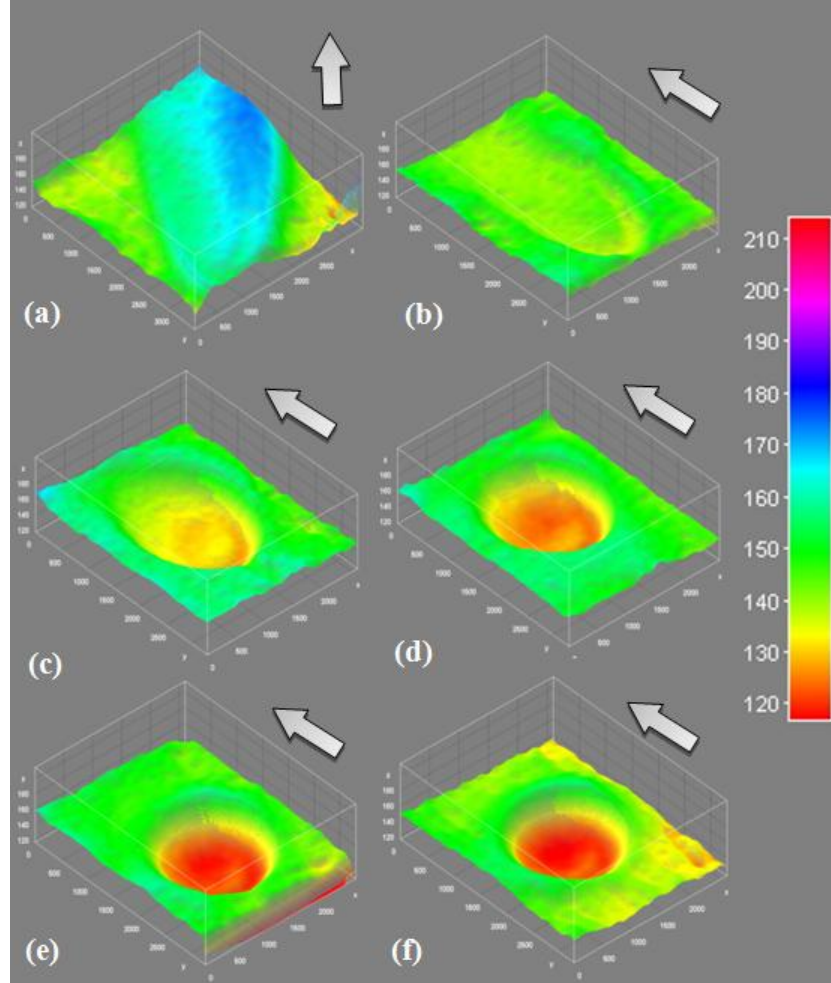
Yukarıda verilen şekiller daha büyük boyutlarda Şekil 7.51’ de verilmiştir. Tüm bu grafikler incelendiğinde partikül çarpma açısına bağlı olarak malzeme yüzeyinde oluşan hasarın radikal bir değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Erozyon oranının partikül çarpma açısının değişimine bağlı olarak değişiminin de benzer bir şekilde olduğu göz önünde bulundurulduğunda görüntü işleme ile elde edilen sonuçların doğru olduğu sonucuna varılabilir. Bölüm içerisinde daha önce de belirtildiği gibi tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme tekniği ile Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışının partikül çarpma açısına bağlı değişiminin çok net ve özgün bir şekilde değerlendirilebildiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.50. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 4 bar, aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)

Şekil 7.50 incelendiğinde malzemede oluşan aşınma hasar konisinin alanının, geometrisinin ve derinliğinin değişimi görülmektedir. Düşük partikül çarpma açılarında malzemede geniş ve alev konisine benzer bir aşınma izi oluştuğu, partikül çarpma açısının artışı ile birlikte ise oluşan hasar izinin geometrisinin dairesele dönüştüğü gözlenmektedir. Yüzeyde görülen hasar alanının ve derinliğinin de partikül çarpma açısına bağlı olarak büyük bir değişim gösterdiği söylenebilir. Yukarıda verilen şekiller daha büyük boyutlarda Şekil 7.51’ de verilmiştir. Tüm bu grafikler incelendiğinde partikül çarpma açısına bağlı olarak malzeme yüzeyinde oluşan hasarın radikal bir değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Erozyon oranının

partikül çarpma açısının değişimine bağlı olarak değişiminin de benzer bir şekilde olduğu göz önünde bulundurulduğunda görüntü işleme ile elde edilen sonuçların doğru olduğu sonucuna varılabilir. Bölüm içerisinde daha önce de belirtildiği gibi tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme tekniği ile Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışının partikül çarpma açısına bağlı değişiminin çok net ve özgün bir şekilde değerlendirilebildiği sonucuna varılmıştır.



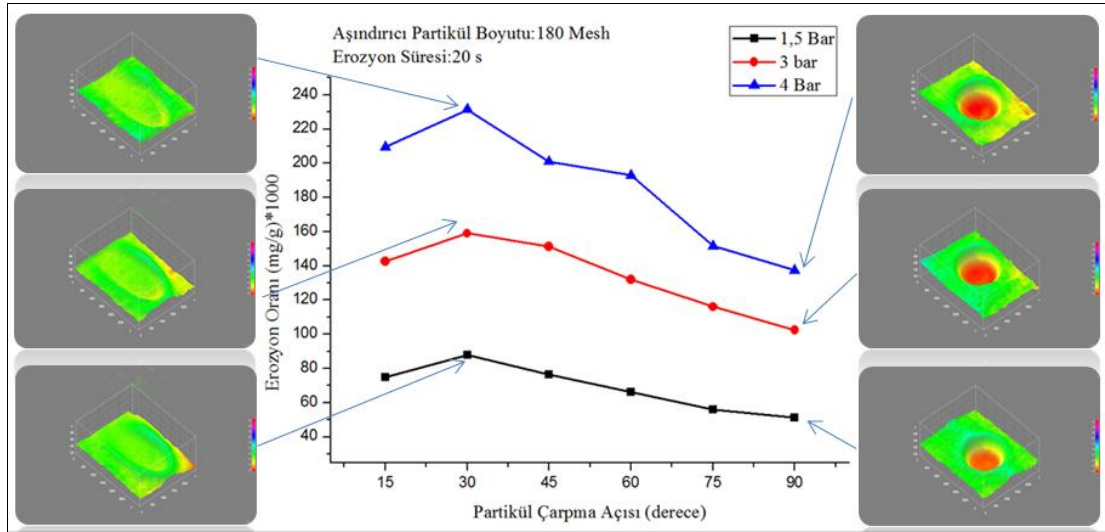
Şekil 7.51. a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90° çarpma açısı, 180 mesh partiküller ile 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

7.7.2. Yüzey morfolojisinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi

Bu bölüm içerisinde malzeme yüzey morfolojisinin partikül püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi görüntü analiz yöntemleri ile incelenecektir. Partikül püskürtme basıncına bağlı olarak yüzey morfolojisinin değişimi erozyon oranının

değişimi ile ilişkilendirilerek açıklanacaktır. Şekil 7.52’ de 180 mesh partiküller ile aşındırılmış numunelerin erozyon oranları ve görüntü işleme programı ile elde edilen yüzey morfolojileri verilmiştir. Şekilde partikül püskürtme basıncına bağlı olarak yüzey morfolojisinin genel değişiminin rahat bir şekilde anlaşılabilmesi için erozyon oranı grafiği üzerinde oklar yardımıyla yüzey görüntüleri ilişkilendirilmiştir.

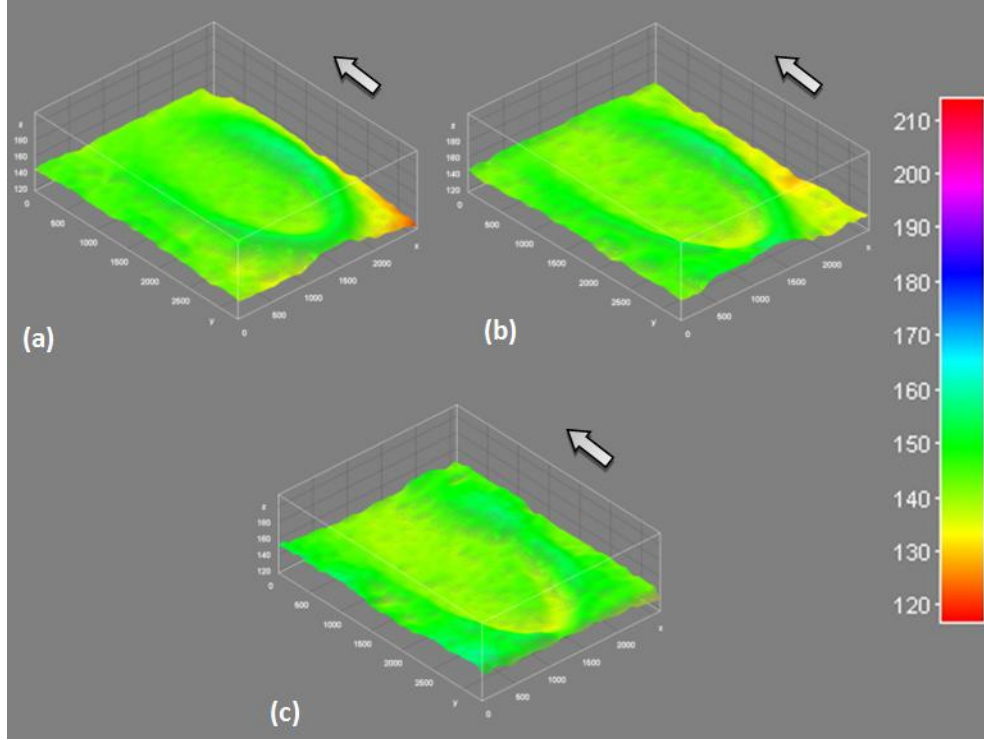
Şekil 7.53’te ise Şekil 7.52’ de verilen görüntülerin büyültülmüş haller verilmiştir. Şekil 7.52’ te sol tarafta 30° partikül çarpma açısında 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basıncında aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri, sağ tarafta ise aynı basınç değerlerinde 90° püskürtme basıncında aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde her iki açı değerinde de erozif aşınma izinin alanının ve derinliğinin değişim gösterdiği, buna karşın aşınma geometrisinde önemli bir değişiklik görülmediği belirlenmiştir. Püskürtme basıncının artışı ile birlikte her iki partikül çarpma açısında da aşınma izinin alanının büyüdüğü ve aşınma derinliğinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu açı değerleri için erozyon oranı–partikül çarpma açısı grafiği incelendiğinde erozyon oranının püskürtme basıncına bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir. Bu durumda aşınmış yüzeylerin morfolojilerinin değişimi ile erozyon oranının değişiminin korelasyon gösterdiği sonucuna varılabilir.



Şekil 7.52. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Partikül çarpma açıları: 30° ve 90°, Aşındırıcı Partikül Boyutu: 180 mesh)

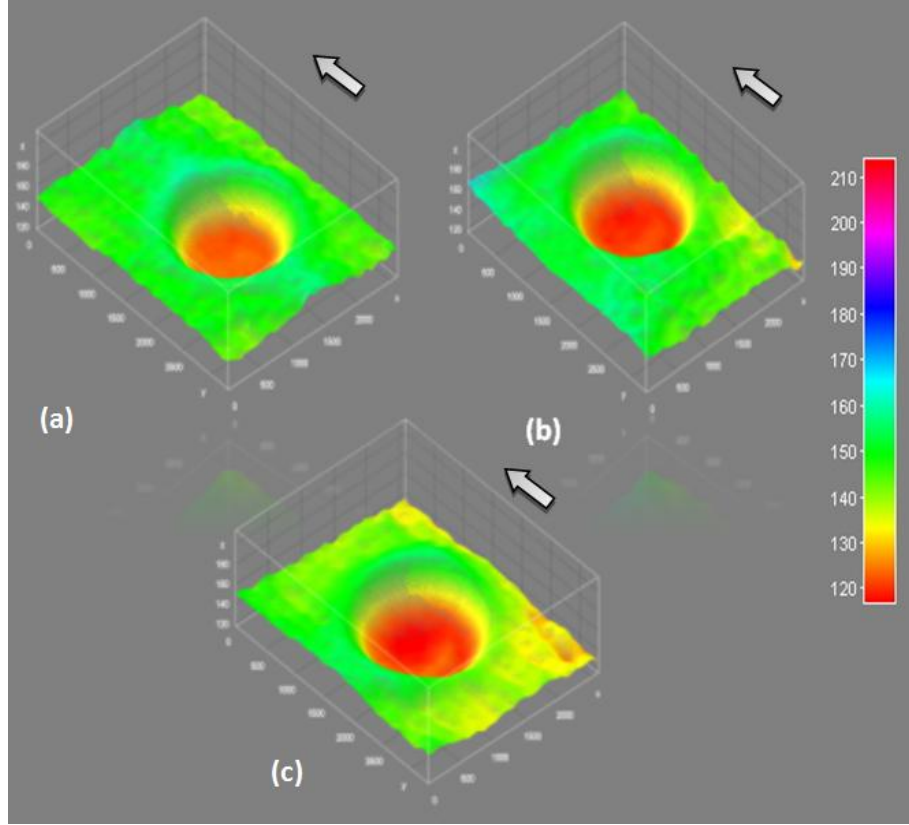
Şekil 7.53-a’ da 30° çarpma açısı, 1,5 bar püskürtme basıncında 180 mesh boyutunda partiküller ile aşındırılan yüzeyin görüntüsü verilmiştir. Şekil 7.53-b ve 7.53-c’ de ise

aynı çarpma açısında 3 ve 4 bar püskürtme basıncında aşındırılan numunelerin görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde püskürtme basıncının değişimi ile aşınma izinin geometrisinde önemli bir değişim meydana gelmediği, buna karşın aşınma izinin alanının ve derinliğinin basınç artışı ile birlikte artış gösterdi sonucuna varılabilir.



Şekil 7.53. 180 mesh partiküller ile 30° partikül çarpma açısı ve a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

Şekil 7.54’ te 90° çarpma açısı, 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basıncında 180 mesh boyutunda partiküller ile aşındırılan yüzeylerin görüntüsü verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde püskürtme basıncının değişimi ile aşınma izinin geometrisinde önemli bir değişim meydana gelmediği, buna karşın aşınma izinin alanının ve derinliğinin basınç artışı ile birlikte artış gösterdi sonucuna varılabilir.



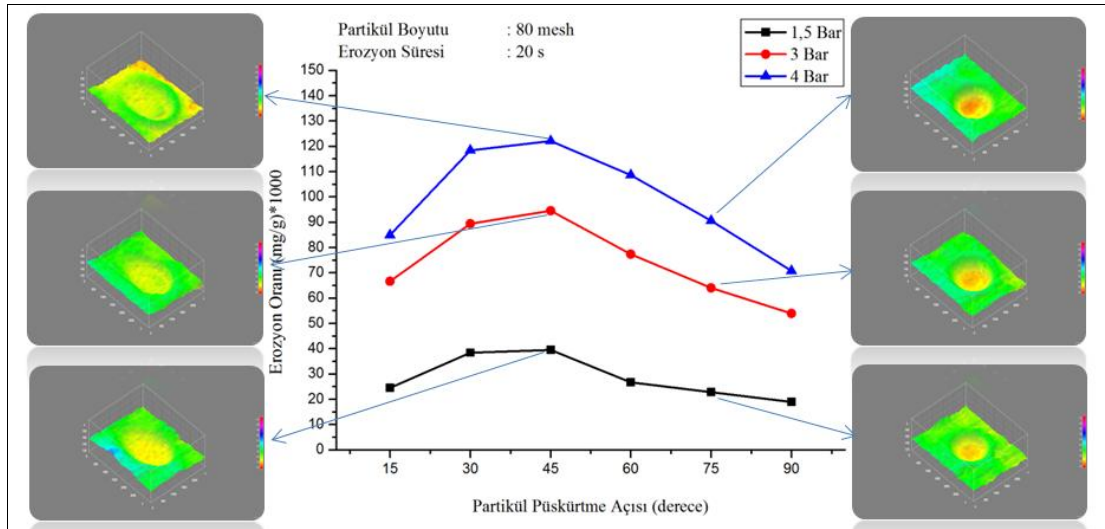
Şekil 7.54. 180 mesh partiküller ile 90° partikül çarpma açısı a) 1,5, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

Bu bölüm içerisinde daha önce verilen şekiller göz önünde bulundurularak basınç değişiminin etkisinin daha net bir şekilde anlaşılabilmesi amacıyla farklı partikül çarpma açılarında aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu şekilde birçok partikül çarpma açısı için görüntü işleme yöntemi ile püskürtme basıncına bağlı olarak yüzey morfolojisinin değişiminin belirlenmesi amaçlanmıştır. Benzer şekilde yine bölüm içerisinde farklı partikül boyutlarında aşındırıcı partiküller ile aşındırılan numunelerin görüntülerine yer verilerek her bir partikül boyutu için püskürtme basıncının yüzey morfolojisine etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Şekil 7.55’ te 45° ve 75° çarpma açılarında, 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basınçlarında 80 mesh boyutunda partiküller ile aşındırılan yüzeyin görüntüsü verilmiştir.

Şekil 7.55’ te sol tarafta 45° partikül çarpma açısında, 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basıncında aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri, sağ tarafta ise aynı basınç

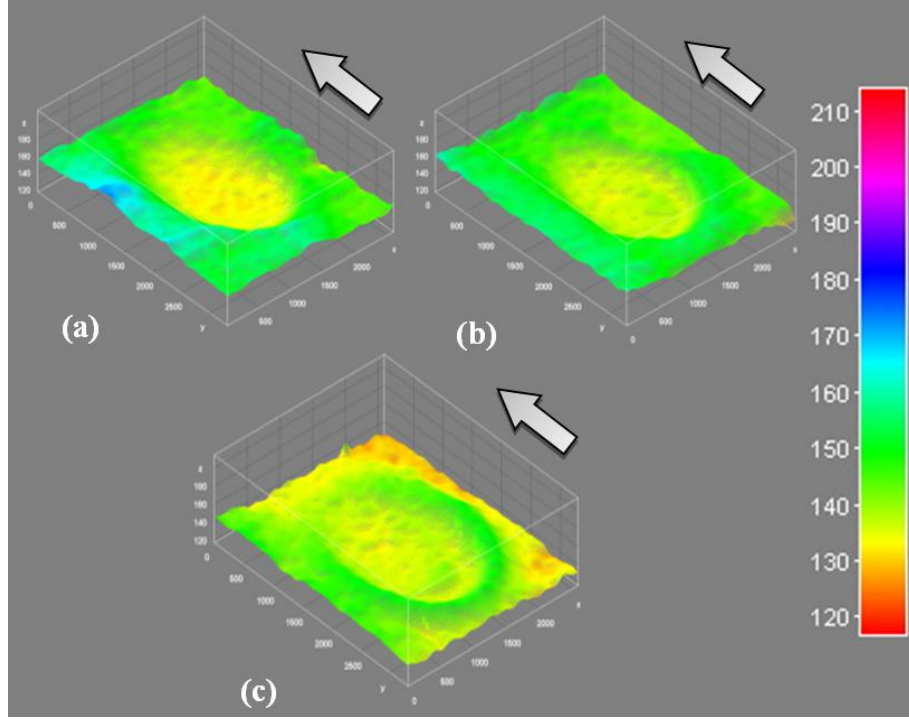
değerlerinde 75° püskürtme basıncında aşındırılan numunelerin yüzey görüntüleri verilmiştir.

Şekil incelendiğinde her iki açı değerinde de erozif aşınma izinin alanının ve derinliğinin değişim gösterdiği, buna karşın aşınma geometrisinde önemli bir değişiklik görülmediği belirlenmiştir. Püskürtme basıncının artışı ile birlikte her iki partikül çarpma açısında da aşınma izinin alanının büyüdüğü ve aşınma derinliğinin artış gösterdiği görülmektedir. Bu açı değerleri için erozyon oranı – partikül çarpma açısı grafiği incelendiğinde erozyon oranının püskürtme basıncına bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir. Bu durumda aşınmış yüzeylerin morfolojilerinin değişimi ile erozyon oranının değişiminin korelasyon gösterdiği sonucuna varılabilir.

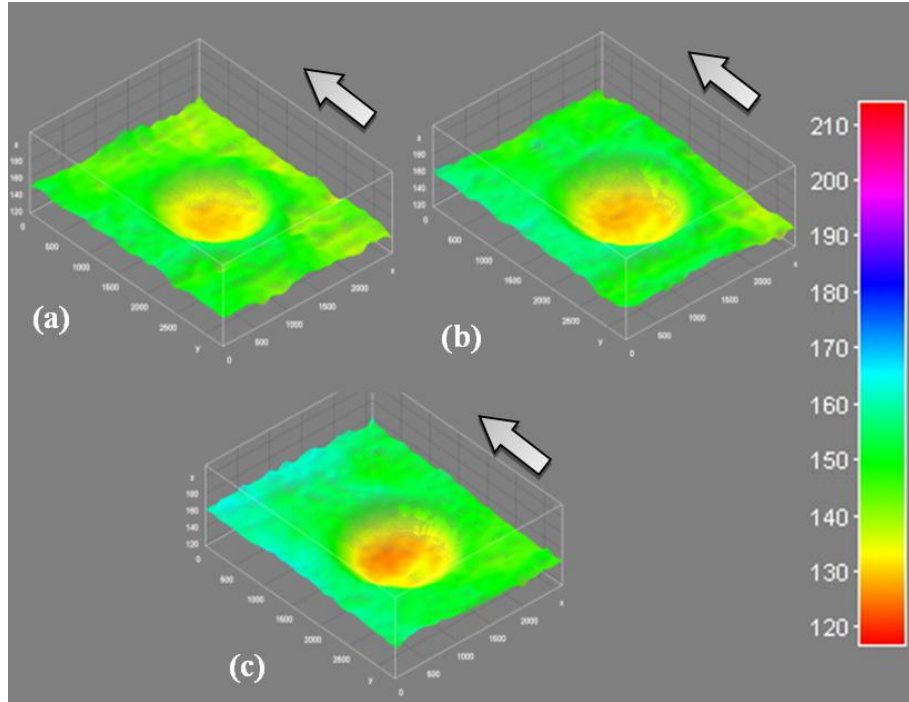


Şekil 7.55. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı Partikül Boyutu: 80 mesh)

Şekil 7.56 ve 7.57’ de ise Şekil 7.55’ te verilen görüntülerin büyütülmüş haller verilmiştir. Şekiller incelendiğinde malzeme yüzeyinde erozif aşınma ile oluşan aşınma hasar konisi görülebilmektedir. Püskürtme basıncının artışı ile birlikte hasar konisinin derinliğinin arttığı ve koninin etrafında plastik deformasyonlara bağlı olarak tepeliklerin oluştuğu gözlenmektedir.



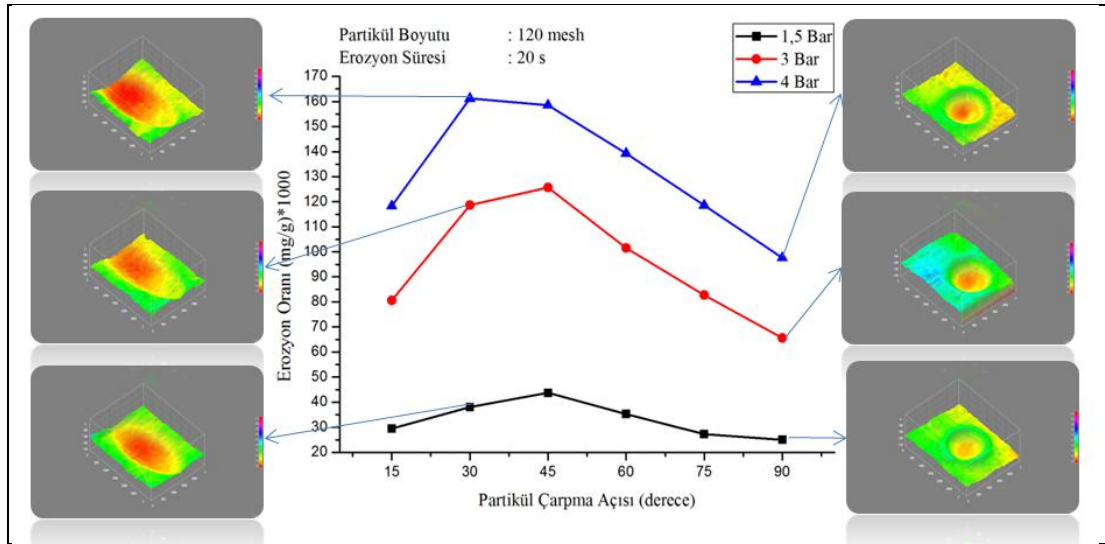
Şekil 7.56. 80 mesh partiküller ile 45° partikül çarpma açısı a) 1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi



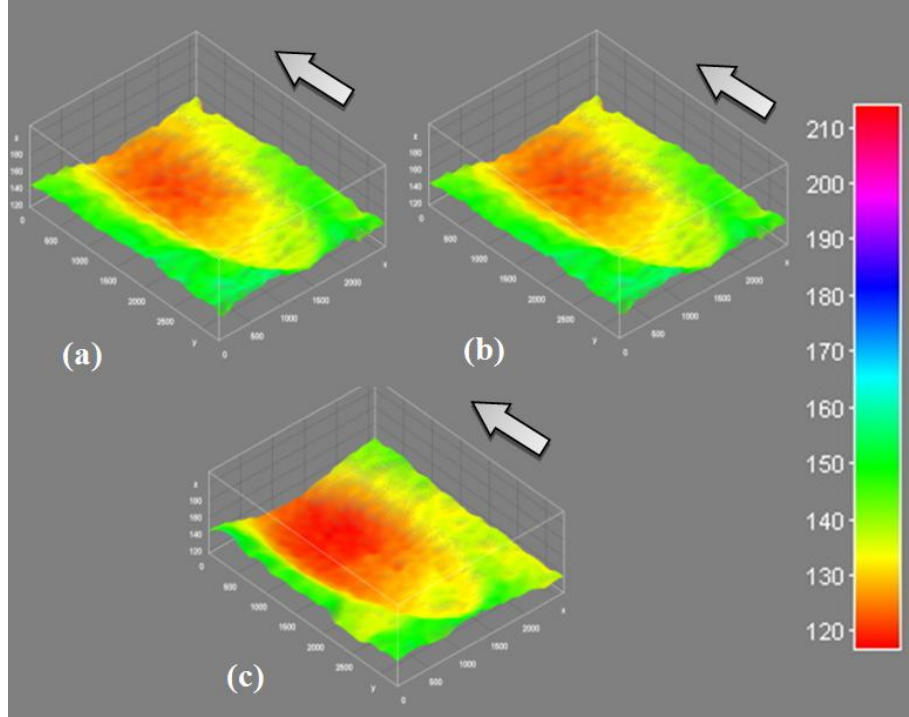
Şekil 7.57. 80 mesh partiküller ile 75° partikül çarpma açısı a)1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

Şekil 7.58’ de 120 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller ile 30° ve 90° partikül çarpma açılarında 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basınçlarında aşındırılan numunelerin erozyon oranları ile yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde her iki partikül çarpma açısında da püskürtme basıncı artışı ile birlikte malzeme yüzeyinde oluşan hasarın arttığı gözlenmektedir.

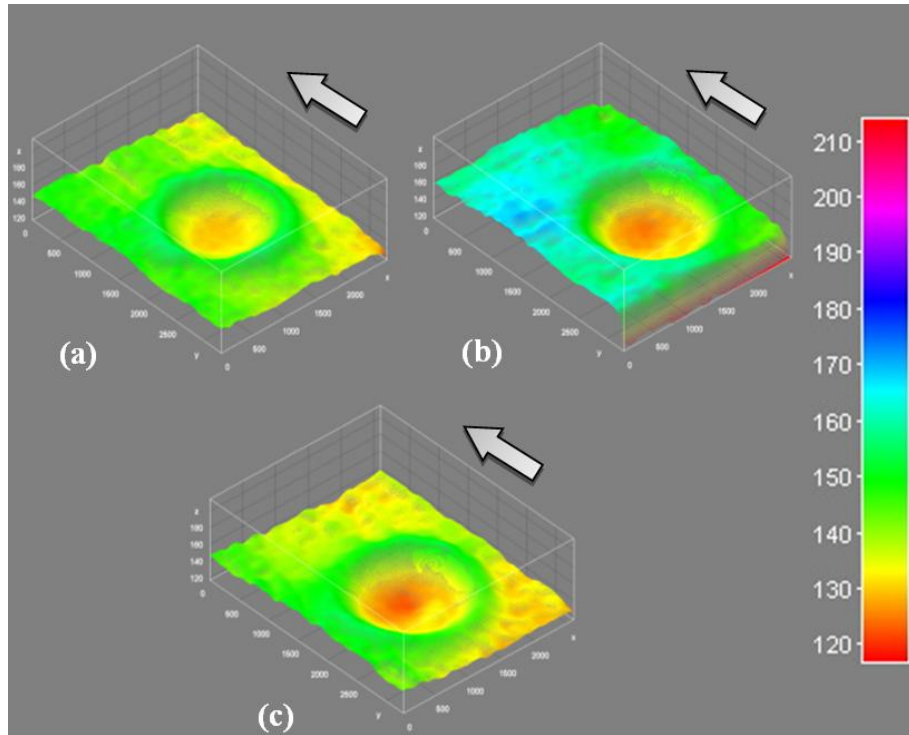
Şekil 7.58’ de erozyon oranı artışına paralel olarak aşınma izinin alanının büyüdüğü ve derinliğinin arttığı görülmektedir. Diğer yandan aşınma geometrisinin 90° partikül çarpma açısında dairesele yakın, 30° partikül çarpma açısında ise alev konisi şeklinde olduğu görülmektedir. Bu durumda erozyon oranı sonuçları ile görüntü işleme yöntemi ile elde edilen üç boyutlu yüzey morfolojileri arasında yüksek bir uyum olduğu söylenebilir. Şekil 7.59 ve 7.60’ ta ise Şekil 7.58’te verilen görüntüler ayrı ayrı ve büyütülmüş formatta verilmiştir. Şekiller incelendiğinde yukarıda da belirtildiği gibi püskürtme basıncının artışı ile birlikte her iki açı değerinde de oluşan erozif aşınma hasarının yüzey alanının büyüdüğü net bir şekilde görülmektedir. Ayrıca püskürtme basıncının artışı ile erozif aşınma hasarının şiddetinin arttığı yüzeyde gözlenen kırmızı alanın artışı ile izlenebilmektedir.



Şekil 7.58. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)



Şekil 7.59. a)1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında, 120 mesh partiküller ile 30° partikül çarpma açısı aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

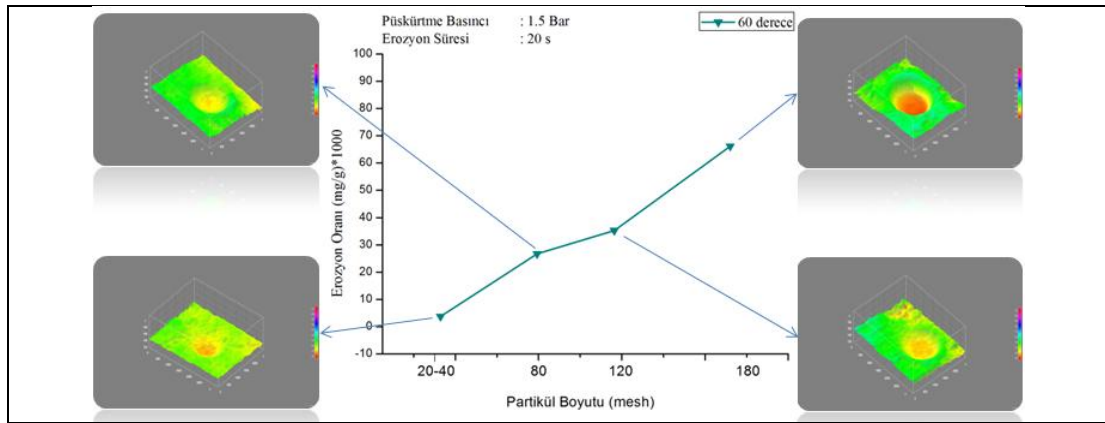


Şekil 7.60. a)1,5 bar, b) 3 bar, c) 4 bar püskürtme basıncında, 120 mesh partiküller ile 90° partikül çarpma açısı aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

7.7.3. Yüzey morfolojisinin aşındırıcı partikül boyutuna bağlı değişimi

Bu bölüm içerisinde aşındırılan numunelerin yüzey morfolojilerine aşındırıcı partikül boyutunun etkisi açıklanacaktır. Literatür çalışmalarında da belirtildiği gibi partikül boyutu malzemelerin erozif aşınma davranışını etkileyen önemli bir parametredir. Ancak buna karşın aşındırıcı partikül boyutunun malzemelerin erozif aşınma davranışlarına etkisi net olarak ifade edilememiştir. Bu konu ile ilgili partikül çarpma açısı ve partikül çarpma hızı gibi parametrelere kıyasla çok daha az sayıda çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucunda daha öncede belirtildiği gibi partikül boyutunun malzemelerin erozif aşınma davranışlarına ve erozyon oranlarına etkileri net olarak açıklanamamıştır. Bu durumda partikül boyutunun aşınmış malzemelerin yüzey morfolojilerine olan etkileri büyük önem arz etmektedir. Tez çalışması kapsamında literatürde ilk defa görüntü işleme teknikleri ile elde edilen yüzey görüntüleri yorumlanarak partikül boyutunun malzemelerin erozyon oranına ve erozyon davranışına olan etkileri irdelenecektir. Bölüm içerisinde bir çok görüntü verilerek farklı partikül çarpma açıları ve partikül püskürtme basınçlarında partikül boyutunun etkisi açıklanacaktır.

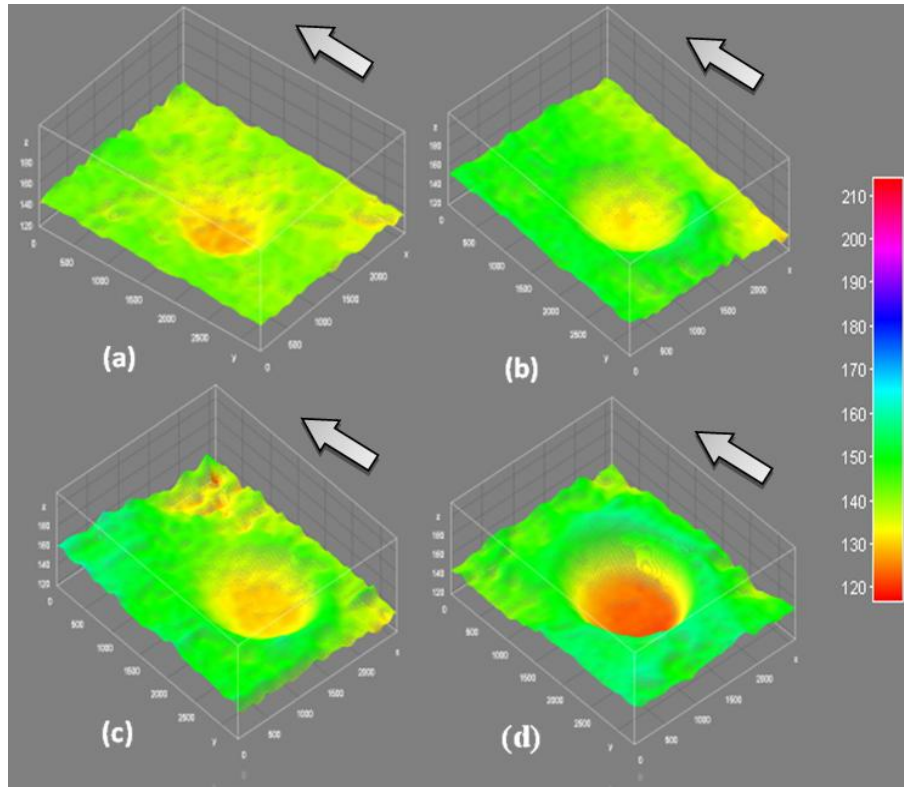
Şekil 7.61' de erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül boyutuna bağlı değişimi verilmiştir. Şekilde verilen grafik incelendiğinde partikül boyutunun küçülmesi ile erozyon oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 7.61. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül boyutuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 1,5 bar, partikül çarpma açısı: 60°)

Şekil 7.61' de verilen aşınma yüzey görüntüleri incelendiğinde 1,5 bar basınçta 60° partikül çarpma açısında 20-40 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numune

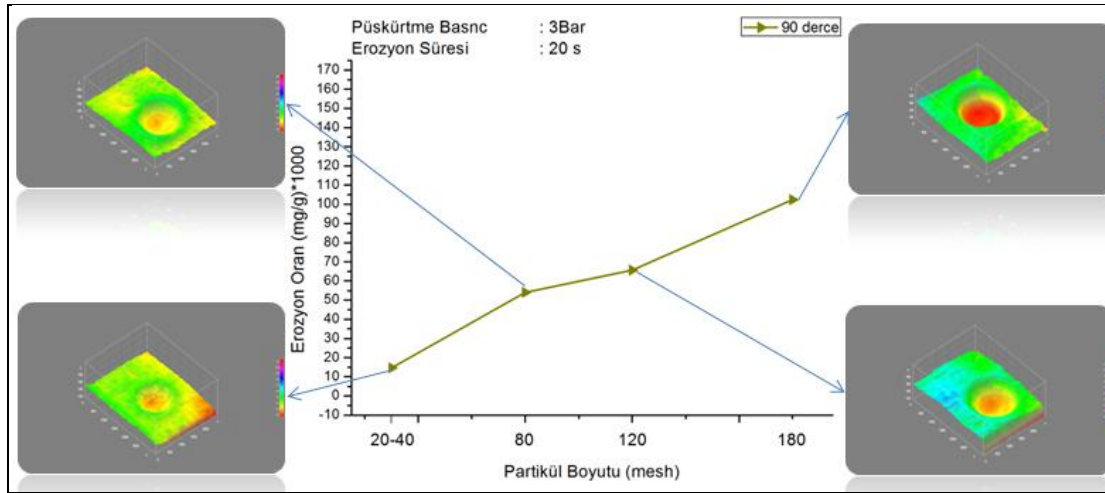
yüzeyinde çok küçük bir aşınma izinin olduğu görülmektedir. Bu parametreler için erozyon oranının da çok düşük olduğu dikkate alındığında oluşan aşınma izi görüntüsü ile erozyon oranının örtüştüğü söylenebilir. Aynı partikül çarpma açısı ve püskürtme basıncında 80 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan yüzeyin görüntüsüne bakıldığında partikül boyutunun küçülmesi ile daha belirgin bir aşınma izinin olduğu gözlenmektedir. Aynı şekilde partikül boyutunun daha fazla küçültülmesi ile aşınma izinin alanının ve derinliğinin artış gösterdiği Şekil 7.61’ de net bir şekilde görülmektedir. Bu değişimin daha net gözlenebilmesi için Şekil 7.62’ de Şekil 7.61’ de verilen görüntüler daha büyük formatta verilmiştir. Şekiller incelendiğinde aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile partiküllerin oluşturduğu aşınma hasarının artış gösterdiği görülmektedir. Erozyon oranının da benzer şekilde partikül boyutunun azalmasına bağlı olarak artış gösterdiği göz önünde bulundurulduğunda aşınmış yüzeylerin görüntüleri ile erozyon oranının uyumluluğu olduğu söylenebilir.



Şekil 7.62. a) 20-40 mesh, b)80 mesh, c) 120 mesh, d)180 mesh partiküller ile 60° partikül çarpma açısı ve 1,5 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

Şekil 7.63 incelendiğinde 1,5 bar püskürtme basıncında büyük boyutta partiküller ile (20-40 ve 80 mesh) malzeme yüzeyinde çok düşük miktarda hasar oluştuğu gözlenmektedir. Bu durum bu parametreler için malzemelerin erozyon oranları incelendiğinde de görülmektedir. Bu durumun 1,5 bar püskürtme basıncında bu boyuttaki partiküllerin efektif bir şekilde hızlandırılmamalarından kaynaklanmaktadır. Bölüm 6.1 incelendiğinde 20-40 mesh partiküllerin 1,5 bar püskürtme basıncında kütleli debileri ve partikül çarpma hızları çok düşük olduğu görülmektedir. Bu durum aşındırıcı partiküllerin düşük hızlarda malzeme yüzeyinde etkin bir aşınma gerçekleştirememelerinden kaynaklanmaktadır.

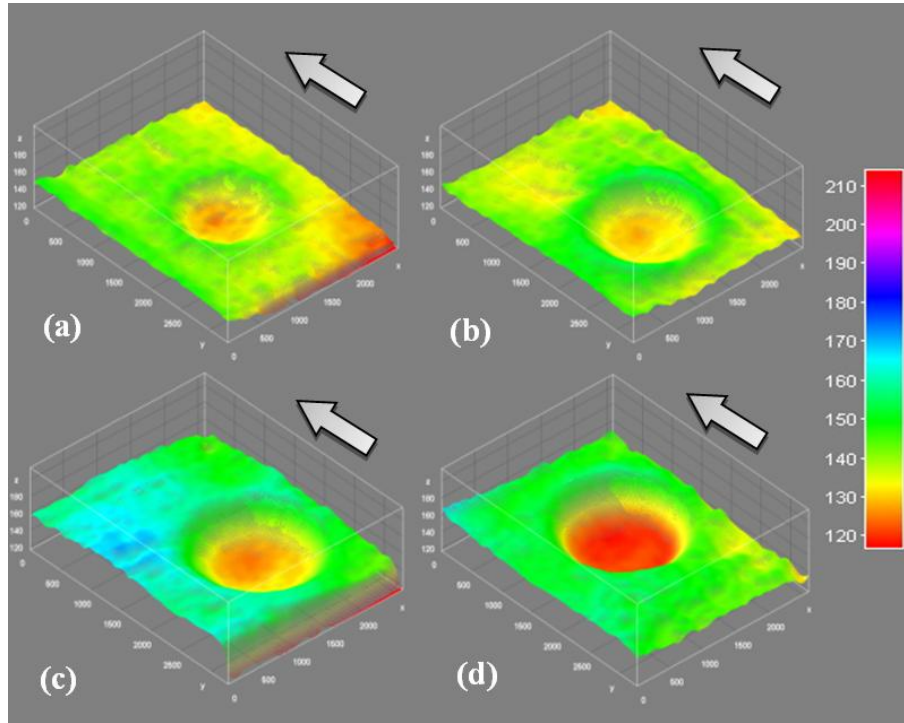
Şekil 7.63' de erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül boyutuna bağlı değişimi verilmiştir. Şekilde verilen grafik incelendiğinde partikül boyutunun küçülmesi ile erozyon oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 7.63. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül boyutuna bağlı değişimi(püskürtme basıncı: 3 bar, partikül çarpma açısı: 90°)

Şekil 7.63' te verilen aşınma yüzey görüntüleri incelendiğinde 3 bar basınçta 90° partikül çarpma açısında farklı boyuttaki partiküller ile aşındırılan numunelerin görüntüleri erozyon oranının partikül boyutuna bağlı değişimini gösteren grafik üzerinde gösterilmiştir. Görüntülerde 80 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numune yüzeyinde meydana gelen aşınma izi ile 120 mesh boyutundaki partikül ile aşındırılan numunenin aşınma izi karşılaştırıldığında, 120 mesh ile aşındırılan malzemedeki aşınma izinin daha fazla olduğu görüntüden anlaşılmaktadır. Grafik incelendiğinde 120 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül ile aşındırılan malzemedeki

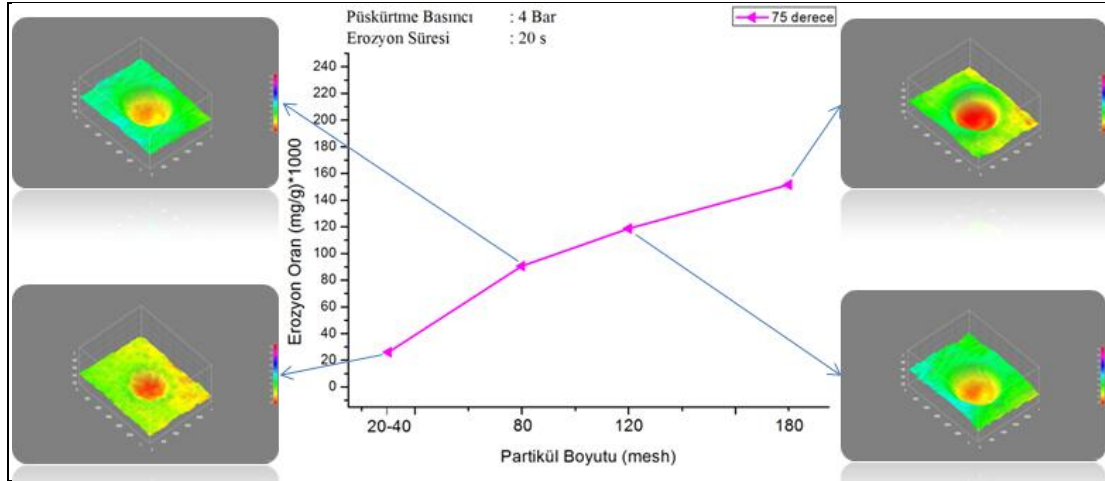
80 mesh boyutunda aşındırıcı partikül ile aşındırılan malzemeye göre erozyon oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu parametreler için oluşan aşınma izi görüntüsü ile erozyon oranının örtüştüğü söylenebilir. Aynı partikül çarpma açısı ve püskürtme basıncında 180 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan yüzeyin görüntüsüne bakıldığında ise partikül boyutunun küçülmesi ile daha belirgin bir aşınma izinin oluştuğu gözlenmektedir. Aynı şekilde partikül boyutunun daha fazla küçültülmesi ile aşınma izinin alanının ve derinliğinin artış gösterdiği Şekil 7.63' te net bir şekilde görülmektedir. Bu değişimin daha net gözlenebilmesi için Şekil 7.64' te Şekil 7.63' te verilen görüntüler daha büyük formatta verilmiştir.



Şekil 7.64. a) 20-40 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh, d) 180 mesh partiküller ile 90° partikül çarpma açısı ve 3 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

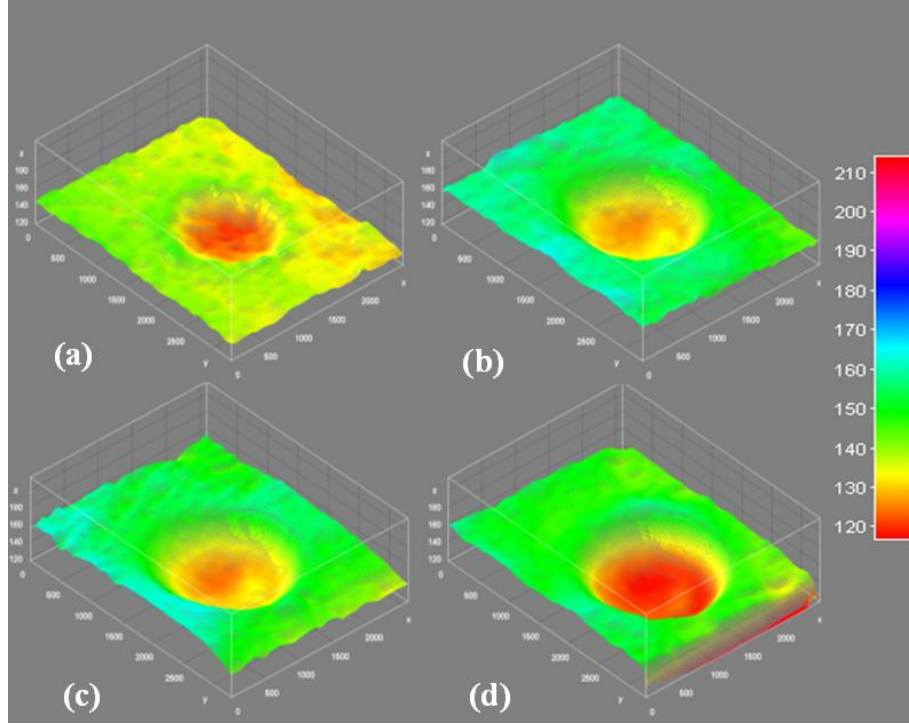
Şekil 7.64 incelendiğinde aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile partiküllerin oluşturduğu aşınma hasarının artış gösterdiği görülmektedir. Erozyon oranının da benzer şekilde partikül boyutunun azalmasına bağlı olarak artış gösterdiği göz önünde bulundurulduğunda aşınmış yüzeylerin görüntüleri ile erozyon oranının uyumlu olduğu söylenebilir.

Şekil 7.65’ te de erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül boyutuna bağlı değişimi verilmiştir. Şekilde verilen grafik incelendiğinde partikül boyutunun küçülmesi ile erozyon oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 7.65. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin partikül boyutuna bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 4 bar, partikül çarpma açısı: 75 °)

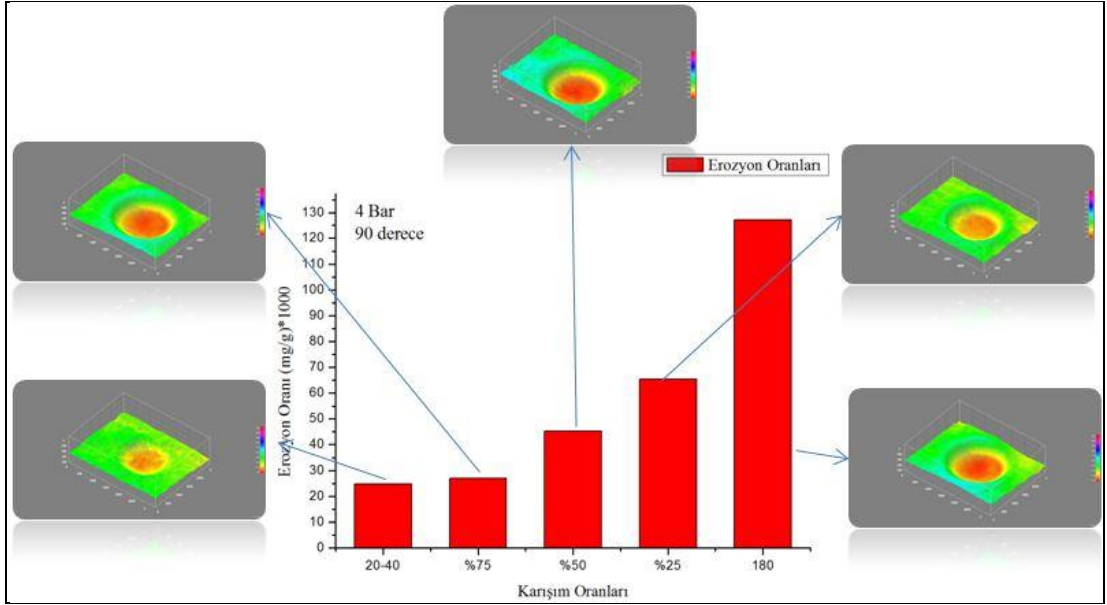
Şekil 7.65’ te verilen aşınma yüzey görüntüleri incelendiğinde 4 bar basınçta 75° partikül çarpma açısında farklı boyuttaki partiküller ile aşındırılan numunelerin görüntüleri erozyon oranının partikül boyutuna bağlı değişimini gösteren grafik üzerinde gösterilmiştir. Görüntülerde 20-40 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan numune yüzeyinde meydana gelen aşınma izi ile 180 mesh boyutundaki partikül ile aşındırılan numunenin aşınma izi karşılaştırıldığında aşınma izinin ve aşınma derinliğinin 180 mesh ile aşındırılan numunede çok daha fazla olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Grafik incelendiğinde ise 180 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül ile aşındırılan numunede 20-40 mesh boyutundaki aşındırıcı partikül ile aşındırılan numuneye göre erozyon oranının çok daha fazla olduğu görülmektedir. Bu parametrelerde oluşan aşınma izi görüntüsü ile erozyon oranının örtüştüğü söylenebilir. Şekil 7.65’ te partikül boyutunun küçültülmesi ile aşınma izinin alanının ve derinliğinin artış gösterdiği net bir şekilde görülmektedir. Bu değişimin daha net gözlenebilmesi için Şekil 7.66’ da arasında Şekil 7.65’ te verilen görüntüler daha büyük formatta verilmiştir.



Şekil 7.66. a) 20-40 mesh, b) 80 mesh, c) 120 mesh, d) 180 mesh partiküller ile 75° partikül çarpma açısı ve 4 bar püskürtme basıncında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

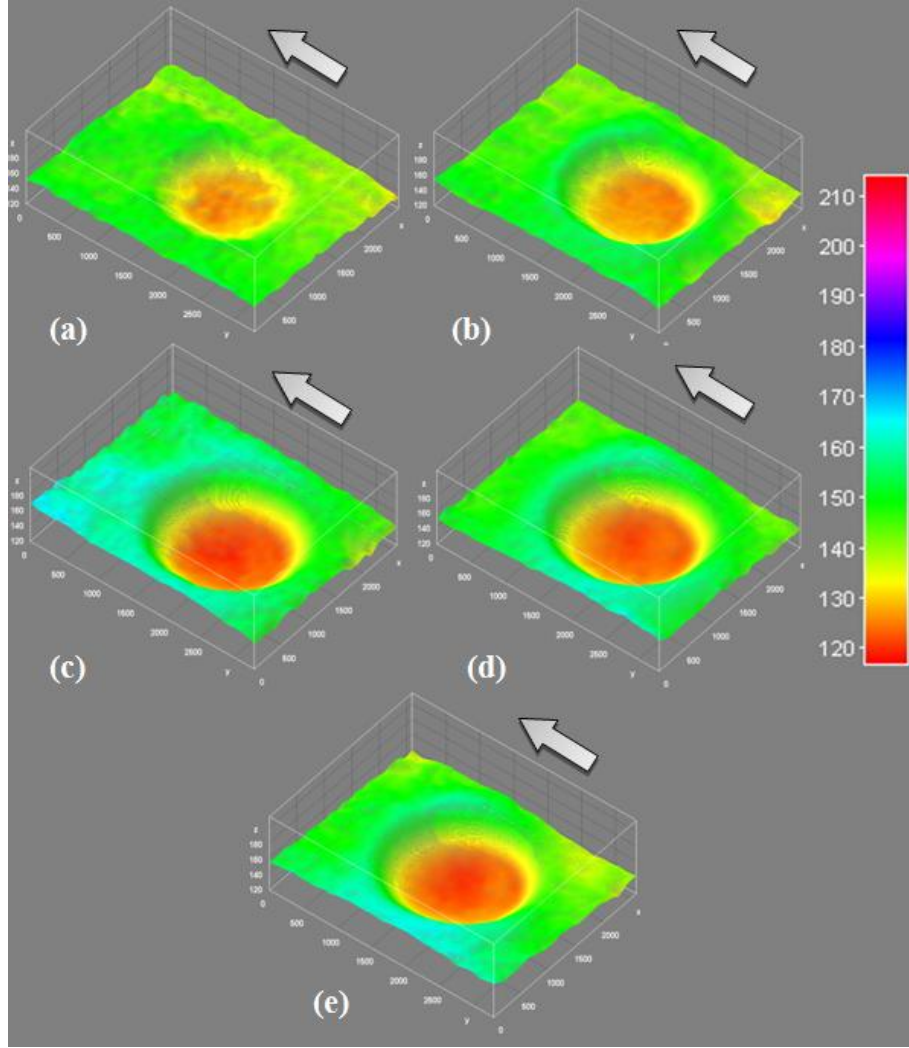
7.7.4. Yüzey morfolojisinin partikül karışımlarına bağlı değişimi

Bu bölüm içerisinde partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının eroziv aşınmasına etkileri görüntü işleme yöntemi ile elde edilen yüzey morfolojileri ile açıklanacaktır. Şekil 7.67’ de partikül karışımlarının erozyon oranları ile yüzey morfolojileri bir arada verilmiştir. Grafikte yatay eksenle sırasıyla 20-40 meshlik partiküllerin bireysel kullanımları, % 75 20-40 mesh % 25 180 mesh, % 50 20-40 mesh % 50 180 mesh, % 25 20-40 mesh % 75 180 mesh ve 180 meshlik partiküllerin bireysel kullanımları ile elde edilen veriler verilmiştir. Şekil incelendiğinde partikül karışım oranına bağlı olarak yüzey morfolojisinde önemli bir değişimin meydana geldiği görülmektedir.



Şekil 7.67. Erozyon oranının ve malzeme yüzey morfolojisinin aşındırıcı partikül karışımlarına bağlı değişimi (püskürtme basıncı: 4 bar, partikül çarpma açısı: 90°)

Şekil 7.67’ de karışım içerisindeki küçük partiküllerin artması ile birlikte yüzeyde daha büyük bir hasarın meydana geldiği söylenebilir. 20-40 meshlik partiküllerin karışım içerisindeki oranının artması oluşan hasar izinin küçülmesine yol açmaktadır. Bu noktada erozyon oranı sonuçları ile yüzey morfolojilerinin uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır. Şekil 7.68’ de karışımların yüzey görüntüleri daha rahat karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla daha yüksek büyütmede verilmiştir. Şekil incelendiğinde karışım içerisindeki büyük veya küçük partikül oranındaki artışa bağlı olarak yüzey morfolojisinin küçük veya büyük partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumunda elde edilen morfolojilere benzedikleri görülmektedir. Buna karşın daha önce gerçekleştirilen SEM ve yüzey pürüzlülük çalışmalarında partikül karışımlarının malzemede çok farklı bir yüzey morfolojisine neden oldukları sonucuna varılmıştır. Bu noktada Şekil 7.68’ de verilen makro yüzey görüntüleri ile bu farklılıkların gözlenebilmesi derinlemesine incelenebilmesi çok zordur. Buna karşın partikül karışımlarının meydana getirdikleri yüzey morfolojilerinin tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme metodu ile genel hatları ile incelenebilecekleri söylenebilir.



Şekil 7.68. a) 20-40 mesh, b) %75, c) %50, d) %25, e) 180 mesh, 4bar püskürtme basıncında, 90 derece çarpma açısında aşındırılmış Ti6Al4V malzemenin yüzey morfolojisi

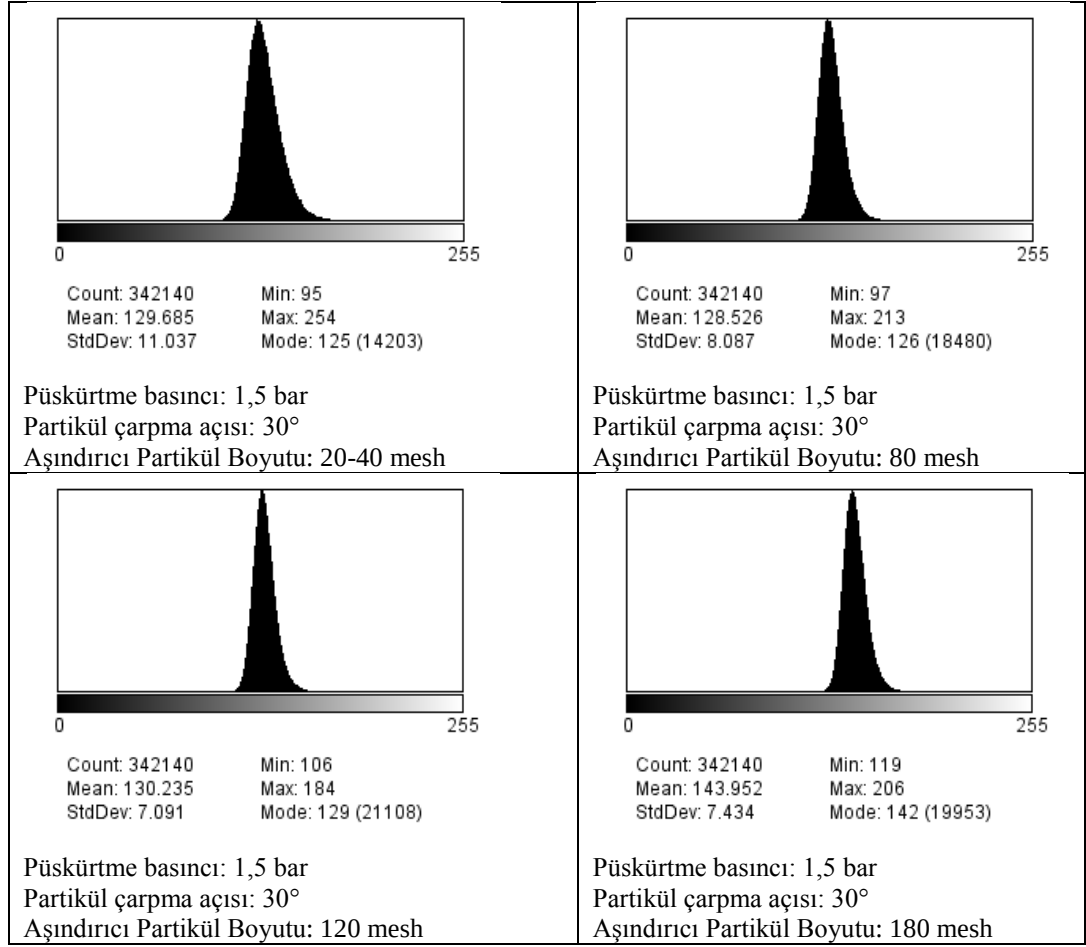
7.8. Ti6Al4V Alaşımının Katı Partikül Erozyonu Davranışının Piksel sayısı-Grilik değeri Eğrileri Yardımıyla İncelenmesi

Bu bölüm içerisinde Ti6Al4V alaşımının eroziv aşınma davranışının partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımlarına bağlı olarak değişimleri görüntü işleme yöntemleri ile elde edilen grafikler incelenerek yorumlanacaktır. Görüntü işleme yönteminin uygulanması ile ilgili detaylar Deneysel Çalışmalar bölümü içerisinde “Yöntem” başlığı altında anlatılmıştır. Ancak aşağıda bu bölümde verilen grafiklerin daha rahat anlaşılabilmesi için görüntü işleme yöntemi ile elde edilen histogram eğrileri ile ilgili genel bilgiler verilecektir.

Deneysel çalışmalar süresince farklı parametreler altında aşındırılmış numunelerin yüzeyleri görüntü işleme yöntemi ile incelenmiş ve görüntü işleme programı ile her numune için Şekil 7.69’ da verilen grafikler elde edilmiştir. Şekil 7.69’ de verilen grafiklerin hemen altında numunelerin aşındırıldığı erozif aşınma parametreleri verilmiştir. Şekil 7.69’ da verilen piksel sayısı–grilik değeri eğrilerinde x eksenini grilik değerini, y eksenini ise her bir grilik değeri için sayılan piksel sayısını ifade etmektedir. Grafiklerde x ekseninde görülen “0” değeri en siyah grilik değerini, “255” değeri ise en beyaz grilik değerini ifade etmektedir. Diğer bir ifade ile numunelerin grilik değerleri “0” (siyah) ve “255” (beyaz) arasında değişim göstermektedir. Görüntü işleme programı her numunede seçilen bölge için (aşınmanın gerçekleştiği alan) hesaplama yaparak piksel sayısı-grilik değeri eğrilerini çizmektedir. Ayrıca görüntü işleme programı; toplam sayılan piksel sayısı (count), ortalama grilik değeri (mean), minimum grilik değeri (min), maksimum grilik değeri (max), grilik değerlerinin standart sapması (StdDev) ve en fazla sayılan grilik değerinin değeri ve toplam miktarı (mode) bilgilerini hesaplayarak histogramların altında vermektedir. Tez çalışması kapsamında tüm bu veriler kullanılarak Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının farklı parametreler altında karakterizasyonu amaçlanmıştır.

Şekil 7.69’ da püskürtme basıncı ve partikül çarpma açısı sabit tutularak 20-40 mesh, 80 mesh, 120 mesh ve 180 mesh partiküller ile aşındırılan numunelerin grafikleri verilerek partikül boyutunun piksel sayısı-grilik değeri eğrilerin üzerindeki etkisinin irdelenmesi amaçlanmıştır. Ancak Şekil 7.69 incelendiğinde bu verilerin bu şekilde karşılaştırılmasının çok zor ve karmaşık olduğu görülmektedir.

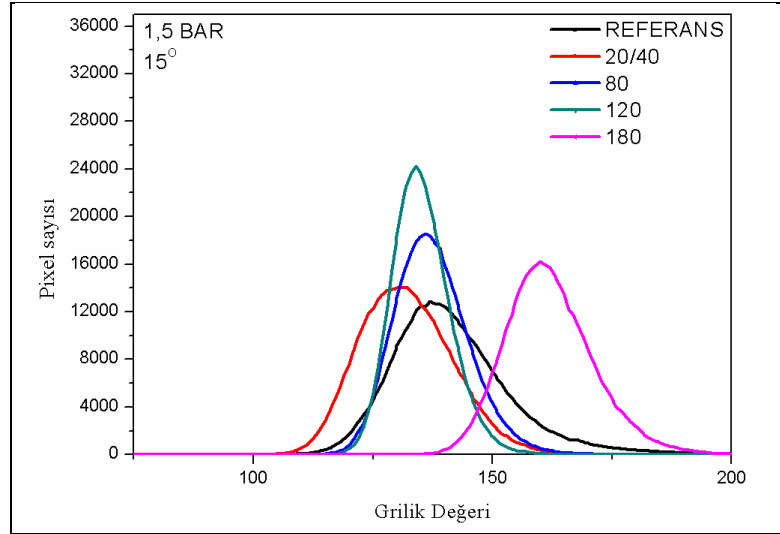
Şekil 7.69 incelendiğinde görüntü işleme programı ile çizilen piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin doğrudan kullanılmasının, partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımlarının bu eğriler üzerindeki etkilerinin tartışılması ve belirlenmesi aşamasında çok sağlıklı olmayacağı sonucuna varılmıştır.



Şekil 7.69. Görüntü işleme programı yardımıyla elde edilen işlenmemiş piksel sayısı-grilik değeri eğrileri

Görüntü işleme programı Şekil 7.69’ da verilen piksel sayısı-grilik değeri eğrileri ile birlikte taranan tüm alan için (aşınmanın gerçekleştiği alan) her bir grilik değeri için sayılan piksel sayılarını tablo halinde de verebilmektedir. Bu veriler kullanılarak Şekil 7.69’ da verilen grafikler yerine Şekil 7.70’ de verilen grafik çizilebilmektedir. Bu grafikte farklı numunelerin piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin aynı grafik üzerinde çizilmiş ve böylece farklı parametrelerin eğriler üzerinde meydana getirdiği değişimler çok rahat bir şekilde karşılaştırılabilmiştir. Şekil 7.70’ de 1,5 bar püskürtme basıncında 15° partikül çarpma açısında 20-40 mesh, 80 mesh, 120 mesh ve 180 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerin piksel sayısı-grilik değeri eğrileri aynı grafik içerisinde verilmiştir. Bu grafikler için de Şekil 7.69 için açıklanan tüm bilgiler geçerlidir. Ancak bu grafiklerin kullanılması Şekil 7.69’ da verilen işlenmemiş eğrilerin kullanılmasına kıyasla, partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma

davranışına etkilerinin incelenmesi aşamasında çok rahat bir karakterizasyon ve karşılaştırma yeteneği kazandırmıştır.



Şekil 7.70. Görüntü işleme verileri kullanılarak çizilen piksel sayısı-grilik değeri eğrileri

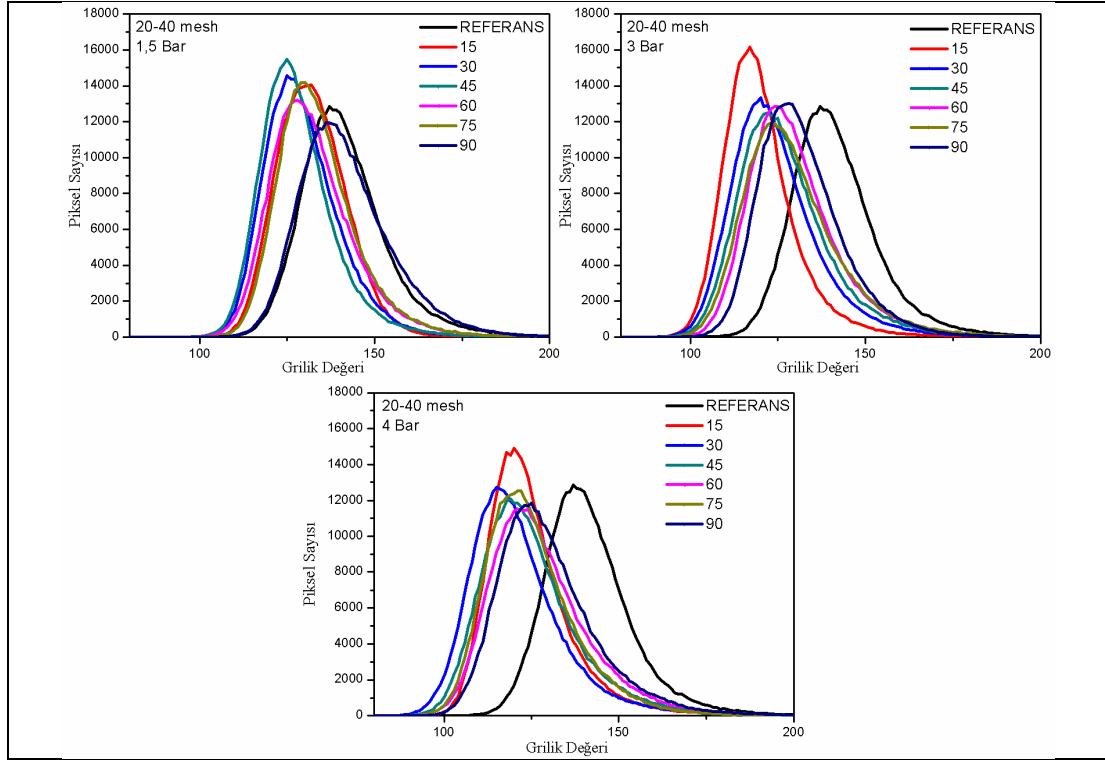
Bölüm içerisinde verilen grafiklerde x eksen (grilik değeri) skalasının genişliği (minimum grilik değeri ve maksimum grilik değeri) değiştirilerek histogramlarda meydana gelen değişimlerin daha net belirlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca tüm grafiklerde aşındırılmamış numunenin yüzeyine ait piksel sayısı-grilik değeri eğrisi verilerek (referans eğri), farklı parametrelerde aşındırılmış numunelerin yüzeylerindeki değişimlerin referans eğri ile karşılaştırılması amaçlanmıştır.

7.8.1. Partikül çarpma açısının etkisi

Bu bölüm içerisinde aşındırılmış yüzeylerin piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül çarpma açısına bağlı olarak değişimi incelenecektir. Bu eğriler üzerinden 4 farklı partikül boyutu ve 3 farklı basınç için partikül çarpma açısının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkileri belirlenecektir.

Şekil 7.71' de 20-40 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerde 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basıncında partikül çarpma açısına bağlı olarak piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde partikül çarpma açısının artışına bağlı olarak eğrilerin grilik değerlerinin sağa doğru ötelenerek referans değere (aşınmamış numuneye ait histogram eğrisi) yaklaştıkları görülmektedir. Eğrilerin maksimum piksel sayısı değerinin ise önemli bir değişimi göstermediği söylenebilir.

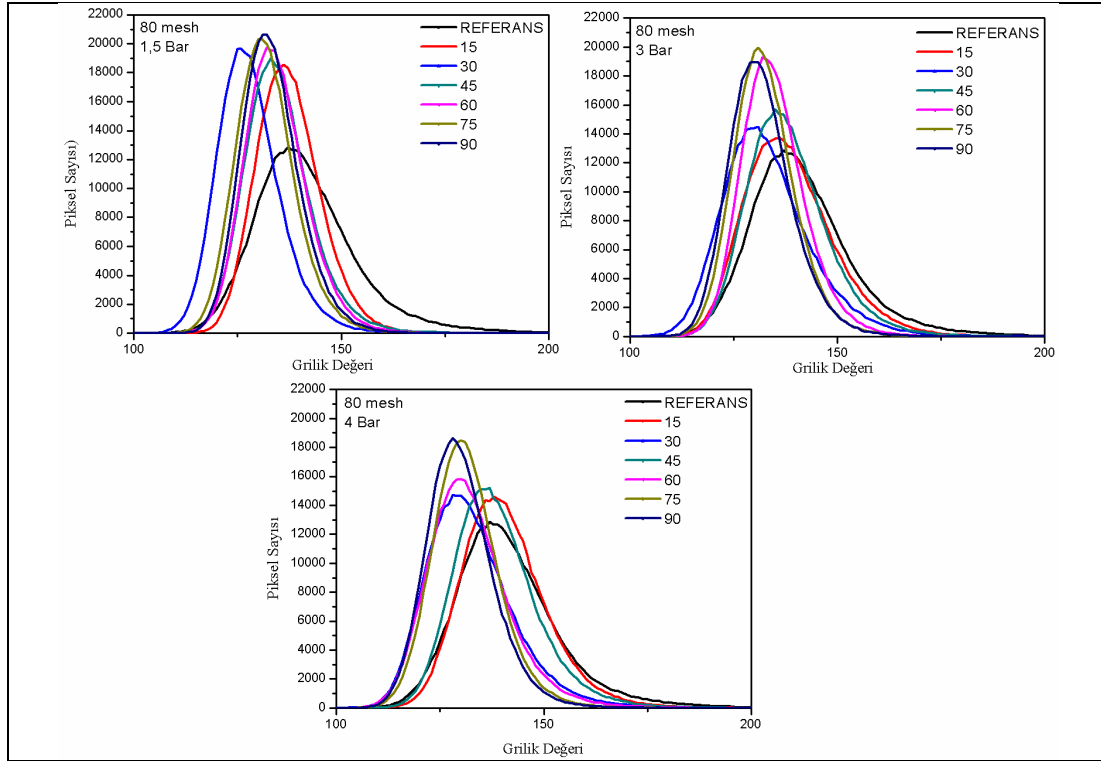
Aynı şekilde histogramların standart sapmalarının da tüm açı değerleri için yakın genişlikte olduğu görülmektedir. Bu sonuçların tüm basınç değerleri için geçerli olduğu söylenebilir. 20-40 meshlik partiküller için partikül çarpma açısının artışı ile birlikte eğrilerin sağa ötelendiği ve referansa yaklaştığı, ancak grilik değerinin standart sapma değerinde önemli bir değişiklik görülmediği belirlenmiştir.



Şekil 7.71. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)

Şekil 7.72’ de 80 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerde 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basıncında partikül çarpma açısına bağlı olarak piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin değişimi verilmiştir. Şekilde eğrilerin grilik değerlerinin partikül çarpma açısının artmasına bağlı olarak sağa doğru ötelendiği ve referans değere yaklaştığı görülmektedir. Bu partikül boyutu içinde eğrilerin standart sapma ve maksimum piksel sayısı değerlerinde önemli bir değişiklik görülmediği söylenebilir. Ancak 20-40 meshlik partiküller ile elde edilen eğriler ile kıyaslandığında (Şekil 7.71) 80 mesh partiküller ile aşındırılan numunelerde tüm açı ve basınç değerlerinde standart sapmanın daha az olduğu ve eğrilerde verilen grilik değerleri için sayılan piksel sayılarının önemli bir artış gösterdiği dikkat çekicidir. Bu konu ile ilgili bulgular

aşındırıcı partikül boyutunun etkisinin irdeleneceği bölümde daha detaylı bir şekilde tartışılacaktır.

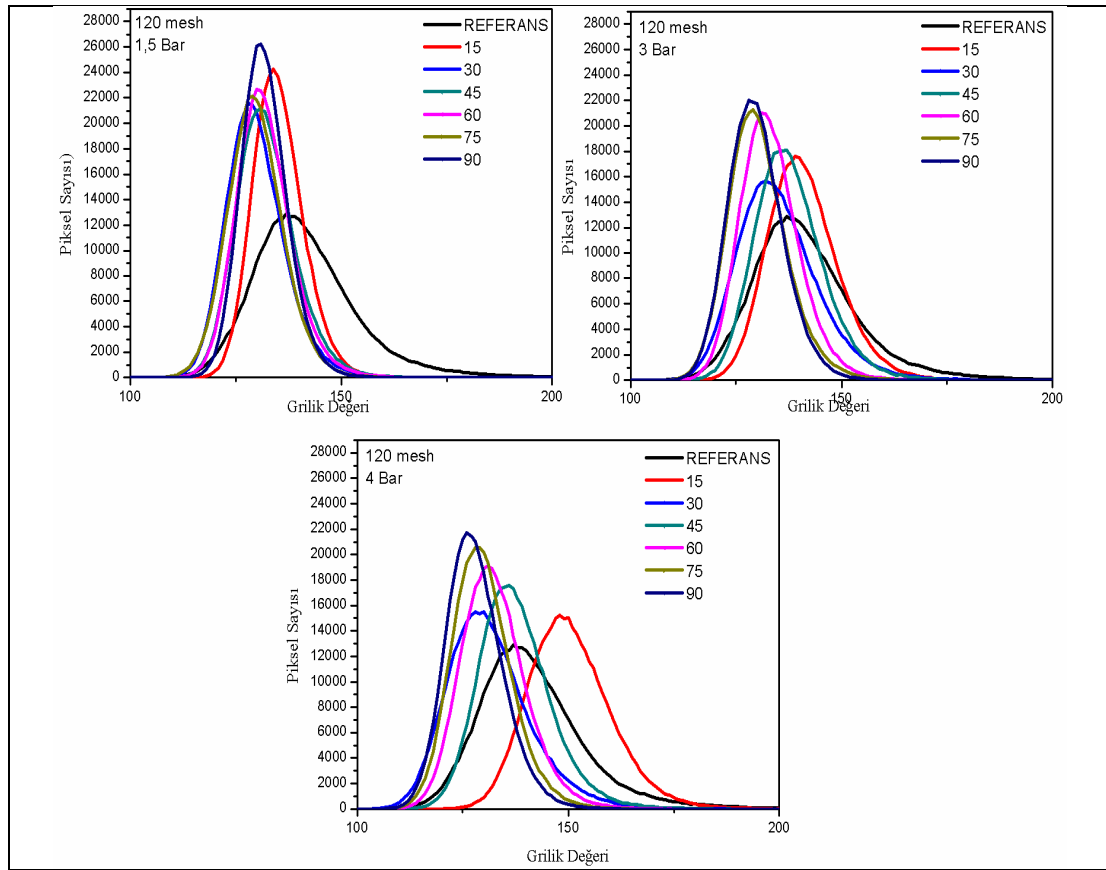


Şekil 7.72. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu 80 mesh)

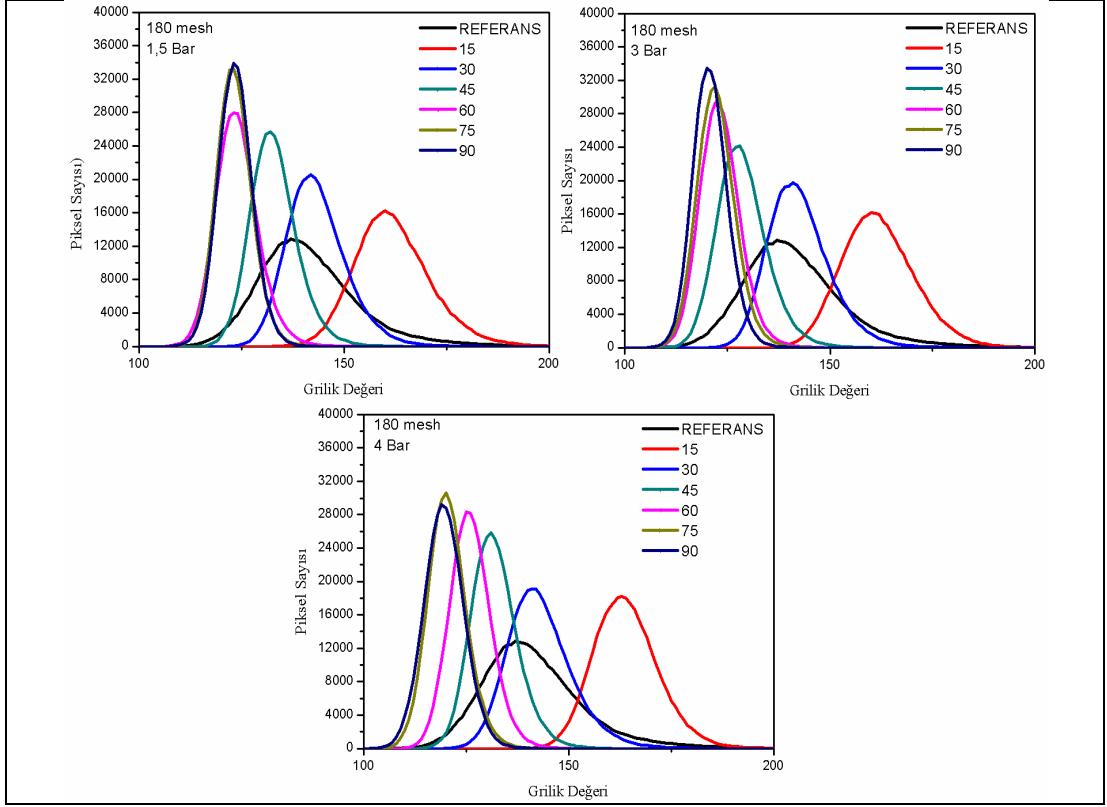
Şekil 7.73' te 120 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerde 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basıncında partikül çarpma açısına bağlı olarak piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde eğrilerin grilik değerlerinin partikül çarpma açısının artmasına bağlı olarak sola ötelendikleri ve referans değerden uzaklaştıkları görülmektedir. Özellikle 3 ve 4 bar püskürtme basıncı değerlerinde partikül çarpma açısına bağlı olarak piksel sayısı-grilik değeri histogramlarının düzenli bir şekilde sıralandıkları görülmektedir. Ancak bu durumun 20-40 mesh ve 80 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerde belirlene düzenin tam tersi şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Diğer yandan eğrilerin standart sapma değerlerinin partikül çarpma açısının artmasına bağlı olarak azaldığı, sayılan maksimum piksel sayısı değerlerinin ise arttığı gözlemlenmektedir.

Standart sapma değerinin azalması ve elde edilen grilik değerleri için sayılan piksel sayısının artması, erozif aşınma ile aşındırılan numunelerde aşınmanın gerçekleştiği yüzey üzerinde aynı miktarda aşınmış noktaların (piksellerin) artması ile

açıklanabilir. Bu durumda görüntü işleme yöntemi ile elde edilen grafikler ile yüzeyde oluşan morfoloji arasındaki ilişki ile ilgili yorum yapılabilir. Şekil 7.73’ te verilen grafikler incelendiğinde partikül çarpma açısının artışı ile birlikte aşınan malzeme alanında düşük açılara kıyasla daha homojen bir aşınma gerçekleştiği ve bu duruma bağlı olarak partikül çarpma artışına paralel olarak standart sapması daha düşük piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin elde edildiği söylenebilir. Yüzey üzerinde aynı grilik değerine sahip piksellerin sayılarının da artışı bu durumun bir sonucudur. Artan partikül çarpma açısına bağlı olarak aşınma alanı içerisinde daha homojen bir deformasyonun gerçekleştiği ve bu homojenliğe paralel olarak aşınma alanından daha düşük standart sapmalara sahip eğrilerin elde edildiği görülmektedir.



Şekil 7.73. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)



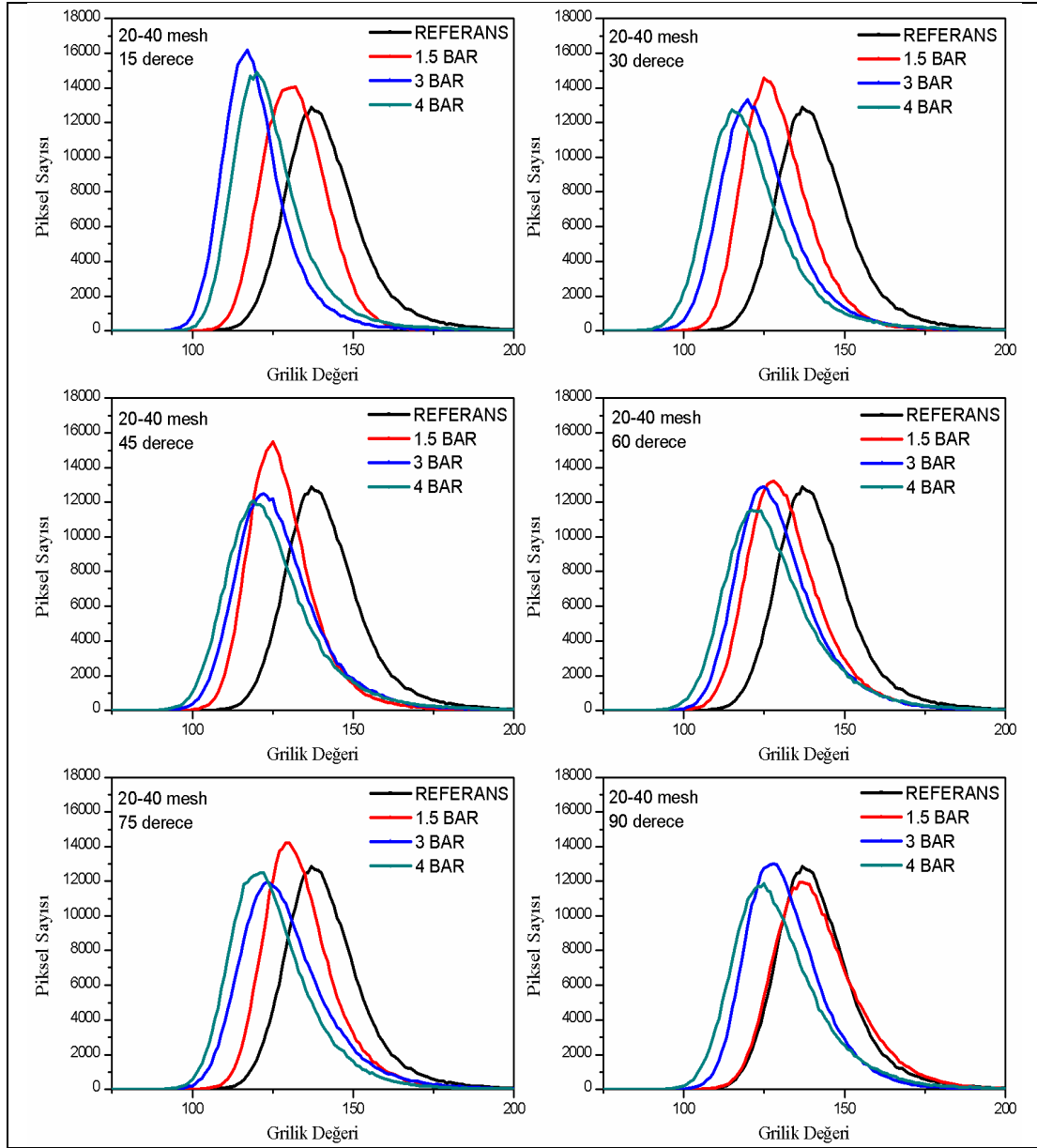
Şekil 7.74. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül çarpma açısına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)

Şekil 7.74’ te 180 mesh partiküller ile 1,5, 3 ve 4 bar püskürtme basıncı ile aşındırılan numunelerin görüntülerinin işlenmesi sonrasında elde edilen Griilik Değeri–Piksel Sayısı eğrileri verilmiştir. Eğriler üzerinde karşılaştırılma yapılabilmesi amacıyla aşınmamış (referans) numunenin de eğrisi verilmiştir. Eğriler incelendiğinde partikül çarpma açısının artışı ile birlikte histogramların sola ötelenerek görüntülerin grilik değerlerinin azaldığı görülmektedir. Buna ek olarak partikül çarpma açısının artışı ile birlikte grilik değerlerinin standart sapmasının azalarak histogramların sivrileştiği göze çarpmaktadır. Şekiller incelendiğinde bu korelasyonun tüm basınç değerlerinde aynı olduğu görülmektedir. Tüm basınç değerleri için histogramların aç değişimine bağlı olarak mükemmel bir uyum ile sola ötelendikleri ve aynı şekilde sayılan maksimum piksel değerlerinin de lineer bir şekilde artış gösterdiği görülmektedir.

7.8.2. Püskürtme basıncının etkisi

Bu bölüm içerisinde aşındırılmış yüzeylerin piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül püskürtme basıncına bağlı olarak değişimi incelenecektir. Şekil 7.75’ te 20-

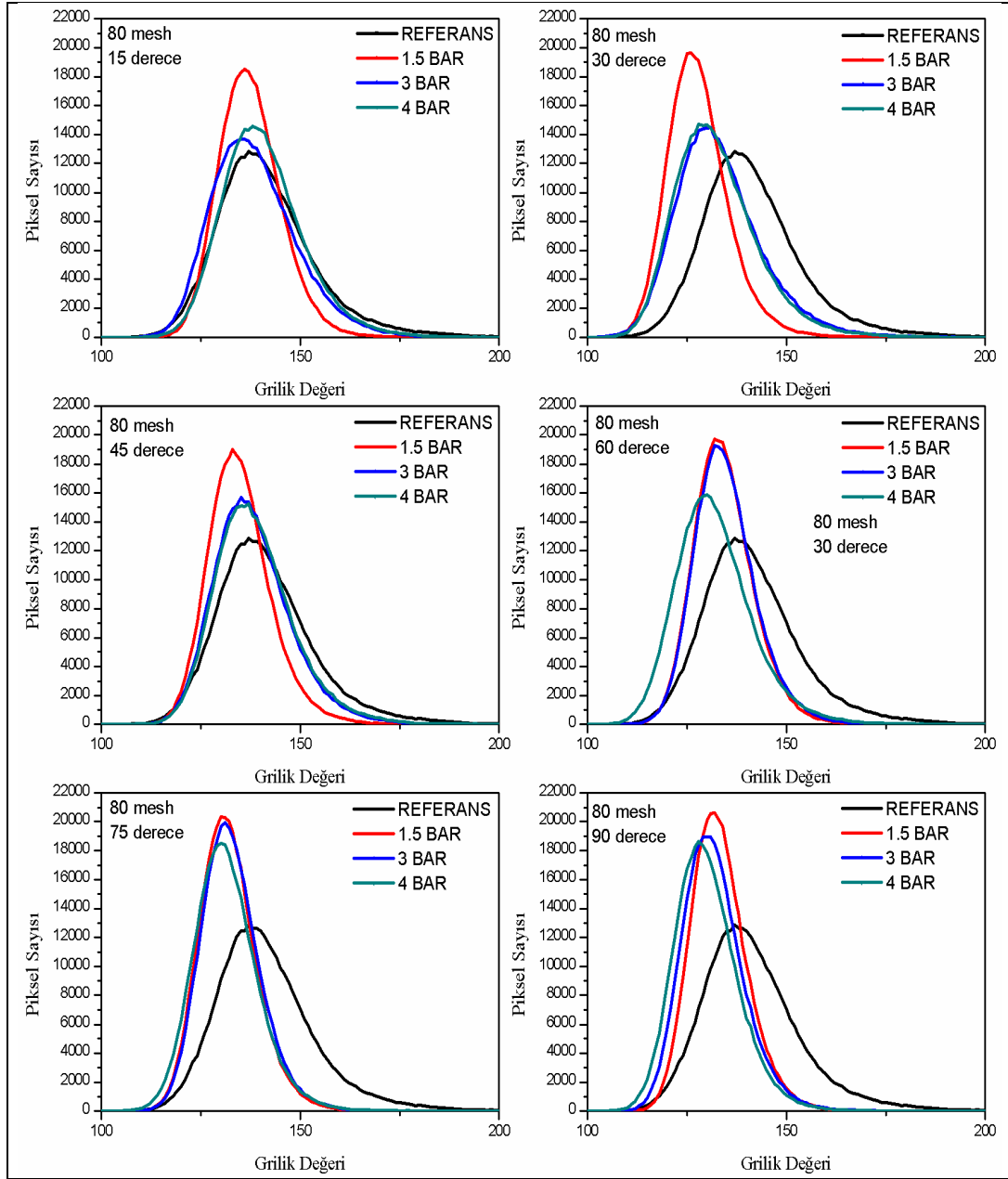
40 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerin 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° partikül çarpma açılarında grilik değeri-piksel sayısı eğrileri verilmiştir.



Şekil 7.75. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 20-40 mesh)

Şekil 7.75 incelendiğinde 15°, 30° ve 45° partikül çarpma açılarında püskürtme basıncına bağlı olarak eğrilerin sağa ötelenerek referans değere yaklaştıkları görülmektedir. Diğer yandan basınç artışı ile birlikte sayılan maksimum piksel sayısının azaldığı dikkat çekicidir. Şekil incelendiğinde 60°, 75° ve 90° partikül çarpma açılarında ise eğrilerin sağa doğru ötelenerek referans değerden uzaklaştıkları

görülmektedir. Ancak sayılan maksimum piksel sayısının düşük çarpma açlarına benzer bir şekilde basınç artışı ile birlikte azaldığı görülmektedir.



Şekil 7.76. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 80 mesh)

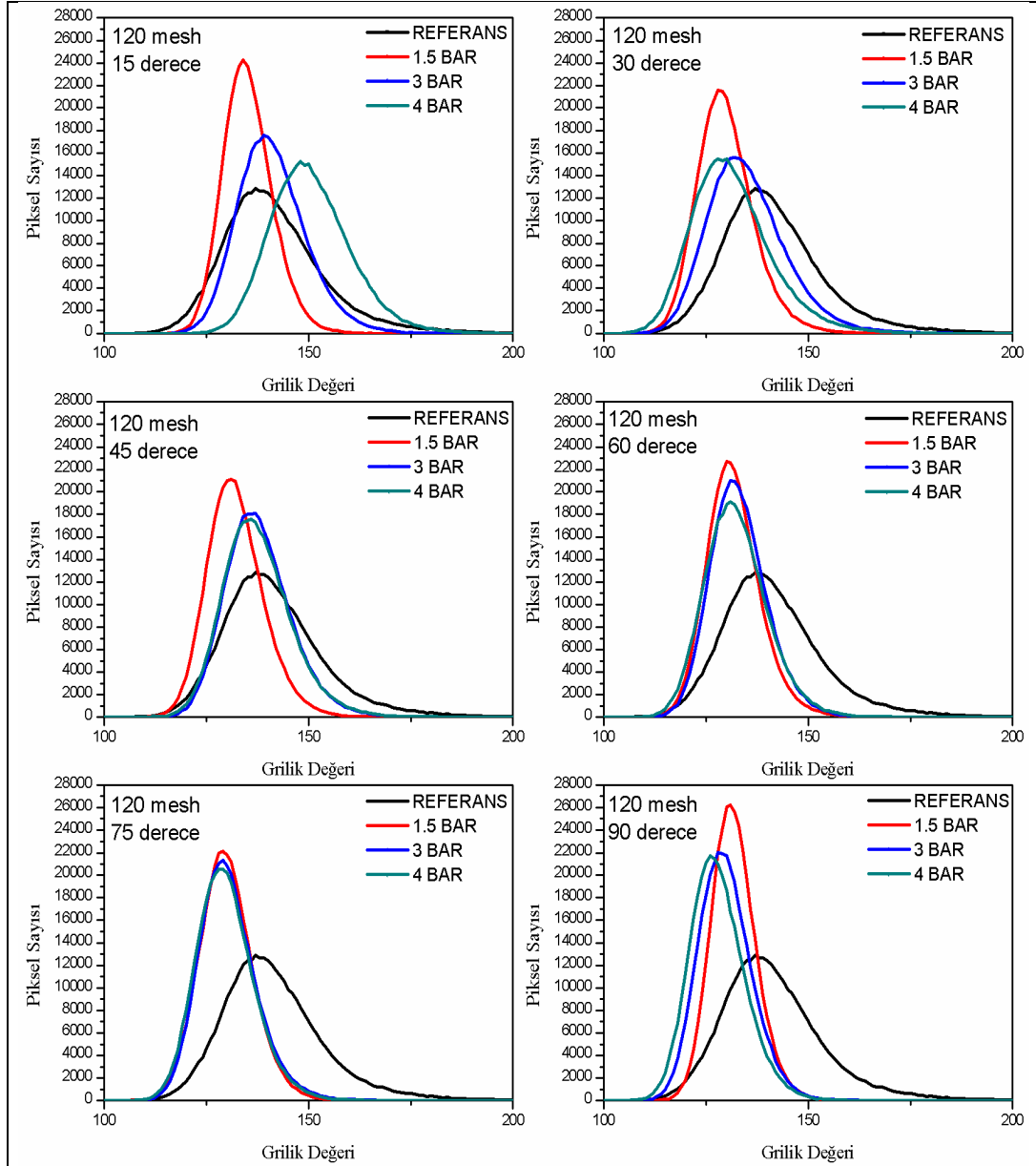
Şekil 7.76' da 80 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerin 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° partikül çarpma açılarında grilik değeri-piksel sayısı eğrileri verilmiştir. Şekil 7.76 incelendiğinde eğrilerdeki değişimin Şekil 7.75 için açıklanan değişimlere yakın olduğu söylenebilir.

Düşük çarpma açılarında (15° - 45°) eğrilerin sağa, normale yakın çarpma açılarında (60° - 90°) ise sola ötelendikleri, sayılan maksimum piksel sayısı değerlerinin ise tüm açı değerleri için basınç artışı ile birlikte azaldığı görülmektedir.

Şekil 7.75 ve 7.76 için yukarıda verilen sonuçlar irdelendiğinde basınç artışı ile birlikte numunenin daha fazla deformasyona uğradığı ve yüzeyde daha derin ve heterojen bir morfolojinin oluştuğu söylenebilir. Bu nedenle basınç artışı ile birlikte eğrilerde sayılan maksimum piksel sayısının azaldığı ve standart sapmanın arttığı gözlenmektedir.

Diğer yandan eğrilerde gözlenen korelasyonun düşük ve normale yakın çarpma açılarında farklılıklar göstermesi çok önemli bir ayrıntıdır. Daha önce verilen SEM analizlerinde Ti6Al4V alaşımının düşük çarpma açılarında mikro-sürme ve mikro-kesme erozif aşınma mekanizmaları, normale yakın çarpma açılarında ise plastik deformasyon ve mikro-çatlama erozif aşınma mekanizmaları ile aşındığı derinlemesine incelenmiş ve belirlenmiştir. Bölüm içerisinde partikül çarpma açısına bağlı olarak yüzey morfolojinin önemli değişimler gösterdiği belirlenmiş ve bu sonuçlar farklı modlarda (SE, BSE, açılı çekimler) verilen SEM fotoğrafları ile net bir şekilde açıklanmıştır. Bu noktada piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinde görülen korelasyonun (sola ve sağa ötelenme) partikül çarpma açısına bağlı olarak değişim göstermesi görüntü işleme ile yüzey morfolojisi ile ilgili güvenilir ve özgün bilgiler sağlanabildiğini göstermektedir.

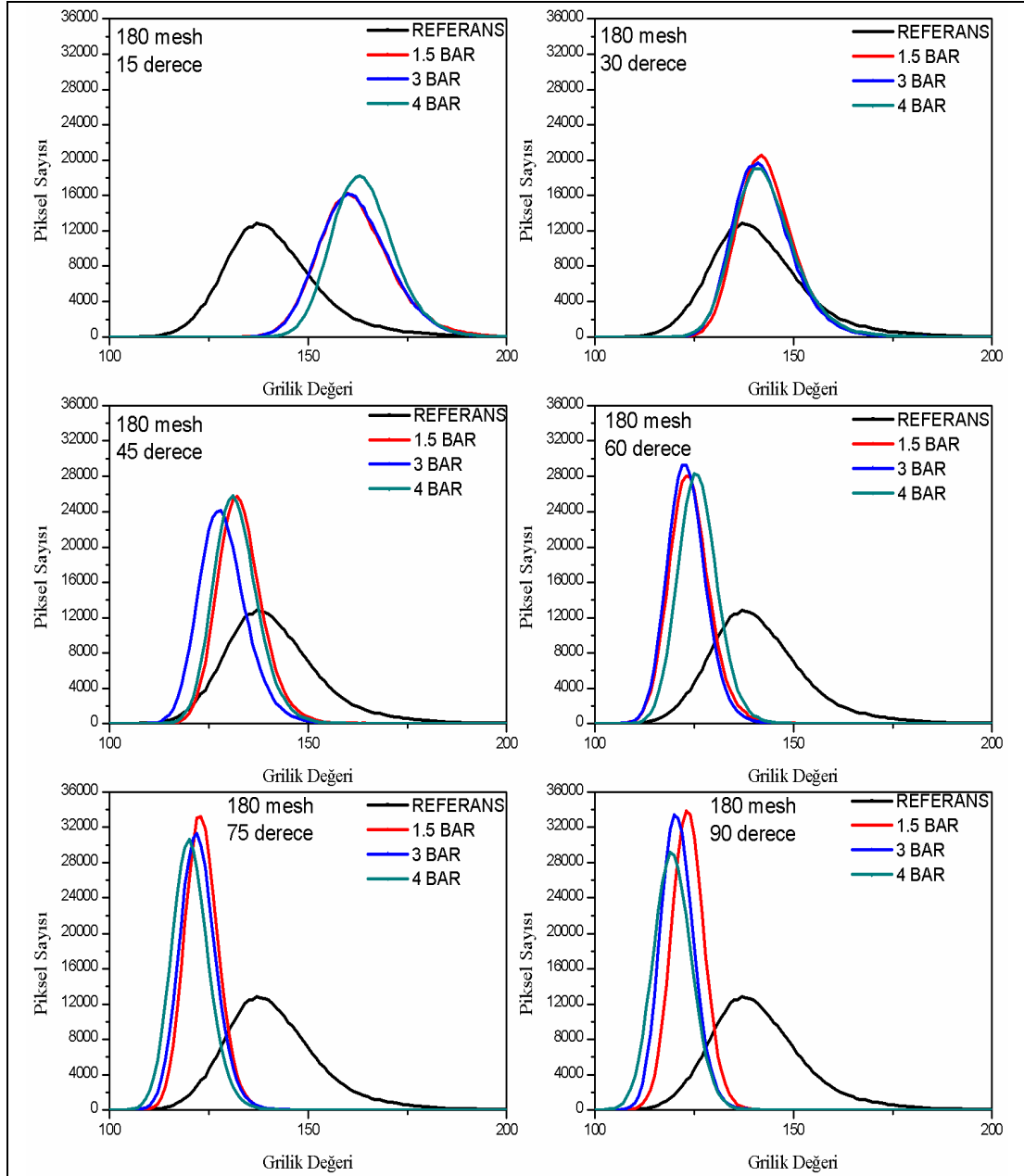
Şekil 7.77' de 120 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerin 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° partikül çarpma açılarında grilik değeri-piksel sayısı eğrileri verilmiştir. Şekil incelendiğinde Şekil 7.75 ve 7.76' ya benzer bir şekilde eğrilerin düşük çarpma açılarında sağa, normale yakın çarpma açılarında ise sola doğru ötelendikleri görülmektedir. Sayılan maksimum piksel sayısı değerinin ise tüm açı değerlerinde basınç artışı ile birlikte azaldığı ve standart sapma değerinin artış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 7.77. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 120 mesh)

Şekil 7.78' de 180 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelerin 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° partikül çarpma açılarında grilik değeri-piksel sayısı eğrileri verilmiştir. Şekil incelendiğinde 20-40, 80 ve 120 meshlik partiküller ile aşındırılan numuneler için verilen şekillere kıyasla, eğrilerin genel olarak tüm açı değerleri için basınç artışı ile birlikte sağa doğru ötelendikleri görülmektedir. Eğrilerin sayılan maksimum piksel sayılarının ise basınç artışı ile azaldığı ve standart sapmalarının arttığı görülmektedir. Ancak bu farklılıkların diğer partiküllere kıyasla daha düşük oranda gerçekleştiği dikkat çekicidir. Bu durum bu partikül boyutu için malzeme yüzey

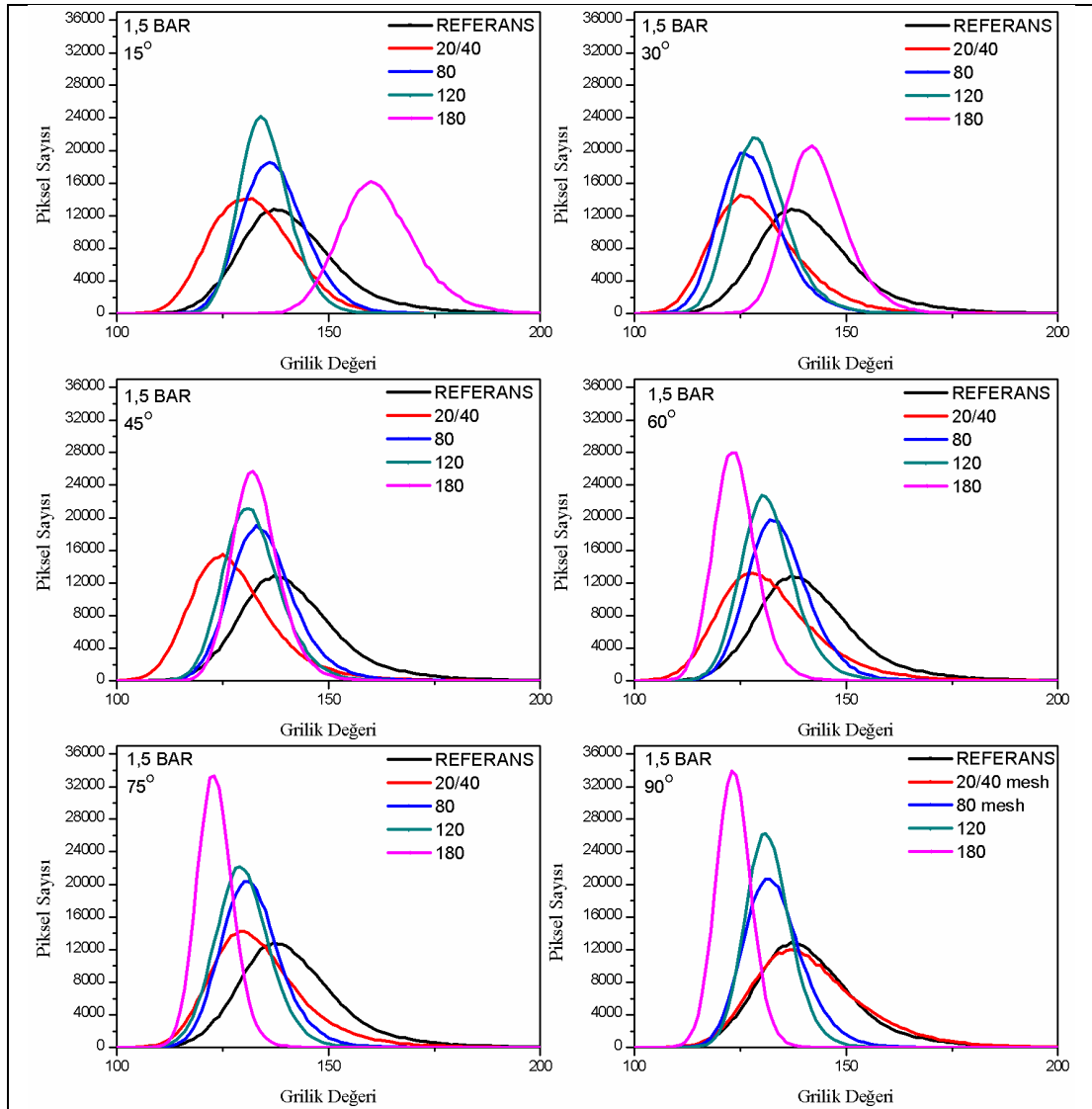
morfolojisinin diğer partiküllere kıyasla önemli farklılıklar göstermesi ile açıklanabilir. Bu durum ile ilgili detaylı bilgiler SEM incelemeleri esnasında anlatılmıştır. Ayrıca bir sonraki bölümde partikül boyutunun piksel sayısı-grilik değeri eğrileri üzerindeki etkileri derinlemesine anlatılacaktır.



Şekil 7.78. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül püskürtme basıncına bağlı değişimi (Aşındırıcı partikül boyutu: 180 mesh)

7.8.3. Partikül boyutunun etkileri

Bu bölüm içerisinde partikül boyutunun piksel sayısı-grilik değeri eğrilerine olan etkileri irdelenecektir. Partikül boyutunun etkilerinin daha rahat anlaşılabilmesi amacıyla deneysel çalışmalarda kullanılan tüm partikül çarpma açıları ve püskürtme basınçlarında 4 farklı partiküle ait piksel sayısı-grilik değeri eğrileri referans numuneye ait (aşındırılmamış numune) eğriler ile birlikte verilmiştir. Şekil 7.79’ da 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° partikül çarpma açılarındaki 1,5 bar püskürtme basıncında, Şekil 7.80’ de aynı açı değerlerinde 3 bar püskürtme basıncında, şekil 7.81’ de ise 4 bar püskürtme basıncında aşındırılan numunelerin yüzeylerinin grilik değeri-piksel sayısı eğrileri verilmiştir.



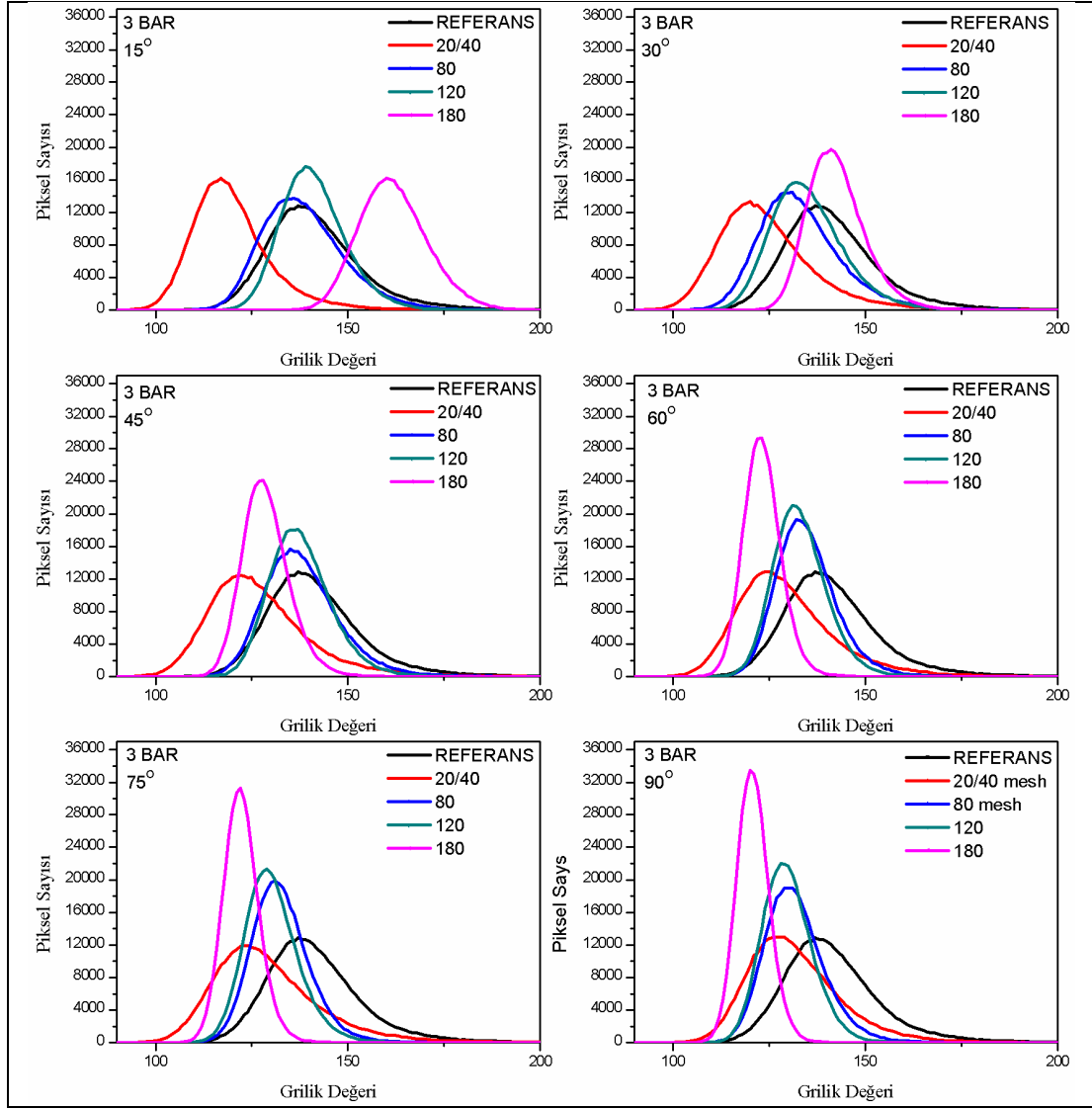
Şekil 7.79. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül boyutuna bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 1.5 Bar)

Şekiller incelendiğinde tüm basınç değerlerinde düşük çarpma açılarında partikül boyutu artışı ile birlikte eğrilerin sola doğru ötelendikleri görülmektedir. Normale yakın çarpma açılarında ise bu korelasyonun değişerek partikül boyutu artışına paralel olarak eğrilerin sağa doğru ötelendikleri görülmektedir.

Tüm grafiklerde 20-40 mesh ile aşındırılan numunelerin maksimum piksel sayısının 80, 120 ve 180 mesh ile aşındırılan numunelere göre çok düşük, standart sapmasının ise çok yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Partikül boyutunun azalması ile birlikte tüm açı ve basınç değerlerinde piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin standart sapma değerlerinin azaldığı, sayılan maksimum piksel sayısının ise artış gösterdiği görülmektedir.

Şekil 7.79 incelendiğinde özellikle normale yakın partikül çarpma açılarında partikül boyutu artışına bağlı olarak eğrilerin düzenli bir şekilde sağa ötelendikleri ve ortalama grilik değerlerinin artış gösterdiği görülmektedir. Şekil 7.79’ da 90° partikül çarpma açısında 20-40 mesh partiküller ile aşındırılan numunenin yüzeyine ait piksel sayısı-grilik değeri eğrisinin referans eğri ile neredeyse örtüştüğü görülmektedir. Bu parametreler için Ti6Al4V malzemenin neredeyse hiç aşınmadığı erozyon oranı ile ilgili bölümde açıklanmıştır. Bu noktada numunenin yüzey morfolojisinde düşük oranda aşınmaya bağlı olarak çok küçük bir değişim meydana geldiği ve bu yüzden bu eğrinin referans eğriye çok yakın olduğu söylenebilir.

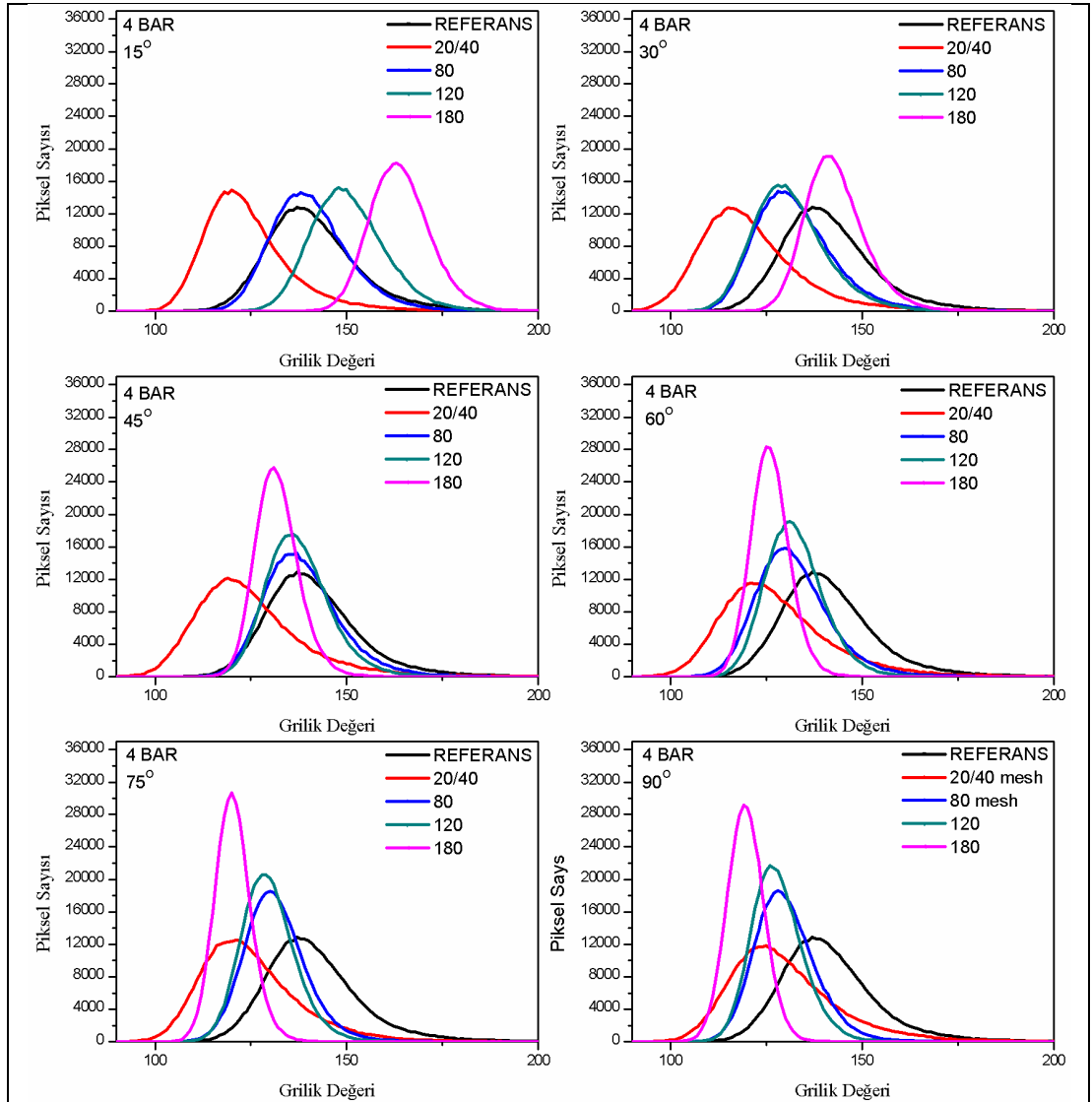
Şekil 7.79, 7.80 ve 7.81 incelendiğinde partikül boyutunun aşındırılmış numunelerin piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinde önemli değişimler meydana getirdiği sonucuna varılmıştır. Partikül boyutunun değişimine bağlı olarak eğrilerin grilik değerlerinin düşük çarpma açıları için ayrı normale yakın çarpma açıları için ayrı bir davranış gösterdiği söylenebilir. Bu durumun daha önce de anlatıldığı gibi malzeme de partikül çarpma açısının değişimine bağlı olarak görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının değişiklik göstermesi ve bunun sonucunda malzemenin yüzey morfolojisinin değişmesi ile açıklanabilir.



Şekil 7.80. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül boyutuna bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 3 Bar)

Diğer yandan tüm grafiklerde partikül boyutunun küçülmesi ile eğrilerin standart sapma değerlerinin azalarak sivrileştiği görülmektedir. Eğrilerin sayılan maksimum piksel sayılarının ise partikül boyutunun küçülmesi ile artış gösterdiği gözlenmektedir. Diğer bir ifade ile partikül boyutunun küçülmesi ile eğrilerin histogramları daralmakta ve aynı grilik değerine sahip piksellerin sayıları artış göstermektedir. Bu durum küçük partiküllerin malzeme yüzeyinde daha homojen bir aşınma meydana getirmesi ve bunun sonucunda aynı grilik değerine sahip piksel sayılarının artış gösterdiği söylenebilir. Büyük partiküller malzeme yüzeyinde daha gelişigüzel ve düzensiz aşınma izleri ve hasarları meydana getirmekte bunun sonucunda piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin standart sapmalarının arttığı

sonucuna varılabilir. Bu çıktılar tez çalışması kapsamında kurgulanan ve kullanılan görüntü işleme yöntemi ile katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunelerin aşınma sonrası yüzey morfolojilerinin incelenmesi ve farklı parametrelerin etkilerinin karakterizasyonu aşamasında efektif bir şekilde kullanılabileceği söylenebilir. Bölüm içerisinde verilen eğrilerde farklı parametrelere bağlı olarak piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin farklı korelasyonlar ile değişimler gösterdiği görülmektedir. Bu korelasyonların irdelenmesi ve özellikle SEM karakterizasyonu gibi yüzey morfolojilerinin incelenebileceği yöntemler ile koordine bir şekilde kullanılması durumunda erozif aşınma sonrası malzemelerin incelenmesinde görüntü işleme yöntemleri başarılı bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılabilir.

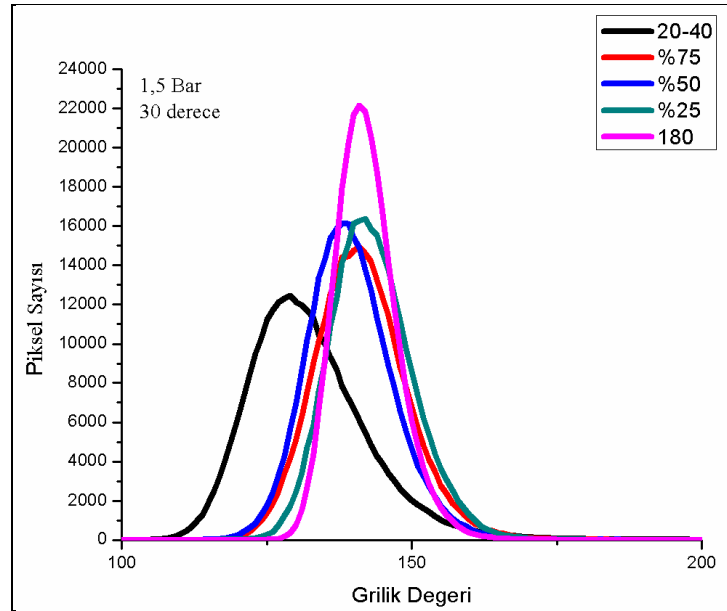


Şekil 7.81. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül boyutuna bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 4 Bar)

7.8.4. Partikül karışımlarının etkileri

Bu bölüm içerisinde partikül karışımlarının piksel sayısı-grilik değeri eğrileri üzerindeki etkileri irdelenecektir. Bu amaçla daha önce de belirtildiği gibi deneysel çalışmalarda kullanılan en büyük partiküller ve (20-40 mesh) ve en küçük partiküller (80 mesh) birbirleri içerisinde farklı oranlarda karıştırılmış ve üç farklı partikül karışımı elde edilmiştir. Bu karışımların Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışlarının incelenmesi amacıyla numuneler maksimum ve minimum erozyon oranının gözlemlendiği 1,5 ve 4 bar püskürtme basıncında 30° ve 90° partikül çarpma açılarında aşındırılmıştır. Bölüm içerisinde karşılaştırılma yapılabilmesi amacıyla partikül karışımlarının piksel sayısı-grilik değeri eğrileri ile birlikte partiküllerin bireysel kullanılması durumunda elde edilen eğriler de verilmiştir.

Şekil 7.82’ de 1,5 bar püskürtme basıncı 30° partikül çarpma açısında partikül karışımlarına bağlı olarak piksel sayısı-grilik eğrilerinin değişimleri verilmiştir. Tablo 7.5’ te hazırlanan partikül karışımları ve bu karışımların grafiklerde kullanılan renkleri verilmiştir.

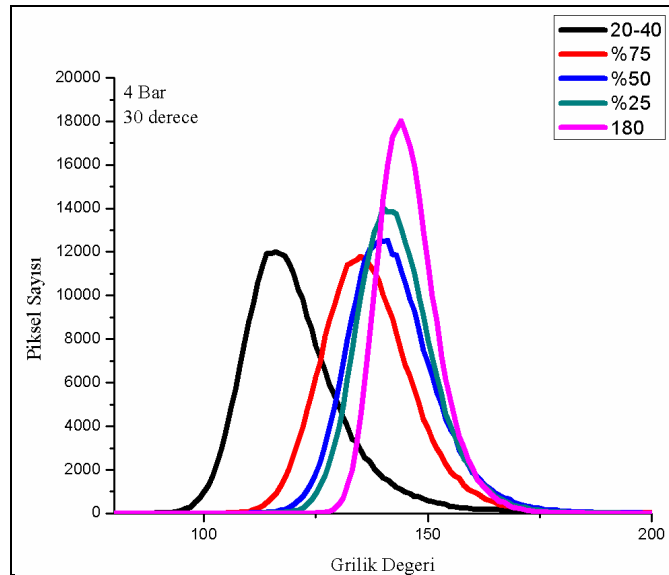


Şekil 7.82. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 1,5 Bar, Partikül çarpma açısı: 30°)

Tablo 7.5. Partikül karışımlarının grafikte kullanılan renkleri

Partikül karışımı	Grafiklerde kullanılan renk
% 100 20-40 mesh	Black
% 75 20-40 mesh - % 25 180 mesh	Red
% 50 20-40 mesh - % 50 180 mesh	Dark Blue
% 25 20-40 mesh - % 75 180 mesh	Cyan
% 100 180 mesh	Magenta

Şekil incelendiğinde 30° partikül çarpma açısında karışımların piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin 20-40 mesh ve 180 meshlik partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumunda elde edilen eğrilerin arasında yer alması dikkat çekmektedir. Partikül karışımları içerisinde büyük veya küçük partikül oranına bağlı olarak karışımların eğrileri karışım içerisinde en fazla oranda bulunan partiküle ait eğriye doğru ötelenmektedir. Bu durum partikül karışımlarının partikül oranlarına bağlı olarak yüzey morfolojisinde değişimler meydana getirdiğini ve bu etkinin karışım oranına bağlı olarak değişim gösterdiğini gözler önüne sermektedir. Diğer yandan karışımların standart sapmaları ve sayılan maksimum piksel sayılarının da partikül karışımlarına bağlı olarak değişim gösterdiği ve karışım oranına bağlı olarak 20-40 mesh ve 180 meshlik partiküllere ait eğrilere yaklaştıkları gözlenmektedir.



Şekil 7.83. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 4 Bar, Partikül çarpma açısı: 30°)

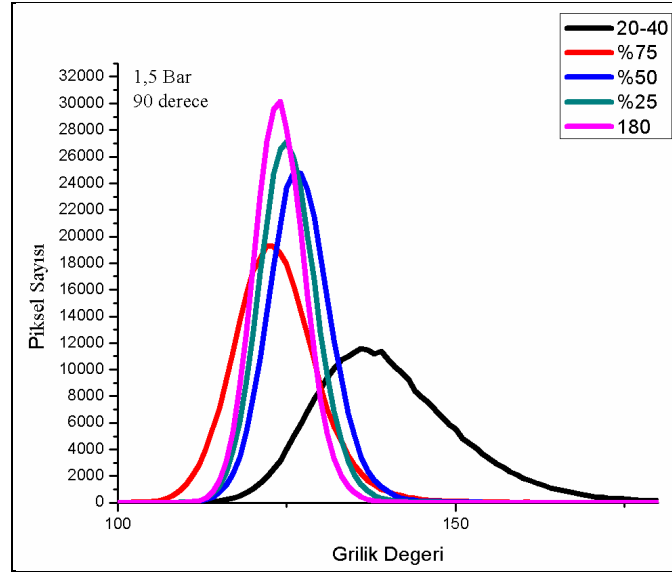
Şekil 7.83' te 4 bar püskürtme basıncı 30° partikül çarpma açısında partikül karışımlarına bağlı olarak piksel sayısı-grilik eğrilerinin değişimleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde eğrilerin Şekil 7.82' ye kıyasla çok daha düzenli bir şekilde sıralandığı görülmektedir. Partikül karışımlarının grilik değerlerinin 20-40 mesh ve 180 meshlik partiküller ile aşındırılan numunelere ait eğriler arasında çok güzel bir şekilde sıralandıkları ve karışım oranına bağlı olarak eğrilerin 20-40 mesh veya 180 meshlik partiküllere ait eğrilere yaklaştığı gözlenmektedir. Daha açık bir ifade ile karışım içerisindeki 180 meshlik partiküllerin oranının artması durumunda karışıma ait eğrinin sadece 180 meshlik partiküllerin kullanılması durumunda elde edilen eğriye, karışım içerisindeki 20-40 meshlik partikül oranının artması durumunda ise karışıma ait eğrinin sadece 180 meshlik partiküllerin kullanılması durumunda elde edilen eğriye yaklaştığı çok çarpıcıdır. Bu sonuçlar piksel sayısı-grilik değeri eğrileri ile partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkilerinin incelenmesinde efektif olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Şekil 7.83 incelendiğinde karışımlara ait piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin standart sapmalarının ve sayılan maksimum piksel sayılarının da karışım oranına bağlı olarak değişim gösterdiği ve yukarıdaki paragrafta anlatılan korelasyona benzer bir davranış sergilediği söylenebilir. Karışım içerisindeki partikül oranına bağlı olarak bu değerler partiküllerin tekil kullanılmaları durumunda elde edilen değerlere yaklaşmaktadırlar. Bu durumda yukarıda da belirtildiği gibi partikül karışımlarının piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin Ti6Al4V alaşımını erozif aşınma davranışının incelenmesinde eşsiz bir karakterizasyon tekniği olduğu söylenebilir. Diğer yandan partikül karışımlarına ait eğrilerin grilik değerlerinin, standart sapmalarının ve maksimum piksel sayılarının çok düzgün ve mantıklı bir şekilde uyumlu olmalarının tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme metodunun doğruluğunun ve hassasiyetinin çok yüksek olduğunu göstermektedir.

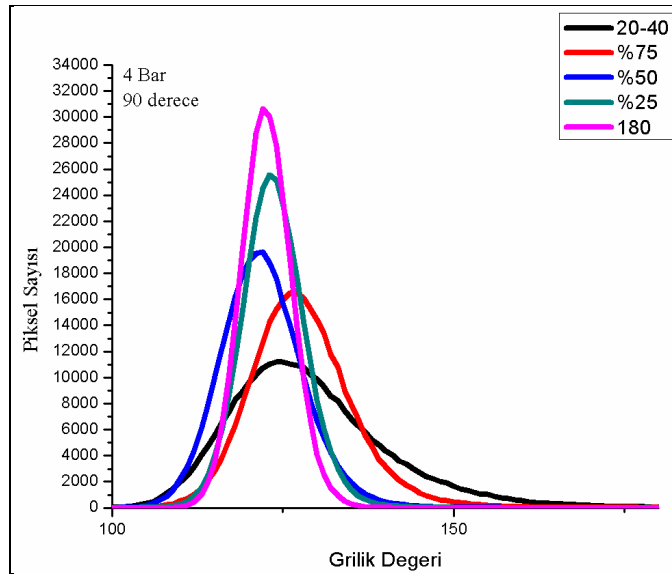
Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmaların bugüne kadar malzemelerin erozif aşınma davranışlarının incelenmesi için kullanılmamış olması tez çalışmasının özgün değerini gözler önüne sermektedir. Diğer yandan tez çalışmasında bu özgün değer partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımları gibi çok sayıda parametre ile geniş bir yelpazede

incelenmiş ve çalışılmıştır. Bu noktada bu çalışmaların malzemelerin erozif aşınma davranışlarının incelenmesine önemli bir yenilik ve katkı sağlayacağı kaçınılmazdır.

Şekil 7.84' te 1,5 bar püskürtme basıncı 90° partikül çarpma açısında, Şekil 7.85' te ise aynı aç değeri için 4 bar püskürtme açısında partikül karışımlarına bağlı olarak piksel sayısı-grilik eğrilerinin değişimleri verilmiştir.



Şekil 7.84. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 1,5 Bar, Partikül çarpma açısı: 90°)



Şekil 7.85. Piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin partikül karışımlarına bağlı değişimi (Püskürtme basıncı: 4 Bar, Partikül çarpma açısı: 90°)

Şekil 7.84 ve 7.85 incelendiğinde 90° partikül çarpma açısında Şekil 7.82 ve 7.83' e kıyasla karışımlara ait eğrilerin sağa ve sola doğru ötelenmelerinin düzenli olmadığı görülmektedir. Bu durumun bölüm içerisinde daha önce verilen partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve partikül boyutunun etkilerinin irdelenmesi aşamasında da karşılaşılan bir durum olduğu bilinmektedir. Partikül çarpma açısına bağlı olarak malzemede görülen erozif aşınma mekanizmasının değişim gösterdiği ve aşınan malzemenin yüzey morfolojisinde meydana gelen değişimler sonucunda piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin sağa veya sola ötelenme davranışlarının düşük çarpma açılarında ve normale yakın çarpma açılarında farklılıklar gösterdiği bilinmektedir. Bu durumun sonucu olarak partikül karışımlarının etkilerinin incelenmesi aşamasında da eğrilerin bu davranışlarının 30° ve 90° partikül çarpma açılarında değişiklikler gösterdiği söylenebilir.

Diğer yandan eğrilerini standart sapma ve sayılan maksimum piksel sayısı değerlerinin karışım oranına bağlı olarak düzenli bir şekilde değişim gösterdiği görülmektedir. Karışım içerisindeki büyük partikül oranının artması durumunda bu değerlerin büyük partiküller tek başlarına kullanılmaları durumunda elde edilen değerlere yaklaştığı, karışım içerisindeki küçük partiküllerin kullanılması durumunda ise bu değerlerin küçük partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumunda elde edilen değerlere yaklaştıkları görülmektedir. Şekil 7.84 ve 7.85' te bu ilişki çok açık bir şekilde görülmektedir. Partikül boyutunun etkilerinin irdelenmesi aşamasında bu değerlerin partikül boyutuna bağlı olarak niye bu şekilde bir davranış gösterdiği net bir şekilde ifade edilmiştir. Bu yüzden bu bölüm içerisinde bu durum tekrar irdelenmeyecektir. Bölüm içerisinde özellikle karışım oranlarına bağlı olarak partiküllerin piksel sayısı-grilik değerleri eğrileri ile partiküllerin bireysel kullanılmaları durumunda elde edilen eğriler arasındaki ilişkilerin ortaya konulması amaçlanmıştır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu bölüm içerisinde tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları ayrı başlıklar altında özetlenerek sunulacak ve çalışmalar ile ilgili öneriler verilecektir.

8.1. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Hızları ve Kütlesel Debileri

Hız ölçümleri sonucunda partikül boyutunun artışı ile aşındırıcı partiküllerinin hedef malzemeye daha düşük hızlarda çarptığı belirlenmiştir. 180 mesh boyutundaki en küçük garnet partikülleri tüm basınç değerlerinde en yüksek hızlara ulaşmıştır. 20-40 mesh boyutundaki en büyük partiküllerin ise tüm basınç değerlerinde en düşük partikül çarpma hızlarına sahip oldukları belirlenmiştir. Bu sonuçlar partikül boyutlarının küçülmesi durumunda partiküllerin püskürtme sistemi içerisinde daha efektif bir şekilde hızlandıklarını göstermiştir. Büyük partiküllerin ise ağırlıklarının artması ile birlikte püskürtme sistemi içerisinde küçük partiküller kadar efektif hızlanamadıkları ve hedef malzemeye daha düşük hızlarda çarptıkları sonucuna varılmıştır.

Püskürtme basıncının artışına paralel olarak numunelerin çarpma hızlarının da artış gösterdiği tespit edilmiştir. Buna karşın partikül boyutunun partiküllerin hızı üzerinde püskürtme basıncına kıyasla çok daha etkin bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır. 20-40 mesh boyutunda garnet partikülleri 4 bar püskürtme basıncında dahi 180 mesh boyutunda garnet partiküllerinin 1,5 bar püskürtme basıncında ulaşabildikleri hızlara ulaşamamışlardır. Partiküllerin minimum ve maksimum hızlarının da püskürtme basıncı ve partikül boyutuna bağlı olarak değişim gösterdiği belirlenmiştir. Partiküllerin hız dağılımlarının ortalama hızları ile orantılı olarak değişimi gösterdiği ve hız dağılımlarının geniş aralıklarda olduğu belirlenmiştir.

8.2. Parametrelerin Önem Derecelerinin Belirlenmesi

Taguchi deney tasarım yöntemi ile Ti6Al4V alaşımının aşınma miktarının püskürtme basıncı, partikül çarpma açısı, partikül boyutu ve nozul numune arası mesafeye bağlı olarak değişim gösterdiği görülmüştür. Buna karşın aşınma miktarı üzerinde en etkin

rolü püskürtme basıncının oynadığı belirlenmiştir. Partikül çarpma açısının ve partikül boyutunun aşınma miktarı üzerinde nispeten daha az etkin olduğu, nozul numune arası mesafenin ise bu parametrelere kıyasla çok düşük bir etkisi olduğu belirlenmiştir.

Taguchi çalışmaları sonucunda püskürtme basıncı artışına bağlı olarak aşınma miktarının arttığı tespit edilmiştir. Malzemenin düşük çarpma açılarında daha fazla aşındığı sonucuna varılmıştır. Küçük partiküllerin büyük partiküllere kıyasla daha fazla aşınma gerçekleştirdiği görülmüştür. Son olarak nozul numune arası mesafenin Ti6Al4V alaşımının aşınma miktarı üzerinde çok fazla bir değişime yol açmadığı belirlenmiştir. Tez çalışmasının bundan sonraki bölümlerinde, Taguchi deney tasarımı ile elde edilen bu çıktılarından yararlanılarak önem derecesi yüksek parametrelerin etkisi üzerinde durulmuştur.

Regresyon denklemi ve Taguchi çalışmaları ile malzemenin aşınma miktarı tüm parametrelerin kombinasyonları için hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre maksimum aşınma miktarı 4 bar püskürtme basıncı, 30° partikül çarpma açısı, 20 mm nozul numune arası mesafe ve 180 mesh boyutundaki garnet partikülleri ile elde edilmiştir.

8.3. Eroziyon Aşınma Deneyleri

Tez çalışmasında Ti6Al4V alaşımının erozyon davranışının partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, aşındırıcı partikül boyutu ve aşındırıcı partikül karışımlarına bağlı olarak değişimi deneysel çalışmalar ile incelenmiştir. Ti6Al4V alaşımının erozyon oranı püskürtme basıncına bağlı olarak tüm partikül çarpma açılarında artış göstermiştir. Tüm partikül çarpma açılarında ve partikül boyutlarında maksimum aşınma değerleri 4 bar püskürtme basıncında elde edilmiştir. Partikül boyutunun etkisi irdelendiğinde ise Ti6Al4V alaşımının erozyon oranının artan partikül boyutu ile azaldığı sonucuna varılmıştır. Tüm partikül çarpma açılarında ve püskürtme basınçlarında bu sonucun değişmediği görülmüştür. Partikül çarpma açısının etkisine bakıldığında Ti6Al4V alaşımının maksimum aşınma oranının tüm basınçlarda ve partikül boyutlarında 15° ve 30° partikül çarpma açılarında görüldüğü belirlenmiştir. Bu sonuçlar Ti6Al4V alaşımının sürekli eroziyon aşınma davranışı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Partikül karışımlarının etkilerinin incelenmesi için deneysel çalışmalarda kullanılan en büyük partiküller ile en küçük partiküller birbirleri içerisinde farklı oranlarda karıştırılmış ve Ti6Al4V alaşımı en yüksek erozif aşınmanın gerçekleştiği 30° ve en düşük erozif aşınmanın gerçekleştiği 90° partikül çarpma açılarında 1,5 ve 4 bar püskürtme basınçlarında aşındırılmıştır. Bu noktada Ti6Al4V alaşımında partikül karışımlarının etkilerinin iki farklı açı ve basınç değeri için anlaşılması amaçlanmıştır. Sonuçlar partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışını önemli bir şekilde etkilediklerini göstermiştir. Özellikle erozif aşınma oranı yüksek olan küçük boyutlu partiküllerin (180 mesh) içerisine % 25 oranında büyük partiküllerin (20-40 mesh) katılması durumunda erozyon oranında büyük bir düşüş gözlenmektedir. Büyük boyutlu partiküllerin içerisine aynı oranda küçük partiküllerin katılması durumunda ise erozyon oranında aynı oranda artış gözlenmemektedir. Bu iki bulgu ile partikül karışımlarının partiküllerin bireysel kullanılmaları durumuna göre daha düşük verimlilikte bir erozif aşınma meydana getirdikleri göstermiştir. Bu durumun partiküllerin karıştırılarak malzeme üzerine gönderilmeleri durumunda aşındırıcı partiküllerin kütlelerine ve yüzey alanlarına bağlı olarak farklı hızlara sahip olmaları ve bu nedenle malzeme yüzeyine ulaşmadan birbirleri ile çarpışarak kinetik enerjilerinin bir kısmını kaybetmelerinden kaynaklanmaktadır. Diğer yandan aşındırıcı partikül karışımlarının kütsel debilerinin çok yüksek olması nedeni ile hedef malzemeye çarparak saçılan partiküller ile saçılan partikülleri takip eden ve henüz malzeme yüzeyine çarpmamış partiküllerin birbirleri arasında çarpışma olasılığının (kalkan etkisi) artması, partikül karışımlarının erozyon oranlarının bireysel partiküllere kıyasla daha düşük olmasının bir diğer nedenidir.

8.4. Taguchi Deney Tasarımı ile Ti6Al4V Alaşımının Erozif Aşınma Davranışının Optimizasyonu

Bu bölümde Ti6Al4V alaşımın erozif aşınma davranışının Taguchi deney tasarımı ile optimizasyonu gerçekleştirilmiş ve bu yöntemin uygulanabilirliği tartışılmıştır. Taguchi deney tasarımından iki farklı deney desenleri kullanılmış (L9 ve L18), hesaplanan erozyon oranları ile bu deney desenleri ile tahminlenen erozyon oranları karşılaştırılmıştır. Partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkisi Taguchi deney tasarımı ile irdelenmiştir.

L9 ve L18 deney desenleri kullanılarak tahminlenen erozif aşınma oranı verileri ile deneysel çalışmalar ile elde edilen erozif aşınma verilerinin incelenen tüm parametreler için yakın sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Özellikle 180 mesh boyutunda aşındırıcı partiküller ile gerçekleştirilen deneylerin sonuçları ile Taguchi tahminleri çok düşük sapmalar ile uyum gösterdiği görülmektedir. Taguchi deney tasarımı ile tahminlenen değerlerin özellikle 30° ve 60° partikül çarpma açılarında 90° partikül çarpma açılara göre daha tutarlı sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Bu durumun nedeninin 90° partikül çarpma açısında aşındırıcı partiküllerin sünek Ti6Al4V alaşımının yüzeyine saplanarak efektif bir erozif aşınma gerçekleştirememeleri ve inkubasyona yol açmaları gösterilebilir. Bu durum tahminlenen değerlerde de tutarsızlıklara yol açmıştır. Ancak genel sonuçlar incelendiğinde çok az sayıda deney gerçekleştirilerek, Taguchi deney desenleri ile tahminlenen değerlerin partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve partikül boyutunun Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına etkilerinin incelenmesi ve bu parametrelerin optimizasyonu aşamasında son derece etkili olduğu sonucuna varılmıştır.

8.5. Yüzey Pürüzlülük Değerleri

Bu bölümde Ti6Al4V alaşımının yüzey pürüzlülük değerlerinin (Ra ve Ry) aşındırıcı partikül boyutu, partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı ve partikül karışımlarına bağlı olarak değişimi irdelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda aşındırılan numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin aşındırıcı partikül boyutu, püskürtme basıncı ve partikül çarpma açısına bağlı olarak belirli korelasyonlar ile değişim gösterdiği saptanmıştır. Ancak buna karşın partikül çarpma açısı ve püskürtme basıncının aşındırıcı partikül boyutuna kıyasla yüzey pürüzlülük değerleri üzerinde daha az rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Artan partikül boyutu ile birlikte malzemenin yüzey pürüzlülüğün önemli ölçüde artış gösterdiği tespit edilmiştir. Diğer yandan püskürtme basıncının artışı da yüzey pürüzlülüğün artmasına yol açmıştır. Partikül çarpma açısının da yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkin olduğu belirlenmiştir. Genellikle tüm boyut ve basınç değerlerinde 60°, 75° ve 90° partikül çarpma açılarında maksimum pürüzlülük değerleri elde edilmiştir.

Aşındırıcı partikül karışımlarının yüzey pürüzlülüğüne etkisinde ise diğer parametreler gibi net bir ilişki saptanamamıştır. Bunun muhtemel sebebi farklı boyutlardaki taneciklerin akış içinde birbirleriyle etkileşimleridir. Farklı boyutlardaki partiküller hedef malzemeye çarpmadan önce ve çarpma esnasında tanecikler arasında rastgele etkileşimler nedeniyle düzenli bir aşınma gerçekleştirememektedir. Bu rastgele dağılımların malzeme yüzeyine çarparken de aynı karakteristiği devam ettirmesi, hedef malzeme yüzeyinde karışıma bağlı bir hasar modeli oluşturmayı da çok zor kılmaktadır. Diğer taraftan büyük partiküllerin karışım içersindeki yüzdesinin fazla olması yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır.

8.6. SEM ve EDS Çalışmaları

Tez çalışmasında birçok farklı parametrenin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına olan etkilerinin daha net anlaşılabilmesi, aşınan malzemelerin yüzey morfolojilerinin değişimi ve malzemede görülen etkin erozif aşınma mekanizmalarının belirlenmesi amacıyla çok detaylı bir SEM çalışması gerçekleştirilmiştir. SEM çalışmalarında aşınmış yüzeylerin farklı detektörler ile farklı modlarda (SE ve BSE) görüntüleri alınmış, malzeme yüzeyine saplanan partiküller enerji dağılım spektrometresi analizi (EDS) ile derinlemesine incelenmiş ve son olarak aşınmış yüzeylerden farklı görüntüleme açılarında SEM fotoğrafları alınarak incelenmiştir.

Ti6Al4V alaşımının yüzey morfolojisinde partikül çarpma açısına bağlı olarak önemli değişimler meydana geldiği gözlenmiştir. Düşük çarpma açısında (30°) malzeme yüzeyinde mikrosürme ve mikro kesme mekanizmaları belirlenmiştir. Malzeme yüzeyinde bu mekanizmalar ile oluşan aşınma yüzeyine paralel aşınma izleri gözlenmiştir. Diğer yandan normal çarpma açısında (90°) yüzeyde düşük oranda mikroçatlak ve yüksek oranda plastik deformasyon hasar mekanizmaları belirlenmiştir. Bu açı değerinde malzemede aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine dik bir açıda çarpması sonucunda bu hasar mekanizmaları ile oluşan vadi ve tepelikler dikkat çekmektedir. SEM fotoğrafları ile Ti6Al4V alaşımının sünek bir erozif aşınma davranışı gösterdiği sonucuna varılmış ve SEM fotoğrafları ile erozyon oranı değerlerinin uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır.

SEM incelemeleri sırasında özellikle BSE görüntüleme modunda çekilen fotoğraflarda Ti6Al4V alaşımının yüzeyinde siyah ve siyaha yakın tonlarda farklı fazlar tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen EDS çalışmaları sonucunda bu fazların yüzeye saplanan garnet mineralleri olduğu sonucuna varılmıştır. SE görüntüleme modunda yüzeye saplanan aşındırıcı partiküllerin yüzeyde meydana gelen plastik deformasyonlara benzediği görülmüştür. Bu noktada erozyon sonrası aşınmış yüzeylerin analizinde hangi bölgenin plastik deformasyona uğradığı ve hangi bölgeye aşındırıcı partiküllerin saplandığının belirlenmesi çok zordur. Bu noktada SE görüntüleme moduna kıyasla BSE görüntüleme modunda yüzeye saplanan aşındırıcı garnet minerallerinin çok rahat bir şekilde gözlemlenebildiği sonucuna varılmıştır. Literatür çalışmaları incelendiğinde yüzeye saplanan aşındırıcı partiküller ile ilgili sınırlı bilgi olduğu görülmektedir. Literatürde gerçekleştirilen çalışmaların neredeyse tamamında aşınan yüzeylerin SE modunda görüntülediği ve buna bağlı olarak yüzeye saplanan partiküllerin gözlenemediği söylenebilir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen detaylı SEM ve EDS çalışmaları sonucunda erozif aşınma çalışmalarında aşınmış yüzeylerin BSE görüntüleme modunda incelenmesi ile SE görüntüleme modu ile karşılaştırıldığında çok daha başarılı bir hasar analizi gerçekleştirilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu sonuçların bundan sonra gerçekleştirilecek erozif aşınma çalışmalarında araştırmacılara büyük kolaylıklar sağlayacağı ve aşınmış yüzeylerin incelenmesi aşamasında büyük önem taşıyacağı düşünülmektedir.

Tez çalışmasında gerçekleştirilen SEM analizlerinde aşınmış yüzeylerde farklı görüntüleme açılarındaki gerçekleştirilen SEM çalışmaları büyük bir özgünlük taşımaktadır. Tez çalışmasında 30° ve 90° partikül çarpma açılarındaki aşındırılan numunelerin $\alpha = 75^\circ$ görüntüleme açısında aşınma yönüne yandan bakılarak çekilmiş fotoğrafları verilmiştir. Görüntüleme açısının fotoğraflara bir derinlik etkisi kazandırdığı ve görüntülerin 3 boyutlu izlenimi verdiği dikkat çekmektedir. Görüntüleme açısı ile birlikte klasik SEM çekimlerine kıyasla erozif aşınma nedeniyle oluşan hasarın çok daha net bir şekilde gözlemlendiği sonucuna varılabilir. Düşük çarpma açısında (30°) aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine çarptıktan sonra malzemeyi sürerek ve keserek aşındırdıkları ve daha sonra malzeme yüzeyini terk ettikleri görülmektedir. Açılı SEM görüntülerinde bu süreç esnasında yüzeyde eş

yönlü oluşan konveks geometrik izler dikkat çekmektedir. Bu görüntüleme açısı ile normal görüntülemeye kıyasla (90° görüntüleme açısı) aşındırıcı partiküllerin oluşturduğu hasarın geometrisinin çok daha net bir şekilde görüntülendiği sonucuna varılmıştır. 90° partikül çarpma açısında aşındırılan numunelerde gerçekleştirilen açılı SEM görüntüleme ile 30° partikül çarpma açısına göre daha farklı bir yüzey morfolojisinin olduğu görülmektedir. Bu partikül çarpma açısında malzeme yüzeyinde 30° partikül çarpma açısına kıyasla daha derin, ancak daha kısa konik geometrili izlerin olduğu söylenebilir. Bu açı değerinde aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyine çarpmakta ve plastik deformasyona yol açarak yüzeyde vadiler ve tepecikler meydana getirmektedir. Bu görüntüleme metodu ile yüzeyde oluşan vadi ve tepecikler çok net bir şekilde gözlenebilmektedir.

Daha önceki bölümlerde verilen erozyon oranı ve yüzey pürüzlülük değeri çalışmalarında 90° partikül çarpma açısında Ti6Al4V alaşımının erozyon oranının 30° partikül çarpma açısına göre azaldığı, ortalama pürüzlülük değerinin ise artış gösterdiği belirlenmiştir. Düşük çarpma açısında aşındırıcı partiküller sünek Ti6Al4V matristen mikrokese ve mikrosürme mekanizmaları ile malzeme koparmakta ve malzemede önemli bir kütle kaybına sebep olmaktadır. Buna karşın 90° partikül çarpma açısında malzeme yüzeyine dik açıda çarpan partiküller sünek matristen efektif bir şekilde malzeme koparamamakta, ancak yüzeyde derin vadi ve yüksek tepecikleri oluşturmaktadır. Bu durum sonucunda 90° partikül çarpma açısında Ti6Al4V alaşımında düşük erozyon oranına rağmen yüksek ortalama pürüzlülük değerleri ortaya çıkmaktadır. Bu sonuçların nedenleri açılı görüntüleme ile alınan SEM fotoğraflarında çok net ve özgün bir şekilde belirlemiştir. Bu noktada açılı görüntüleme tekniği ile malzemede görülen erozif aşınma mekanizmaların çok daha rahat ve doğru bir şekilde gözlenebildiği ve yorumlanabildiği söylenebilir. Bu sonuçların erozif aşınma ile ilgili çalışmaları derinden etkileyeceği ve araştırmacıların bu tekniği kullanarak erozif aşınma davranışlarını inceledikleri malzemelerin hasar mekanizmalarını daha doğru, kolay ve özgün bir şekilde yorumlayabilecekleri söylenebilir.

Partikül püskürtme basıncının Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışına etkileri incelendiğinde; püskürtme basıncı artışı ile birlikte malzeme yüzeyinde meydana gelen plastik deformasyonların artış gösterdiği görülmektedir. Yüksek basınç ile

hızlandırılan aşındırıcı partiküller sahip oldukları yüksek kinetik enerji nedeniyle malzeme yüzeyinde daha derin ve geniş aşınma izleri oluşturmuşlardır. Diğer yandan gerçekleştirilen EDS çalışmaları ile birlikte püskürtme basıncının artışı ile birlikte malzeme yüzeyine saplanan aşındırıcı partikül miktarının artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum basınç artışı ile birlikte hızları ve kinetik enerjileri artan partiküllerin malzeme yüzeyine daha rahat nüfuz edebildikleri ve saplanabildiklerini göstermektedir.

Bu durumda özellikle biyomedikal uygulamalarda titanyum alaşımlarının kum püskürtme ile yüzeylerinin temizlenmesi ve pürüzlendirilmesi için doğru basınç değerinin belirlenmesi aşamasında büyük önem taşımaktadır. Yüksek püskürtme basınçları malzeme yüzeyinin kısa bir süre içerisinde temizlenebilmesini ve yüksek miktarda pürüzlendirilebilmesini sağlayacağı doğrudur. Ancak yüksek püskürtme basıncı nedeniyle implant üzerine çok sayıda aşındırıcı partikülün saplanabileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Saplanan bu partiküller implant malzemenin yüzeyinin vücut ile uyumlu tozlar ile kaplanması aşamasında kaplama kalitesine zarar vereceği açıktır. Diğer yandan saplanan bu partiküller hastanın yaşamsal fonksiyonları üzerinde ne gibi etkilere yol açacağı da bilinmemektedir. Bu noktada biyomedikal malzemelerin kumlama ile yüzey temizleme ve pürüzlendirme uygulamalarında püskürtme basıncının optimizasyonu büyük önem arz etmektedir. Tez çalışmasında gerçekleştirilen SEM çalışmalarının araştırmacılara ışık tutacağı düşünülmektedir.

Aşındırıcı partikül boyutunun aşınmış yüzeylerin morfolojisine ve aşınma mekanizmalarına etkileri SEM çalışmaları ile incelendiğinde partikül boyutu artışı ile aşınma mekanizmalarında bir değişim ortaya çıkmadığı belirlenmiştir. Ancak partikül boyutunun değişimi yüzeyde meydana gelen hasarın şiddetini değiştirmiştir. Küçük partiküller sahip oldukları yüksek hızlar ve kinetik enerjiler ile birlikte yüzeyde daha ağır tahribatlara yol açmıştır. Aşındırıcı partikül boyutunun küçülmesi ile malzemede görülen erozyon hasarının arttığı sonucuna varılabilir. Bu durum malzemenin erozyon oranı ile yüzey morfolojisi arasındaki korelasyonu da gözler önüne sermektedir. Diğer yandan partikül boyutunun artışı ile özellikle 90° partikül çarpma açısında daha derin vadilerin ve tepeciklerin oluştuğu, ancak bu durumun malzemenin efektif aşınmasına yol açmaması şaşırtıcı bir gerçektir. Yüzey

pürüzlülük ölçümleri esnasında büyük partiküller ile birlikte malzemenin ortalama pürüzlülük değerinin artış göstermesi bu sonucu desteklemektedir. Büyük partiküller malzeme yüzeyini heterojen bir karakterde aşındırmakta ve malzeme yüzeyinde derin çukur ve tepecikler oluşturarak malzemenin yüzey pürüzlülük değerini arttırmaktadır. Diğer yandan küçük partikülleri ise yüzeyde daha homojen bir aşınma meydana getirmekte, yüzey yoğun miktarda hasara uğramakta ve bu durum yüksek bir erozyon oranına karşın düşük bir pürüzlülük değerine yol açmaktadır. Bu durumda küçük partiküllerin malzeme yüzeyinden büyük partiküllere kıyasla çok daha efektif bir şekilde malzeme kaldıracabildikleri söylenebilir. Büyük partiküller ise yüzeyden malzeme kaldırmaktan ziyade yüzeyi plastik olarak şekillendirmekte ve pürüzlendirmektedir.

Partikül karışımlarının yüzey morfolojisi üzerinde etkileri incelendiğinde partikül karışımlarının yüzey morfolojisi üzerinde değişime yol açtıkları sonucuna varılmıştır. Karışım içerisinde büyük partiküllerin oranının artması yüzey morfolojisi büyük partiküllerin tek başlarına kullanılmaları durumunda ortaya çıkan yüzey morfolojisine benzerdir. Aynı ilişki küçük partiküller için de geçerlidir. Bu sonuçlar erozyon oranı ile yüzey morfolojisi arasındaki korelasyonu göstermektedir. Partikül karışımları ile aşındırılan numunelerin 75° görüntüleme açısında çekilen SEM fotoğrafları incelendiğinde karışım oranına bağlı olarak yüzey morfolojisinin önemli oranda değişim gösterdiği görülmektedir. Malzeme yüzeyinde büyük partiküllerin oluşturduğu derin ve geniş aşınma izleri ile küçük partiküllerin meydana getirdiği küçük boyutlu aşınma izleri gözlenmektedir. Partikül karışımlarının malzemede meydana getirdiği düzensiz yüzey morfolojisi bu görüntüleme metodu ile farklı bir bakış açısı ile araştırılabileceği sonucuna varılmıştır.

SEM çalışmaları esnasında açılı görüntüleme tekniği ile tek bir aşındırıcı partikülün malzeme yüzeyinde oluşturduğu hasar incelenmiştir. Görüntülerde aşındırıcı partikülün malzeme yüzeyine çarpması ile darbenin etkisiyle malzemede görülen plastik deformasyonlar incelenmiştir. Malzeme yüzeyde derin bir çukur oluşturmuş ve çukur içerisindeki malzeme aşınma yönü doğrultusunda yığılmıştır. Bu durum Ti6Al4V alaşımının daha önce de bahsedilen sünek kırılma davranışı ve yüksek tokluğundan kaynaklanmaktadır. Yığılan malzeme ile hasar görmemiş yüzey arasında oluşan delaminasyon dikkat çekicidir. Bu noktada literatürde çok fazla yer

almayan bir durum ortaya çıkmaktadır. Farklı görüntüleme açılarında aşınma yönüne karşıdan bakılarak gerçekleştirilen SEM çalışmaları ile erozif aşınma sırasında sünek erozif aşınma davranışına sahip Ti6Al4V alaşımında yüzeyde delaminasyonların meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Malzemenin aşındırıcı partiküller ile plastik şekil verme ile orijinal yüzeye adeta sıvanması çok çarpıcıdır. Bu süreç esnasında malzeme yüzeyinde delaminasyon kusurlarına sahip tepeciklerin oluştuğu ve bu tepeciklerin diğer aşındırıcı partiküller ile kesilerek yüzeyden malzeme uzaklaştığı söylenebilir. Bu mekanizma ile malzemedan önemli bir miktarda kütle kaybı gerçekleşmektedir. Literatürde malzemelerin erozif aşınmaları esnasında malzeme yüzeyinde görülen mekanizmalara yönelik bu şekilde bir açıklama bulunmamaktadır. Erozif aşınma esnasında malzeme yüzeyinde oluşan delaminasyon kusurlarından hiç bahsedilmemiştir. Tez çalışması kapsamında Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının karakterizasyonu için çok sayıda özgün ve klasik yöntem kullanılmıştır. Ancak özellikle açılı görüntüleme ile malzeme yüzeyinde görülen erozif aşınma sürecine ilişkin özgün sonuçların belirlendiği söylenebilir. Tez çalışması kapsamında bu mekanizmalar üzerine daha detaylı bir araştırma gerçekleştirilmeyecektir. Ancak bu bölüm içerisinde verilen bu sonuçların erozif aşınmada etkin mekanizmaların belirlenmesi ve aşınma süreçlerinin incelenmesi aşamasında gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalara yardımcı olacağı düşünülmektedir.

8.7. Görüntü İşleme Yöntemi ile Aşındırılmış Numunelerin Yüzey Görüntülerinin İncelenmesi

Tez çalışması kapsamında farklı parametrelerde aşındırılan numunelerin aşınma sonrası yüzey morfolojilerinin görüntü işleme yöntemleri ile derinlemesine incelenmesi amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalarda görüntü işleme programları ve yüksek çözünürlüklü masaüstü tarayıcılar kullanılarak bir erozif aşınma muayene metodu geliştirilmiş ve bu metodoloji ile Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışı karakterize edilmiştir. Bu noktada tez çalışmasında uygulanan görüntü işleme yöntemi erozif aşınma hasar bölgesinin makro boyutta incelenmesi amaçlanmıştır. Bu aşamada tüm numunelerin yüzeyleri taranmış ve görüntü işleme yöntemleri ile aşınmış yüzey morfolojileri elde edilmiştir. Elde edilen görüntülere bakıldığında malzemenin yüzey morfolojisinin erozif aşınma operasyon parametrelerine bağlı olarak değişimi net bir şekilde görülmüştür.

Düşük çarpma açılarında (15° - 45°) yüzeyde meydana gelen erozif aşınma hasarının normale yakın çarpma açılara kıyasla (60° - 90°) daha büyük bir alan kapladığı belirlenmiştir. Çarpma açısının normale yaklaşması ile oluşan hasar izinin küçüldüğü ve geometrisinin dairesel bir şekil aldığı belirlenmiştir. Özellikle yüksek püskürtme basınçlarında 75° ve 90° partikül çarpma açılarında aşınma izinin etrafında plastik deformasyonların etkisi ile oluşan tepeceklerin dahi net bir şekilde gözlenmesi, bu yöntem ile erozif aşınmaya maruz kalan malzemelerde görülen hasar mekanizmalarının makro boyutta analizinin mümkün olduğunu çarpıcı bir şekilde ortaya koymuştur. Diğer yandan artan püskürtme basıncı ile birlikte malzeme yüzeyinde oluşan aşınma izinin derinliği ve büyüklüğü artış göstermiştir. En geniş aşınma izleri maksimum erozyon oranının görüldüğü 15° ve 30° partikül çarpma açılarında gözlenmiştir. Partikül boyutu artışı ile birlikte ise erozif aşınma izinin ve hasarının azaldığı net bir şekilde görülmüştür. Küçük partikül boyutlarında aşınma izinin alanının arttığı ve aşınmanın şiddetlendiği belirlenmiştir. Tez çalışmasında uygulanan özgün görüntü işleme yöntemi ile elde edilen yüzey morfolojileri ile Ti6Al4V alaşımının erozyon oranlarının yüksek oranda örtüştüğü sonucuna varılmıştır.

8.8. Erozif Aşınma Davranışının Piksel Sayısı–Grilik Değeri Eğrileri Yardımıyla İncelenmesi

Bu bölüm içerisinde Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımlarına bağlı olarak değişimi görüntü işleme yöntemleri ile elde edilen grafikler incelenerek yorumlanmıştır. Bu çalışmalar ile tez çalışmasında geliştirilen görüntü işleme yöntemi ile elde edilen grilik değeri-piksel sayısı eğrileri yardımıyla Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının karakterize edilmesi amaçlanmıştır. Farklı parametreler altında aşındırılan numunelere ait eğriler karşılaştırılmalı olarak incelenmiş ve bu yöntemin Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının incelenmesi aşamasında uygulanabilirliği sınanmıştır.

Bu çalışmalar ile elde edilen çıktılar, tez çalışması kapsamında geliştirilen ve kullanılan görüntü işleme yöntemi ile katı partikül erozyonu ile aşındırılmış numunelerin aşınma sonrası yüzey morfolojilerinin incelenmesi ve farklı

parametrelerin etkilerinin karakterizasyonu aşamasında efektif bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir. Bölüm içerisinde verilen eğrilerde farklı parametrelere bağlı olarak piksel sayısı-grilik değeri eğrilerinin farklı korelasyonlar ile değişimler gösterdiği görülmüştür. Bu korelasyonların irdelenmesi ve özellikle SEM karakterizasyonu gibi yüzey morfolojilerinin incelenebileceği yöntemler ile koordine bir şekilde kullanılması durumunda erozif aşınma sonrası malzemelerin incelenmesinde görüntü işleme yönteminin başarılı bir şekilde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda bu yöntem ile Ti6Al4V alaşımının erozif aşınma davranışının net ve güvenilir bir şekilde incelenebileceği belirlenmiştir. Görüntü işleme yöntemi ile elde edilen eğrilerin, Ti6Al4V alaşımının erozyon oranı, aşınmış yüzeylerin SEM ve pürüzlülük analizleri ile yüksek oranda uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu yöntem ile elde edilen eğrilerin grilik değerlerinin, standart sapmalarının ve maksimum piksel sayılarının daha önce elde edilen erozyon oranı, yüzey morfolojileri ve yüzey pürüzlülük değerleri ile düzgün ve mantıklı bir şekilde uyumlu olmalarının tez çalışmasında kullanılan görüntü işleme metodunun doğruluğunun ve hassasiyetinin çok yüksek olduğunu göstermektedir.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmaların bugüne kadar malzemelerin erozif aşınma davranışlarının incelenmesi için kullanılmamış olması tez çalışmasının özgün değerini gözler önüne sermektedir. Diğer yandan tez çalışmasında bu özgün değer partikül çarpma açısı, püskürtme basıncı, partikül boyutu ve partikül karışımları gibi çok sayıda parametre ile geniş bir yelpazede incelenmiş ve çalışılmıştır. Bu noktada bu çalışmaların malzemelerin erozif aşınma davranışlarının incelenmesine önemli bir yenilik ve katkı sağlayacağı kaçınılmazdır.

KAYNAKLAR

- [1] İçdem C., Saf Titanyum ve Ti6Al4V, Ti6Al7Nb alaşımlarının akışkan yatak ortamında termal oksidasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 252003.
- [2] Akagündüz E., Isıl işlem görmüş Ti6Al4V alaşımının yüzey özelliklerinin mikroyapı ve yüzey çizilme dayanımları açısından incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 179147.
- [3] Yücel Z., Lazer ve kumlama yöntemleri ile Ti6Al4V alaşımında fonksiyonel yüzeylerin oluşturulması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2008, 232710.
- [4] Akyol S., Ti6Al4V Titanyum alaşımının işlenebilirliğinin ısıtılma işlemiyle artırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007, 223609.
- [5] Titanium Alloys-Physical Properties, <http://www.azom.com/Details.asp?ArticleID=1341>, (Ziyaret Tarihi: 5 Mayıs 2007).
- [6] Akman E., Ti6Al4V alaşımlarının atımlı Nd: YAG lazeri kullanılarak kaynak edilmesi ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli Üniversitesi, 2006, 197940.
- [7] Özdemir B., Lazer ile titanyum ve magnezyum alaşımlarının işlenmesi ve kaynağı, Bitirme Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kocaeli, 2006.
- [8] William F. S., *Structure and properties of engineering alloys*, McGraw- Hill International Editions, 433-487, 1993.
- [9] Boettcher C., Bell T., Dong H., Surface engineering of Timet 550 with oxygen to form a rutile-based, wear resistant coating, *Metallurgical and Materials Transactions A33*, 2002, **4**, 1201-1211.
- [10] Stachowiak G. W., Bachelor, A.W., *Engineering tribology*, 3rd Ed., Elsevier Butterworth Heinemann, Oxford, 2001.
- [11] Ensarioğlu C., Çakır M., Titanyum ve alaşımlarının işlenebilirlik etüdü, *Mühendis ve Makine*, 2005, **547**, 36-46.

- [12] Zeng L., Bieler T. R., Effects of working, heat treatment, and aging on microstructural evolution and crystallographic texture of α' , α'' , α''' and Q phases in Ti-6Al-4V wire, *Materials Science and Engineering*, 2005, **A 392**, 403-414.
- [13] Matthew J. D., *Titanium a technical guide*, ASM International, 55-65, 2000.
- [14] Ezugwu E. O., Wang Z. M., Titanium alloys and their machinability, *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, **68**, 262-274.
- [15] Askeland D. R., The science and engineering of materials, *VNR International*, USA, 1994.
- [16] Brunette D. M., Tengvall P., Textor M., Thomsen M., *Titanium in medicine*, Springer, Germany, 2001.
- [17] International Titanium Association, <http://www.titanium.org/> (Ziyaret Tarihi: 8 Eylül 2010).
- [18] Diş hekimliğinde Titanyum Uygulamaları, <http://www.ido.org.tr/dergi.asp?Sayi=91>, (Ziyaret Tarihi: 8 Eylül 2010).
- [19] Rana F., Stefanescu D. M., Friction properties of Al 1.5PctMg/SiC particulate metal-matrix composites, *Metallurgical Transactions A*, 1989, **20**, 1564-1566.
- [20] Vingsbo O., *Wear and wear mechanisms*, ASME, New York, 1979.
- [21] Sundararajan G., Roy M., Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures, *Tribology International*, 1997, **30**, 339-359.
- [22] Bağcı M., İmrek H., CuZn10 ve CuSn10 Bakır alaşımlarının erozif aşınması, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- [23] Finnie I., Some reflections on the past and future of erosion: Part I, *Wear*, 1995, **186-187**, 1-10.
- [24] Veinthal R., Tarbea R., Kulua P., Kaerdi H., Abrasive erosive wear of powder steels and cermets, *Wear*, 2009, **267**, 1838-1844.
- [25] Momber A., *Blast cleaning technology*, Springer, Berlin, 2008.
- [26] Tsiang T. H., Survey of sand and rain erosion of composite materials, *Journal of Composite Technology and Research*, 1986, **8**, 154-158.
- [27] Liebhaf M., Levy A., The effect of erodent particle characteristics on the erosion of metals, *Wear*, 1991, **151**, 381-390.

- [28] Tilly G. P., Erosion Caused by Airborne Particles, *Wear*, 1969, **14**, 63-79.
- [29] Arnold J. C., Hutchings M., A model for the erosive wear of rubber at oblique impact angles, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1992, **25**, A222-A229.
- [30] Tewari U. S., Harsha A. P., Hager A. M., Friedrich K., Solid particle erosion of carbon fibre and glass fibre epoxy composites, *Composites Science and Technology*, 2003, **63**, 549-557.
- [31] Hager A., Friedrich K., Dzenis Y. A., Paipetis S. A., Study of erosion wear of advanced polymer composites, *Proceedings of the 10th International Conference on Composite Materials*, 1995, **4**, 155-162.
- [32] Stachowiak G. W., Batchelor A. W., Engineering Tribology, *Tribology Series*, 1993, **24**, 577-586.
- [33] Heuer V., Walter G., Hutchings I. M., A study of the erosive wear of fibrous ceramic components by solid particle impact, *Wear*, 1999, **225–229**, 493–501.
- [34] Harsha A. P., Kumarjha S., Erosive wear studies of epoxy-based composites at normal incidence, *Wear*, 2008, **265**, 1129–1135.
- [35] Barkoula N. M., Kocsis J. K., Processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites, *Journal of Materials Science*, 2002, **37**, 3807-3820.
- [36] Shipway P. H., Hutchings I. M., Wear resistant materials-into the next century Materials in erosion testing with a gas-blast apparatus, *Wear*, 1994, **174** , 169-175.
- [37] Anand K., Hovis S. K., Conrad H., Scattergood R. O., Flux effect in solid particle erosion, *Wear*, 1987, **118**, 243-257.
- [38] Mondal D. P., Das S., Jha A. K., Yegneswaran A. H., Abrasive wear of Al alloy–Al₂O₃ particle composite: a study on the 2 3 combined effect of load and size of abrasive, *Wear*, 1998, **223**, 131–138.
- [39] Mondal D. P., Das S., High stress abrasive wear behaviour of aluminium hard particle composites: Effect of experimental parameters, particle size and volume fraction, *Tribology International*, 2006, **39**, 470–478.
- [40] Dunder M., Inal O. T., Solid particle erosion of a-brass with 5 and 25 mm particles at normal Incidence, *Wear*, 1999, **224**, 226–235.
- [41] Amirthan G., Udayakumar A., Prasad B., Balasubramanian M., Solid particle erosion studies on biomorphic Si/SiC ceramic composites, *Wear*, 2010, **268**, 145–152.

- [42] Chen Q., Li D. Y., Computer simulation of solid-particle erosion of composite materials, *Wear*, 2003, **255**, 78–84.
- [43] Tabakoff W., Vittal B. V. R., High Temperature Erosion Study of INCO 600 Metal, *Wear*, 1983, **86**, 89-99.
- [44] Sinmazcelik T., Sari N. Y., Erodent Size Effect on the Erosion of Polyphenylene Sulfide Composite, *Polymer Composites*, 2010, **31**, 985-994.
- [45] Scattergood R. O., Routbort J. L., Turner A. P. L., Velocity and size dependence of the erosion rates in silicon, *Wear*, 1981, **67**, 227-232.
- [46] Sinmazcelik T., Fidan S., Polimerler ve Polimer Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonu Mekanizmaları ve Malzeme Performansını Etkileyen Faktörler, 13. *Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, Türkiye 9-11 Kasım 2006.
- [47] Yerramareddy S., Bahadur S., Effect of operational variables, microstructure and mechanical properties on the erosion of Ti-6Al-4V, *Wear*, 1990, **142**, 253-263.
- [48] Chen K. C., He J. L., Huang W. H., Yeh T. T., Study on the solid-liquid erosion resistance of ion-nitrided metal, *Wear*, 2002, **252**, 580-585.
- [49] Mann B. S., Arya V., Pant B. K., Influence of laser power on the hardening of Ti6Al4V low-pressure steam turbine blade material for enhancing water droplet erosion resistance, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2011, **20** (2), 213-218.
- [50] Gerdes C., Karimi A., Bieler H. W., Water droplet erosion and micro structure of laser-nitrided Ti-6Al-4V, *Wear*, 1995, **186**, 368-374.
- [51] Dehouve J., Nardin P., Zeghmami M., Erosion study of final stage blading of low pressure steam turbines, *Applied Surface Science*, 1999, **144-145**, 238-243.
- [52] Fowler G., Shipway P. H., Pashby I. R., Abrasive water-jet controlled depth milling of Ti-6Al-4V alloy- an investigation of the role of jet-workpiece traverse speed and abrasive grit size on the characteristics of the milled material, *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, **161**, 407-414.
- [53] Fowler G., Pashby I. R., Shipway P. H., The effect of particle hardness and shape when abrasive water jet milling titanium alloy Ti6Al4V, *Wear*, 2008, **266**, 613-620.
- [54] Zhou J., Bahadur S., Erosion-corrosion of Ti-6Al-4V in elevated temperature air environment, *Wear*, 1995, **186**, 332-339.
- [55] Shipway P. H., Fowler G., Pashby I. R., Characteristics of surface of a titanium alloy following milling with abrasive waterjets, *Wear*, 2005, **258**, 123-132.

- [56] Ahmad M., Casey M., Sürken N., Experimental assessment of droplet impact erosion resistance of steam turbine blade materials, *Wear*, 2009, **267**, 1605-1618.
- [57] Mochizuki H., Yokota M., Hattori S., Effects of materials and solution temperatures on cavitation erosion of pure titanium and titanium alloy in seawater, *Wear*, 2007, **262**, 522-528.
- [58] Madencilik Rehberi, www.madencilikrehberi.files.wordpress.com/2012/02/garnet1.doc, (Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2012)
- [59] Hight R., Industrial Minerals and Rocks, *Abrasives*, 1983, **18**, 11-12.
- [60] Wellborn W. W., Synthetics cut natural products down to size, *Industrial Minerals Abrasives*, 1996, **347**, 31-44.
- [61] Choi K. Y., Kim S. S., Morphological analysis and classification of types of surface corrosion damage by digital image processing, *Corrosion Science*, 2005, **47**, 1-15.
- [62] Codaro E. N., Nakazato R. Z., Horovistiz A. L., Ribeiro L. M. F., Ribeiro R. B., Hein L. R. O., An image processing method for morphology characterization and pitting corrosion evaluation, *Materials Science and Engineering: A*, 2002, **334**, 298-306.
- [63] Chang C. W., Lien H. S., Lin C. H., Determination of the stress intensity factors due to corrosion cracking in ferroconcrete by digital image processing reflection photoelasticity, *Corrosion Science*, 2010, **52**, 1570-1575.
- [64] Liu Z., Genest M., Krys D., Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe, *NDT & E International*, 2012, **47**, 105-115.
- [65] Zimer A. M., Rios E. C., Mendes P. C. D., Gonçalves W. N., Bruno O. M., Pereira E. C., Mascaro L. H., Investigation of AISI 1040 steel corrosion in H₂S solution containing chloride ions by digital image processing coupled with electrochemical techniques, *Corrosion Science*, 2011, **53**, 3193-3201.
- [66] Grinzato E., Vavilov V., Corrosion evaluation by thermal image processing and 3D modelling, *Revue Générale de Thermique*, 1998, **37**, 669-679.
- [67] Wang S., Song S., Image analysis of atmospheric corrosion exposure of zinc, *Materials Science and Engineering: A*, 2004, **385**, 377-381.
- [68] Pidaparti R. M., Aghazadeh B. S., Whitfield A., Rao A. S., Mercier G. P., Classification of corrosion defects in NiAl bronze through image analysis, *Corrosion Science*, 2010, **52**, 3661-3666

- [69] Tao L., Song S., Zhang X., Zhang Z., Lu F., Image analysis of atmospheric corrosion of field exposure high strength aluminium alloys, *Applied Surface Science*, 2008, **254**, 6870-6874.
- [70] Chang C. W., Lien H. S., Expansion stress analysis of ferroconcrete corrosion by digital reflection photoelasticity, *NDT & E International*, 2007, **40**, 309-314.
- [71] Tao L., Song S., Zhang X., Zhang Z., Lu F., Image analysis of periodic rain accelerated corrosion of aeronautical aluminium alloys, *Materials Science and Engineering: A*, 2008, **476**, 210-216.
- [72] Padilla M. G. D. G., Bielefeldt A., Ovtchinnikov S., Pellegrino J., Silverstein J., Simple scanner-based image analysis for corrosion testing: Concrete application, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, **209**, 51-57.
- [73] Codaro E. N., Nakazato R. Z., Horovistiz A. L., Ribeiro L. M. F., Ribeiro R. B., Hein L. R. O., An image analysis study of pit formation on Ti-6Al-4V, *Materials Science and Engineering: A*, 2003, **341**, 202-210.
- [74] White P. A., Smith G. B., Harvey T. G., Corrigan P. A., Glenn M.A, Lau D., Hardin S. G., Mardel J., Markley T. A., Muster T. H., Sherman N., Garcia S. J., Mol J. M. C., Hughes A. E., A new high-throughput method for corrosion testing, *Corrosion Science*, 2012, **58**, 327-331.
- [75] Bonnet N., Some trends in microscope image processing, *Micron*, 2004, **35**, 635-653.
- [76] Barreiro J., Castejón M., Alegre E., Hernández L. K., Use of descriptors based on moments from digital images for tool wear monitoring, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2008, **48**, 1005-1013.
- [77] Aoyama H., Ishii T., Sensor to Detect Cutting Force Components, Cutting Torque and Cutting Tool Deflections, *Journal of Manufacturing Processes*, 2004, **6**, 141-147.
- [78] Dimla E., Dimla S., Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations-a review of methods, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2000, **40**, 1073-1098.
- [79] Mannan M. A., Kassim A. A., Jing M., Application of image and sound analysis techniques to monitor the condition of cutting tools, *Pattern Recognition Letters*, 2000, **21**, 969-979.
- [80] Lim T. Y., Ratnam M. M., Edge detection and measurement of nose radii of cutting tool inserts from scanned 2D images, *Optics and Lasers in Engineering*, 2012, **50**, 1628-1642.
- [81] Wang W., Wong Y. S., Hong G. S., Flank wear measurement by successive image analysis, *Computers in Industry*, 2005, **56**, 816-830.

- [82] Lanzetta M., A new flexible high-resolution vision sensor for tool condition monitoring, *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **119**, 73-82.
- [83] Castejón M., Alegre E., Barreiro J., Hernández L. K., On-line tool wear monitoring using geometric descriptors from digital images, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2007, **47**, 1847-1853.
- [84] Gao W., Motoki T., Kiyono S., Nanometer edge profile measurement of diamond cutting tools by atomic force microscope with optical alignment sensor, *Precision Engineering*, 2006, **30**, 396-405.
- [85] Kurada S., Bradley C., A machine vision system for tool wear assessment, *Tribology International*, 1997, **30**, 295-304.
- [86] Wang W. H., Hong G. S., Wong Y. S., Flank wear measurement by a threshold independent method with sub-pixel accuracy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, **46**, 199-207.
- [87] Dutta S., Datta A., Chakladar N., Pal S. K., Mukhopadhyay S., Sen R., Detection of tool condition from the turned surface images using an accurate grey level co-occurrence technique, *Precision Engineering*, 2012, **36**, 458-466.
- [88] Dumitrache A., Borangiu T., IMS10-image-based milling toolpaths with tool engagement control for complex geometry, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2012, **25**, 1161-1172.
- [89] Su J. C., Huang C. K., Tarng Y. S., An automated flank wear measurement of microdrills using machine vision, *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, **180**, 328-335.
- [90] Jurkovic J., Korosec M., Kopac J., New approach in tool wear measuring technique using CCD vision system, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, **45**, 1023-1030.
- [91] Kim E. G., Park J. K., Jo S. H., A study on fiber orientation during the injection molding of fiber-reinforced polymeric composites: Comparison between image processing results and numerical simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, **111**, 225-232.
- [92] Sohn H., Dutta D., Yang J. Y., Park H. J., Simio M., Olson S., Swenson E., Delamination detection in composites through guided wave field image processing, *Composites Science and Technology*, 2011, **71**, 1250-1256.
- [93] Trias D., García R., Costa J., Blanco N., Hurtado J. E., Quality control of CFRP by means of digital image processing and statistical point pattern analysis, *Composites Science and Technology*, 2007, **67**, 2438-2446.

- [94] Pearce N. R. L., Guild F. J., Summerscales J., The use of automated image analysis for the investigation of fabric architecture on the processing and properties of fibre-reinforced composites produced by RTM, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 1998, **29**, 829-837.
- [95] Guillaumat L., Batsale J. C., Mourand D., Real time infra-red image processing for the detection of delamination in composite plates, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2004, **35**, 939-944.
- [96] Palerosi A. C., Almeida S. F. M., Thermoelastic evaluation of composite laminates using digital imaging processing, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007, **38**, 2283-2293.
- [97] Vignoles G. L., Image segmentation for phase-contrast hard X-ray CMT of C/C composites, *Carbon*, 2001, **39**, 167-173.
- [98] Comer A. J., Katnam K. B., Stanley W. F., Young T. M., Characterising the behaviour of composite single lap bonded joints using digital image correlation, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013, **40**, 215-223.
- [99] Chiang Y. C., Hickel R., Lin C. P., Kunzelmann K. H., Shrinkage vector determination of dental composite by μ CT images, *Composites Science and Technology*, 2010, **70**, 989-994.
- [100] Seif M. A., Khashaba U. A., Oviedo R. R., Measuring delamination in carbon/epoxy composites using a shadow moiré laser based imaging technique, *Composite Structures*, 2007, **79**, 113-118.
- [101] Rjafiallah S., Guessasma S., Three-phase model and digital image correlation to assess the interphase effect on the elasticity of carbohydrate polymer-based composites reinforced with glass–silica beads, *Carbohydrate Polymers*, 2011, **83**, 246-256.
- [102] Icardi U., Through the thickness displacements measurement in laminated composites using electronic speckle photography, *Mechanics of Materials*, 2003, **35**, 35-51.
- [103] Venkataraman R., Das G., Venkataraman B., Narashima Rao G. V. N., Krishnamurthy R., Image processing and statistical analysis of microstructures of as plasma sprayed Alumina 13 wt.% Titania coatings, *Surface and Coatings Technology*, 2006, **201**, 3691-3700.
- [104] Abdin Y., Taha I., El-Sabbagh A., Ebeid S., Description of draping behaviour of woven fabrics over single curvatures by image processing and simulation techniques, *Composites Part B: Engineering*, 2013, **45**, 792-799.

- [105] Kratmann K. K., Sutcliffe M. P. F., Lilleheden L. T., Pyrz R., Thomsen O. T., A novel image analysis procedure for measuring fibre misalignment in unidirectional fibre composites, *Composite Science and Technology*, 2009, **69**, 228-238.
- [106] Willems A., Lomov S. V., Verpoest I., Vandepitte D., Drape-ability characterization of textile composite reinforcements using digital image correlation, *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, **47**, 343-351.
- [107] Herrero J. M., Germain C., Microstructure reconstruction of fibrous C/C composites from X-ray microtomography, *Carbon*, 2007, **45**, 1242-1253.
- [108] Chen J. L. H. K. C., Huang W.H., Yeh T. T., Study on the solid liquid erosion resistance of ion nitrided metal, *Wear*, 2002, **252**, 580-585.
- [109] Zhou S. B. J. R., Effect of Blending of Silicon Carbide Particles in Varying Sizes On The Erosion of Ti-6Al-4V, *Wear*, 1989, **132**, 235-246.
- [110] Grogler E. Z. T., Franz A., Plewa O., Rosiwal S.M, Singer R.F., Erosion resistance of CVD diamond-coated titanium alloy for aerospace applications, *Surface and Coatings Technology*, 1999, **112**, 129-132
- [111] Fidan S., Avcu E., Karakulak E., Yamanoglu R., Zeren M., T. Sınmazçelik, Effect of heat treatment on erosive wear behaviour of Ti6Al4V alloy, *Materials Science and Technology*, 2013, **29** (9), 1088-1094.
- [112] Lisiecki A. K. A., Diode laser surface modification of Ti6Al4V alloy to improve erosion wear resistance, *Archives of Materials Science and Engineering*, 2008, **32** (1), 5-12
- [113] Biswas S., Satapathy A., A Study on Tribological Behavior of Alumina-Filled Glass-Epoxy Composites Using Taguchi Experimental Design, *Tribology Transactions*, 2010, **53** (4), 520-532.
- [114] Sahoo R., Mantry S., Sahoo T. K., Mishra S., Jha B. B., Effect of Microstructural Variation on Erosion Wear Behavior of Ti-6Al-4V Alloy, *Tribology Transactions*, 2013, **56** (4), 555-560.
- [115] Bagci M., Imrek H., Application of Taguchi method on optimization of testing parameters for erosion of glass fiber reinforced epoxy composite materials, *Materials and Design*, 2013, **46**, 706-712.
- [116] Mantry S., Behera D., Mishra S. K., Debasish D., Jha B. B., Mishra B. K., Erosive Wear Analysis of Plasma-Sprayed Cu Slag-Al Composite Coatings, *Tribology Transactions*, 2013, **56** (2), 196-202.
- [117] Biswas S., Satapathy A., A comparative study on erosion characteristics of red mud filled bamboo-epoxy and glass-epoxy composites, *Materials and Design*, 2010, **31**, 1752-1767.

- [118] Bishoyee N., Dash A., Mishra A., Patra S., Mahapatra S. S., A Grey-Based Taguchi Approach for Characterization of Erosive Wear Phenomenon of Glass-Polyester Fly Ash Filled Composites, *Journal of Polymers and the Environment*, 2010, **18**, 177-187.
- [119] Chen H. S., Lee J. N., Kung H. K., Application of Taguchi Method in the Optimization of PTA Hardfacing Process, *Advanced Materials Research*, 2011, **314-316**, 86-93.
- [120] Satapathy A., Patnaik A., Pradhan M. K., A study on processing, characterization and erosion behavior of fish (Labeo-rohita) scale filled epoxy matrix composites, *Materials and Design*, 2009, **30**, 2359-2371.
- [121] Patnaik A., Satapathy A., Mahapatra S. S., Dash R. R., Parametric Optimization Erosion Wear of Polyester-GF-Alumina Hybrid Composites using the Taguchi Method, *Journal of Reinforced Plastic and Composites*, 2008, **27**, 1039-1058.
- [122] Sahu S. P., Satapathy A., Patnaik A., Sreekumar K. P., Ananthapadmanabhan P. V., Development, characterization and erosion wear response of plasma sprayed fly ash-aluminum coatings, *Materials and Design*, 2010, **31**, 1166-1173.
- [123] Patnaik A., Mamatha T. C., Biswas S., Kumar P., Damage assessment of titania filled zinc-aluminum alloy metal matrix composites in erosive environment: A comparative study, *Materials and Design*, 2012, **36**, 511-521.
- [124] Mishra S. C., Das S., Satapathy A., Ananthapadmanabhan P. V., Sreekumar K. P., Erosion Wear Analysis of Plasma Sprayed Ceramic Coating Using the Taguchi Technique, *Tribology Transactions*, 2009, **52** (3), 401-404.
- [125] Mahapatra S. S., Patnaik A., Satapathy A., Taguchi method applied to parametric appraisal of erosion behavior of GF-reinforced polyester composites, *Wear*, 2008, **265**, 214-222.
- [126] Patnaik A., Tejyan S., A Taguchi approach for investigation of solid particle erosion response of needle-punched nonwoven reinforced polymer composites: Part II, *Journal of Industrial Textiles*, DOI:10.1177/1528083712460264.
- [127] Kumar S., Satapathy B. K., Patnaik A., Thermo-mechanical correlations to erosion performance of short carbon fibre reinforced vinyl ester resin composites, *Materials and Design*, 2011, **32**, 2260-2268.
- [128] Patnaik A., Mahapatra S. S., Study on mechanical and erosion wear behavior of hybrid composites using Taguchi experimental design, *Materials and Design*, 2009, **30**, 2791-2801.

- [129] Biswas S, Satapathy A., Patnaik A., Erosion Wear Behavior of Polymer Composites: A Review, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2010, **29**, 2898-2924.
- [130] Patnaik A., Satapathy A., Mahapatra S. S, Dash R. R, Implementation of Taguchi Design for Erosion of Fiber-reinforced Polyester Composites Systems with SiC Filler, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2008, **27**, 1093-1111.
- [131] Satapathy A, Padhi P. K., Prediction and Simulation of Erosion Wear behavior of Glass-Epoxy Composites filled with Blast Furnace Slag, *Advanced Materials Research*, 2012, **585**, 549-553.
- [132] Patnaik A, Satapathy A., Chand N., Barkoula N. M., Biswas S., Solid particle erosion wear characteristics of fiber and particulate filled polymer composites: A review, *Wear*, 2010, **268**, 249-263.
- [133] Patnaik A., Kaundal R., Satapathy A., Biswas S., Kumar P., Solid Particle Erosion of particulate filled Short Glass Fiber Reinforced Polyester Resin Composites, *Advanced Materials Research*, 2010, **123-125**, 213-216.
- [134] Patnaik A., Satapathy A., Mahapatra S. S., Dash R. R., Modeling and Prediction of Erosion Response of Glass Reinforced Polyester-Flyash Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009, **28**, 513-536.
- [135] Sadeghi S. H., Moosavi V., Karami A., Behnia N., Soil erosion assessment and prioritization of affecting factors at plot scale using the Taguchi method, *Journal of Hydrology*, 2012, **448-449**, 174-180.
- [136] Paul C. P., Mishra S. K., Tiwari P., Kukreja L. M., Solid Particle Erosion Behaviour of WC/Ni Composite Clad layers with Different Contents of WC Particles, *Optics and Laser Technology*, 2013, **50**, 156-162.
- [137] Das K. S., Sahoo P., Potimisation of tribological performance of electroless Ni-B coating using Taguchi method and grey relational analysis, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2011, **5**, 16-24.
- [138] Kane M., Do M. T., Tribological approach to study polishing of road surface under traffic, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2007, **1**, 203-210.
- [139] Mischler S., Barril S., Landolt D., Fretting corrosion behavior of Ti-6Al-4V/PMMA contact in simulated body fluid, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2009, **3**, 16-23.
- [140] Schneider A., Brenner J., Nethl D. S., Roy M., Franek F., Tribological properties of lubricated nanocrystalline diamond surfaces for various loads and geometries, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2009, **3**, 175-181.

- [141] Jadoon A. N. K., Mufti R. A., Tribological behavior of alternate hypereutectic Al-Si alloys with different antiwear additives, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2010, **4**, 61-73.
- [142] Kim S. H., Dugger M. T., Erdemir A., Barnette A. L., Hsiao E., Marino M. J., Eryilmaz O., MEMS lubrication with alcohol vapour, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2010, **4**, 109-114.
- [143] Sivakumar B., Kumar S., Narayanan T. S. N. S., Comparison of fretting corrosion behavior of Ti-6Al-4V alloy and CP-Ti in Ringer's solution, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2011, **5**, 158-164.
- [144] Kubiak K. J., Mathia T. G., Bigerelle M., Influence of roughness on ZDDP tribofilm formation in boundary lubricated fretting, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2012, **6**, 182-188.
- [145] Barthel A. J., Kim S. H., Surface chemistry dependence of water adsorption on solid substrates in humid ambient and humidity effect on wear of copper and glass surface, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2013, **7**, 63-68.
- [146] Kovalev A. V., Myshkin N. K., Fominski V. Y., Titov V. I., Scharff W., Study of adhesion during actual contact area formation at light loads, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2008, **2**, 186-193.
- [147] Kalbarczyk M., Michalczewski R., Piekoszewski W., Szczerek M., Tribological and nanoscale research on model friction couples intended for hip joint prostheses, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2009, **3**, 189-195.
- [148] Margielewski L., Płaza S., Surfactant dithiophosphates lubricating oil additives, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2010, **4**, 43-53.
- [149] Ahmad Z., Abdul Aleem B. J., Resistance of nanostructured titanium dioxide coatings to erosion corrosion, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2009, **3**, 41-48.
- [150] Horvart P., Kiriakidis G., Sucheai M., Christoulakis S., Kassavetis S., Logothetidis S., Surface characteristics and tribology study of metal oxide thin films, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2008, **2**, 225-231.
- [151] Soleimanpour A. M., Abachi P., Purazrang K., Wear behavior of in situ Cu-Al₂O₃ composites produced by internal oxidation of as cast alloys, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2009, **3**, 125-131.
- [152] Miyake S., Kurosaka W., Oshimoto K., Nanometre scale mechanical properties of extremely thin diamond-like carbon films, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2009, **3**, 158-164.

- [153] Myshkin N., Kovalev A., Makhovskaya Y., Torskaya E., Goryacheva I., Influence of adhesion induced contact areas on sliding friction, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2010, **4**, 130-135.
- [154] Duvivier P. Y., Mandrillon V., Inal K., Selective image analysis for roughness characterization, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2010, **4**, 136-143.
- [155] Kumar N., Krishnan R., Kumar D. D., Dash S., Tyagi A. K., Tribological properties of nanostructured TiC coatings deposited on steel and silicon substrates using pulse laser deposition technique, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2011, **5**, 1-9.
- [156] Pena A., Gallardo E. A., Moran A., Bravo J. A., Morena M., Vite M., Microabrasion on dental restorative porcelains and amalgam, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2013, **7**, 74-82.
- [157] Kumar N., Dash S., Kamruddun M., Das C. R., Chandramohan P., Srinivasan M. P., Tyagi A. K., Raj B., Influence of TiC/a-C phase on tribological properties of composites coatings, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2011, **5**, 172-176.
- [158] Abetkovskaia S., Chizhik S., Nazaruk P., Stelmachowski J. M., Rymuza Z., Complex approach to investigate mechanical and tribological characteristics of microcontacting objects for MEMS, *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2013, **7**, 83-86.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

- [1] **Avcu E.**, Fidan S., Yıldırım Y., Sınmazçelik T., Solid particle erosion behaviour of Ti6Al4V alloy, *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, DOI: 10.1179/1751584X13Y.0000000043.
- [2] **Avcu E.**, Fidan S., Bora M. Ö., Çoban O., Taşkiran I., Sınmazçelik T., Solid particle erosive wear behavior of glass mat reinforced PPS composites: Influence of erodent particle size, pressure, particle impingement angle and velocity, *Advances in Polymer Technology*, 2013, **32**, E386-E398.
- [3] Okutan E., Karabay S., Sınmazçelik T., **Avcu E.**, A study on the derivation of parametric cutting force equations in drilling of GFRP composites, *Strojniski Vestnik/Journal of Mechanical Engineering*, 2013, **59** (2), 97-105.
- [4] Fidan S., **Avcu E.**, Karakulak E., Yamanoglu R., Zeren M. and Sınmazcelik T., Effect of heat treatment on erosive wear behaviour of Ti6Al4V alloy, *Materials Science and Technology*, 2013, **29** (9), 1088-1094.
- [5] Bora M. O., Çoban O., **Avcu E.**, Fidan, S., Sınmazçelik T., The effect of TiO₂ filler content on the mechanical, thermal, and tribological properties of TiO₂/PPS composites, *Polymer Composites*, 2013, **34** (10), 1591-1599.
- [6] **Avcu E.**, Fidan S., Karabay S., Sınmazçelik T., The comparison of solid particle erosion behaviors of AA-1070 and AA-6101 alloys used in power transmission lines in Turkey, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2012, **27** (4), 865-874.
- [7] Fidan S., Sınmazcelik T., **Avcu E.**, Bora M. O., Coban, O., Detecting impact damages in an aramid/glass fiber reinforced hybrid composite with micro tomography, *Materials And Manufacturing Technologies XIV Book Series: Advanced Materials Research*, 2012, **445**, 9-14.
- [8] Fidan S., Sınmazçelik T., **Avcu E.**, Internal damage investigation of the impacted glass/glassaramid fiber reinforced composites by micro-computerized tomography, *NDT and E International*, 2012, **51**, 1-7.
- [9] Sınmazçelik T., **Avcu E.**, Bora M. O., Çoban O., A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods, *Materials and Design*, 2011, **32** (7), 3671-3685.

- [10] Coban O., Bora M. O., **Avcu E.**, Sinmazcelik T., The influence of annealing on the crystallization and tribological behavior of MWNT/PEEK nanocomposites, *Polymer Composites*, 2011, **32** (11), 1766-1771.
- [11] **Avcu E.**, Yıldiran Y. Şahin A. E., Fidan S. and Sinmazçelik T., The influences of the particle impingement angle and velocity on surface roughness, erosion rate and 3D surface morphology of the solid particle eroded Ti6Al4V alloy , *Acta Physica Polonica A*, (Basım aşamasında)
- [12] Yıldiran Y., **Avcu E.**, Şahin A. E., Fidan S., Yetiştiren Y. and Sinmazçelik T., Effect of particle impact angle, erodent particle size and acceleration pressure on the solid particle erosion behavior of 3003 aluminium alloy, *Acta Physica Polonica A*, (Basım aşamasında)
- [13] Şahin A. E., Yıldiran Y., **Avcu E.**, Fidan S., Sinmazçelik T., Mechanical and thermal properties of pumice powder filled PPS composites, *Acta Physica Polonica A*, (Basım aşamasında)

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan Ve Bildiri Kitabında (Proceedings) Basılan Bildiriler

- [1] Yıldiran Y., **Avcu E.**, Şahin A. E., Fidan S., Yetiştiren H., Sinmazçelik T., Effect of particle impact angle, erodent particle size and acceleration pressure on the solid particle erosion behavior of 3003 aluminum alloy, *3rd International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Turkey, 24-28 April 2013.
- [2] **Avcu E.**, Yıldiran Y., Şahin A. E., Fidan S., Sinmazçelik T., The influences of the particle impingement angle and velocity on the surface roughness, the erosion rate and the 3D surface morphology of the solid particle eroded Ti6Al4V, *3rd International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Turkey, 24-28 April 2013.
- [3] Şahin A. E., Yıldiran Y., **Avcu E.**, Fidan S., Sinmazçelik T., Mechanical and thermal properties of pumice powder filled PPS composites, *3rd International Advances in Applied Physics and Material Science Congress APMAS*, Antalya, Turkey, 24-28 April 2013.
- [4] Bora M. Ö., Çoban O., **Avcu E.**, Fidan S., Sinmazçelik T., Residual flexural properties of solid particle eroded TiO₂/PPS composites, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [5] Bora M. Ö., Çoban O., Fidan S., **Avcu E.**, Sinmazçelik T., The influence of antibiotic impregnation on the scratch behavior of bone cement (PMMA), *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.

- [6] Fidan S, **Avcu E**, Bora M. Ö., Çoban O., Sınmazçelik T., Influence of low velocity drop weight impact test parameters on impact damage mechanisms of polymer composites, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [7] Çoban O., Bora M. Ö., **Avcu E.**, Fidan S., Sınmazçelik T., Ersoy O., Use of volcanic ash as an alternative filler material in PPS composites for thermal and viscoelastic properties, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [8] **Avcu E**, Çoban O., Bora M. Ö., Fidan S., Sınmazçelik T., Thermal and viscoelastic properties of TiO₂/PPS composites, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [9] **Avcu E.**, Fidan S., Bora M. Ö., Çoban O., Sınmazçelik T., Computerized tomography characterization of low velocity impact damage in glass fiber reinforced polyester composite, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [10] Fidan S, **Avcu E.**, Çoban O., Bora M. Ö., Sınmazçelik T., Effects of repeated impact frequency on glass fibre reinforced polyester composite during impact loading, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [11] Şahin A. E., Yıldırım Y., **Avcu E.**, Fidan S., Sınmazçelik T., Günay V., Aşındırıcı partikül boyutu, partikül çarpma açısı ve püskürtme basıncının alümina seramik malzemenin katı partikül erozyonu davranışına etkileri, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [12] Yıldırım Y., Şahin A. E., **Avcu E.**, Fidan S., Sınmazçelik T., Aşındırıcı partikül boyutu ve püskürtme basıncının Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyonu davranışına etkileri, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli, Turkey, 10-12 October 2012.
- [13] **Avcu E.**, Fidan S., Bora M. O., Coban O., Sinmazcelik T., Taskiran I., Solid particle erosive wear behavior of ductile, semi-ductile and brittle materials: Influence of particle impingement angle and velocity, *International Conference Series, Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications AES-ATEMA*, Montreal, Canada, 1-5 August 2011.
- [14] Fidan S., Sınmazçelik T., **Avcu E.**, Bora M. Ö., Çoban O. Detecting impact damages in an aramid/glass fiber reinforced hybrid composite with micro tomography, *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT)*, İstanbul, Turkey, 13-16 July 2011.

- [15] Çoban O., Bora M. Ö., Özcan B., **Avcu E.**, Sınmazçelik T., Process optimization by design of experiments: micro-compounding and injection molding of PPS composites, *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT)*, İstanbul, Turkey, 13-16 July 2011.
- [16] Bora M. Ö., Çoban O., Fidan S., **Avcu E.**, Sınmazçelik T., Cürgül İ., Processing of a novel fibre metal laminates: the effect of circular hole formations on flexural properties, *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies (AMPT)*, İstanbul, Turkey, 13-16 July 2011..
- [17] **Avcu E.**, Fidan S., Bora M. Ö., Çoban O., Taşkiran İ., Sınmazçelik T., Solid particle erosive wear behavior of glass mat reinforced thermoplastics : influence of erodent particle size, particle impingement angle and pressure, *International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites THEPLAC*, Lecce, Italy, 23-24 June 2011.
- [18] Bora M. Ö., Çoban O., **Avcu E.**, Fidan S., Sınmazçelik T., Cürgül İ., The influence of different circular hole formations on tensile properties of a novel fiber metal laminates, *International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites THEPLAC*, Lecce, Italy, 23-24 June 2011.
- [19] Çoban O., Bora M. Ö., **Avcu E.**, Taşkiran İ., Sınmazçelik T., Effect of mixed particles reinforcing on the thermal, mechanical and morphological properties of PPS composites, *International Workshop on Thermoplastic Matrix Composites THEPLAC*, Lecce, Italy, 23-24 June 2011.
- [20] Fidan S., **Avcu E.**, Sınmazçelik T., Composite impact damage investigation with Micro-CT, *SkyScan User Meeting 2011*, Leuven, Belgium, 13-15 April 2011.

Ulusal Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

- [1] Fidan S., **Avcu E.**, Kompozit uçak yapılarında gömülü tahribatsız muayene sensörleriyle eş zamanlı hasar izleme yöntemleri, *Mühendis ve Makina*, 2011, 52, 94-102.

Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan Ve Bildiri Kitaplarında Basılan Bildiriler

- [1] Yıldırım Y., Şahin A. E., **Avcu E.**, Fidan S., Sınmazçelik T., Aşındırıcı partikül karışımlarının cam keçe takviyeli polifenilen sulfid matrisli kompozitlerin katı partikül erozyon davranışlarına etkileri, *IV. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 12-14 Eylül 2012.
- [2] Şahin A. E., Yıldırım Y., Fidan S., **Avcu E.**, Sınmazçelik T., Aşındırıcı partikül karışımlarının Ti6Al4V alaşımının katı partikül erozyon davranışına etkileri, *IV. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 12-14 Eylül 2012.

- [3] Kaba C., Yalçınkaya G., Bora M. Ö., Çoban O., Sınmazçelik T, **Avcu E.**, Cürgül İ., Farklı çaptaki darbe uçlarının cam fiber takviyeli PPS kompozitlerinin darbe davranışlarına etkisi, *III: Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı UHUK*, Eskişehir, Türkiye, 16-18 Eylül 2010.
- [4] **Avcu E.**, Şahin A. E., Fidan S., Sınmazçelik T., Taşkiran İ., Bora M. Ö., Çoban O., Cam keçe takviyeli polifenilen sülfid matrisli kompozitlerin katı partikül erozyon davranışları: partikül çarpma açısının ve hızının etkileri, *I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 17–19 Kasım 2011.
- [5] Fidan S., **Avcu E.**, Sınmazçelik T., Cam fiber takviyeli polyester kompozitte tekrarlı darbe yüklemeleriyle oluşan hasar mekanizmaları, *I. Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 17–19 Kasım 2011.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Edirne’de doğdu. 2003 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nü kazandı. 2004 yılında çift anadal programı (ÇAP) kapsamında aynı üniversite ve fakültede Makine Mühendisliği Bölümü’ne kaydoldu. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü’nden 2007 yılı bahar dönemi sonunda mezun oldu. Makine Mühendisliği Bölümü’ndeki eğitimini 2010 yılı güz dönemi sonunda tamamladı. 2009 yılı güz döneminde Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı ve 2010 yılı güz döneminde yüksek lisans eğitimini tamamladı. 2011 yılında aynı üniversite ve bölümde doktora eğitimine başladı. 2007–2009 yılları arasında Daechang Seat Co. Ltd. (D.S.C.) Otomotiv’de Üretim Mühendisi ve Üretim Planlama Takım Şefi olarak çalıştı. 2010 yılında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Malzeme Enstitüsü’nde iç bursiyer olarak görev aldı. 2010 yılı Aralık ayından beri Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde Araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.