

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

FARKLI NOZUL GEOMETRİLERİNİN
POLİMETİLMETAKRİLAT (PMMA) YÜZEYİNDE KATI
PARTİKÜL EROZYONUNUN İNCELENMESİ

BARIŞ ÖNEN

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

FARKLI NOZUL GEOMETRİLERİNİN
POLİMETİLMETAKRİLAT (PMMA) YÜZEYİNDE KATI
PARTİKÜL EROZYONUNUN İNCELENMESİ

BARIŞ ÖNEN

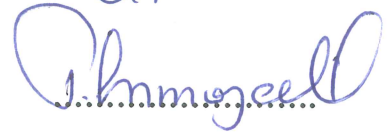
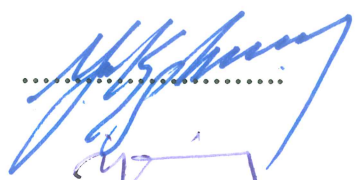
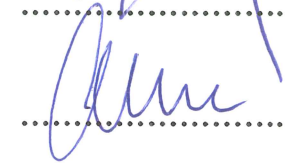
Doç.Dr. Ali ÇINAR
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Prof. Dr. Yasin KIŞIOĞLU
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi

Doç.Dr. İbrahim SEVİM
Jüri Üyesi, Mersin Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr. Ekrem ALTUNCU
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi


.....

.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarihi: 10.06.2016

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Katı partikül erozyonu işlemi teknoloji transferine açık bir alan olmakla birlikte; düzenli ve disiplinler arası bir planlamayla, modelleme, laboratuvar deneyleri, saha testleri gibi süreçleri yürüterek yeni tip nozulların gerçekleştirilmesi için bir araştırma programı gerektirmektedir. Bu yüzden, kaplama ve diğer sivil mühendislik uygulamaları için yüksek miktarda yatırım yaparak iyileştirmeler yapmak yerine daha az maliyetle nozul geometrilerinde iyileştirmeler yapmak daha mantıklı gözükmemektedir.

Tez çalışmasında özgün değer olarak, nozul geometrilerinin aşındırıcı partiküllerin hareket karakteristiğine etkileri, hedef malzeme üzerinde ortaya çıkan hasar mekanizmalarına etkileri, hasar dağılım alanlarına etkileri, yüzeyde ortaya çıkan pürüzlülük değerlerine etkileri, farklı boyutta aşındırıcı partiküller kullanıldığında bu etkilerin değişimleri gibi birçok önemli başlık altında deneysel ve simülasyon sonuçları elde edilerek irdelenmiştir.

Bu çalışma boyunca her türlü yardım ve desteği ile beni sürekli gayretlendiren, sahip oldukları bilgi birikimi ile çalışmalarımda yardımlarını eksik etmeyen danışmanım Doç. Dr. Ali ÇINAR'a, Prof. Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e ve Prof. Dr. Yasin KİŞİOĞLU'na şükran ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmam sırasında bana her zaman yol gösterici olan, ellerinden geldiği ölçüde yardım eden ve beni çalışmam sırasında sürekli cesaretlendiren değerli dostlarım ve çalışma arkadaşlarım Yrd. Doç. Dr. Sinan FİDAN'a, Yrd. Doç. Dr. Egemen AVCU'ya ve Arş. Gör. Yasemin YILDIRAN AVCU'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca maddi ve manevi her konuda destek ve yardımlarını esirgemeyen aileme sonsuz minnet duygularımı sunarım. Hayat arkadaşım Serpil ÖNEN'e ve canlarım UMUT ve YİĞİT'e bu süreçte bana her konuda destek olmaları nedeniyle teşekkür ederim.

Haziran - 2016

Barış ÖNEN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xii
GİRİŞ	1
1. KATI PARTİKÜL EROZYONU.....	5
1.1. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı.....	8
1.2. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debisi.....	9
1.3. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu.....	10
1.4. Aşınan Malzeme Özellikleri	12
1.5. Püskürtme Mesafesinin Etkisi.....	12
1.6. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı	16
2. NOZUL GEOMETRİSİ	18
2.1. Nozul Basıncı ve Verimlilik Arasındaki İlişki.....	21
2.2. Verimliliği Aşındırıcı Tanecik Boyutu Üzerinden Artırma.....	24
2.3. Nozul Tasarımı ve Kumlama Verimliliği	26
2.4. Parçacık Hızına Nozul Geometrisinin Etkileri.....	29
2.4.1. Parçacık hızına nozul uzunluğunun ve nozul çapının etkileri.....	30
2.4.2. Parçacık hızına nozul duvarı pürüzlülüğünün etkileri	31
2.5. Nozullar ile İlgili Literatür Çalışmaları	32
3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELLEMESİ.....	35
4. MALZEME VE YÖNTEM.....	42
4.1. Malzeme.....	43
4.1.1. Hedef malzeme.....	43
4.1.2. Aşındırıcı malzemeler	45
4.1.2.1. Alüminyum oksit aşındırıcı partikülü	46
4.1.2.2. Garnet aşındırıcı partikülü	48
4.2. Yöntem.....	49
4.2.1. HAD yöntemi ile nozul tasarımları ve analizleri	49
4.2.2. Nozul imalatı.....	52
4.2.3. Erozif aşınma deneyleri.....	56
4.2.4. Aşındırıcı partikül karakterizasyonu	59
4.3. Partikül Çarpma Hızlarının Ölçülmesi.....	59
4.3.1. Yüksek hızlı kamera ile ölçüm.....	60
4.3.2. Döner disk ile ölçüm	62
4.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri	65
4.5. Görüntü İşleme Yöntemiyle Yüzey Karakterizasyonu	66
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	71
5.1. Bilgisayar Destekli Akış Analizi.....	71
5.1.1. Nozul geometrisinin etkisi	71

5.1.2. Partikül ivmelendirme basıncının etkisi.....	75
5.1.3. Partikül boyutunun etkisi	77
5.1.4. Püskürtme mesafesinin etkisi.....	78
5.2. Deneysel Çalışmalar	79
5.2.1. Farklı nozullarda aşındırıcı partiküllerin kütleli debi analizi.....	80
5.2.2. Partikül hızlarının analizi	81
5.2.2.1. Döner disk metodu ile hız ölçüm analizi	82
5.2.2.2. Yüksek hızlı kamera ile analiz.....	83
5.2.3. Nozul geometrilerine göre hedef malzemenin erozyon oranının değişimi	85
5.2.3.1. Partikül boyutuna göre erozyon aşınması	85
5.2.3.2. Partikül çeşidine göre erozyon aşınması.....	92
5.2.3.3. Nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeye göre erozyon aşınması.....	95
5.2.4. Nozul geometrilerine göre hedef malzeme üzerindeki etki alanının değişimi	96
5.2.4.1. Partikül boyutuna göre hedef malzeme üzerindeki etki alanı.....	96
5.2.4.2. Partikül çeşidine göre hedef malzeme üzerindeki etki alanı.....	108
5.2.4.3. Nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeye göre etki alanı.....	109
5.2.5. Farklı nozul geometrileriyle erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülük analizleri.....	112
5.2.5.1. Partikül boyutuna göre hedef malzeme üzerindeki yüzey pürüzlülük analizleri.....	113
5.2.5.2. Partikül çeşidine göre hedef malzeme üzerindeki yüzey pürüzlülük analizi	124
5.2.5.3. Nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeye göre yüzey pürüzlülük analizi.....	125
5.2.6. Farklı nozul geometrileriyle erozif aşınma testleri sonrası üç boyutlu yüzey topografyaları	128
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	133
6.1. Sonuçlar	133
6.1.1. Partikül boyutunun etkileri.....	137
6.1.1.1. Garnet partikülü	137
6.1.1.2. Alümina partikülü	137
6.1.2. Kütleli debilerin etkileri.....	138
6.1.2.1. Garnet partikülü	138
6.1.2.2. Alümina partikülü	138
6.1.3. Nozul geometrilerinin etkileri.....	139
6.1.3.1. Garnet partikülü	139
6.1.3.2. Alümina partikülü	140
6.1.4. Püskürtme mesafesi etkileri	142
6.2. Öneriler	143
6.2.1. Mikrosertlik analizleri.....	144
6.2.2. SEM Analizleri.....	144
6.2.3. Hacimsel Analizler.....	144

6.2.4. Isıl değişim	144
6.2.5. Nozul malzemesi ve işleme parametrelerinin etkileri	145
6.2.6. Deney ortamının etkilerinin incelenmesi	145
KAYNAKLAR	146
KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER	153
ÖZGEÇMİŞ	154



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler	8
Şekil 1.2.	Partikül hızının katı partikül erozyonuna etkisi	9
Şekil 1.3.	Erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi	11
Şekil 1.4.	Bağıl parçacık hızına püskürtme mesafesinin etkisi	13
Şekil 1.5.	Parçacık hızı üzerinde püskürtme mesafesi etkisi.....	14
Şekil 1.6.	Parçacık hızına püskürtme mesafesi ve hava kütle akış hızı etkileri	14
Şekil 1.7.	Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri	16
Şekil 2.1.	Kumlama nozulları.....	19
Şekil 2.2.	Üretkenlik ile kullanılan aşındırıcı değişimi	20
Şekil 2.3.	Nozul basıncıyla verimliliğinin artışı.....	21
Şekil 2.4.	Kumlama nozulu Schlieren görüntüsü, a) Tasarım basıncının altında, b) Tasarım basıncında c) Tasarım basıncının altında mikro-saniyelik görüntüsü sonucu elde edilen ses dalgası yayılımı	22
Şekil 2.5.	Kumlama nozulu tasarım basıncının bulunma yöntemi.....	23
Şekil 2.6.	Laval nozulda öngörülen ve deneysel olarak ölçülen hızlar	25
Şekil 2.7.	Kumlama nozulunda farklı büyüklükteki partiküllerin hesaplanan hızları.....	26
Şekil 2.8.	Aşındırıcı partiküllerin 7 inç uzunluğundaki ventüri nozuldaki hızlarının bilgisayar program analiz sonuçları	27
Şekil 2.9.	Aşındırıcı parçacık hızı üzerinde nozul tipi etkisi.....	29
Şekil 2.10.	Aşındırıcı parçacık hızına, basınç ve nozul enine kesit şeklinin etkileri	30
Şekil 2.11.	Nozul uzunluğu, nozul çapı ve kütle akış oranının parçacık hızı üzerindeki etkileri.....	31
Şekil 2.12.	Kütle akış oranı aşındırıcı/hava ve partikül hızı üzerinde nozul çapı etkileri.....	31
Şekil 3.1.	Hız büyüklüğü alanı ve yan boru açıklığı (siyah çizgi) boyunca hızının y-bileşeni	38
Şekil 3.2.	Gaz hızının izokontur değerleri, (a) $p=2$ Mpa, (b) $P=3$ Mpa	40
Şekil 3.3.	Altı farklı nozulun hız dağılım konturları	41
Şekil 4.1.	Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması.....	43
Şekil 4.2.	Alüminyum oksitin SEM görüntüleri; (A) 60 mesh, (B) 120 mesh	46
Şekil 4.3.	Garnetin SEM görüntüleri; (A) 80 mesh, (B) 120 mesh.....	48
Şekil 4.4.	HAD simülasyonunda kullanılan geometrik modelin şematik diyagramı.....	50
Şekil 4.5.	ANSYS Fluent programı arayüzü	51
Şekil 4.6.	İmal edilen nozullar.....	52
Şekil 4.7.	Nozul geometrisinin teknik resmi	53
Şekil 4.8.	I.grup nozul geometrileri.....	55

Şekil 4.9. II. grup nozul geometrileri	55
Şekil 4.10. III. grup nozul geometrileri	55
Şekil 4.11. IV. grup nozul geometrileri	56
Şekil 4.12. V. grup nozul geometrileri	56
Şekil 4.13. Katı partikül erozyonu test düzeneği	58
Şekil 4.14. Kumlama kabini iç düzeneği	58
Şekil 4.15. Microtrack S3500 cihazı	59
Şekil 4.16. FastCAM MC2 yüksek hızlı kamera sistemi	60
Şekil 4.17. Yüksek Hızlı kamera test düzeneği	61
Şekil 4.18. Nozuldan çıkan partiküllerin yüksek hızlı kamerayla görüntüsü	62
Şekil 4.19. Döner disk partikül hızı ölçme sisteminin CAD ve gerçek resmi	63
Şekil 4.20. Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler	63
Şekil 4.21. Döner disk yöntemiyle yapılan deney ve MB-Ruler programıyla açı hesabı	64
Şekil 4.22. Optik profilometre cihazı ve test düzeneği	65
Şekil 4.23. Yüzey pürüzlülük ölçümü yapılan profil çizgisinin şematik gösterimi	66
Şekil 4.24. Aşındırılmış PMMA numunelerin tarayıcıya yerleştirilmesinin şematik gösterimi	67
Şekil 4.25. Aşındırılmış PMMA numunelerin görüntü işleme işlem basamakları	69
Şekil 5.1. İvmelendirilmiş havanın eksenel hızı dağılımı	72
Şekil 5.2. I. ve II. grup nozul geometrilerinin partikül hız dağılımı	73
Şekil 5.3. III., IV. ve V. grup nozul geometrilerinin partikül hız dağılımı	74
Şekil 5.4. Farklı nozul geometrilerin partikül hızı karşılaştırması	75
Şekil 5.5. Çeşitli parametreler altında partikül hızına partikül ivmelenme basıncının etkisi	75
Şekil 5.6. Çeşitli ivmelenme basınçları altında nozul girişinden hedef malzemeye gelen gaz ve partikül hız konturları (partikül boyutu: 206 µm, Püskürtme mesafesi: 20 mm)	76
Şekil 5.7. Çeşitli parametreler altında partikül hızına partikül boyutunun etkisi (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar	77
Şekil 5.8. Çeşitli parametreler altında partikül hızına püskürtme mesafesinin etkisi	78
Şekil 5.9. Çeşitli püskürtme mesafeleri altında nozul girişinden hedef malzemeye gelen gaz ve partikül hız konturları (partikül boyutu: 206 µm, ivmelenen basınç: 3 bar)	79
Şekil 5.10. Farklı boyutlarda alümina ve garnet partiküllerinin nozullardaki debilerinin karşılaştırılması	81
Şekil 5.11. Nozullarda döner disk yöntemiyle hız ölçümü karşılaştırması	82
Şekil 5.12. Nozullarda yüksek hızlı kamerayla hız ölçümü karşılaştırması	85
Şekil 5.13. Farklı geometrili nozullarda 120 mesh alüminanın erozyon oranına etkisi	86
Şekil 5.14. Farklı geometrili nozullarda 80 mesh alüminanın erozyon oranına etkisi	87
Şekil 5.15. Farklı geometrili nozullarda 60 mesh alüminanın erozyon oranına etkisi	88

Şekil 5.16. Farklı geometrili nozullarda 120 mesh garnetin erozyon oranına etkisi	89
Şekil 5.17. Farklı geometrili nozullarda 80 mesh garnetin erozyon oranına etkisi	90
Şekil 5.18. Farklı geometrili nozullarda 60 mesh garnetin erozyon oranına etkisi	91
Şekil 5.19. Farklı geometrili nozullarda 120 mesh alümina ve garnet partiküllerinin erozyon oranına etkisinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 5.20. Farklı geometrili nozullarda 80 mesh alümina ve garnet partiküllerinin erozyon oranına etkisinin karşılaştırılması.....	93
Şekil 5.21. Farklı geometrili nozullarda 60 mesh alümina ve garnet partiküllerinin erozyon oranına etkisinin karşılaştırılması.....	94
Şekil 5.22. Farklı geometrili nozullarda püskürtme mesafesine göre erozyon oranı etkisi	95
Şekil 5.23. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı.....	97
Şekil 5.24. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı	98
Şekil 5.25. 80 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı.....	99
Şekil 5.26. 80 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı	100
Şekil 5.27. 60 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı.....	101
Şekil 5.28. 60 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı	102
Şekil 5.29. 120 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı	103
Şekil 5.30. 120 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı.....	104
Şekil 5.31. 80 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı	105
Şekil 5.32. 80 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı.....	106
Şekil 5.33. 60 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı	107
Şekil 5.34. 60 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı.....	108
Şekil 5.35. Alümina ve garnet partiküllerinin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımının karşılaştırması	109
Şekil 5.36. Farklı geometrili nozullarda püskürtme mesafesine göre etki alanlarının karşılaştırması	110
Şekil 5.37. Farklı partiküllerin püskürtme mesafesine göre hedef malzeme üzerindeki etki alanı görüntüsü	112
Şekil 5.38. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili	114
Şekil 5.39. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması	115

Şekil 5.40. 120 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili	116
Şekil 5.41. 120 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması	117
Şekil 5.42. 80 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili	118
Şekil 5.43. 80 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması	119
Şekil 5.44. 80 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili	120
Şekil 5.45. 80 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması	121
Şekil 5.46. 60 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili	122
Şekil 5.47. 60 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması	122
Şekil 5.48. 60 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili	123
Şekil 5.49. 60 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması	124
Şekil 5.50. Alümina ve garnet aşındırıcılarının farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması	125
Şekil 5.51. Püskürtme mesafesi değişimine göre farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması	126
Şekil 5.52. 120 meshlik alüminada A nozulunun hedef malzemedeki pürüzlülük profili karşılaştırılması	127
Şekil 5.53. 120 meshlik garnette A nozulunun hedef malzemedeki pürüzlülük profili karşılaştırılması	127
Şekil 5.54. 60 meshlik alüminada A nozulunun hedef malzemedeki pürüzlülük profili karşılaştırılması	127
Şekil 5.55. 60 meshlik garnette A nozulunun hedef malzemedeki pürüzlülük profili karşılaştırılması	128
Şekil 5.56. Farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki ortalama alan pürüzlülüğü (Sa) değerlerinin karşılaştırılması	129
Şekil 5.57. I. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları	130
Şekil 5.58. II. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları	131
Şekil 5.59. III. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları	131
Şekil 5.60. IV. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları	132
Şekil 5.61. V. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları	132

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 4.1. PMMA'nın teknik özellikleri	45
Tablo 4.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları.....	46
Tablo 4.3. Alüminyum oksit mineralinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	47
Tablo 4.4. Garnet mineralinin fiziksel ve kimyasal özellikleri	49
Tablo 4.5. Farklı nozul geometrilerinin ölçüleri.....	54
Tablo 4.6. Deneylerde kullanılan erozif aşınma test parametreleri.....	57
Tablo 4.7. Bu çalışmada modellenen garnet partiküllerinin ortalama partikül boyutları	59
Tablo 4.8. Optik profilometre cihazının özellikleri.....	65
Tablo 4.9. HP Scanjet G2710 özellikleri ve PMMA tarama parametreleri.....	68

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

α	: Görüntülemenin gerçekleştirildiği açı, (°)
θ	: İlk iz ile ikinci iz arasındaki açı, (°)
Δm_s	: Örnek numunenin kütle kaybı, (mg)
d_N	: Nozul Çapı
d_P	: Partikül Yoğunluğu
E	: Erozyon oranı, (g/g)
L	: Diskler arası mesafe, (m)
m_e	: Aşındırıcı kütlesi, (mg)
n	: Disklerin dönüş hızı, (m/s)
R_a	: Ortalama pürüzlülük değeri
S_a	: Ortalama alan pürüzlülüğü
t	: Partiküllerin üst diskten alt diske ulaşmaları esnasında geçen süre, (s)
V	: Partikül çarpma hızı, (m/s)

Kısaltmalar

CAD	: Computer Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CCD	: Charge Coupled Device (CCD Algılayıcı)
CS	: Cold Spray (Soğuk Sprey)
DMP	: Discrete Phase Model (Ayrık Faz Model)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HDPE	: High Density Polyethylene (Yüksek Yoğunluklu Polietilen)
HVOF	: High Velocity Oxi Fuel (Yüksek Hızla Kaplama)
LED	: Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
PMMA	: Polimetil Metakrilat
PVC	: Polivinil Chloride
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TEM	: Transmission Electron Microscope (Transmisyon Elektron Mikroskobu)

FARKLI NOZUL GEOMETRİLERİNİN POLİMETİLMETAKRİLAT (PMMA) YÜZEYİNDE KATI PARTİKÜL EROZYONUNUN İNCELENMESİ

ÖZET

Katı partikül erozyonunu etkileyen en önemli faktörlerden biri nozul geometrileridir. Nozul, aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye çarpma öncesi hız kazanmalarında ve hedef malzeme yüzeyine çarpma esnasında yayılım alanlarının üzerinde birinci dereceden etkiye sahiptir. Nozulun farklı tasarımlarda geliştirilmesi verimliliğin artmasını ve dolayısı ile maliyetin düşmesini sağlayacak ve aşındırıcı atığını azaltacaktır.

Bu tez çalışmasında, farklı nozul tasarımlarının Polimetilmetakrilat'ın (PMMA) erozif aşınma davranışına etkileri incelenmiştir. Çalışmalarda ilk olarak, bilgisayar destekli hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemiyle farklı geometrilerde nozul tasarlanmış ve farklı parametreler altında simüle edilmiştir.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında HAD sonuçları yorumlanarak uygun nozul geometrileri seçilmiş ve imal edilmiştir. Farklı nozul geometrileriyle ortaya çıkan partikül hızları, yüksek hızlı kamera ve döner disk hız ölçme metodu ile ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Farklı geometrilerde üretilen nozul tipleri erozif aşınma deneylerinde kullanılarak püskürtülen katı partiküllerin PMMA yüzeyindeki etkileri, erozyon izi, kütle kaybı ve yüzey pürüzlülüğü açısından incelenmiştir.

Deneysel çalışmada, iki farklı aşındırıcı partikül, alümina ve garnet, kullanılmıştır. Her bir aşındırıcı tipinden üç farklı partikül boyutu kullanılarak dört farklı püskürtme mesafesinde çalışılmıştır. Aşındırılan numunelerin yüzey morfolojileri görüntü işleme tekniği ile elde edilerek farklı nozul geometrilerinin hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkardığı dağılım haritaları ve etki alanları irdelenmiştir. Bununla birlikte üç boyutlu temassız lazer profilometre ile hasar krateri merkezi, çizgisel olarak taranmıştır. Ayrıca, aşındırılan bütün yüzeylerin alanı taranarak yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Sonuç olarak, farklı nozul geometrileriyle PMMA yüzeyinde katı partikül erozyonu incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), Katı Partikül Erozyonu, Nozul Geometrisi, Polimetil Metakrilat (PMMA).

INVESTIGATING VARIOUS NOZZLE GEOMETRIES FOR SOLID PARTICLE EROSION ON POLYMETHYL METHACRYLATE (PMMA)

ABSTRACT

One of the most important factors that affect the solid particle erosion is the nozzle geometry. In accelerating the abrasive particles prior to impacting the target material and on propagation area during the impact the target material surface, nozzle has a primary effect. The development of different nozzle designs lead to increased efficiency and thus lower costs and reduce the abrasive waste.

In this study, the effects of different nozzle geometries on erosive wear behavior of Polymethyl methacrylate (PMMA) was investigated. In the first phase of this study, various nozzle geometries were designed by using computer aided computational fluid dynamic (CFD) method and simulated under numerous parameters.

In the second phase, proper nozzle geometries were chosen by interpreting the simulation results and selected nozzles were manufactured for experimental tests. Particle impingement velocities at various nozzle geometries were measured by using a high speed camera and the double disc velocity measurement methods and compared with each other. The effects of solid particles sprayed on PMMA surface were analyzed in terms of erosion scars, mass losses and surface roughnesses by using erosive wear test results of the nozzles types manufactured in various geometry.

In experimental work of this study, two different abrasive particles, alumina and garnet, were used. Each type of abrasives were studied in four different stand-off distances by using three different particle sizes. Distribution maps revealed on target material surfaces of different nozzle geometry and their affected areas were analyzed by obtaining surface morphology of the eroded samples with image processing methods. Moreover, the surface roughness profile at the center of the erosion crater was scanned with 3D non-contact laser profilometer. In addition, the eroded surfaces roughnesses were measured by scanning the entire surface area. Finally, solid particle erosions in the PMMA surfaces were examined for different nozzle geometries.

Keywords: Computational Fluid Dynamics (CFD), Solid Particle Erosion, Nozzle Geometry, Polymethyl Methacrylate (PMMA).

GİRİŞ

Katı partikül erozyonu, bir sıvı veya gaz içerisindeki sert partiküllerin malzeme yüzeyinden yüksek hızlarda çarpması sonucunda katı partiküllerin kayması ve yuvarlanması esnasında çok sayıda parça koparması sonucunda meydana gelir [1-7]. Bu tür erozyonu, uçak üzerine çarpan yağmur damlaları, sıvı damlacıklarını dışarı atan fanlar, difüzyon pompaları gibi sesten daha hızlı akışkan taşıyan cihazlar, buhar türbin vanaları, uzay ve havacılık uygulamalarında, enerji dönüşüm sistemlerinde, jet motorlarında ve helikopter rotor kanatlarında yoğun olarak görmek mümkündür [8-10]. Katı partikül erozyonu, aşınmanın değişik bir tipidir. Bu nedenle uygulamada malzemeler hesaplanan ömürlerinden daha kısa sürelerde hasara uğramaktadırlar. Bu da beraberinde büyük maddi kayıplara, hatta önlem alınmaması durumunda can kayıplarına yol açabilmektedir [9, 11, 12].

Partikül erozyonu literatürde çok çalışılan güncel konulardan biridir. Eroziyon aşınmaya ilişkin çalışmalar iki temel nedenle yürütülmektedir. Birincisi eroziyon aşınmaya maruz kalacak makine parçaları ya da malzemelerin aşınma karakteristiklerinin belirlenmesi, mevcut aşınma riskleri göz önünde bulundurularak malzeme ve parça tasarımlarının yapılmasıdır. İkincisi ise boyama, yapıştırma, kaplama vb. gibi uygulamalar öncesi malzeme yüzeyinde istenilen pürüzlülüğün elde edilebilmesi için malzemenin hangi parametreler altında aşındırılması gerektiğinin belirlenmesidir. Eroziyon aşınma, bir anlamda sistemlere zarar veren, onları aşındırıp kullanılmaz hale getiren bir faktör iken, diğer yandan da bir makine parçasına istediğimiz yüzey özelliklerini kazandırmak adına etkilerini bilerek kontrollü bir şekilde kullanmayı istediğimiz bir yöntemdir [9].

Katı partikül erozyonunu etkileyen en önemli faktörlerden biri aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye püskürtülmesi sırasında kullanılan nozul geometrileridir. Nozul geometrileri aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye çarpma öncesi hız kazanmalarında ve hedef malzeme yüzeyine çarpma esnasında yayılım alanlarının üzerinde birinci dereceden etkiye sahiptir [13-15].

Katı partikül erozyonu yöntemlerinden biri olan kumlama; otomotiv, gemi yapım, boyama ve yüzey hazırlama endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Kumlama işleminde; ince, aşındırıcı partiküller taşıyıcı gazlar ile nozul içerisinde hızlandırılarak yüksek hızlarda hedef malzeme yüzeyine çarpmakta ve katı partikül erozyonu ile aşınma meydana getirmektedir. Kumlama olarak adlandırılan basınçlı hava ile kum püskürtme işleminde kumun basınçlı bir şekilde yüzeye püskürtülmesini sağlayan en önemli ekipmanlardan bir tanesi kumlama nozuludur. Nozul geometrisi, uzunluğu ve iç çap/çıkış çapı oranı gibi parametreler maksimum aşındırıcı partikül hızını değiştiren parametrelerdir. Buna karşın kumlama nozullarının modern bilimsel yöntemler kullanılarak optimize edilmesi üzerine az sayıda çalışma bulunmaktadır. Literatür çalışmalarında nozul geometrisinin (nozul giriş çapı ve nozul uzunluğunun) partikül hızına etkisinin az olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada bu nedenle giriş çapı ve nozul uzunluğu değişimleri hesaba katılmamıştır. Boğaz çapı ve çıkış çapına daha fazla odaklanılmıştır [14-18].

Kumlama ile malzemelerin yüzeylerinin işlenmesinde temel amaçlardan biri malzeme yüzeyinin istenilen pürüzlülük değerlerine getirilmesidir. Özellikle boyama, yapıştırma ve kaplama uygulamaları öncesi, özellikle biyomedikal, otomotiv ve havacılık uygulamalarında malzemelerin yüzeyleri kumlama ile pürüzlendirilmektedir [19-21]. Değişen nozul geometrisi ile hedef malzemenin erozyon oranı ile birlikte yüzey pürüzlülüğünde önemli miktarda değişeceği açıktır. Bu nedenle bu çalışmada farklı nozul tasarımlarının hedef malzemedeki yüzey pürüzlülüğüne etkileri ayrı bir başlık altında incelenmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri temassız lazer profilometre yardımıyla gerçekleştirilerek yüksek tarama hassasiyeti elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülük analizlerinde erozif aşınma sonrası hedef malzemedeki ortaya çıkan erozyon kraterinin merkezinden profil pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan bütün yüzeyde ortaya çıkan erozyon hasar krateri topografyasını ortaya koymak amacıyla da yüzey pürüzlülük taramaları alansal olarak yüksek hassasiyetle gerçekleştirilmiştir.

Nozul tasarımları yapılırken birinci basamakta bilgisayar destekli analiz yöntemleri kullanılarak kumlama işlemi modellenmiş ve uygun nozul tasarımları belirlenmiştir. İkinci aşamada bu bilgiler ışığında belirlenen nozullar imal edilmiş ve kumlama deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler ile nozul tasarımının partikül çarpma hızı,

erozyon oranı üzerine etkileri ve hedef malzeme üzerindeki yüzey pürüzlülük etkileri ortaya çıkarılmıştır.

Katı partikül erozyonu birçok mühendislik malzemesinde ömür hesabını etkileyen önemli bir faktördür. Tasarım aşamasında mühendislik malzemelerinin katı partikül erozyonu davranışlarının simülasyon ortamında değerlendirilebilmesi; üretim öncesi zaman, malzeme, maliyet gibi kayıpları azaltacaktır. Böylece katı partikül erozyonuna maruz kalan mühendislik parçalarının tasarımı ve üretimi daha verimli hale gelecektir. Diğer taraftan elde edilecek simülasyon sonuçları; katı partikül erozyonuna dayanıklı malzemelerin geliştirilmesinde bilgi birikimi sağlayacaktır [22-26].

Deneysel olarak katı partikül erozyonu sonrası hedef malzemede ortaya çıkan hasar mekanizmaları bilinmekle birlikte, bu sonuçların Ansys–Fluent programı yardımıyla yapılmış simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılması ile ilgili fazla çalışma yoktur. Bu çalışmada hem deneysel hem simülasyon sonuçları elde edilerek karşılaştırmalar yapılacaktır. Bu sonuçlar geçerli ve kanıtlanabilir bir katı partikül erozyonu simülasyonu modelini ortaya koymayı sağlayacaktır.

Deneysel ve simülasyon çalışması yapılacak nozullarla püskürtülecek aşındırıcıların otomotiv sektöründe boya öncesi yüzey hazırlama ve korozyon giderme gibi işlemlerde optimizasyon sağlanacaktır. Böylece istenilen kalite de boya yüzeyi kısa sürelerde ve efektif olarak elde edilebilecektir. Bu ise maliyetleri düşürüp zamandan tasarruf sağlayacaktır. Diğer taraftan uygulamalar için geliştirilen nozullar uzun ömürlü olacaklarından bakım maliyetlerini düşüreceklerdir [27, 28].

Otomobiller üzerinde son yıllarda boya ömrünün arttırılması için farklı kaplamalar kullanılmaktadır. Farklı kaplama kalınlıkları elde etmek, kaplamanın bütün yüzeyde eşit miktarda dağılmasını sağlamak, kaplamanın alt malzemeye tutunmasını sağlamak gibi parametreleri belirlerken kaplama püskürtme nozulu geometrisi önem teşkil etmektedir [29-31]. Bu yüzden elde edilmek istenen püskürtmeyle kaplama yöntemlerinde her bir kaplama malzemesi için farklı püskürtme nozulları tasarlanmalıdır. Bu çalışmada farklı kaplamalar için geliştirilecek nozulların tasarımında önem teşkil eden parametrelerin belirlenmesi için bir ön bilgi birikimi sağlanacaktır.

Literatür araştırması HAD analizinin, katı partikül erozyonu, erozyon çamur, soğuk sprey kaplama vb. gibi çeşitli işlemlerde partikül çarpma hızını incelemek amacıyla kullanılabileceğini göstermiştir [32-36]. Diğer yandan tez süreçlerinde partikül çarpma hızları üzerinde partikül hızlandırma basıncı, aşındırıcı partikül boyutu ve püskürtme mesafesi etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu hedeflere ulaşmak için katı partikül erozyonu testleri deneysel sonuçları ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak detaylı analizler gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışması beş ana bölümden oluşmuştur. Birinci bölümde katı partikül erozyonu başlığı altında genel bilgilere, katı partikül erozyonunu etkileyen parametreler ve PMMA malzemesi üzerine yapılan literatür çalışmalarına yer verilmiştir. İkinci bölümde nozul tasarımı başlığı altında nozul geometrisinin çeşitli parametreler altında verimliliği nasıl etkilediği, verimliliği arttırmak için nozul geometrilerinde nasıl iyileştirmeler yapılması gerektiği konusunda genel bilgiler ile literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde hesaplamalı akışkanlar dinamiği modellemesi başlığı altında nozul geometrisi ve ayrık faz yöntemi ile ilgili HAD yöntemi ile simülasyon çalışmaları hakkında genel bilgiler ve literatür çalışmalarına yer verilmiştir. Dördüncü bölümde malzeme ve yöntem başlığı altında simülasyon çalışmalarının nasıl yapıldığı, erozif aşınma deneyleri, partikül hızlarının ölçülmesi, yüzey görüntüleme işlemleri ve yüzey pürüzlülük değerlerini hesaplamak için kullanılan malzemeler tanıtılmış ve bu çalışmaları yaparken uygulanan test yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir. Son bölümde ise deneysel sonuçlar ve tartışma başlığı altında HAD yöntemiyle yapılan simülasyon, yüksek hızlı kamera ve döner disk ölçüm yöntemiyle partikül hızları, erozif aşınma testleri sonrasında debi, kütle kaybı, erozyon oranı, görüntü işleme yöntemiyle aşınma etki alanları ve profilometre ile yüzey pürüzlülük değerleri hem çizgisel hem de alansal olarak elde edilmiş olan bulgu ve sonuçlar irdelenmiş ve grafikler yardımıyla açıklanmıştır.

Bu çalışmada özgün değer olarak, nozul geometrilerinin aşındırıcı partiküllerin hareket karakteristiğine etkileri, hedef malzeme üzerinde ortaya çıkan hasar mekanizmalarına etkileri, hasar dağılım alanlarına etkileri, yüzeyde ortaya çıkan pürüzlülük değerlerine etkileri, farklı boyutta aşındırıcı partiküller kullanıldığında bu etkilerin değişimleri gibi birçok önemli başlık altında deneysel ve simülasyon sonuçları elde edilerek irdelenmiştir.

1. KATI PARTİKÜL EROZYONU

Aşınma, birçok mühendislik malzemesinde görülen, istenmeyen bir malzeme kaybıdır [1-2]. Eroziyon aşınma, bir katının, katı parçacıklar taşıyan bir akışkan ile teması sırasındaki bağıl hareketlere bağlı olarak yüzeyinde oluşan malzeme kaybıdır [3]. Eroziyon aşınma çok çeşitli makinelerde görülür. Tipik örnekleri ise toz bulutundan geçen bir uçağın pervanesinde, 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 [8-10]. Bu aşınma türünde katı partikül erozyonu nedeniyle uygulamada malzemeler hesaplanan ömürlerinden daha kısa sürelerde hasara uğramaktadırlar. Bu da beraberinde büyük maddi kayıplara, hatta önlem alınmaması durumunda can kayıplarına yol açabilmektedir. 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 [9, 11, 12, 37]. Katı partikül erozyonunun tespitiyle ilgili farklı araştırmacıların yaptıkları bilimsel çalışmalar aşağıdaki gibi açıklanabilir;

Rao ve Buckley (1983) çalışmalarında, ışık optik ve taramalı elektron mikroskobu çalışmalarını, PMMA ile birlikte üç farklı termoplastik malzemenin erozyon direncini karakterize etmek için yapmışlardır. Aşındırıcı partikül olarak küre biçiminde mikro-cam boncuklar kullanılmıştır. Hasarın başlangıç aşamalarından itibaren, bu malzemelerin yüzeyleri bir profilometre ile incelenmiştir. PMMA üzerinde 90° çarpma açısında artan erozyon oranını takip etmişlerdir. Esas yüzey üzerinde madde birikmesi PMMA üzerinde gözlenmiştir. 0,27 Mpa basınç altında ve 72 m/s partikül hızında yapılan deneylerde, başlangıçta, hedef malzeme ve aşınan parçacıklarının bir kombinasyonundan oluşan bir malzeme birikimi hasarın erken aşamalarında PMMA için hedef malzeme üzerinde oluşan çukurun etrafında gözlenmiştir. Bu çarpma sırasında malzeme yüzeyinde bozulma ya da kısmi eritme ve yeniden tortulaşması, ısı nedeniyle olduğunu açıklamışlardır [38].

Jain ve Bahadur (1982), PMMA, yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) ve polivinilklorid (PVC)'yi leplenmiş çelik bir diskle aşınma deneyine tabi tutmuşlar ve polimer yüzeyindeki aşınma ve yorulma izlerini SEM ve TEM cihazlarıyla incelemişlerdir. Araştırmacılar, bir aşınma parçacığının yüzeyden ayrılma mekanizmasının, yorulma olaylarında rastlanan “hasar birikmesinden” ibaret olduğunu göstermişlerdir [39].

Fidan (2014), çalışmasında havacılıkta kullanılan bir çeşit polimer olan PMMA'nın tribolojik performansını incelemiştir. Özellikle uçakların ön camına alternatif olarak kullanıldığında PMMA'nın erozyon davranışları çok önemlidir. Bu çalışmada katı partikül erozyon testlerinden sonra üç boyutlu optik profilometre kullanılarak PMMA yüzey pürüzlülüğüne partikül boyutu, hızı ve çarpma açısına göre etkisini deneysel verilerle sunmuştur. Yapılan çalışmada PMMA'nın sünek karakteristliğine uygun olarak maksimum aşınma 30°'de gözlemlendiği bildirilmiştir [40].

J. Stodola ve diğ. (2012), askeri araç bileşenlerinin kaplama üzerine erozyon etkilerinin modellenmesini incelemişlerdir. Bu çalışmalarında, askeri araçlar ve uçakları zorlayıcı koşullarda çalışması için malzeme ömrünü arttırmayı hedeflemektedirler. Koruyucu kaplamalar genellikle büyük bir başarı ile bu işlevi yerine getirmektedirler. Bu nedenle, askeriyede kullanılan makine elemanlarının (türbinler, motorlar, kompresörler, turbo, ara parçalar, vb.) erozyon korunması için en acil ihtiyaçlarından biri yüksek performanslı kaplama geliştirilmesidir. Bu çalışmalarında öncü modelleme sonuçları, farklı malzeme özelliklerini (iç katmanın kalınlığı ve gerilmesi) seçmek ve kaplama yapısını incelemek için kullanılmıştır [30].

Rutherford ve diğ. (1997), polimer boya filmlerinin abrasif ve erozif aşınması üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, 20-70 µm kalınlığında altı farklı çeşit polimerik kaplamanın hem galvanizli çelik üzerine hem de polimerik malzeme üzerine uygulanması ile elde edilen aşınma dayanımları iki yeni metotla incelenmiştir. İlk aşınma testi katı partikül erozyonu içerir ve tek tabaka ince kaplamaların dayanıklılığını değerlendirmek için geliştirilmiştir. Bu çalışmada, çok katmanlı sistemlere uygulanarak genişletilmiştir. İkinci teknik ise bir malzemenin aşınma direncini ölçmek için küçük aşındırıcı zerrelerin bir karışımı olarak dönen bir top kullanır. Bu teknik, 4 mm²'den daha küçük bir örnek alan kısmında yapılan

abrasif aşınma testlerine olanak sağlar ve malzemeyi en üstteki 30 µm lik kısımda inceler. Bu teknikler çok ince kaplamalarda en çok ortaya çıkan problem olan; çok küçük kütle ve hacim değişimlerini ölçme diye isimlendirilen, problemleri tanımlamak için kullanılmıştır. Kaplamaların erozyon dayanıklılığı alt tabakanın niteliğine duyarlı olduğu bulunmuştur[27].

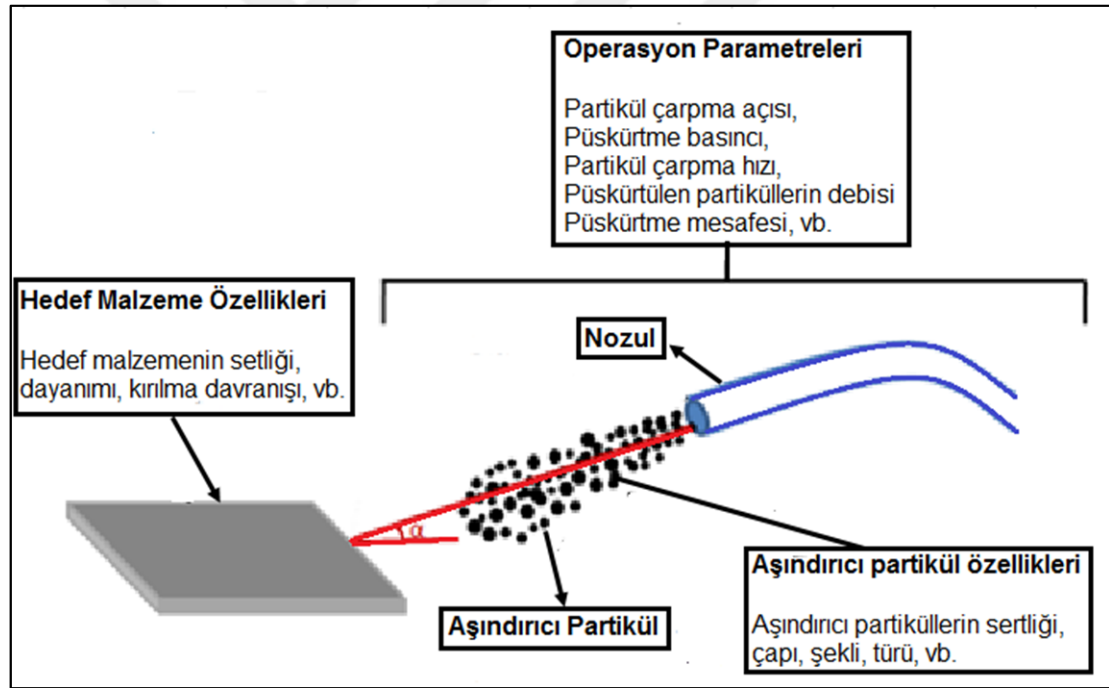
Pasha ve Kaleemulla (2013), püskürtülen metal matris kompozitlerin eroziv aşınma davranışlarına incelemişlerdir. Bu çalışmada, metal matrisli kompozitlerin havacılık ve otomobil sanayinde; elastik modülü, sertlik, çekme mukavemeti, aşınma dayanımı ve hafiflikleri ile birlikte katkısız alaşımlara kıyasla kullanımları giderek artmaktadır. Bu özelliklerinden dolayı motor girişleri, kontrol yüzeyleri iniş takım kapakları, radom ve aerodinamik kaplama gibi korozyondan etkilenen uçağın en kritik uygulamalarında havacılık sanayi için kullanılmaktadır. Bu uygulamalar aynı anda oluşan aşınma ve korozyon süreçlerine maruz kalmaktadır. Bu çalışmada, metal ve alaşımlarının, günümüz ve geçmişteki erozyon aşınma davranışlarını incelemişlerdir. İlk olarak, farklı kaplamalarda ve farklı takviye elemanları ile hazırlanan metal matrisli kompozitler incelenmiştir. Meydana gelen hasar mekanizmaları tartışılmıştır. Bunu daha sonra eroziv aşınmanın temel özelliklerinin tartışılması izler. Farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen erozyon oranını açıklayan farklı tahminler ve modeller sunulmaktadır [28].

Trezona ve diğ. (2001), boya kaplamaların tekrarlı katı partikül erozyonuna dayanımı: kaplama kalınlığı ve ana malzemenin etkisi üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, katı partikül çarpmasına karşı boyalı kaplamaların direncini belirlemek için yeni bir teknik geliştirilmiştir. İki akrilikli otomotiv son kat boyası için boya tabakası kalınlığının erozyon direncine etkisi değerlendirilmiştir. Bu kaplamalar, aşınmaya iki aşamalı bir tepki göstermiştir. İlk olarak, bunların kalınlığı kademeli olarak düşürülmüştür, kritik kalınlığa ulaşıldığında kalan kaplama tekli çarpmalarla uzaklaşmıştır. Bu davranışı tanımlamak için basit bir model önerilmiştir. Farklı kalınlıklardaki kaplamalar, çelik ve polimer alt yüzeylere uygulanmış endüstriyel spreyci otomotiv kaplamalarını karşılaştırmak için kaplama kalınlığını dikkate alan özgül erozyon dayanımı isminde yeni bir ölçüm tanımlanmıştır. Polimerlere uygulandığında bu kaplamalar çok daha yüksek erozyon dayanımı göstermektedir. Otomotivde polimerik kaplamaların kullanılması her geçen gün

artmaktadır. Bu kaplamaların eroziv aşınma davranışlarının bilgisayar ortamında incelenmesi önemli bir araştırma gereğidir [31].

Mühendislik malzemelerinin, katı partiküllerin veya sıvı damlalarının çarpmasına karşı gösterdikleri tepki, malzemenin türüne, o malzemelerin karşı karşıya kaldığı malzemelerin durumuna (termal yapısı, kalıntı gerilmeleri, yüzey işlemleri) ve çarpma hızı, çarpma açısı, partikül tipi ve boyutu gibi aşınma prosesi ile ilgili ortamsal parametrelere bağlı olarak büyük oranda değişiklik gösterir [37].

Bu bölümde içerisinde malzemelerin katı partikül erozyonu davranışını etkileyen önemli parametreler Şekil 1.1’de verildiği gibi kısaca açıklanmıştır. Bir sonraki bölümde ise nozul geometrisinin katı partikül erozyonu üzerine etkisi konusunda bilgi verilecek ve bu konuyla gerçekleştirilen çalışmalar irdelenecektir.

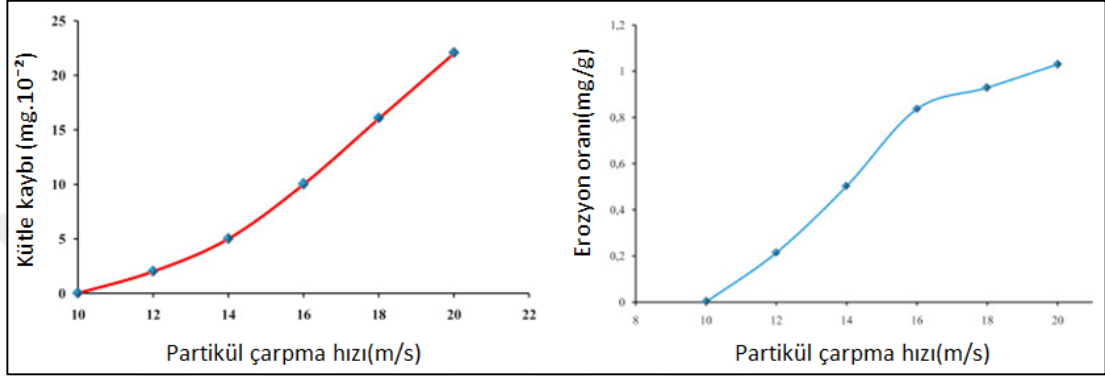


Şekil 1.1. Katı partikül erozyonuna etki eden parametreler [5]

1.1. Aşındırıcı Partiküllerin Hızı

Aşındırıcı partikül hızı, aşınma süreci üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir. Şekil 1.2’de partikül hızının kütle kaybına ve erozyon oranına etkisi gösterilmiştir [41, 42]. Aşındırıcı partikülün yüzeye çarpması sonucunda yüzeyde oluşan gerilmenin düşük olması nedeniyle plastik deformasyon oluşmaz ve aşınma yüzey yorulması şeklinde

devam eder [43]. Aşındırıcı partikülün hızı arttığında, aşınan malzemede partikülün çarpmasına bağlı olarak plastik deformasyon meydana gelir. Bu sistemde, aşınma tekrarlanan plastik deformasyonla oluşur. Çok yüksek partikül çarpma hızlarında, darbeye maruz kalan yüzeyde lokal ergime oluşmaktadır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki; aşınan malzemelerde partikül hızının artırılması ile aşınma miktarı artmaktadır [44].



Şekil 1.2. Partikül hızının katı partikül erozyonuna etkisi [41]

Partikül çarpma hızı; katı partikül erozyonu, kumlama, soğuk plazma sprej kaplama, termal püskürtme ile kaplama gibi birçok işlemler için en önemli parametrelerden birisidir [22-25]. Bu nedenle, lazer doppler hızölçer, fotoğraf tekniği, döner disk vb. gibi çeşitli yöntemler parçacık hızı ölçmek için kullanılmaktadır [26]. Partikül çarpma hızını çeşitli parametreler belirlemek etkiler. Bu parametrelerin etkileri son derece önemlidir. Zeng ve diğerleri (2007) nozul geometrisinin, ivmelenen gazın ve partiküllerin özelliklerinin, partikül çarpma hızını etkilediğini açıklamışlardır [22]. Li ve diğerleri (2007) de, nozul geometrisinin partikül hızını büyük oranda etkilediği üzerine çalışmalar yapmışlardır [45].

1.2. Aşındırıcı Partiküllerin Kütlesel Debisi

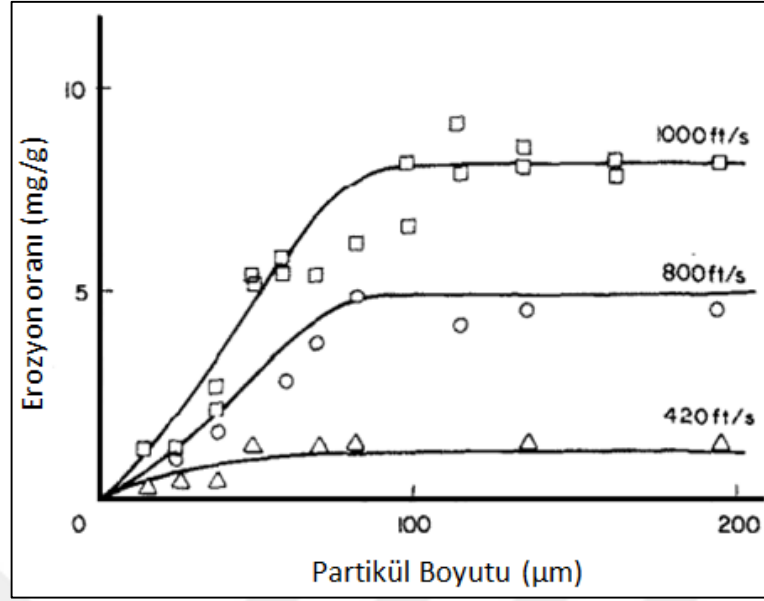
Partikül akış debisi (birim zamanda birim alana çarpan aşındırıcı partikül kütlesi) erozyon aşınmasını yakından etkileyen parametrelerden biridir. Teorik olarak, bütün aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye eşit çarpma açısı ve hızda çarptıkları kabul edildiğinden aşınma miktarı, aşındırıcı partiküllerin akış debisinden bağımsız olmalıdır. Ancak pratikte, ölçülen aşınma oranı üzerinde partikül debisinin önemli etkileri vardır [46-49]. Belirli bir akış oranı eşik değerine kadar erozyon aşınma miktarının akış debisiyle doğru orantılıdır. Bu limit değerın gelen ve geri seken

aşındırıcı partiküller arasındaki etkileşimin bir sonucu olduğuna inanılır [50]. Bu etki, çarpanların önceki partikülleri erozyon sürecinden uzaklaştırdığı birinci sırada partikül çarpma modeli ile rasyonalize edilmiştir [47]. Bu çarpışma teorisi, çok düşük değerli akış debi değerlerinde bile önemli role sahiptir. Partikül akış oranı sınırı elastomerler için 100 kg/m^2 kadar düşük olduğu gibi, büyük ve hızlı parçalarla metallerde oluşan erozyon için 10000 kg/m^2 kadar yüksek olabilir. Sınır akış debisi değeri geçildiğinde aşınma oranı çok az düşer [47, 49]. 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. Böylece bozulmanın derecesi ve ona bağlı olarak da erozyon aşınması miktarı düşecektir [47]. Yukarıdaki analizlerden “Seçilen malzemenin erozyon davranışını etkilememesi için, partikül etkileşimi ve çevresel bozulma etkilerini ortadan kaldıracak bir özel debi miktarı seçilmesi gereklidir.” sonucu çıkarılabilir.

1.3. Aşındırıcı Partiküllerin Boyutu

Malzeme yüzeyine çarpan partiküllerin boyutları katı partikül erozyonunda önemli bir rol oynamaktadır [11, 42, 51-53]. Son yıllarda aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkilerinin anlaşılabilmesi amacıyla çok sayıda çalışma yapılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda iki farklı görüş ileri sürülmüştür.

Sundararajan ve Roy (1997), Mondal ve diğ. (1998), Dünder ve Inal (1999), Amirthan ve diğerleri (2010) , 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, Şekil 1.3’de de görüldüğü gibi, kritik değere kadar partikül boyutunun arttırılması ile erozyon miktarının arttığını belirlemişlerdir [11, 51-55].



Şekil 1.3. Erozyon oranının aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olarak değişimi [51]

Chen ve Li (2003), 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 sonucunda oluştuğu belirtilmiştir [56].

Tabakoff ve Vittal (1983), Heuer ve diğ. (1999), Mondal ve diğerleri (2006) ise aşındırıcı partikül boyutunun erozyon miktarını çok düşük oranda etkilediğini ifade etmişlerdir. Ancak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda partikül boyutunun artırılması 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 artırılmasının erozyon miktarını çok az miktarda arttırdığını belirlemişlerdir [42, 53, 57].

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 [53, 58].

Katı partikül erozyonu mekanik ve metalurjik faktörlerden etkilenen karmaşık bir yüzey hasar prosesidir [54]. 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.

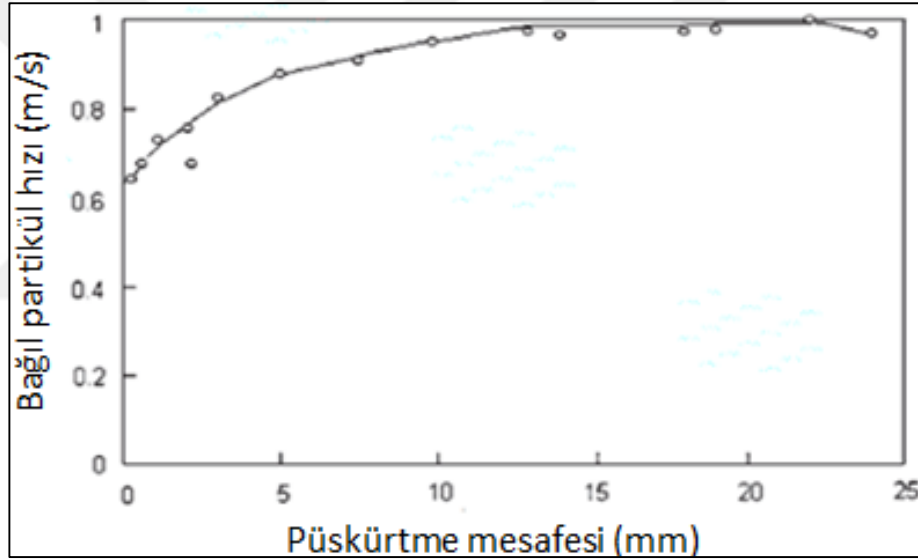
1.4. Aşınan Malzeme Özellikleri

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 [58, 59].

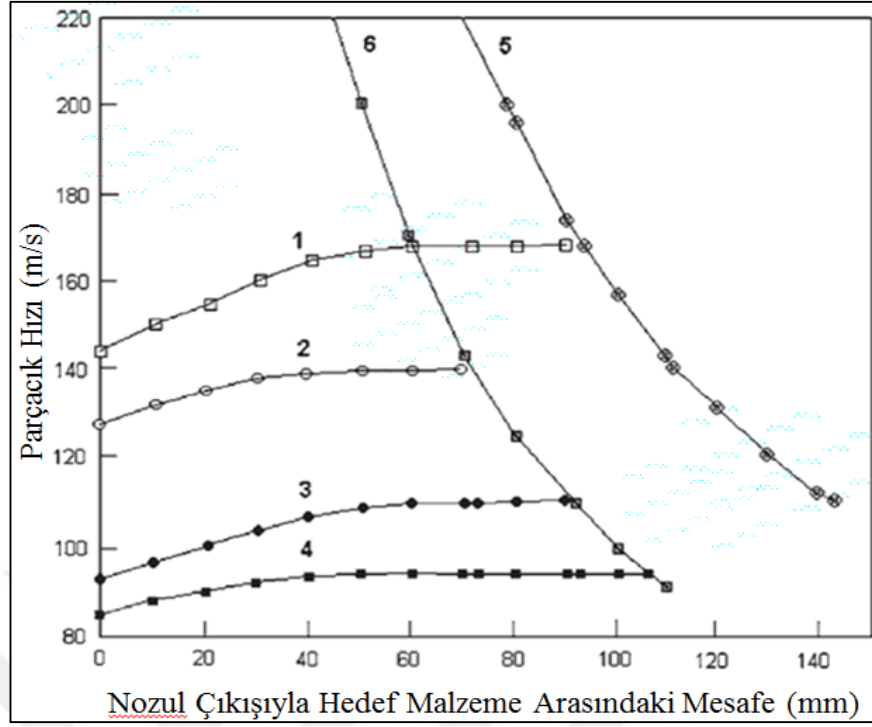
1.5. Püskürtme Mesafesinin Etkisi

Bothen (2000), Fokke (1999), Uferer (1992) ve Wolak (1977) aşındırıcı parçacık hızı üzerindeki uzak mesafe etkileri üzerine çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmaların sonuçları Şekil 1.4, Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'de gösterilmiştir. Şekil 1.4'de püskürtme mesafesindeki değişimlerin bağıl aşındırıcı partikül hızı üzerindeki etkisini göstermektedir. Aşındırıcı partikül hızlarının maksimum olduğu değerlerde optimum bir püskürtme mesafesi olduğu aşikardır. Nozul çıkışından sonra partiküllerle hızlandırıcı gaz arasında hala bir hız kayması olduğundan katı

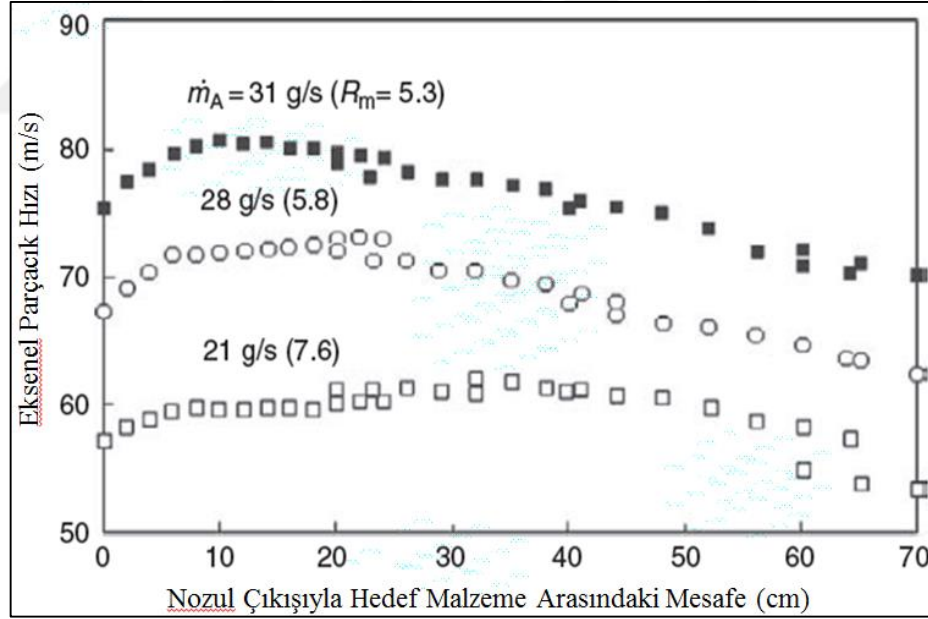
partiküller ve gaz, aynı hıza ulaşıncaya kadar partiküller hızlanmaya devam eder. Bu etki Bothen (2000) tarafından iki farklı nozul tipi ve iki farklı aşındırıcı malzeme için deneysel olarak yüksek hızlı fotoğraflama yöntemi ile incelenmiştir. Nozul çıkışından sonra kritik bir uzaklıkta bir hız dengesi oluşacaktır. Eğer bu kritik püskürtme mesafesi aşılsa hava sürtünmesinin etkilerine bağlı olarak partikül hızında bir düşme başlayacaktır. Aşındırıcı kütle akış oranının aşındırıcı hızına etkisi Şekil 1.6’da gösterilmiştir. Püskürtme mesafesinin etkisinin daha çok düşük kütle akış oranları için (daha yüksek hava kütlesi akış değeri) vurgulandığı görülmektedir. Ayrıca görülmektedir ki optimum püskürtme mesafesi daha yüksek aşındırıcı/hava kütle akış oranlarında daha yüksek değerlere çıkmaktadır (daha düşük hava kütlesi akışı) [60-63].



Şekil 1.4. Bağlı parçacık hızına püskürtme mesafesinin etkisi [60]



Şekil 1.5. Parçacık hızı üzerinde püskürtme mesafesi etkisi [62]



Şekil 1.6. Parçacık hızına püskürtme mesafesi ve hava kütle akış hızı etkileri [61]

Li ve diğerlerinin (2008) yapmış olduğu çalışmada, soğuk püskürtme bölgesindeki kaplamanın çökeltme özelliklerine nozul çıkışı ile hedef malzeme arasındaki mesafesinin etkisini partikül hızlanmayla sayısal simülasyon ve deneysel çalışma yaparak incelemiştir. Farklı boyutlarda, Al, Ti ve Cu tozu gibi ham maddeler

kullanılmıştır. Bu verimlilik çöküntüsü, bu çalışmada kullanılan Al, Ti tozu her ikisi için de 10 mm ile 110 mm arasında bir nozul çıkışı ile hedef malzeme arasındaki mesafenin artması ile azalma olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, Cu tozlar için, maksimum verimlilik çöküntüsü, 30 mm'lik bir nozul çıkışı ile hedef malzeme arasındaki mesafede elde edilmiştir ve sonra nozul çıkışı ile hedef malzeme arasındaki mesafesi 110 mm'ye kadar arttıkça, verimlilik çöküntüsü azalmıştır. Bu çalışmada, deneysel ve sayısal simülasyonun her ikisinden de elde edilen rapor sonuçlarına göre, birçok faktör nozul geometrisi, hızlanan gaz koşulları ve parçacıkların özellikleri de dâhil olmak üzere, soğuk püskürtme de parçacık hızını etkilediği gözlenmiştir. Bir daralan-genişleyen nozul için, nozul'ın genişleyen bölümü uzunluğunun artması parçacık hızında önemli bir artışa yol açtığını belirtmişlerdir. Nozul boyutları sabit kalıp, gaz sıcaklığı ya da basıncı artırıldığında, partikül hızı artmıştır. Helyum kullanıldığında parçacık nitrojen veya hava kullanıldığındaki duruma göre daha yüksek hıza ulaşabilmektedir. Ayrıca, parçacık hızı, parçacık boyutunun azalması ile birlikte artmıştır ve daha yüksek bir hız, aynı gaz koşulları altında daha düşük yoğunluğa sahip bir parçacık için elde edilmiştir [64].

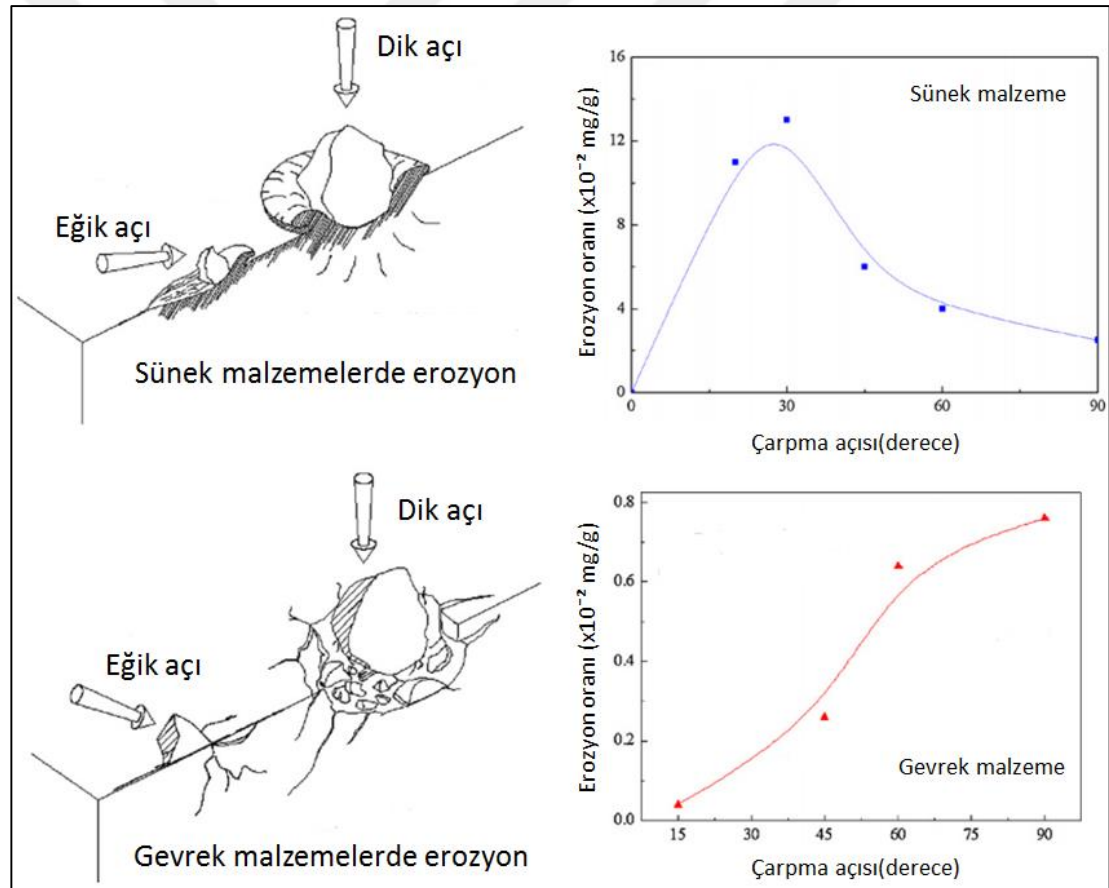
Ceylan (2006), tez çalışmasında toz püskürtme yöntemiyle boru iç yüzey kaplamanın incelenmesini yapmıştır. Deneysel çalışmalarda, püskürtme mesafesi ve hava basıncı değişken kaplama parametreleri olarak kullanılmıştır. Püskürtme mesafesi olarak 50mm, 100mm ve 150 mm, hava basıncı olarak 0 bar, 0,5 bar, 1 bar ve 2 bar değerleri kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen numunelerin ara yüzeyleri, mikro sertlikleri, yüzey pürüzlülükleri ve bağlanma mukavemetleri incelenerek değişken parametrelerin bunlara olan etkileri tespit etmiştir. Deneysel sonuçlar, yakın püskürtme mesafelerinde porozitenin arttığını fakat hava basıncının düşürülmesi ile porozitede bir miktar azalma olduğunu, uzak püskürtme mesafelerinde ise hava basıncının çok düşürülmesinin erimemiş partiküllere sebep olduğunu göstermiştir. 50 mm püskürtme mesafesi için 0,5 bar, 100 mm ve 150 mm püskürtme mesafesi için 1 bar hava basıncı bağ mukavemeti açısından en iyi değer olarak bulunmuştur [65].

1.6. Aşındırıcı Partiküllerin Çarpma Açısı

Çarpma açısına (α) bağlı olarak, katı partikül erozyonu iki şekilde incelenebilir [66, 67]:

- Dik çarpma açılarındaki erozyon ($\alpha = 90^\circ$)
- Eğik çarpma açılarındaki erozyon ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$)

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



Şekil 1.7. Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri [67]

Şekil 1.7’de tasvir edildiği gibi kırılğan malzemelerde maksimum malzeme kaybı yüksek çarpma açılarında ortaya çıkarken, sünek malzemelerde malzeme kaybının en fazla düşük çarpma açılarında ($\alpha \sim 30^\circ$) 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 [37, 50, 68]. Çarpma enerjisindeki kaybın büyük kısmı hedef malzeme yüzeyini pürüzlendirirken ortaya çıkar [69, 70].

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 [71].

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 [9].

Erozyon aşınmasındaki kütle kaybı çarpma açısının bir fonksiyonu olarak ölçüldüğünde sünek ve kırılğan malzemeler farklı özellikler gösterir. Sünek malzemelerin karakteristik özelliği düşük çarpma açılarında $\alpha=15^{\circ}-30^{\circ}$ arasında maksimum erozyon göstermeleridir. Kırılğan malzemeler maksimum erozyon davranışını normal çarpma açılarında $\alpha=90^{\circ}$ 'de gösterirler. Fiber takviyeli kompozitler, maksimum erozyonun $\alpha=45^{\circ}-60^{\circ}$ arasında ortaya çıktığı yarı-sünek davranış gösterirler [43, 46].

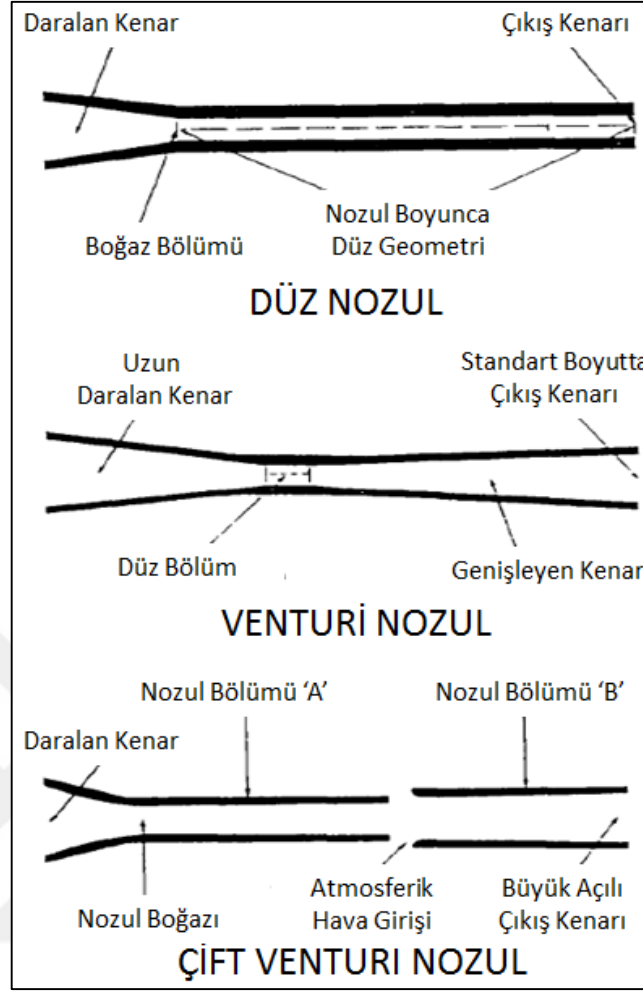
2. NOZUL GEOMETRİSİ

Kumlama nozullarının ilginç bir gelişim süreci vardır. Şekil 2.1’de görüldüğü gibi 1950 yıllarına kadar sabit kesitli ve düz hatlı nozullar kullanılmıştır. Kline ve diğerlerine (1988) göre kumlama nozul geometrileri koverjan-diverjan yapıda ve nozul içi boğaz kesiti minimum olduğunda daha efektif sonuçlar elde edilmeye başlanmıştır [15].

Bu tip nozullar 1888 yılında C.G.P. de Laval tarafından buhar türbinlerinde kullanım için bulunmuştur. Laval nozullar kumlama alanında kullanıma girmemişlerdir. Diğer taraftan Şekil 2.1’de görülen modern kumlama nozullarının hepsi Laval geometride olmasına rağmen yanlış isimlendirilerek ventüri tip nozullar diye isimlendirilmişlerdir [14].

Ventüri nozullar önceki düz nozullara göre kumlama işlemi için neden daha uygun olduğunu gaz dinamiği açısından bakıldığında, cevap hızlı şekilde verilebilir; bir roket nozulunda olduğu gibi nozul çıkışında yüksek hızlı akışı başarmanın tek yolu bu tip nozul geometrisi kullanmaktır [13]. Nozulun, akışın ses hızına yaklaşması için önce iyice daralması; sonrasında genişleyerek süpersonik hava hızlarına ulaşması beklenir. Roket nozulları da aynı prensiple çalışmasına rağmen irtifa arttıkça verimli şekilde çalışabilmeleri için daha geniş çıkış çaplarında yapılırken, kumlamada kullanılan nozullarda bu çaplara çıkılmaz.

Kumlama nozullarının tasarımını iyileştirmenin birinci hedefi üretkenliği artırmaktır. Kumlama nozulları açısından bakıldığında üretkenlik; aşındırıcı püskürtülerek bir günde bir nozul tarafından temizlenen alan olarak tanımlanabilir. (Burada yüzey temizlemenin derecesi ve yüzeyden kaldırılan kaplamanın kalınlığı tam olarak belirtilmeden tanımlamanın eksik olduğunu belirtmek gerekir) Kumlama verimliliğini artırmaya çalışmanın en önemli sebebi maliyetlerin düşürülmeye çalışılması, ikinci sebep ise çevre kirliliğini azaltmaktır [14].



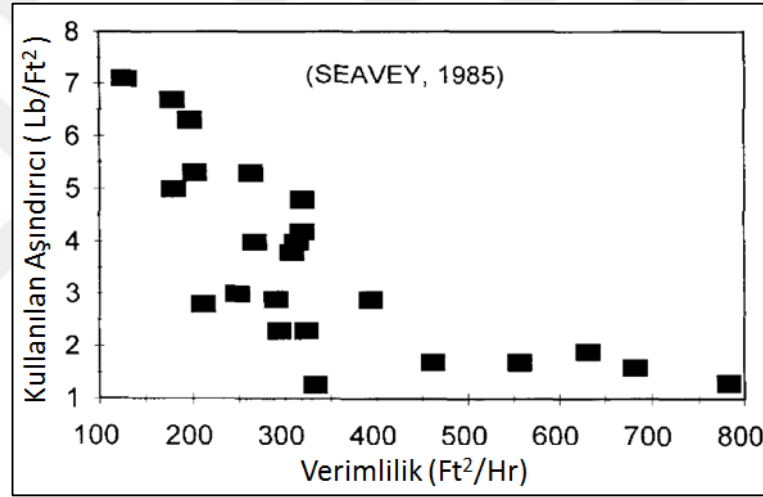
Şekil 2.1. Kumlama nozulları [14]

Lyras (1991), kumlama üretkenliği ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmiştir. İlk olarak 10 saatlik bir kumlama işleminde sadece 4 saatlik aktif kumlama işleminin yapıldığını kalan 6 saatin ise teçhizatın hazırlanması, ayarlar, molalar gibi süreçlere harcandığını göstermiştir. Dolayısıyla 4 saatlik süreçte verimli bir kumlama yapılması ve boya söküm işinin maliyetinin düşürülmesi büyük önem arz etmektedir. İkinci olarak Lyras yaptığı çalışmada üretkenlikle temizlenen birim alan maliyeti arasında ters orantı olduğunu ortaya koymuştur. Lyras yaptığı çalışmadan elde edilen sonuçlarla oluşturulan üretkenliğin 2 katına çıktığı sırada birim alan temizleme maliyetinin yarıya indiği gözlemlenmiştir [72].

Ekonomik olarak bunun anlamına bakarsak, Appleman (1992), köprülerde ortalama 4500 ile 7200 m² kumlama ile temizleme işlemi yapıldığını bulmuştur. Ülke çapında ortalama 1500 köprü her yıl yeniden boyanmaktadır. Appleman her yıl köprülerde ortalama 2,7 ile 6,48 milyon m² toplam kumlama yapıldığını öngörmüştür. Eğer

kumlama verimliliği 2 katına çıkarılırsa elde edilebilecek kazançlar yıllık 100 milyon \$ civarı olabilir [73].

Kumlama verimliliğinde artış aynı zamanda çevresel faktörler üzerinde de pozitif bir katkı yapmaktadır. Seaway (1985), Şekil 2.2’de göstermiştir ki daha yüksek verimlilik birim alanı temizlemek için kullanılan daha az aşındırıcı partikül anlamına gelmektedir. Bunun bilimsel açıklamasına bakıldığında daha yüksek verimlilikte, her aşındırıcı partikül temizlenecek yüzeyde daha fazla iş yaptığından toplam temizleme işini yapmak için daha az aşındırıcıya ihtiyaç duyulmaktadır. Daha az aşındırıcı kullanıldığında daha az aşındırıcı atığı ortaya çıkmakta ve çevresel etkiler azalmaktadır [17].



Şekil 2.2. Üretkenlik ile kullanılan aşındırıcı değişimi [17]

Daha iyi kumlama verimliliğinin yolunun nereden geçtiğine bakılması gerekir. Denklem (2.1)’de belirtildiği gibi, bir yüzeye çarpan aşındırıcı partikülün etkinliğinin, partikülün sahip olduğu kinetik enerjiyle doğru orantılı olduğunu söylemek gerekir.

$$E = \frac{1}{2} mV^2 \quad (2.1)$$

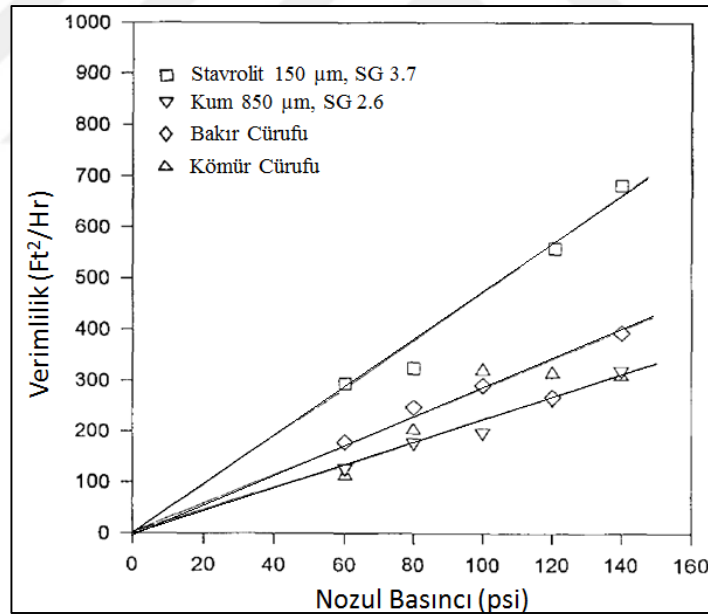
denkleminde V partikül hızı; m partikülün kütlesidir [74].

Bilimsel açıdan bakıldığında kumlama verimliliğini artırmanın 3 tane yolu vardır: (a) Sadece nozulun tasarlandığı basınçta veya daha yüksek basınçta kumlama yapılmalı (b) mümkün olan en küçük aşındırıcı boyutu kullanılmalı (c) gelişmiş bir kumlama nozulu kullanılmalıdır.

2.1. Nozul Basıncı ve Verimlilik Arasındaki İlişki

Seavey'in bilgileri nozul basıncını da kapsayacak şekilde kumlama verimliliği hakkında en detaylı bilgileri kapsayan çalışmadır. Bu bilgiler ışığında kumlama verimliliği ile nozul basıncı arasındaki ilişkinin sonuçları Şekil 2.3'te verilmiştir. Şekilde net olarak görülmektedir ki, nozul basıncı arttıkça verimlilikte doğrusal olarak artmaktadır ve bu artış kullanılan aşındırıcı malzemeye bağlıdır [17].

Her ne kadar nozul basıncıyla verimliliğin arttığı gerçeği kaplama sektöründe birçok çalışmada ortaya konmuş olsa da bu gerçeğin arkasında yatan gaz (akış) dinamikleri net olarak tanımlanamamıştır [14]. Bir hava akımı içindeki aşındırıcı partikülde ortaya çıkan geri sürüklenme kuvveti (drag); geri sürüklenme katsayısının, partikül boyutunun ve akışın dinamik basıncının çarpımına eşittir. Nozul basıncını artırmak doğru orantılı olarak dinamik basıncı arttırmakta ve bu da daha sonra aşındırıcı partikülü nozul içinde hızlandıran geri sürüklenme kuvvetini artırmaktadır [18].

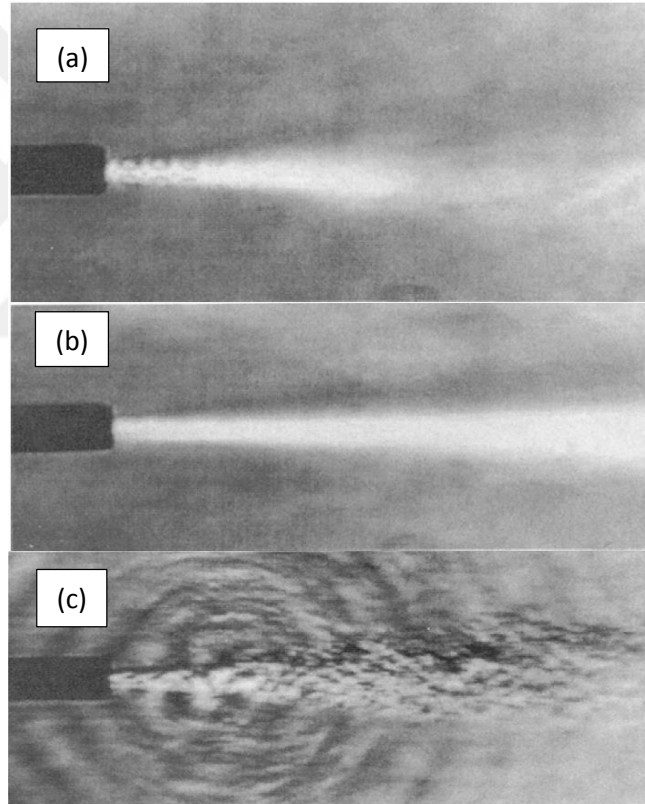


Şekil 2.3. Nozul basıncıyla verimliliğinin artışı [17]

Sadece nozul basıncını iki katına çıkararak verimliliği iki katına çıkarmak mümkün değildir. Günümüzdeki kumlama nozulları 100 psi (700 kPa) basınçta çalışacak şekilde tasarlanmışlardır ve basınçlarını 2 katına çıkarmak mümkün değildir. Yüksek basınçlara çıkıldığında kumlama yapan teknisyenin yorgunluğu nozulun geri tepmesi (geri basınç) sonucu artmaktadır. Daha da ötesi, eğer nozul yüksek basınçta çalışma

için tasarlanmadıysa nozulda yüksek basına çıkıldığında basınçta kayıplar da yaşanmaktadır [14].

Bu yüzden, şekil 2.3'teki grafiğın asıl önemi; düşük nozul basınçlarında kumlama yapıldığında ortaya çıkan verimlilik kayıplarını ortaya koymasıdır. Her Laval nozul sözde öyle bir tasarıma sahiptir ki, tasarlandığı çalışma basıncı nozulun atmosfere süpersonik hızda hava pşkrtmesini hava akışında minimum bozulmayla sağlamaktadır. Bu tasarım basıncının altında çalıştırıldığında nozul hem içinden geçen havayı hem de aşındırıcı partikülleri yavaşlatacak şok dalgaları oluşturur. Hava araçları ve uzay mekiklerinde ortaya çıkan bu 'şok elmas'ı görülebilirken, kumlama nozullarında gözlemlenemez [14].

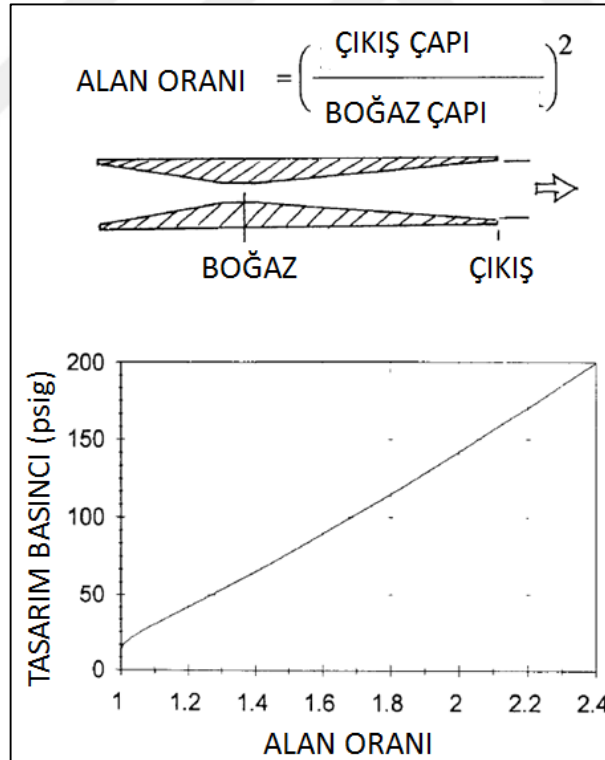


şekil 2.4. Kumlama nozulu Schlieren görüntüsü,
a) Tasarım basıncının altında, b) Tasarım basıncında c) Tasarım basıncının altında mikro-saniyelik görüntüsü sonucu elde edilen ses dalgası yayılımı [14]

Diğerk taraftan, Schlieren optiğı olarak bilinen bir yöntem kullanılarak 7 in uzunlukta ventrili nozul kullanılarak sadece 60 psi (420 kPa) basınçta ortaya çıkan şok dalgası şekil 2.4.a'da görüntülenmiştir. Bunun tam tersi olarak aynı nozul

tasarım basıncı olan 115 psi (800 kPa) basınçta çalıştırıldığında herhangi bir şok dalgası oluşturmada 2 Mach civarında yumuşak bir süpersonik hava jeti üretmiştir (Şekil 2.4.b). Son olarak Şekil 2.4.a'da verilmiş olan düşük basınçta püskürtme durumunun mikro-saniye zaman aralığındaki görüntüsü olan Şekil 2.4.c'de püskürtme jetinden etrafa doğru dalga şeklinde yayılan ses dalgaları görülmektedir [14]. Uzayda kullanılan nozul teknolojilerinde Laval nozulların tasarım basınçlarının çok altında çalıştırılması sonucu 'çığlık atmak' olarak isimlendirilen çok yüksek ses seviyeleri görülmektedir [75].

Sonuç olarak, düşük nozul basıncıyla kumlama yapmak düşük verimliliğe ve yüksek ses seviyelerine yol açmaktadır. Bu yüzden, mümkünse daha yüksek basınçlarda, mümkün değilse en azından tasarım basıncında nozulları kullanmak akıllıca bir seçim olacaktır. Şekil 2.5'te gösterildiği gibi, alan oranı, nozul çıkış çapının boğaz çapına oranının karesi ile değişmektedir. Düzgün çalışma için; basıncı hortuma girmeden önce değil, nozula girmeden hemen önce ölçmek önemlidir [14].



Şekil 2.5. Kumlama nozulu tasarım basıncının bulunma yöntemi [14]

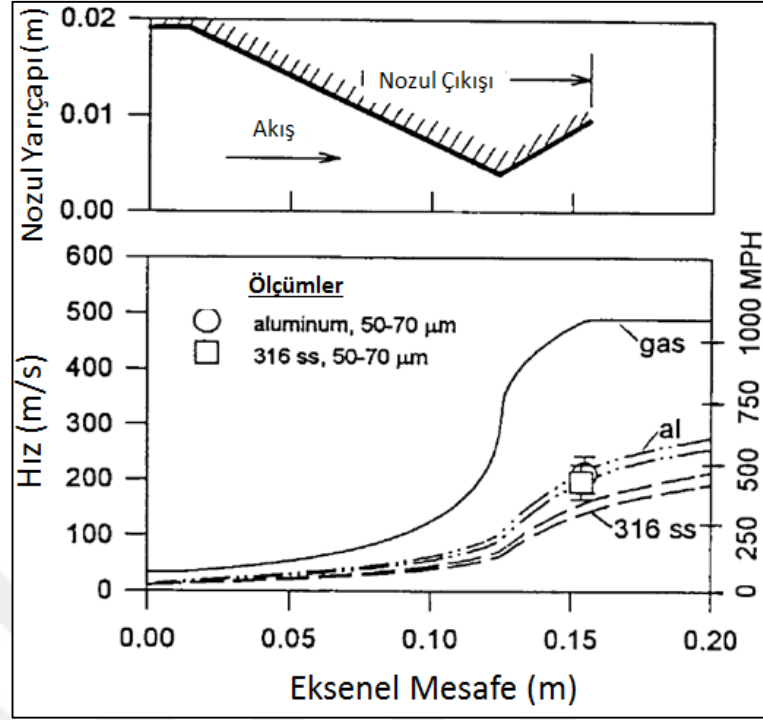
2.2. Verimliliği Aşındırıcı Tanecik Boyutu Üzerinden Artırma

Bir hava akımı içindeki katı partiküller havadan daha yoğun oldukları için, ataletleri (durağanlık) onların hava kadar hızlı ivmelenmelerini engeller. Havadaki birçok uçan partiküle göre, aşındırıcı partiküller daha büyük ve ağır olduklarından ataletleri büyük bir problemdir. Bu etki Şekil 2.3’de net şekilde gözlemlenmektedir; 150 μm ortalama boyuttaki stavrolit taneciği 850 μm boyutundaki kum taneciğinden çok daha ani hızlanarak verimliliği artırır (stavrolitin kumdan daha büyük yoğunluğa sahip olmasına rağmen). Bu konunun daha fazla irdelenmesi amacıyla, bir Laval nozul içindeki hava akışı ve onun küçük katı partikülleri hızlandırmasıyla ilgili bir bilgisayar modeli yazılmıştır [14].

Bu bilgisayar programında hava ve partikül özellikleriyle birlikte nozul geometrisi program için veri girişinde kullanılan değişkenlerdir ve nozul içindeki hem havanın hem de partikülün hareketi hakkındaki öngörülerde kullanılırlar [13]. Basitleştirme için sadece tek bir küresel partikül hesaba katılır ve böylece partikül yükleri veya çoklu partikül hesapları bu bilgisayar modelinde dışarıda tutulmuş olur. Bilgisayar programı partikülü nozul içinde yakalayarak kat ettiği mesafe boyunca her adımda üzerinde oluşan geri sürüklenme kuvvetini hesaplar. Sonuç nozul çıkışındaki partikül hızı (V)’dir ve gaz hızı olan (U) ile genelde aynı değerde değildir.

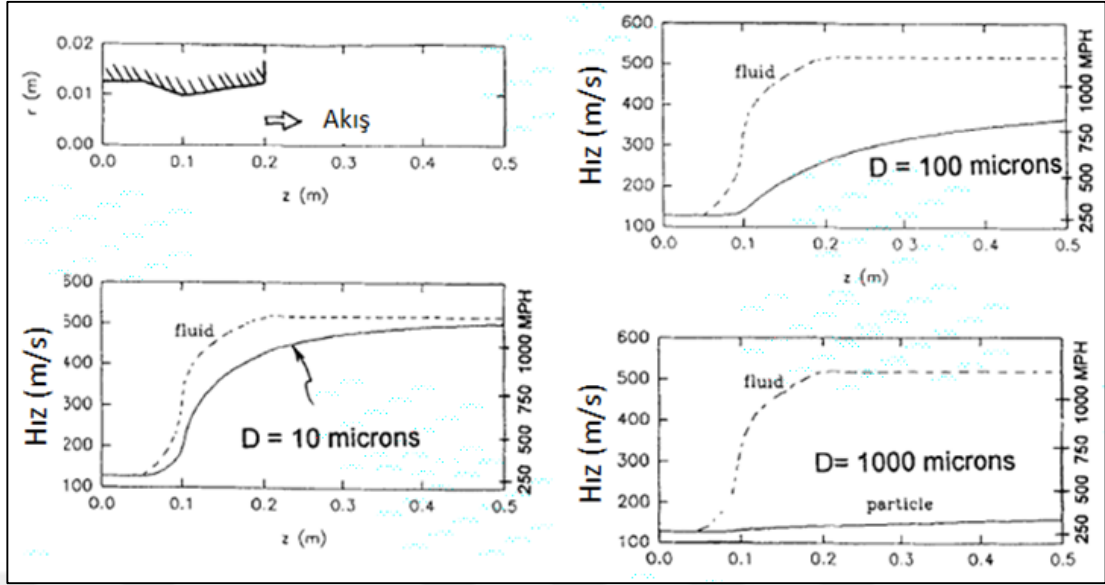
Bilgisayar modelinin doğrulaması deneysel olarak tasarım basıncında çalıştırılan bir Laval nozul içinden 50-70 μm boyutlarında alüminyum ve paslanmaz çelik partiküllerinin püskürtülmesiyle gerçekleştirilir. Partiküllerin nozul çıkışındaki hızları ‘çizgi fotoğraflaması’ diye isimlendirilen bir yüksek hızlı kamera görüntülemesiyle ölçülür [76].

Sonuçlar Şekil 2.6’da bilgisayar programıyla elde edilen sonuçlar çizgiler şeklinde, deneysel sonuçlar ise semboller şeklinde hız-nozul çıkışından mesafe şeklinde verilmiştir. Nozul çıkışında hava hızı 500 m/s (1650 ft/s) ulaştığında, partiküller çok geride kalarak sadece 200 m/s (660 ft/s) hıza ulaşmışlardır. Sonuçlar alüminyum partiküller için mükemmel, çelik partiküller için ise iyidir; bu yüzden bilgisayar modelinin gerçek durumla ilgili bir öngöründe bulunmak için kullanılabileceği söylenebilir.



Şekil 2.6. Laval nozulda öngörülen ve deneysel olarak ölçülen hızlar [14]

Daha sonra, 0,2 m (8 inç) uzunluğundaki bir kumlama nozulu için aşındırıcı partikülün büyüklüğünün hızına etkisini ortaya koymak için bilgisayar modeli yapılmıştır. Nozul tasarımı çıkışta 2 Mach olacak şekilde tasarlanarak bu değer için uygun olan 100 psi (700 kPa) basınca göre ayarlanmıştır. 1 özgül ağırlığında ve 10, 100 ve 1000 mikrometre büyüklüğündeki partiküller için hesaplamalar yapılmıştır. Sonuçlar Şekil 2.7’de gösterilmiştir. 10 μm boyutundaki partiküller bir şekilde hava akımının gerisinde kalmışlar fakat nozul çıkışında hava hızının %80’ine ulaşmayı başarmışlardır. 100 μm partiküller ciddi derecede sıkışarak nozul çıkışındaki hava hızının sadece %50’sine ulaşabilmişlerdir. 1000 μm partiküller nozul içindeki hava tarafından hiç hızlandırılmamışlardır.



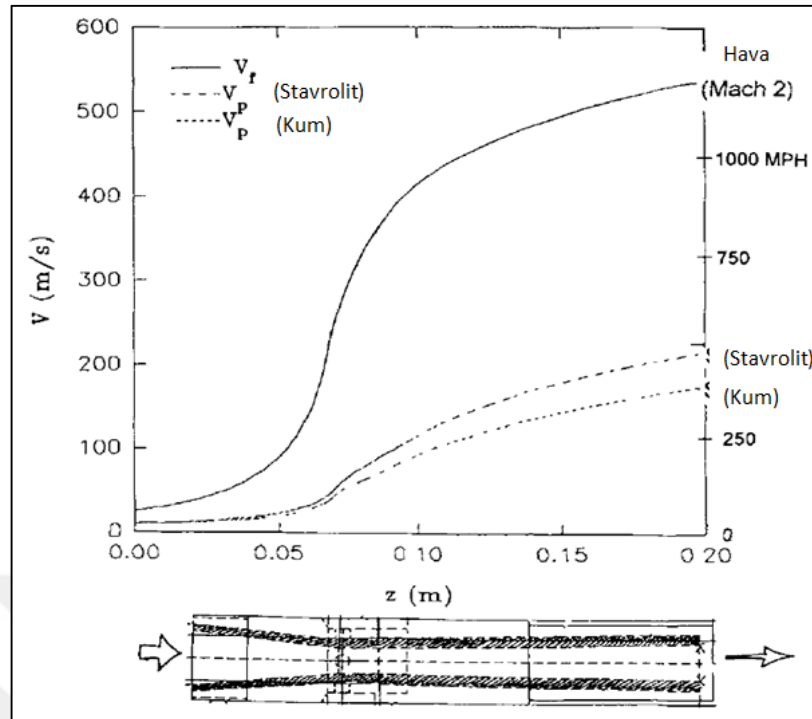
Şekil 2.7. Kumlama nozulunda farklı büyüklükteki partiküllerin hesaplanan hızları [14]

Büyük, ağır partiküller kumlama nozulu tarafından az ivmelendirilir, dolayısıyla düşük verime sebep olur. Yüksek verimliliğe ulaşmak için mümkün olan en küçük aşındırıcı partikül boyutunu kullanmak tavsiye edilir.

2.3. Nozul Tasarımı ve Kumlama Verimliliği

Nozul basıncı ve aşındırıcı partikül boyutu etkilerinden sonra, nozul tasarımının da kumlama verimliliği üzerine etkisi vardır. Nozulun tam şekli, uzunluğu ve iç çap/çıkış alanı oranı; bu parametrelerin hepsi maksimum aşındırıcı hızını elde etmek için kullanılması gereken parametrelerdir. Yukarıda tanımlanan bilgisayar modeli bu nozul tasarım parametrelerinin göreceli etkilerini ortaya koymak için araştırmalar yapmamıza olanak tanır.

Standart olarak 7 inç uzunluğundaki ventüri nozulun şekli kullanılarak program hesaplaması yapılmıştır. Seavey'in çalışmasındaki verileri karşılaştırma için 150 μm boyutunda stavrolit partikülü ve 850 μm boyutunda kum modellenmiştir. (Bu partiküllerin özgül ağırlıkları sırasıyla 2,6 ve 3,7'dir). Hesaplamanın sonuçları Şekil 2.8'de hızın nozul çıkışındaki eksene uzaklığına bağlı değişimi şeklinde verilmiştir. Referans olması açısından nozulun kesit geometrisi yatay eksen altında ölçekli çizim şeklinde verilmiştir.



Şekil 2.8’de nozul çıkışıındaki hava akış hızı 2,13 Mach’tır (533 m/s veya 1200 mph). Beklendiği gibi partiküller geride sıkışarak kalmıştır. Kum partikülleri sadece 173 m/s (570 ft/s) ulaşırken, daha ağır fakat daha küçük olan stavrolit partikülleri 200 m/s (660 ft/s) hızı geçmiştir. Stavrolit partiküllerin kuma göre daha yüksek olan momentum avantajı Şekil 2.4.a’da görüldüğü gibi daha yüksek kumlama verimiyle sonuçlanmaktadır.

Tipik bir kumlama nozulu verimi hesabı için öngöründe bulunurken; hava akışının kinetik enerjisi ile nozul çıkışındaki partikül akışı arasında bir karşılaştırma yapılır. Bu amaçla, Seavey tarafından yapılan kumlama testi datalarından tam sonuç alınanlar kullanılarak bilgisayar programı için koşullar oluşturulmuştur. Seavey standart 9,5 mm delik çapına sahip, 700 kPa (100 psi) basınçta 850 μm ortalama çapta kumdan 580 kg/saat (1280 lb/hr) püskürten bir nozul kullanmıştır. Hava akımının kütle akış hesabı yapılırken partiküller yokmuş gibi hesaplama yapılarak 0,16 kg/s (0,35 lb/s) bulunmuştur. Havanın nozul çıkışındaki hızı $U=533$ m/s (1760 ft/s) bulunmuştur. Buradan akışın kinetik enerjisi ya da sadece hava akımının gücü şu formülle hesap edilerek 23,3 kW bulunmuştur. Bu sonucun mantıklı olduğu

sonucuna; böyle kumlama işleminde kullanılması gereken kompresör kapasitesinin 33 kW veya 44 hp olduğu Hansel (1986) tarafından ortaya konulmuştur [77].

Tam zıt olarak, Seavey'in testlerinde hava akışıyla aşındırıcı partikül akışı aynı akış oranına sahipken, bilgisayar programında nozul çıkışında hız sadece 173 m/s (570 ft/s) olarak bulunmuştur. Bu durumda kum partiküllerinin gücü sadece 2,4 kW veya hava akış gücünün sadece %10'u kadardır. Bu yüzden Seavey'in kumlama deneyinde aşındırıcı olarak kum kullanıldığında toplam kumlama işlemi verimi %10 civarındır. Stavrolit partiküller daha küçük ve daha kolay hızlandırılabilirdiklerinden daha iyi bir verimlilik elde etmek mümkün olmaktadır. Bu çalışmaya göre, %10 iyi bir kumlama verimi değeri değildir. Bir başka deyişle, sıkıştırılmış havanın %90'lık kısmının enerjisi herhangi bir şekilde temizlenecek yüzeyde faydalı bir işe dönüştürülememektedir. Bu sonuç kumlama işleminde dramatik iyileştirmeler yapılabileceğinin göstergesidir. Örneğin, işlemin verimi 2 katına çıkarılabilir ve bu yapıldığında bile verimin toplamda sadece %20 olduğu rahatça söylenebilir [14].

Kumlama işleminde %100 verim mümkün değildir, çünkü gazın tüm enerjisini kalıntı ve kayıplar olmadan tamamen aşındırıcı partiküle aktarmak mümkün değildir. Kaba bir kılavuz olarak, Gregor (1985) yaptığı çalışmada değişken partikül boyutu ve yoğunluğu, yükleme faktörü ve nozul geometrisi bilgilerini kullanarak mümkün olan verim değerlerinin %3 ile %60 arasında değişebileceğini öngörmüştür [78]. Dolayısıyla kumlama verimini 2 katına çıkarmak imkansız bir süreç değildir.

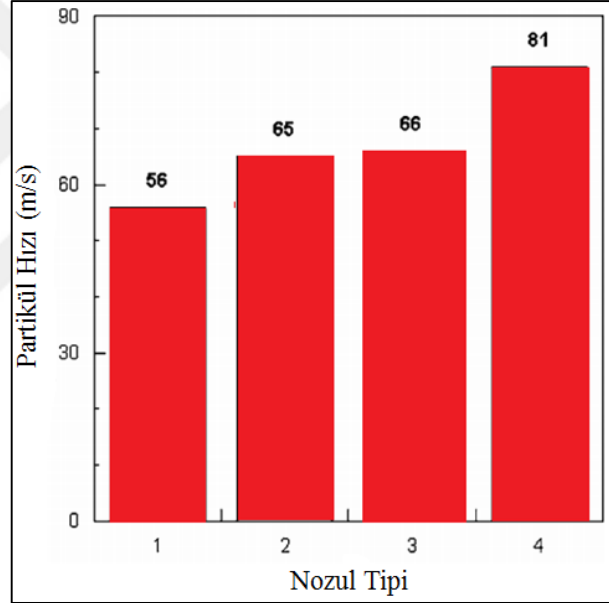
Nozul verimliliği hakkındaki daha detaylı çalışmada nozul boyutu ve şekliyle ilgili incelemeler standart uzun ventüri nozul geometrisinden başlayarak yapılmış ve Şekil 2.10'da verilmiştir. Örneğin Şekil 2.10'da nozul boğazına kadar olan ilk kısımda aşındırıcı hızında çok az veya hiç değişim olmadığı gözlemlenmiş ve bunun kumlama verimine katkısının olmadığı gözlemlenmiştir. Roket motorlarında kullanılan nozullardan elde edilen teknoloji ve bilgi birikiminin kumlama nozullarına aktarılmasıyla Seavey'in 850 µm kum partikülleriyle nozul çıkışında 230 m/s (760 ft/s) hızlara ulaşmak mümkün olmuştur [14].

Kum akışındaki kinetik enerji bu iyileştirme sonrasında toplam verimin %10'dan %18 seviyelerine çıkmasına yani verimi 2 katına çıkarmaya yaklaştığını göstermiştir [18]. Bu tür bir sonuç deneysel olarak da geniş bir kanıtlamaya ihtiyaç duysa da

kumlama nozulu verimini dramatik şekilde artırmanın mümkün olduğuna işaret etmektedir.

2.4. Parçacık Hızına Nozul Geometrisinin Etkileri

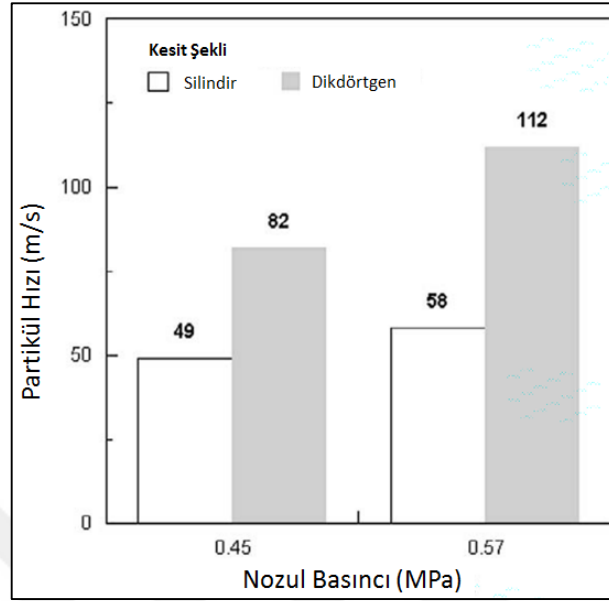
Hamann (1987)'de yaptığı çalışmada Şekil 2.9'da da görüldüğü gibi, 4 farklı geometride oluşturulan kumlama nozullarının aşındırıcı partikül hızlarına etkilerini incelemiştir. Oluşturduğu nozul tipleri: "1" - çan ağzılı + silindir; "2" - çan ağzılı + yakınsak; "3" - standart yakınsak-ıraksak; "4" - özel olarak tasarlanmış giriş bölümü ile yakınsak-ıraksak olarak belirlemiştir. En yüksek aşındırıcı parçacık hızı, özel olarak tasarlanmış bir giriş akış kesiti olan ıraksak-yakınsak nozul ile gerçekleştirilmesi mümkün olduğunu göstermiştir (nozul tip "4") [79].



Şekil 2.9. Aşındırıcı parçacık hızı üzerinde nozul tipi etkisi [79]

Düşük aşındırıcı parçacık hızı çan şeklinde bir giriş bölümü ve silindir şeklinde bir nozulda bulunmuştur (nozul tip "1"). Aşındırıcı parçacık hızlarının farklılıkları test nozul düzenekleri arasında %45 büyüklüktedir. Şekil 2.10'da aşındırıcı parçacık hızına nozulun enine kesit geometrisi etkileri gösterilmektedir. Bu, dikdörtgen bir enine kesit kullanıldığında özellikle geleneksel bir dairesel enine kesite göre kullanımı ile karşılaştırıldığında, partikül hızını artırabilir. Aşındırıcı parçacık hızı üzerindeki nozul enine kesitinin etkisi nozul hava basıncına bağlıdır. Aşındırıcı

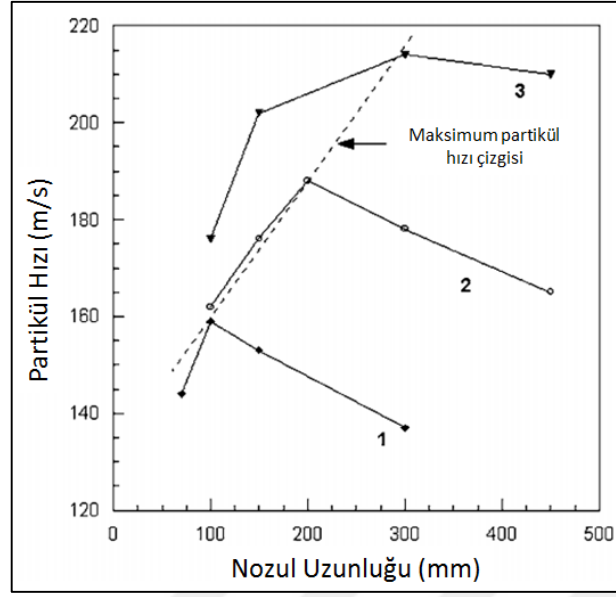
parçacık hızı artışı, bir nozul çıkışı basıncı $p=0,45$ MPa ‘da %67’dir (nozul basıncı $p=0,57$ MPa iken %93’tür.) [80].



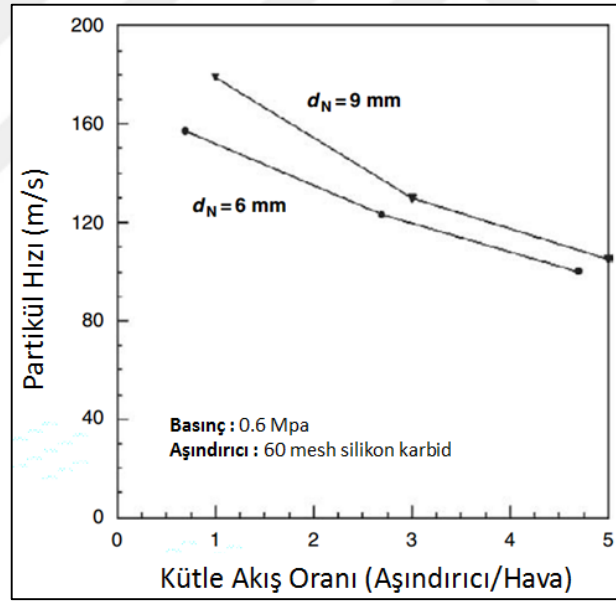
Şekil 2.10. Aşındırıcı parçacık hızına, basınç ve nozul enine kesit şeklinin etkileri [80]

2.4.1. Parçacık hızına nozul uzunluğunun ve nozul çapının etkileri

Aşındırıcı parçacık hızı ile ilgili nozul uzunluğunun etkisi üzerinde yapılan ölçümlerin sonuçları Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Hızın en büyük olduğu yerde optimum nozul uzunluğu olduğu görülebilir [63, 81]. Bu optimum için eğer nozul çapı azalır, nozul uzunluğunda küçük bir miktar değişim olacaktır ancak bu değişim parçacık kütle akış oranına (aşındırıcı/hava oranı) bağlı olmadığı görülmüştür. Nozul uzunluğu, nozul iç çapının yaklaşık 20 katı olduğunda maksimum eksenel aşındırıcı partikül hızına verilen debide ulaşılır [63]. Artan nozul uzunluğu parçacıkların nozul içinde hava ile temas süresini artırır ve böylece parçacığın hızları artar. Ancak daha uzun nozul, hava akışı etkisiyle sürtünmeyi artırır ve parçacık üzerindeki sürtünme kuvvetini artırır. Bir başka faktör ise parçacık ile nozul duvarı arasındır ve parçacık üzerinde etkisi olduğu kanıtlanmıştır. Bundan dolayı parçacık hızı azalmıştır [63, 81]. Nozul çapı (d_N) artarsa aşındırıcı partikül hız artışı Şekil 2.11 ve 2.12’de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 2.11. Nozul uzunluğu, nozul çapı ve kütle akış oranının parçacık hızı üzerindeki etkileri [63].



Şekil 2.12. Kütle akış oranı aşındırıcı/hava ve partikül hızı üzerinde nozul çapı etkileri [81]

2.4.2. Parçacık hızına nozul duvarı pürüzlülüğünün etkileri

Shipway ve Hutchings (1993), silindirik paslanmaz çelik nozul duvarı kullanıp nozul iç duvarın pürüzlülüğünü test ederek cam küre parçacıkların hızlarını hesaplamıştır. Pürüzsüz duvar yüzeyinde parçaların çıkış hızlarının daha büyük olduğunu gözlemlemiştir. Örneğin basıncın $p=0,06$ MPa olduğu teorik olarak parça

hızı cam küreler (yoğunluk $dP=125-150 \mu m$) için $vP=100$ m/s; pürüzsüz nozul için parça hızı ($Ra=0,25 \mu m$) $vP=85$ m/s; nozul pürüzlü yüzeyde ise ($Ra=0,94 \mu m$) hızın $vP=65$ m/s olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, parçacık çıkış hızı standart sapmasının duvar pürüzlülüğündeki artış ile arttığı görülmüştür. Bu sonuçlar parçacığın geri tepme etkilerine bağlanabilir. Duvar pürüzlülüğü arttıkça, geri tepme açısındaki artış, nozul boyunca birbirini takip eden çarpma noktaları arasında daha kısa bir mesafe olduğu tespit edildi. Nozul duvarı ile aşındırıcı parçacıkların etkisi, bazı parçacıkların birçok kez etkilediği bazılarının da nadiren etkilediği olasılıksal bir olay olarak kabul edilebilir. Bu da parçacık çıkış hızları yayılımı duvar sertliğinin artmasıyla artacaktır [82].

2.5. Nozullar ile İlgili Literatür Çalışmaları

Li ve diğerleri (2007), farklı sprey koşulları altında bir soğuk püskürtme nozulunun çıkış çapı optimizasyonu, ilk kez sayısal olarak incelenmiştir ve optimum genişleme oranının, gaz koşulları, parçacık boyutu, ıraksak nozul bölümü uzunluğu ve boğaz çapı tarafından etkilendiğini belirtmişlerdir. Optimal genişleme oranı gaz basıncı ve nozul ıraksak uzunluğu artışı ile arttığını, gazın sıcaklığı, partikül büyüklüğü ve nozul boğaz çapının artmasıyla azaldığını göstermişlerdir. 316L paslanmaz çelik tozu ile yaptıkları deney göstermiştir ki, yoğunluğu ve mikro sertliği yüksek 316L paslanmaz çelik kaplaması optimize edilmiş bir nozul kullanılarak hızlandırılıp hedef malzeme yüzeyine biriktirilmiştir. Kaplamalı mikro yapı ve mikro sertlik ile parçacık hızının iyi bir korelasyonu ile optimal tasarım yöntemi doğrulanmıştır [45].

Aydın (2005), çalışmasında gaz atomizasyon yönteminde yeni bir nozul tasarımı ve toz üretimini incelemiştir. Bu çalışmada, gaz atomizasyon yöntemi ile metal tozu üretimi için, dairesel yarıklı süpersonik bir nozul tasarımı yapılarak metal tozu üretimi gerçekleştirilmiştir. Nozula ait temel parametreler; boğaz alanı, gaz çıkış alanı, gaz çıkış açısı ve nozul geometrisi deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir [83].

İ. Uslan (1999), yapmış olduğu çalışmada, Mannesmann ve Laval tipi nozullarla üretilmiş hava atomize alüminyum tozu boyutuna nozul tipinin etkisi araştırılmıştır. Gazi Üniversitesi Gaz Atomizasyon Ünitesi'nde gerçekleştirilen çalışmalarda, Laval tipi nozulların, aynı basınçlarda daha yüksek metal/gaz debisi oranına sahip

olmalarına rağmen daha ince tozlar ürettikleri tespit edilmiştir. Ayrıca Laval tipi nozulların toz üretim hızını yaklaşık dört kat arttırdıkları, gaz tüketiminde de aynı oranlarda bir ekonomi sağladıkları belirlenmiştir [84].

Ünsal ve diğerleri (2013), bu bildiride sonik nozulların çalışma prensibi, kullanım alanları ve kalibrasyonları konularında bilgiler vermektedirler. Sonik nozullar daralan ve artan kesit alanından oluşmaktadır ve nozul giriş gaz basıncı yeteri kadar artırıldığında, en küçük kesit alanındaki akış hızı ses hızına eşit olur. Nozul giriş basıncının daha da artırılması ve nozul çıkışındaki basınç değişimleri en küçük alandaki ses hızını etkilemez ve dolayısıyla kütleli debi sadece nozul girişindeki basınç ve sıcaklığa bağlıdır. Bu basit çalışma prensibi, hareketli parça içermemesi ve debinin sadece nozul giriş koşullarına ve kesit alanına bağlı olmasından dolayı, sonik nozul debimetrelerinde üstün seviyede tekrarlanabilirlik ve yüksek doğruluk derecesi elde etmek mümkün olmaktadır. Bu nedenle endüstride çeşitli alanlarda uygulanan sonik nozullar, metrolojide gaz debimetrelerin kalibrasyonlarında ve referans sistem olarak dünyada başarı ile kullanıldığını belirtmişlerdir [85].

Sonuç olarak, daha verimli kumlama nozullarının geliştirilmesi verimliliği artıracak, işin daha çabuk bitirilmesini sağlayacak ve daha ucuza çevreyi daha az kirleterek işlemi tamamlamak mümkün olacaktır. Daha da ötesi, bunu yaparken sadece nozulu değiştirmek yeterli olacak, kumlama sisteminin kalan sistem parçaları aynen kullanılacaktır.

Diğer taraftan, kumlama veriminde en yüksek artış yolunun nozul tasarımından geçtiği nettir. Kumlama nozulları hiçbir zaman modern bilimsel yöntemler kullanılarak optimize edilmemişlerdir. Örnek bir bilgisayar programı göstermiştir ki tipik bir kumlama operasyonu ile elde edilen verim ancak %10'lar seviyesindedir. Öncü çalışmalar göstermiştir ki, nozul tasarımında gerçekleştirilen iyileştirmelerle bu verimin %18'ler seviyesine çıkarılabildiği görülmüştür. Daha fazla iyileştirmenin nozul tasarımını, basıncı, aşındırıcı boyutunu ve yükleme faktörünü optimize etmekle mümkün olduğu açıktır.

Böyle bir optimizasyonun ekonomik boyut olarak özendirici olduğu düşünülebilir. Mesela, USA köprü temizleme maliyetleri bu optimizasyon çalışması yapılarak gerçekleştirildiğinde her yıl yaklaşık 100 milyon \$ kazanç sağlanabilecektir. Bunu

gerçekleştirmek için burada bahsedilen iyileştirilmesin yapılması yeterli olacak, kumlama sistemi bileşenlerinin geri kalanında herhangi bir değişikliğe gidilmesine ihtiyaç olmayacaktır. Ayrıca daha az aşındırıcı kullanımına bağlı daha az evre kirliliği de pozitif bir katkı olacaktır [62].

Kumlama işlemi teknoloji transferine açık bir alan olmakla birlikte; düzenli ve disiplinler arası bir planlamayla, modelleme, laboratuvar deneyleri, saha testleri gibi süreçleri yürüterek yeni tip nozulların gerçekleştirilmesi için bir araştırma programı gerektirmektedir. Bu yüzden, kaplama ve diğer sivil mühendislik uygulamaları için yüksek miktarda yatırım yaparak iyileştirmeler yapmak yerine daha az maliyetle kumlama nozulu iyileştirmeleri yapmak daha mantıklı gözükmektedir.



3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ MODELLEMESİ

Birçok endüstri dalında bir ürünün performansının daha ürün tasarım sürecindeyken bilinmesi oldukça önemlidir. Böylece ürünün artan performans isteklerini karşılayıp karşılamadığı daha tasarı aşamasında görülebilir, probleme sebep olan etkenler bu aşamada ortadan kaldırılabilir ve optimize edilmiş ürün piyasaya sürülerek ürünün rekabet gücünü ve müşteri memnuniyetini artırma imkanına sahip olunabilir.

Firmalar ve mühendisler bu amaçla değişik araçların yardımına başvurmuş ve bu araçları hem tasarım sürecini kısaltmak hem de problemin fiziğini daha iyi anlamak amacıyla kullanmışlardır. Akış ve ısı transferi problemlerinin sanal ortamda çözülmesine olanak sağlayan HAD yöntemleri bu araçların başında gelmektedir [86].

Uzun yıllar boyunca yapılan testler ve edinilen tecrübeler firmaları HAD yöntemlerini daha aktif bir şekilde kullanılarak tasarım sürecini kısaltılma, simülasyonlar vasıtasıyla herhangi bir ürünü tasarım aşamasındayken optimize etme ve oldukça pahalı ve zaman alıcı olan deneylerin ve prototip üretme işlemlerinin minimize etme yoluna yönlendirmiş ve bunun sonucu olarak bir çok alanda akış modellenmesi ve ısı transferi konusunda yapılan çalışmaların sayısında büyük bir artış gözlenmiştir. Ayrıca bilgisayar konusundaki gelişmeler ve yüksek performanslı donanım düşük maliyetlerle sahip olma imkanı milyonlarca elemana sahip modellerle yapılan analizleri günlük bir iş haline getirmiştir [86].

Fluent sonlu hacimler yöntemini kullanan bir HAD yazılımıdır. 1983' ten bu yana dünya çapında birçok endüstri dalında kullanılan ve günden güne gelişerek tüm dünyadaki HAD piyasasında en çok kullanılan yazılım durumuna gelen Fluent, en ileri teknolojiye sahip ticari HAD yazılımı olarak kullanıcılarının en zor problemlerine kolay ve kısa sürede elde edilen çözümler sunmaktadır.

Fluent, genel amaçlı bir HAD yazılımı olarak, otomotiv endüstrisi, havacılık endüstrisi, beyaz eşya endüstrisi, turbomakine (fanlar, kompresörler, pompalar, türbinler v.b.) endüstrisi, kimya endüstrisi, yiyecek endüstrisi gibi birbirinden farklı

birçok endüstriye ait akışkanlar mekaniği ve ısı transferi problemlerinin çözümünde kullanılabilir. Bu özelliği sayesinde kullanıcıya birbirinden farklı birçok probleme aynı arayüzü kullanarak çözüm alma olanağı sağlar.

Kolay kullanımı ile Fluent, ürün performansını ürün henüz tasarım aşamasındayken ölçme, performansı düşüren etkenleri detaylı bir şekilde tespit ederek yine bilgisayar ortamında giderme ve piyasaya iyileştirme işlemleri tamamlanmış son ürünün verilmesi sağlayarak kullanıcısının zorlu rekabet şartlarında emsallerinden bir adım önde olmasına katkıda bulunur.

Fluent, sahip olduğu ileri çözücü teknolojisi ve bünyesinde barındırdığı değişik fiziksel modeller sayesinde laminar, geçişsel ve türbülanslı akışlara, iletim, taşınım ve radyasyon ile ısı geçişini içeren problemlere, kimyasal tepkimeleri içeren problemlere, yakıt pilleri, akustik, akış kaynaklı gürültü, çok fazlı akışları içeren problemlere hızlı ve güvenilir çözümler üreterek, AR-GE bölümlerinin tasarım esnasındaki en güvenilir aracı olmaya adaydır [86].

Fluent, sıkıştırılamaz (düşük sabsonik), orta sıkıştırılabilir (transonik) ve yüksek sıkıştırılabilir (süpersonik ve hipersonik) akışlar için HAD çözücüsüdür. Yakınsamayı hızlandıran çoklu ağ metoduyla beraber çoklu çözücü seçenekleri ile Fluent geniş hız rejimleri aralıklarında optimum çözüm etkinliği ve hassasiyeti getirir. Fluent'teki fiziksel modellerin zenginliği, laminar, geçiş ve türbülanslı akışların, ısı transferinin, kimyasal tepkimelerin, çok fazlı akışların ve diğer olguların sayısal ağ esnekliği ve çözüm tabanlı ağ uyarlaması ile hassas çözülmesine olanak sağlar.

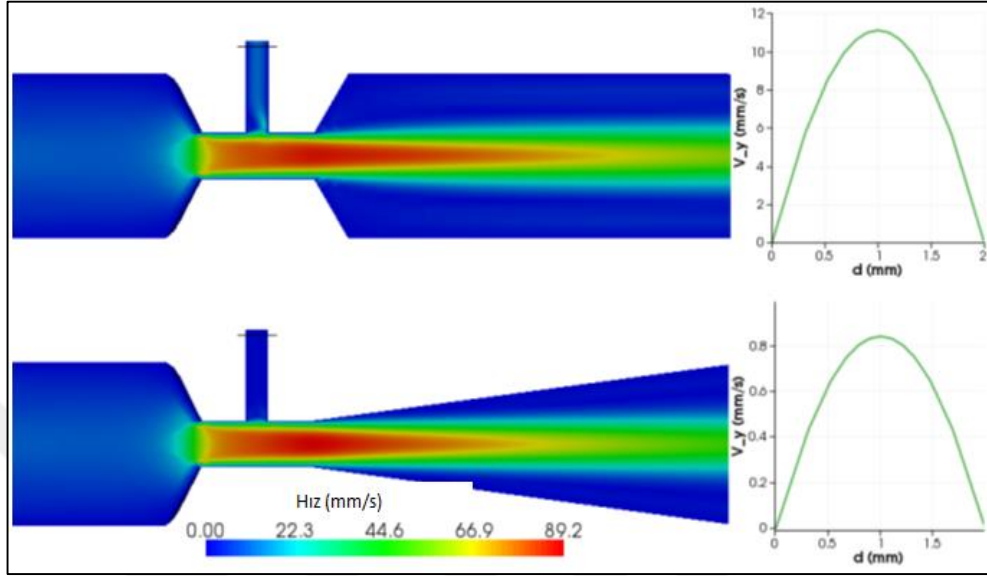
İvmelenme basıncı, püskürtme mesafesi, aşındırıcı partiküllerin özellikleri gibi deneysel parametrelerin ve nozul uzunluğu, nozul geometrisi gibi tasarımsal faktörlerin partikül çarpma hızını nasıl etkilediğini anlamak zor olduğu için birçok araştırmacı, modeller geliştirmeye çalışmış ve partikül çarpma hızını analiz etmek için hesaplamalı simülasyonlar kullanmışlardır [22-26, 32]. HAD iki fazlı gaz-katı akış simülasyonunu mümkün kılmış ve literatürde belirtildiği gibi partikül çarpma hızı analiz edilmiştir [22, 24, 33]. Bu nedenle, birçok araştırmacı HAD analizi kullanarak partikül çarpma hızı üzerinde çeşitli parametrelerin etkilerini analiz etmeye çalışmıştır.

Grewal ve diğerkleri (2013), HAD analizi kullanılarak çarpan parçacıkların hızına, nozul uzunluğunun etkilerini incelemişlerdir. Parçacıkları akışkanın hızına ulaştıracak mesafenin olmaması, parçacıkların akışkanla aynı hızda hareket ettikleri varsayımını ortadan kaldırdığı için HAD analizi partikül hızlandırma mesafesinin hesaplanmasında ve optimizasyonunda kullanılabilirliğini göstermişlerdir [34]. Çarpma öncesinde partikül hızının soğuk püskürtmenin en önemli parametrelerinden birisi olduğu genel olarak kabul edilmiştir. Deneysel ve nümerik simülasyondan elde edilen rapor sonuçlarına göre, bir çok faktör nozul geometrisi, ivmeli gaz koşulları ve partiküllerinin özellikleri, soğuk püskürtmedeki partikül hızını etkilediğini belirtmişlerdir [26]. Azimian ve diğerkleri (2012), iki sert metalin bir silindir tank içindeki su-kum karışımındaki erozif aşınmasını deneysel ve HAD simülasyonunu incelemiş ve etkileyen parametrelerin erozif aşınmasına bağımlılığını çalışmışlardır [35]. Özkaya ve diğerkleri (2013), düşük basınçlı aşındırıcı su jeti püskürtmesi yöntemiyle üç farklı boyutlarda alümina kullanarak, bunların HAD simülasyonları üzerine çalışmışlardır. Kapsamlı HAD simülasyonlarına göre, aşındırıcı su jeti akış alanı doğru olarak çözülebilir ve sonuçlar güvenli bir şekilde, yüzey erozyonu simülasyonlarında kullanılabilir olduklarını belirtmişlerdir [35].

Bayraktar ve diğerkleri (2013), HAD simülasyon yoluyla düşük basınçlı mikro aşındırıcı su jeti püskürtmesi (μ AWJB) için nozul tasarımı üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmada, Venturi prensibinden tıkanma sorununa neden olmayacak yeni bir nozul tasarımı elde etmek için yararlanılmıştır. Hacimsel akış oranı, daralma-genişleme oranları, silindirik boğaz uzunluğu ve eklenen (yan) borunun konumu incelenmiştir. Farklı nozul geometrileriyle ve HAD analiziyle düşük basınç μ AWJB için uygun olan bir nozul sayısal sonuçları ışığında bu faktörlerin analizi gerçekleştirmişlerdir. Sayısal bilgilere uygun olarak seçilen nozul, deneysel çalışmalar ile operasyonel olduğu kanıtlanmıştır [36].

Bu çalışmada, iki farklı venturi tüpleri, emiş gücü verimliliğine geometri etkisini göstermek için dikkate alınmıştır. Daha sonra, karşılaştırmalı bir çalışma hacimsel akış oranı etkisini göstermek için simülasyon çalışmaları deneysel olarak da gerçekleştirilmiştir. Son olarak, silindirik boğazın çapı azaltarak daralma ve genişleme oranlarını artırma etkisi araştırılmıştır. Ayrıca, silindirik boğaz uzunluğunun etkisi dikkate alınmıştır. Hesaplamaların doğruluğu bir kılavuza

bağımlı çalışma ile gösterilmiştir. Partiküllerle beraber akış, akış alanı üzerindeki parçacıkların etkisini göstermek için simüle edilmiştir. Şekil 3.1’de gerçekleştirdikleri simülasyon çalışmalarına bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.1. Hız büyüklüğü alanı ve yan boru açıklığı (siyah çizgi) boyunca hızının y-bileşeni [36]

Sayısal simülasyonlar, venturi tüplerin dizaynında iki en önemli parametrenin genişleme oranları ve yan borunun yerinin olduğunu göstermiştir. Hesaplamalar, bir AWJ nozul için optimize edilmiş bir geometri belirlemek amacıyla ön çalışmalar olarak kabul edilmesi uygun görülmüştür. Sonuçlar, aşındırıcı parçacıkların sürekli bir vakum oluşturabilen bir karıştırma odacıklı tasarımı için iyi bir rehber sunmaktadır [36].

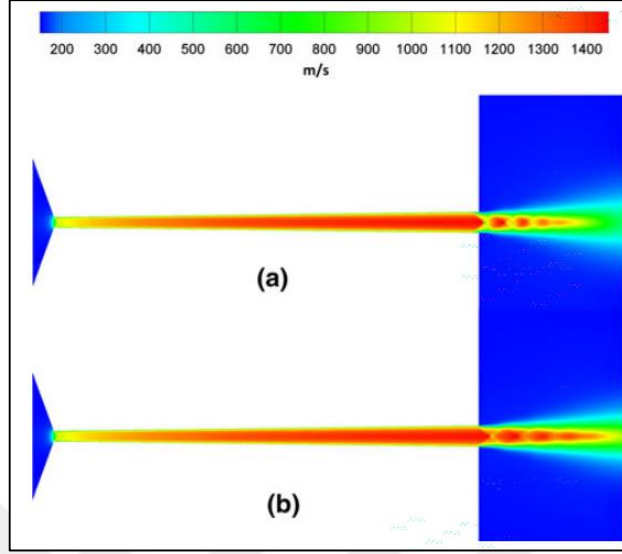
Yin ve diğerleri (2011) çalışmalarında, soğuk püskürtme yönteminde gaz akışına ve partikül ivmelenmesine nozul kesit alanının etkisini incelemişlerdir. Üç boyutlu modeller, gaz akışının ve parçacık hızlandırmanın tüm özelliklerini ortaya çıkarmak için kullanılır. Hesaplamaya göre nozul kesit şeklinin, gaz akış alanına partikül hızlandırmasına ve partikül çarpma hızına etki edebileceği sonucuna varılmıştır. Eliptik ve dikdörtgen nozullar karşılaştırıldığında, eliptik durumda yay şoku boyutu aynı en/boy oranında dikdörtgen bir nozul için biraz daha küçük olduğu bulunmuştur. Bu nedenle, eliptik nozullarda partikül hızlandırma yay şok etkisi zayıftır ve partiküller yüksek çarpma hızı elde edebilir. Ancak dikdörtgen nozullar için, daha çok partikül daha yüksek hız elde edecek çünkü nozulun iç yapısı daha

büyük kesit alanına sahiptir. Ayrıca en/boy oranı azaldığında yay şok boyu kısalmış bu sonuçlar hem dikdörtgen hem eliptik nozulda ortalama partikül hızını kademeli olarak artırır. Ama en/boy 0,2'e düştüğü zaman ortalama partikül çarpma hızı dik olarak azalmaya başlar. Ayrıca toz halinde salma pozisyonu üzerindeki sayısal araştırmalar göstermiştir ki en iyi partikül salma yeri nozul girişi olarak belirtmişlerdir [23].

Lupoi ve O'Neill (2011) çalışmalarında, soğuk sprej nozullarının toz akım karakteristiklerini incelemişlerdir. Soğuk Sprej (CS) yüksek enerjili parçacık etkileri nedeniyle bir substrat üzerindeki metal tozu birikimine dayalı yeni geliştirilmiş bir üretim tekniğidir. Bu işlemde, toz tipik olarak bir taşıyıcı gaz olarak hava, nitrojen veya helyum kullanılarak, bir ıraksak nozulla önemli hızı kadar yükseltilir. Son gelişmeler düşük porozite ve korozyona dayanıklı titanyum kaplama için çeşitli metaller yapılmış kalıp ücretsiz üç boyutlu şekillerin bina, önemli süreç yetenekleri ortaya koymuştur. CS olarak, hızlanma sırasında parçacık akış özelliklerinin kaplamanın nihai geometri ile ilgili olarak önemlidir. Deneysel çalışmalarda geniş bir çıkış akımı ve dar parçaların üretim zorluğu ile sonuçlanan, nozul hızlandırma kanalı boyunca yayılımı için partiküllerin eğilimi gösterilmiştir. Toz ekleme konumu, partikül yörüngesi ile ilişkisini belirlemek için, toz enjektör geometrisi ile birlikte, taşıyıcı gaz akımı içinde değiştirilmiştir. Fluent v6.3.26 programı tarafından HAD sonuçları deneysel gözlemlerle birlikte sunulmaktadır [16].

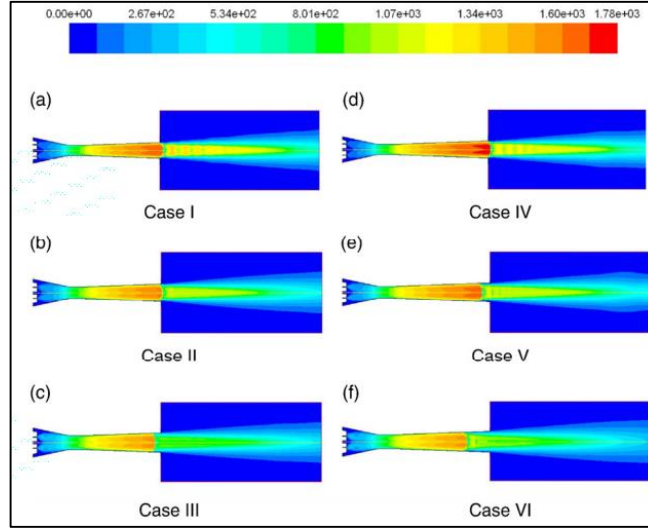
Sova ve diğerleri (2013), mevcut çalışmada, eksenel simetrik soğuk sprej mikro nozulda alüminyum, çinko ve bakır partiküllerinin ivmelenme hızlarının sayısal simülasyonu yapılarak deneysel olarak ölçmüşlerdir. Bu işlemde helyum gazı kullanıldığı zaman alüminyum ve çinko parçacıklarının 1 mm çıkış çapı 0,5 mm boğaz çapı, 20 mm uzunluğa sahip bir süpersonik nozul içinde kritik değerlerine yakın hızları hızlandırılabilir olduğu bulunmuştur. Micronozul tarafından sağlanan jet parçacık çapı, test edilen tozların türlerinin herhangi biri için 1,3 mm'den fazla olmamaktadır. Elde edilen deneysel sonuçlar partikül hızının ölçümünü klasik soğuk sprej süpersonik nozzle'ında yapmak için geliştirilmiş olan optiksel gözetleme sisteminin belirli limitler dahilinde mikonozle'larla da yapılabileceğini göstermiştir. Ayrıca, mikro nozul içinde helyum akışı ile hızlandırılmış alüminyum, bakır ve çinko parçacıklarının ortalama hızları ölçüldüğünde helyumun 20-40 µm'lık alüminyum

parçacıklarının 510-580 m/s kadar hızlandırılmasına olanak sağladığı bulunmuştur. Şekil 3.2' de gerçekleştirdikleri simülasyon çalışmalarına bir örnek verilmiştir [87].



Şekil 3.2. Gaz hızının izokontur değerleri, (a) p=2 Mpa, (b) P=3 Mpa [87]

Baik ve Kim (2008), yüksek hız oksijen yakıt (HVOF) termal püskürtme sistemlerinin performansına nozul geometrisinin etkisini incelemişlerdir. Fluent kullanarak kapsamlı bir HAD modeli, oksijen yakıt karışımı HVOF termal püskürtme nozulunda içinde gaz dinamik davranışları araştırmak için geliştirilmiştir. Şekil etkilerini altı farklı nozul ile incelemişlerdir. Bu çalışmada mach sayısının nozul boğazında her durumda bire yakın olduğunu (boğucu) ve gazın nozulun genişleyen bölümünde sesüstü hızlara ivmelendiğini göstermişlerdir. Nozulun çıkışında mach şok diskleri görülmüştür. Bu şok diskleri nozul boğaz genişliği arttıkça arttığı ve şok disklerinin konumunun nozul çıkışından geriye doğru hareket ettiği görülmüştür. Bu çalışmadaki hız dağılım konturları Şekil 3.3'de görülmektedir [88].



Şekil 3.3. Altı farklı nozulun hız dağılım konturları [88]

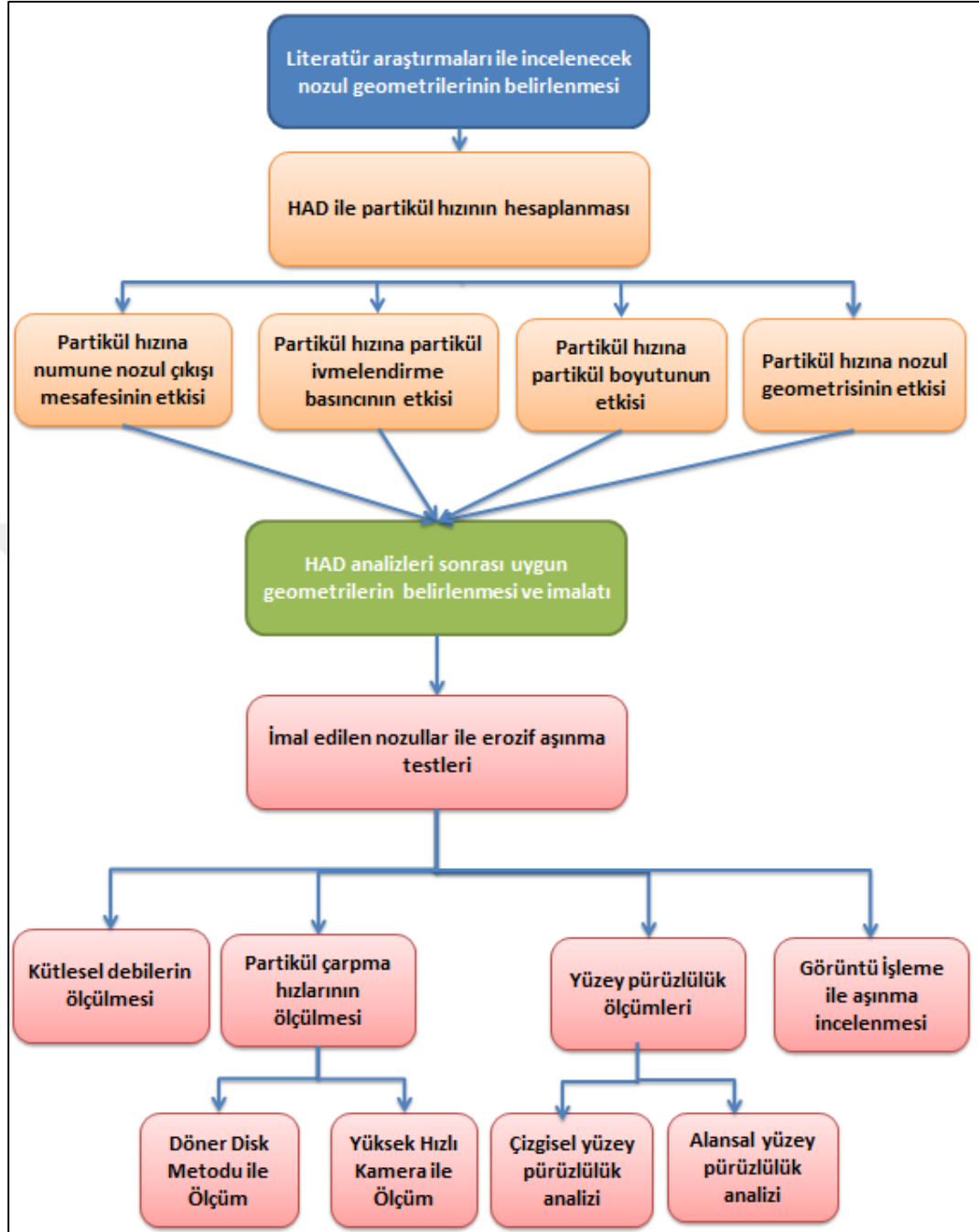
Katı partikül erozyonu birçok mühendislik malzemesinde ömür hesabını etkileyen önemli bir faktördür. Tasarım aşamasında mühendislik malzemelerinin katı partikül erozyonu davranışlarının simülasyon ortamında değerlendirilebilmesi; üretim öncesi zaman, malzeme, maliyet gibi kayıpları azaltacaktır. Böylece katı partikül erozyonuna maruz kalan mühendislik parçalarının tasarımı ve üretimi daha verimli hale gelecektir. Diğer taraftan elde edilecek simülasyon sonuçları; katı partikül erozyonuna dayanıklı malzemelerin geliştirilmesinde bilgi birikimi sağlayacaktır [22-26].

Literatür araştırması HAD analizinin, katı partikül erozyonu, erozyon çamur, soğuk sprej kaplama vb. gibi çeşitli işlemlerde partikül çarpma hızını incelemek amacıyla kullanılabileceğini göstermiştir. Öte yandan tez süreçlerinde partikül çarpma hızları üzerinde partikül hızlandırma basıncı, aşındırıcı partikül boyutu ve püskürtme mesafelerinin etkileri önemlidir. Bu nedenle, bir HAD analizi kullanılarak katı partikül erozyon sürecinde partikül çarpma hızlarına parçacık hızlandırma basıncı, nozul geometrisi, aşındırıcı partikül boyutu ve püskürtme mesafe etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu hedeflere ulaşmak için katı partikül erozyonu testleri, çeşitli test parametreleri altında simüle edildi ve bu parametrelerin etkileri detaylı olarak incelenmiştir [32-36].

4. MALZEME VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında farklı nozul tasarımlarının malzemelerin erozif aşınma davranışına etkileri akış simülasyonları ve erozif aşınma testleri yardımıyla incelenmiştir. Şekil 4.1'de verilen akış şemasında tez süresince gerçekleştirilen tüm çalışmalar özetlenmiştir. Çalışmalarda ilk olarak HAD yöntemi yardımıyla farklı geometrilerde nozullar tasarlanmış ve farklı parametreler altında analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde partikül hızının, nozul geometrisi, partikül boyutu, partikülün ivmelendirme basıncı ve püskürtme mesafesi etkisine göre değişimi incelenmiştir.

Tez çalışmasının ikinci aşamasında analiz sonuçları yorumlanarak uygun nozullar seçilmiş ve bu nozulların imalat işlemlerine geçilmiştir. Nozulların imalatından sonra deneysel çalışmalar ile simülasyon çalışmalarında kullanılan parametrelerin partikül çarpma hızlarına etkileri yüksek hızlı kamera ve döner disk hız ölçme metodu ile incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Daha sonra erozif aşınma testleri ile tüm nozullar farklı parametreler altında denenmiş ve farklı nozulların hedef malzeme üzerindeki erozyon izleri, kütle kayıpları ve yüzey pürüzlülük benzeri sonuçlara etkileri irdelenmiştir. Bu çalışmaların yanında nozul tasarımlarını partiküllerin kütsel debisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda tez çalışmasının ana amacı olan farklı nozul geometrilerinin HAD simülasyonları ve deneysel sonuçları başarı ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.1. Tez çalışmasında gerçekleştirilen çalışmaların akış şeması

4.1. Malzeme

4.1.1. Hedef malzeme

Erozif aşınma testinde hedef malzeme olarak Polimetil Metakrilat (PMMA) kullanılmıştır. Piyasada daha çok akrilik cam ya da pleksiglas olarak bilinen PMMA, renksiz ve şeffaf bir termoplastik polimerdir. Genelde cama alternatif

malzeme olarak tercih edilir ve polikarbonatla benzer özelliklere sahip olduğu için polikarbonatın kullanıldığı ürünlere de alternatif olabilir [89].

Kullanım alanları, otomobil camı, sinyal camı merceklerinde, uçakların kabin camları, helikopter ön ve üst kısmı, her çeşit cam kaplamalar, saat camı, ev dekorasyon ürünleri, ışıklı reklam panoları, residantal yapı ve ticari akvaryum dizaynı, izleme yerlerinde hatta denizaltı gövdelerinde, dışçılık ile ilgili cihazlar vb. malzemelerde kullanımı mevcuttur.

PMMA'nın ticari isimlerini Plexiglas, Vitroflex, Limacryl, R-Cast, Per-Clax, Perspex, Plazcryl, Acrylex, Acrylite, Acrylplast, Altuglas, Polycast, Oroglass, Optix ve Lucite olarak sayabiliriz. Tablo 4.1'de PMMA'nın teknik özellikleri verilmiştir.

PMMA emülsiyon polimerizasyonu, çözelti polimerizasyonu ve kütle polimerizasyonu ile üretilir. Bir kg PMMA üretmek için 2 kg petrole ihtiyaç vardır. PMMA radikal katılma polimerizasyonu yöntemiyle ataktik ve tamamen amorf olarak üretilir. PMMA güçlü ve hafif bir materyaldir. Özgül ağırlığı 1,17-1,20 gr/cm³'dür. Bu değer camın yarısından daha azdır (cam 2,60 gr/cm³). Cam ve polistirenden daha iyi darbe mukavemetine sahip olmasına rağmen bazı mühendislik polimerlerinden ve polikarbonattan daha düşük bir değerdedir. 460 °C'de karbürleşir. 3 mm kalınlıkta görünür ışığın %92'sini geçirir ve %4 oranında yansıtır. 300 nm'nin altındaki UV ışınlarını filtre eder. PMMA birçok organik çözücülere göre dirençsizdir yine de polistiren ve polietilen gibi birçok polimere kıyasla çok iyi çevresel şartlara dayanımı vardır. Bu nedenle dış çevre uygulamalarında tercih sebebidir.

Saf haldeki homopolimer polimetilmetakrilat nadiren uygulama için optimize edilmeden son ürün olarak satılır. Daha doğrusu diğer komonomerler, katkıları ve dolgu malzemeleriyle istenilen özellikleri kazandırmak amacıyla modifiye edilir. Örneğin;

- Küçük boyutlu akrilat komonomerleri proses boyunca PMMA'ya ısıl dayanım kazandırarak bozulmasını engeller.
- Bütil akrilat gibi komonomerler genelde darbe dayanımını arttırmak için,

- Metakrilik asit, camsı geçiş sıcaklığını arttırmak amacıyla aydınlatma uygulamaları gibi uygulamalar için,
- Plastikleştiriciler proses şartlarını iyileştirmek için (daha küçük camsı geçiş yada darbe dayanımı artırma),
- Dekoratif uygulamalarda renk vermek için veya UV dayanımı kazandırmak için boyalar,
- Daha düşük maliyet için ise dolgu malzemeleri PMMA'ya eklenir.

PMMA daha çok enjeksiyon, ekstrüzyon, vakum şekillendirme, döküm, şişirerek kalıplama yöntemleriyle şekillendirilir. Enjeksiyon kalıplama 200-250 °C, ekstrüzyon 180-250 °C sıcaklıkları arasında yapılır. Erimiş halde akıcılığı düşüktür. Bu nedenle enjeksiyonla kalıplaşmada yüksek basınçlar uygulanır ve enjeksiyon hızı düşük tutulur. Ön kurutmada 70-80 °C'de 3-4 saat fırınlanması öngörülür. Proses sıcaklığı 170-250 °C arasında olmalıdır [89-91].

Tablo 4.1. PMMA'nın teknik özellikleri [91]

Polimetil metakrilat (PMMA)	
Yapı	Amorf
Yoğunluk	1,16 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	137 °C
Kristalleşme Sıcaklığı	- °C
Camsılaşma Sıcaklığı	114 °C
Doğrusal Genleşme Katsayısı (CTE)	81,1 µm/m-°C
Yük Altında Eğilme Sıcaklığı (HDT)	96,6 °C @ 0,46 MPa
Azami Servis Sıcaklığı (Hava)	89 °C
Dielektrik Dayanımı	17 kV/mm
Saydamlık	Saydam
Mekanik Özellikleri	
Çekme Mukavemeti	48 MPa
Basma Mukavemeti	79 MPa
Elastisite Modülü	2,1 GPa
Kopma Esnemesi	50%
Darbe Dayanımı (Çentikli Izod)	0,36 J/cm
Sertlik	R120 Shore Ölçeği

4.1.2. Aşındırıcı malzemeler

Deneyisel çalışmalarda aşındırıcı partikül olarak, alüminyum oksit (Alumina) ve garnet (Grade) kullanılmıştır. Ayrıca bu aşındırıcıların üç farklı partikül boyutuyla

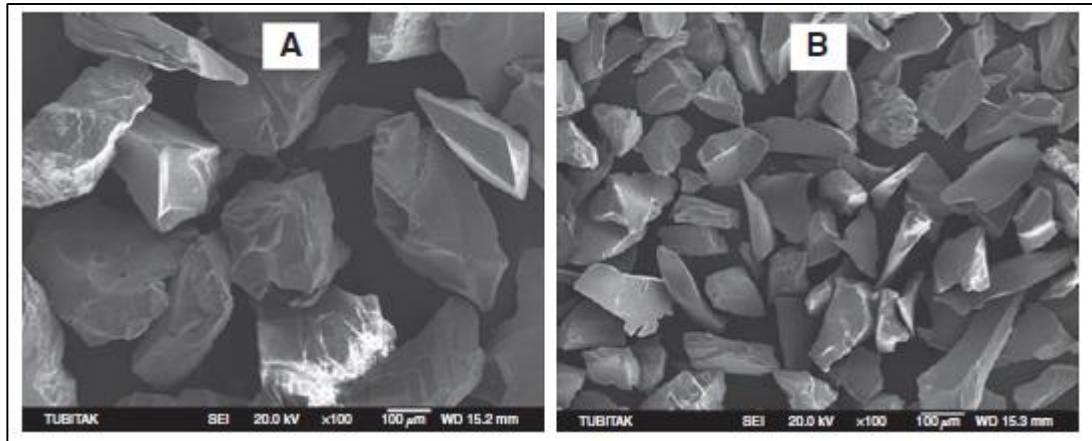
erozif aşınma testleri yapılmıştır. Tablo 4.2’de deneysel çalışmalarda kullanılan garnet ve alümina partiküllerinin partikül boyutları verilmiştir.

Tablo 4.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin kodları ve boyutları [92]

Aşındırıcı Partikül Adı	Aşındırıcı Tane Büyüklüğü
Grade C (30/60 Mesh)	180-600 μm
Grade D (40/80 Mesh)	125-300 μm
Grade E (60/120 Mesh)	90-250 μm
Alumina 60 mesh	212 - 300 μm
Alumina 80 mesh	150 - 212 μm
Alumina 120 mesh	90 - 125 μm

4.1.2.1. Alüminyum oksit aşındırıcı partikülü

Mineral içerikli bir sarf malzemesi olan alüminyum oksit, saflığına göre derecelendirilir. Piyasada alüminyum oksit, corund, korund, corondum, korondum, alumina isimleriyle de adlandırılan bu malzeme saflık derecesine göre beyaz, pembe ve kahverengi renkte bulunur. Şekil 4.2’de alüminyum oksitin 60 mesh ve 120 mesh boyutlarındaki SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.2. Alüminyum oksitin SEM görüntüleri; (A) 60 mesh, (B) 120 mesh [40]

Tablo 4.3’de teknik özellikleri verilen alüminyum oksit minerali, alüminyum metalinin oksijene karşı yüksek duyarlılıkta olmasından dolayı meydana gelmektedir. Yüksek sertlikleri ve dayanım ömürlerinin yüksek oluşları nedeniyle

yüzey işlem sektöründe tercih edilirler. Boya çıkarma veya pürüzlendirme işlemleri için en çok kullanılan malzemelerdir. Alüminyum oksit yüksek sertlikleri ve köşeli yapılarından dolayı özellikle kaplama öncesi pürüzlendirme işleminde yoğun olarak kullanılmaktadır.

Tablo 4.3. Alüminyum oksit mineralinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [92]

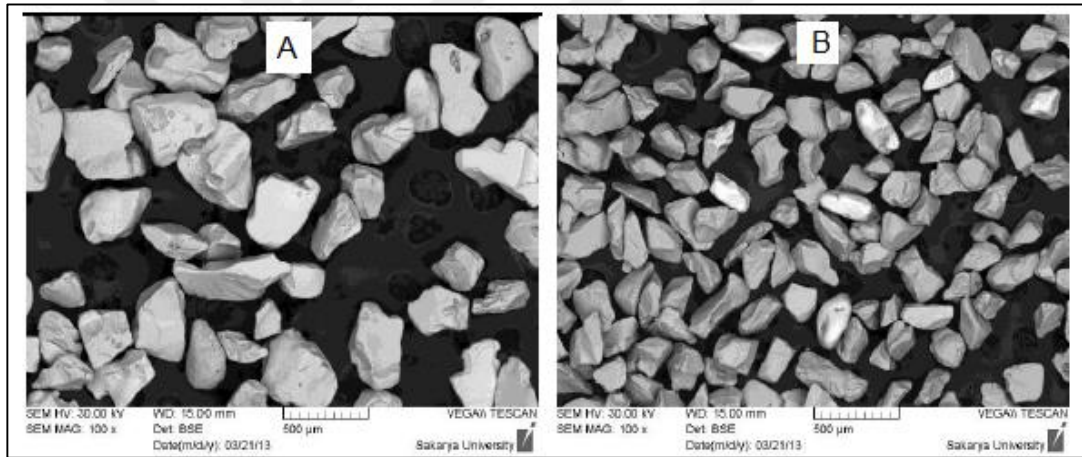
ALÜMİNYUM OKSİT MİNERALİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
Kahverengi Alüminyum Oksit 'in Özgül Ağırlığı	3,96 g/cm ³
Beyaz Alüminyum Oksit 'in Özgül Ağırlığı	3,92 g/cm ³
Pembe Alüminyum Oksit 'in Özgül Ağırlığı	3,92 g/cm ³
Ortalama Dökme Yoğunluğu	2,4 g/cm ³
Sertliği	9 (mohs scale)
Kristal Sistemi	Kübik
Kristal Şekli	Köşeli
Kırılması	Dökme Mineralin Preslenmesi Suretiyle
Dayanıklılığı	Yüksek
Serbest Akış Özelliği	97 % minimum
Aside Duyarlılığı	Yoktur
Nem Çekme Özelliği	Vardır.
Magnetiklik Özelliği	Çok hafif magnetikdir
Radioaktivite Özelliği	Tesbit edilmemiştir
Patolojik Zarar Verme Özelliği	Yoktur
Serbet Silika İçeriği	Yoktur
BEYAZ ALUMİNYUM OKSİT MİNERALİNİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	
Al ₂ O ₃ : %99,7	Klor içeriği <50 ppm
SiO ₂ : %0,02	Eriyebilen tuz içeriği<100 ppm
Fe ₂ O ₃ : %0,02	Sulu ortamda pH 6,93
TiO ₂ : %2,60-3,20	Alçıtaşı içeriğiYoktur
Na ₂ O: %0,20	Rutubet < 0,5 %Eser
Metal içeriği serbest Fe, Cu ve diğer ağır metaller eser oranda	Karbonat içeriği yoktur

Basınçlı hava ile birlikte yüzeye püskürtüldüklerinde, sarf malzemesinin boyutlarına bağlı olarak yüzeyde mikron mertebesinde yarıklar açmaktadırlar. Sonradan bir kaplama işlemi uygulandığında açılan bu yarıklara yerleşen kaplama malzemesi ana metale daha iyi tutunduğundan kaplama ömrü ve kalitesi yüksek olmaktadır. Beyaz alüminyum oksit saflık değerinden ötürü paslanmazlık özelliği taşıyan malzemelerin kumlanmasında tercih edilmelidir. Paslanmaz çelikler, titanyum ve alüminyum alaşımları, bakır ve pirinç alaşımları ve hatta seramik esaslı malzemelerin kumlanmasında tercih edilen beyaz alüminyum oksit, kahverengi

alüminyum oksite nazaran çok daha az toz çıkararak daha temiz bir yüzey kalitesi sunmaktadır.

4.1.2.2. Garnet aşındırıcı partikülü

Garnet benzer fiziksel özellikleri, kristal formu ve genel kimyasal bileşimlere sahip bir grup 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. Şekil 4.3’de garnetin 80 mesh ve 120 mesh boyutlarındaki SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.3. Garnetin SEM görüntüleri; (A) 80 mesh, (B) 120 mesh [9]

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. Demir içerikli olanların önemli bir özelliği 800°C’ye kadar ısıtılıp ani olarak soğutulduklarında sertliklerinin artması ve çatlaklarının derinleşmesidir.

Tablo 4.4’de fiziksel ve kimyasal özellikleri verilen garnet, son derecede sert ve üzerinde keskin çatlaklar bulunmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle ağaç, deri, cam, metal ve plastik malzemelerin işlenmesinde aşındırıcı olarak kullanılmaktadır. Kullanım çoğunlukla aşındırma kâğıdı, aşındırıcı diskler, bileme taşları, parlatma ya da cilalama toz ve kumları şeklindedir.

Tablo 4.4. Garnet mineralinin fiziksel ve kimyasal özellikleri [92]

GARNET MİNERALİNİN FİZİKSEL ÖZELLİKLERİ	
Özgül Ağırlığı	4,1 g/cm ³
Ortalama Dökme Yoğunluğu	2,4 g/cm ³
Serliği	>8 (mohs scale)
Kristal Sistemi	Kübik
Kristal Şekli	Dodekahedron ve nadiren de Trapezohedron
Kırılması	Yarı-concoidal (midye kabuğu şekli)
Dayanıklılığı	Yüksek
Serbest Akış Özelliği	97 % minimum
Aside Duyarlılığı	Yoktur
Nem Çekme Özelliği	Nem çekmez (higroskopik değildir)
Magnetiklik Özelliği	Çok hafif magnetikdir
Elektrik İletimi	10 microsiemens per meter
Radioaktivite Özelliği	Tesbit edilmemiştir
Patolojik Zarar Verme Özelliği	Yoktur
Serbet Silika İçeriği	Yoktur
GARNET MİNERALİNİN KİMYASAL ÖZELLİKLERİ	
Al ₂ O ₃ : 21%	Klor içeriği <50 ppm
Fe ₂ O ₃ : 31%	Eriyebilen tuz içeriği <100 ppm
SiO ₂ : 35%	Sulu ortamda pH6,93
MgO : 8%	Alçıtaşı içeriği Yoktur
CaO : 1,5%	Rutubet < 0,5 %Eser
TiO ₂ : 1%	Karbonat içeriği Hiç
P ₂ O ₅ : 0,05%	Kızdırma kaybı
MnO : 0,5%	Metal içeriği (serbest Fe, bakır ve diğer ağır metaller Eser

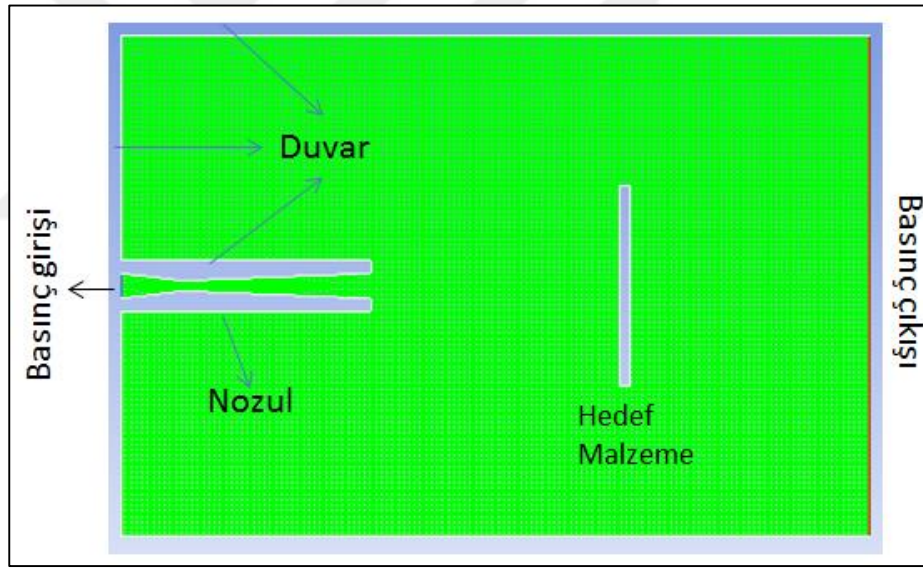
4.2. Yöntem

4.2.1. HAD yöntemi ile nozul tasarımları ve analizleri

Katı partikül erozyonunda partikül hızını etkileyen nozul geometrisi, gaz ivmelenmesi ve partikülün özellikleri gibi birçok faktör vardır. Katı partikül erozyonunda partiküllerin hızının deneysel olarak çift odaklı lazer hız ölçer kullanılarak ölçülebilmesine rağmen bu sistem verimsiz ve pahalıdır. HAD’deki ilerlemeler, iki fazlı akış olan gaz-katı akışını eksiksiz olarak simüle etmektedir.

Geçerli sonuçları elde etmek için HAD'nin kullanılması gerektiğine dair birkaç rapor bulunmaktadır. Bu yüzden, belirli durumlarda partikül hızını tahmin etmek için HAD yaklaşımının kullanılması yaygın bir hale gelmiştir. Çoğu araştırmada gaz durumu, partikül boyutu ve nozul tasarımı gibi konulara odaklanılmıştır. Fakat nozul geometrisi, partikül özellikleri ve süreç değişkenleri gibi parametrelerin etkileşimi henüz tam olarak anlaşılmamıştır [25].

Bu çalışmada, bir sayısal modelleme katı parçacık erozyon işlemi ile ilgili nozul çıkışı ile hedef malzeme arasındaki mesafe, ivmelenme basıncı ve parçacık boyutu etkilerinin belirlenmesi amacıyla Ansys-Fluent 14.5 programı kullanılmıştır. İki boyutlu düzlemde simetrik modeller hesaplama süresini azaltmak için kullanılmaktadır. Nozul giriş ve çıkış yüzeyleri şematik olarak Şekil 4.4 'de verilmiştir.



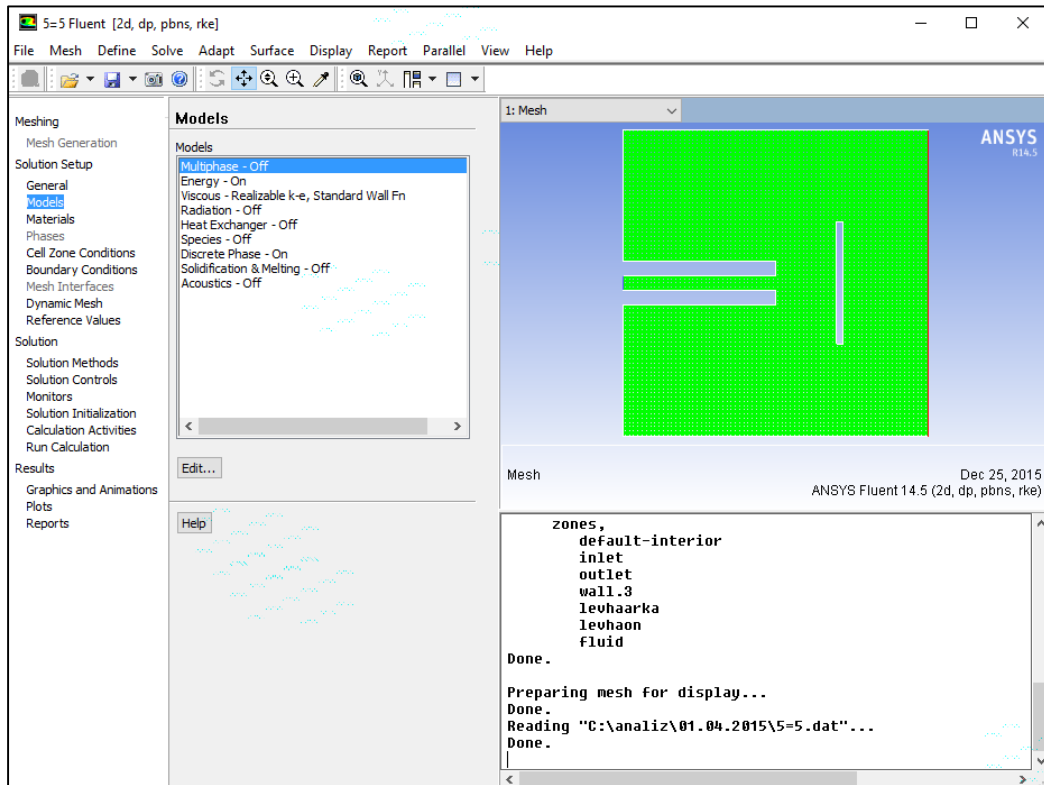
Şekil 4.4. HAD simülasyonunda kullanılan geometrik modelin şematik diyagramı

Sınır koşulları basınç girişi (gerçek çalışma basıncı) ve basınç çıkışını (statik atmosferik koşullarıyla eş) belirlemek için değerler kullanılmıştır. Gerçekçi sonuçlara uygulamak için çıkış sınır koşulları nozul çıkış kesitinden yeteri kadar uzakta olması gerekir [87]. Bu nedenle dış etki alanı yarıçapı 50 mm ve nozul çıkışından uzunluğu 100 mm olan bir silindir modellenmiştir. Hedef malzeme nozul çıkış konumundan belirli mesafelerde sert yüzey olarak modellenmiştir. Duvar sınırı, Şekil 4.5'de Ansys-Fluent programının varsayılan değerleri kabul edilerek,

hareketsiz ve ısı akışı yoktur. Hedef malzeme olarak 20 mm çapında ve 2 mm kalınlığında bir disk kullanıldı. HAD analizinde, nozulun iç boyutları farklı geometrilerde ve uzunluğu 50 mm kadar bir silindir idi. Hava bu çalışmada itici gaz olarak seçilmiştir. İdeal gaz yasası, sıkıştırılabilirlik etkisini göz önüne alarak yoğunluğu ölçmede kullanılır. Gaz akışı için denklemler içeren fiziksel yasalar kütle, momentum ve enerjinin korunumunu içerir. Çünkü kararlı bir akış için sağlam ve verimli birleştirilmiş şema elde etmek önemlidir.

Basıncı hava ideal ve sıkıştırılabilir olarak alınmıştır. Kararlı bir durumda; akış alanını ve sonuçları çözmek için Fluent'te kullanılan mevcut bir birleştirilmiş kapalı yöntem elde edilmiştir. Realizable K- ϵ türbülans modeli simülasyonda kullanılmıştır [22, 23, 25, 45].

Partikül püskürtme materyali olarak garnet kullanılmıştır. Partikül hızlanması ayrı faz modelleme (DPM) kullanılarak hesaplanır. Model yeterince düşük hacimli kesirlere ihtiyaç duyar. Bu durumda bütün püskürtme partikülleri küreseldir ve küresel sürtünme kuralları sürtünme katsayısını hesaplamak için kullanılır. Partikül-partikül etkileşimleri ve gaz fazdaki partikül etkileri ihmal edilebilir [23].



Şekil 4.5. ANSYS Fluent programı arayüzü

4.2.2. Nozul imalatı

Katı partikül erozyonunu etkileyen önemli faktörlerden bir tanesi de aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye püskürtülmesi sırasında kullanılan nozul geometrileridir. Nozul geometrileri aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye çarpma öncesi hız kazanmalarında ve hedef malzeme yüzeyine çarpma esnasında yayılım alanlarının üzerinde birinci dereceden etkiye sahiptir. Bu yüzden gerçekleştirilen doktora çalışmasında farklı iç geometrilere sahip nozullar tasarlanarak ürettirilmiş, katı partikül erozyonu testlerinde bu farklı nozul geometrileriyle deneysel ve simülasyon çalışmaları yapılarak kullanım amacına yönelik olarak hangi geometrinin optimum sonuçları vereceği ortaya konulmaya çalışılmıştır.

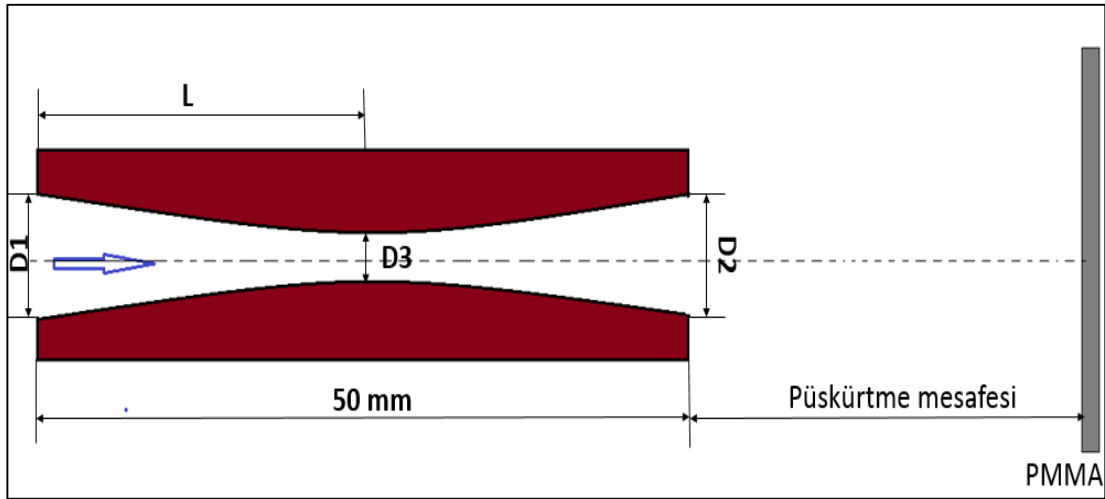
Kumlama olarak adlandırılan basınçlı hava ile kum püskürtme işleminde basınçlı kumlama hortumundan sonra dar boğaz yaratıp kumun basınçlı bir şekilde yüzeye püskürmesini sağlayan ekipman kumlama nozulu 'dur. Bu işlem sırasında kum-hava karışımı nozulun iç yüzeyine yoğun bir şekilde temas eder. Bu temas esnasında sürekli sürtünme ve aşınmaya maruz kalan kumlama nozulunun bu duruma dayanım gösterebilmesi gerekmektedir. Aksi takdirde çok kısa zaman aralıklarında nozulun değişmesi gerekmektedir. Bu durum çok ekonomik olmadığı için nozul imalatında sert metal oksitler kullanılmaktadır. Doktora çalışmasındaki nozullar iç geometrilerinin üretim zorluğundan dolayı metal oksit kullanılarak değil, çelik malzemeden imal edilmişlerdir. Fakat kısa sürede aşınmalarını engellemek için üretimleri sonrası ıslı işleme tabi tutularak yüzeyinin sertleşmesi sağlanmıştır. Şekil 4.6'da imal edilmiş nozullar gösterilmiştir.



Şekil 4.6. İmal edilen nozullar

Kumlama işleminde sarf edilen hava miktarını belirleyen nozulun iç çapıdır. Bu sebeple kumlama nozulu seçiminde kullanacak hava kompresörünün ürettiği hava miktarı da göz önüne alınmalıdır. Kumlama nozulu kullanırken dikkat edilmesi gereken en önemli faktör, sarf malzemesinin boyutlarıdır. Hava ve kum karışımının kumlama nozulunun ucundan verimli bir şekilde püskürtülebilmesi için, kullanılan kumun boyutunun nozul çapına bağlı olarak seçilmesi gerekmektedir. Genel olarak kum taneciği boyutunun en az 10 kat daha büyük çapta kumlama nozulu kullanılması gerekmektedir. Örneğin 600 μm kadar olan tane büyüklüğüne sahip sarf malzemesi kumun püskürtülebilmesi için minimum 6 mm çapındaki kumlama nozulu kullanılmalıdır [92].

Nozul geometrilerinde girişte büyük çıkışta küçük çaplara sahip farklı boyutlarda konverjan tipte birlikte giriş ve çıkış arasında farklı mesafelerde boğazlara sahip nozul geometrileri seçilmiştir. Şekil 4.7’de nozul geometrisinin teknik resmi verilmiştir. Burada nozul uzunluğu 50 mm sabit alınarak, nozul giriş çapı (D_1), nozul çıkış çapı (D_2), nozul içindeki boğaz çapı (D_3) ve nozul içi boğaz konumunun nozul girişinden uzaklığı (L) olarak ifade edilmiştir. Farklı geometri ve ölçülerde tasarlanan 15 adet nozul geometrisine ait ölçüler Tablo 4.5’de verilmiştir.

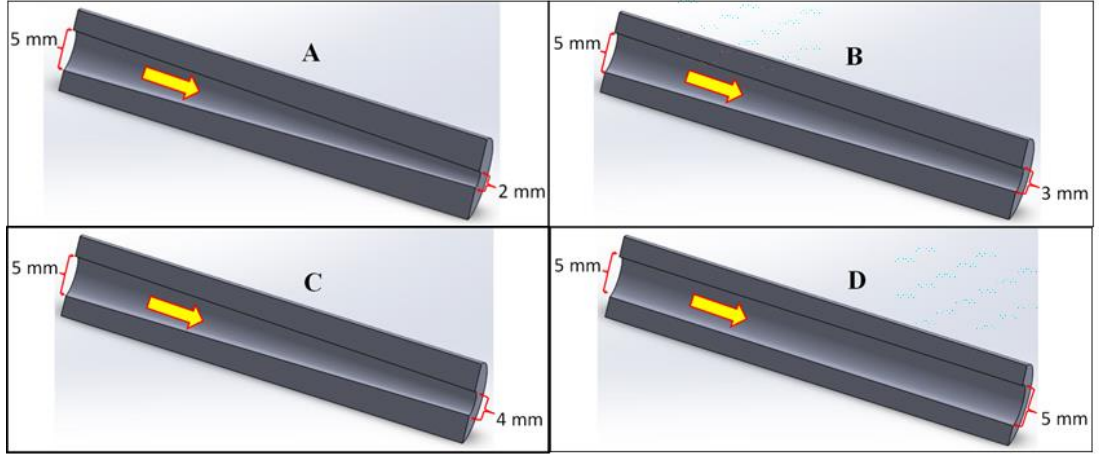


Şekil 4.7. Nozul geometrisinin teknik resmi

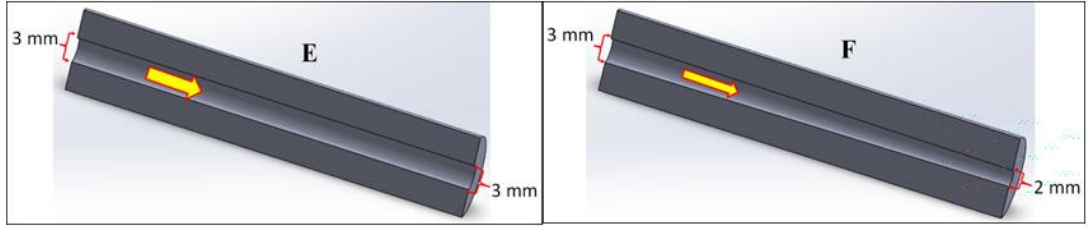
Tablo 4.5. Farklı nozul geometrilerinin ölçüleri

Nozul Adı	D1 (mm)	D3 (mm)	L (mm)	D2 (mm)	Sınıflandırma
A	5			2	I.Grup
B	5			3	
C	5			4	
D	5			5	
E	3			3	II.Grup
F	3			2	
G	5	2	25	5	III.Grup
H	5	3	25	5	
I	5	4	25	5	
J	5	2	37,5	5	IV.Grup
K	5	3	37,5	5	
L	5	4	37,5	5	
M	5	2	12,5	5	V.Grup
N	5	3	12,5	5	
O	5	4	12,5	5	

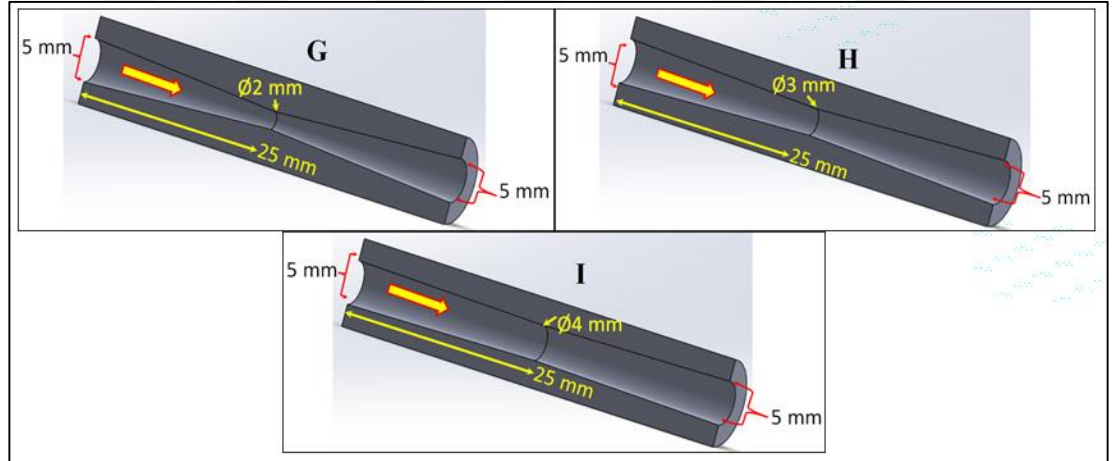
Şekil 4.8-4.12 arasında üretilen farklı geometrideki nozulların teknik resimleri verilmiştir. I. grup nozul geometrilerinde giriş çapı 5 mm olarak belirlenmiş çıkış çapları 2 mm'den başlayarak 1mm arttırılıp 5 mm çapına kadar 4 farklı nozul tasarlanmıştır. II. grup nozul geometrilerinde ise giriş çapı 3 mm, çıkış çapları ise 2 mm ve 3 mm olarak çizilmiştir. Bu iki gruba ait nozul geometrileri literatürde Mannesmann nozulları olarak adlandırılmaktadır. Diğer gruptaki nozulların iç kısımda oluşturulan daralma boğazları giriş kısmından farklı mesafelere yerleştirilmiştir. Boğazın nozul uzunluk eksenindeki yerinin püskürtme karakteristiğine etkilerini ortaya koymak için bu tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Bu nozulların giriş çapları ve çıkış çapları 5 mm'de sabit tutulmuştur ve boğazın bulunduğu yerin çapları da 2, 3 ve 4 mm olarak belirlenmiştir. III. grup'ta nozulun tam orta noktasında farklı çaplarda boğaz oluşturulmuştur. IV. Grup'ta nozulun çıkışına yakın kısımda farklı çaplarda boğaz oluşturulmuştur. Bu boğazın yeri nozulun uzunluğunun %75'lik kısmına gelmektedir. V. Grup nozullarda ise boğazın yeri nozul uzunluğun %25'lik kısmına yerleştirilmiştir. Bu boğazlı tip nozul geometrileri literatürde laval tip nozullar olarak bilinmektedir.



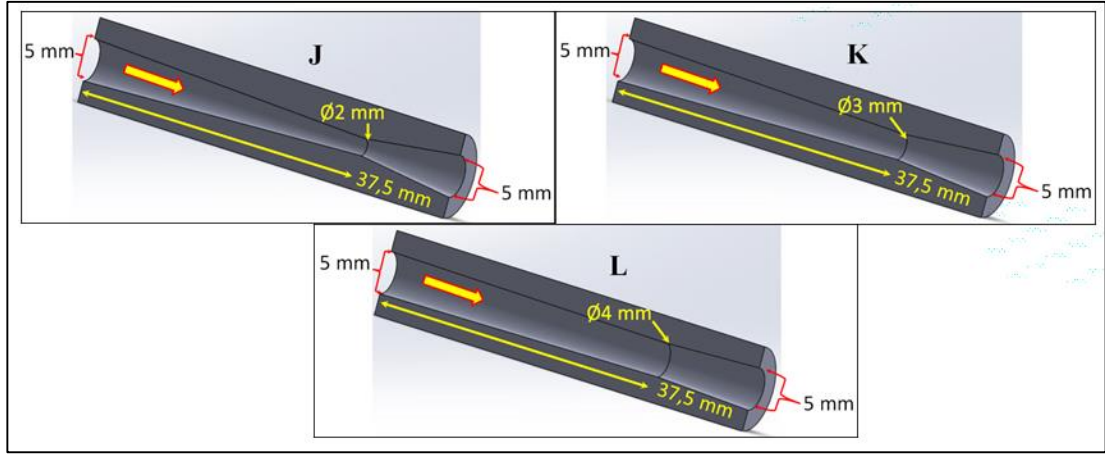
Şekil 4.8. I.grup nozul geometrileri



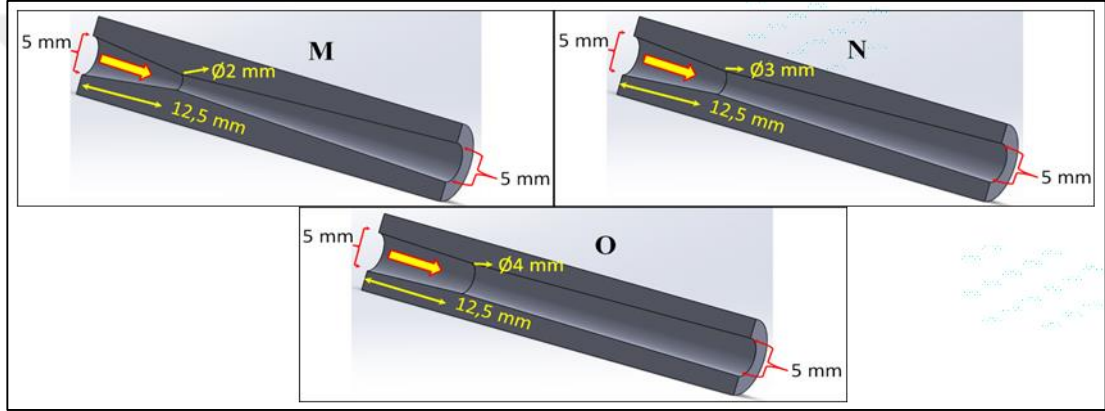
Şekil 4.9. II. grup nozul geometrileri



Şekil 4.10. III. grup nozul geometrileri



Şekil 4.11. IV. grup nozul geometrileri



Şekil 4.12. V. grup nozul geometrileri

4.2.3. Eroziyon aşınma deneyleri

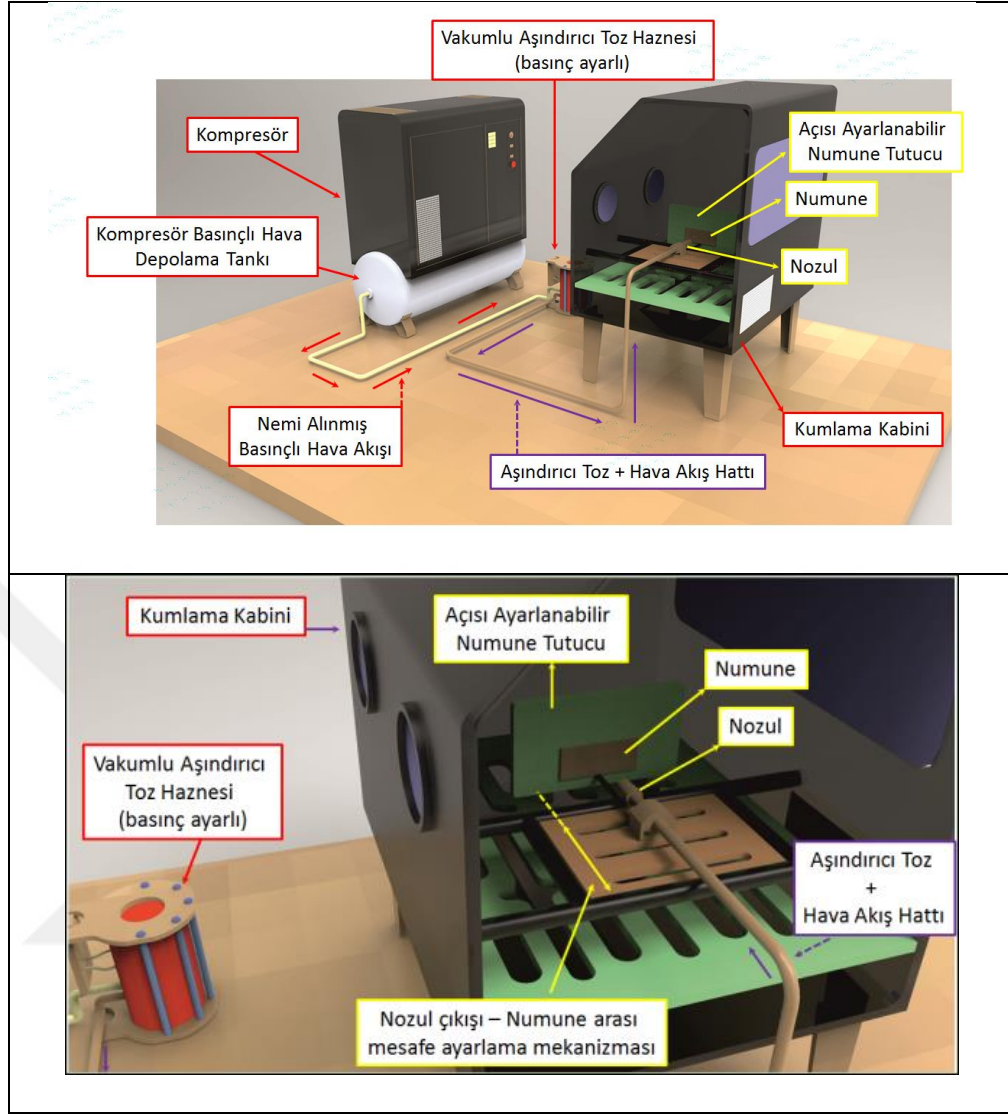
Eroziyon aşınma deneyleri özel olarak tasarlanan eroziyon aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Eroziyon aşınma test düzeneği basınçlı hava kompresörü, portatif basınçlı kumlama makinesi, kumlama kabini, numune fikstürü ve kumlama tabancası elemanlarından oluşmaktadır. Kumlama tabancası kumlama kabini içerisine sabitlenmiştir ve kabin dışarısından portatif basınçlı kumlama makinesi üzerindeki bir kol vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Kumlama basıncı da portatif basınçlı kumlama makinesi üzerine 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 farklı püskürtme mesafelerinde (20, 50, 70, 100, 120 mm) tutulmuştur.

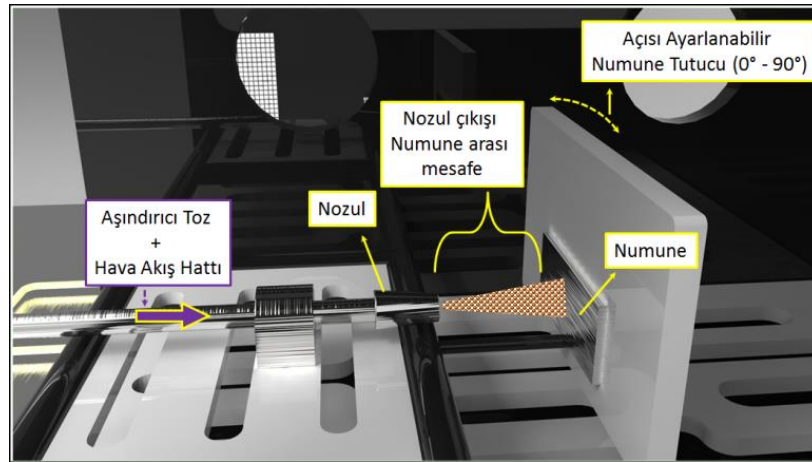
Bu çalışmada gerçekleştirilen erozif aşınma testleri ASTM G76-95 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı partiküller olarak Tablo 4.2’de verilen boyutlarda garnet ve alümina kullanılmıştır. Testler özel tasarlanmış test kabiniinde 90° çarpma açısında 1,5 bar püskürtme havası basıncında gerçekleştirilmiştir. Aşındırıcı partiküller vakumlu kaptan basınçlı hava yardımıyla çekilerek nozuldan püskürtülmüştür. 50x50x5 mm boyutundaki PMMA numuneleri nozul çıkışından 20, 50, 70, 100 mm mesafeye yerleştirilmiştir. Her numune için 20 saniye süre ile püskürtme yapılmıştır. Her bir parametrede iki tekrar yapılarak sonuçların ortalaması alınmıştır. Her numune test öncesi ve sonrası basınçlı hava ile temizlenerek testler sonrası hassasiyeti $\pm 0,1$ mg olan hassas terazi ile kütle kayıpları ölçülmüştür. Erozif aşınma testlerinde kullanılan düzenek Şekil 4.13 ve 4.14’de gösterilmiştir. Nemi alınmış basınçlı hava ile püskürtülen aşındırıcı parçacıklar Şekil 4.14’de gösterilen düzende 15° ile 90° açıları arasında hedef malzemeye çarptırılabilir. Erozif aşınma test parametreleri Tablo 4.6’da verilmiştir.

Tablo 4.6. Deneylerde kullanılan erozif aşınma test parametreleri

Aşındırıcı Tipi	Alümina-Garnet
Aşındırıcı Boyutu	60-80-120 mesh
Aşındırıcı Çarpma Açısı	90°
Püskürtme Basıncı	1,5 bar
Test Sıcaklığı	25 °C $\pm$ 2 °C
Test Süresi	20 saniye
Nozul çıkışı-Numune arası mesafe	20-50-70-100 mm



Şekil 4.13. Katı partikül erozyonu test düzeneği



Şekil 4.14. Kumlama kabini iç düzeneği

4.2.4. Aşındırıcı partikül karakterizasyonu

Bu çalışmada HAD analizi kullanılarak çeşitli parametreler altında katı partikül erozyonunun simülasyonu amaçlanmıştır. Simülasyon parametreleri önceden araştırmacılar tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalara uygun olarak seçilir [93, 94]. Bu nedenle, ticari olarak elde edilebilen 20-40, 80, 120 ve 180 mesh boyutlu garnet parçacıkları temin edilmektedir ve bu parçacıkların ortalama parçacık boyutları, Şekil 4.15’de gösterilen bir lazer kırınım parçacık boyutu analizörü (Microtrack S3500) kullanılarak analiz edilmiştir. Tablo 4.7’de garnet parçacıklarının ortalama parçacık boyutu verilmektedir. Daha sonra garnet parçacıklarının ölçülen ortalama parçacık boyutları, sayısal modellemede parçacık boyutları olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.15. Microtrack S3500 cihazı [95]

Tablo 4.7. Bu çalışmada modellenen garnet partiküllerinin ortalama partikül boyutları

Garnet Partiküllerinin ticari kullanımı	Ölçülen ortalama partikül boyutu
20-40 mesh	702 μm
80 mesh	238 μm
120 mesh	206 μm
180 mesh	158 μm

4.3. Partikül Çarpma Hızlarının Ölçülmesi

Partikül çarpma hızı; katı partikül erozyonu, kumlama, soğuk plazma sprej kaplama, termal püskürtme ile kaplama gibi birçok işlemler için en önemli parametrelerden biri olarak kabul edilebilir [22-25]. Bu nedenle, lazer doppler hızölçer, fotoğraf tekniği, döner disk vb. gibi çeşitli yöntemler parçacık hızı ölçmek

için kullanılmıştır [26]. Partikül arpma hızını çeşitli parametreler etkiler ve çarpan partiküllerin hızı bu parametrelerin etkilerini anlamak için son derece önemlidir. Zeng ve diğ rleri (2007) nozul geometrisinin, ivmelenen gazın ve partiküllerin özelliklerinin, partikül çarpma hızını etkilediğini bildirmişlerdir [22]. Li ve diğ rleri (2007) de, nozul geometrisinin partikül hızını büyük oranda etkilediğini bildirmişlerdir [45]. Literatür çalışmalarından yola çıkarak bu tez çalışmasında farklı nozul geometrileriyle aşındırıcı partiküllerin püskürtülmesi sonucunda partikül çarpma hızları, yüksek hızlı kamera yöntemi ve döner disk ile ölçüm yöntemi kullanılarak deneyler yapılmıştır.

4.3.1. Yüksek hızlı kamera ile ölçüm

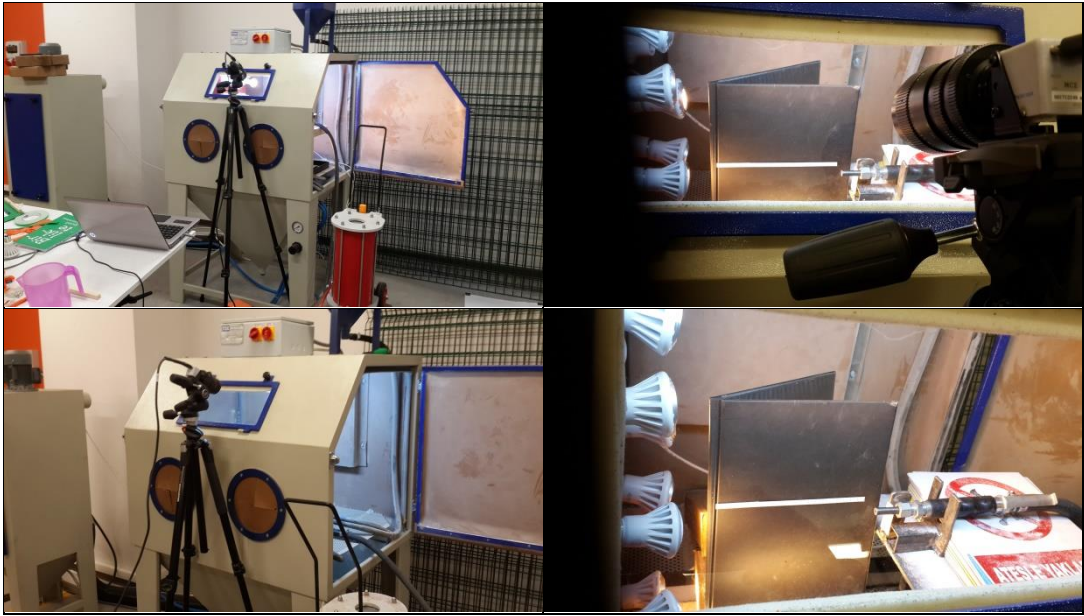
Yüksek hızlı kamera metodu ile gerçekleştirilen aşındırıcı partikül hız ölçümleri için kullanılan deneysel cihaz yani yüksek hızlı kamera olarak FastCAM MC2 şekil 4.16'de görülmektedir. FastCAM MC2, geleneksel kamera başlarını yerleştirmenin zor olduğu dar alanlarda kayıt yapmak için küçük kamera başlığı kullanan yüksek hızlı kamera sistemidir. Sistemin kayıt performansı tam kare kullanarak 512x512 piksel maksimum  z n rl kte 2000 fps iken ancak çerçevenin bir bölümünü kullanarak aynı zamanda maksimum 10.000 fps kaydedilebilmektedir. Sistem Gigabit Ether bağlantısı üzerinden PC yazılımı ve LCD Monitör Klavye ile çalıştırılır. Ayrıca, istenilen fonksiyon ayarlarını ayarlamanızı sağlayan programlanabilir d ğme fonksiyonu ile kameranın çalışma durum/sahne eşleştirilmiş olabilir. Bu teknoloji kullanılarak yüksek hızlı süreç yavaş hareket modunda kaydedilerek dinamik bir görüntü ölçüm sistemi olarak görev yapabilir.



şekil 4.16. FastCAM MC2 yüksek hızlı kamera sistemi

Bir görüntü işlemi yaparken genellikle kameranın özellikleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Ancak incelenmek istenen nesne yeterli ve dikkatli şekilde aydınlatılmadığı takdirde alınan görüntü ile istenilen sonuca ulaşamaz. Kameralar bir görüntüdeki çarparak yansıyan ışığı gördüklerinden resim kalitesinin iyi olması için ortamın ışıklandırması, ister doğal ister yapay ışık ya da her ikisi birden yeterli düzeyde olmalıdır. Kötü ışıklandırma ya da yanlış optik elemanlar kullanıldığında, en iyi şekilde tasarlanmış bir görüntü sistemi dahi kapasitesinin çok altında bir başarı gösterecektir. Doğru seçilmiş ışıklandırma ve optik elemanlar en iyi görüntü ve en hassas sonuçlar verecektir. Nozuldan çıkan partiküllerin gerektiği şekilde aydınlatılması mümkün olan en iyi görüntünün yakalanabilmesi için ön koşuldur. Bundan dolayı kumlama kabininin içine nozuldan çıkan partiküllerin görülebilmesi için kendi aydınlatma sisteminin dışında ekstra aydınlatma yapılmıştır.

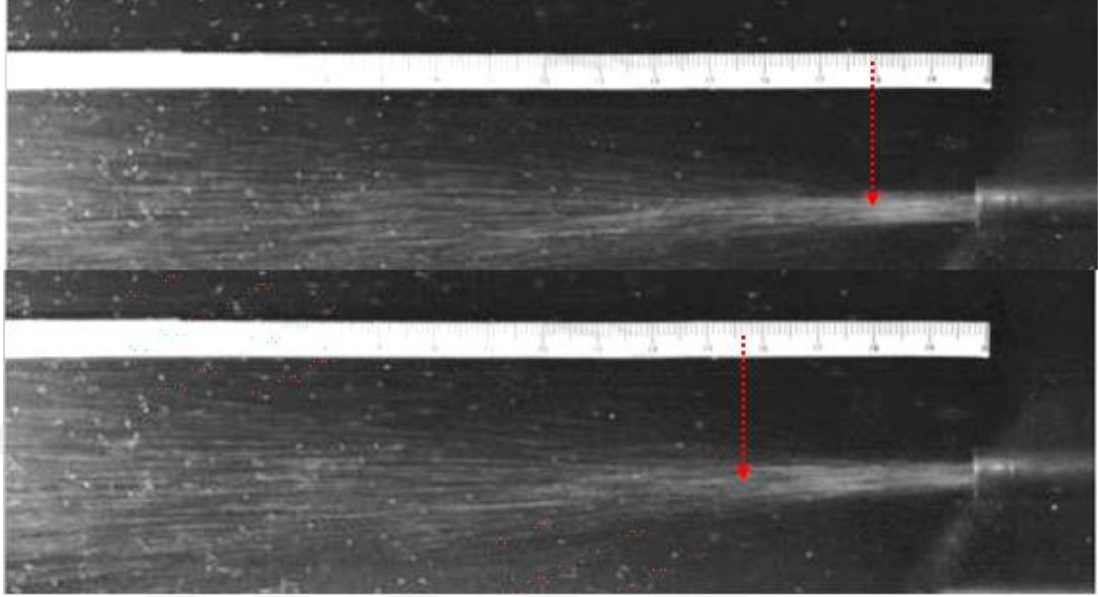
Doktora tezi çalışması için partikül hız ölçümlerini yüksek hızlı kamerayla test etmek için Şekil 4.17'de görülen düzenek hazırlanmıştır. Deneysel çalışmalarda yüksek hızlı kamera metodu ile 120 mesh alümina aşındırıcısı 1,5 bar basınçta hızlandırılmış ve bu basınçta partikül hızları ölçülmüştür.



Şekil 4.17. Yüksek Hızlı kamera test düzeneği

Her bir nozul için yapılan çalışmada 2000 fps ile 2,046 saniyede 4092 fotoğraf alındı. Buradan iki fotoğraf arasındaki geçen sürenin 0,0005 saniye olduğu hesaplanmıştır. Daha sonra kamerada yavaş hareketle, nozuldan çıkan partikül takip

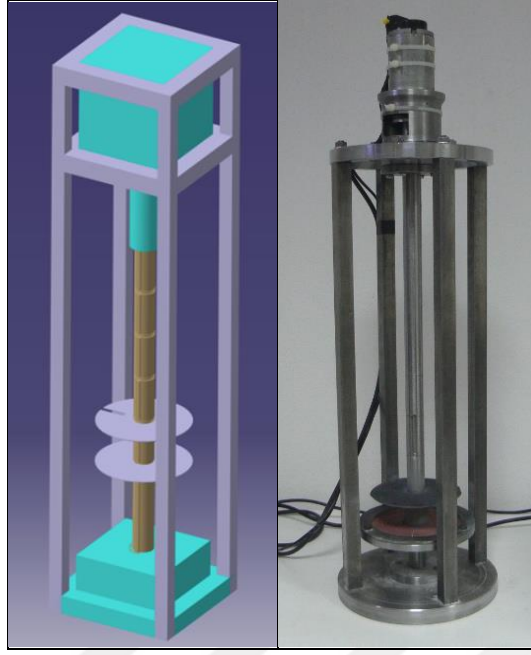
edilerek gitmiş olduğu mesafe hesaplanmıştır. şekil 4.18’da görüldüğü gibi partiküllerin geçen süre ve gidilen mesafeden partikül hızı hesaplanmıştır.



şekil 4.18. Nozuldan çıkan partiküllerin yüksek hızlı kamerayla görüntüsü

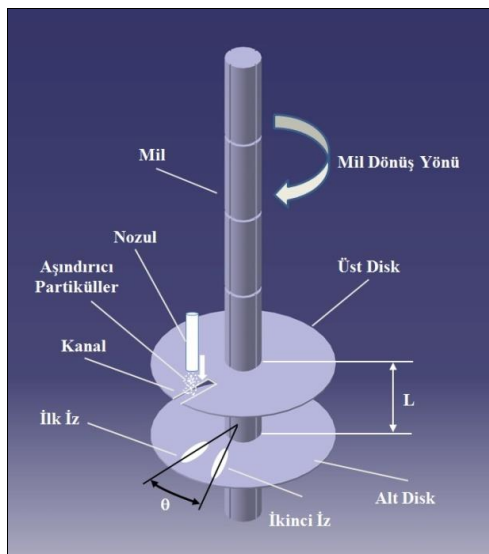
4.3.2. Döner disk ile ölçüm

Deneysel çalışmalarda döner disk metodu ile garnet aşındırıcıların 1,5 bar basınçta hızlandırılmış ve bu basınçta partikül hızları ölçülmüştür. Döner disk metodu ile gerçekleştirilen aşındırıcı partikül hız ölçümleri için kullanılan deneysel cihaz aşağıda açıklanan matematiksel hesaplamalara göre tasarlanarak imal edilmiş ve ölçümler gerçekleştirilmiştir. şekil 4.19’da döner disk yöntemi deney düzeneğinin CAD ve gerçek resmi verilmiştir.



Şekil 4.19. Döner disk partikül hızı ölçme sisteminin CAD ve gerçek resmi [9]

15 farklı nozul geometrisinin 120 mesh garnet aşındırıcı partiküllerinin 1,5 bar basınç değerinde püskürtülmesiyle, aşınma izleri arası mesafe, diskler arası mesafe, disk merkezi ile iz arası mesafe ve disk devir sayısı hesapları yapıp aşındırıcı partiküllerin hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.20’de partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler cihazın CAD resmi üzerinde verilmiştir.



Şekil 4.20. Partikül çarpma hızlarının hesaplanmasında kullanılan değişkenler [9]

Döner disk partikül hız ölçme sistemini çalıştırmadan önce ikinci disk üzerinde başlangıç noktası belirlendi. Daha sonra sistemi 2000 devir’de 50 mm disk arası mesafe belirlenerek çalıştırıldı ve ikinci disk üzerinde oluşan izle Şekil 4.21’de görüldüğü gibi MB-Ruler programıyla açı (θ) hesabı yapılmıştır. İlk aşamada disklerin dönüş hızı (n) ve aşınma izleri arasındaki açı (θ) ölçülerek partiküllerin birinci diskten ikinci diske ulaşmaları esnasında geçen süre (t) hesaplanmıştır. Denklem (4.1) ve (4.2)’de şekilde verilen döner disk ile partikül çarpma hızlarının hesaplanması için kullanılan formülasyon verilmiştir.

$$t = \frac{60 \times \theta}{360 \times n} \quad (4.1)$$

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

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

n= devir hızı (rpm)

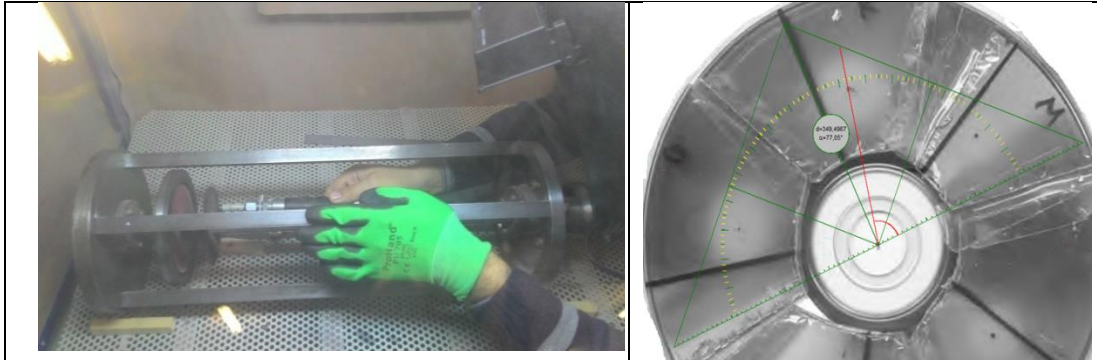
Hesaplanan süre Denklem (4.2)’de yerine konularak partiküllerin çarpma hızı bulunur.

$$V = \frac{L}{t} \quad (4.2)$$

V= partikül çarpma hızı (m/s)

L= diskler arası mesafe (m)

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

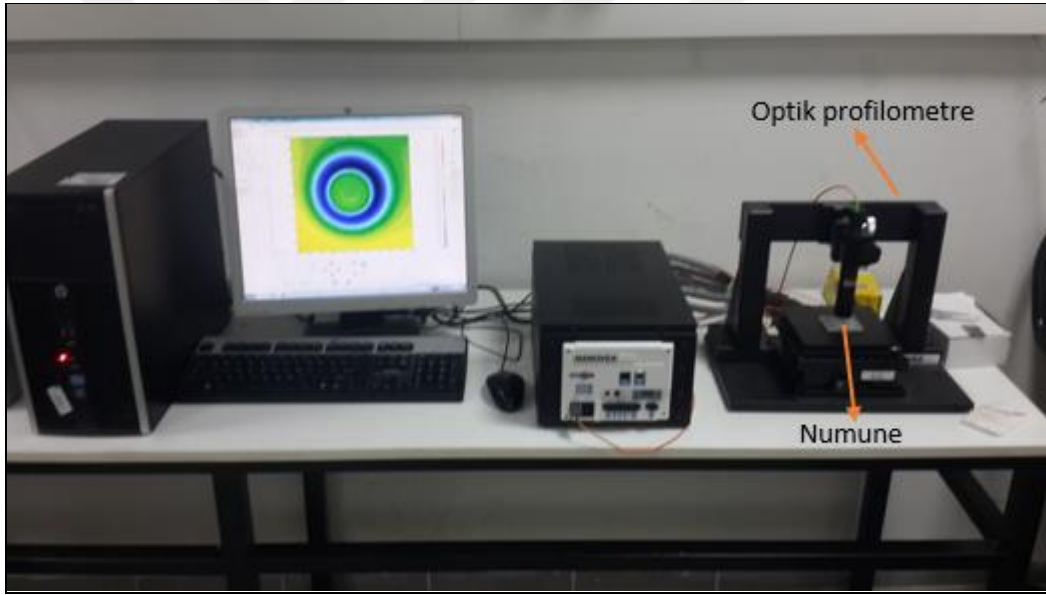


Şekil 4.21. Döner disk yöntemiyle yapılan deney ve MB-Ruler programıyla açı hesabı

4.4. Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Kumlama ile malzemelerin yüzeylerinin işlenmesinde temel amaçlardan biri malzeme yüzeyinin istenilen pürüzlülük değerlerine getirilmesidir. Özellikle boyama, yapıştırma ve kaplama uygulamaları öncesi, özellikle biyomedikal, otomotiv ve havacılık uygulamalarında malzemelerin yüzeyleri kumlama ile pürüzlendirilmektedir.

Farklı operasyon parametreleri altında katı partikül erozyonu ile aşındırılan numunelerin yüzeylerinden aşınma hasarının merkez bölgesinde Nanovea PS50 marka 3 boyutlu optik profilometre cihazı ile yüzey pürüzlülük ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.22’de deneysel çalışmalarda kullanılan optik profilometre cihazının fotoğrafı, Tablo 4.8’de ise bu cihazın önemli özellikleri verilmiştir.



Şekil 4.22. Optik profilometre cihazı ve test düzeneği

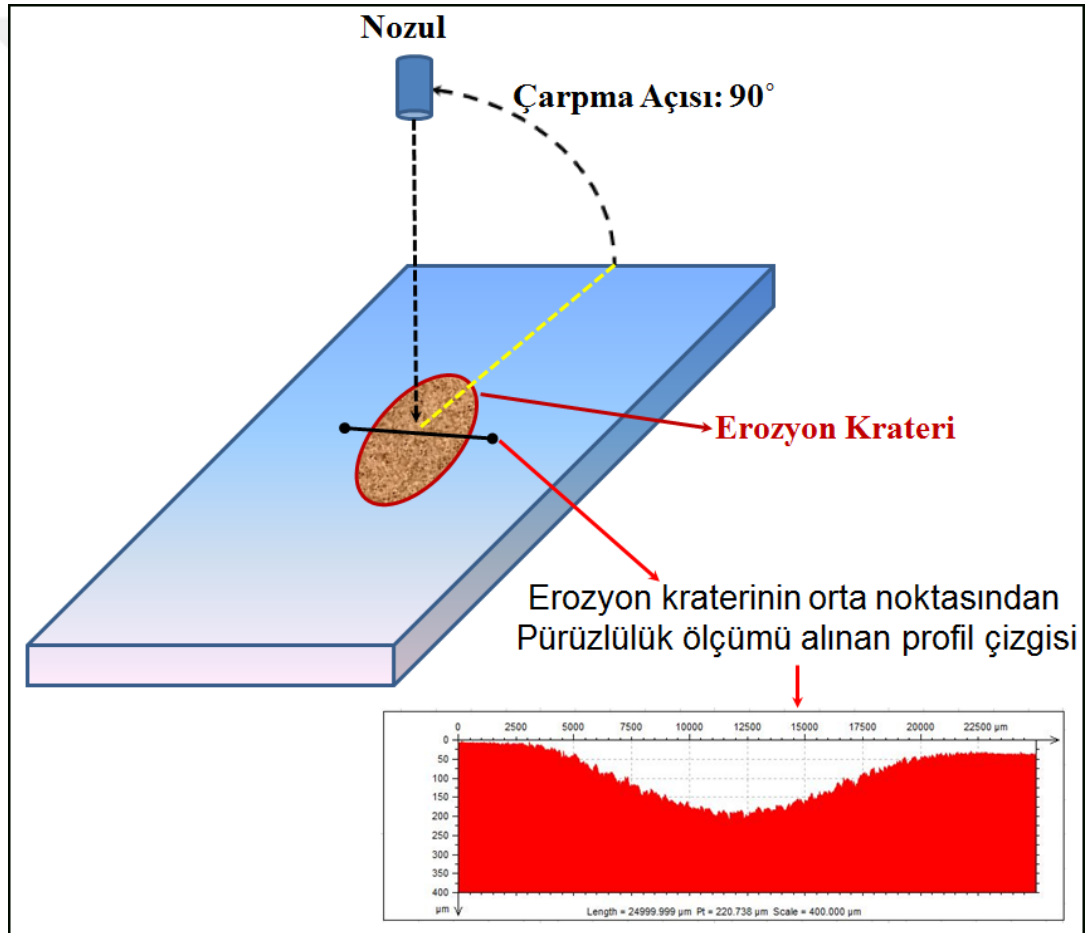
Tablo 4.8. Optik profilometre cihazının özellikleri

Aydınlatma aralığı (dinamik)	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)

Mühendislikte bir yüzeyin pürüzlülüğünü ölçmek için en yaygın olarak kullanılan parametre, ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) veya merkez çizgi ortalaması değeridir. Basit olarak, profilin orta çizgiden aritmetik ortalamasının sapmasıdır.

Diğer ölçüm yöntemlerinden bir de hedef malzeme yüzeyinde belli bir bölümün taranmasıyla elde edilen ortalama alan pürüzlülüğüdür (S_a).

Erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülük ölçümlerinde nozul püskürtme yönüne dik olacak şekilde erozyon kraterinin orta noktasında profil çizgisinden ölçüm gerçekleştirilir. Bu sebeple Şekil 4.23’de şematik gösterimi verilen pürüzlülük ölçümlerinde erozyon kraterinin orta noktasından 30 mm boyunda profil çizgisi 0,1 μm hassasiyetle taranmıştır. Ortalama alan pürüzlülüğünde ise 20x20 mm bir alan x yönünde 20 μm bir hızda, y yönünde 50 μm hızda tarama yapılmıştır.



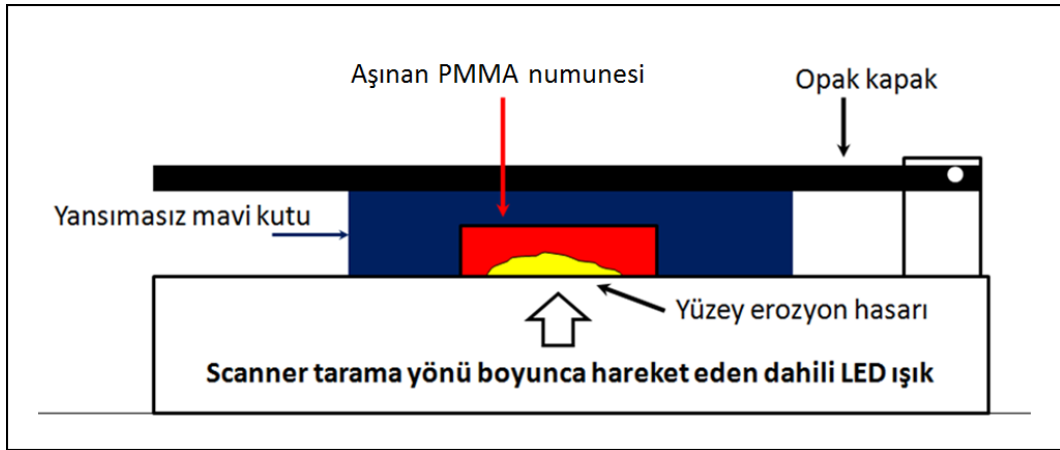
Şekil 4.23. Yüzey pürüzlülük ölçümü yapılan profil çizgisinin şematik gösterimi

4.5. Görüntü İşleme Yöntemiyle Yüzey Karakterizasyonu

Doktora tez çalışması kapsamında 2 farklı aşındırıcı partikül kullanılarak (alümina ve garnet), her bir aşındırıcı için 3 farklı boyutta (60 mesh, 80 mesh ve 120 mesh) ve her bir partikül boyutu ve aşındırıcı tipi için 4 farklı stand-off mesafesinde (20

mm, 50 mm, 70 mm ve 100 mm) aşındırılan numunelerin yüzey morfolojileri görüntü işleme programları yardımıyla analiz edilmiştir. Aşındırılmış yüzeylerin görüntü analizleri ile tez çalışmasında incelenen farklı nozul geometrilerinin hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkardığı dağılım haritaları ve etki alanları irdelenmiştir.

Katı partikül erozyonu sonrası PMMA 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 PMMA numunelerinin tarayıcıda taranması için kurulmuş düzenek Şekil 4.24’de şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.24. Aşındırılmış PMMA 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

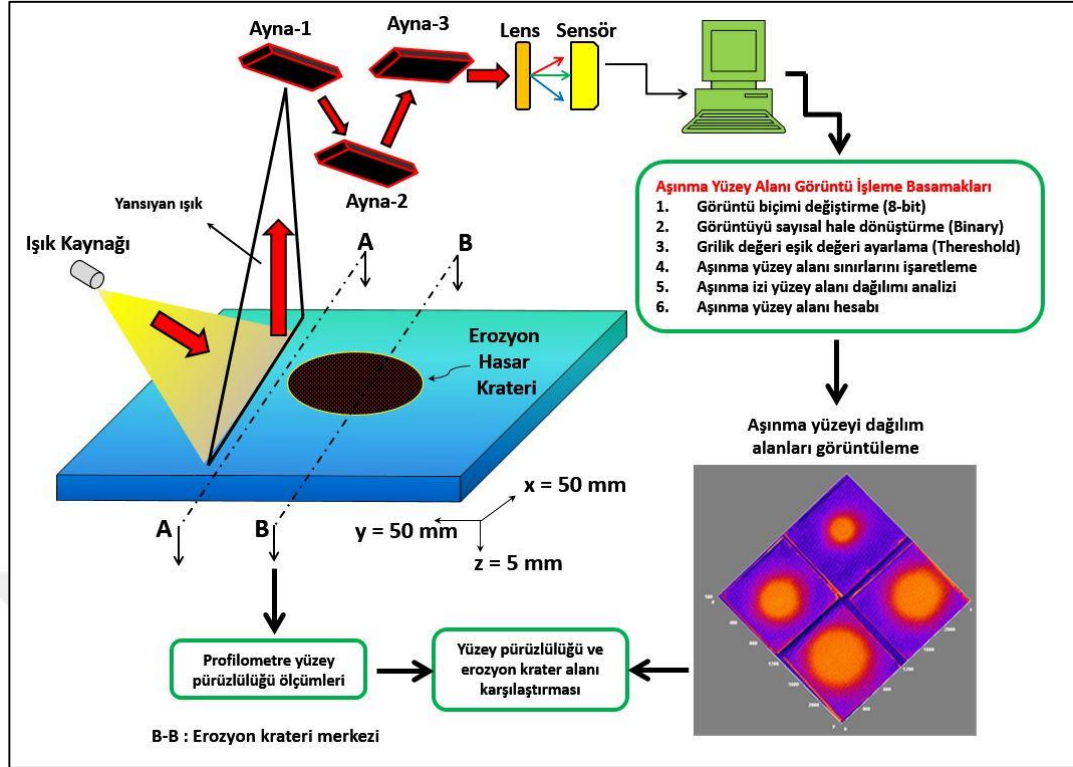
ilerlemiştir. LED ışık kaynağından gelerek numune yüzeyine çarpan ışık geri yansarak CCD algılayıcılar tarafından yakalanmıştır. CCD algılayıcıların yakaladığı bu yansıyan ışın demeti işlenerek taranan numune yüzeyinin 2 boyutlu görüntüsü elde edilmiştir.

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 PMMA numunelerin tarama parametreleri aşağıdaki Tablo 4.9’da verilmiştir.

Tablo 4.9. HP Scanjet G2710 özellikleri ve PMMA tarama parametreleri

Tarama Parametreleri	
Görüntü Pixel Boyutu (genişlik × yükseklik)	945 × 945 dpi (50 mm × 50 mm)
Bit Derinliği	24-bit (görüntü işleme 8 bit)
Görüntü Tipi	BMP
HP Scanjet G2710 Tarayıcı Özellikleri	
Çalışma Voltajı	220 V 50 Hz
Tarama çözünürlüğü, optik	4800 dpi kadar
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 farklı nozullarla aşınmış yüzeylerinin görüntülerinin elde edilmesi sonrasında görüntü işleme aşamasına geçilmiştir. Şekil 4.25’de yüzey tarama, 2 boyutlu yüzey resimlerinin işlenmesi, 2 boyutlu yüzey resimlerinden grilik seviyesi histogramlarının oluşturulması ve sonrasında histogramlardan yüzey dağılım haritalarının elde edilmesini gösteren işlem basamakları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Aşındırılmış PMMA numunelerin görüntü işleme işlem basamakları

Farklı nozul geometrileri kullanılarak gerçekleştirilen katı partikül erozyonunun, PMMA yüzeylerinde oluşturduğu hasarın yüzey dağılım alanlarına etkilerini ortaya koymak amacıyla yüksek çözünürlüklü yüzey görüntüleri tarayıcıdan elde edilmiştir. Tarama sonrası elde edilen 2 boyutlu numune yüzey resimleri ImageJ açık kodlu görüntü işleme programı algoritmaları yardımıyla işlenmiştir. ImageJ programı A.B.D. Federal Hükümeti adına Ulusal Sağlık Enstitüleri tarafından geliştirilmektedir.

ImageJ programı ile açılan yüksek çözünürlüklü 2 boyutlu PMMA numune yüzeyleri görüntüleri ilk basamakta 8-bit formatına dönüştürülmüştür. Bu dönüşüm alan hesaplamasında kullanılacak diğer komutlar uygulanmadan önce yapılması gereken ilk basamaktır. İkinci basamakta görüntülerin sayısal veriler haline dönüştürülmesi için 'Make Binary' komutu kullanılmıştır. Sayısal hale dönüştürülen yüzey görüntülerine her nozul geometrisinde eşik değeri belirleme (thresholding) işlemi uygulanmıştır. Eşik belirleme işlemi görüntü netliğini artırma, gürültü olarak isimlendirilen yansıma hatalarını önleme ve grilik değeri ölçümleri yapılırken standart oluşturma açısından önemlidir. Eşik belirleme işlemi sonrası erozyon hasarına uğrayan yüzeyin her bir pikseli için grilik değerini belirleme

işlemi programın ilgili algoritması yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Elde edile grilik değerleri işlenerek her bir nozul geometrisi için PMMA numunelerde yüzeyde aşınma dağılım alanları hesaplanarak görüntüler elde edilmiştir.



5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Bilgisayar Destekli Akış Analizi

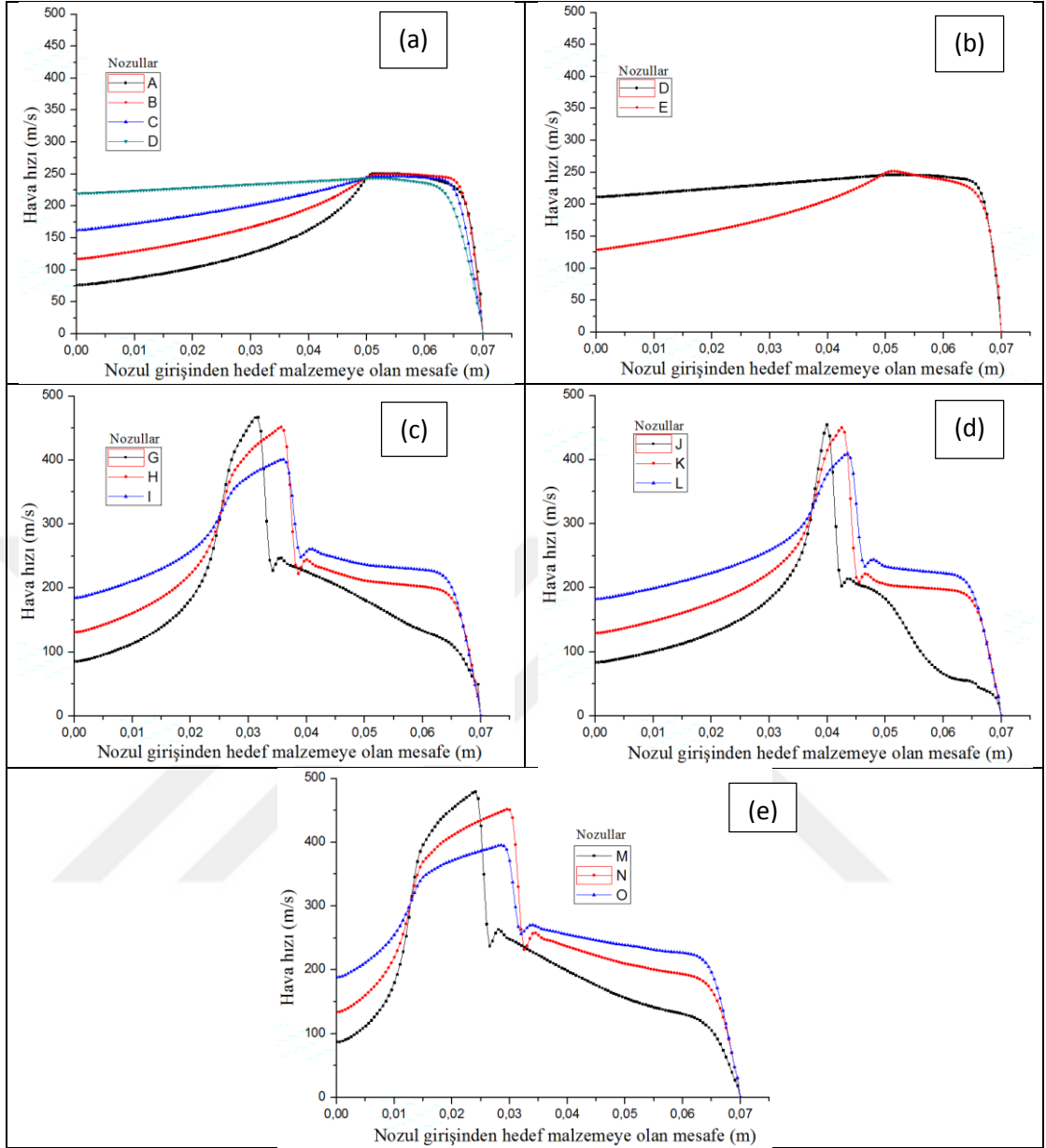
Bilgisayar destekli akış analizinde Ansys Fluent 14.5 programı kullanılarak farklı nozul geometrilerine göre ivmelendirici gaz ve partikül hızlarının analizi yapılmıştır. Ayrıca nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafe, gaz ve partiküllerin ivmelendirme basıncı, partikül boyutu parametrelerinin de partikül hızlarına etkisi incelenmiştir.

5.1.1. Nozul geometrisinin etkisi

Katı partikül erozyonunu etkileyen en önemli faktörlerden biri aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye püskürtülmesi sırasında kullanılan nozul geometrileridir. Nozul geometrileri aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye çarpma öncesi hız kazanmalarında ve hedef malzeme yüzeyine çarpma esnasında yayılım alanlarının üzerinde birinci dereceden etkiye sahiptir.

Nozul geometrisi için önceki çalışmalar göstermiştir ki, nozul giriş çapı ve nozul uzunluğunun partikül hızına etkisi küçüktür [25]. Bu yüzden, giriş çapı ve nozul uzunluğu değişimleri bu çalışmada hesaba katılmamıştır. Boğaz çapı ve çıkış çapına daha fazla odaklanılmıştır.

Partikül boyutunun, partikül hızına etkisi çok fazla olduğundan dolayı, nozul çıkış çapının optimizasyonunda partikül boyutunun etkisi de hesaplanmıştır. Küresel garnet partikülleri gaz akışına ekstenel olarak giriş yapmaktadır. Diğer faktörlerin hesaplanmasındaki partikül çapı 158 μm (180mesh), 206 μm (120 mesh), 238 μm (80 mesh), 702 μm (20-40 mesh) boyutlu parçacıklardır. Tüm sonuçlar, nozulun merkezi eksenini boyunca değişkenleri göstermektedir. Sonuçlar nozul çıkışından 20 mm uzaklığa konulmuş hedef malzemeye çarpma anına kadar alınmıştır. Nozul uzunluğu 50 mm’de sabit tutularak boğaz ve nozul çıkışının değiştirildiği farklı geometrilerdeki ölçüler Tablo 4.5’de gösterilmiştir.

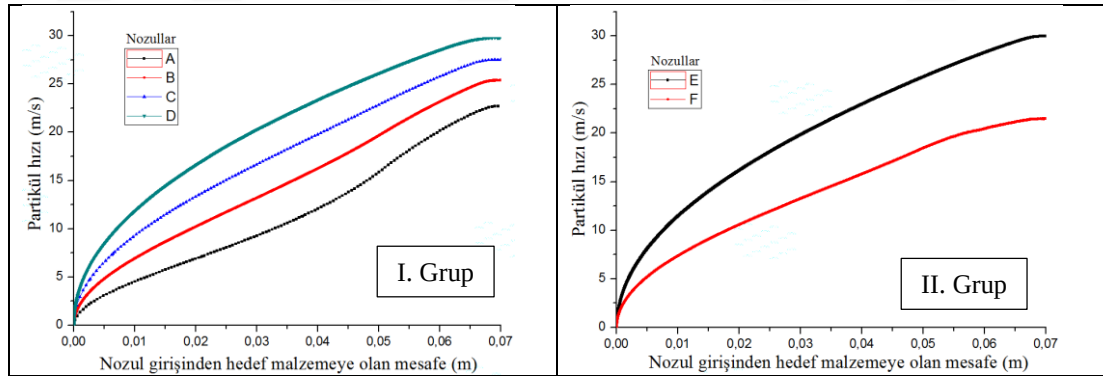


Şekil 5.1. İvmelendirilmiş havanın aksenal hızı dağılımı

Şekil 5.1’de farklı nozul geometrilerinin 1,5 bar basınç ve 27 °C sıcaklıkta hava hızlarının nozul girişinden hedef malzemeye çarpma kadar ki dağılımı gösterilmektedir. Şekil 5.1.a ve Şekil 5.1.b’de düz ve konik geometrili nozulların hava hızı dağılımı görülmektedir. Bu dağılım incelendiğinde nozul çıkışında hava hızının maksimum değerlere ulaştığı (yaklaşık 250 m/s) nozul çıkışından hedef malzemeye ulaşana kadar ise hızlarda önemli bir değişimin olmadığı gözlemlenmiştir. Farklı geometrileri birbiriyle karşılaştırdığımızda hava hızlarının birbirine yakın değerler aldığı görülmektedir. Bu düz ve konik şekillerin hava hızını çok fazla değiştirmedığının göstergesidir. Şekil 5.1.c, Şekil 5.1.d ve Şekil 5.1.e’deki

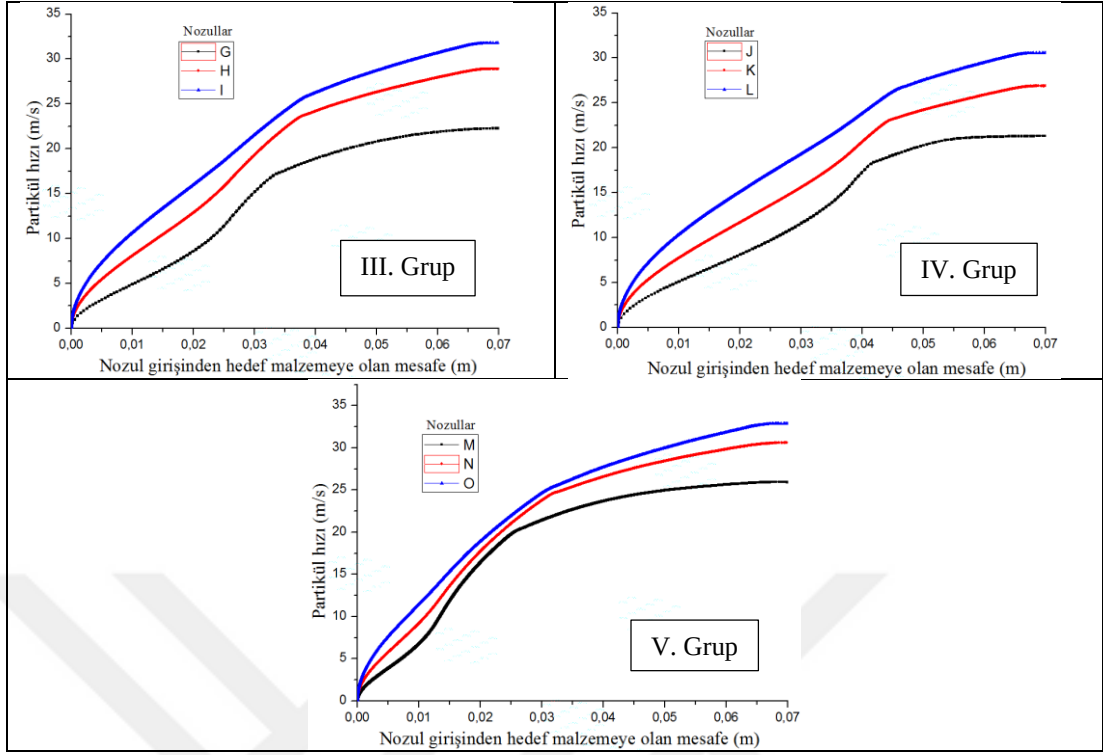
nozül tasarımlarında; giriş ve çıkış çapları 5 mm olan 50 mm uzunluktaki nozullarda, girişe 25 mm, 37,5 mm ve 12,5 mm mesafede oluşturulan farklı çapta boğazların hız dağılımına etkileri görülmektedir. Dağılımlar incelendiğinde, boğaz kısmında hava hızının maksimum değerlere ulaştığı (yaklaşık 500 m/s) daha sonra ani şekilde hızda düşüş yaşandığı görülmektedir. Bu aşamadan sonra hava hızı hedef malzemeye doğru lineer bir azalmayla ilerlemiştir. Farklı çapta boğaz olan nozul geometrilerinin hava hızları karşılaştırıldığında, boğaz kısmının çapı daraldıkça nozul içinde hızın arttığı, nozul çıkışından hedef malzemeye çarpana kadar ise hızın sabit kaldığı veya azaldığı görülmüştür.

Şekil 5.2 'de düz ve konik geometrili nozulların 1,5 bar basınç ve 27 °C sıcaklıkta partiküllerin nozul girişinden hedef malzemeye çarpana kadar ki eksenel hız dağılımı gösterilmektedir. Farklı nozul geometrilerinde partikül hızları, nozul girişinden hedef malzemeye çarpana kadar sürekli bir artış göstermiştir. Nozulun çıkış çapı arttıkça partikül hızlarının arttığı görülmektedir. Nozul geometrilerini birbiriyle karşılaştırdığımızda E nozulu (nozül giriş çapı 3 mm, çıkış çapının 3 mm), partikülü 30 m/s partikül hızıyla en fazla hızlandıran nozul olmuştur.



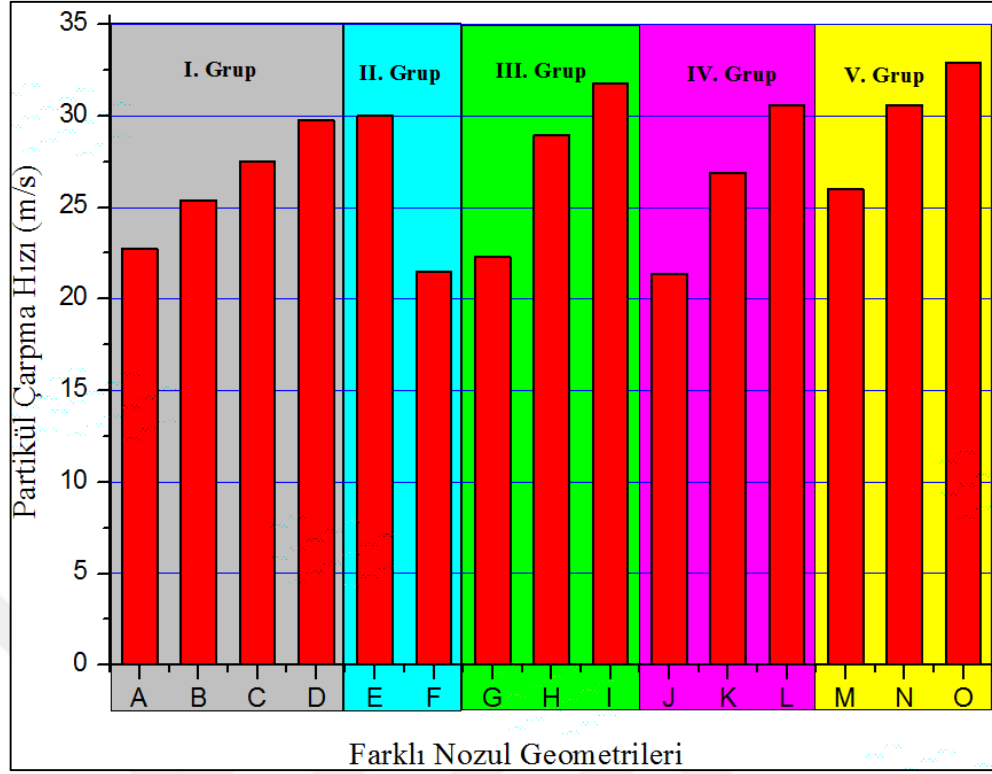
Şekil 5.2. I. ve II. grup nozul geometrilerinin partikül hız dağılımı

Şekil 5.3'deki nozul tasarımlarında; giriş ve çıkış çapları 5 mm olan 50 mm uzunluktaki nozullarda, girişe 25 mm, 37,5 mm ve 12,5 mm mesafede oluşturulan farklı çapta boğazların partikül hızlarına etkileri görülmektedir. Her üç gruptaki nozulların boğaz kısımlarındaki çap arttıkça daha yüksek hız değerlerine ulaştığı görülmüştür. Boğazların nozul içindeki konumlarının partikül hızını etkilemediği görülmüştür.



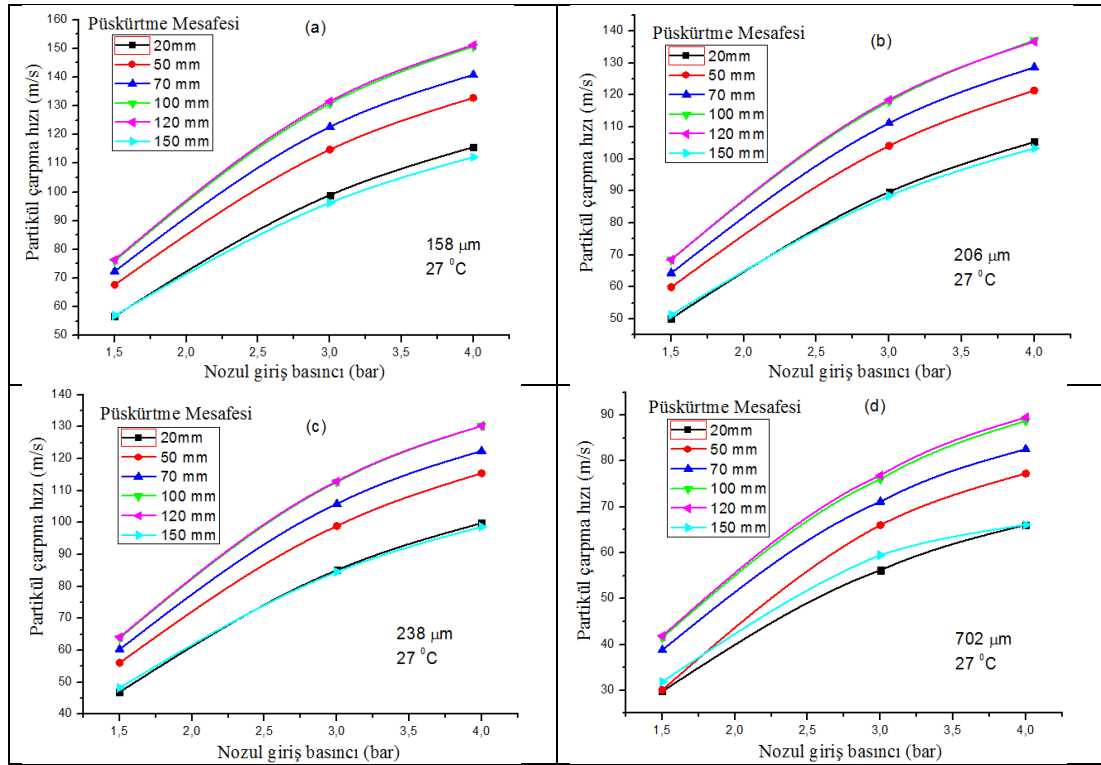
Şekil 5.3. III., IV. ve V. grup nozul geometrilerinin partikül hız dağılımı

Şekil 5.4’de 15 farklı nozul geometrisinde partiküllerin hedef malzemeye çarpma hızlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Bu sonuçlara göre beş farklı gruptan oluşan nozul geometrilerinin nozul çıkış çapları arttıkça hedef malzemeye çarpma hızlarının arttığı görülmüştür. Nozul geometrilerinin içinde O nozul geometrisinin yaklaşık 33 m/s ile diğer nozullardan daha fazla partikülleri hızlandırdığı görülmüştür.



Şekil 5.4. Farklı nozul geometrilerinin partikül hızı karşılaştırması

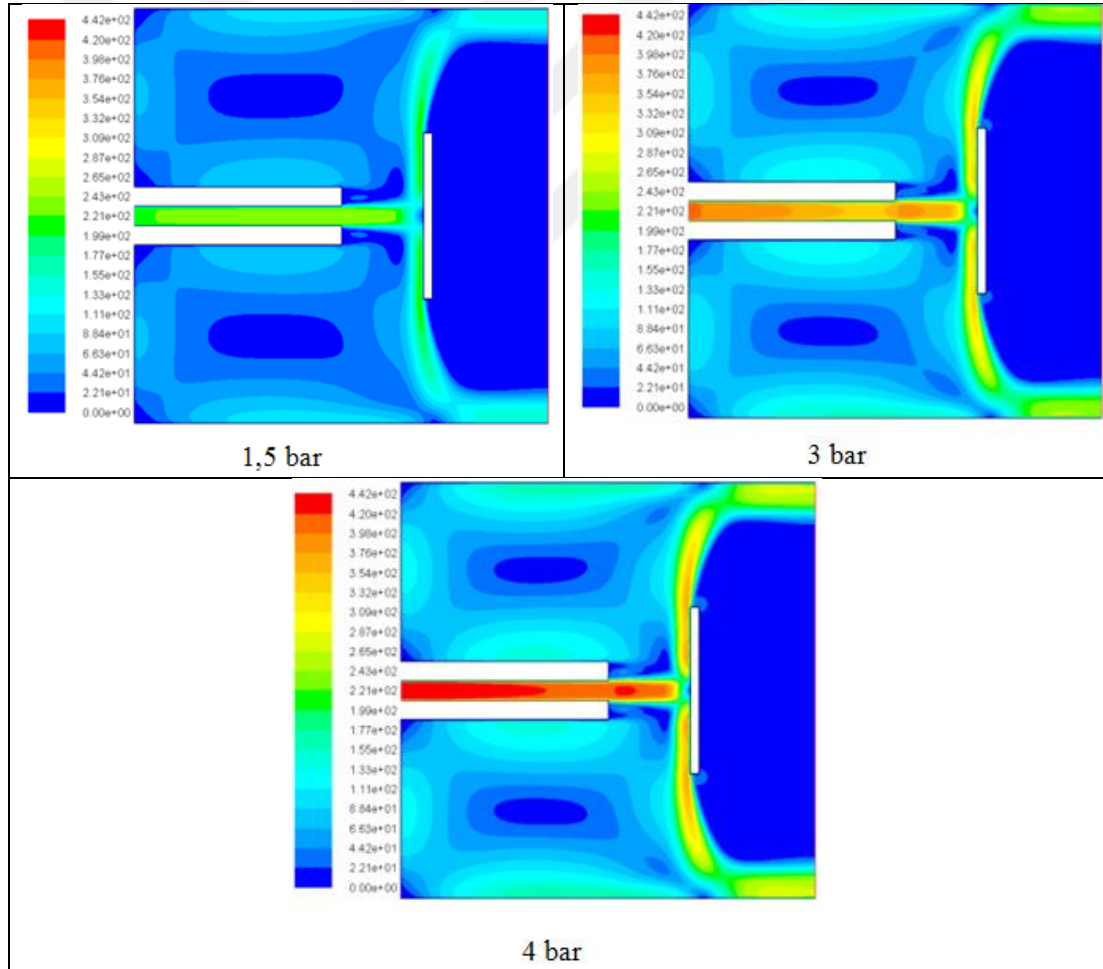
5.1.2. Partikül ivmelendirme basıncının etkisi



Şekil 5.5. Çeşitli parametreler altında partikül hızına partikül ivmelendirme basıncının etkisi

Şekil 5.5'de partikül boyutu ve nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeye göre partikül hızına, partikül hızlandırma basıncının etkisi verilmektedir. Burada hızlandırıcı gaz olarak hava kullanılmış ve 1,5, 3 ve 4 bar basınç altında analizler yapılmıştır. Bu partikül hızlandırma basıncı önemli ölçüde partikül hızını etkilediği görülmektedir. Üç farklı gaz basınçlarında elde edilen hava hızı büyüklük konturları Şekil 5.6'da sunulmuştur. Nozul çıkışındaki hava hızı 4 bar basınç altında yaklaşık 450 m/s olduğu Şekil 5.6 'da görülebilmektedir.

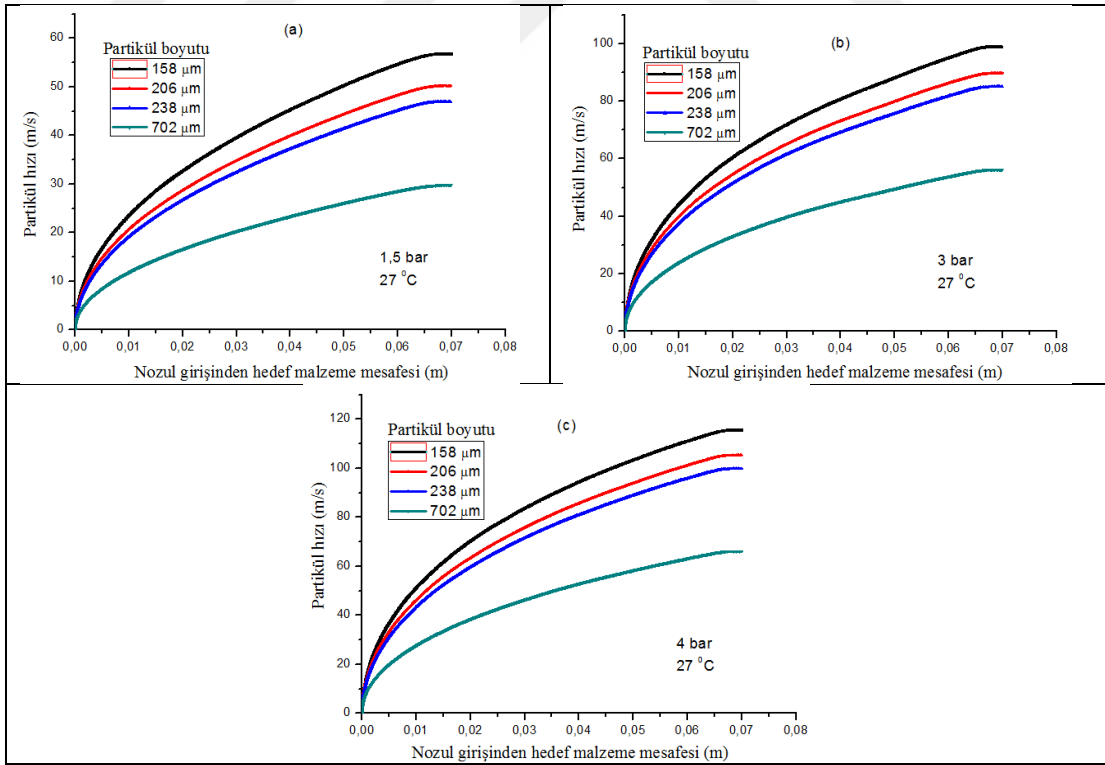
Şekil 5.6'da açık bir şekilde, gaz ve partikül hızı ivmelenme basıncının büyütülmesiyle arttığı görülebilir. Bu sonuçlar ivmelenen basıncın önemli ölçüde giriş hava basıncı ve hava akış hızı arttıkça, parçacık hızları da arttığını literatür sonuçları ile tutarlı hava ve partikül çarpma hızlarını etkilediğini göstermektedir.



Şekil 5.6. Çeşitli ivmelenme basınçları altında nozul girişinden hedef malzemeye gelen gaz ve partikül hız konturları (partikül boyutu: 206 μm , Püskürtme mesafesi: 20 mm)

5.1.3. Partikül boyutunun etkisi

Hava basıncının 1,5, 3 ve 4 bar basınç değerleri için farklı partikül boyutlarına göre nozulun girişinden hedef malzeme kadar olan bölümdeki aksenal partikül hız dağılımları Şekil 5.7 (a), (b) ve (c)'de sunulmuştur. Hesaplama 158 μm (180 mesh), 206 μm (120 mesh), 238 μm (80 mesh), 702 μm (20-40 mesh) boyutlu partiküller için uygulanmıştır. Aşındırıcı partikül hızının, parçacık boyutu ve hava basıncına bağlı olduğu görülebilmektedir. 1,5 bar basınç altında simülasyonda kullanılan en küçük partikül boyutu olan 158 μm ile püskürtülen aşındırıcı partikülün hedef malzemeye çarpma hızının 55 m/s civarında olduğu görülürken, 702 μm boyutundaki aşındırıcı partikülün ise 25 m/s hızla çarptığı görülmektedir. 3 bar basınç altında yapılan simülasyon çalışmasında en büyük aşındırıcı partikül boyutunun hedef malzemeye çarpma hızının 45 m/s olduğu, en küçük aşındırıcı partikül boyutunun ise 100 m/s hızlara ulaştığı görülmektedir. 4 bar basınç altında ise 702 μm partikül boyutuna sahip aşındırıcının 60 m/s civarında hızlarda olduğu, 158 μm partikül boyutunda ise 120 m/s hızla hedef malzemeye çarptığı gözlemlenmiştir.

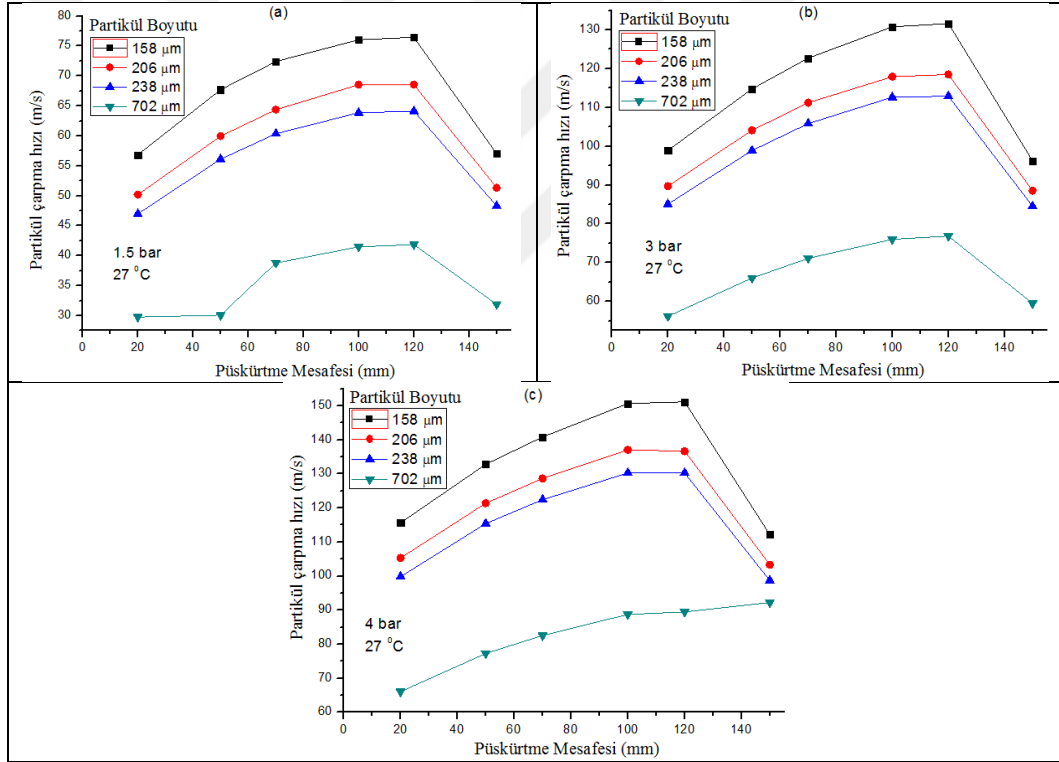


Şekil 5.7. Çeşitli parametreler altında partikül hızına partikül boyutunun etkisi (a) 1,5 bar, (b) 3 bar, (c) 4 bar

Şekil 5.7 (a), (b) ve (c)'de görülebileceği gibi, en büyük garnet aşındırıcı partiküllerle minimum partikül çarpma hızı görülürken, en küçük garnet aşındırıcı partiküllerle maksimum partikül çarpma hızı görülmüştür. Bu nedenle, literatürde belirtildiği gibi parçacık darbe hızı partikül boyutunda azalma ile artar sonucuna varılabilir.

5.1.4. Püskürtme mesafesinin etkisi

Bu çalışmada, sayısal simülasyonlar kumlama işlemindeki koşullara göre farklı boyutlarda 158 μm (180 mesh), 206 μm (120 mesh), 238 μm (80 mesh), 702 μm (20-40 mesh) garnet partikülleri için gerçekleştirilmiştir. İvmelenen gaz 1,5 bar, 3 bar, 4 bar basınçta kullanılmıştır. Nozul çıkışından hedef malzeme yüzeyine olan püskürtme mesafesi, 20, 50, 70, 100, 120, 150 mm dir.

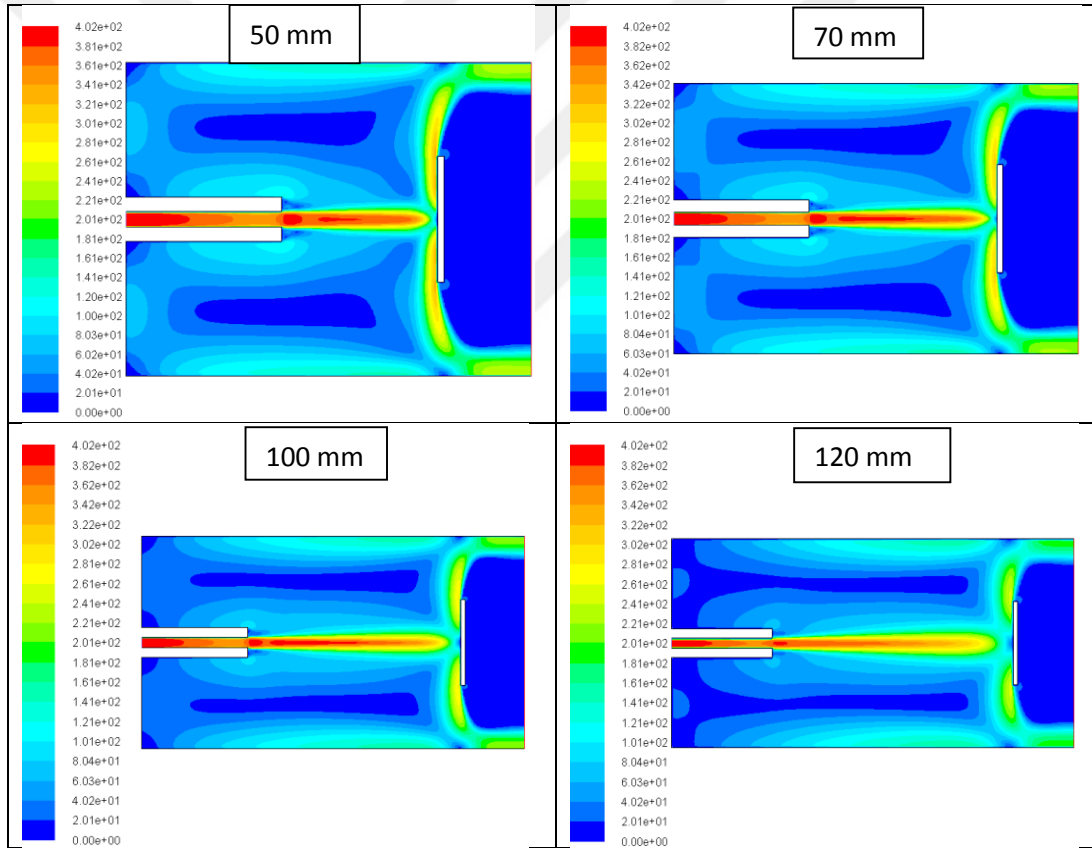


Şekil 5.8. Çeşitli parametreler altında partikül hızına püskürtme mesafesinin etkisi

Şekil 5.8'de nozuldan hedef malzeme yüzeyine partikül hızlarının değişimlerinin simülasyon sonuçları gösterilmiştir. Bu partiküllerin hızının nozul çıkışından sonra biraz daha arttırdığı görülmektedir. Partikül hızı, yaklaşık 120 mm püskürtme mesafesinden itibaren hızlı bir şekilde azalmaktadır. Çarpan partiküllerin hızı, nozul çıkışından sonra ivmelendirici gaz olan havanın kinetik enerjisiyle artış göstermiş ve ayrıca partikül boyutu ve ivmelenen basınca bağlı olarak 20 mm ile 120 mm arasında

değişen püskürtme mesafelerinde nozul çıkışının hemen dışında maksimum değere yükselmiştir. Bu sonuçlarla, daha hafif parçacıkların gaz akışıyla ilk anda etkilendiklerini bildiren rapor sonuçlarına uyan şekilde, daha büyük parçacıklar için optimum püskürtme mesafesinin daha kısa olduğu önerilmektedir.

Şekil 5.9’da çeşitli püskürtme mesafeleri altında nozul girişinden hedef malzemeye gelen gaz ve partikül hız konturlarını göstermektedir. Gaz ve aşındırıcı parçacıkların hızları püskürtme mesafesi arttıkça azalmıştır. Şekil 5.9’dan püskürtme mesafesinin önemli ölçüde gaz ve aşındırıcı parçacıkların hızlarını etkilediği sonucuna varılabilir. Bu kontur başarılı bir şekilde püskürtme mesafesine bağlı olarak, gaz ve partikül hız davranışını anlamak için kullanılabilir.



Şekil 5.9. Çeşitli püskürtme mesafeleri altında nozul girişinden hedef malzemeye gelen gaz ve partikül hız konturları (partikül boyutu: 206 μm , ivmelenen basınç: 3 bar)

5.2. Deneysel Çalışmalar

Nozul tasarımıyla ilgili HAD yöntemiyle yapılan analizler tamamlandıktan sonra belirlenen nozullar imal edilerek deney aşamasına geçilmiştir. İlk olarak belirlenen

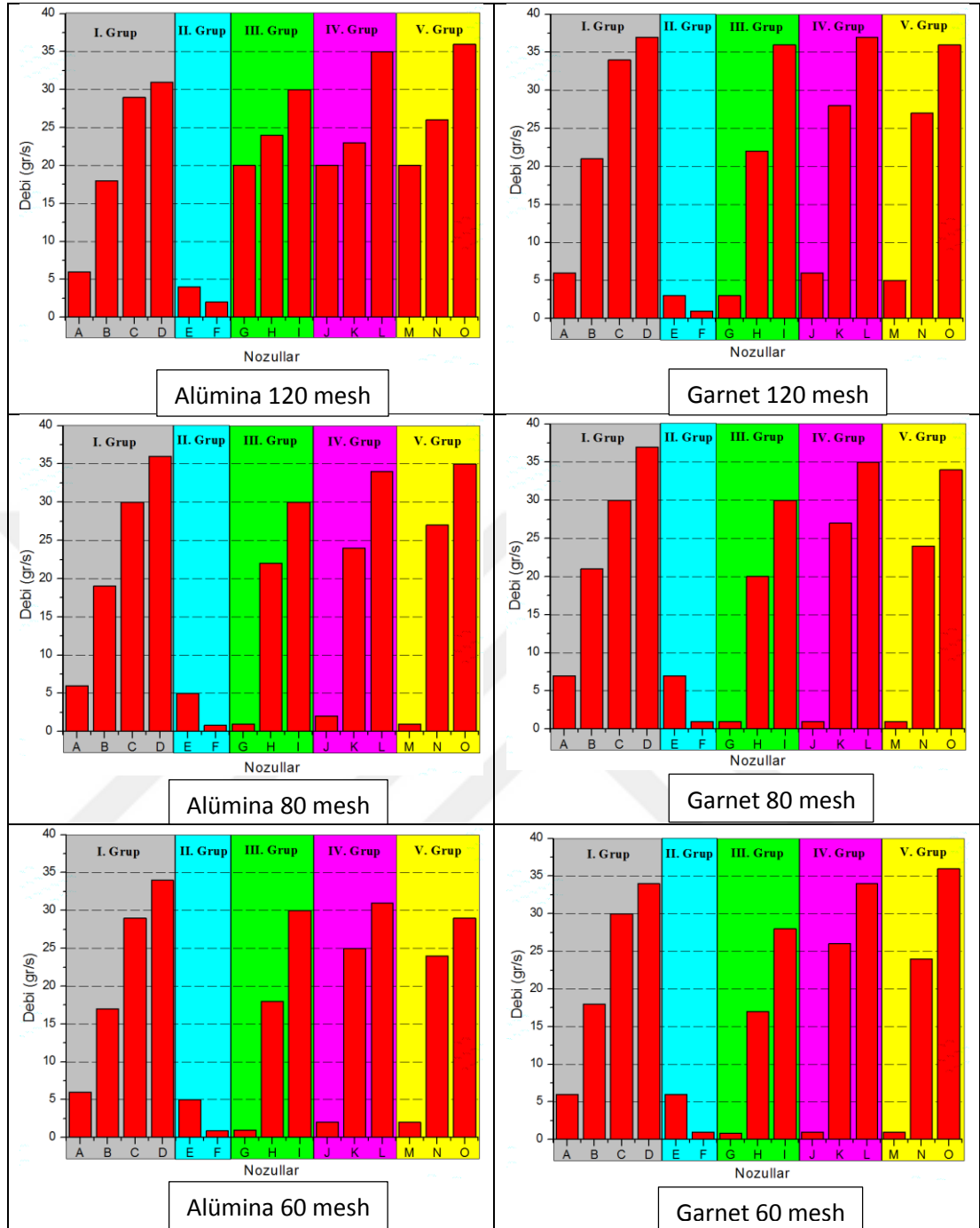
15 farklı nozulla birim zamanda malzeme yüzeyine çarpan partikül miktarının değişimi ölçülmüştür. Daha sonra hedef malzeme üzerinde farklı nozulların etkilerine bakılmıştır. Deney, 1,5 bar basınç altında, Tablo 4.2’de belirtilen aşındırıcılar kullanılarak ve 20 mm, 50 mm, 70 mm ve 100 mm püskürtme mesafeleri kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca partikül hızlarını belirlemek için döner disk ile hız ölçüm yöntemi ve yüksek hızlı kamera yöntemleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda imal edilen nozulların hedef malzeme yüzeyindeki erozif aşınma miktarına, etki dağılım alanlarına, yüzey pürüzlülüğüne ve partikül hızlarına etkileri ortaya konulmuştur.

5.2.1. Farklı nozularda aşındırıcı partiküllerin kütleli debi analizi

Şekil 5.10’daki grafiklerde 15 farklı nozul geometrisinin 1,5 bar basınç altında aşındırıcı partikül türüne (alümina ve garnet) ve partikül boyutuna (60, 80, 120 mesh) göre birim zamanda malzeme yüzeyine çarpan partikül miktarının değişimi incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda aynı nozullar arasında partikül boyutuna ve partikül türüne göre karşılaştırma yapıldığında 60 ve 80 mesh boyutlarındaki garnet ve alümina partiküllerinde dikkate değer bir fark ortaya çıkmamıştır.

120 mesh alümina ve garnet partiküllerinin debi değişimi incelendiğinde ise alümina partiküllerinin garnet partiküllerine göre en dar boğaza sahip G, J ve M nozullarında daha büyük debiye sahip oldukları gözlemlenmiştir. 15 farklı nozul kendi içinde karşılaştırıldığında 5 farklı grupta incelenen nozullar içinde her gruptaki en dar kesite sahip nozul geometrilerinin debilerinin daha az olduğu gözlemlenmiştir.

Barkoula ve Kocsis (2002), çalışmalarında akış debisi arttığında, ilgili yüzeydeki çarpmalar arası zamanın azaldığını ve bundan dolayı bir sonraki çarpmadan önce hasar için daha az zaman kalacağını, böylece hasarın derecesi ve ona bağlı olarak da erozyon aşınması miktarının düşeceğini belirtmişlerdir. Literatür çalışmalarında da belirtildiği gibi akış debisinin erozyon aşınmasını etkileyen önemli bir parametre olduğudur. Bu farklı nozul geometrileriyle yapılmış olan deneyler sonucunda çıkan debilerin erozyon aşınmasına nasıl bir etki yaptığı tezin sonraki bölümlerinde irdelenecektir.



Şekil 5.10. Farklı boyutlarda alümina ve garnet partiküllerinin nozullardaki debilerinin karşılaştırılması

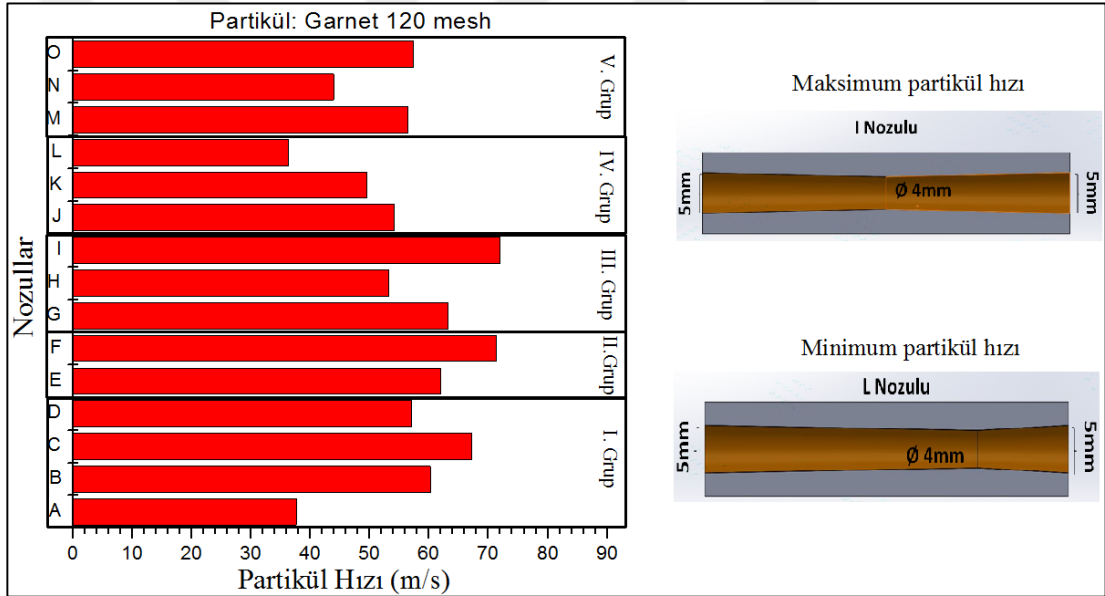
5.2.2. Partikül hızlarının analizi

Nozul geometrilerini belirlemek için yapılan HAD analizlerinde farklı nozul geometrilerindeki partikül hızlarının hesapları da gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak partikül hız ölçümlerinin elde edilmesinde döner disk yöntemi ve yüksek hızlı kamera ölçüm yöntemleri kullanılmıştır.

5.2.2.1. Döner disk metodu ile hız ölçüm analizi

15 farklı nozul için garnet 120 mesh aşındırıcı partikül kullanılarak ve püskürtme mesafesi 50 mm seçilerek yapılan döner disk metodu ile partiküllerin hızlarının hesabı Şekil 5.11’de görülmektedir. Buradaki sonuçlara göre en yüksek hız giriş çapı 5mm, çıkış çapı 5 mm olan ve nozul ortasında 4 mm boğaz bulunan I nozulunda görülmüştür. Bu noktada nozul tasarımlarının partikül çarpma hızlarını önemli oranda etkilediği söylenebilir. Nozul tasarımında;

- i) Nozul giriş ve çıkış çapı,
- ii) Boğaz çapı,
- iii) Boğazın konumu partikül çarpma hızlarını etkileyen en önemli değişkenlerdir.



Şekil 5.11. Nozullarda döner disk yöntemiyle hız ölçümü karşılaştırması

I. grup nozul tasarımlarında (giriş çapının 5 mm olduğu ve boğazın olmadığı tasarımlarda) nozul çıkış çapının artmasıyla genelde partikül çarpma hızında artış görülürken, II. grup nozul tasarımlarında (giriş çapının 3 mm olduğu, ve boğazın olmadığı tasarımlarda) çıkış çapının artması ile partikülün hedef malzemeye çarpma hızının azaldığı belirlenmiştir.

III. grup nozul tasarımlarında (giriş çapının 5 mm, çıkış çapının 5 mm ve boğazın girişi 25 mm mesafede konumlandığı), boğaz çapının değişmesi ile partikül hızlarında değişme meydana geldiği belirlenmiştir. Boğaz çapı 2 mm, 3 mm ve 4 mm

olan bu grup nozullarda; boğaz çapı 2 mm'den 3 mm'ye çıktığında partikül hızı düşerken; 4 mm'ye çıkıldığında partikül hızının arttığı görülmüştür. IV. grup nozul tasarımlarında (giriş çapının 5 mm, çıkış çapının 5 mm ve boğazın girişe 37,5 mm mesafede konumlandığı) boğaz çapının artmasıyla partikül çarpma hızının azaldığı belirlenmiştir. III. grup ve IV. grup incelendiğinde boğaz çapının yerinin değişimi ile partikül hızlarının değişim gösterdiği, boğaz çapı yerinin nozul çıkışına yaklaşması ile partikül çarpma hızının azaldığı belirlenmiştir. V. grup nozul tasarımlarında III. ve IV. grup tasarımlarda olduğu gibi boğazlı tasarımlar da kullanılarak boğazın yeri nozul girişine 12,5 mm mesafede yerleştirilmiştir. V. grup tasarımlarda 2 mm'lik boğaz çapıyla 4'lik boğaz çapında partikül çarpma hızında çok büyük bir değişiklik görülmezken, 3 mm'lik boğaz çağında azalma görülmüştür.

Genel olarak nozul tasarımları incelendiğinde boğazlı tasarımlarda, boğaz yerinin nozulun ortasında olduğu tasarım gruplarında yüksek partikül çarpma hızı gözlenmiştir.

5.2.2.2. Yüksek hızlı kamera ile analiz

15 farklı nozul için alümina 120 mesh aşındırıcı partikül kullanılarak ve nozul çıkışıyla hedef malzeme arası 50 mm belirlenerek yapılan yüksek hızlı kamera yöntemiyle partiküllerin hızlarının ölçümü şekil 5.12'de görülmektedir. Partikül çarpma hızları nozul tasarımlarına bağlı olarak 24 ile 48 m/s aralığında değişim göstermiştir. Bu noktada nozul tasarımlarının partikül çarpma hızlarını önemli oranda etkilediği söylenebilir. Nozul tasarımında; i) nozul giriş ve çıkış çapı, ii) boğaz çapı ve iii) boğazın konumu partikül çarpma hızlarını etkileyen en önemli değişkenlerdir.

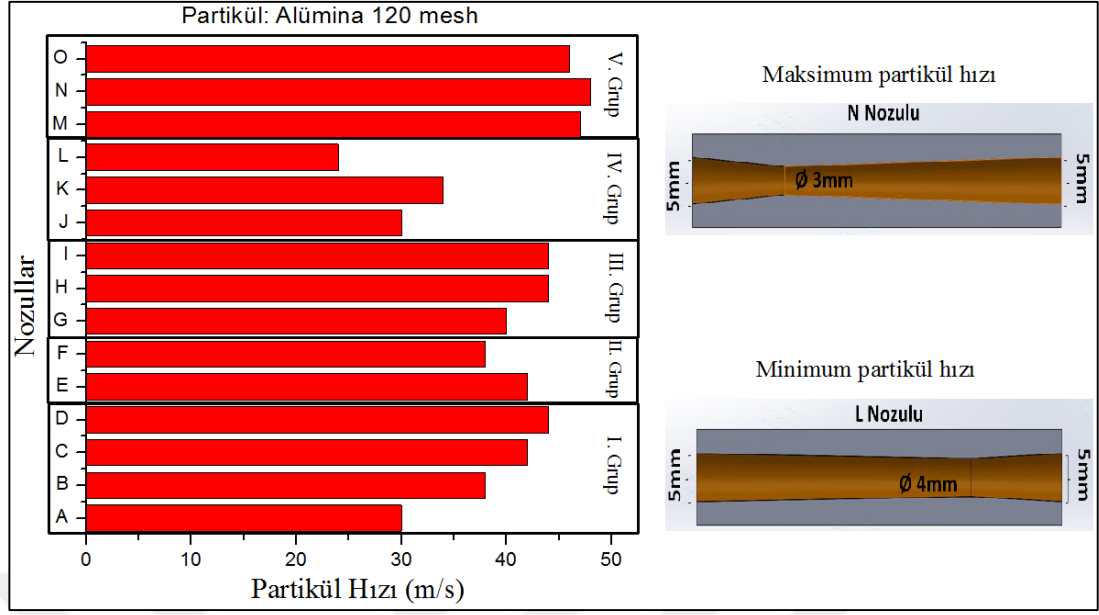
Yüksek hızlı kamera ile yapılan hız ölçüm çalışmalarının başında, döner disk metodunda hız ölçümünde kullanılan garnet 120 mesh aşındırıcı partikülleri ile hız ölçüm denemeleri yapılmıştır. Ancak garnet partiküllerinin koyu kahverengi renkleri, yüksek hızlı kamerada çekim esnasında partiküllerin takip edilerek analiz yapılmasını engellemiştir. Partiküller net şekilde tespit edilemediğinden hız ölçümleri sağlıklı sonuçlar vermemiştir. Bu sebeple diğer aşındırıcı tipi olan alümina partikülleri yüksek hızlı kamera ile hız ölçümünde kullanılmıştır. Alümina partikülleri beyaz renkli olduklarından yüksek hızlı kamera ölçümlerinde yüksek

aydınlatmalı lambalar yardımıyla net şekilde tespit edilebilmiştir. Şekil 5.12’de yüksek hızlı kamera ile 120 mesh alümina partiküllerinin 15 farklı nozul geometrisiyle püskürtülmesi sonucu ortaya çıkan hızları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 5.12 incelendiğinde genelde nozul çapının artışı ile partikül çarpma hızında azalma olduğu görülmüştür. Bu durum daralan nozul çapı ile partiküllerin birbirleri arasındaki etkileşimlerin artması, buna bağlı partikül akışının düzensiz bir hal alması ve partiküllerin çarpma enerjilerini kaybetmeleri ile açıklanabilir. Bu nedenle daha büyük çaplar partiküllerin daha rahat hızlanmalarına ve enerjilerini koruyarak nozul çıkışında daha yüksek hızlar göstermelerine neden olmaktadır. Bu noktada nozul çapının literatürdeki çalışmalara uyumlu olarak partikül çarpma hızını etkileyen en önemli parametrelerden biri olduğu sonucuna varılmıştır.

Şekil 5.12 incelendiğinde genelde I. grup nozullarda nozul çapının artışı ile partikül çarpma hızında azalma olduğu görülmüştür. II. grup nozullarda ise çapın artışıyla birlikte partikül hızlarında bir artış görülmektedir. Nozul içerisinde boğaz durumunda ise, boğazın nozul çıkışına yakın olmasının partikül çarpma hızını ciddi oranda azalttığı belirlenmiştir. Bu durum, nozul çıkışına kadar hızlanan partiküllerin yüksek hızlarda dar bir boğazdan geçmeleri esnasında birbirlerine çarparak yönlerini ve doğrultularını değiştirmeleri ile birlikte enerjilerini yitirmeleriyle açıklanabilir. Diğer yandan nozul çıkışında dar boğaz partiküllerin akış düzenlerini de karmaşık hale getirerek birbirleri ile olan etkileşimleri artmasına yol açmıştır. Sonuç olarak bu değişimler partikül hızının azalmasına yol açmıştır. Boğazın konumunun nozul girişine yakın olması durumunda ise partikül çarpma hızının artış gösterdiği ve tüm nozul tasarımlarında içerisinde en yüksek hızlara ulaşıldığı görülmüştür. Bu durum; nozul girişinde partiküllerin yönlerinin ve doğrultularının birbirlerine yaklaştırılmasıyla, belirli bir doğrultuda düzenli bir şekilde akan partiküllerin basınçlı hava ile hızlandırılması esnasında partikül etkileşimlerinin azalarak hızlandırma verimliliğinin artması ile açıklanabilir.

Yüksek hızlı kamera ölçümlerinde alümina 120 mesh partiküllerinde ortaya çıkan hız dağılımları döner disk metodundaki garnet 120 mesh partikülleriyle genelde benzer bir eğilim göstermiştir.



Şekil 5.12. Nozullarda yüksek hızlı kamerayla hız ölçümü karşılaştırması

5.2.3. Nozul geometrilerine göre hedef malzemenin erozyon oranının değişimi

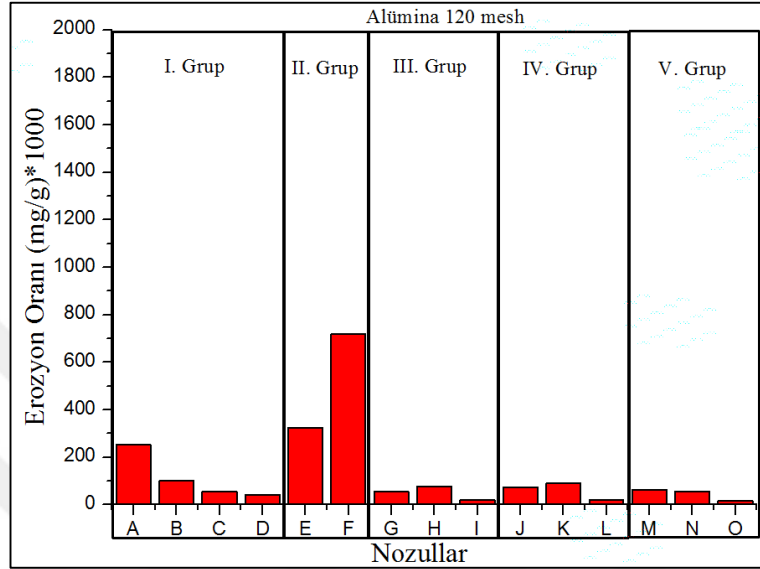
Bu bölümde 15 farklı nozul geometrisinin 1,5 bar basınç altında partikül boyutuna, partikül türüne ve püskürtme mesafesine göre hedef malzeme üzerindeki erozyon oranları değişimi incelenmiştir.

5.2.3.1. Partikül boyutuna göre erozyon aşınması

Şekil 5.13’de farklı nozul tasarımlarının 120 mesh alümina aşındırıcı kullanılarak yapılan testler sonucu hedef malzeme yüzeyinde oluşan erozyon oranına etkileri incelenmiştir. I. grup nozullarda (giriş çapı 5 mm, çıkış çapı değişen) çıkış çapının küçülmesi ile erozyon oranında artış meydana gelmiştir. II. grup tasarımlarda (giriş çapı 4 mm, çıkış çapı değişen) da I. grupta olduğu gibi çıkış çapındaki küçülme ile erozyon oranında artış gerçekleştiği belirlenmiştir.

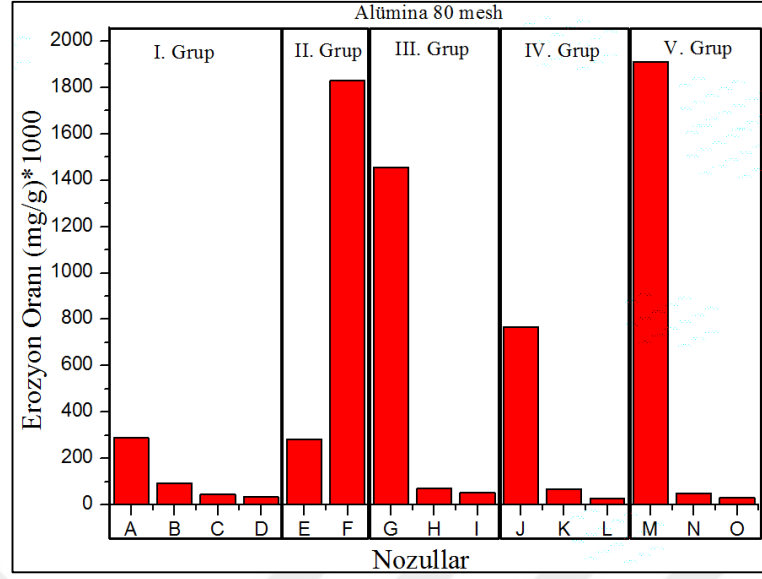
Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V.grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile erozyon oranında değişimlerin gerçekleştiği görülmüştür. Boğaz çapının 2 mm’den 3 mm’ye çıkması ile erozyon oranında artma meydana gelirken, 3 mm’den 4 mm’ ye geçişte erozyon oranında azalma gerçekleşmektedir. Bu durum üç grup tasarım içinde de gözlemlenmiştir. Boğaz yerlerinin değişimi erozyon oranını etkileyen diğer bir husustur. Boğazın nozul giriş çapına yakın konumlandırılması ile erozyon oranında artış meydana geldiği belirlenmiştir.

Genel olarak nozul giriş, çıkış ve boğaz çapının, boğaz yerinin erozyon oranına etkisinin olduğu belirlenmiştir. En yüksek erozyon oranı değerlerinin boğazın olmadığı, küçük giriş ve çıkış çaplı tasarımlarda (I. ve II. grup) gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.13. Farklı geometrili nozullarda 120 mesh alüminanın erozyon oranına etkisi

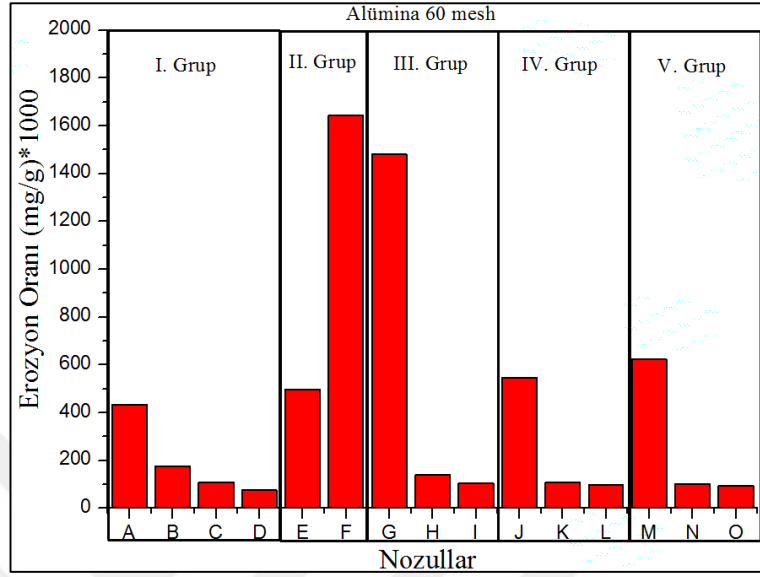
Şekil 5.13’de II. grup nozullar E ve F nozulları, tüm nozul geometrileri içinde maksimum erozyon oranı ortaya çıkaran nozullar olmuştur. En küçük partikül boyutuna sahip alümina 120 mesh partikülleri 3 mm giriş çaplı II. grup nozullarda boğulmaya uğramadan hızlanarak hedef malzeme yüzeyinde erozyon hasarı ortaya çıkarmışlardır. Giriş çapı 3 mm çıkış çapı 2 mm olan F nozulu 120 mesh alümina aşındırıcı partikülleri ile diğer nozul geometrilerine göre çok daha yüksek erozyon oranına ulaşılmasına sebep olmuştur. II. grup nozullardan farklı olarak en yüksek üçüncü erozyon oranına sebep olan nozul geometrisi I. grup nozullardan giriş çapı 5 mm çıkış çapı 2 mm olan A nozulu olmuştur. Alümina 120 mesh partikül boyutundaki aşındırıcı partiküller için F, E ve A nozul geometrileri dışında kalan geometrilerde erozyon aşınma oranlarının daha düşük seviyelerde gerçekleştiği görülmüş ve nozul geometrilerinin alümina 120 mesh aşındırıcı partiküller için çok fazla bir etkiye sahip olmadığı görülmüştür.



Şekil 5.14. Farklı geometrili nozullarda 80 mesh alüminanın erozyon oranına etkisi

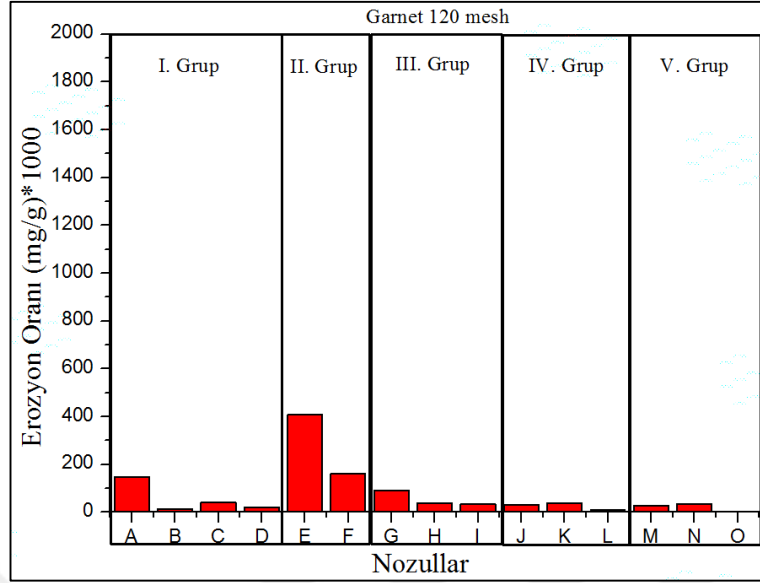
Şekil 5.14’de alümina 80 mesh aşındırıcı partikül boyutuyla gerçekleştirilen testler sonrası ortaya çıkan erozyon oranları 15 farklı nozul için karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Alümina 120 mesh boyutundan 80 mesh boyutuna büyüyen aşındırıcı partiküller erozyon oranı üzerinde önemli bir değişime sebep olmuştur. 120 mesh boyutta maksimum erozyon oranı gözlemlenen F, E ve A nozullarına ek olarak 80 mesh boyutuna büyüyen partiküller M, G ve J nozullarında da yüksek seviyede erozyon oranı ortaya çıkarmışlardır. M, G ve J nozul geometrilerine bakıldığında bu nozullarda nozul boylamasına eksende farklı noktalarda 2 mm çapında bir ventüri boğazı olduğu görülmektedir. M nozulunda ventüri boğazının, nozul girişine yakın bir noktada olmasının; ventüri boğazının ortada olduğu G ve nozul çıkışına yakın yerde olduğu J nozuluna göre daha yüksek erozyon oranına sebep olduğu görülmüştür. Ayrıca boğaz bulunmayan F, E ve A nozullarında alümina aşındırıcı partikül boyutunun 120 mesh olması durumunda maksimum erozyon oranları gözlemlenirken, alümina aşındırıcı partikül boyutu 80 mesh boyutuna büyüdüğünde ventüri boğazlı M, G ve J nozullarında daha yüksek erozyon oranları gözlemlenmiştir. Bu geometriler içinde de ventüri boğaz çapı her nozulda aynı olmasına rağmen ventüri boğazının nozul girişine yakın bir noktada olması daha yüksek erozyon oranına sebep olmuştur. Sonuç olarak partikül boyutunun alümina aşındırıcı için 120 meshten 80 mesh boyutuna büyümesi hem erozyon oranlarını

artırmış hem de nozul geometrisinde ventüri boğazının bulunması, daralan nozul geometrilerine göre daha yüksek erozyon oranlarına çıkılmasına sebep olmuştur.



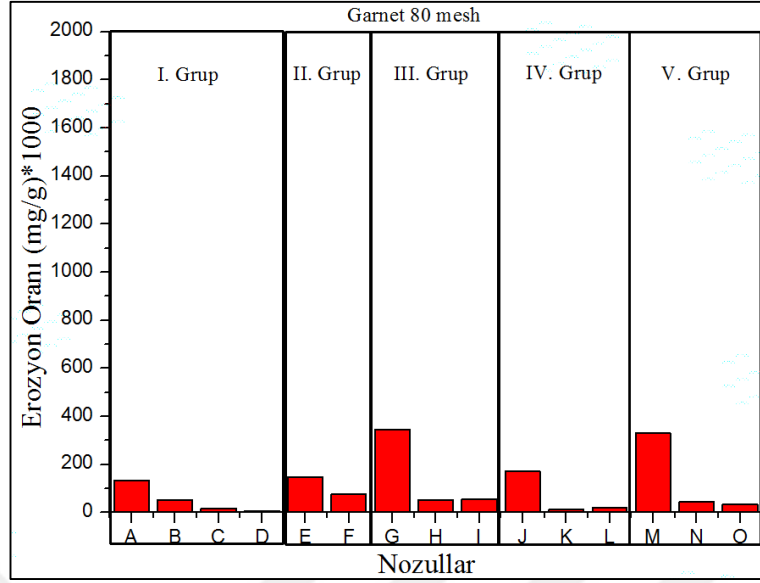
Şekil 5.15. Farklı geometrili nozullarda 60 mesh alüminanın erozyon oranına etkisi

Şekil 5.15’de alümina aşındırıcı partiküller içinde en büyük boyuta sahip 60 mesh ile yapılan testler sonrası 15 farklı nozul geometrisi için erozyon oranı karşılaştırmaları verilmiştir. 120 mesh ve 80 mesh boyutta olduğu gibi 60 mesh boyutlu aşındırıcı partiküllerde de maksimum erozyon oranı daralan kesitli nozullardan F, E ve A nozullarında gözlemlenirken; ventüri tipi nozullardan M, G ve J tipi nozullarda erozyon oranlarının yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ventüri boğazına sahip nozullarda maksimum erozyon oranı sırasıyla G, M ve J nozullarında ortaya çıkmıştır. Daha küçük partikül boyutu 80 mesh alüminada bu sıralama M, G ve J iken; partikül boyutunun 80 meshten 60 meshe büyümesi sıralamayı G, M ve J olarak değiştirmiştir. Yani partikül boyutunun büyümesi, ventüri boğazının orta noktada olması halinde daha yüksek erozyon oranına ulaşılmasına sebep olmuştur. Diğer taraftan, partikül boyutunun büyümesi M ve J nozullarında erozyon oranında azalmaya sebep olurken; ventürinin, nozulun ortasında bulunduğu G nozulunda erozyon oranında bir değişim yaratmadığı gözlemlenmiştir. Daralan kesitli F, E ve A nozullarında ise alümina aşındırıcıların partikül boyutlarının büyümesi erozyon oranının artmasına sebep olmuştur.



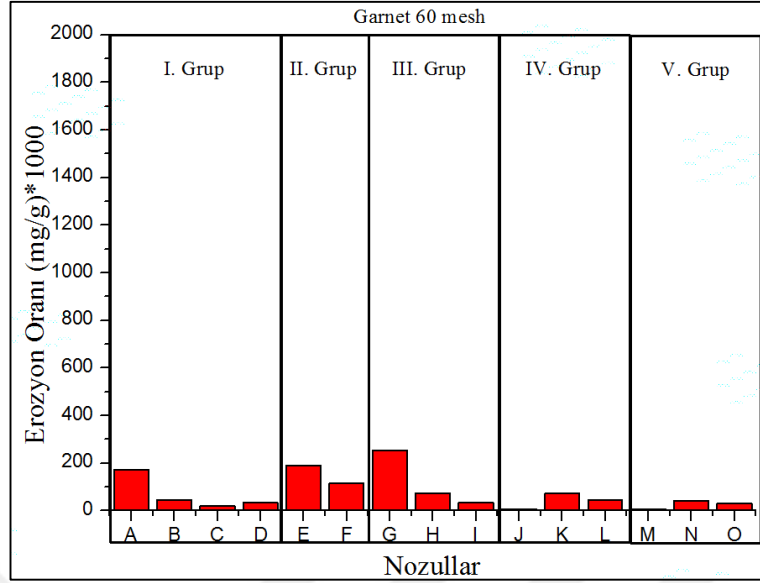
Şekil 5.16. Farklı geometrili nozullarda 120 mesh garnetin erozyon oranına etkisi

Deneysel çalışmalarda kullanılan bir başka aşındırıcı partikül tipi de garnettir. Yine aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkisinin ortaya konması amacıyla 3 farklı boyutta garnet minerali 120, 80 ve 60 mesh boyutlarında seçilerek kullanılmıştır. Böylece hem garnet partikül büyüklüğünün hem de daha önce analiz edilmiş olan alümina ve garnet aşındırıcılarının karşılaştırmalı erozyon oranı sonuçları ortaya konulmuştur. Şekil 5.16'da 120 mesh boyutunda garnet partikülleriyle 15 farklı nozul geometrisiyle gerçekleştirilen testler sonrası ortaya çıkan erozyon oranları karşılaştırması görülmektedir. En yüksek erozyon oranları sırasıyla E, F ve A nozullarında ortaya çıkmıştır. E nozulunda giriş çapı ve çıkış çapı 3 mm iken F nozulunda giriş çapı 3 mm çıkış çapı 2 mm, A nozulunda ise giriş çapı 5 mm çıkış çapı 2 mm'dir. Sonuç olarak garnet 120 mesh aşındırıcı partikül büyüklüğünde maksimum erozyon oranı sabit kesitli ve 3 mm çaplı E nozul geometrisinde elde edilmiştir. Garnet 120 mesh aşındırıcı partikül boyutu için bu üç nozul geometrisi dışındaki nozullarda erozyon oranları çok düşük seviyede kalmıştır ve nozul geometrisi çapının erozyon oranına önemli bir etkisi görülmemiştir.



Şekil 5.17. Farklı geometrili nozullarda 80 mesh garnetin erozyon oranına etkisi

Şekil 5.17’de 80 mesh garnet partikülleriyle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası ortaya çıkan erozyon oranları karşılaştırması verilmiştir. Garnet aşındırıcı partikül boyutunun 120 meshten 80 meshe büyümesi, E, F ve A nozullarındaki erozyon oranlarını bir miktar düşürürken, alümina aşındırıcısında olduğu gibi G, M ve J nozullarında garnet partikül boyutunun artması erozyon oranını önemli miktarda artırmıştır. Bir başka deyişle garnet partikül boyutunun büyümesi ventüri boğaza sahip nozul geometrilerinin de erozyon oranlarını önemli ölçüde artırmıştır. G, M ve J nozullarındaki erozyon oranları E, F ve A nozullarına göre daha yüksek olmuştur. Diğer nozul geometrilerinde, bu altı nozul geometrisinde ortaya çıkan erozyon oranlarına göre çok daha düşük değerler ortaya çıkmıştır. Tüm nozullar içinde maksimum erozyon oranı G ve M nozul geometrisinde ortaya çıkmış; 2 mm çaplı ventüri boğazlı nozulların, garnet 80 mesh partikül için maksimum erozyon oranı ortaya çıkardığı gözlemlenmiştir.



Şekil 5.18. Farklı geometrili nozullarda 60 mesh garnetin erozyon oranına etkisi

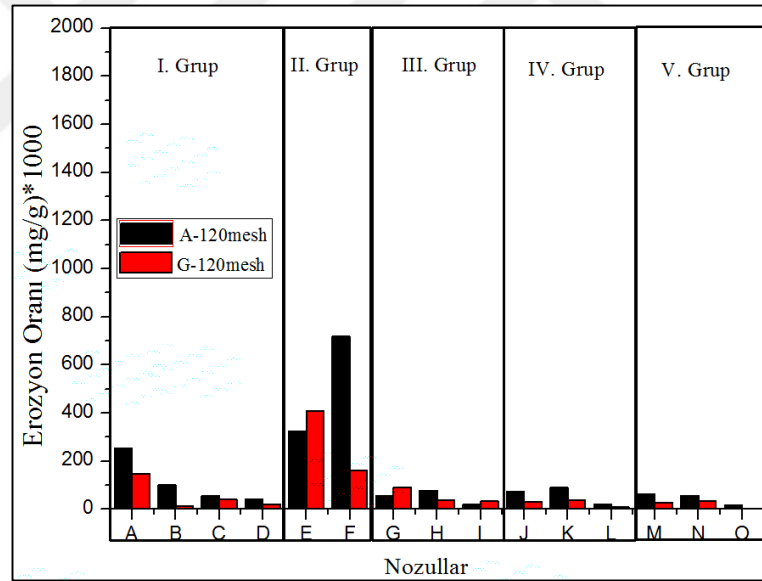
Şekil 5.18’de garnet için en büyük tanecik boyutu olan 60 mesh boyutunda testler sonrası ortaya çıkan erozyon oranları görülmektedir. Bundan önceki garnet tanecik boyutlarında gözlemlenenlere benzer olarak G nozul geometrisinde maksimum erozyon oranı tespit edilmiştir. Bununla birlikte girişe yakın konumda 2 mm çaplı ventüri boğazına sahip M nozulunda, 60 mesh garnet boyutunda çok düşük seviyede erozyon oranı ortaya çıkmıştır. Ventüri tip boğaza sahip nozullardan G ve M nozullarında ventüri daralma kesitinin G nozulunda olduğu gibi orta kısımda bulunması erozyon oranını çok etkilemez iken, M nozulu gibi girişe yakın olan ventüri boğazına sahip nozullarda kritik bir partikül boyutu geçildiğinde erozyon oranının büyük miktarda düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir. Daralan kesitli E, F ve A nozullarında ise erozyon oranlarında partikül boyutuna bağlı çok büyük değişim gözlemlenmemiştir. 6 nozul geometrisinin dışında kalan nozul geometrilerinde erozyon oranları en küçük partikül boyutu olan 60 mesh garnet için de düşük seviyelerde kalmıştır.

Bu bölümde aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranına etkisi, alümina ve garnet partikülleri için ayrı ayrı irdelenerek nozul geometrileri bazında ortaya konmuştur. Alümina aşındırıcı için 120 mesh boyutta F, E ve A nozullarında erozyon oranları yüksek gözlemlenirken, partikül boyutu 80 ve 60 mesh olarak büyüdüğünde etkin erozyon oranlarına G, M ve J ventüri boğazına sahip nozullarda da rastlanmıştır.

Alümina için partikül boyutunun büyümesi erozyon oranlarını artırırken aynı zamanda sadece daralan tip nozullarda değil, ventürili boğaza sahip nozullarda da erozyon oranlarının yüksek seviyede ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Benzer etkiler aynı nozul geometrileri için garnet aşındırıcı partikül boyut değişiminde de gözlemlenmiştir. Diğer taraftan alümina aşındırıcı partikülleri garnet aşındırıcı partiküllerine göre daha yüksek erozyon oranlarına sebep olmuştur.

5.2.3.2. Partikül çeşitine göre erozyon aşınması

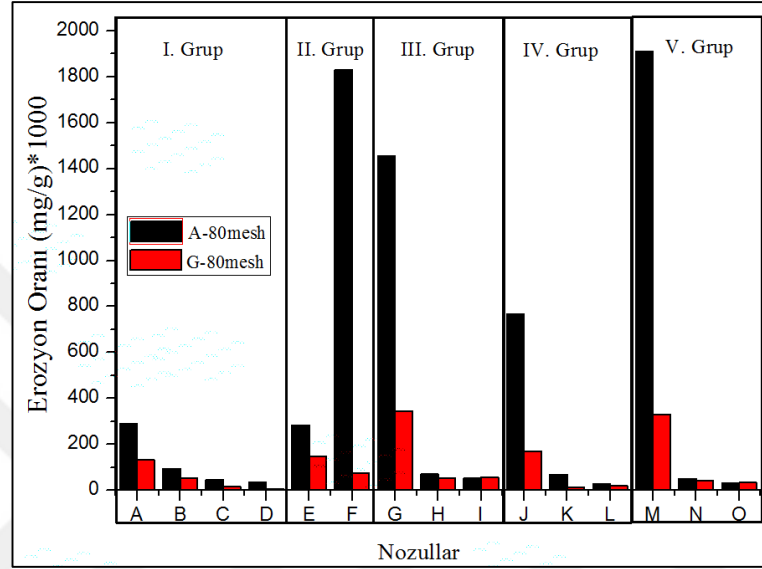
Bu bölümde aşındırıcı partikül boyutunun erozyon oranı üzerine etkileri incelenmeye ve analiz edilmeye çalışılmıştır. Alümina ve garnet partikülleriyle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası ortaya çıkan erozyon oranları 15 farklı nozul geometrisi için karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur. Alümina ve garnet partikülleri için aynı partikül büyüklüğünde her nozul geometrisi için erozyon oranları analiz edilmiştir.



Şekil 5.19. Farklı geometrili nozullarda 120 mesh alümina ve garnet partiküllerinin erozyon oranına etkisinin karşılaştırılması

Şekil 5.19’da aşındırıcı partiküller içinde en küçük tanecik boyutuna sahip 120 mesh alümina ve garnet partiküllerinin erozyon oranları karşılaştırması verilmiştir. En yüksek erozyon oranı F nozulunda alümina partikülleriyle ortaya çıkmıştır. Aynı boyutta garnet partikülleriyle aynı nozul geometrisinde yaklaşık 4 kat daha düşük erozyon oranı elde edilmiştir. Sabit kesitli ve 3 mm giriş ve çıkış çapına sahip E nozulunda ise garnet partikülleri alümina partiküllerine göre daha yüksek erozyon

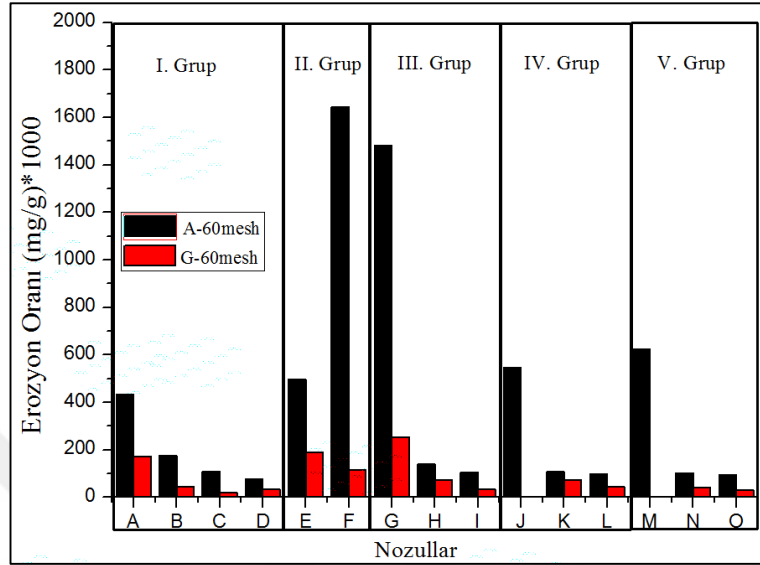
oranına sebep olmuştur. Fakat burada alümina ve garnet partikülleri erozyon oranları arasındaki fark, F nozulundaki kadar gerçekleşmemiştir. Bütün nozul geometrileri için değerlendirme yapıldığında, 120 mesh boyutunda alümina partiküllerin garnet partiküllere göre ortalamada daha yüksek erozyon oranları ortaya çıkardığı görülmüştür.



Şekil 5.20. Farklı geometrili nozularda 80 mesh alümina ve garnet partiküllerinin erozyon oranına etkisinin karşılaştırılması

Şekil 5.20’de 80 mesh boyutundaki aşındırıcı alümina ve garnet partiküllerinin erozyon oranları karşılaştırması verilmiştir. Maksimum erozyon oranları daralan kesitli F nozuluyla birlikte 2 mm ventüri boğaza sahip M, G ve J nozullarında ortaya çıkmıştır. 80 mesh boyutlu aşındırıcı partiküller arasındaki karşılaştırmada ortaya çıkmıştır ki, alümina aşındırıcı garnet aşındırıcıya göre çok daha yüksek erozyon oranlarına sebep olmuştur. Daha küçük olan 120 mesh partikül boyutunda sadece daralan kesitli nozularda alümina etkin erozyon oranlarına sebep olurken, partikül boyutunun 80 meshe büyümesiyle birlikte ventüri boğazlı nozul geometrileri de erozyon oranları üzerinde önemli bir etki yapmıştır. 80 mesh partikül boyutunda alümina aşındırıcı garnet aşındırıcıya göre çok daha yüksek oranda hedef malzeme yüzeyinde kütle kaybına sebep olmaktadır. Derinlemesine yüzey temizleme işlemi yapılması gereken yerlerde 80 mesh boyutta alümina aşındırıcı partiküllerin daha efektif sonuçlar vereceği açıktır. Diğer taraftan kumlama sonrası hedef malzeme

ölçülerinde sıkı toleranslara bağlı kalınması gerekiyorsa, garnet partikülleri temizleme sonrası boyutsal kararlılığı korumak açısından daha uygun olacaktır.



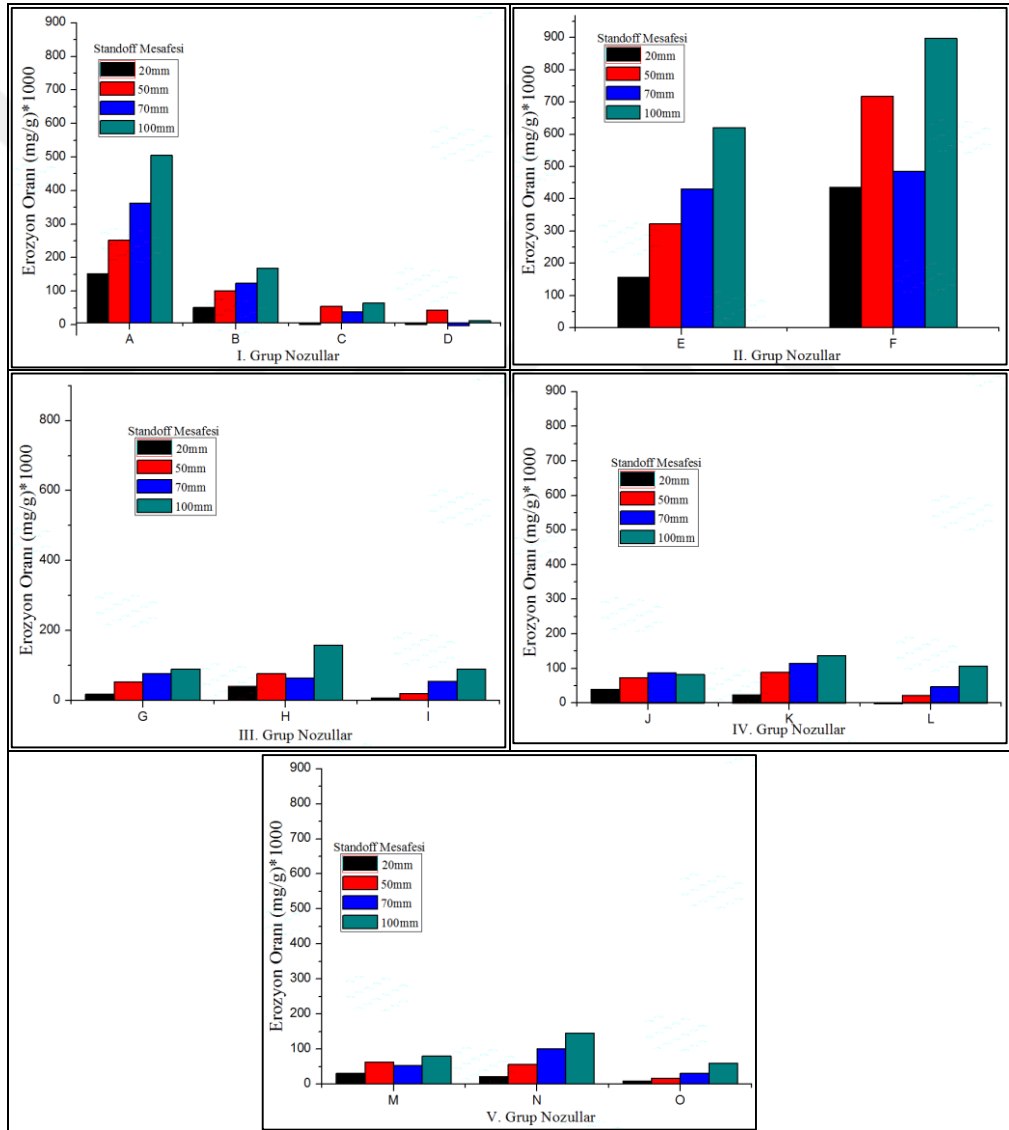
Şekil 5.21.Farklı geometrili nozullarda 60 mesh alümina ve garnet partiküllerinin erozyon oranına etkisinin karşılaştırılması

Şekil 5.21’de aşındırıcı partikül boyutları içinde en büyük olan 60 mesh boyutlu aşındırıcı garnet ve alümina partiküllerin erozyon oranları karşılaştırması verilmiştir. Maksimum erozyon oranı F nozulunda alümina aşındırıcı ile elde edilmiştir. Aynı nozulda garnet partikülle elde edilen erozyon oranı alüminaya göre yaklaşık 10 kat daha az olmuştur. İkinci maksimum erozyon oranı G nozuluyla yine alümina partikülle ortaya çıkmıştır. Aynı nozulda garnet partikülle ortaya çıkan erozyon oranı alüminaya göre yaklaşık 7 kat daha az olmuştur. Bütün nozul geometrileri incelendiğinde ortalamada alümina aşındırıcının garnete göre çok daha yüksek erozyon oranlarına sebep olduğu net şekilde görülmektedir.

Bu bölümde elde edilen bilgiler ışığında alümina partikülleri aynı boyutta garnet partiküllerine göre çok daha yüksek erozyon oranlarına sebep olmuştur. Bu bağlamda hedef malzemede kütle kayıpları alümina ile yapılan testlerde garnet testlerine göre daha yüksek olmuştur. Erozyon oranlarının partikül boyutuyla birlikte aşındırıcı partikül türüne göre de çok büyük değişim gösterdiği net şekilde ortaya çıkmıştır.

5.2.3.3. Nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeye göre erozyon aşınması

Bu bölümde aşındırıcı partiküllerin nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafenin değişimiyle numune üzerinde erozyon oranı etkileri incelenmeye ve analiz edilmeye çalışılmıştır. Nozul çıkışıyla hedef malzeme arasında belirlenen 20, 50, 70 ve 100 mm'lik mesafelere göre gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası ortaya çıkan erozyon oranları 15 farklı nozul geometrisi için karşılaştırmalı olarak ortaya konmuştur.



Şekil 5.22. Farklı geometrili nozullarda püskürtme mesafesine göre erozyon oranı etkisi

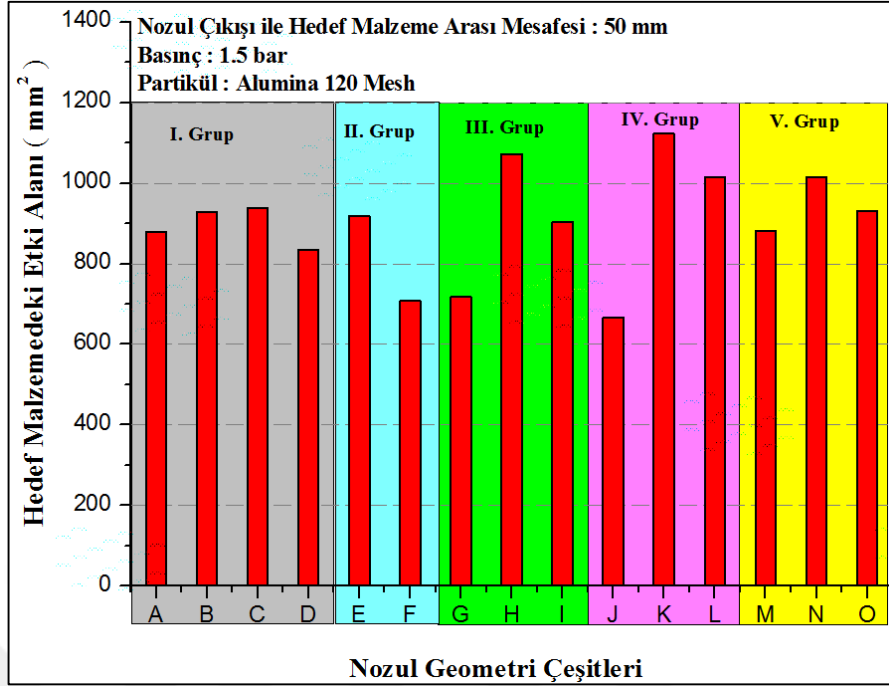
Şekil 5.22’de beş gruba ayrılmış nozul geometrilerinin nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafenin değişimiyle numune üzerinde erozyon oranı etkileri görülmektedir. Bütün nozul grupları incelendiğinde mesafenin artmasıyla erozyon oranında artış olduğu görülmüştür. Aşındırıcı partiküllerin, nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafenin arttırılmasıyla partikül hızlarının artması sonucu literatürle de uyumlu olarak erozyon artışına neden olduğu söylenebilir.

5.2.4. Nozul geometrilerine göre hedef malzeme üzerindeki etki alanının değişimi

Bu çalışmada 15 farklı nozul geometrisinin 1,5 bar basınç altında partikül boyutuna, partikül çeşidine ve nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeye göre PMMA yüzeyi üzerindeki etki alanları incelenmiş ve 15 farklı nozul geometrisiyle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası PMMA yüzeylerinde ortaya çıkan hasar bölgelerinin görüntü işleme tekniğiyle elde edilen dağılımları verilmiştir. Görüntü işleme basamakları uygulanmadan önce yüksek çözünürlükte yatay tarayıcıda numunelerin hasarlı bölgelerinin görüntüleri tarama yapılarak elde edilmiştir. Böylece aşındırıcı partiküllerin PMMA yüzeyinde oluşturdukları aşınma etkinliği ortaya konabilmiştir.

5.2.4.1. Partikül boyutuna göre hedef malzeme üzerinde etki alanı

Şekil 5.23’de nozul geometrilerine bağlı olarak 120 mesh alümina aşındırıcı partikülü kullanılarak yapılan deneyler sonucunda PMMA yüzeyinde oluşan etki alanları verilmiştir. I. ve II. grup nozulları incelediğimizde nozulun çıkış çapı arttıkça etki alanının arttığı görülmüştür. Bu nozul tiplerinde çap arttıkça aşındırıcı partiküller nozul çıkışından itibaren bir yayılma göstererek hedef malzeme yüzeyinde daha büyük bir etki alanı yaratmışlardır. Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V.grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile 120 mesh alüminanın hedef malzeme yüzeyinde etki ettiği alanda değişimlerin gerçekleştiği belirlenmiştir. Boğaz çapının 2 mm’den 3 mm’ye çıkması ile etki alanında artış meydana gelirken, 3 mm’den 4 mm’ye geçişte etki alanında azalma gerçekleşmektedir. Bu durum üç grup tasarım içinde de gözlemlenmiştir. Bütün nozullar içinde en fazla etki alanına H ve K nozulları sahip olmuştur.

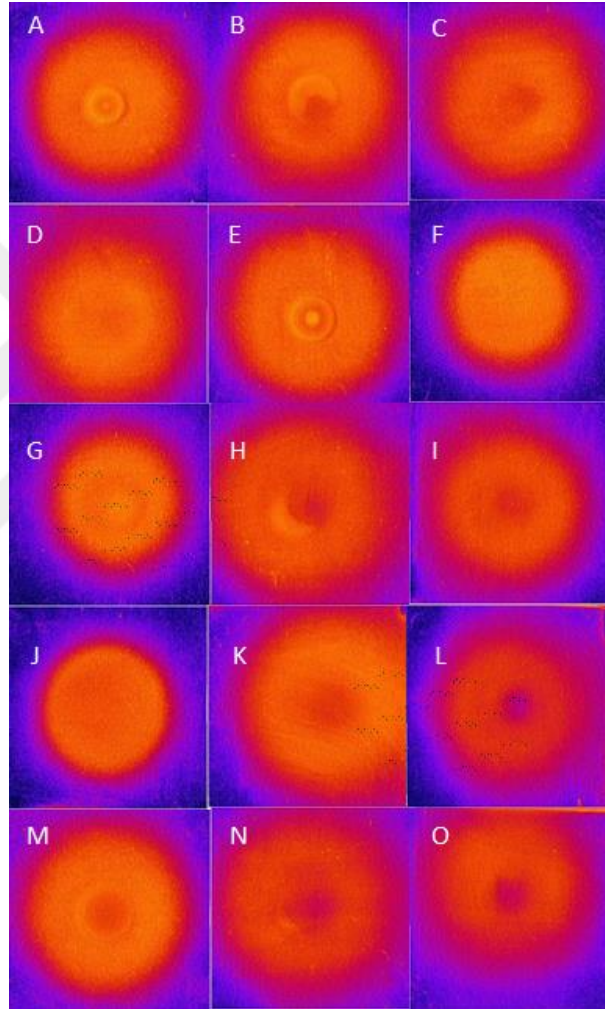


Şekil 5.23. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı

Şekil 5.24'te, 15 farklı nozul geometrisiyle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası PMMA yüzeylerinde ortaya çıkan hasar bölgelerinin görüntü işleme tekniğiyle elde edilen dağılımları verilmiştir. Görüntü işleme basamakları uygulanmadan önce yüksek çözünürlükte yatay tarayıcıda numunelerin hasarlı bölgelerinin görüntüleri tarama yapılarak elde edilmiştir. Hasar bölgesinin dağılımının net analizi için Image J programında filtre olarak Fire LUT kullanılmıştır. Böylece aşındırıcı partiküllerin PMMA yüzeyinde oluşturdukları aşınma etkinliği ortaya konabilmiştir. Hiç aşınmaya uğramamış bölgeler mor renkli, az aşınmış bölgeler kırmızı renkli ve en çok aşınmanın olduğu bölgeler turuncu renkli spektrumla görülmektedir.

Şekil 5.24'te 120 mesh alüminanın aşındırıcı tozları kullanılarak farklı nozul geometrileriyle yapılan deneyler sonrası aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu aşındırıcı partikülle yapılan deneyde hedef malzeme yüzeyinde geniş bir alanda aşınma izinin etkili olduğu gözlemlenmiştir. Termoplastik bir malzeme olan PMMA'nın erozif aşınma testleri sonrası A ve E nozullarında aşındırıcı partiküller merkez noktada daha fazla aşınmaya sebep olarak "puslanma" olarak adlandırılan bir hasar mekanizması ortaya çıkarmıştır. Şeffaf bir malzeme olan PMMA'da aşındırıcı

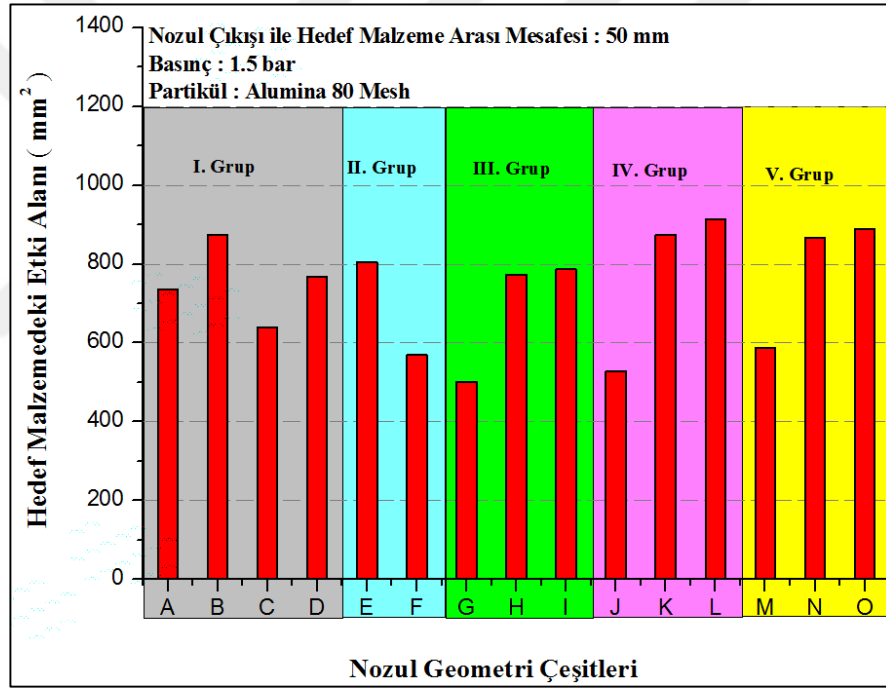
partiküllerin tekrarlı çarpması sonucu opak bir bölgenin merkezde ortaya çıkarak görüntü kaybına sebep olmasına “puslanma” denir. Puslanma bölgesi izi merkezde A ve E nozullarıyla yapılan aşındırma testleri sonrası daha net görülmüştür. L, N ve O nozullarında ise merkezde aşınmanın fazla olmadığı gözlemlenmiştir. Bu tip nozullarda aşındırıcı partiküllerin merkezde odaklanmadığı görülmektedir. Şekil 5.24’e baktığımızda F, G ve J nozullarının da hedef malzeme yüzeyinde daha az bir etki alanı yarattığı görülmüştür.



Şekil 5.24. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı

Şekil 5.25’de nozul geometrilerine bağlı olarak 80 mesh alümina aşındırıcı partikülü kullanılarak yapılan deneyler sonucunda PMMA yüzeyinde oluşan etki alanları verilmiştir. I. grup nozulları incelediğimizde B nozulunun (giriş çapı 5 mm, çıkış çapı 3 mm) hedef malzeme yüzeyinde en fazla etki alanı yarattığı görülmüştür. II.

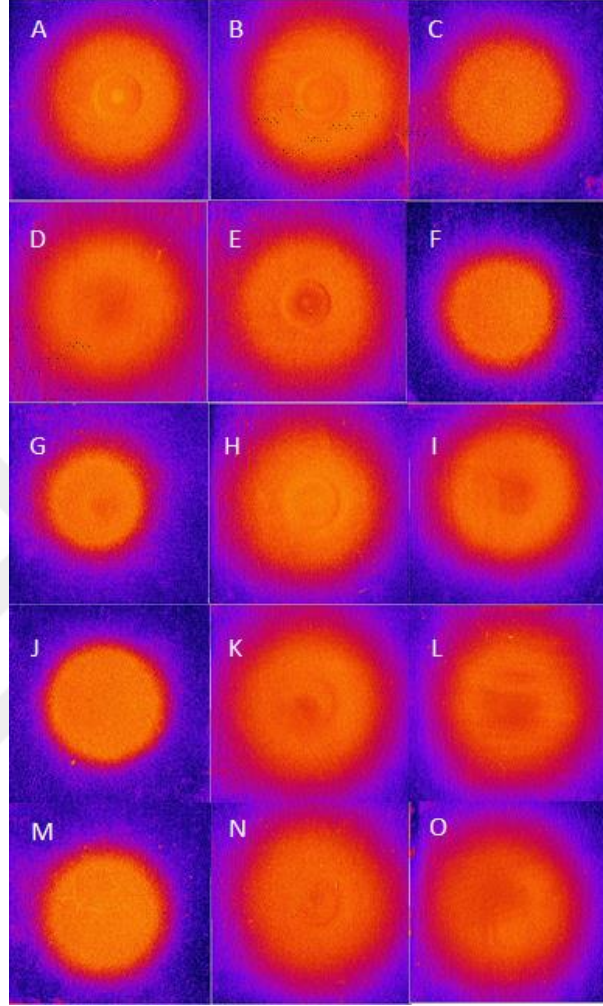
grup nozullarda çıkış çapı daraldıkça hedef malzeme yüzeyindeki etki alanının küçüldüğü görülmüştür. F nozul (giriş çapı 3 mm, çıkış çapı 2 mm) tipinde giriş çapına göre çıkış çapının azalmasıyla aşındırıcı partiküller nozul çıkışından itibaren bir yayılma göstermeyerek hedef malzeme yüzeyinde daha dar bir alanda etki etmiştir. Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V.grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile 80 mesh alüminanın hedef malzeme yüzeyinde etki ettiği alanda değişimlerin gerçekleştiği belirlenmiştir. Boğaz çapının artmasıyla etki alanında artma meydana gelmiştir. Bu durum 3 grup tasarım içinde de gözlemlenmiştir. Bütün nozullar içinde en fazla etki alanına L nozullunda (giriş çapı 5 mm, çıkış çapı 5 mm ve boğaz yeri çıkışa yakın, nozulun %75'lik kısmında çapı da 4 mm) gözlemlenmiştir.



Şekil 5.25. 80 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı

Şekil 5.26'da 80 mesh alüminanın aşındırıcı tozları kullanılarak farklı nozul geometrileriyle yapılan deneyler sonrası aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu aşındırıcı partikülle yapılan deneyde hedef malzeme yüzeyinde geniş bir alanda aşınma izinin etkili olduğu gözlemlenmiştir. Puslanma bölgesi izi merkezde özellikle E nozuluyla yapılan aşındırma testleri sonrası daha net görülmüştür. F, G, J ve M nozullarının hedef malzeme yüzeyinde daha az bir etki alanı yarattığı görülmüştür. Bu nozulları incelediğimizde F nozulunun çıkış çapının 2 mm olduğu, G, J ve M

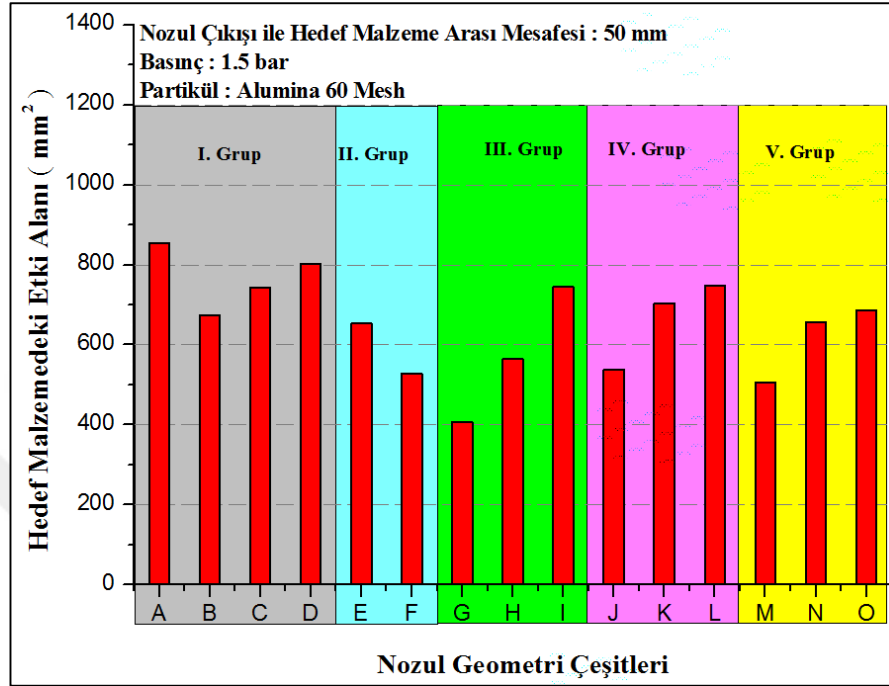
nozullarının boğaz konumları farklı olduğu ama boğaz çaplarının 2 mm görülmektedir. Partikül boyutunun büyümesiyle dar olan nozul çaplarının hedef malzeme yüzeyinde daha az bir etki alanı yarattığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.26. 80 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı

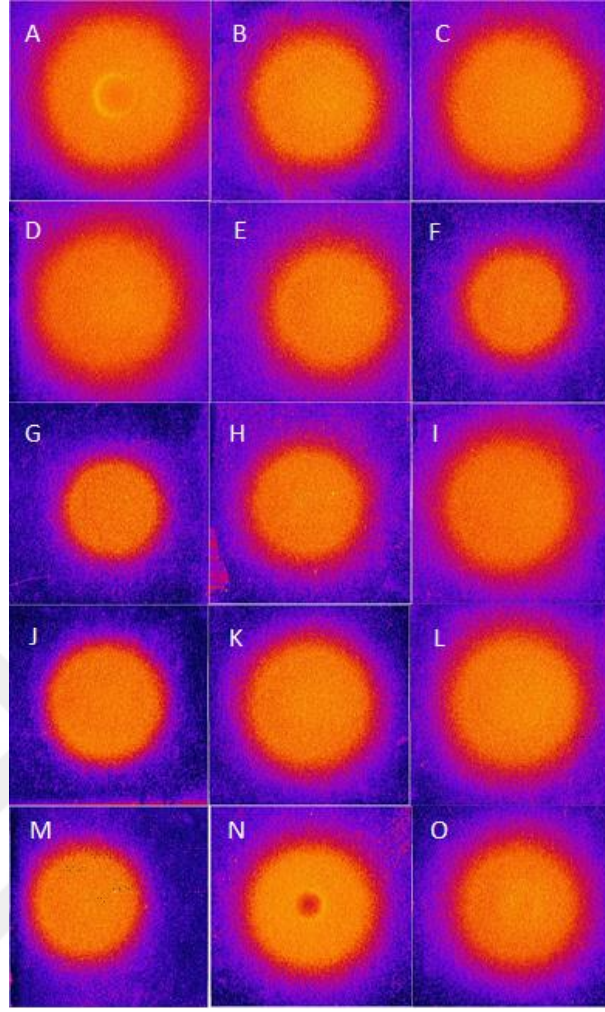
Şekil 5.27’de nozul geometrilerine bağlı olarak 60 mesh alümina aşındırıcı partikülü kullanılarak yapılan deneyler sonucunda PMMA yüzeyinde oluşan etki alanları verilmiştir. I. ve II. grup nozulları incelediğimizde genelde nozulun çıkış çapı arttıkça etki alanının arttığı görülmüştür. Bu nozul tiplerinde çap arttıkça aşındırıcı partiküller nozul çıkışından itibaren bir yayılma göstererek hedef malzeme yüzeyinde daha büyük bir etki alanı yaratmışlardır. Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V.grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile 60 mesh alüminanın hedef malzeme yüzeyinde etki ettiği alanda değişimlerin gerçekleştiği belirlenmiştir. Boğaz çapının

artmasıyla etki alanında artma meydana gelmiştir. Bu durum 3 grup tasarım içinde de gözlemlenmiştir. Bütün nozullar içinde en fazla etki alanına A nozulunda (giriş çapı 5 mm, çıkış çapı 2 mm) gözlemlenmiştir.



Şekil 5.27. 60 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı

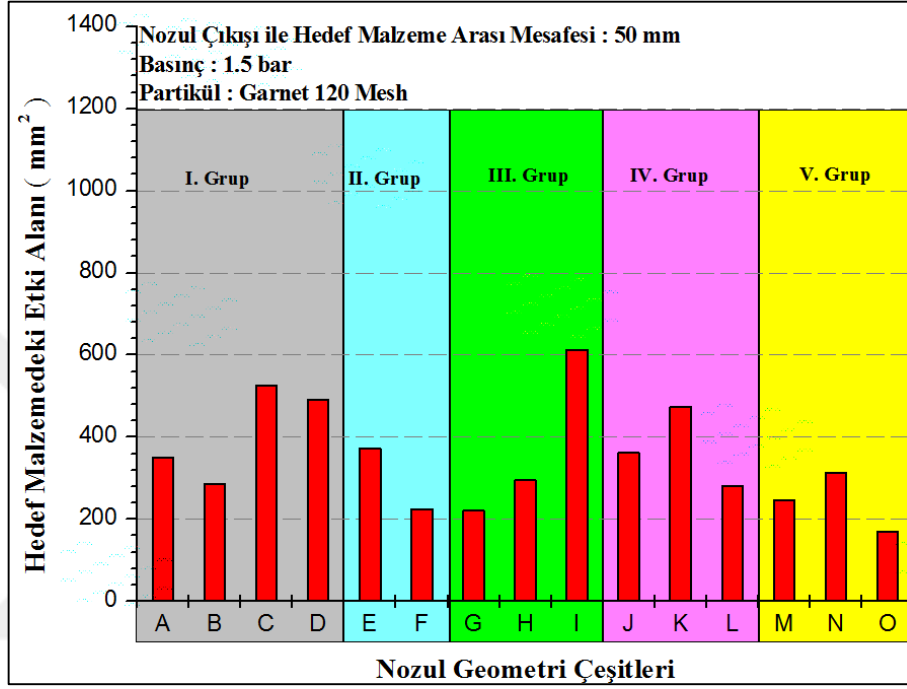
Şekil 5.28’de 60 mesh alüminanın aşındırıcı partikül kullanılarak farklı nozul geometrileriyle yapılan deneyler sonrası aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu aşındırıcı partikülle yapılan deneyde diğer 120 mesh ve 80 mesh alümina aşındırıcılara nazaran hedef malzeme yüzeyinde daha sınırlı bir alanda aşınma izinin etkili olduğu gözlemlenmiştir. Puslanma bölgesi izi merkezde özellikle N nozuluyla (giriş çapı 5 mm, çıkış çapı 5 mm ve boğaz yeri girişe yakın, nozulun %25’lik kısmında çapı da 3 mm) yapılan aşındırma testleri sonrası daha net görülmüştür. Partikül boyutunun büyümesiyle dar olan nozul çaplarının hedef malzeme yüzeyinde daha az bir etki alanı yarattığı söylenebilir.



Şekil 5.28. 60 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı

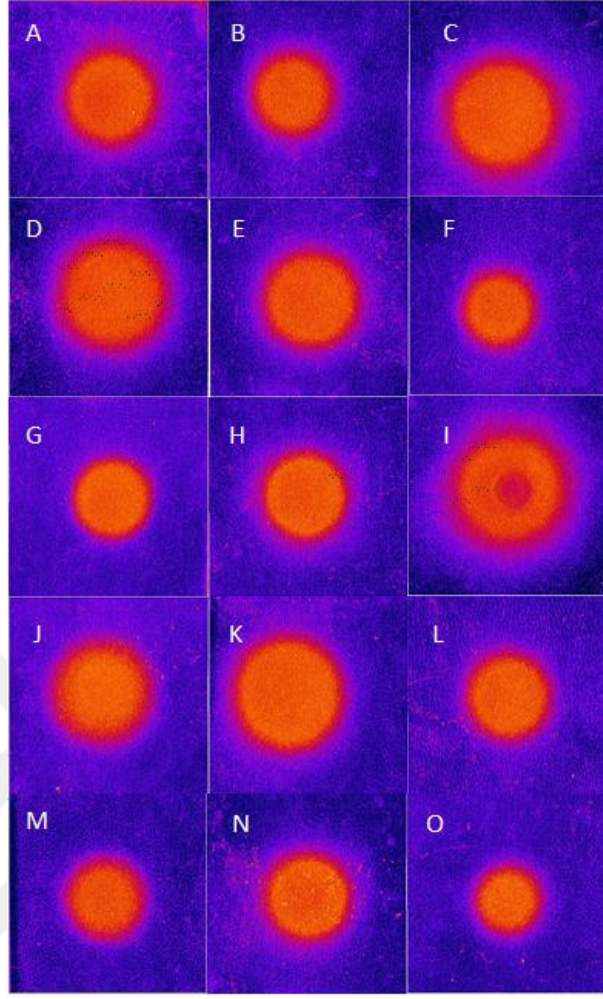
Deneysel çalışmalarda kullanılan bir başka aşındırıcı partikül tipi de garnettir. Yine aşındırıcı partikül boyutunun hedef malzeme yüzeyine etki alanının ortaya konması amacıyla 3 farklı boyutta garnet minerali 120, 80 ve 60 mesh boyutlarında seçilerek kullanılmıştır. Şekil 5.29’da nozul geometrilerine bağlı olarak 120 mesh garnet aşındırıcı partikülü kullanılarak yapılan deneyler sonucunda PMMA yüzeyinde oluşan etki alanları verilmiştir. I. ve II. grup nozulları incelediğimizde genelde nozulun çıkış çapı arttıkça etki alanının arttığı görülmüştür. Bu nozul tiplerinde çap arttıkça aşındırıcı partiküller nozul çıkışından itibaren bir yayılma göstererek hedef malzeme yüzeyinde daha büyük bir etki alanı yaratmışlardır. Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V.grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile 120 mesh garnetin hedef malzeme yüzeyinde etki ettiği alanda değişimlerin gerçekleştiği belirlenmiştir. III. grup nozullarda boğaz çapının artmasıyla etki alanının arttığı görülürken, IV. ve

V. grup nozullarda ise boğaz çapının 2 mm'den 3 mm'ye çıkması ile etki alanında artma meydana gelirken, 3 mm'den 4 mm'ye geçişte etki alanında azalma gerçekleşmektedir. Bütün nozullar içinde en fazla etki alanına I nozulu (giriş çapı 5 mm, çıkış çapı 5 mm ve boğaz yeri nozulun orta kısmında çapı da 4 mm) sahip olmuştur.



Şekil 5.29. 120 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı

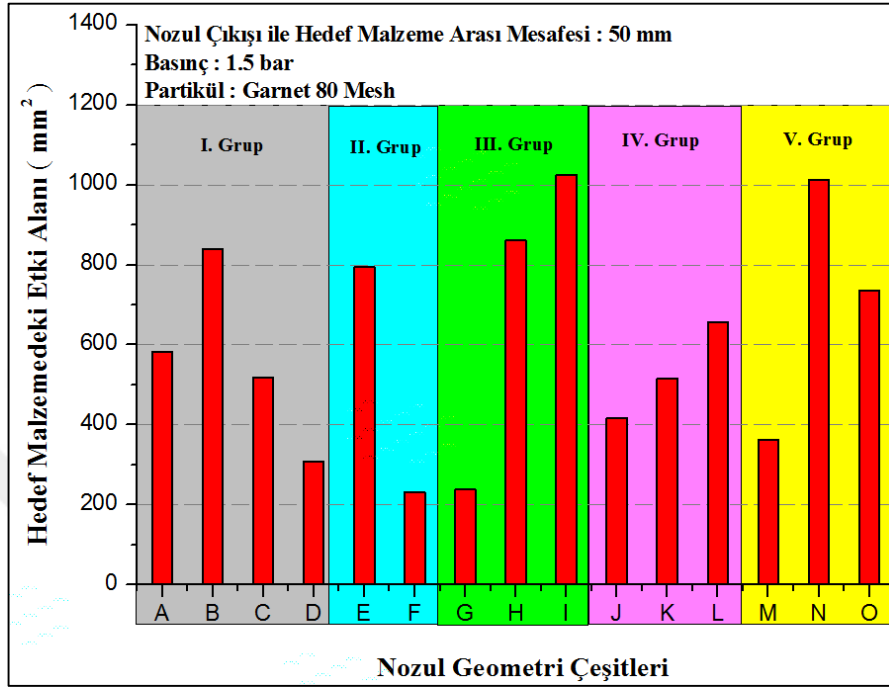
Şekil 5.30'da 120 mesh garnetin aşındırıcı partikül kullanılarak farklı nozul geometrileriyle yapılan deneyler sonrası aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu aşındırıcı partikülle yapılan deneyde hedef malzeme yüzeyinde az bir alanda aşınma izi gözlemlenmiştir. Bu nozulların içinde 120 mesh garnet aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyinde en fazla C, D, I ve K nozullarında etki alanı yarattığı görülmüştür. Puslanma bölgesi izi merkezde özellikle I nozuluyla (giriş çapı 5mm, çıkış çapı 5 mm ve boğaz yeri nozulun orta kısmında çapı da 4 mm) yapılan aşındırma testleri sonrası net bir şekilde görülmüştür.



Şekil 5.30. 120 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı

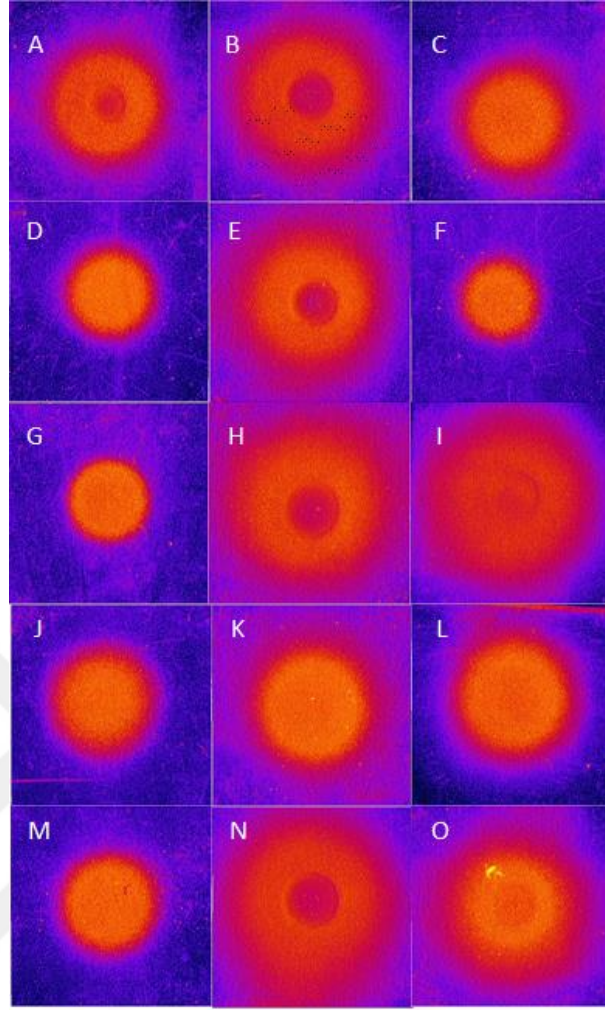
Şekil 5.31’de farklı nozul geometrileriyle ve 80 mesh garnet aşındırıcı partikülüyle gerçekleştirilen testler sonrası PMMA yüzeyinde ortaya çıkan aşındırıcı etki alanlarının karşılaştırması verilmiştir. I. grup nozulları incelendiğinde B nozulunun (giriş çapı 5 mm, çıkış çapı 3 mm) hedef malzeme yüzeyinde en fazla etki alanı yarattığı görülmüştür. II. grup nozullarda çıkış çapı daraldıkça hedef malzeme yüzeyindeki etki alanının küçüldüğü görülmüştür. F nozul (giriş çapı 3 mm, çıkış çapı 2 mm) tipinde giriş çapına göre çıkış çapının azalmasıyla aşındırıcı partiküller nozul çıkışından itibaren bir yayılma göstermeyerek hedef malzeme yüzeyinde daha dar bir alanda etki etmiştir. Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V. grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile 120 mesh garnetin hedef malzeme yüzeyinde etki ettiği alanda değişimlerin gerçekleştiği belirlenmiştir. Boğaz çapının artmasıyla etki alanında artma meydana gelmiştir. Bu durum üç grup tasarım içinde de

gözlemlenmiştir. Hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkan etki alanları incelendiğinde en büyük etki alanı ortada boğaza sahip I nozul geometrisinde gözlemlenmiştir. Diğer taraftan en dar etki alanına sahip nozul F nozulu olmuştur.



Şekil 5.31. 80 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı

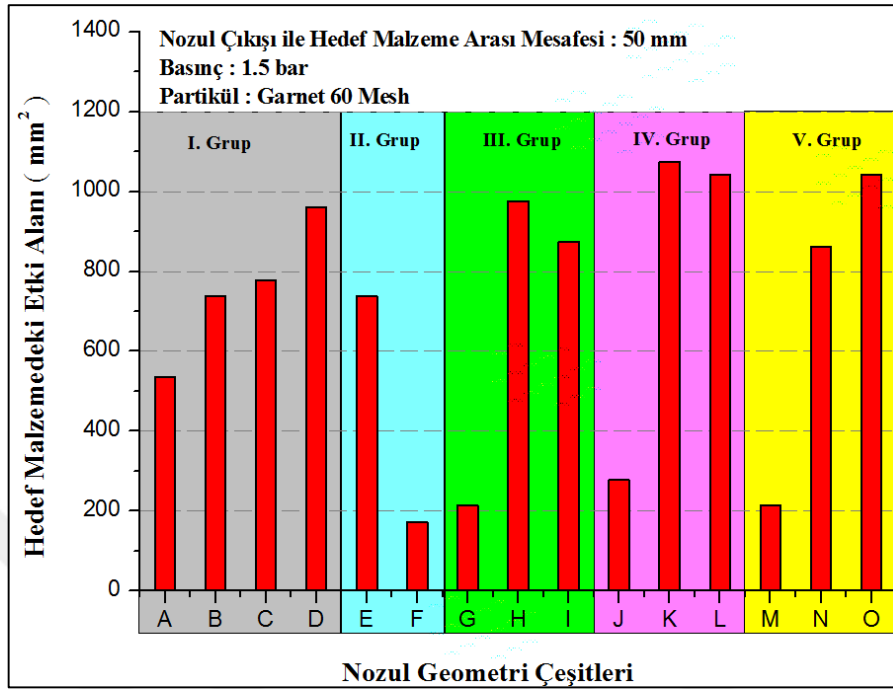
Şekil 5.32’de, 15 farklı nozul geometrisiyle ve 80 mesh garnet aşındırıcı partikülüyle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası PMMA yüzeylerinde ortaya çıkan hasar bölgelerinin görüntü işleme tekniğiyle elde edilen dağılımları verilmiştir. Şekil 5.32 incelendiğinde F ve G tipi nozulların en küçük etki alanına sahip oldukları görülmüştür. En geniş etki alanına ise I, N ve H tipi nozullarda rastlanmıştır. A, B, E, H ve N tipi nozullarla püskürtme sonrası ise yüzeyde orta kısımda daha az aşınma olan dairesel bölge oluşurken, dairenin kenarlarında halka şeklinde daha derin aşınmanın olduğu bir bölge ortaya çıkmıştır. Nozul geometrisine bağlı olarak bu tip nozullarda orta kısımda aşındırıcı partiküllerin nozul içinde hızlanırken birbirleriyle fazla etkileşime girerek kinetik enerjilerini kaybettikleri ve merkezde daha az aşındırmaya sebep oldukları söylenebilir.



Şekil 5.32. 80 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı

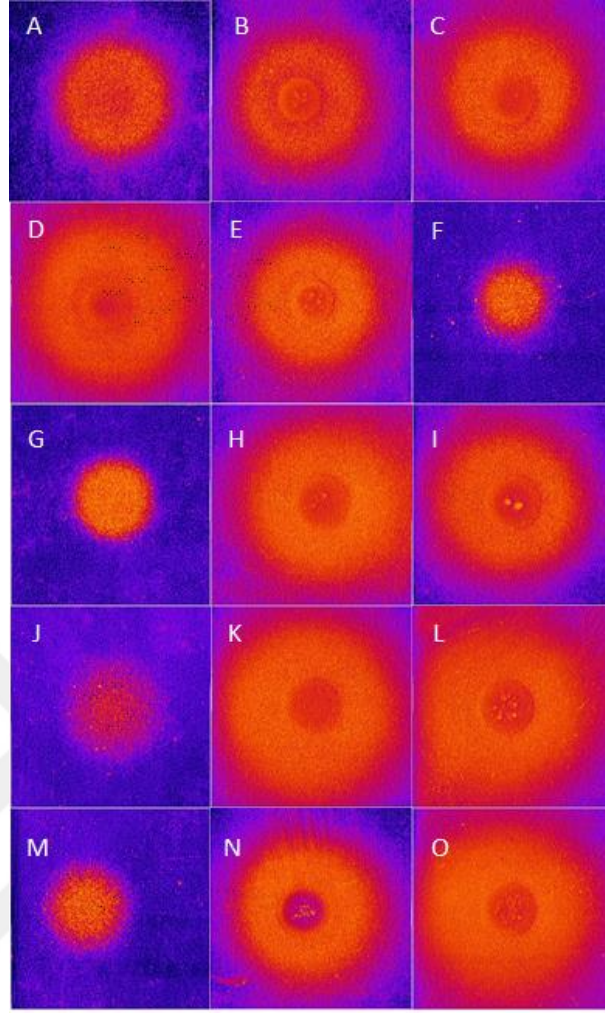
Şekil 5.33’de nozul geometrilerine bağlı olarak 60 mesh garnet aşındırıcı partikülü kullanılarak yapılan deneyler sonucunda PMMA yüzeyinde oluşan etki alanları verilmiştir. I. ve II. grup nozulları incelediğimizde nozulun çıkış çapı arttıkça etki alanının arttığı görülmüştür. Bu nozul tiplerinde çap arttıkça aşındırıcı partiküller nozul çıkışından itibaren bir yayılma göstererek hedef malzeme yüzeyinde daha büyük bir etki alanı yaratmışlardır. Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V. grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile 60 mesh garnetin hedef malzeme yüzeyinde etki ettiği alanda değişimlerin gerçekleştiği belirlenmiştir. III. ve IV: grup nozullarda boğaz çapının 2 mm’den 3 mm’ye çıkması ile etki alanında artma meydana gelirken, 3 mm’den 4 mm’ye geçişte etki alanında azalma gerçekleşmiştir. V. grup nozullarda ise boğaz çapının artmasıyla hedef malzeme üzerindeki etki alanının arttığı

görülmüştür. Bütün nozullar içinde en fazla etki alanına K nozulu sahip olmuştur. En az etki alanı ise F nozulunda gözlemlenmiştir.



Şekil 5.33. 60 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerindeki etki alanı

Şekil 5.34’de, 15 farklı nozul geometrisiyle ve 60 mesh garnet aşındırıcı partikülüyle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası PMMA yüzeylerinde ortaya çıkan hasar bölgelerinin görüntü işleme tekniğiyle elde edilen dağılımları verilmiştir. Şekil 5.34 incelendiğinde F, G, J ve M tipi nozulların en küçük etki alanına sahip oldukları görülmüştür. Özellikle J nozulunda aşındırıcı partiküllerin yüzeye fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür. En geniş etki alanına ise D, H, K, L ve O tipi nozullarda rastlanmıştır. F, G, J ve M tipi nozulların dışındaki nozullarla püskürtme sonrası ise yüzeyde orta kısımda daha az aşınma olan bir dairesel bölge oluşurken, dairenin kenarlarında halka şeklinde daha derin aşınmanın olduğu bir bölge ortaya çıkmıştır. Nozul geometrisine bağlı olarak bu tip nozullarda orta kısımda aşındırıcı partiküllerin nozul içinde hızlanırken birbirleriyle fazla etkileşime girerek kinetik enerjilerini kaybettikleri ve merkezde daha az aşındırmaya sebep oldukları söylenebilir.

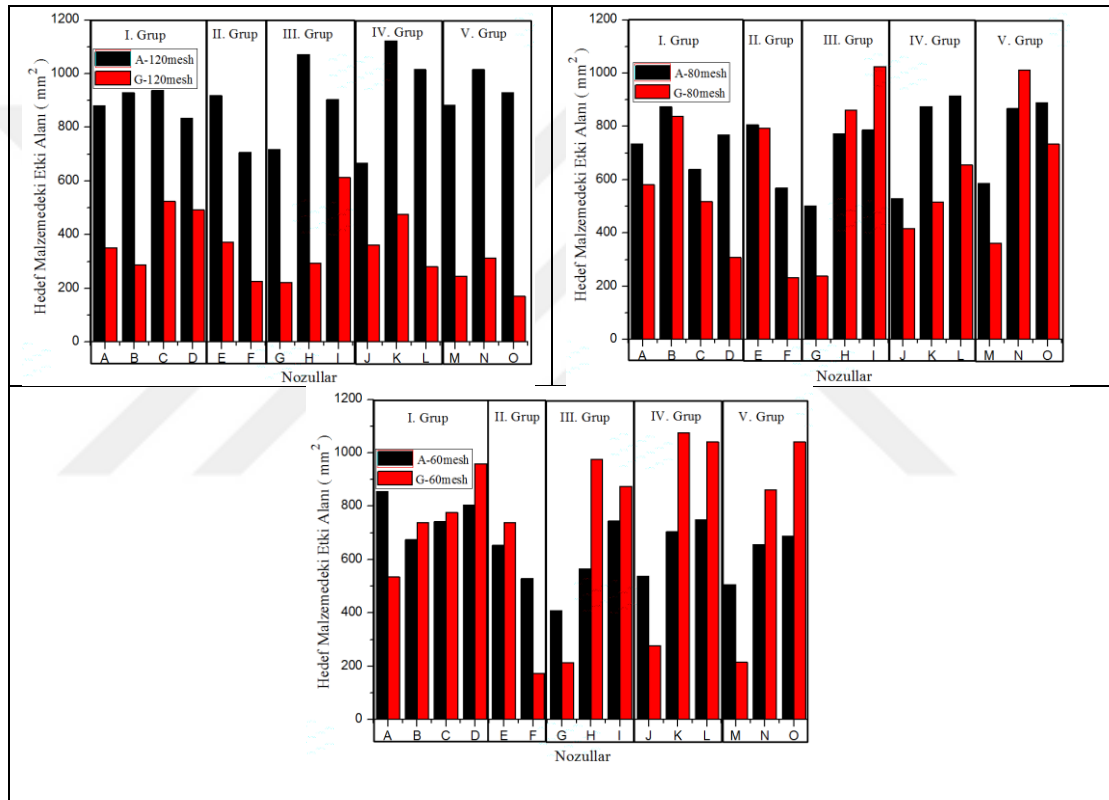


Şekil 5.34. 60 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımı

5.2.4.2. Partikül çeşidine göre hedef malzeme üzerindeki etki alanı

Bu çalışmada 15 farklı nozul geometrisinin 1,5 bar basınç altında ve nozul çıkışıyla hedef malzeme arasında 50 mm mesafese durumunda, partikül boyutuna ve partikül çeşidine göre PMMA yüzeyi üzerindeki etki alanları incelenmiş ve 15 farklı nozul geometrisiyle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası PMMA yüzeylerinde ortaya çıkan hasar bölgelerinin görüntü işleme tekniğiyle elde edilen dağılımları verilmiştir. Görüntü işleme basamakları uygulanmadan önce yüksek çözünürlükte yatay tarayıcıda numunelerin hasarlı bölgelerinin görüntüleri tarama yapılarak elde edilmiştir. Böylece aşındırıcı partiküllerin PMMA yüzeyinde oluşturdukları aşınma etkinliği ortaya konabilmiştir.

Şekil 5.35’de garnet ve alümina aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyindeki etki alanlarının karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 5.35’de 120 mesh aşındırıcı partikülleri incelendiğinde bariz bir şekilde alümina partiküllerinin garnet partiküllere göre hedef malzeme yüzeyinde daha etkin bir yüzey alanı oluşturduğu görülmektedir. 80 mesh ve 60 mesh aşındırıcı partiküllere baktığımızda dar çaplı nozullarda alümina partikülleri daha geniş bir etki alanı yaratırken, nozulların çapı arttıkça garnet partiküllerinin alümina partiküllerine göre daha geniş bir etki alanına sahip oldukları görülmektedir.

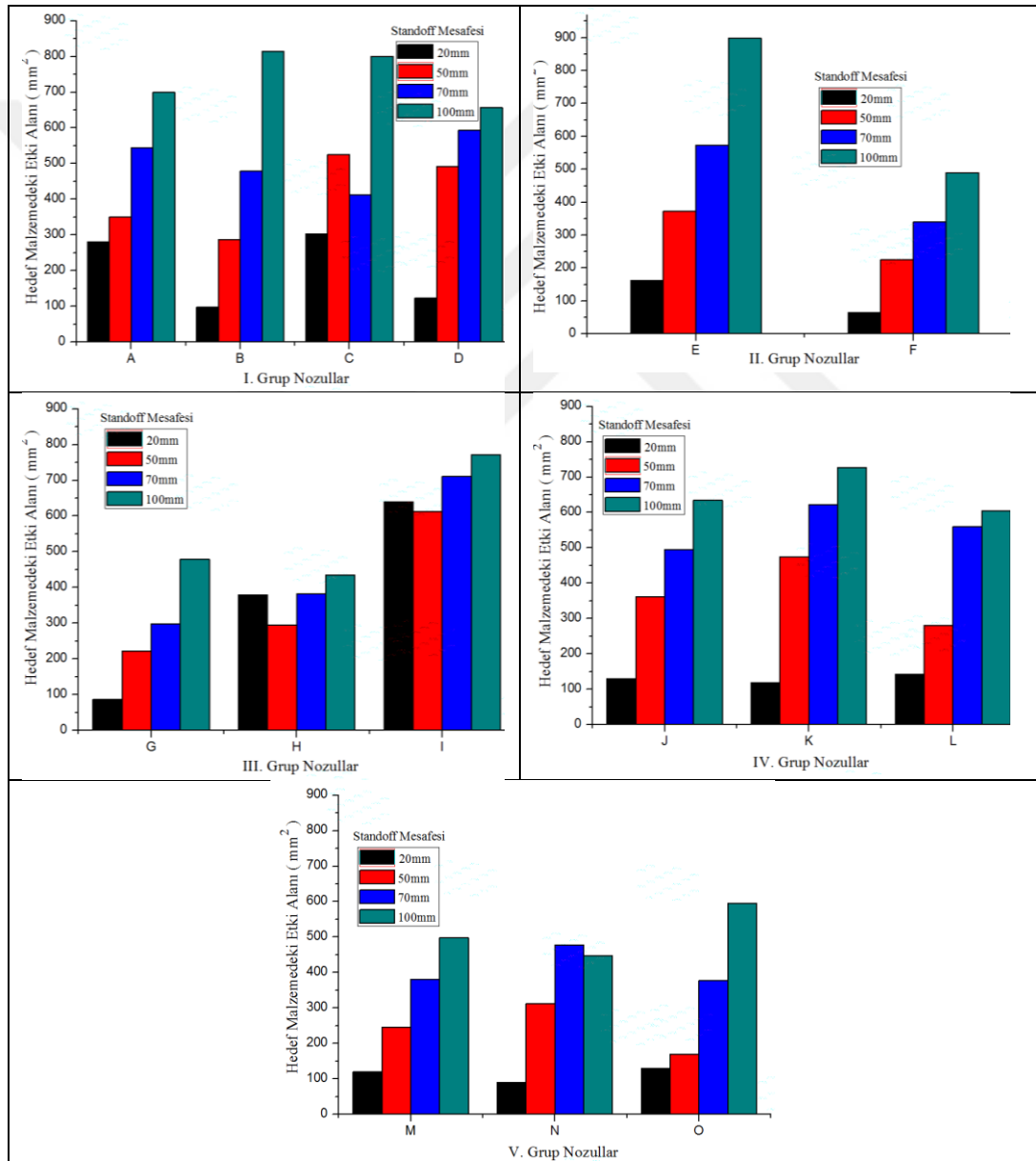


Şekil 5.35. Alümina ve garnet partiküllerinin farklı nozul geometrileriyle hedef malzeme üzerinde dağılımının karşılaştırması

5.2.4.3. Nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeye göre etki alanı

Bu çalışmada 15 farklı nozul geometrisinin 1,5 bar basınç altında 120 mesh alümina aşındırıcı partiküllerinin 20, 50, 70 ve 100 mm nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafelere göre PMMA yüzeyi üzerindeki etki alanları incelenmiş ve 15 farklı nozul geometrisiyle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası PMMA yüzeylerinde ortaya çıkan hasar bölgelerinin görüntü işleme tekniğiyle elde edilen dağılımları verilmiştir. Görüntü işleme basamakları uygulanmadan önce yüksek

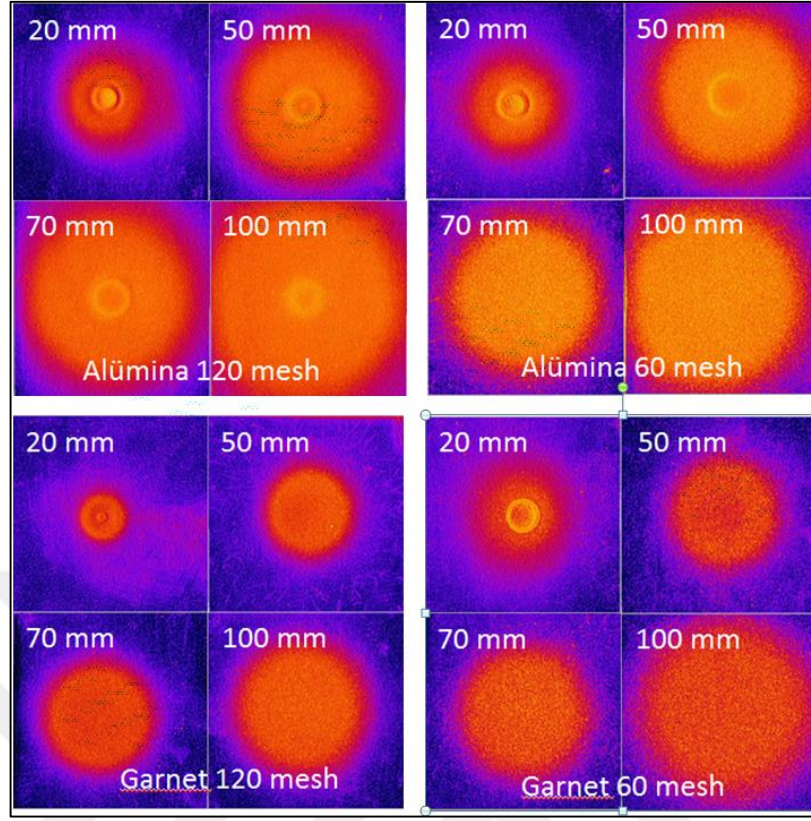
çözünürlükte yatay tarayıcıda numunelerin hasarlı bölgelerinin görüntüleri tarama yapılarak elde edilmiştir. Böylece aşındırıcı partiküllerin PMMA yüzeyinde oluşturdukları aşınma etkinliği ortaya konabilmiştir. Şekil 5.36 incelendiğinde nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafenin artmasıyla, hedef malzeme yüzeyindeki etki alanının da arttığı görülmüştür. 20 mm mesafe de I nozulu hariç diğer nozulların hedef malzeme yüzeyinde çok az bir etki yarattığı görülmektedir. 20 mm'den 100 mm'ye mesafeyi arttırdığımızda yaklaşık 10 kat daha fazla bir etki alanı oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.36. Farklı geometrili nozullarda püskürtme mesafesine göre etki alanlarının karşılaştırması

Şekil 5.37’de, 15 farklı nozul geometrisiyle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası PMMA yüzeylerinde ortaya çıkan hasar bölgelerinin görüntü işleme tekniğiyle elde edilen dağılımları verilmiştir. Görüntü işleme basamakları uygulanmadan önce yüksek çözünürlükte yatay tarayıcıda numunelerin hasarlı bölgelerinin görüntüleri tarama yapılarak elde edilmiştir. Hasar bölgesinin dağılımının net analizi için Image J programı kullanılmıştır. Böylece aşındırıcı partiküllerin PMMA yüzeyinde oluşturdukları aşınma etkinliği ortaya konabilmiştir. Hiç aşınmaya uğramamış bölgeler mor renkli, az aşınmış bölgeler kırmızı renkli ve en çok aşınmanın olduğu bölgeler turuncu renkli spektrumla görülmektedir.

Şekil 5.37’de farklı boyutlardaki aşındırıcı partiküllerin nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafenin değişiminin farklı nozul geometrileriyle yapılan deneyler sonrası aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Bu aşındırıcı partikülle yapılan deneyde nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafenin artmasıyla hedef malzeme yüzeyinde geniş bir alanda aşınma izinin etkili olduğu gözlemlenmiştir. 20 mm mesafeden nozullarla püskürtme sonrası yüzeyde orta kısımda daha az aşınma olan bir dairesel bölge oluşurken, dairenin kenarlarında halka şeklinde daha derin aşınmanın olduğu bir bölge ortaya çıkmıştır. Nozul geometrisine bağlı olarak bu tip nozullarda orta kısımda aşındırıcı partiküllerin nozul içinde hızlanırken birbirleriyle fazla etkileşime girerek kinetik enerjilerini kaybettikleri ve merkezde daha az aşındırmaya sebep oldukları söylenebilir. Mesafe arttıkça bu izin ortadan kalkarak hedef malzeme yüzeyinde daha homojen bir aşınma izinin olduğu görülmüştür.



Şekil 5.37. Farklı partiküllerin püskürtme mesafesine göre hedef malzeme üzerindeki etki alanı görüntüsü

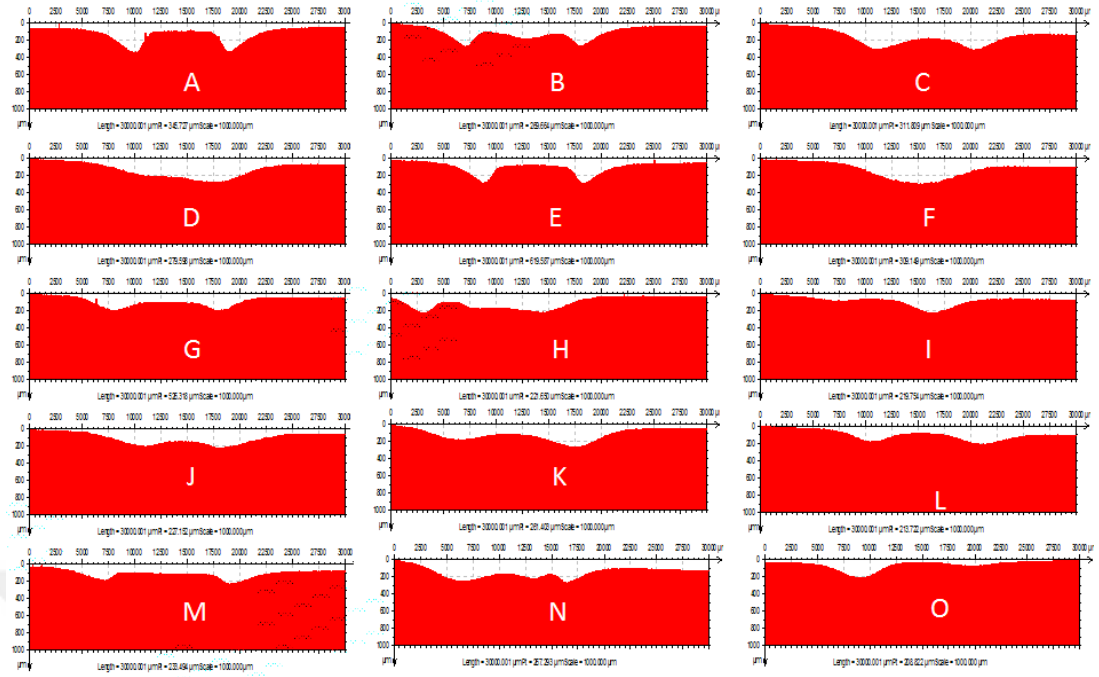
5.2.5. Farklı nozul geometrileriyle erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülük analizleri

Erozif aşınma testleri sonrası hedef malzemede ortaya çıkan en önemli hasarların başında yüzey pürüzlülük oluşumu ve topografya değişimi gelmektedir. Aşındırıcı partiküller hedef malzeme yüzeyine çarptıklarında kinetik enerjileri hedef malzeme tarafından sönmülenererek, hedef malzemeden parça kopmasına bağlı kütle kaybına sebep olabilmektedir. Diğer taraftan aşındırıcı partiküllerin hedef malzemede ortaya çıkardığı bir başka hasar da yüzey pürüzlülüğünde artış ve topografyasında değişimdir. Mikro-sürme gibi hasar mekanizmaları hedef malzeme yüzeyinde derin oluklar şeklinde plastik deformasyona bağlı yüzey olukları oluşturarak topografyanın bozulmasına sebep olmaktadır. Tüm bu gerçekler ışığında, erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülük değerlerinin ve topografyasının nasıl değiştiğinin analizinin yapılması önem arz etmektedir. Bu yüzden, PMMA hedef malzemeyle 15 farklı tip nozul geometrisi kullanılarak yapılan erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülük ve topografya analizi temassız lazer profilometre ile gerçekleştirilerek karşılaştırmalı

sonuçlar verilmiştir. Eroziyon aşınma sonrası pürüzlölük taramaları aşınma kraterinin tam orta noktasından alınarak ortaya çıkan kraterin nüfuziyet ve hasar derinliği ortaya konulmaya çalışılmıştır.

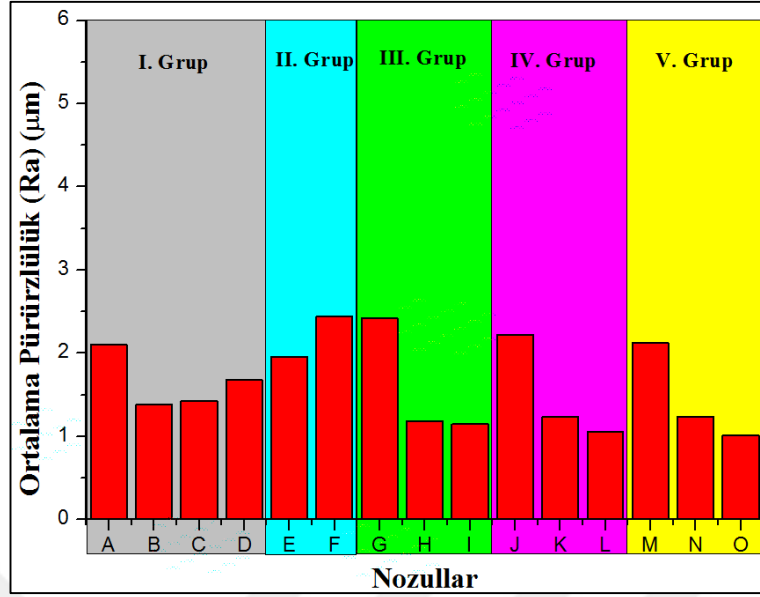
5.2.5.1. Partiköl boyutuna göre hedef malzeme üzerinde yüzey pürüzlölük analizleri

şekil 5.38’de açık şekilde görüldüğü gibi, diğer test parametreleri sabit tutulup sadece nozulların geometrileri değiştirildiğinde aşındırıcı partiköllerin hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkardıkları krater geometrileri çok farklı olmaktadır. 120 mesh alümina ile yapılan eroziyon aşınma deneyleri sonucunda 15 nozulun neredeyse tamamı, yüzey topografyasını yüksek miktarda hasara uğratarak yüzeyde derin hasar vadilerinin oluşmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. A, B ve E tipi nozullarda tam merkezde yüksek bir tepe şeklinde az hasara uğramış bölge görölürken bu tepenin etrafında daha derin şekilde hasar vadisinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi bu tip nozullarda nozul içi geometrisine bağlı olarak aşındırıcı partiköllerin hızının merkezde düşerken, halka şeklinde bir akış bölgesinde aşındırıcı partiköllerin hızının çok yükselmesidir. Nozul geometrilerinin hedef malzeme yüzeyinde meydana getirdiği hasara baktığımızda nozul çapı arttıķa yüzeyde oluşturduğu hasar derinliğinin azaldığı görölmüştür.



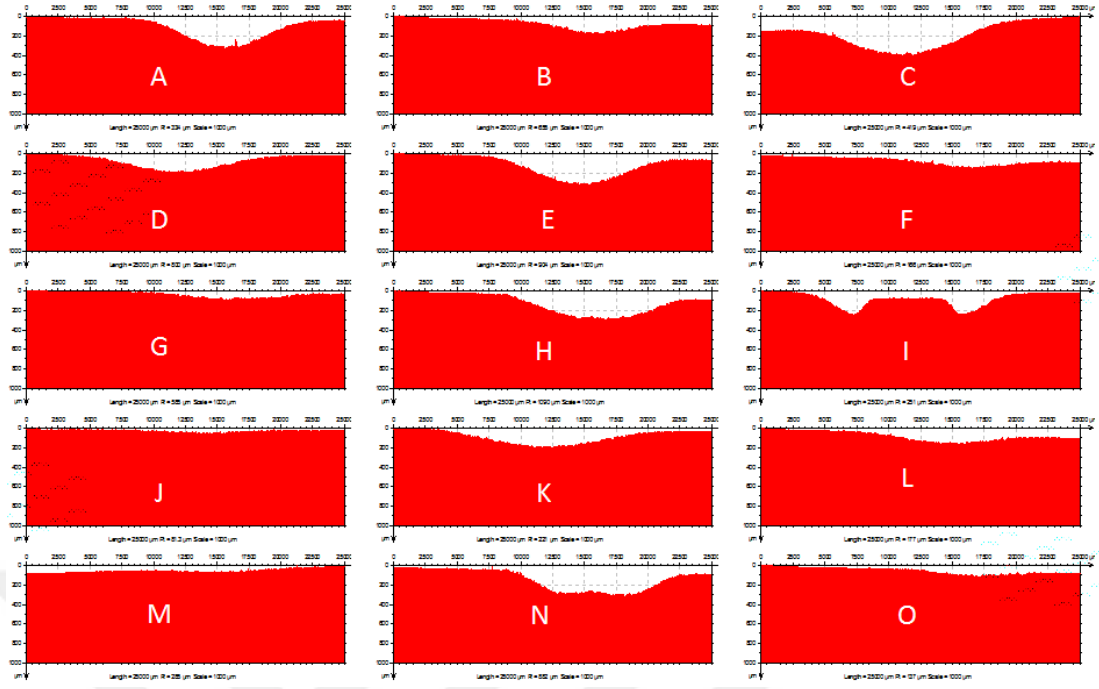
Şekil 5.38. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili

Şekil 5.39’da PMMA numunelerle gerçekleştirilen eroziv aşınma testleri sonrası lazer profilometre ile elde edilen ortalama pürüzlülük değerlerinin (R_a) karşılaştırması verilmiştir. Şekil 5.39 incelendiğinde özellikle nozulun iç yapısında boğaz bulunan nozulların en büyük çapa sahip olanlarında R_a değerinin minimum seviyede oldukları gözlemlenmiştir. Buradan yüzey pürüzlülük değerinin çok artmadan kumlama işlemi yapılması gerektiğinde tam orta noktada daralan boğaza sahip ventüri tip nozulların uygun olduğu görülmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülük değerleri A ve E tipi en dar nozul çıkış çapında olanlarla, G, J ve M tipi en küçük boğaz çapına sahip nozullarla püskürtme sonrası malzeme yüzeyinde ortaya çıkmıştır.



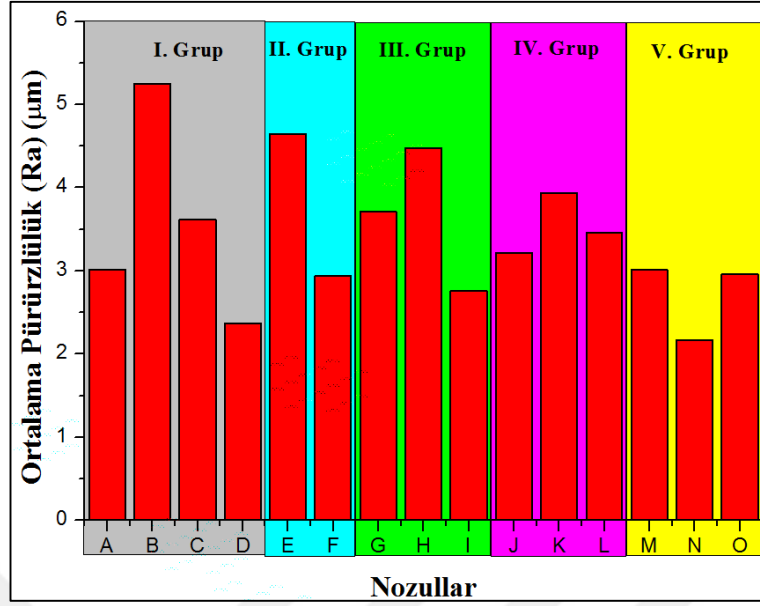
Şekil 5.39. 120 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.40'da nozul geometrileri değiştirildiğinde 120 mesh garnet aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkardıkları krater geometrileri verilmiştir. Bu krater geometrilerini incelediğimizde, I grup nozullar içinde A ve C nozullarında derin bir vadi olduğu görülürken, B ve D nozullarının az hasara uğradığı görülmüştür. II. grup nozullarda nozul çıkış çapının azalmasıyla yüzeyde oluşan derin hasar vadisinin azaldığı, Boğazlı tip olan III., IV. ve V. grup nozullarda da aynı şekilde boğaz çapı azaldıkça yüzeyde oluşturduğu hasar derinliğinin azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak nozulun çapı azaldıkça daralan yerden geçen partikülün debisi azalarak hedef malzeme yüzeyinde az hasar bıraktığını söyleyebiliriz. Nozul geometrilerinin hedef malzeme yüzeyinde meydana getirdiği hasara baktığımızda I tipi nozulun tam merkezinde yüksek bir tepe şeklinde az hasara uğramış bölge görülürken bu tepenin etrafında daha derin şekilde hasar vadisinin olduğu gözlemlenmiştir.



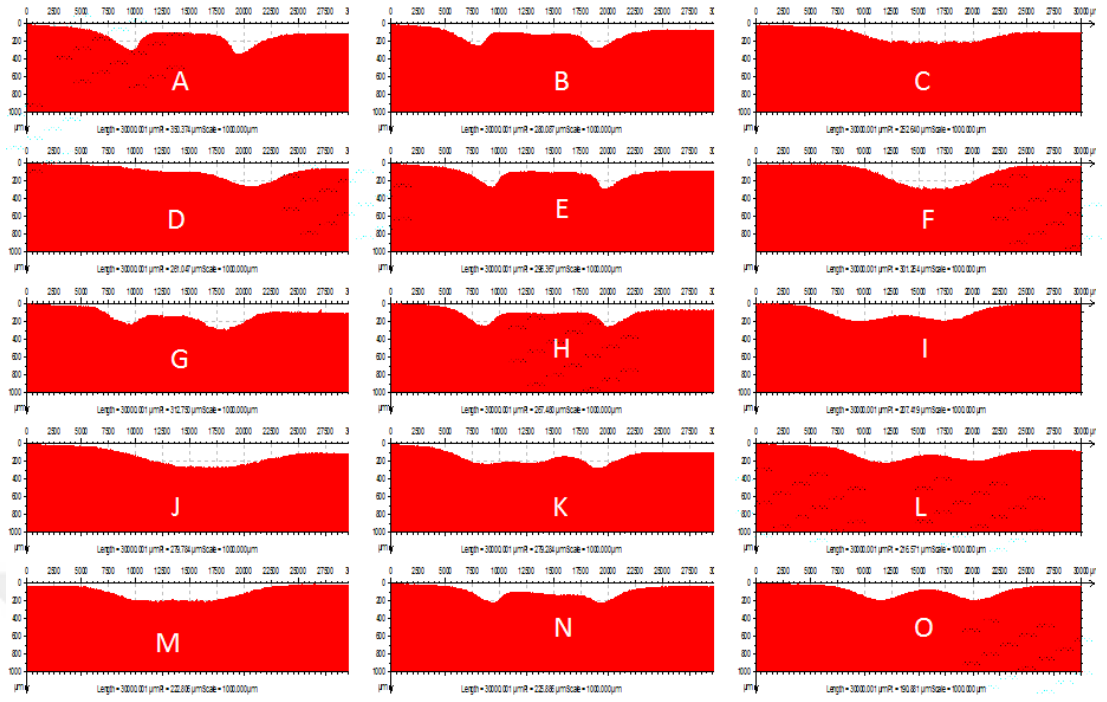
Şekil 5.40. 120 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili

Şekil 5.41’de farklı nozul geometrilerinde 120 mesh garnet aşındırıcılar ile gerçekleştirilen eroziv aşınma testleri sonrası lazer profilometre ile elde edilen R_a değerlerinin karşılaştırması verilmiştir. Şekil 5.41 incelendiğinde I. grup nozullar içinde B nozulunda en fazla ortalama yüzey pürüzlülük değeri görülmüştür. II.grup nozullarda çap arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü de artmıştır. Boğazlı nozul tasarımlarında ise boğazın nozul içindeki yerine göre farklılıklar göstermiştir. III. ve IV. grup nozullarda boğaz çapının 2 mm’den 3 mm’ye çıkması ile ortalama yüzey pürüzlülüğünde artma meydana gelirken, 3 mm’den 4 mm’ye geçişte ortalama yüzey pürüzlülüğünde azalma gerçekleşmektedir. V. grup nozullarda ise boğaz çapının 2 mm ile 4 mm olan tiplerinde ortalama yüzey pürüzlülüğü aynı görülürken, 3 mm boğaz çapında azalma görülmüştür. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri B tipi nozulla püskürtme sonrası malzeme yüzeyinde ortaya çıkmıştır. Bu nozul tipiyle boyama ve yapıştırma işlemleri öncesinde yüzey hazırlamada kullanılabilir.



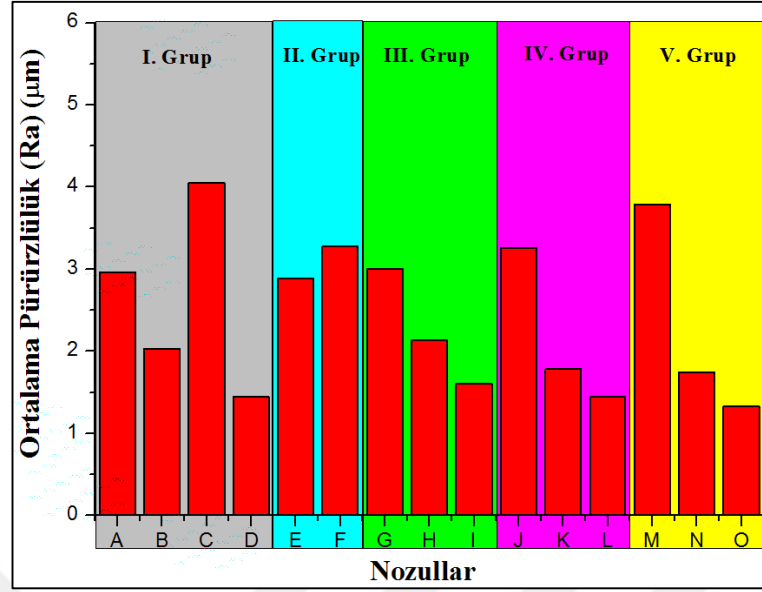
Şekil 5.41. 120 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.42’de açık şekilde görüldüğü gibi, diğer test parametreleri sabit tutulup sadece nozulların geometrileri değiştirildiğinde aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkardıkları krater geometrileri çok farklı olmaktadır. 80 mesh alümina ile yapılan erozif aşınma deneyleri sonucunda 15 nozulun neredeyse tamamı, yüzey topografyasını yüksek miktarda hasara uğratarak yüzeyde derin hasar vadilerinin oluşmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. C, F, J ve M nozullarından çıkan partiküller hedef malzeme yüzeyinin merkezinde derin vadiler oluştururken diğer nozullarda tam merkezde yüksek bir tepe şeklinde az hasara uğramış bölge görülürken bu tepenin etrafında daha derin şekilde hasar vadisinin olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.42. 80 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili

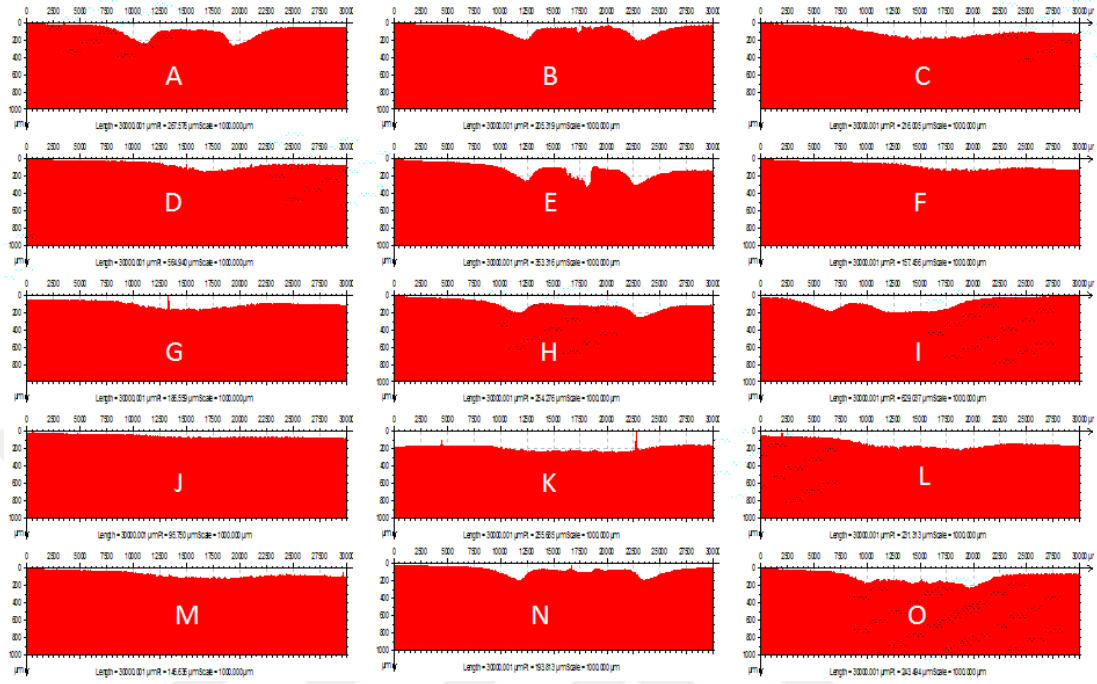
Şekil 5.43’de PMMA numunelerle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası lazer profilometre ile elde edilen R_a değerlerinin karşılaştırması verilmiştir. Şekil 5.43 incelendiğinde özellikle nozulun iç yapısında boğaz bulunan nozulların en küçük çapa sahip olanlarında R_a değerinin yüksek seviyede oldukları gözlemlenmiştir. Boğazlı tasarımlarda (III., IV ve V.grup) boğaz çapının ve boğaz yerinin değişmesi ile 80 mesh alüminanın hedef malzeme yüzeyinde ortalama yüzey pürüzlülüğünde değişimlerin gerçekleştiği belirlenmiştir. Boğaz çapının artmasıyla ortalama yüzey pürüzlülüğünde artma meydana gelmiştir. Bu durum 3 grup tasarım içinde de gözlemlenmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri C tipi nozulla püskürtme sonrası malzeme yüzeyinde ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.43. 80 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması

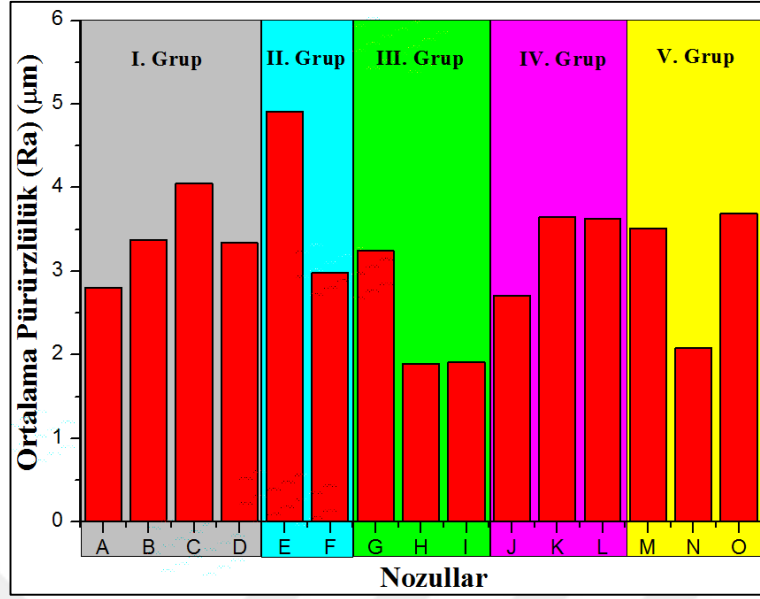
PMMA hedef malzemeyle 15 farklı tip nozul geometrisi kullanılarak yapılan erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülük ve topografya analizi temassız lazer profilometre ile gerçekleştirilerek karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.44’de verilmiştir. Erozif aşınma sonrası pürüzlülük taramaları aşınma kraterinin tam orta noktasından alınarak ortaya çıkan kraterin nüfuziyet ve hasar derinliği ortaya konulmaya çalışılmıştır. Şekil 5.44’de açık şekilde görüldüğü gibi, diğer test parametreleri sabit tutulup sadece nozulların geometrileri değiştirildiğinde aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkardıkları krater geometrileri çok farklı olmaktadır. Yüzey topografyasını yüksek miktarda hasara uğratarak yüzeyde derin hasar vadilerinin oluşması E, A ve I kodlu nozullarda gözlemlenmiştir. Özellikle E ve A tipi geometrili nozullarda aşındırıcı partiküllerin nozul içinde hızlanma sonrası birkaç farklı akış bölgesi oluşturarak farklı geometrilerde hasar vadileri oluşturduğu tespit edilmiştir. Nozul içinde farklı akış bölgelerinin oluşması nozul iç geometrileriyle birebir bağlantılıdır. Diğer taraftan F, G, J ve M tipi nozullarda aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme PMMA yüzeyine homojene yakın bir dağılımla çarparak yüzey topografyasında çok az değişime sebep oldukları görülmüştür. A, B, H ve N tipi nozullarda tam merkezde yüksek bir tepe şeklinde az hasara uğramış bölge görülürken bu tepenin etrafında daha derin şekilde hasar vadisinin olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi bu tip nozullarda nozul içi geometrisine bağlı olarak

aşındırıcı partiküllerin hızının merkezde düşerken, halka şeklinde bir akış bölgesinde aşındırıcı partiküllerin hızının çok yükselmesidir.



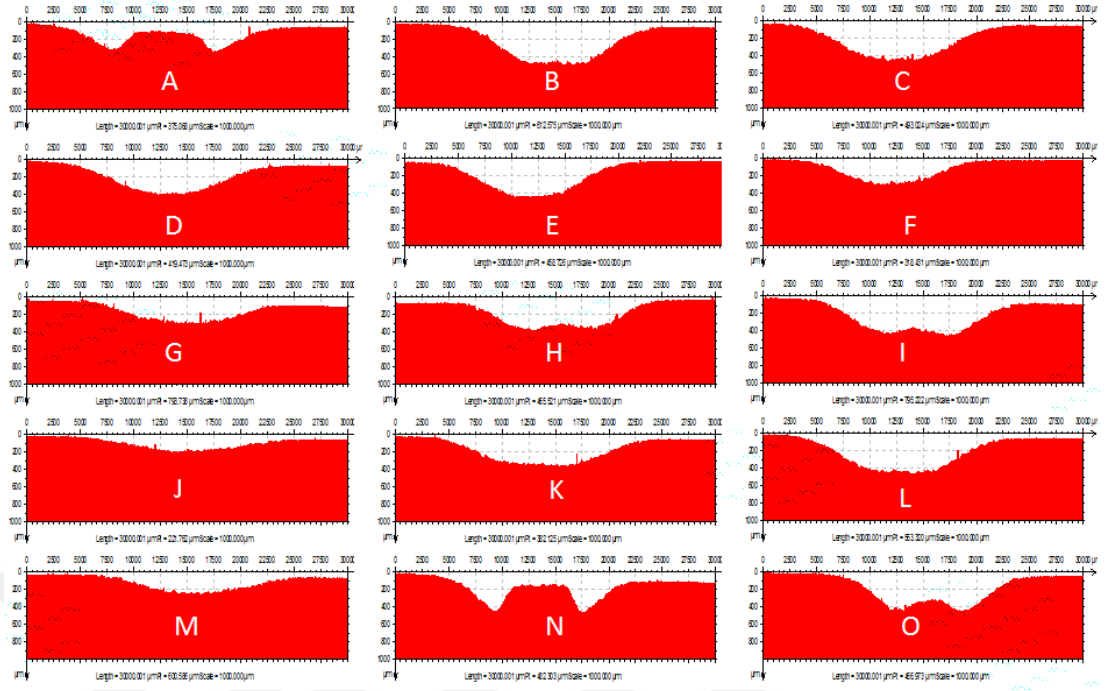
Şekil 5.44. 80 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili

Şekil 5.45’de PMMA numunelerle gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası lazer profilometre ile elde edilen ortalama pürüzlülük değerlerinin karşılaştırması verilmiştir. Şekil 5.45 incelendiğinde H ve I tipi nozullarda R_a değerinin diğer nozul tipleriyle karşılaştırıldığında minimum seviyede oldukları gözlemlenmiştir. Buradan yüzey pürüzlülük değerinin çok artmadan kumlama işlemi yapılması gerektiğinde tam orta noktada daralan boğaza sahip ventüri tip nozulların uygun olduğu görülmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri E tipi nozulla püskürtme sonrası malzeme yüzeyinde ortaya çıkmıştır. E tipi nozulun Şekil 5.44’de verilen yüzey topografya kesiti de maksimum pürüzlülük değeri ile örtüşmektedir.

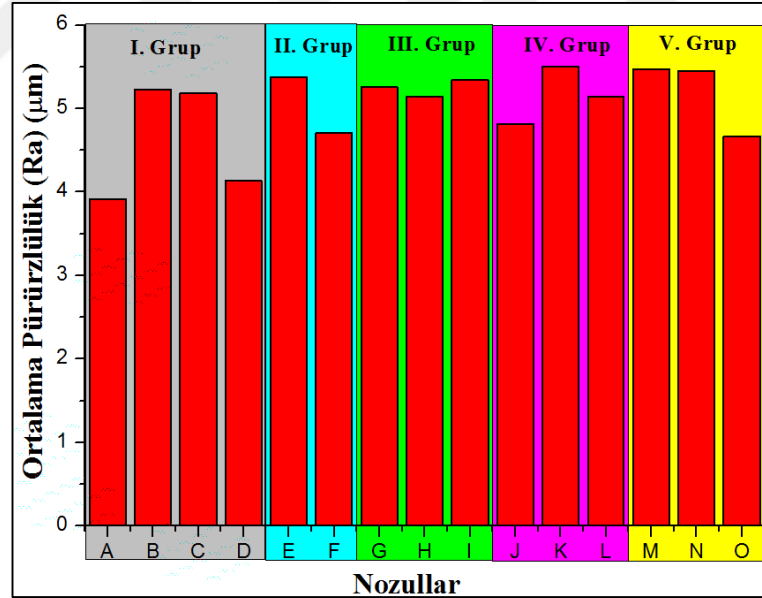


Şekil 5.45. 80 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.46'da açık şekilde görüldüğü gibi, diğer test parametreleri sabit tutulup sadece nozulların geometrileri değiştirildiğinde aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkardıkları krater geometrileri çok farklı olmaktadır. 80 mesh alümina ile yapılan erozif aşınma deneyleri sonucunda 15 nozulun neredeyse tamamı, yüzey topografyasını yüksek miktarda hasara uğratarak yüzeyde derin hasar vadilerinin oluşmasına sebep olduğu gözlemlenmiştir. A ve N tipi nozullarda tam merkezde yüksek bir tepe şeklinde az hasara uğramış bölge görülürken bu tepenin etrafında daha derin şekilde hasar vadisinin olduğu gözlemlenmiştir. I. grup nozul tiplerinde nozul çıkış çapı arttıkça derin hasar vadilerinin azaldığı görülürken diğer gruptaki nozullarda çap arttıkça daha derin vadilerin olduğu görülmüştür.



Şekil 5.46. 60 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili

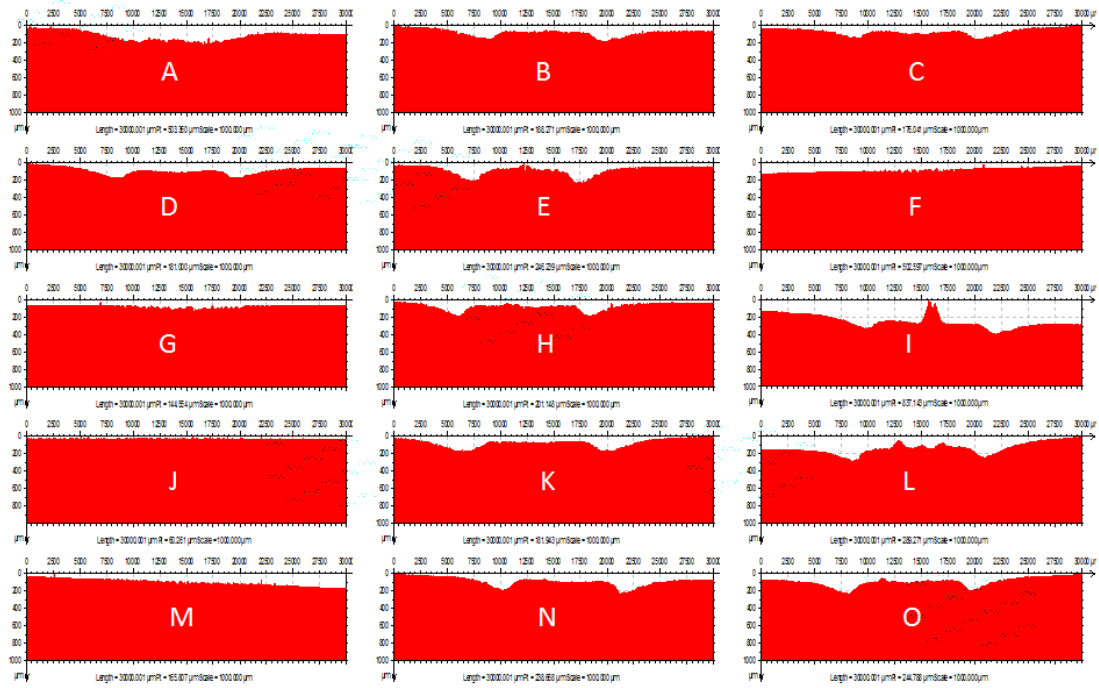


Şekil 5.47. 60 meshlik alüminanın farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.47’de farklı nozul geometrilerinde 60 mesh alümina aşındırıcılar ile gerçekleştirilen eroziv aşınma testleri sonrası lazer profilometre ile elde edilen R_a değerlerinin karşılaştırması verilmiştir. Bütün nozul geometrilerine baktığımızda

neredeyse tamamında ortalama yüzey pürüzlülük değerleri çok yüksek çıkarken birbirlerine de yakın değerlerde oluşmuştur.

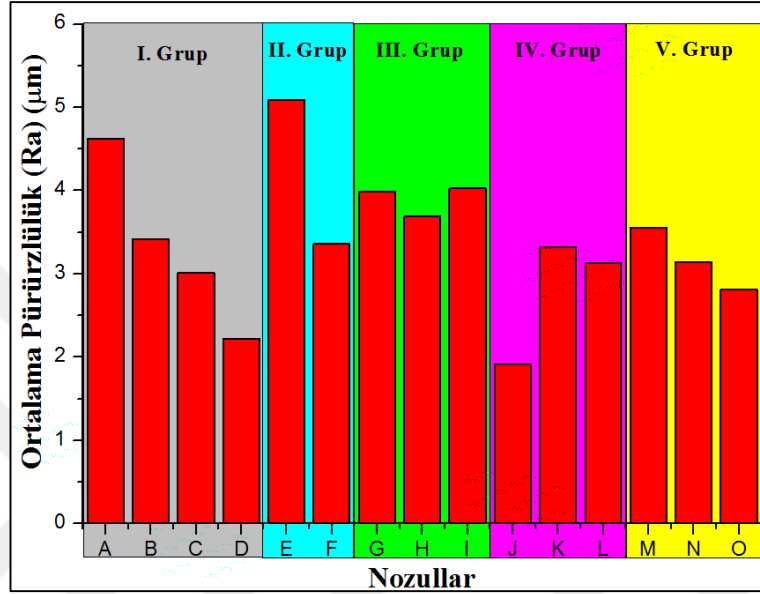
Şekil 5.48’de nozul geometrileri değiştirildiğinde 60 mesh garnet aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkardıkları krater geometrileri verilmiştir. Bu krater geometrilerini incelediğimizde, neredeyse bütün nozullarda yüzeyde çok fazla bir hasar meydana gelmediği görülmüştür. Nozul geometrilerinin hedef malzeme yüzeyinde meydana getirdiği hasara baktığımızda I tipi nozulda aşındırıcı partiküllerin nozul içinde hızlanma sonrası birkaç farklı akış bölgesi oluşturarak farklı geometrilerde hasar vadileri oluşturduğu tespit edilmiştir. Genel olarak nozul geometrilerinin çapları küçüldükçe yüzey oluşturduğu hasarların azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.48. 60 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki pürüzlülük profili

Şekil 5.49’da farklı nozul geometrilerinde 60 mesh garnet aşındırıcılar ile gerçekleştirilen erozif aşınma testleri sonrası lazer profilometre ile elde edilen R_a değerlerinin karşılaştırması verilmiştir. I. grup nozullarda nozul çıkış çapı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülük değeri azalma gösterirken II.grup nozullarda çap arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü artmıştır. Boğazlı nozul tasarımlarında ise boğazın nozul içindeki yerine göre farklılıklar göstermiştir. Boğaz yerinin nozulun ortasında olan

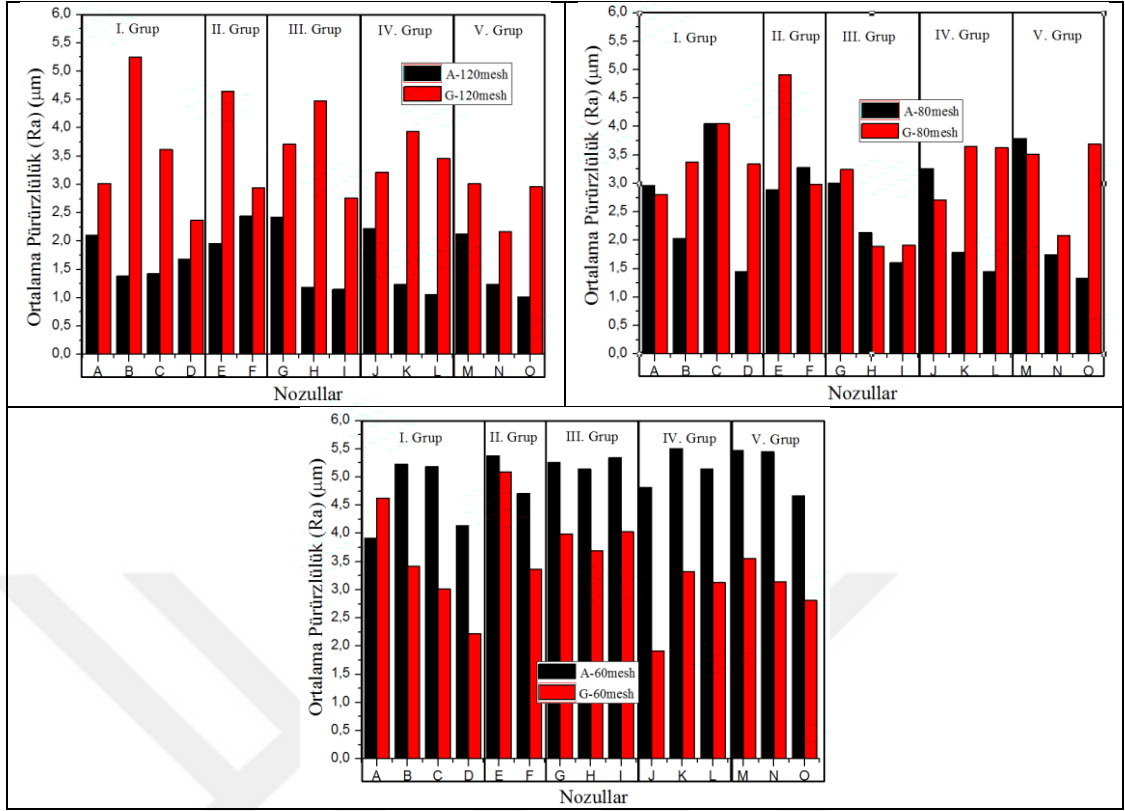
III. grup nozullarda ortalama yüzey pürüzlülüğünde değişim göstermemiştir. IV: grup nozullarda ise nozul çapı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğünde artma meydana gelirken, V. grup nozullarda ise boğaz çapı arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğünde azalma gerçekleşmektedir. En yüksek yüzey pürüzlülük değeri E tipi nozulla püskürtme sonrası malzeme yüzeyinde ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.49. 60 meshlik garnetin farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması

5.2.5.2. Partikül çeşidine göre hedef malzeme üzerindeki yüzey pürüzlülük analizi

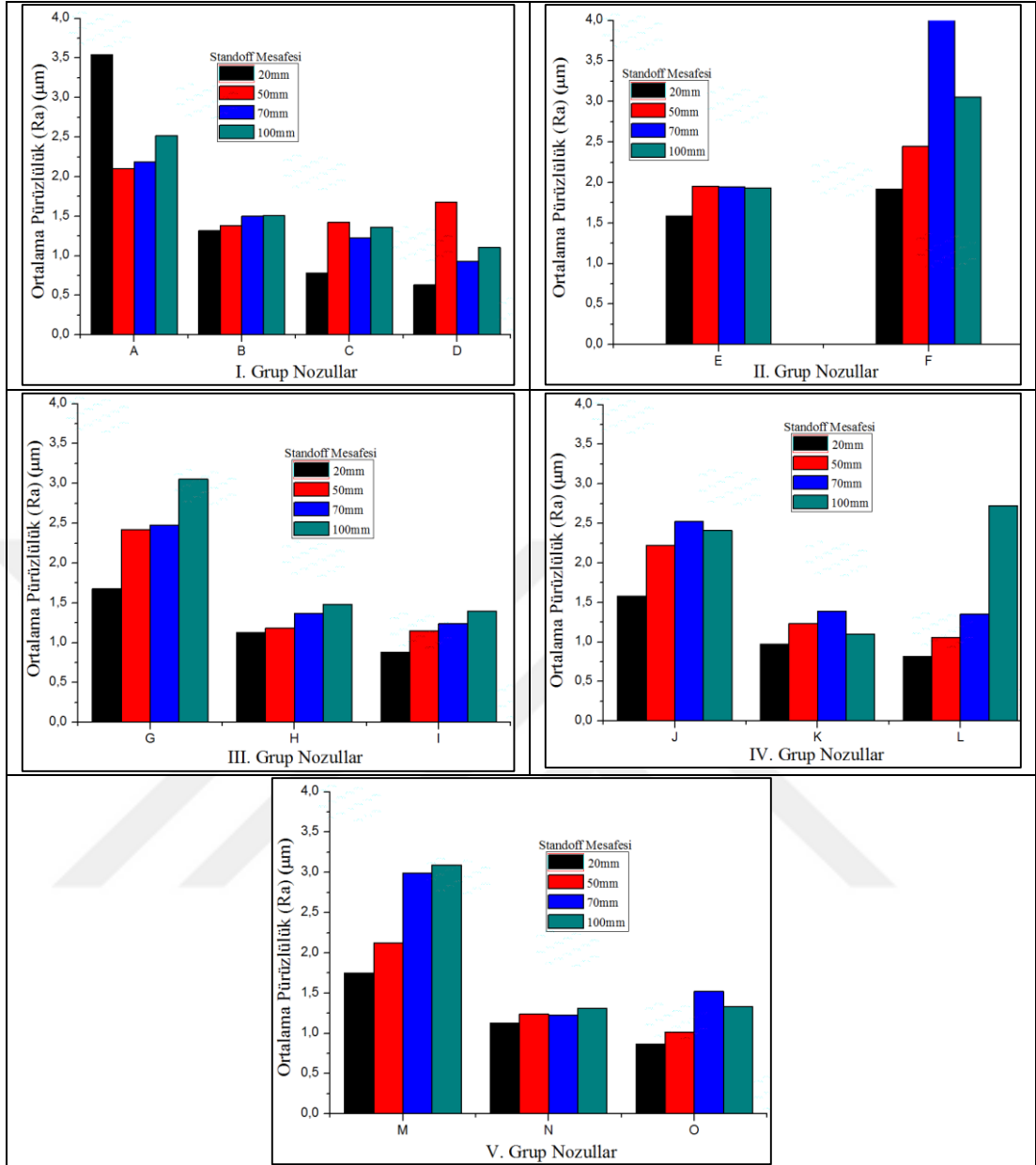
PMMA hedef malzemeyle 15 farklı tip nozul geometrisi ve farklı boyutlarda alümina ve garnet aşındırıcı partikülleri kullanılarak yapılan erozif aşınma testleri sonrası R_a değerlerinin karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 5.50’de verilmiştir. Şekil 5.50 incelendiğinde aşındırıcı partiküllerin boyutlarını değiştirildiğinde hedef malzeme yüzeyinde ortaya çıkardıkları ortalama yüzey pürüzlülükleri çok farklı olmuştur. 120 mesh boyutlarındaki aşındırıcı partiküller kullanıldığında garnet partiküllerinin ortalama pürüzlülük değerlerinin alümina aşındırıcılara göre daha fazla çıktığı görülürken, partikül boyutları büyüdükçe alümina aşındırıcı partiküllerinin ortalama pürüzlülük değerleri garnet aşındırıcı partiküllerden daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 5.50. Alümina ve garnet aşındırıcılarının farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması

5.2.5.3. Nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeye göre yüzey pürüzlülük analizi

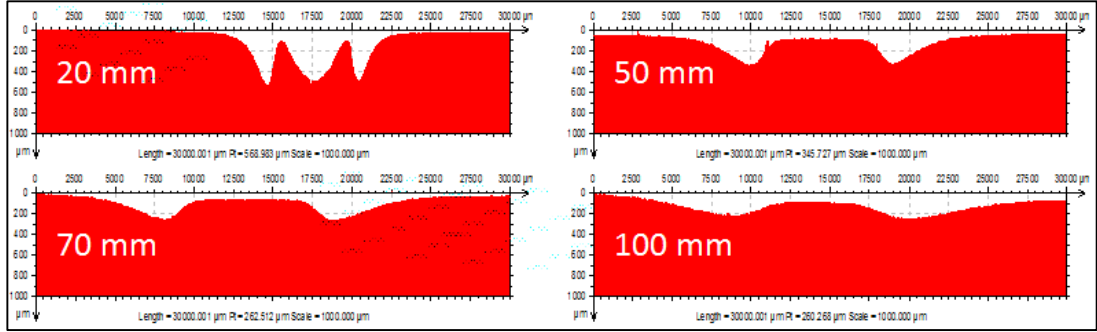
PMMA hedef malzemeyle 15 farklı tip nozul geometrisi kullanılarak ve nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeyi değiştirerek yapılan eroziv aşınma testleri sonrası R_a değerlerinin karşılaştırmalı sonuçları Şekil 5.51’de verilmiştir. Bütün nozul geometrilerinde genelde nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafe arttıkça ortalama pürüzlülük değerinin arttığı görülmüştür. Bu durumun partikül hızlarının mesafenin artmasıyla artış göstererek yüzeye daha hızlı çarpmasına bağlayabiliriz.



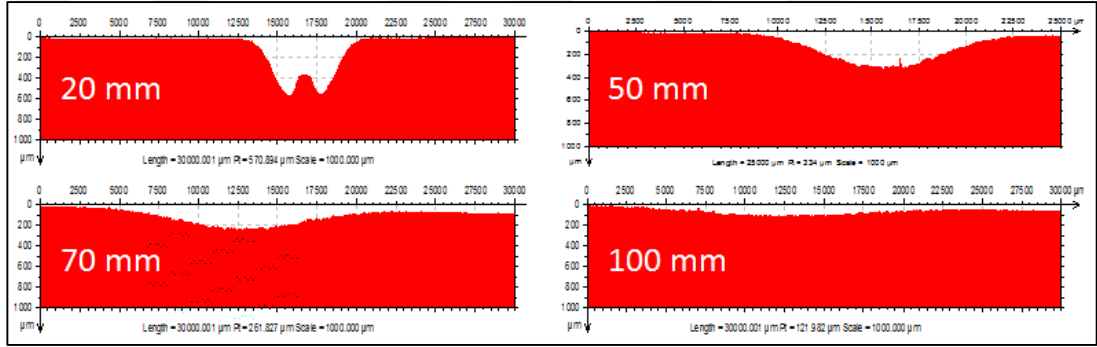
Şekil 5.51. Püskürtme mesafesi değişimine göre farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki Ra değerlerinin karşılaştırılması

PMMA hedef malzemeyle 15 farklı tip nozul geometrisi kullanılarak ve nozul çıkışıyla hedef malzeme arasındaki mesafeyi değiştirerek yapılan erozif aşınma testleri sonrası yüzey pürüzlülük ve topografya analizi temassız lazer profilometre ile gerçekleştirilerek karşılaştırmalı sonuçları farklı boyutlarda aşındırıcı partiküllerin etkisine göre Şekil 5.52-5.55 arasında verilmiştir. Erozif aşınma sonrası pürüzlülük taramaları aşınma kraterinin tam orta noktasından alınarak ortaya çıkan kraterin nüfuziyet ve hasar derinliği ortaya konulmaya çalışılmıştır. Bütün şekillerde açık şekilde görüldüğü gibi, nozul çıkış ile hedef malzeme arasındaki mesafe arttıkça

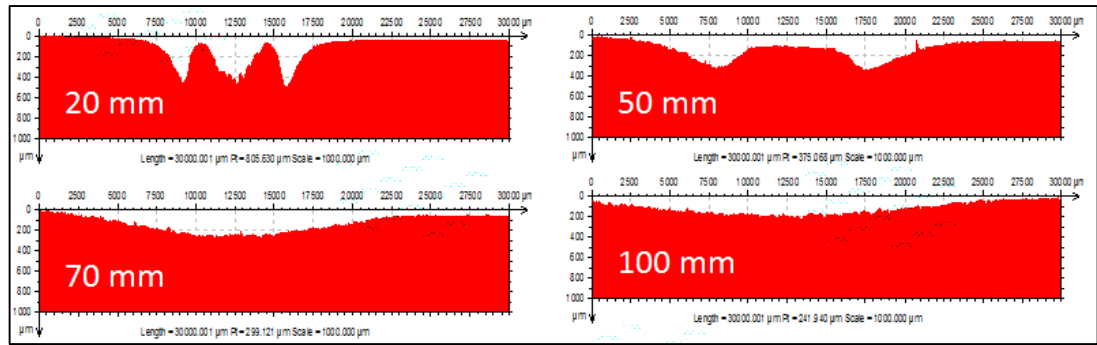
yüzeyde meydana gelen hasarın azaldığı görülmüştür. Özellikle 20 mm mesafede yüzey üzerinde çok derin hasar vadilerinin meydana geldiği görülmüştür.



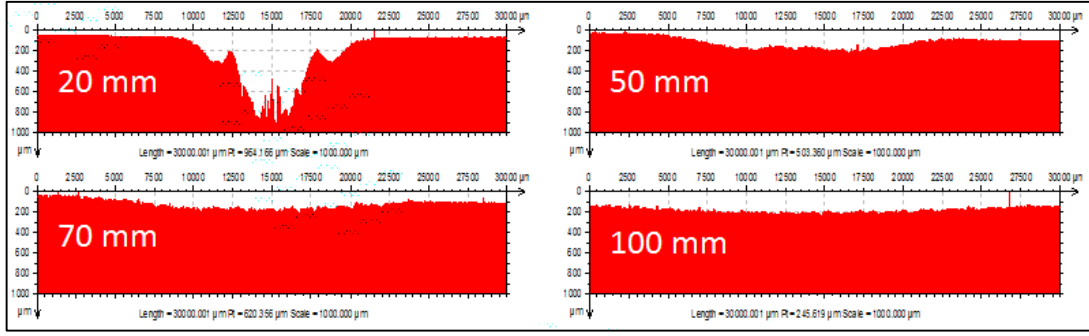
Şekil 5.52. 120 meshlik alüminada A nozulunun hedef malzemedeki pürüzlülük profili karşılaştırılması



Şekil 5.53. 120 meshlik garnette A nozulunun hedef malzemedeki pürüzlülük profili karşılaştırılması



Şekil 5.54. 60 meshlik alüminada A nozulunun hedef malzemedeki pürüzlülük profili karşılaştırılması

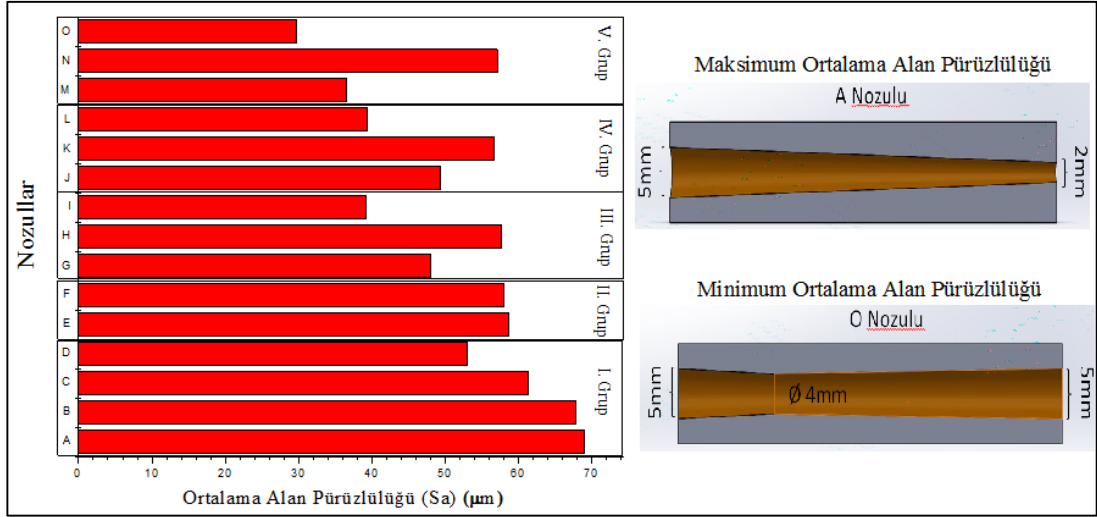


Şekil 5.55. 60 meshlik garnette A nozulunun hedef malzemedeki pürüzlülük profili karşılaştırılması

5.2.6. Farklı nozul geometrileriyle erozif aşınma testleri sonrası üç boyutlu yüzey topografyaları

Şekil 5.56’da farklı nozul tasarımları ile aşındırılan numunelerin ortalama alansal pürüzlülük değişimleri verilmiştir. Şekil incelendiğinde farklı nozul geometrilerinin hedef malzemenin ortalama alansal pürüzlülük değerleri üzerinde önemli bir rol oynadığı görülmüştür. En yüksek pürüzlülük değerleri nozul içerisinde boğaz içermeyen A, B ve C nozullarının kullanılması durumunda elde edilmiştir. Nozul çıkış çapının daraltılması ile ortalama pürüzlülük değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumun nozul çıkış çapının daralması ile aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyinde daha küçük bir alanda etkileşim içinde bulunmaları ve birim alana çok sayıda aşındırıcı partikülün tekrarlı bir şekilde çarpması ile daha derin vadilerin ve tepelerin oluşması ile açıklanabilir. Nozul çıkış çapının genişlemesi durumunda aşındırıcı partiküller büyük bir alana etki etmekte ve bu durum birim alana çarpan partikül miktarının azalmasına yol açmaktadır.

Nozul içerisinde boğaz bulunması durumunda düz ve konik nozul tiplerine göre pürüzlülük değerlerinin azaldığı ve bu azalmanın boğazın nozul içerisinde bulunduğu konuma bağlı olarak da değişim gösterdiği belirlenmiştir. Buna karşın nozul içerisinde boğaz bulunması durumunda 5 mm giriş çapı 3 mm boğaz çapı ve 5 mm çıkış çapı bulunan H, K ve N nozullarının diğer boğazlı nozullara kıyasla daha yüksek pürüzlülüğe neden oldukları sonucuna varılmıştır.

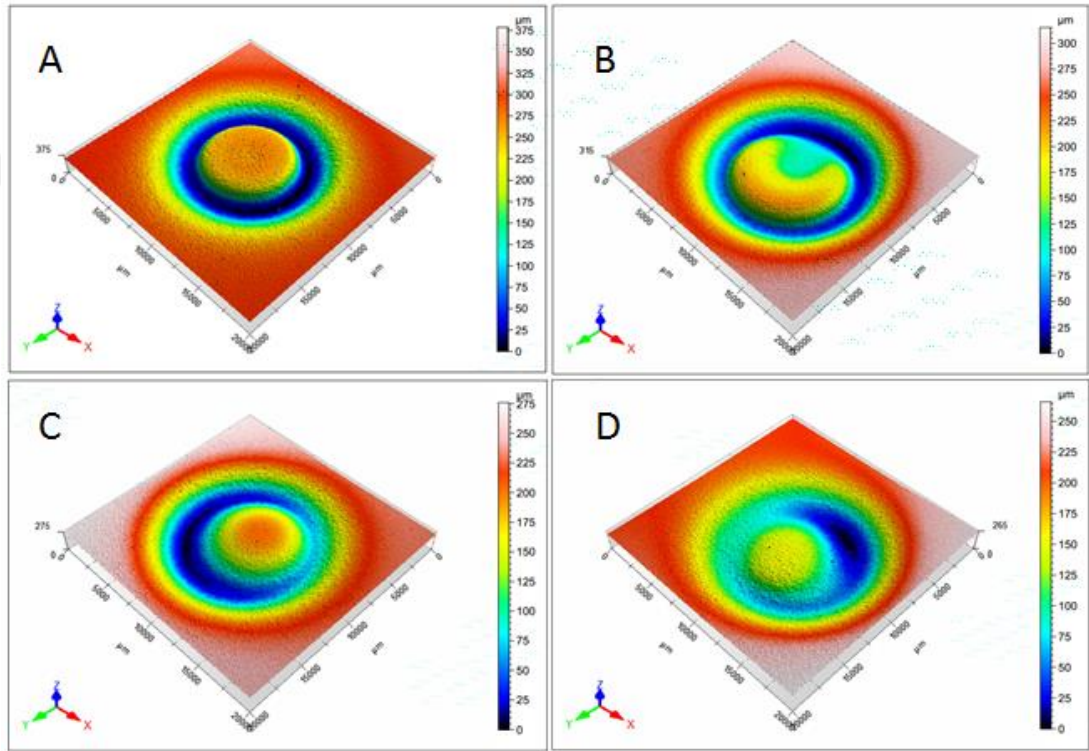


Şekil 5.56. Farklı nozul geometrileriyle hedef malzemedeki ortalama alan pürüzlülüğü (Sa) değerlerinin karşılaştırılması

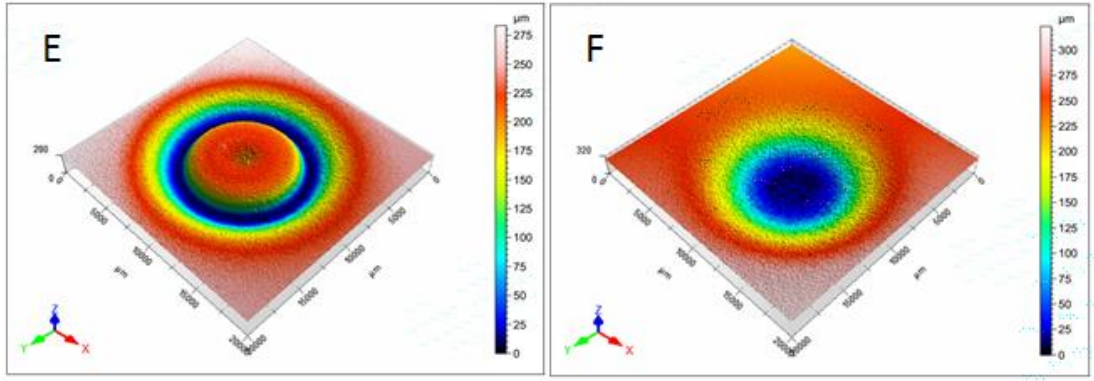
Şekil 5.57 ile Şekil 5.61 arasındaki şekillerde farklı nozullar kullanılarak pürüzlendirilen hedef malzemelerin 3 boyutlu yüzey topografyaları verilmiştir. Şekiller incelendiğinde nozul geometrisine bağlı olarak oluşan erozif aşınma izinin geometrisinin ve topografyasındaki değişim dikkat çekmektedir. Nozul çıkış çapının artışı ile erozif aşınma izinin kapladığı alanın arttığı A ve D nozullarının analiz sonuçları karşılaştırıldığında net bir şekilde görülmektedir. Bu durumun yüzey pürüzlülük sonuçlarında belirtildiği gibi nozul çıkış çapının artışı ile aşındırıcı partiküllerin nozul çıkışı sonrası saçılarak daha büyük bir alana çarpmaları ve aşınma gerçekleştirmeleri ile açıklanabilir.

Boğaz içermeyen ve dar bir nozul giriş ve çıkış çapına sahip olan F nozulunun meydana getirdiği aşınma izi diğer tüm nozullara göre farklılık göstermektedir. Diğer nozullar ile gerçekleştirilen kumlama işlemi sonrasında hedef malzeme yüzeyinde merkezde aşınmanın sınırlı olduğu ve bu sınırlı alanın etrafında halka şeklinde bir aşınma meydana geldiği görülmektedir. Bu durum nozul geometrisi nedeniyle hedef malzemenin tam merkezinde bir durma noktası meydana geldiği ve bu nedenle bu bölgeye çok az sayıda partikülün çarpması ile açıklanabilir. F nozulunda ise nozul tasarımına bağlı olarak bir durma noktasının oluşmadığı ve aşınmanın izin merkezinde maksimum miktarda gerçekleştiği görülmektedir. Bu durum aşındırıcı partiküllerin hedef malzeme yüzeyine daha düzenli bir şekilde yönlendirilerek tekrarlı bir şekilde belirli bir alana çarpması ile gerçekleştiğini göstermektedir. Bu durum

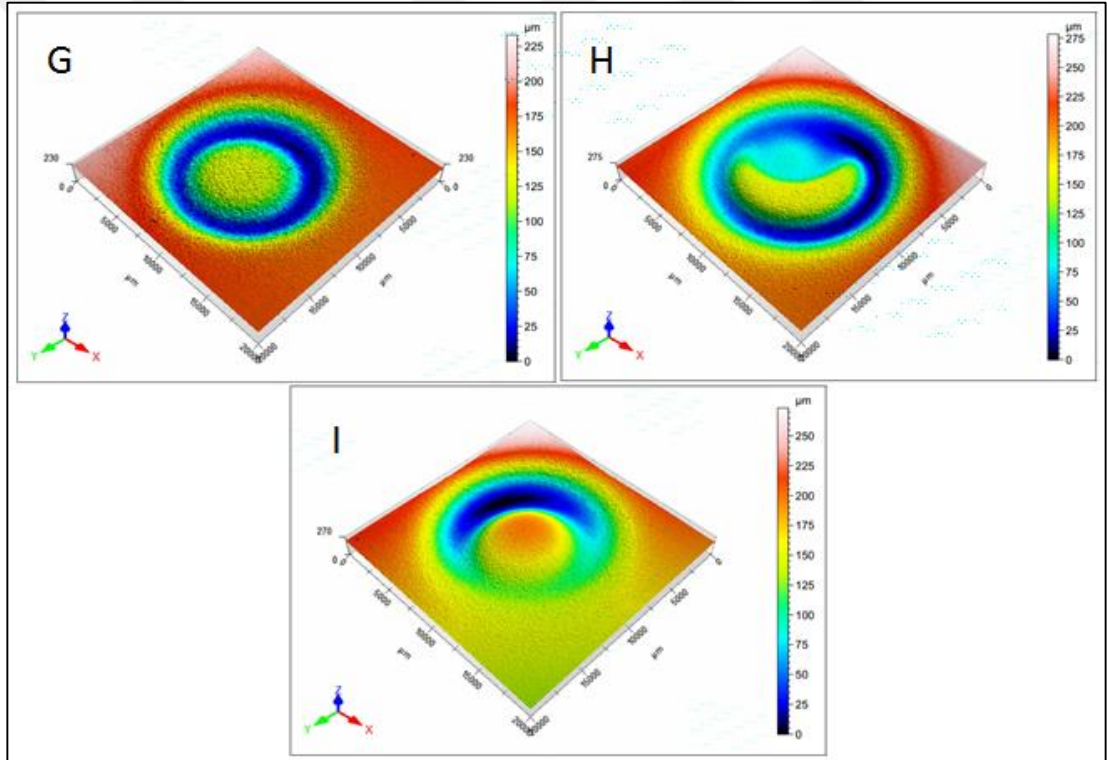
topografyanın yanında verilen derinlik cetveline bakılarak da doğrulanmaktadır. Yüzeyde oluşan erozif aşınma kraterinin derinliğinin $300\text{ }\mu\text{m}$ 'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Buna karşın nozul tasarımına boğaz eklenmesi ile oluşan iz derinliği düşmüştür. M nozulu için maksimum iz derinliği yaklaşık olarak $190\text{ }\mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Bu değişim nozul tasarımının yüzeyde meydana gelen erozif aşınma kraterinin büyüklüğünü, geometrisini ve derinliğini büyük ölçüde değiştirdiğini ortaya çıkarmaktadır.



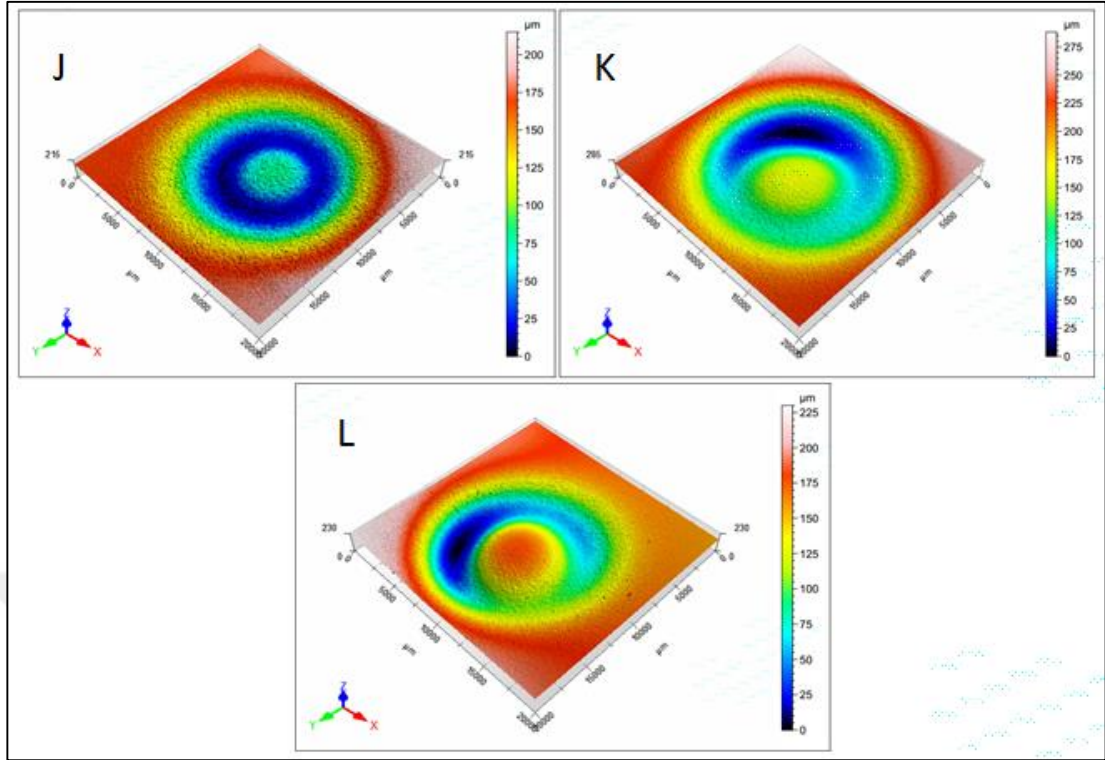
Şekil 5.57. I. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları



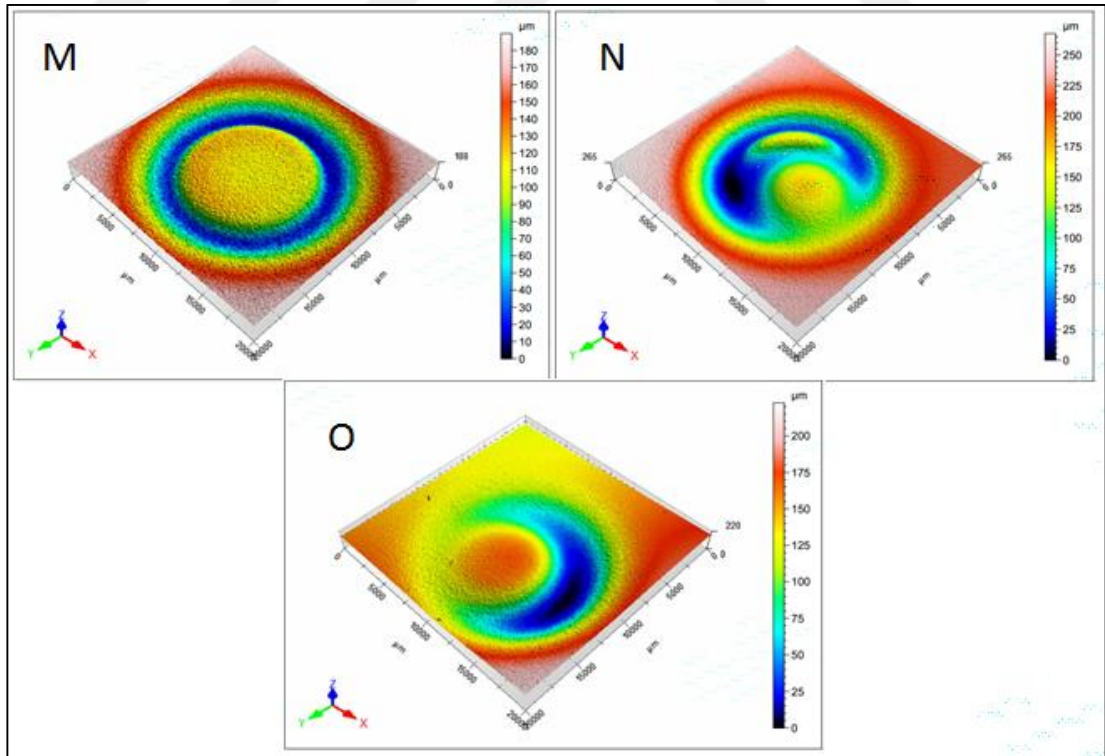
Şekil 5.58. II. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları



Şekil 5.59. III. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları



Şekil 5.60. IV. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları



Şekil 5.61. V. grup nozullarla pürüzlendirilen PMMA'nın üç boyutlu yüzey topografyaları

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Partikül erozyonu, akışkanlar mekaniği, malzeme bilimi, malzemelerin plastik şekillendirilmesi, talaşlı imalat esasları, aerodinamik, kırılma mekaniği gibi pek çok parametre ile karakterize edilen, bu parametrelerden etkilenen bir aşınma türüdür. Dolayısı ile partiküllerin belli bir basınç altında hareketlendirilmesinden başlayıp, hedef malzemenin aşınması sürecinin sonuna kadar geçerli olan parametrelerin çok olması partikül erozyonu ile malzeme karakterizasyonunu kompleks hale getirmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda çok sayıda değişken aynı anda etki ettiği için sonuçların analiz edilmesi aşamasında olabildiğince parametreleri sabit tutarak, değişkenleri aza indirmek sureti ile çıkarımları yapmak yoluna gidilmiştir.

Partikül erozyonu sürecinde etki eden parametreler hareketsiz halde duran partiküllerin basınç altında harekete başlatılmaları ile başlar. Basınç bir anlamda vakum etkisi ile önce partikülün eylemsizliğine karşı bir etki yaratarak partikülün hareket etmesini sağlar. Bu aşamada partikülün (aşındırıcı partikül) büyük olması eylemsizliğinin fazla olmasından dolayı hızlanması açısından bir dezavantajdır. Bu nedenle ilk aşamada büyük partiküllerin daha düşük bir ivme ile hızlanmasını beklemekteyiz. Partikülü hızlandırmak için kullanılan basıncı bir potansiyel enerji olarak yorumlarsak bunun partikülün hareketinde kinetik enerji olarak dönüşmesi sürecinde küçük partiküller daha avantajlıdır. Basıncı havanın sağladığı potansiyel enerji karşılığı kinetik enerjiye ulaştıklarında büyük partiküllere kıyasla daha yüksek hızlara çıkabilmesinin temelinde bu yatmaktadır. Bu nedenle sonuç olarak kullanılan basıncın artması ile partikülün kazandığı hız arasında birebir ilişkin olduğunu belirtmek gereklidir [13].

Tez çalışması kapsamındaki tüm deneyler 1,5 bar basınç altında yapılmıştır. Dolayısı ile basınçtan kaynaklanan değişkenler elimine edilmiştir. Fakat şu konunun altı çizilmelidir ki, tez kapsamındaki tüm çalışmalar 1,5 bar altındaki akışkanın (hava)

özellikleri ve 1,5 bara karşılık gelen atmosferik ve akışkanlar mekaniğinin ilgili kanunları çerçevesinde gerçekleşmiştir.

Partiküllerin eylemsizliklerinin yenilip boru içinde harekete başlamalarını takip eden ve tez kapsamında en yoğun şekilde irdelenen, bir anlamda tez konusunun omurgasını oluşturan diğer parametre ise nozuldur. Nozul, giriş noktasına kadar standart bir kütleli debi ve hız ile gelen partikülün bundan sonraki hareketini şekillendiren en önemli fiziksel unsurdur. Nozul geometrisi hava/partikül karışımının hareketini belirler. Akışkanlar mekaniğinde havanın hareketini yönlendiren kesit değişimleri, uzunluklar, yüzey pürüzlük değerleri, malzeme/akışkan arası sürtünme katsayısı gibi veriler partikül erozyonunu etkileyen nozula ait alt parametrelerdir. Burada en önemli kısım nozul içinde havanın ve partiküllerin hareketlerinin nozul geometrisine göre değişimleridir. Nozulun sabit çapta tam silindirik olması, giriş ve çıkış çapları arasında farklılıkların olması yada nozul içinde bir boğaz olması, o boğaz kısmına kadar bir daralmanın olması, boğaz sonrası genişlemenin olması, boğazın konumu, bu daralma ve genişlemelerin açıları vb. her biri bir parametre hüviyetindedir. Bu parametreler öncelikle nozul içindeki havanın (gaz akışkan) hızını ve basıncını etkiler. Bu da onunla birlikte hareket eden katı partiküllerin hızlarına direkt etki eder. Diğer yandan nozul geometrisinin içinden geçen hava/partikül karışımının birbiri ile etkileşimini de belirler. Örneğin nozuldaki boğaz bölgesinin çok dar olması havanın hızını artırmakta bir pozitif etki gösterirken, hızlanmasını beklediğimiz partiküllerin hızlarının azalması hatta o bölgede bir tıkanmanın meydana gelmesi bile söz konusu olabilir. Şöyle ki kütleli debi arttıkça nozul içindeki boğazdan geçen hava/partikül karışımının geçebileceği alan giderek daralmaktadır. Olabildiğince laminar bir akış sağlanmış olsa bile yerçekimi etkisi ve aerodinamik etkiler nedeniyle partiküllerin birbirine ve nozul çeperlerine çarpma eğilimleri artar. Bu partiküllerin gerek laminar akışta olduğu gibi doğrusal hızlanmalarına negatif etki etmekle beraber aynı zamanda çarpma sonrası hız ve enerji kaybetmelerine, hareket doğrultularını değiştirmelerine neden olur. Dolayısı ile bu boğazın çapının büyüklüğü, nozul içindeki konumu son derece önemlidir. Boğaz bulunan nozul tiplerinde giriş ile boğazın bulunduğu yere kadar olan noktaya kadar kesit göreceli olarak giderek azalmaktadır. Bu açı son derece önemlidir. Aynı şekilde bu mesafe de çok önemli parametrelerden biridir. Boğaz noktasında yukarıda

belirtilen etkileşimlerden sonra hızlanan ve saçılmaya başlayan partiküller nozul çıkışına doğru hareket eder. Bu aşamada nozul çıkışına kadar olan mesafe ve açı da akışkanlar mekaniği ve aerodinamik yasalarının geçerli olduğu nedenlerle havanın ve beraberinde hareket eden partiküllerin hızlarını ciddi bir şekilde etkiler. İçerisinde boğaz olmayan nozullarda ise giderek daralan kesit, boğazın yukarıda anlatılan etkisini nozul boyunca kademeli olarak gerçekleştirip, hava ve partikül hızlarını dramatik bir şekilde etkiler [66].

Diğer yandan nozul malzemesinin moleküler yapısı ile havanın ve partiküllerin etkileşimleri dahi ayrı bir parametredir. Malzemelerin atomsal anlamda birbirleri çekmeleri, hava/nozul çeperi arasındaki sürtünme katsayısı, hava akışında oluşan sınır bölgesi vb. tüm parametreler birer etkendir. Nozul malzemesinin yüzeyinin işlenmesi sonrası elde edilen yüzey pürüzlük değerleri de akışa etki etmektedir.

Tez kapsamında tüm nozullar aynı malzemeden üretilmiş, aynı koşullarda şekillendirilmiştir. Nozulların her biri aynı takımlar ile aynı parametreler altında işlenmiştir. Dolayısı ile nozul malzemeleri, işlenme kalitelerinden kaynaklanan parametrelerin etkileri elimine edilmiştir.

Sonrasında nozulu terk eden hava/partikül karışımı atmosferde hareket etmeye başlar. Bu aşamada atmosferin (deney ortamının) nemi, sıcaklığı gibi gaz fazın (hava) sıcaklığına, yoğunluğuna, dolayısı ile akışkanlar mekaniği ve aerodinamik olarak basınçlı havanın hızı ve durgun atmosfer içindeki hareketine etkileri söz konusudur. Nozul çıkışında hareket eden hava/partikül karışımları öncelikle nozul içinde iken takip ettikleri yörüngeyi sürdürme eğilimindedir. Nozul içinde nozul geometrisinin yönlendirmesi ile hareket eden hava ve partiküller nozul çıkışında durgun atmosferde hareket eden basınçlı bir karışım olarak hareket eder. Durgun atmosfer ile etkileşime girer. Burada atmosfer içinde vorteks oluşumları söz konusu olabilmektedir. Bu nedenler ile nozul çıkışından itibaren hızlar değişir. Hava ile olan sürtünme ve yerçekimine bağlı olarak partikül hızı değişim gösterir. Yeryüzüne tez kapsamında olduğu gibi yatay püskürtülen hava ve partikül hızında azalma beklemekteyiz. Sürtünmenin etkisi ve aerodinamik nedenler ile bu yavaşlama nozul çıkışı ile hedef malzeme arasındaki mesafe uzadıkça artacaktır. Dolayısı ile püskürtme mesafesi bu anlamda hedef malzemeye çarpma hızının belirlenmesinde önemli bir parametredir. Diğer yandan havanın oluşan vorteksler nedeniyle partikül

hızını giderek arttırması da söz konusu olabilmektedir. Bütün bu olayların başlayıp bitmesi püskürtme mesafesi ile ilişkilidir. Partikül hızının yavaşlaması ve hızlandırılması arasındaki ilişkinin neticesini püskürtme mesafesi belirlemektedir [66].

Nozul içindeki partikül çarpışmaları, partiküllerin nozul çeperlerine ve birbirlerine çarparak yön değiştirmeleri süreci nozul çıkışında izledikleri doğrultu olarak karşımıza çıkar. Havanın akışına uyum sağlayarak püskürtme mesafesi boyunca bir yörünge izlerler ve hedef malzemeye çarparlar. Literatürde belirtildiği üzere partikül boyutu küçüldükçe havanın izlediği yörüngeye bağımlı kalma, ondan etkilenme daha yüksek seviyelerdedir. Büyüklük arttıkça havanın akışından daha bağımsız olarak partiküllerin hareket etmesi söz konusu olabilmektedir.

Partiküllerin büyüklükleri ve morfolojileri de başka bir önemli faktördür. İdeal olarak küresel form tanımlanmıştır. Bu formun atmosferdeki hareketi aerodinamik olarak daha ideale yakın bir şekildedir. Fakat partikülün keskin köşeli olması, üzerindeki girinti ve çıkıntılar, çatlaklar vb. hava ile olan etkileşimini etkiler, hızını ve doğrultusunun değişmesine yol açabilir. Hatta havada hareket ederken partiküllerin kendi eksenini etrafında dönüşleri dahi söz konusudur. Dolayısı ile partiküllerin büyüklükleri ile birlikte yüzeylerinin morfolojileri, makro anlamda boyutları partikül hareketine etki eder.

Diğer çok önemli bir faktör ise yoğunluklarıdır. Partikülün kendi ağırlığı kazandığı kinetik enerji ve hız ile hareketini etkiler. Basıncın etkisi ile hızlanmış partiküllerin havanın etkisi ile daha hızlanması ya da giderek hızını kaybetmesi sürecinde sahip olduğu kinetik enerji (dolayısı ile kütlesi) son derece belirleyici olacaktır.

Özetle yukarıdaki bilgiler ışığında sonuçlar kısmında her bir parametrenin etkisini diğerlerini mümkün olduğunca soyutlayarak irdelemek amaçlanmıştır. Bu nedenle sonuçlar kısmı, olaya etki eden her bir parametreye göre ayrı ayrı tanımlanarak genel tablo anlaşılmaya çalışılmıştır.

6.1.1. Partikül boyutunun etkileri

6.1.1.1. Garnet partikülü

- Bilgisayar destekli HAD sonuçlarına göre partikül boyutu arttıkça, partikül hızlarında nozuldan çıktıktan sonra azalma görülmüştür. 1,5 bar basınç altındaki sonuçlara göre 158 μm 'lik garnet partikülünün 20 mm püskürtme mesafesindeki partikül çarpma hızı 68 m/s iken 702 μm 'lik garnet partikülünün, partikül çarpma hızı 30 m/s olmuştur (Şekil 5.7).
- Partiküllerin kütle akış oranlarına baktığımızda partikül boyutu arttıkça birim zamandaki partikül akış oranında azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.10).
- Partikül boyutu arttıkça düz ve konik yapıya sahip I. ve II. grup nozullarda erozyon oranında yaklaşık 2 kat azalma gözlemlenirken, boğazlı yapıya sahip III., IV. ve V. grup nozullarda 4 kat civarında artışlar görülmüştür (Şekil 5.16-5.18).
- Partiküllerin hedef malzeme olan PMMA yüzeyine etki ettiği alana baktığımızda partikül boyutu arttıkça I. ve II. grup nozulların yüzeye etki alanında da 2 kat artış görülürken, III., IV. ve V. grup nozullarda bu artış 5 kat civarlarını bulmuştur (Şekil 5.29, 5.31, 5.33).
- PMMA yüzeyinde oluşan hasar kraterinde ise partikül boyutu arttıkça oluşan hasar kraterinin derinliğinin arttığı görülmüştür (Şekil 5.40, 5.44, 5.48).
- Partikül boyutu arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğünde %50 civarında artış meydana gelmiştir (Şekil 5.41, 5.45, 5.47).

6.1.1.2. Alümina partikülü

- Partiküllerin kütle akış oranlarına baktığımızda partikül boyutu arttıkça birim zamandaki partikül akış oranında azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.10) .
- Partikül boyutu arttıkça erozyon oranında artış gözlemlenirken, bu artış düz ve konik yapıya sahip I. ve II. grup nozullarda yaklaşık 2 katı olurken, boğazlı yapıya sahip III., IV. ve V. grup nozullarda ise 18 katlık bir artma görülmüştür (Şekil 5.13, 5.14, 5.15).
- Partiküllerin PMMA yüzeyindeki etki ettiği alana baktığımızda partikül boyutu arttıkça yüzeyi etki ettiği alanda azalma görülmüştür. 120 mesh alümina

partikülüne göre 60 mesh alümina partikülünde yaklaşık 2 katlık bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.23, 5.25, 5.27).

- PMMA yüzeyinde oluşan hasar kraterinde ise partikül boyutu arttıkça artma meydana gelmiştir. Küçük partikül boyutlarında merkezde tepe noktaları görülürken, partikül boyutu arttıkça bu tepeler derin çukurlara dönüşmüştür (Şekil 5.38, 5.42, 5.46).
- Partikül boyutu arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğünde artış meydana gelmiştir. Ra değerindeki bu artışların 3 kata kadar çıktığı görülmüştür (Şekil 5.39, 5.43, 5.47).

6.1.2. Kütlesel debilerin etkileri

6.1.2.1. Garnet partikülü

- Garnet partiküllerinde en düşük debi F nozulunda (nozul giriş çapı 3 mm, nozul çıkış çapı 2 mm) gözlemlenmiştir. En yüksek debi ise D nozulunda (nozul giriş çapı 5 mm, nozul çıkış çapı 5 mm) görülmüştür (Şekil 5.10).
- Garnet partikülleriyle yapılan deneylerde düz ve konik yapıli nozullarda nozul çıkış çapı arttıkça kütle akış oranında artış meydana gelmiştir. Aynı durum boğazlı yapılara sahip nozullarda da boğaz çapı arttıkça görülmüştür (Şekil 5.10).
- Partikül boyutu arttıkça E nozulu (nozul giriş çapı 3 mm, nozul çıkış çapı 3 mm) hariç bütün nozullarda kütle akış oranında azalma meydana gelmiştir. E nozulunda ise partikül boyutu arttıkça yaklaşık 2 katlık bir artış meydana gelmiştir (Şekil 5.10).

6.1.2.2. Alümina partikülü

- Alümina partiküllerinde en düşük debi F nozulunda (nozul giriş çapı 3 mm, nozul çıkış çapı 2 mm) gözlemlenmiştir. En yüksek debi ise küçük partikül boyutlarında O nozulunda (nozul giriş çapı 5mm, nozul çıkış çapı 5 mm) görülürken, partikül boyutu büyüdükçe D nozulunda daha fazla partikül akış oranı görülmüştür. En yüksek debi ile en düşük debi arasında yaklaşık 10 kat fark meydana gelmiştir (Şekil 5.10).

- Alümina partikülleriyle yapılan deneylerde düz ve konik yapılı nozularda nozul çıkış çapı arttıkça kütle akış oranında artış meydana gelmiştir. Aynı durum boğazlı yapılara sahip nozularda da boğaz çapı arttıkça görülmüştür (Şekil 5.10).
- 120 mesh partikül boyutunda boğazlı yapılara sahip nozulların en dar kesikli olanlarında debi yüksekken partikül boyutu arttıkça büyük bir azalma meydana gelmiştir. Bu azalma yaklaşık 10 kat oluşmuştur (Şekil 5.10).
- Boğazlı yapılara sahip nozularda, boğazın nozul girişine yaklaşmasıyla debide artış görülmüştür (Şekil 5.10).

6.1.3. Nozul geometrilerinin etkileri

6.1.3.1. Garnet partikülü

- Bilgisayar destekli HAD sonuçlarına göre en yüksek partikül hızı, 1,5 bar basınç altında 206 μm partikül boyutuyla yapılan simülasyonlarda 33 m/s ile O nozulunda görülürken en düşük partikül hızı ise J nozulunda görülmüştür (Şekil 5.4).
- Simülasyon sonuçlarına göre nozul çıkış çapı ve boğaz çapı arttıkça partikül hızlarında artış görülmüştür. Aynı zamanda boğazın konumunun girişe yaklaşmasıyla partikül hızlarında artış meydana gelmiştir (Şekil 5.2, 5.3).
- Döner disk yöntemiyle yapılan hız ölçümünde 120 mesh garnet partiküllerinin 50 mm püskürtme mesafesinde partikül çarpma hızı en yüksek 70 m/s ile I nozulunda görülürken, en düşük partikül çarpma hızı 36 m/s ile L nozulunda görülmüştür (Şekil 5.11).
- E ve F nozullarında kütle akış oranı en az ortaya çıkmıştır. Bu nozularda debi en yüksek görülen nozula göre yaklaşık 15 kat daha az meydana gelmiştir. Nozul çıkış çapı ve boğaz çapı arttıkça debide artış görülmüştür. Boğaz konumunda ise ortada yer alan nozul geometrilerinde debi daha az gözlemlenmiştir (Şekil 5.10).
- 120 mesh partikül boyutunda en yüksek erozyon oranları E, F ve A nozullarında ortaya çıkarken, partikül boyutu arttıkça boğazlı yapılara sahip en dar kesitli G, J ve M nozullarında erozyon oranları daha yüksek çıkmıştır. Partikül boyutu arttıkça bu nozularda yaklaşık 4 kat bir artış görülmüştür (Şekil 5.13, 5.14, 5.15).
- Genel olarak nozul çıkış çapının ve boğaz çapının artması erozyon oranını azaltmıştır. Boğazın nozul içindeki konumuna baktığımızda, nozulun çıkışa yakın

olana göre nozulun orta kısmında boğaz bulunan geometrilerle yapılan deneylerde daha fazla erozyon oranı görülmüştür (Şekil 5.13, 5.14, 5.15)..

- Nozul çıkış çapı ve boğaz çapı arttıkça hedef malzeme üzerindeki etki alanının arttığı görülmektedir (Şekil 5.29, 5.31, 5.33).
- Küçük partikül boyutlarıyla yapılan püskürtmelerde I nozulu daha geniş bir etki alanına sahipken, partikül boyutu arttıkça K ve O nozulu daha büyük bir etki alanı yaratmıştır. Nozul gruplarını incelediğimizde özellikle büyük partikül boyutlarında daha büyük nozul çıkış çapı ve boğaz çapına sahip nozullar dar kesitli nozullara göre 5 kat daha büyük bir alan etkisi yaratmıştır (Şekil 5.29, 5.31, 5.33).
- Partikül boyutu büyüdükçe nozullar merkeze odaklanmayıp bir saçılma meydana getirmişlerdir (Şekil 5.30, 5.32, 5.34).
- Hedef malzeme üzerindeki hasar kraterine baktığımızda, nozullardan püskürtülen küçük partiküllerle genelde hedef malzemenin merkezinde derin hasar kraterleri oluştururken, partikül boyutu büyüdükçe nozullar hedef malzemenin merkezinde bir tepe noktası oluşturduğu ve bunun etrafında derin hasar kraterlerinin meydana geldiğini görmekteyiz (Şekil 5.40, 5.44, 5.48).
- Ortalama yüzey pürüzlülüğünün E nozulunda daha fazla olduğu görülmüştür. Genelde N ve D nozullarında ise daha az ortalama yüzey pürüzlülüğü görülmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülük değerine baktığımızda E nozulu, D ve N nozuluna göre 2,5 kat daha fazla pürüzlülük yaratmıştır (Şekil 5.41, 5.45, 5.47).

6.1.3.2. Alümina partikülü

- Yüksek hızlı kamera yöntemiyle yapılan hız ölçümünde 120 mesh alümina partiküllerinin nozul çıkışında partikül hızı en yüksek 48 m/s ile N nozulunda görülürken, en düşük partikül hızı 24 m/s ile L nozulunda görülmüştür. Nozul çıkış çapı ve boğaz çapı arttıkça partikül hızlarının arttığı görülmektedir. Nozul içerisinde boğazın nozul çıkışına yakın olmasının partikül hızını ciddi oranda azalttığı belirlenmiştir. Nozul içerisinde boğazlı yapılara sahip nozullarda nozul çıkışına yakın olana göre nozul girişine yakın aynı boğaz çapına sahip olan nozul geometrilerini karşılaştırdığımızda 2 kat daha fazla partikül hızı görülmüştür (Şekil 5.12).

- E ve F nozullarında kütle akış oranı en düşük seviyede olmuştur. Bu nozullarda debi en yüksek görülen nozula göre yaklaşık 18 kat düşmüştür. Nozul çıkış çapı ve boğaz çapı arttıkça debide artış görülmüştür. Nozul içerisindeki boğazın konumuna göre ise nozul girişine yakın geometrilerde debi daha fazla gözlemlenmiştir. Ayrıca nozul içerisindeki boğazlı yapılara sahip nozulların en dar kesitlerinde küçük partiküllerde yüksek debi görülürken, partikül boyutu büyüdükçe 10 kat gibi debide ciddi bir azalma meydana gelmiştir (Şekil 5.10).
- 120 mesh partikül boyutunda en yüksek erozyon oranları E, F ve A nozullarında ortaya çıkarken, partikül boyutu arttıkça nozul içerisindeki boğazlı yapılara sahip en dar kesitli G, J ve M nozullarında da yüksek erozyon oranları görülmüştür. Partikül boyutu arttıkça bu nozullarda yaklaşık 14 ile 18 kat arasında bir artış görülmüştür (Şekil 5.13, 5.14, 5.15).
- Genel olarak nozul çıkış çapının ve boğaz çapının artması erozyon oranını azaltmıştır. Nozul içerisindeki boğazın konumuna baktığımızda, nozul girişine yakın boğaz bulunan geometrilerde daha fazla erozyon oranı görülmüştür (Şekil 5.13, 5.14, 5.15).
- Nozul çıkış çapı ve boğaz çapı arttıkça hedef malzeme üzerindeki etki alanının arttığı görülmektedir (Şekil 5.23, 5.25, 5.27).
- Küçük partikül boyutlarıyla yapılan püskürtmelerde K nozulu daha geniş bir etki alanına sahipken, partikül boyutu arttıkça A nozulu daha büyük bir etki alanı yaratmıştır. Daha büyük nozul çıkış çapı ve boğaz çapına sahip nozullar dar kesitli nozullara göre yaklaşık 2 kat daha büyük bir alan etkisi yarattığı görülmektedir (Şekil 5.23, 5.25, 5.27).
- Küçük partikül boyutlarında nozullar merkezde puslanma meydana getirirken partikül boyutu büyüdükçe nozulların hedef malzeme üzerindeki dağılımı daha homojen olmuştur (Şekil 5.24, 5.26, 5.28).
- Hedef malzeme üzerindeki hasar kraterine baktığımızda, nozullardan püskürtülen büyük partiküllerle genelde hedef malzemenin merkezinde derin hasar kraterleri oluştururken, partikül boyutu küçüldükçe nozullar hedef malzemenin merkezinde bir tepe noktası oluşturduğu ve bunun etrafında derin hasar kraterlerinin meydana getirdiğini görmekteyiz (Şekil 5.38, 5.42, 5.46).
- Ortalama yüzey pürüzlülüğü üç farklı partikül boyutunda da M nozulunda daha fazla olduğu görülmüştür. Genelde O nozulunda ise daha az ortalama yüzey

pürüzlülüğü görülmektedir. Ortalama yüzey pürüzlülük değerine baktığımızda M nozulu, O nozuluna göre 2 kat daha fazla pürüzlülük yaratmıştır (Şekil 5.39, 5.43, 5.47).

- Partikül boyutu arttıkça nozulların yaratmış olduğu ortalama pürüzlülük değerlerinde büyük artış meydana gelirken kendi aralarında oluşan ortalama pürüzlülük değeri farkları da azalmıştır (Şekil 5.39, 5.43, 5.47).
- PMMA yüzeyindeki ortalama alansal pürüzlülük değişimlerine baktığımızda düz ve konik nozullardan oluşan I. grup nozullarda daha fazla oluştuğu görülmüştür. Nozul çıkış çapının daralmasıyla ortalama alansal pürüzlülük değerinin arttığı belirlenmiştir (Şekil 5.56).
- Nozul içerisinde boğazlı yapılara sahip nozullarda, düz ve konik nozul geometrilerine göre yaklaşık 2 kat pürüzlülük değerinde azalma oluşmuştur. Ayrıca boğazın nozul içerisindeki konumuna göre de değişim meydana gelmiştir. Nozul içerisindeki nozul girişine yakın boğaza sahip olanda daha az ortalama alansal pürüzlülük değeri oluşmuştur (Şekil 5.56).
- 3 boyutlu yüzey topografyalarında nozul çıkış çapı arttıkça erozif aşınma izinin kapladığı alanın arttığı görülmüştür (Şekil 5.57-5.61).
- F nozulu hariç diğer nozul geometrilerinde gerçekleştirilen kumlama işlemi sonrasında hedef malzeme yüzeyinde merkezde aşınmanın sınırlı olup, bu sınırlı alanın etrafında halka şeklinde bir aşınma meydana geldiği görülürken, F nozulunda ise aşınma izinin merkezde maksimum miktarda gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 5.58).

6.1.4. Püskürtme mesafesi etkileri

- Bilgisayar destekli HAD yöntemiyle yapılan simülasyon çalışmalarında 120 mm'ye kadar garnet aşındırıcı partiküllerin hızları ivmelendirici havanın kinetik enerjisiyle nozul çıkışından sonra da hız kazanmaya devam etmiştir. Bu mesafeden sonra partikül hızları sürüklemenin etkisiyle yavaşlamaya başlamıştır. Bu hızlanma 1,5 bar basınç altında 158 µm garnet partikül boyutu için nozul çıkışında yaklaşık 50 m/s iken 120 mm püskürtme mesafesinde 70 m/s'leri bulmuştur (Şekil 5.8).

- 1,5 bar basınç altında 158 μm boyutundaki garnet partikülü 120 mm püskürtme mesafesinde 70 m/s iken 702 μm boyutundaki garnet partikülü aynı mesafede, aynı hızı 3 bar basınç altında sağlayabilmiştir (Şekil 5.8).
- Erozyon oranına püskürtme mesafesi etkisine bakacak olursak, mesafe arttıkça erozyon oranının da arttığı görülmektedir. Püskürtme mesafesi arttıkça en fazla artış oranı nozul içinde boğaza sahip olan geometrilerde görülmektedir. Özellikle H ve N nozullarında 20 mm mesafeye göre 100 mm mesafede yaklaşık 10 kat erozyon oranında artış görülmüştür. En fazla erozyon oranına sahip F nozulu 20 mm'ye göre 100 mm'de yaklaşık 2 kat bir artış göstermiştir (Şekil 5.22).
- Püskürtme mesafesinin alan etkisine baktığımızda mesafe arttıkça alanın büyüdüğü gözlemlenmiştir. 20 mm mesafede en büyük etki alanını I nozulu sağlarken 100 mm'de en büyük etki alanı E nozulu ile sağlanmıştır (Şekil 5.36).
- Etki alanı üzerinde püskürtme mesafesinin değişim oranı 8 kat ile en fazla B nozulunda görülürken, en az değişim %25'lik artışla I nozulunda görülmüştür. Boğazlı yapılara sahip nozul geometrilerinde 20 mm'de en fazla etki alanı nozulun ortasındaki boğazlı geometrilerde görülürken, 100 mm mesafede en fazla etki alanı nozulun çıkışına yakın boğazlı nozul geometrilerinde görülmüştür (Şekil 5.36).
- Püskürtme mesafesinin ortalama yüzey pürüzlülük değerine etkisine bakacak olursak, genelde mesafe arttıkça ortalama pürüzlülük değerinde artış görülmüştür (Şekil 5.51).
- En fazla ortalama pürüzlülük değeri 70 mm mesafede F nozulu ile sağlanmıştır. 20 mm püskürtme mesafesinde en fazla Ra değeri A nozulu ile sağlanırken, 100 mm püskürtme mesafesinde M nozulunda meydana gelmiştir (Şekil 5.51).
- Ortalama yüzey pürüzlülüğünün püskürtme mesafesine göre değişimi yaklaşık 4 kat ile en fazla L nozulunda görülmüştür (Şekil 5.8).

6.2. Öneriler

Tez çalışmasında gerçekleştirilen deneylerin dışında gelecekte aşağıdaki başlıklar altında çalışmalar yapılması önerilmektedir:

6.2.1. Mikrosertlik analizleri

Katı partikül erozyonu testleri sonrası hedef malzeme yüzeyi ile etkileşime giren aşındırıcı partiküller yüzeyde dövme etkisi yapmaktadır. Bilyalı dövme gibi işlemler sonrası, metallerde yüzeydeki sertlik değişimleri mikro sertlik ölçümleri gerçekleştirilerek analiz edilmektedir. Tez çalışmasında kullanılan PMMA yüzeylerinde katı partikül erozyonu testleri sonrası yüzey mikro-sertlik ölçümleri gerçekleştirilerek gelecekteki çalışmalarda nozul geometrisinin erozif aşınmaya olan etkisinin yanında yüzey ve yüzey altı sertliğine olan etkileri de araştırılabilir.

6.2.2. SEM analizleri

Katı partikül erozyonu sonrası PMMA yüzeylerinde farklı nozullarla püskürtme sonucu ortaya çıkan hasar mekanizmaları SEM incelemeleri ile daha net ortaya konabilir. Nozul geometrilerinin değişmesiyle aşındırıcı partiküllerin PMMA yüzeyinde ortaya çıkardıkları farklı hasar mekanizmaları detaylı şekilde analiz edilebilme potansiyeline sahiptir. Yapılacak yeni çalışmalarda numunelerin SEM analizleri gerçekleştirilerek bilimsel çalışmalar yapılması önerilmektedir.

6.2.3. Hacimsel analizler

PMMA yüzeylerde farklı nozullarla püskürtme sonucu ortaya çıkan hasar kraterleri profilometre analizleri ile detaylı şekilde incelenmiştir. Bu incelemelerde her nozul geometrisiyle püskürtme sonrası ortaya çıkan hasar krater hacim hesapları gelecekteki çalışmalarda ortaya konabilir. Bununla birlikte aşınma ile kaybedilen kütle miktarı, hedef malzeme yoğunluğu ve krater hacmi arasında bağıntılar kurulması önerilmektedir.

6.2.4. Isıl değişim

PMMA yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküllerin, yüzeyde tekrarlı çarpmalara bağlı olarak lokal ve anlık ısınma bölgeleri oluşturduğu öngörülmektedir. Gelecekteki çalışmalarda farklı nozullarla katı partikül erozyonu testleri gerçekleştirilirken termal kamera yardımıyla yüzeyde ortaya çıkan bu anlık ve lokal ısı bölgelerinin tespit edilmesi önerilmektedir. Bu ısı dağılım gradyanlarının, ortaya çıkan hasar mekanizmalarını da etkilediği düşünülmektedir.

6.2.5. Nozul malzemesi ve işleme parametrelerinin etkileri

Tez kapsamında kullanılan malzemeden farklı malzemelerin seçilmesiyle nozul malzemesinin erozif aşınmaya etkileri ve hava akışına karşı gösterdiği direncin değişimi bu şekilde incelenebilir. Malzemeden bağımsız olarak nozul iç yüzeylerinin işlenme şekilleri (talaşlı imalat, döküm vb. farklı yöntemler) ve işlenme sonrası yüzey özelliklerinin etkileri incelenebilir.

6.2.6. Deney ortamının etkilerinin incelenmesi

Partiküller ile püskürtülen havanın sıcaklığı, nemi, basıncı aynı zamanda nozul çıkışında hareketsiz durumda bekleyen diğer atmosferin türü (farklı gaz karışımları kullanılabilir, vakum ortamında çalışılabilir vb.), sıcaklığı, basıncının erozyona etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Rana F., Stefanescu D. M., Friction Properties of Al-1.5 Pct Mg/SiC Particulate Metal-Matrix Composites, *Metallurgical Transactions A*, 1989, **20**(8), 1564-1566.
- [2] G40-02, Standart Terminology Relating to Wear and Erosion, *ASTM International*, US, 2002.
- [3] ASM International Handbook Committee, Failure Analysis and Prevention, Editors: Becker W. T. and Shipley R. J., *ASM Handbook*, ASM International, Material Park, Ohio, US, 2002.
- [4] Avcu E., Fidan S., Yıldiran Y. ve Sınmazçelik T., Solid Particle Erosion Behavior of Ti6Al4V Alloy, *Tribology*, 2013, **7**(4), 201-210.
- [5] Avcu E., Fidan S., Bora M. Ö., Çoban O., Taşkiran İ. ve 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**(S1), E386-E398.
- [6] Avcu E., Fidan S., Karabay S.ve Sınmazçelik T., Türkiye’de Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan AA-1070 ile AA-6101 Alaşımlarının Katı Partikül Erozyon Davranışlarının Karşılaştırılması, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2012, **27**(4), 865-874.
- [7] Fidan S., Avcu E., Karakulak E., Yamanoğlu R., Zeren M.ve Sınmazçelik T., Effect of Heat Treatment on Erosive Wear Behavior of Ti6Al4V Alloy, *Materials Science and Technology*, 2013, **29**(9), 1088-1094.
- [8] Erdem V. E., AISI 1060 Çeliğinin Eroziyon Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi ve Geliştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006, 172122.
- [9] Avcu E., Titanyum Alaşımlarının Partikül Erozyonu ile Pürüzlendirilmesi ve Aşındırılması İşlemlerinin Optimizasyonu, Doktora Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2013, 348736.
- [10] Sarıca B., Farklı Kalite Çeliklere Uygulanan Yüzey Kaplama İşlemlerinin Aşınma Davranışlarına Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005, 166290.
- [11] Sundararajan G., Roy M., Solid Particle Erosion Behavior of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, *Tribology International*, 1997, **30**(5), 339-359.

- [12] Bağcı M., İmrek H., CuZn10 ve CuSn10 Bakır Alaşımlarının Eroziyon Aşınması, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs 2009.
- [13] John J. E. A., *Gas Dynamics*, 2nd edition, Allyn and Bacon Inc., Bolton, US, 1984.
- [14] Settles G. S. and Garg S., Scientific View of the Productivity of Abrasive Blasting Nozzles, *Journal of Thermal Spray Technology*, 1996, **5**(I), 35-41.
- [15] Kline E., Mort G. and LaCompte J., Improved Productivity from New Blast Nozzle Geometry, *Journal of Protective Coatings & Linings*, 1988, **5**, 8-12.
- [16] Lupoi R., O'Neill W., Powder Stream Characteristics in Cold Spray Nozzles, *Surface & Coatings Technology*, 2011, **206**, 1069–1076.
- [17] Seavey M., Abrasive Blasting Above 100 psi, *Journal of Protective Coatings & Linings*, 1985, **2**(7), 26-37.
- [18] Sutton G. E., *Rocket Propulsion Elements*, 6th edition, John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [19] Özel S., Vural E., Alüminyum Alaşımı Yüzeyine Kaplanan Tabakaların Mikroyapı ve Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi, *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2015, **4**(2), 211-218.
- [20] Barbezat G., Advanced Thermal Spray Technology and Coating for Lightweight Engine Blocks for the Automotive Industry, *Surface & Coatings Technology*, 2005, **200**, 1990–1993.
- [21] Turchi A., Bianchi D., Thakre P., Nasuti F., Yang V., Radiation and Roughness Effects on Nozzle Thermochemical Erosion in Solid Rocket Motors, *Journal of Propulsion and Power*, 2014, **30**(2), 314-324.
- [22] Zeng L., Bieler T.R., Optimal Design of a Cold Spray Nozzle by Numerical Analysis of Particle Velocity and Experimental Validation with 316L Stainless Steel Powder, *Materials and Design*, 2007, **28**, 2129–2137.
- [23] Shuo Y., Wang X.-F., Li W.-Y., Computational Analysis of The Effect of Nozzle Cross-Section Shape on Gas Flow and Particle Acceleration in Cold Spraying, *Surface & Coatings Technology*, 2011, **205**, 2970–2977.
- [24] Samareh B., Stier O., Luthen V., and Dolatabadi A., Assessment of CFD Modeling via Flow Visualization in Cold Spray Process, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, **18**(5-6).
- [25] Li W.-Y., Li C.-J., Optimal Design of a Novel Cold Spray Gun Nozzle at a Limited Space, *Journal of Thermal Spray Technology JTTEE5*, 2004, **14**, 391-396.

- [26] Wang Q., Melaaen M. C., De Silva S. R., Tong G., Experimental and Computational Studies of Gas-Particle Flow in a 'Sand-Blast' Type of Erosion Tester, *Powder Technology*, 2005, **160**, 93-102.
- [27] Rutherford K. L., Trezona R. I., Ramamurthy A. C., Hutchings I. M., The Abrasive and Erosive Wear of Polymeric Paint Films, *Wear*, 1997, **203-204**, 325-334.
- [28] Pasha M. and Kaleemulla M., Erosive wear behavior of sprayed metal matrix composites: An overview, *Proceedings of The Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 2013, **227**(10), 1063-1075.
- [29] Stodola J., Modelling of Ball Impacts on Coatings and Erosion of Special Technique Components, *Advances in Military Technology*, 2011, **6**(2), December (2011)
- [30] Stodola P., Jamrichova Z., Stodola J., Modelling of Erosion Effects on Coatings of Military Vehicle Components, *Transactions of FAMENA*, 2012, **XXXVI**(3), 1333-1124.
- [31] Trezona R. I., Hutchings I. M., Resistance of Paint Coatings to Multiple Solid Particle Impact: Effect of Coating Thickness and Substrate Material, *Progress in Organic Coatings*, 2001, **41**, 85-92.
- [32] Deng T., Bingley M. S., Bradley M. S. A., De Silva S. R., A Comparison of the Gas Blast and Centrifugal-Accelerator Erosion Testers: The Influence of Particle Dynamics, *Wear*, 2008, **265**, 945-955.
- [33] Grewal H. S., Agrawal A., and Singh H., Design and Development of High-Velocity Slurry Erosion Test Rig Using CFD, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2013, **22**, 152-161.
- [34] Azimian, M., Bart, H.-J., CFD Simulation and Experimental Analysis of Erosion in a Slurry Tank Test Rig, *EPJ Web of Conferences*, 2013, **45**, 01009(1)- 01009(8).
- [35] Özkaya E., Bayraktar E., Turek S. and Biermann D., Abrasive Medium Classification and CFD Simulations for Low-Pressure Abrasive Water-Jet Blasting, <https://www.researchgate.net/publication/260311077>, (Ziyaret Tarihi: 10 Ocak 2014).
- [36] Bayraktar E., Özkaya E., Münster R., Biermann D., Turek, S., Nozzle Design for Low-Pressure Micro Abrasive Waterjet Blasting via CFD Simulations, *Ergebnisberichte des Instituts für Angewandte Mathematik 465*, Technische Universität Dortmund, 2013.
- [37] Finnie I., Some Reflections on The Past and Future of Erosion: Part I, *Wear*, 1995, **186-187**, 1-10.

- [38] Rao P. V., Buckley D. H., Spherical Micro-Glass Particle Impingement Studies of Thermoplastic Materials at Normal Incidence, *ASLE Transactions*, 1984, **27**(4), 373-379.
- [39] Jain V. K. and Bahadur S., An Investigation of The Markings on Wear and Fatigue Fracture Surface, *Wear*, 1982, **75**, 357-368.
- [40] Fidan S., Tribological Performance of Polymethyl Methacrylate as an Aviation Polymer, *Journal of Polymer Engineering*, 2014, **34**(6), 569-579.
- [41] Bahri, A., Guermazi N., Elleuch K., Ürgen M., On the Erosive Wear of 304L Stainless Steel Caused by Olive Seed Particles Impact: Modeling and Experiments, *Wear*, 2015, **342-343**, 77-84.
- [42] 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.
- [43] Hager A., Friedrich K., Dzenis Y. A., Paipetis S. A., Study of Erosion Wear of Advanced Polymer Composites. *ICCM-10 Conference Proceedings*, Canada Woodhead Publishing Ltd., Cambridge (UK), 155-162, 1995.
- [44] Harsha A. P., Kumarjha S., Erosive Wear Studies of Epoxy-Based Composites at Normal Incidence, *Wear*, 2008, **265**, 1129-1135.
- [45] Li W.-Y., Liao H., Douchy G., Coddet C., Optimal design of a cold spray nozzle by numerical analysis of particle velocity and experimental validation with 316L stainless steel powder, *Materials and Design*, 2007, **28**(7), 2129-2137.
- [46] Stachowiak G. W., Batchelor A.W., Engineering Tribology, *Tribology Series*, 1993, **24**, 577-586.
- [47] 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**(18), 3807-3820.
- [48] 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.
- [49] Anand K., Hovis S. K., Conrad H., Scattergood R. O., Flux Effect in Solid Particle Erosion, *Wear*, 1987, **118**, 243-257.
- [50] Liebhard M., Levy A., The Effect of Erodent Particle Characteristics on The Erosion of Metals, *Wear*, 1991, **151**, 381-390.
- [51] Misra A., Finnie I., On the Size Effect in Abrasive and Erosive Wear, *Wear*, 1980, **65**(1981), 359-373.

- [52] 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.
- [53] 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**(6) 470-478.
- [54] Dundar M., Inal O. T., Solid Particle Erosion of A-Brass with 5 and 25 µm Particles at Normal Incidence, *Wear*, 1999, **224**, 226–235.
- [55] Amirthan G., Udayakumar A., Prasad B., Balasubramanian M., Solid Particle Erosion Studies on Biomorphic Si/Sic Ceramic Composites, *Wear*, 2010, **268**, 145-152.
- [56] Chen Q., Li D. Y., Computer Simulation of Solid Particle Erosion of Composite Materials, *Wear*, 2003, **255** , 78–84.
- [57] Tabakoff W., Vittal B. V. R., High Temperature Erosion Study of INCO 600 Metal, *Wear*, 1983, **86**, 89-99.
- [58] Sınmazçelik T., Sarı N., Erodent Size Effect on The Erosion of Polyphenylene Sulfide Composite, *Polymer Composites*, 2010, **31**, 985-994.
- [59] Sınmazçelik T., Fidan S., Polimerler ve Polimer Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonun Mekanizmaları ve Malzeme Performansını Etkileyen Faktörler, *13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 9-11 Kasım 2006.
- [60] Bothen M., Mikro-Abrasives-Druckluftstrahlen zum Abtragen Sprödbrechender Materialien der Mikrosystemtechnik, PhD. Dissertation, Technische Universität Cottbus, Berlin, 2000.
- [61] Fokke M., *Abrasive Blasting of Metal Surfaces*, Delft University Press, Netherlands, 1999.
- [62] Uferer R., Optimales Druckluftstrahlen unter variable Bedingungen, *J. Oberflächentechnik*, 1992, **33**(7), 36-40.
- [63] Wolak, J., Worm, P., Patterson, I., Bodoia, J., Parameters Affecting The Velocity of Particles in an Abrasive Jet. *ASME Journal of Engineering Material Technology*, 1977, **99**(4), 147-152.
- [64] Li W.-Y., Zhang C., Guo X. P., Zhang G., Liao H. L., Li C.-J., Coddet C., Effect of Standoff Distance on Coating Deposition Characteristics in Cold Spraying, *Materials and Design*, 2008, **29**, 297–304.
- [65] Ceylan İ., Toz Püskürtme Yöntemi ile Boru İç Yüzey Kaplamanın İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2006, 181778.

- [66] Momber A., *Blast Cleaning Technology*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [67] Wang Y.-F., Yang Z.-G., Finite Element Model of Erosive Wear on Ductile and Brittle Materials, *Wear*, 2008, **265**, 871–878.
- [68] Tsiang T. H., Survey of Sand and Rain Erosion of Composite Materials, *Journal of Composite Technology and Research*, 1986, **8**(4), 154-158.
- [69] Tilly G. P., Erosion Caused by Airborne Particles, *Wear*, 1969, **14**, 63-79.
- [70] 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.
- [71] 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.
- [72] Lyras L. G., The Cost of Lead Paint Removal, *Journal of Protective Coatings & Linings*, 1991, **25**, 56-63.
- [73] Appleman B. R., *Bridge Paint: Removal, Containment and Disposal*, 2nd edition, Transportation Research Board, Washington D. C., 1992.
- [74] Flinme I., Wolak J. and Kabd Y., Erosionof Metals by Solid Particles, *Journal of Materials*, 1967, **2**(3), 682-700.
- [75] Pao S. P. and Seiner J. M., Shock-Associated Noise in Supersonic Jets, *AIAA Journal*, 1983, **21**, 687-693.
- [76] Somerscales E. F. C., Tracer Methods, Editors: R J Emrich, *In Methods of Experimental Physics-Fluid Dynamics 18A*, 1st Ed., Academic Press, New York, 1-240, 1981.
- [77] Hansel D., Abrasive Blast Cleaning-Vital Foundation for Coating Cost and Success, *Materials Performance*, 1986, **25**(8), 15-20.
- [78] Gregor W., Dispersed Two-Phase Flows at High Velocities, *Encyclopedia of Fluid Mechanics*, 1985, **4**, 399-420.
- [79] Hamann J., Zur Entwicklung von Strahldüsen für das Druckluft-Freistrahilverfahren hoher Strahlleistung, *Korrosion*, 1987, **18**(4), 183-192.
- [80] McPhee W. S., Lin C. X., Zheng B., Kang H. J., Welker K., Ade R., Ebadian M. A., High Productivity Vakuum Blasting System, *International Decommissioning Symposium*, Knoxville-Tennessee, US, 13-16 July 2000.
- [81] Stevenson, A. N., Hutchings, I. M., The Influence of Nozzle Length on The Divergence of The Erodent Particle Stream in A Gas-Blast Erosion Rig, *Wear*, 1995, **189**, 66-69.

- [82] Shipway P. H., Hutchings I. M., Influence of Nozzle Roughness on Condition in a Gas-Blast Erosion Rig, *Wear*, 1993, **162-164**, 148-158.
- [83] Aydın M., Gaz Optimizasyon Yönteminde Yeni Bir Nozul Tasarımı ve Toz Üretimi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 2005, 198295.
- [84] Uslan İ., Nozul Tipinin Hava Atomize Aluminyum Tozu Boyutuna Etkisi, *Gazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, 1999, **14**(1), 1-15.
- [85] Ünsal B., Kaykısızlı H., Şenlikçi S. C., Gaz Debisi Ölçümlerinde Sonik Nozulların Kullanımı ve Kalibrasyonları, *VIII. Ulusal Ölçümbilim Kongresi*, Gebze, Kocaeli, 26-28 Eylül 2013.
- [86] www.anova.com.tr/main/68/ansys_fluent.aspx, (Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2013).
- [87] Sova A., Okunkova A., Grigoriev S. and Smurov I., Velocity of the Particles Accelerated by a Cold Spray Micronozzle: Experimental Measurements and Numerical Simulation, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, **22**(1), 75-80.
- [88] Baik J.-S. and Kim Y.-J., Effect of Nozzle Shape on The Performance of High Velocity Oxygen-Fuel Thermal Spray System, *Surface & Coatings Technology*, 2008, **202**, 5457-5462.
- [89] <http://pmma.nedir.com/>, (Ziyaret Tarihi : 13 Mayıs 2015)
- [90] Yılmaz S., PMMA, <http://slideplayer.biz.tr/slide/2749183/>, (Ziyaret Tarihi : 05 Mart 2016)
- [91] <http://www.hammaddeleransiklopedisi.com/makale-detay.php? seo=polmetl-metakrlat-ve-ozellikler-hammaddeler-ansiklopedisi>, (Ziyaret Tarihi: 08 Mayıs 2016)
- [92] www.saykar.net/kumlama+nozulu.html, (Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2013)
- [93] Yıldırım Y., Avcu E., Şahin A. E., Fidan S., Yetiştiren H. and Sınmazçelik T., Effect of Particle Impact Angle, Eroding Particle Size and Acceleration Pressure on the Solid Particle Erosion Behavior of 3003 Aluminum Alloy, *Acta Physica Polonica A*, 2014, **125**(2), 523-525.
- [94] Avcu E., Yıldırım Y., Şahin A. E., Fidan S. and Sınmazçelik T., Influences of Particle Impingement Angle and Velocity on Surface Roughness, Erosion Rate and 3D Surface Morphology of Solid Particle Eroded Ti6Al4V Alloy, *Acta Physica Polonica A*, 2014, **125**(2), 541-543.
- [95] http://nqaco.com/san_pham/462/thiet-bi-phan-tich-kich-co-hat-s3500/vni (Ziyaret Tarihi: 10 Mayıs 2014)

KİŞİSEL YAYINLAR ve ESERLER

- [1] **Önen B.**, Yıldiran Y., Avcu E., Çınar A., Investigation of the Effects of Erosion Test Parameters on the Particle Impingement Velocity by Using CFD Analysis, *Proceedings of the 4th International Congress APMAS2014*, Fethiye, Turkey, 24-27 April, 2014.
- [2] **Önen B.**, Fidan S., Çınar A., Sınmazçelik T., The Effect of Nozzle Geometry on Erosive Wear Behavior of Polymethyl Methacrylate, *4th International Conference of Engineering Against Failure (ICEAF IV)*, Skiathos, Greece, 24-26 June 2015
- [3] **Önen B.**, Yıldiran Y., Avcu E., Çınar A., Investigation of the Effects of Erosion Test Parameters on the Particle Impingement Velocity by Using CFD Analysis, *Acta Physica Polonica A*, DOI: 10.12693/APhysPolA.127.1225.
- [4] **Önen B.**, Yıldiran Y., Avcu E., Çınar A., Kumlama Yönteminde Farklı Nozul Tasarımlarının Hedef Malzeme Pürüzlülüğüne Etkileri, *1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, Afyon Kocatepe University, Turkey, 21-22 April 2016.
- [5] **Önen B.**, Yıldiran Y., Avcu E., Çınar A., Kumlama Yönteminde Farklı Nozul Tasarımlarının Partikül Çarpma Hızlarına ve Erozyon Oranlarına Etkileri, *1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*, Afyon Kocatepe University, Turkey, 21-22 April 2016.

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında Kocaeli/ İzmit'te doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini İzmit'te tamamladı. Üniversite eğitimini 1994-1999 yılları arasında Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu'nun Uçak Gövde Bakım Bölümünde okudu. 2009-2011 yılları arasında Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Eğitimi Anabilim dalında Yüksek Lisansını tamamladı. 2003 yılından itibaren Kocaeli Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümünde Öğretim görevlisi olarak görev yapmaktadır.

