

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KATI PARTİKÜL EROZYONUNUN ENDÜSTRİYEL ALANDAKİ
ÖNEMİ**

AHMET YAVUZ

KOCAELİ 2018

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

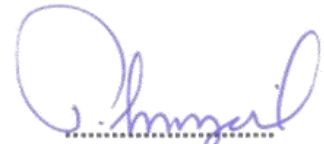
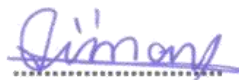
KATI PARTİKÜL EROZYONUNUN ENDÜSTRİYEL ALANDAKİ
ÖNEMİ

AHMET YAVUZ

Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK
Danışman, Kocaeli Üniversitesi

Prof.Dr. Volkan GÜNAY
Jüri Üyesi, Yeditepe Üniversitesi

Doç.Dr. Sinan FİDAN
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi


Tezin Savunulduğu Tarih: 11.06.2018

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Gerek ülkemizde gerekse dünyada ciddi derecede ekonomik kayıplara neden olan aşınmaya maruz kalmış malzemelerin temizlenme yöntemlerinin incelendiği bu çalışmada, aşınmanın engellenebilmesi için yaklaşımlarda bulunulmuştur.

Tez çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına yön veren, bana güvenen ve yüreklendiren değerli danışman hocam sayın Prof.Dr. Tamer SINMAZÇELİK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca hayatım ve çalışmalarım boyunca maddi manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme de teşekkür ederim.

Haziran - 2018

Ahmet YAVUZ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iv
TABLolar DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ.....	viii
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
GİRİŞ.....	1
1. AŞINMA VE AŞINMA TÜRLERİ.....	3
1.1. Adezyon Aşınması	4
1.2. Abrazyon Aşınması	4
1.3. Mekanik Aşınma.....	5
1.4. Yorulma Aşınması	5
1.5. Katı Partikül Erozyonu	6
1.5.1. Katı partikül erozyonu alanları	6
1.5.2. Katı partikül erozyonunun fiziksel mekanizması.....	8
1.5.2.1. Bir aşınma yüzeyinin makroyapısı ve mikroyapısı	8
1.5.2.2. Malzeme yüzeyi gerilme dağılımı ve yapısal değişimi	11
1.5.2.3. Partiküllerin parçalanması ve yüzeye yapışması	13
2. ENDÜSTRİYEL ALANLARDA KULLANILAN TEMİZLEME YÖNTEMLERİ	15
2.1. Tel Fırça Tekniği.....	15
2.1.1. El ile kullanılan tel fırçalar	15
2.1.2. Motorlu tel fırçalar	15
2.2. Katı Partikül Erozyonu Yöntemi ile Temizleme (Kumlama) Tekniği.....	16
2.2.1. Kumlama çeşitleri ve derecelendirilmesi	17
2.2.1.1. Otomatik kumlama.....	17
2.2.1.2. Manuel (seyyar) kumlama.....	18
2.2.1.3. Kumlamanın derecelendirilmesi	19
2.2.2. Aşındırıcı partiküller ve özellikleri.....	20
2.2.2.1. Aşındırıcı partikül malzeme yapısı ve sertliği	20
2.2.2.2. Aşındırıcı partikül şekil parametreleri	23
2.2.2.3. Aşındırıcı partikül boyut dağılımı ve partikül çapı	27
2.2.2.4. Aşındırıcı partiküllerin yoğunluğu	28
2.2.2.5. Aşındırıcı partiküllerin sayısı ve kinetik enerjisi	29
2.2.2.6. Aşındırıcı partiküllerdeki kirlilik	31
2.2.2.7. Aşındırıcı partikül malzeme davranışları	32
2.2.2.8. Aşındırıcı partikül çarpma açısı.....	35
2.2.2.9. Sıcaklık.....	38
2.2.3. Havanın etkisi	39
2.2.3.1. Nozuldaki hava debisi	39
2.2.3.2. Hacimsel debi	40
2.2.3.3. Havanın nozuldan çıkış hızı	43
2.2.3.4. Laval (yakınsak-ıraksak) nozullardaki hava akışı	44
2.2.3.5. Güç, itici akış ve sıcaklık.....	47
2.2.4. Nozuldaki aşındırıcı partikül hızı	47

2.2.4.1. Genel görünüm	49
2.2.4.2. Aşındırıcı partiküllerin debisi	50
2.2.4.3. Aşındırıcı partikül boşluğu.....	50
2.2.5. Nozul-jet yapısı	51
2.2.5.1. Havanın nozuldaki çıkış yapısı	51
2.2.5.2. Nozuldaki hava-partikül yapısı	52
2.2.5.3. Nozul basıncı tasarımı	52
2.2.6. Aşındırıcı partiküllerin dağılımı	55
2.2.6.1. Radyal aşındırıcı partikül dağılımı	55
2.2.6.2. Partikül hız dağılım fonksiyonu	57
2.2.6.3. Radyal aşındırıcı partikül hız dağılımı	58
2.2.6.4. Aşındırıcı partikül kaplama alanı	59
2.2.6.5. Akış yoğunluğu	60
2.2.7. Aşındırıcı partikül hızına etki eden parametreler	61
2.2.7.1. Hava basıncının partikül hızına etkisi.....	61
2.2.7.2. Aşındırıcı kütleli debinin partikül hızına etkisi	62
2.2.7.3. Aşındırıcı partikül boyutunun partikül hızına etkisi.....	62
2.2.7.4. Aşındırıcı partikül şeklinin partikül hızına etkisi	63
2.2.7.5. Aşındırıcı partikül yoğunluğunun partikül hızına etkisi	64
2.2.7.6. Nozul mesafesinin partikül hızına etkisi	64
2.2.7.7. Nozul boyutunun ve nozul çapının partikül hızına etkisi	65
2.2.7.8. Nozul tasarımının partikül hızına etkisi.....	66
2.2.7.9. Nozul cidarı pürüzlülüğünün partikül hızına etkisi.....	67
2.2.8. Aşındırıcı enerji akışı ve nozul verimliliği.....	67
3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR.....	71
EKLER.....	73
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	80
ÖZGEÇMİŞ.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Bir kam milinin adezyon aşınması	4
Şekil 1.2.	Bir mil üzerindeki abrazyon aşınması	5
Şekil 1.3.	Bir malzeme üzerindeki yorulma aşınması	6
Şekil 1.4.	Erozyona uğramış türbin bıçakları, gerilim hattı, buhar kazanı ve boru devresi.....	7
Şekil 1.5.	Partiküllerin 90°de metal yüzeye çarpması ile oluşan kraterler	8
Şekil 1.6.	Partiküllerin $\phi < 90^\circ$ de metal yüzeye çarpması ile oluşan kraterler	9
Şekil 1.7.	Düşük çarpma açılarındaki çarpma krater şeması	9
Şekil 1.8.	Kg oranının çizik derinliğine (h) göre ilişkisi	10
Şekil 1.9.	Aşınmış yüzeylerin mikroyapısı	11
Şekil 1.10.	Tipik bakır aşınması	11
Şekil 1.11.	Sertlik ile yüzey gerilimi sertleşmesinin sonucu katman içindeki çeşitli derinlik değerleri.....	12
Şekil 1.12.	Yüzeydeki küresel partiküller	12
Şekil 1.13.	Taşlama işlemindeki küresel partikül yapısı	13
Şekil 1.14.	WC-6Co yüzeyine 0,9 mm partiküllerin yapışması.....	14
Şekil 2.1.	El ile kullanılan tel fırça	15
Şekil 2.2.	Motorlu tel fırça	15
Şekil 2.3.	Katı partikül erozyonu test düzeneği.....	16
Şekil 2.4.	Katı partikül erozyonu şekli.....	17
Şekil 2.5.	Otomatik kumlama	18
Şekil 2.6.	Manuel kumlama sisteminin temel elemanları	18
Şekil 2.7.	Manuel kumlama işlemi	19
Şekil 2.8.	Aluminyum oksit partiküllerinin mukavemeti	21
Şekil 2.9.	Partikül kırılma mukavemeti ile partikül boyutu arasındaki bağıntı	22
Şekil 2.10.	Küresel ve grit partiküllerdeki çatlaklar	22
Şekil 2.11.	Sertlik ölçme metodları Brinell ve Vickers	23
Şekil 2.12.	Aşındırıcı malzemeler: grit ve küresel yapıdaki partiküller	23
Şekil 2.13.	Aşındırıcı partiküllerin şekil parametreleri	24
Şekil 2.14.	Aşındırıcı malzemenin, partikül boyutu ve şekli arasındaki ilişkisi.....	24
Şekil 2.15.	Aşındırıcı bir malzemenin küresellik-yuvarlaklık diyagramı	25
Şekil 2.16.	Açılı ve yuvarlak şekilli partiküllerin tasarımları	26
Şekil 2.17.	Çelik küresel partiküllerin dairesellik faktörü	26
Şekil 2.18.	Mesh boyutunun mikron ölçüsünde karşılığı ve yaygın örnekleri	27
Şekil 2.19.	Elek analiz sonucunun grafiksel gösterimi	28
Şekil 2.20.	Aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisi.....	30
Şekil 2.21.	Partikül kinetik enerji ve frekans değerleri	31
Şekil 2.22.	Hedef yüzeye çarpmış bir partikülün kırılma yapısı ve şekli.....	32
Şekil 2.23.	Hedef malzeme sertliği ve çarpma sayısının çelik kürelere etkisi.....	33
Şekil 2.24.	Çelik partiküllerinin temizleme esnasındaki sertlik değişimi	34

Şekil 2.25.	Çelik telin çelik plakaya çarpması ile oluşturduğu sertlik değişimi	34
Şekil 2.26.	Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri	35
Şekil 2.27.	Aşınma hızının 120 m/s hızında çarpma açısına göre değişimi	36
Şekil 2.28.	Katı partikül erozyonunun olası mekanizmaları	37
Şekil 2.29.	Aşınma hızının (lg) 45° ve 90° çarpma açısındaki sıcaklığı	38
Şekil 2.30.	Hava için outflow (çıkış) fonksiyonu $\Psi = f(p_0/p)$	39
Şekil 2.31.	Nozul hava basıncı, nozul çapı ve kütleli debi ilişkisi	40
Şekil 2.32.	Kompresörün teorik hacimsel debisi ve önerilen değerler	41
Şekil 2.33.	Hava basıncı, nozul çapı, nozul geometrisi ve aşındırıcı tipinin hacimsel debi üzerindeki etkisi	42
Şekil 2.34.	Aşındırıcı tipinin hacimsel hava debisi üzerindeki etkisi	42
Şekil 2.35.	Nozul geometrisinin hacimsel hava debisi üzerindeki etkisi	43
Şekil 2.36.	Laval nozulun X-ray den çekilmiş resmi.....	44
Şekil 2.37.	ϕL ve ω arasındaki bağıntı	45
Şekil 2.38.	$p_0 = 0,1$ MPa için $\omega = f(p)$ fonksiyonu.....	45
Şekil 2.39.	Laval nozullarındaki teorik olarak havanın çıkış hızı	45
Şekil 2.40.	Yakınsak-ıraksak (Laval) nozullarındaki hava akışının nümerik simülasyon sonuçları.....	46
Şekil 2.41.	Kırılgan bir parçacığın davranışı	48
Şekil 2.42.	Sert metallerin ve çeliğin v_p çarpma hızındaki aşındırma oranı.....	48
Şekil 2.43.	Bir partiküldeki basınç hareketi ve yüksek hızdaki hava akışı	49
Şekil 2.44.	Mach ve Reynold sayısının sürtünme üzerindeki etkisi	50
Şekil 2.45.	Bir nozuldaki yüksek hızdaki havanın yapısı	51
Şekil 2.46.	Nozul tasarımının jet yapısı ve aşındırıcı hızlanmasına etkisi	52
Şekil 2.47.	Laval nozulların geometrisi ve dizayn basıncı arasındaki bağıntı.....	53
Şekil 2.48.	Yakınsak-ıraksak nozulun çıkış tarafındaki akış durumu	53
Şekil 2.49.	Bir nozulun ıraksak kesitindeki şok dalgası.....	54
Şekil 2.50.	Yakınsak-ıraksak nozulun çalışma koşulları	55
Şekil 2.51.	Nozul çıkışındaki yaklaşık aşındırıcı partikül dağılımı	56
Şekil 2.52.	Nozul çıkışındaki aşındırıcı partikül dağılımı	56
Şekil 2.53.	Yuvarlak kesitli nozul çıkışındaki aşındırıcı partikül dağılımı	57
Şekil 2.54.	2 farklı basınçta nozuldaki aşındırıcı partikül hızı.....	57
Şekil 2.55.	Hava jetindeki aşındırıcı partikül dağılımı	58
Şekil 2.56.	Nozullardaki radyal aşındırıcı partikül hız dağılımı	58
Şekil 2.57.	Aşındırıcı partikül kaplama alanı görüntüsü	59
Şekil 2.58.	Aşındırıcı partikül kaplama alanı ve süresi arasındaki bağıntı	60
Şekil 2.59.	Nozul akış yoğunluğu	60
Şekil 2.60.	Hava basıncı ve partikül boyutunun partikül hızına etkisi.....	61
Şekil 2.61.	Kütleli debi oranının partikül hızına ve nozul çapına etkisi	62
Şekil 2.62.	Aşındırıcı partikül boyutunun Laval nozullarındaki partikül hızına etkisi	63
Şekil 2.63.	Nozul tipinin ve farklı tip aşındırıcının partikül hızına etkisi	64
Şekil 2.64.	Nozul mesafesinin ve kütleli debinin partikül hızına etkisi	65

Şekil 2.65.	Nozul uzunluğu, çapı ve kütleli debinin partikül hızına etkisi.....	66
Şekil 2.66.	Nozul tipinin aşındırıcı partikül hızına etkisi	66
Şekil 2.67.	Nozul basıncı ve nozul kesitinin aşındırıcı partikül hızına etkisi	67
Şekil 2.68.	Nozul tipinin aşındırıcı enerji akışına etkisi	68
Şekil 2.69.	Nozul tipinin verimliliğe etkisi	68



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1. Katı partikül erozyonuna maruz kalan bileşenler	7
Tablo 2.2. % 0,2 C çelik hedef yüzeyine çarpan aşındırıcı partikül verileri	10
Tablo 2.3. Katı partikül erozyonunda kullanılan yıllık aşındırıcı oranı.....	20
Tablo 2.4. Aşındırıcı malzemelerin mukavemet parametreleri.....	21
Tablo 2.5. Aşındırıcı malzeme içeriğindeki kirliliğin limit değerleri.....	32
Tablo 2.6. İzin verilen maksimum tehlikeli maddeler	32
Tablo 2.7. Nozul çıkış katsayısı	40
Tablo 2.8. Bir nozulda bulunan partiküllerin arasındaki ortalama mesafesi.....	51



SİMGELER DİZİNİ

A_a	:Aşınma alanı, (mm^2)
A_c	:Hedef yüzeyin kesit alanı, (m^2)
A_g	:Dağılmış partikül alanı, (mm^2)
A_p	:Partikül kesit alanı, (m^2)
a_p	:Partikül ivmesi, (m/s^2)
C_A	:Kaplama alanı, (birimsiz)
C_D	:Direnç katsayısı, (birimsiz)
C_K	:Partikül çarpma sayısı, (birimsiz)
C_P	:Isı kapasitesi, ($\text{N.m}/(\text{kg}^\circ\text{K})$)
C_R	:Partikül konsantrasyonu, (birimsiz)
d_E	:Laval nozulu çıkış çapı, (mm)
d_N	:Nozul (boğaz) çapı, (mm)
d_p	:aşındırıcı partikül çapı, (mm)
d_{PG}	:Geometrik ortalama partikül çapı, (mm)
E_P	:Partikül kinetik enerjisi, ($(\text{kg.m}^2)/\text{s}^2$)
E'_P	:Enerji akışı, ($(\text{kg.m}^2)/\text{s}^3$)
F_D	:Direnç kuvveti, ($(\text{kg.m})/\text{s}^2$)
h_a	:Aşınma kalınlığı, (mm)
$\dot{I}_A$	:Havanın itici akışı, ($(\text{kg.m})/\text{s}^2$)
L_P	:Aşındırıcı partikül boşluğu, (mm)
m'_A	:Havanın debisi, (kg/s)
m_P	:Partikül kütlesi, (kg)
m'_P	:Partikül debisi, (kg/s)
m_w	:weibull modülü, (birimsiz)
N_P	:Partikül sayısı, (birimsiz)
N'_P	:Partikül çarpma sıklığı, (1/s)
n'_P	:Partikül sıklığı, $1/(\text{s.m}^2)$
p	:Statik hava basıncı, (kg/ms^2)
p_0	:Atmosfer basıncı, (kg/ms^2)
P_A	:Havanın akış gücü, ($(\text{kg.m}^2)/\text{s}^3$)
p_E	:Nozul çıkış basıncı, (kg/ms^2)
P_H	:Kompresör gücü, ($(\text{kg.m}^2)/\text{s}^3$)
P_P	:Nozul çıkışındaki partikül gücü, ($(\text{kg.m}^2)/\text{s}^3$)
Q'_A	:Havanın hacimsel debisi, (m^3/s)
r_P	:Partikül yarıçapı, (mm)
r_P^*	:Boyutsuz partikül yarıçapı
r_N	:Nozul yarıçapı, (mm)
r_N^*	:Boyutsuz nozul yarıçapı
r_1	:Girinti yarıçapı, (mm)
T_E	:Havanın nozuldan çıkış sıcaklığı, ($^\circ\text{K}$)
t_E	:Harcanan zaman, (s)
T_N	:Havanın nozula giriş sıcaklığı, ($^\circ\text{K}$)
v_A	:Havanın hızı, (m/s)
V_h	:Aşınma hacmi, (mm^3)
v_L	:Laval hızı, (m/s)
V_P	:Partikül hacmi, (m^3)
v_P	:Partikül hızı, (m/s)

v_T	:Nozul frekansı, (1/s)
ω	:Nozul akış parametresi, (birimsiz)
x	:Nozul mesafesi, (mm)
x^*	:Boyutsuz nozul mesafesi
α_N	:Nozul çıkış katsayısı, (birimsiz)
Π_N	:Nozul verimliliği, (%)
Φ	:Hız gücü, (birimsiz)
ϕ	:Partikül çarpma açısı
ϕ_L	:Laval nozul katsayısı, (birimsiz)
θ_J	:Genişleme açısı, ($^\circ$)
ρ_A	:Havanın yoğunluğu, (kg/m ³)
ρ_P	:Partikül yoğunluğu, (kg/m ³)
ρ_S^*	:Boyutsuz partikül akış yoğunluğu
σ_F	:Kırılma mukavemeti, (N/mm ²)
σ_{vp}	:Partikül hızı standart sapması, (m/s)
σ^*	:Mukavemet parametresi, (N/mm ²)



KATI PARTİKÜL EROZYONUNUN ENDÜSTRİYEL ALANDAKİ ÖNEMİ

ÖZET

Hayatın her alanında görülen aşınma, mühendislik malzemeleri açısından oldukça önemli bir parametredir. Bu tez çalışmasında, endüstriyel alanlarda meydana gelen aşınma ve çeşitlerinin metaller üzerindeki davranışları gözden geçirilmiştir. Ağırlıklı olarak, katı partikül erozyonu oluşum sürecinde ortaya çıkan mekanizmalara ve partikül erozyonuna etki eden faktörlere değinilmiştir.

Aşınmış malzemelerin katı partikül erozyonu yöntemi ile temizlenme şekli, yapılan deneylerden ana malzemeye zarar vermeden prosesin kısa sürede tamamlanması ve optimum şartlar oluşturulduğunda iyi sonuçlar elde edilebileceği bilgisi verilmiştir. Bu süreçte, aşınmış malzeme yüzeyine püskürtülen aşındırıcı partiküllerin tipi, geometrileri, çarpma hızları, malzemeye çarpma açıları, sertliği, debisi, deneyin yapıldığı ortam sıcaklığı ve nem miktarı gibi mekanik faktörlerinde öneminden bahsedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Katı Partikül Erozyonu, Malzeme, Metal.

IMPORTANCE OF SOLID PARTICLE EROSION IN INDUSTRIAL AREA

ABSTRACT

Wear, in all areas of life, is a very important parameter in terms of engineering materials. In this study, the attitudes of the wear and the varieties of metal on the industrial fields have been examined. It mainly refers to the mechanisms that occur during the formation process of solid particle erosion and the factors affecting particle erosion.

It has been shown that worn materials can be cleaned by solid particle erosion method, that the process can be completed in a short time without harming the main material from the experiments and good results can be obtained when optimum conditions are established. In this process, the importance of mechanical factors such as the type of abrasive particles sprayed on the surface of the worn material, geometries, impact velocity, impact angle, hardness, temperature, ambient temperature and moisture level are discussed.

Keywords: Wear, Solid Particle Erosion, Material, Metal.

GİRİŞ

Evrendeki hiçbir şey ilk günkü gibi olmayıp sürekli bir değişim içindedir. Bu değişimde aşınma mekanizmalarının etkisi çok büyüktür. Deniz kıyılarında dalgalardan dolayı oluşan kıyı erozyonu, çöllerde oluşan rüzgar erozyonu, doğadaki aşınmalara birer örnektir. Aşınma, gündelik yaşamın her alanında görülebilmektedir. Aşınmayı giyindiğimiz elbise ve ayakkabıların zamanla yıpranmasında, kullandığımız mobilya ve eşyaların hızla eskimesinde, bıçakların ve kesici aletlerin körelmesinde görebiliriz.

Yapılan istatistiki verilere göre makine elemanlarının ortalama %70'inin hurdaya ayrılmasının nedeni aşınmadır. Aşınma sonucunda meydana gelen malzeme kayıpları, aşınan parçaların yenisiyle değişmesi zorunluluğu, makinelerin bakım-onarım faaliyetleri için harcanan zaman ve emek ile bunun için istihdam edilen teknik personel de göz önünde bulundurulduğunda her yıl milli sermayeye oldukça büyük yükler gelmektedir. Mühendisler, her türlü makine aksamında aşınmanın etkilerini dikkate almak zorundadırlar.

Mühendislik malzemeleri, çalışma süresince aşındırıcı bir ortamda birçok zararlı dış etkiye maruz kalmaktadır. Çalışma mahallinin katı partikül içermesi ve ağır çalışma şartlarında katı partiküllerin yüksek hızlarda ve farklı açılarda tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine çarpmaları sonucunda erozif aşınma meydana gelmektedir. Bu erozif aşınma sonucu malzeme yüzeyinde malzeme kaybı meydana gelmekte ve çalışan ekipman hasara uğramaktadır. Erozif aşınma ile ilgili ilk çalışmalar 1950'li yıllarda başlayıp, günümüze kadar gelmiştir. Bu tarihten günümüze metalik/metalik olmayan malzemeler ve kompozit malzemeler gibi mühendislik malzemelerinin katı partikül erozyonu davranışları üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır.

Katı partikül erozyonu makine ve bileşenlerinin çalışmasını olumsuz etkileyen ve malzeme kayıplarına neden olan bir aşınma olayıdır. Yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu bu süreç sonucunda meydana gelen erozyon oranının en aza indirilmesine ve engellenmesine yönelik yapılan çalışmalardır. Katı partikül erozyonu diğer aşınma süreçlerinde olduğu gibi birçok farklı parametrelerin etkisi altında gerçekleşen kompleks bir olaydır. Bu nedenle konu ile ilgili yapılan birçok çalışma farklı mühendislik malzemelerinin farklı parametreler altında katı partikül erozyonu

sonucu göstermiş oldukları davranışlarının anlaşılmasına yönelik gerçekleştirilmektedir. Katı partikül erozyonu mekanizması iki farklı hedef doğrultusunda gerçekleşmektedir. Bunlardan birincisi, olumsuz ortam koşulları sonucu gerçekleşen, makine ve bileşenlerinin işlevini olumsuz yönde etkileyen kısımdır. İkincisi ise aşınmış malzemelerin yüzeylerinin işlenmesi ve temizlenmesi gibi yüzey işlemleri için kullanılan deneysel kısımdır.

Bir malzemenin hangi tür aşınmalara maruz kaldığı, bu aşınmaların hangi alanlarda görüldüğü ve aşınma yüzeyinin mikroskopik görüntüleri çalışmada mevcuttur. Aynı zamanda aşınmaya maruz kalmış bu malzemelerin temizlenme teknikleri, temizleme esnasında kullanılan aşındırıcı partiküllerin malzeme özellikleri, püskürtme nozulunun ve havanın özellikleri ve aşındırıcı partiküllerin hızına etki eden parametrelerden bahsedilmiş, bu yöntemle temizlenmiş malzemelerin görüntüleri paylaşılmıştır.

Bu tezin amacı, katı partikül erozyonu yöntemi kullanarak aşınmış malzemelerin yüzeyine belirli bir basınçta ve çarpma açısında aşındırıcı partiküller püskürterek malzeme yüzeyini temiz hale getirmektir. Katı partikül erozyonu, mühendislik malzemeleri üzerinde olumsuz etkiye sebep olmamakla birlikte malzemelere istenilen şeklin verilmesi ve malzemelerin yüzeylerinin işlenmesi amacıyla kullanılan faydalı bir proses olarak değerlendirilebilir.

1. AŞINMA VE AŞINMA TÜRLERİ

Aşınma, katı cisimlerin yüzeylerinden partiküllerin ayrılması ile bir malzeme kaybı şeklinde tanımlanmaktadır. Birbirine göre izafi hareket yapan cisimlerin sürtünmesiyle oluşur. Aşınma Triboloji biliminin bir konusudur. Yüzey değişikliği, çeşitli sebeplerle veya parçanın zorlanma durumuyla ilgilidir. Mekanik, fiziksel, elektriksel veya termal sebeplerle aşınma meydana geldiği gibi korozyon sonucunda da aşınma meydana gelebilmektedir.

Aşınma, birçok mekanik sisteminin performansını etkilemesine rağmen çoğu zaman tasarımda ihmal edilen bir faktördür. Çoğu zaman önemli tamirler veya yenileme masrafları gerektirir ve kullanılabilirlik oranını düşürür. Sonuçta aşınan parçaların tamir edilmediği ve yenilenmediği durumlarda makinenin randımanının düşmesine sebep olur.

Bahsedilen sebeplerden dolayı aşınma, tasarım sürecinde ele alınmalı ve kullanım sırasında bir problem olarak karşımıza çıkması önlenmelidir. Birbirleri üzerinde kayan katı yüzeylerde meydana gelen aşınma, yağlamanın durumundan, kayan yüzeylerin yapısından, kimyasal ortamdan, normal yük ve kayma hızı gibi işleme koşullarından etkilenebilir. Yüzeyler arasındaki izafi yer değiştirmenin belli bir amacının olması gerekmez. Birbirlerine bağlı olmayan yüzeylerde de hafif bir titreşimle aşınma olabilir. Dönen elemanlarda meydana gelen temas, kaymadan ziyade dönme hareketini kapsadığı için aşınma yorulma ile olur. Eğer sert partiküller yüzeye çarpıyorlarsa aşınma erozyonla oluşur.

Yukarıda anlatılanlara bağlı olarak aşınmanın oluşmasının genel sebepleri; uygun olmayan yağlama sonucunda metal-metal temasının olması, yağ içerisindeki aşındırıcı tanecikler ve toz parçalarının bulunması, temas alanında yağ filminin yırtılması ile yağ ve içerisindeki kimyasal katkıların oluşturacağı kimyasal aşınmalardan kaynaklanabilir.

Günümüzde birçok aşınma türü vardır. Bunlar; adezyon aşınması, abrazyon aşınması, mekanik aşınma, yorulma aşınması ve katı partikül erozyonudur.

1.1. Adezyon Aşınması

Yapışma, ovalanma ve kavrama olarak da bilinen, birbirleriyle etkileşen cisimlerin temas yüzeylerinin, bir normal kuvvet etkisi altında izafi hareket yapmaları sırasında görülen bir aşınma türüdür. Adezyon aşınması en yaygın aşınma türüdür ve genel anlamda aşınma kavramı bu aşınma için kullanılmaktadır. Çok iyi parlatılmış yüzeylerin bile çok küçükte olsa bazı bölgeleri birbirine temas eder. Çok küçük yüklemeler altında bile bu noktalardaki gerilmeler malzemenin akma sınırını geçebilir. Yüzeyde bulunan bu oksit tabakası parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaşma meydana gelir. Kayma hareketi esnasında bu noktalar kesilerek yenme ve aşınma olayı ortaya çıkar (Gürleyik, 1986). Şekil 1.1’de adezyon aşınması örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Bir kam milinin adezyon aşınması

Adezyon aşınmasının önlenmesi için; benzer veya kolay alaşım yapabilen malzemeler arasında meydana geldiğinden malzeme çiftinin biri sert diğeri yumuşak olarak seçilmelidir. Ayrıca, yağlamanın etkisi çok büyüktür. Sınır sürtünmesi bölgesinde dahi yüzeylere yapışmış yağ tabakası adezyon aşınmasını büyük ölçüde önlemektedir (Akkurt, 1990).

1.2. Abrasyon Aşınması

Çizilme aşınması olarak bilinen, birbirlerine göre izafi hareket yapan iki cismin temas yüzeyleri arasına çalıştığı ortamdan yabancı sert partiküllerin girmesiyle ortaya çıkan, aşındırdığı yüzeyde çizikler ve kesikler şeklinde hasara sebebiyet veren bir aşınma türüdür ve Şekil 1.2’de gösterilmiştir. Pulluk ve benzeri aletlerde, kırıcılar ve iş makinelerinin kazıma bıçakları ve çalışma ağızları gibi makine parçalarında bu tür aşınma çok sık görülür. Bu sert partiküller bir

zımpara tozu gibi yüzeyler arasında kazıyıcı bir etki yaparak eğelemeye ve taşlamaya benzeyen bir malzeme kaybının meydana gelmesine neden olurlar. Abrazyon aşınmasında önemli olan yüzeylerin sertliğidir. Yüzeylerin sertliği ısıtıl işlem veya yüzeylere sert malzeme kaplama ile elde edilebilir. Abrazyon aşınmasını önlemek için, yüzeyler sertleştirilmeli ve dışarıdan sert malzemelerin yüzeyler arasına girmemesi için iyi bir sızdırmazlık sağlanmalıdır.



Şekil 1.2. Bir mil üzerindeki abrazyon aşınması

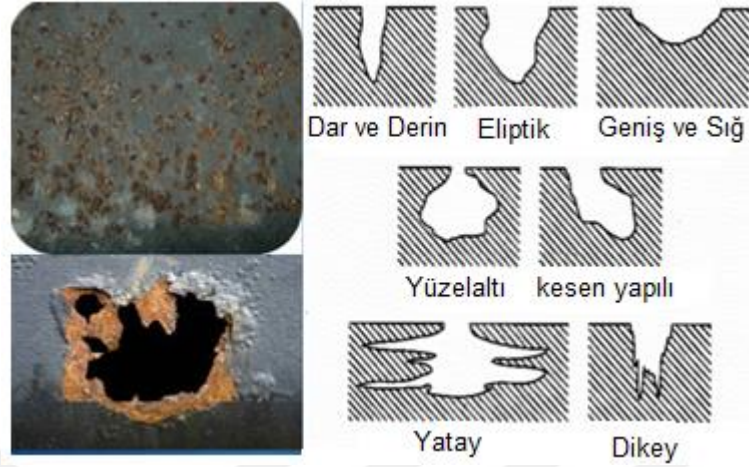
1.3. Mekanik Aşınma

Yüzeyler hava ile reaksiyona girerek aşınmanın şiddetli olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları meydana getirirler. Bununla beraber, özellikle kimyasal madde bulunan ortamda çalışan makine elemanlarının yüzeyleri bu maddelerle reaksiyona girerek ince fakat sert tabakalar oluştururlar. Aynı sonuç yağlarda bulunan maddelerden dolayı da gerçekleşir. Değişken yük altında bu sert tabakalar kırılır ve kırılan partiküller yerinden ayrılarak aşındırıcı partikülleri oluştururlar. Temiz kalan temas yüzeylerinde reaksiyon sonucu olarak tekrar bir sert tabaka oluşur, yük altında tekrar kırılır ve olay bu şekilde devam eder.

1.4. Yorulma Aşınması

Metal yüzeyinin bazı noktalarında çukur oluşturarak meydana gelen korozyon türüdür. Oyuklanma korozyonu genellikle pasifleşebilen metaller olarak nitelenen paslanmaz çelik, alüminyum alaşımlarında gözlenir ve değişik şekillerde noktasal derin oyuklar halinde kendini gösterir. Çoğu zaman oluşan çukurlar gözle görülemeyecek kadar küçüktür. Korozyon sonucu çukur gittikçe büyüyerek metalin o noktadan kısa sürede delinmesine neden olur. Bu nedenle çukur tipi korozyon çok tehlikeli bir korozyon türü olarak kabul edilir. Çok az malzeme kaybı olmasına

rağmen, ekipman kısa sürede devre dışı kalabilir. Şekil 1.3'te bir malzeme üzerindeki yorulma aşınması gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Bir malzeme üzerindeki yorulma aşınması

1.5. Katı Partikül Erozyonu

Erozyon aşınması, katı partiküller içeren bir akışkanın bir yüzeye çarpması durumunda oluşur. Başka bir tarifile, belirli bir hıza sahip olan katı partiküllerin metal bir yüzeye çarptığı zaman, yüzeyin üst tabakasında malzeme kaybı meydana getirmesi sonucu oluşan aşınmaya erozyon aşınması denir. Yüzeyin üst tabakasından malzeme kaybının devam etmesi halinde kullanım yerine bağlı olarak ciddi mekanik olumsuzluklara yol açabilir. Makine elemanlarının erozif ortamlarda bulunması durumunda yüzeylere sıvı damlaları veya katı partiküllerinin çarpması sonucu elemanların ömürlerinde azalmalar meydana gelmektedir. Diğer tribolojik süreçlerde olduğu gibi katı partikül erozyonu da kompleks bir süreçtir. Tribolojik etkileşimde bulunan unsurlar arasındaki termal, kimyasal ve fiziksel reaksiyonlar erozyon şekli ve miktarını yakından etkiler.

1.5.1. Katı partikül erozyonu alanları

Katı partikül erozyonu, son yıllarda artan bir ilgi görmüştür. Bu ilgi, kömür dönüştürme santralleri üzerinde yapılan araştırmalardan, bu sistemlerde elde edilen gelişmelerden ve santrallerin değişik ekipmanlarında katı partiküllerin akışını sağlamak amacıyla oluşan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Bu partiküllerin hareketli kanatlara, valf deliklerine, boru bağlantıları ile boru dirseklerine ve diğer yüzeylere çarpmasıyla şiddetli erozyon aşınması oluşturmaktadır. Düşük ve orta hızlı katı partikül erozyonuna maruz kalan sünek metallerin elemanları önce ağırlık kaybı

olmadan yüzey deformasyona uğrar sonra da çok tartışılan ve teorisi üzerinde durulan malzeme kaybı prosesi meydana gelir.

Katı partiküllerin çarpmasıyla meydana gelen malzeme kaybı, erozyon proseslerinin en yaygın olanıdır. Bu tip hasarların görülebileceği yerlerden bazıları; enerji dönüşüm sistemlerinde kömürün küçük tanecikler halinde yaygın kullanılması, büyük türbinlerde oksit tabakaların kopması ve ardından kanatlara ve yüzeylere çarpması olarak sayılabilir. Tablo 2.1’de partikül erozyonuna maruz kalan bileşenler gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Katı partikül erozyonuna maruz kalan bileşenler

Sistem	Örnek parçası
Kimyevi fabrika	Hava akışlı abrazif malzeme taşıyıcı
Hidrolik maden ve makinalar	Pompalar ve valfler
Öteleme sistemi	Roket motor memeleri, silah fırçaları
Yanma sistemleri	Yanıcı memeleri, ısıtıcılar
Kömür gaz prosesi	Türbin, kilit hazne valfleri, genişleme türbini
Kömür sıvı prosesi	Üretilen buharı kısmak için boşgaz
Uçak motoru	Kompresör ve türbin kanatları
Helikopter motoru	Rotor ve gaz türbini kanatları

En genel anlamda erozif aşınma, yüzeye katı partiküllerin tekrarlı çarpması sonucu meydana gelen malzeme kaybı şeklinde tanımlanan bir hasar mekanizması türüdür. Bu tür hasarlar daha çok uçak motorları, buhar kazanları, sondaj cihazları gibi çeşitli endüstriyel alanlarda görülmektedir. Şekil 1.4’te katı partikül erozyonuna uğramış türbin bıçakları, gerilim hatları ve buhar kazan borusu gösterilmektedir.



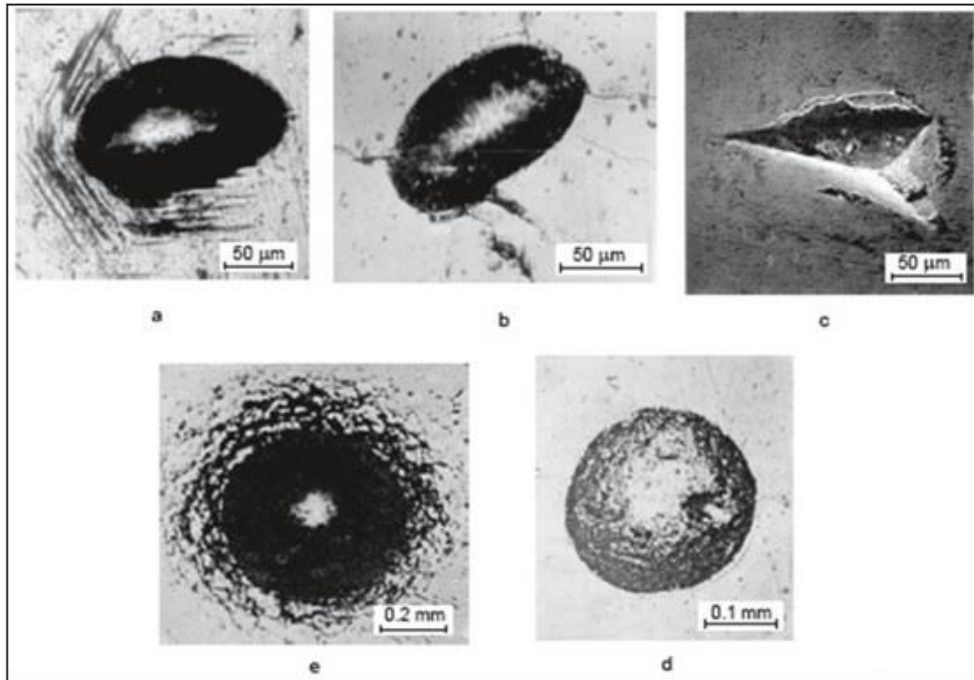
Şekil 1.4. Erozyona uğramış türbin bıçakları, gerilim hatları, buhar kazanı ve boru devresi

1.5.2. Katı partikül erozyonunun fiziksel mekanizması

Aşındırıcı partiküller ile hedef malzeme yüzeyi arasında oluşan süreç 3 aşamada anlatılmaktadır. Bir aşınma yüzeyinin makroyapısı ve mikroyapısı, hedef malzeme yüzeyi katmanındaki gerilme dağılımı ile yapısal değişiklikler ve aşındırıcı partiküllerin parçalanması-yüzeye yapışması.

1.5.2.1. Bir aşınma yüzeyinin makroyapısı ve mikroyapısı

Erozyon sürecinde, aşınmış bir parçanın makroyapısı ve mikroyapısı değişir. Aşındırıcı partikül çarpmasından kaynaklı yüzeyin mikroyapısında meydana gelen değişimler, erozyonun fiziksel mekanizmasının incelenmesini sağlamıştır. Çarpma açısına, hedef malzemeye ve partikül özelliklerine bağlı olarak, malzeme yüzeyinde çeşitli çizikler bulunur. Aşındırıcı partiküllerin hedef malzemeye normal çarpma açısında ($\phi=90^\circ$) çarpmasıyla hedef malzemede oluşan deformasyonlar Şekil 1.5'te gösterilmektedir. Şekilde partiküllerin a- Kobalt malzemesi üzerine 80 m/s; b- Tungsten c- WC-6Co sert metal yüzeye 225 m/s, d- %0,2 C çelik yüzeyi üzerine 50 m/s ve e- 225 m/s hızında çarptığındaki etkisini göstermektedir.

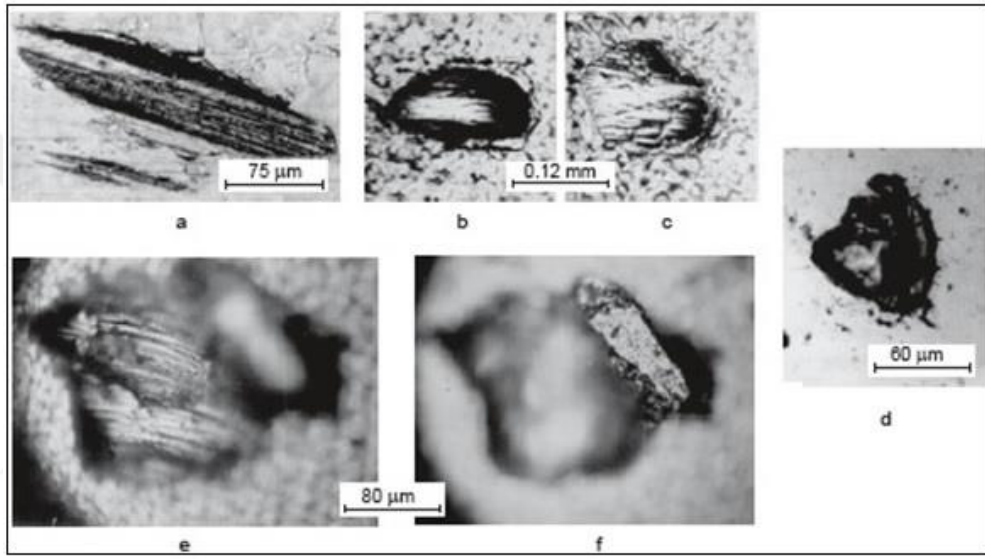


Şekil 1.5. Partiküllerin 90°de metal yüzeye çarpması ile oluşan kraterler, (Kleis I. ve diğ., 1960-1970)

Şekil 1.6, aşındırıcı partiküllerin $\phi < 90^\circ$ çarpma açısındaki etkilerini göstermektedir. Çarpma açısına, partikül büyüklüğüne ve yüzeye çarpma esnasındaki konumuna bağlı olarak çarpma etkisi farklılık gösterebilir. Şekilde a- 0,4-0,6 mm'lik taş ocağı

kumunun oluşturduğu % 0,2 C çelik, $\phi = 3^\circ$, $v_p = 100$ m/s; b,c – 0,3-0,4 mm'lik taş ocağı kumunun oluşturduğu % 0,2 C çelik, $\phi = 30^\circ$, $v_p = 150$ m/s; d- 0,3-0,4 mm'lik taş ocağı kumunun oluşturduğu sertleştirilmiş çelik 710 HV, $\phi = 45^\circ$, $v_p = 80$ m/s; e, f - % 0,2 C çelik 0,3-0,4 mm partikül taş ocağı kumu izleri, $\phi = 40^\circ$, $v_p = 150$ m/s yüzeyindeki taş ocağı; e- deformasyonun alt kısmı; f- izlerin kenar kısımda yoğunlaşmış resimleri gösterilmektedir.

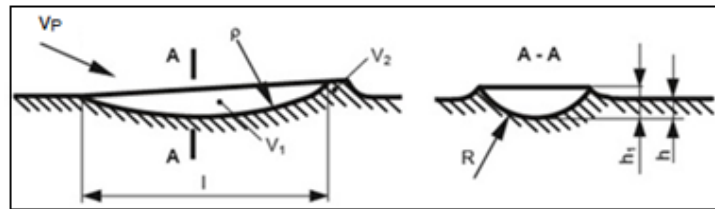
Aşındırıcı partiküller, yüzeyden herhangi bir malzeme kaldırmadan çevresine basınç uygulayarak deforme de etmektedir.



Şekil 1.6. Partiküllerin $\phi < 90^\circ$ de metal yüzeye çarpması ile oluşan kraterler (Hutchings IM. ve diğ.,1980)

Çarpma etkisiyle oluşan kraterin hacmi ile yüzeyden kaldırılan malzeme arasındaki oranı hesaplamak için numune parçaların malzeme yüzeyleri bir mikroskop kullanılarak incelenmiştir.

Şekil 1.7'deki semboller kullanılarak Tablo 2.2'de düşük çarpma açılarındaki sonuçlar elde edilmiştir. V_1 - çarpma kraterinin hacmi, V_2 - yüzeyden çekilen ancak yüzeyden ayrılmayan malzeme hacmini göstermektedir.



Şekil 1.7. Düşük çarpma açılarındaki çarpma krater şeması

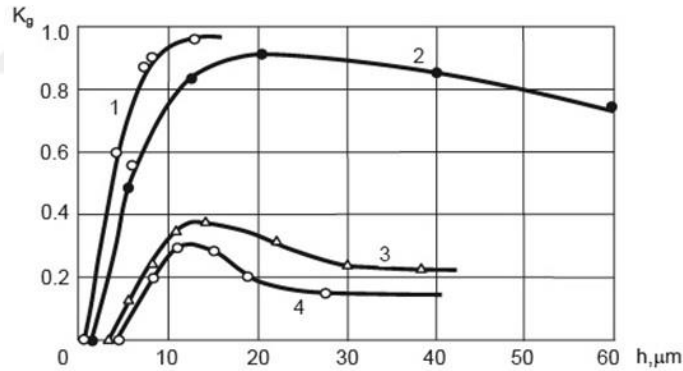
Tablo 2.2. % 0,2 C çelik hedef yüzeyine çarpan aşındırıcı partikül verileri, $v_p = 97$ m/s (Kleis I., 1959)

ϕ°	$l, \mu m$	$h, \mu m$	$\rho, \mu m$	V_1 ve $V_2, (\mu m^3 \times 10^{-3})$	$K_g = (V_1 - V_2)/V_1$	Z, %	K_g'
3	197	3	1.618	6,7 3,4	0,49	100	0,49
9	136	4	580	12,2 7,9	0,35	93	0,36
15	136	7,6	308	29,8 21,4	0,28	73	0,35
30	126	10,3	192	46,4 38,7	0,17	53	0,26

Not: Her testte en az 15 krater ölçülmüş olup, tabloda ortalamaları gösterilmektedir. Z, çarpma etkisiyle malzemenin yüzeyinden kaldırılan krater yüzdesini göstermektedir.

Yapılan testlerde sertleştirilmiş çeliklerin K_g (Hedef malzeme yüzeyinden çekilmeyen malzeme oranı, $(V_1 - V_2)/V_1$) oranlarının sünek çeliklerden oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Yani sünek malzemelerde yüzeyden çekilme miktarları sertleştirilmiş çeliklere oranla daha fazladır.

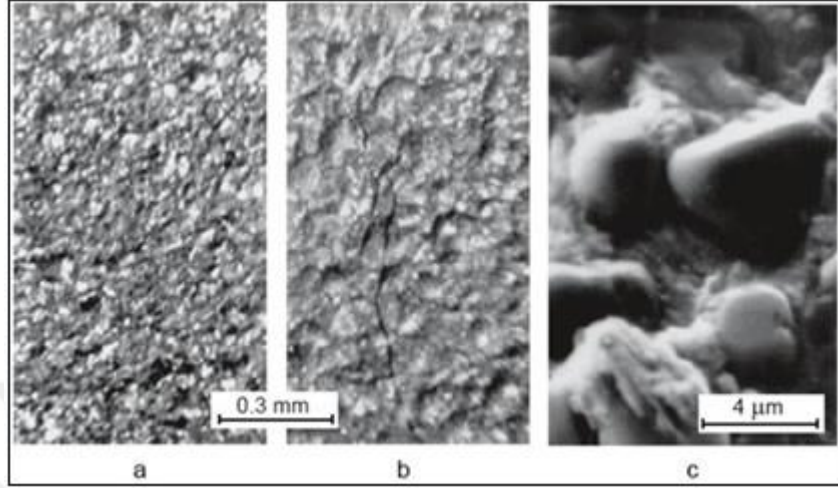
Şekil 1.8'deki eğriler ilgili test sonuçlarını göstermektedir. Şekilde 1 numaralı eğri sertleştirilmiş çeliği, 2 numaralı eğri dökme demiri, 3 numaralı eğri tavllanmış çeliği ve 4 numaralı eğri bakır'ı temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü üzere sertleştirilmiş çeliğin çizik derinliği dökme demir, tavllanmış çelik ve bakıra oranla daha düşüktür.



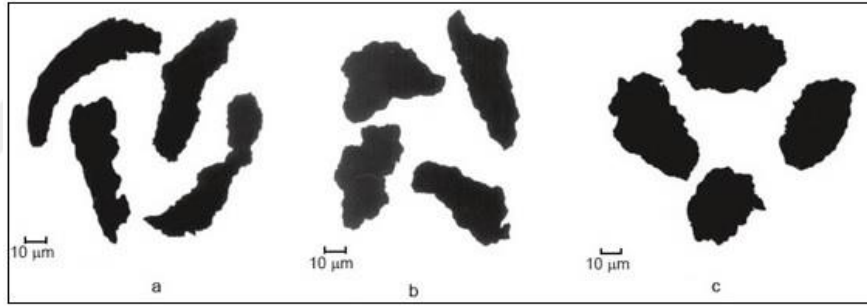
Şekil 1.8. K_g oranının çizik derinliğine (h) göre ilişkisi (Bogomolov N.I., 1962)

Yüzeyde kalan kraterlerin hacmi partiküllerin çarpmasıyla önemli ölçüde değişirken, Şekil 1.9.a,b'de gösterildiği gibi kraterler üst üste geldiğinde, yüzeyin mikroyapısı farklı açılarda oldukça benzerdir. Şekil 1.9c'deki gibi sert metallerdeki karbür taneleri arasındaki bağların kopması oldukça sık görülür ve çarpma açısından bağımsızdır. Şekil 1.19'da a- çelik % 0,2 C, $v_p = 50$ m/s, $\phi = 30^\circ$, 0,4-0,6 mm korundom kumu; b- "a" ile aynı, $\phi = 90^\circ$; c- TiC-Ni-Co sermet, $v_p = 80$ m/s, $\phi = 90^\circ$, demir 0,1-0,3 mm özelliğindedir.

Tipik olarak bakır esaslı aşınmış partiküllerin görüntüleri Şekil 1.10'da gösterildiği gibidir. Çarpma hızı $v_P = 130$ m/s, korundum partikülleri çapı 0,3-0,4 mm: a- $\phi=3^\circ$, b- $\phi=15^\circ$, c - $\phi=90^\circ$



Şekil 1.9. Aşınmış yüzeylerin mikroyapısı (Bogomolov Nl., 1962)

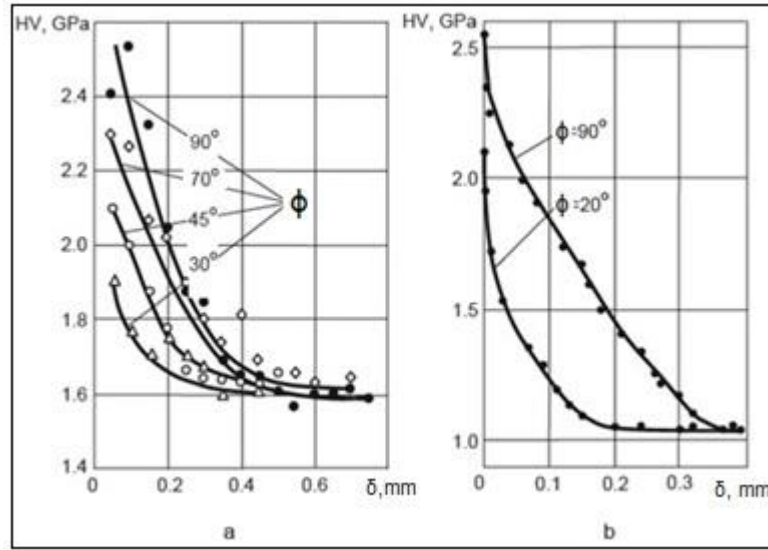


Şekil 1.10. Tipik bakır aşınması (Bogomolov Nl., 1962)

1.5.2.2. Malzeme yüzeyi gerilme dağılımı ve yapısal değişimi

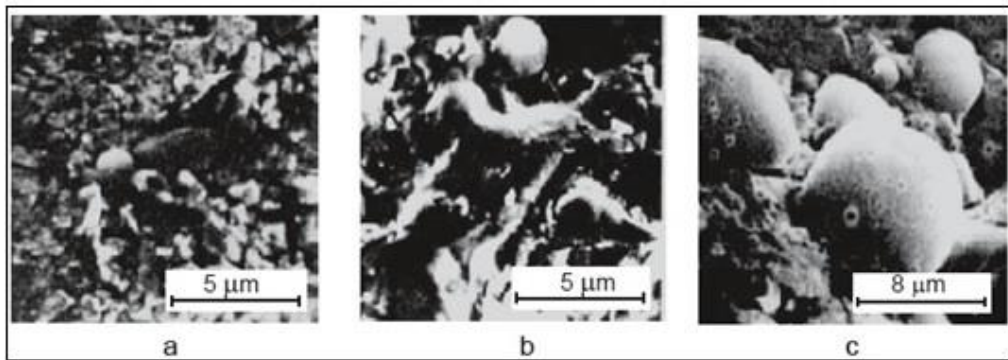
Bir metalin yorulma direncini artırmak için “shot peening” işlemi uygulanır. Sert malzemeden oluşan metal partikülleri hedef sünek malzemeye çarptırılarak yüzey daha sert hale getirilir.

“Shot peening” yöntemiyle elde edilmiş yüzey sertlik değerleri ile katman kalınlığı Şekil 1.11a'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi yüksek çarpma açılarında yüzeyin sertlik değerleri daha fazladır. Buna benzer olarak kum partiküllerinin saf demir yüzeyinde oluşturduğu değerler Şekil 1.11b'de gösterilmiştir. Şekilde derinlik değeri δ : a -% 0,3 C çelik, 0,5 MPa hava ile 1-1,5 mm'lik dökme demir pelletleri b- armco (saf) demiri 0,4-0,6 mm kuvars kumu, $v_P = 80$ m/s 'dir.



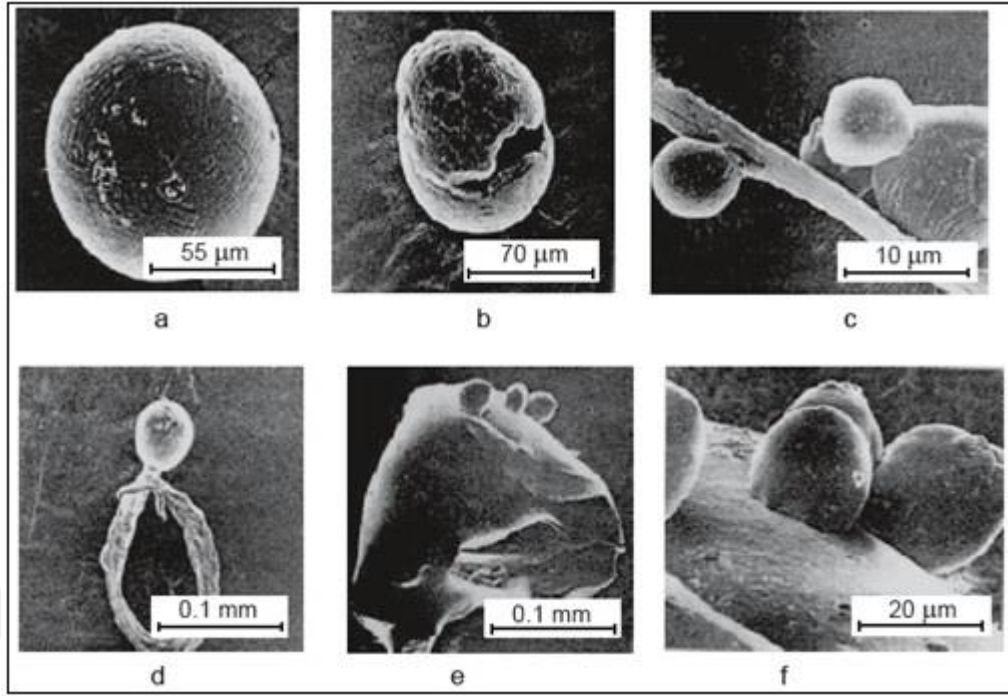
Şekil 1.11. Sertlik ile yüzey gerilimi sertleşmesinin sonucu katman içindeki çeşitli derinlik değerleri (Tadolder J.,1966)

Elektron mikroskobu kullanılarak, erozyon ve taşlama ile termal prosesler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Şekil 1.12'de küçük küreler kullanılarak yüksek çarpma hızlarında sert metallerin ve çeliğin yüzey tabakasında oluşturduğu örnekler gösterilmiştir. Şekilde a- sert metal WC-Co yüzeyinde, $v_p = 325$ m/s, $\phi = 90^\circ$, aşındırıcı-dökme demir partiküllerini 0,4-0,6 mm; b- sermet esaslı krom karbür yüzeyi, $v_p = 325$ m/s, $\phi = 90^\circ$, aşındırıcı kuvarz kumunu 0,4-0,6 mm; c- % 0,45 C çelik yüzeyinde, $v_0 = 108$ m/s, $\phi = 60^\circ$, aşındırıcı kuvars kumunu 0,4-0,6 mm göstermektedir.



Şekil 1.12. Yüzeydeki küresel partiküller (Kleis I. ve diğ., 1979)

Malzemeye uygulanan taşlama işleminde de, partiküllerin taşlama yüzeyine ve hedef malzemeye yapıştığı Şekil 1.13'te gösterilmiştir. Şekilde a- kobalt, taşlama hızı= 35 m/s; b,d -% 0,45 C çelik; c- % 0,45 C grup halinde erimiş çelik küresel partiküller, taşlama hızı = 35 m/s; e, f -taşlama tekerinin yüzeyi üzerinde % 0,45 C çelik küresel partiküller, taşlama hızı= 35 m/s olarak gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Taşlama işlemindeki küresel partikül yapısı (Kleis I. ve diğ., 1979)

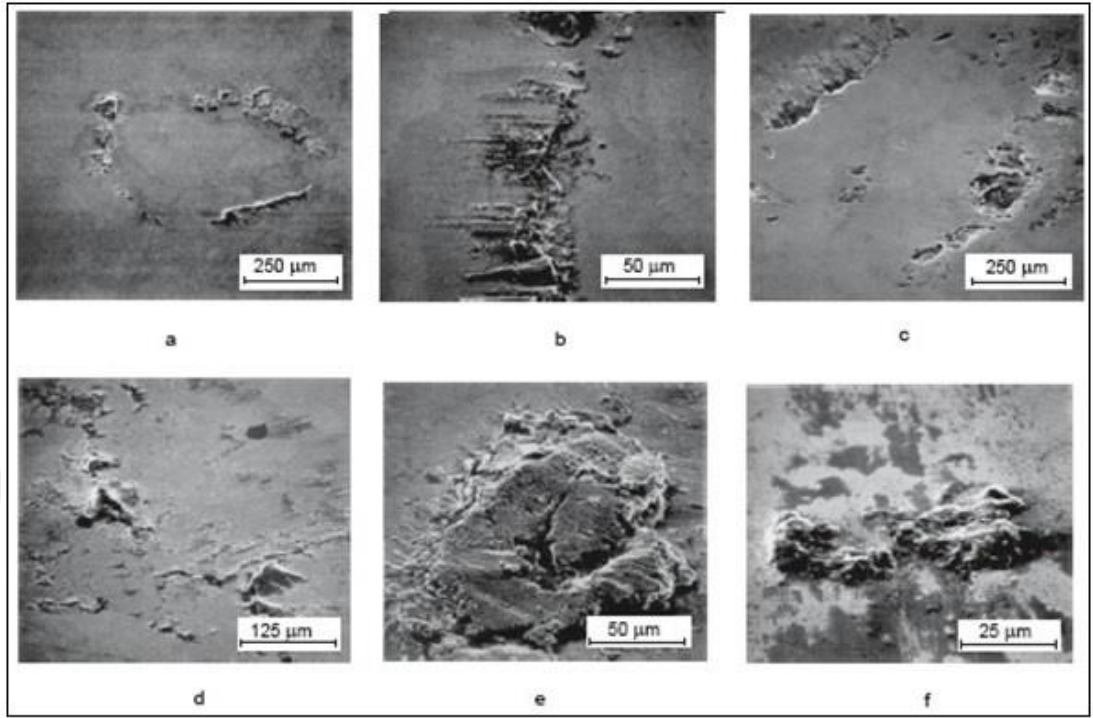
Aşındırıcı taneler, basıncına ve yönüne bağlı olarak metal yüzeylerle temas ettiğinde, çevresindeki yüksek sıcaklıklar meydana gelir, taşlama esnasında kıvılcımlar ortaya çıkar.

1.5.2.3. Partiküllerin parçalanması ve yüzeye yapışması

Partiküllerin parçalanıp yüzeyde kalıntı/çöküntü oluşturması ile ilgili bir çok çalışma yapılmıştır. Mekanik olarak yüzeye yapışan ve yüzeyde çöküntü oluşturan alüminyum gibi birçok malzeme vardır. Büyük çarpma açılarında malzemenin kütlelerinde kayıplar meydana gelir. Bununla birlikte, bu esnada oluşan partiküllerin hedef malzemeye yapışması yüksek hızlarda daha çoktur.

Şekil 1.14, elektron mikroskobu ile gözlenmiş sert metallere yapışan partikülleri göstermektedir. Şekilde çarpma hızı $v_p=225$ m/s, $\phi=90^\circ$: a- küresel dökme demir partiküllerini; b- a'daki şeklin büyütülmüş parçasını, c, d- dökme demir partikülü ile oluşan düzensiz şekilleri; e- c'deki şeklin büyütülmüş parçasını; f- kuvars kumu partiküllerini göstermektedir. Partiküller, hedef malzeme yüzeyinde oldukça düzensiz olarak bulunabilirler. Şekil 1.14 a'daki gibi, küresel dökme demir partiküllerin çarpması ile oluşan kalıntıların merkezinde herhangi bir deformasyon görülmeyebilir.

Şekil 1.14 b'de ise malzeme yüzeyinde oluşan görüntü kalın ve kısmen ergimiş metali anımsatmaktadır.



Şekil 1.14. WC-6Co yüzeyine 0,9 mm partiküllerin yapışması (Kleis I. ve Uuemõis H, 1974)

2. ENDÜSTRİYEL ALANLARDA KULLANILAN TEMİZLEME YÖNTEMLERİ

Günümüzde endüstriyel alanların çoğunda aşınmaya uğramış malzeme temizliği yapılmaktadır. Bunlardan ikisi tel fırça tekniği ve katı partikül erozyonu (kumlama) tekniğidir.

2.1. Tel Fırça Tekniği

Tel fırçalarla gereç yüzeyinin temizlenmesi, elle ve motorla olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

2.1.1. El ile kullanılan tel fırçalar

Fabrikasyon üretiminde temizlenecek parçaların fazlalığı motorla çalışmayı, küçük işletmelerde parça sayısının azlığı elle kullanılan tel fırçaları (Şekil 2.1.) ön plana çıkarır. Dövme demirciliği, sıcak kalıplama ya da döküm yoluyla üretilmiş parçaların yüzeyinde bulunan oksit tabakasının temizliği elde kullanılan saplı fırçalar ile yapılır.



Şekil 2.1. El ile kullanılan tel fırça

2.1.2. Motorlu tel fırçalar

Döner fırçalar da denilen bu gruptaki fırçalar, polisaj motoru miline takılıp kullanılır. Parça yüzeyinden oksidi temizleyecek fırça tellerin uçlarıdır. Tel fırçalar ile mat görünümlü yüzey temizliği yapılır. (Şekil 2.2.)



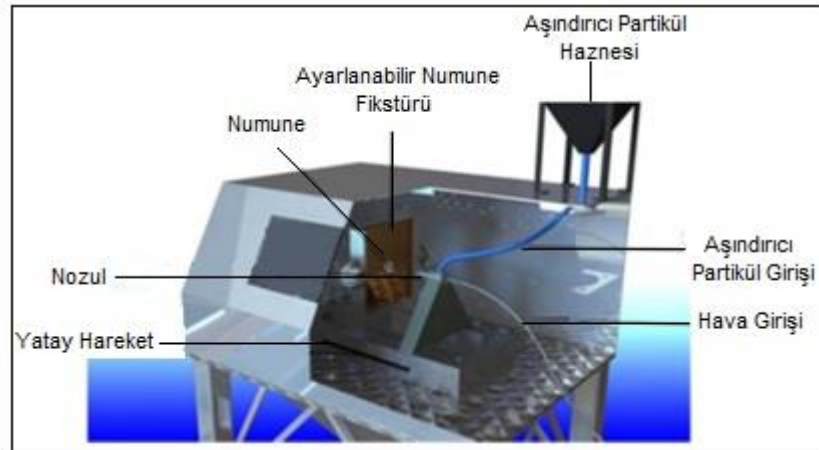
Şekil 2.2. Motorlu tel fırça

2.2. Katı Partikül Erozyonu Yöntemi ile Temizleme (Kumlama) Tekniği

Katı partikül erozyonu ile temizleme (kumlama), metal malzemelerin üretiminden sonraki temizliğinde veya zaman içerisinde kirlenmesinden (pas, yağ, boya vb.) kaynaklı oluşan istenmeyen maddelerin yüzeyden atılmasında kullanılan bir mekanik temizleme işlemidir. İşlemin amacı, malzemeyi sonraki prosese hazırlamaktır. Kumlama makinelerinde çeşitli kumlama aşındırıcı malzemeleri kullanılır. Bunlar, metal esaslı, cam ve mineral esaslı olabilmektedir. Her çeşit kumlama makinesinde kullanılabilecek aşındırıcı çeşidi farklıdır. Kumlama işlemlerinde nozul, nozul tutucu, kumlama maskesi, kumlama eldiveni gibi çeşitli kumlama malzemeleri kullanılır. Kumlamada kullanılan kum türleri; Silis, oldukça ince çeşitleri olan silis kumu, genellikle ince saçlarda, hafif şiddette kumlama yapılacağı zaman kullanılır. Bazalt, tozuması az denilebilecek bu kum genellikle kapalı ortamlarda kumun geri dönüşümlü olarak kullanılabileceği yerlerde kullanılır. Grid, tozuması en az ve kumlama gücü en iyi olan kum çeşididir.

Katı partikül erozyonu test düzeneği Şekil 2.3.'te verilen bileşenlerden oluşmaktadır. Kompresörden sağlanan basınçlı hava ile hızlandırılan aşındırıcı partiküller yüksek hızlarda tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine çarparak erozif aşınmayı meydana getirir.

Aynı zamanda hava kompresöründen çıkan havanın kurutulmasını sağlayan bir ünite de hava kompresörünün yanında mevcuttur. Sonuçta aşındırıcı partiküllerin topaklanması ve aşındırıcı partikül taşıma sisteminin tıkanması engellenerek, aşındırıcı partiküllerin ideal bir akışkanlık ile sistemde rahatlıkla ilerlemesi sağlanmış olur.

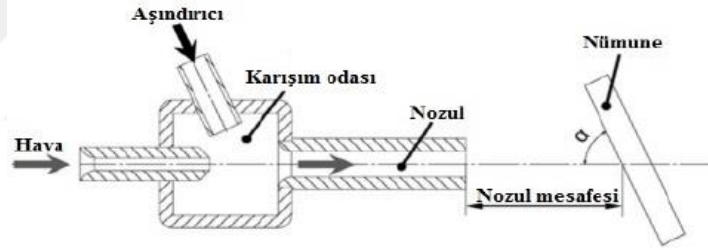


Şekil 2.3. Katı partikül erozyonu test düzeneği (Kaplan M. ve diğ., 2016)

Katı partikül erozyonu özel olarak tasarlanmış kumlama düzeneğinde gerçekleştirilmektedir. Kumlama düzeneği basınçlı hava kompresörü, basınçlı hava tankı, kumlama kabini, farklı açılarda ayarlanabilir numune fikstürü ve nozul elemanlarından oluşmaktadır.

Nozul, kumlama kabini içerisine sabitlenmiştir ve nozulun açılıp kapatılması kabin dışarısından bir pedal vasıtasıyla kontrol edilebilmektedir. Kumlama basıncı da kabin dışarısına yerleştirilen bir basınç regülatörü ile ayarlanabilmektedir.

Kumlama kabini içerisine numunenin sabitlenmesi ve numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülmesini sağlayan özel bir numune fikstürü yerleştirilmiştir. Bu düzenek ve kabin içerisine sabitlenmiş nozul ile numunenin farklı partikül çarpma açılarında döndürülmesine imkan veren fikstürün hareketi sayesinde numune üzerine istenilen açılarda kum püskürtülebilmektedir. Kumlama işlemleri sırasında numuneler bu fikstür kullanılarak nozuldaki istenilen uzaklığa yerleştirilmiştir. Şekil 2.4'te katı partikül erozyonu sisteminin daha anlaşılır biçimi gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Katı partikül erozyonu şekli

2.2.1. Kumlama çeşitleri ve derecelendirilmesi

Kumlama işlemi genel olarak otomatik kumlama ve manuel kumlama olmak üzere ikiye ayrılır.

2.2.1.1. Otomatik kumlama

Otomatik kumlama makineleri, seri işlerde ve küçük parçaların temizlenmesinde büyük avantaj sağlamaktadır. Özellikle hat tarzında çalışan fabrikalarda, bir hattan gelen ürünleri durmadan sürekli olarak kumlanmaktadır. Ancak bu işlemin dezavantajı, büyük ebatlı malzemelerin seri olarak kumlama yapılabilmesine elverişli olmamasıdır. Şekil 2.5'te otomatik kumlama makinesi gösterilmektedir.

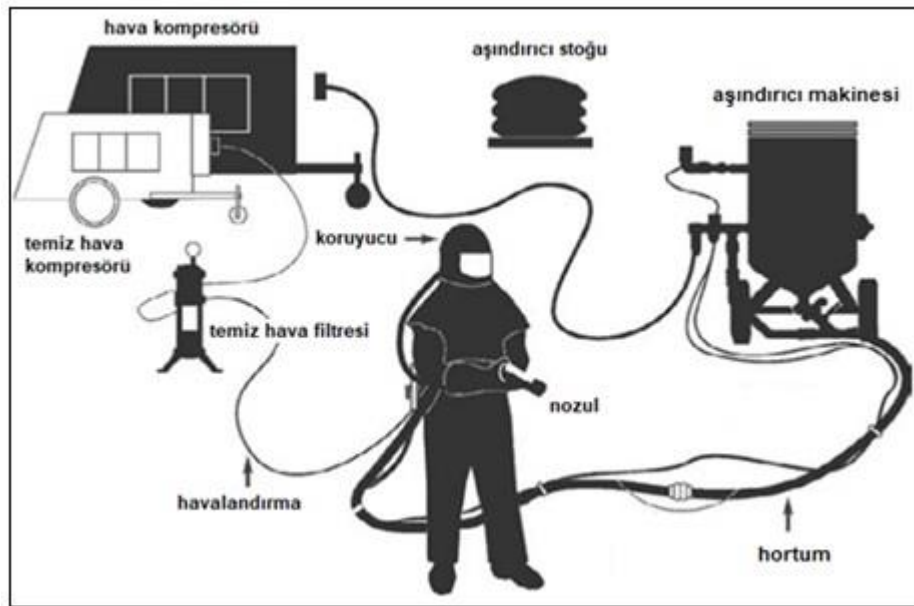


Şekil 2.5. Otomatik kumlama

2.2.1.2. Manuel (seyyar) kumlama

Manuel kumlama, yüksek tazyikli hava üreten bir kompresör, kumlama makinası, hortumlar vb. donanım ile her yerde yapılıp her cins malzemeye (ve genellikle büyük malzemelere) uygulanmaktadır.

Bu metodun dezavantajı fazla miktarda toz çıkardığından, toz olmadan kumlama yapmak için, sulu (ıslak) kumlama tercih edilmektedir. Bu sistemde kumlama yapılırken, özel bir yöntem ile kumlanan malzemenin üzerine ıslak kum püskürtüldüğünden toz çıkmamaktadır. Sulu (ıslak) kumlama daha çok marinalarda, çekek yerlerinde, fiber ya da ahşap teknelere yapılır. Manuel kumlama sisteminin temel elemanları Şekil 2.6'da ve örnek kumlama işlemi ise Şekil 2.7'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.6. Manuel kumlama sisteminin temel elemanları



Şekil 2.7. Manuel kumlama işlemi

2.2.1.3. Kumlamanın derecelendirilmesi

Kumlama işlemi çeliğin yüzeyinde istenmeyen oluşumların ne derecede temizlendiğine ve yüzeyin hangi ölçüde aşındırıldığına göre derecelendirilir. Bu konuda Dünyada bazı standart derecelendirmeler vardır. Türkiye’de İsveç standardı olan “Swedish Standards For Ground Vibrations and Airblast” SA 1, SA 2, SA 2,5 ve SA 3 dereceleri kullanılır.

SA 1, Paslanmış yüzeylerde son derece yüzeysel bir temizlik biçimi olup, piyasada “süpürme” olarak adlandırılır. SA 2, Çeliğin oldukça temizlenmiş, yüzeyin bir hayli pürüzlendirildiği, bir kumlama derecesidir. SA 2,5, Çelik yüzeyin gayet iyi pürüzlendirildiği, istenmeyen oluşumların tamamına yakın bölümünün temizlendiği ve çeliğin kendine has gri renginin kolaylıkla görüldüğü, piyasada en çok tercih edilen kumlama derecesidir. SA 3, Çelik yüzeyin çok iyi pürüzlendirildiği, istenmeyen oluşumların tamamen temizlendiği, çeliğin kendine has gri renginin tamamen ortaya çıktığı bir kumlama derecesi olup, piyasada tercih edilmeyen bir kumlama derecesidir. Çünkü uygulama zamanı ve maliyeti oldukça yüksektir.

Endüstride kullanılan temizlik uygulamalarında çok sayıda farklı aşındırıcı malzeme mevcuttur. En sık kullanılan aşındırıcı malzemeler Tablo 2.3'te listelenmiştir. Aşındırıcı malzemeler temel olarak, metalik ve metalik olmayan aşındırıcı malzemeler olmak üzere 2 çeşittir.

Tablo 2.3. Katı partikül erozyonunda kullanılan yıllık aşındırıcı oranı (Hansink, 2000)

Aşındırıcı tipi	Kullanım oranı (milyon ton)
Silisyum	1,6
Kömür	0,65
Çelik grit ve küre	0,35
Bakır	0,1-0,12
Nikel	0,05
Demir	0,005

Temizleme uygulamalarında, bir aşındırıcı malzeme; malzeme yapısı, malzeme sertliği, malzeme yoğunluğu, mekanik davranış, partikül şekli, partikül boyutu dağılımı ve ortalama partikül boyutu gibi parametrelere göre değerlendirilir.

2.2.2. Aşındırıcı partiküller ve özellikleri

2.2.2.1. Aşındırıcı partikül malzeme yapısı ve sertliği

Aşındırıcı malzemelerin yapısal özellikleri arasında kafes parametreleri, kristalografik grup ve simetri, kimyasal bileşim, bölünme ve kapanımlar (su-gaz dahil ve mineral içerme) gibi parametreler bulunmaktadır.

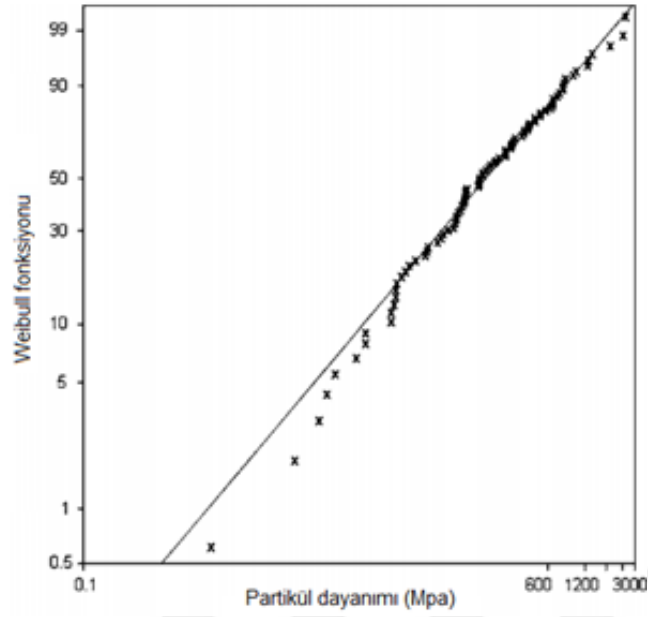
Ayrıca, aşındırıcı partiküllerin yapısında mikro çatlak ve çöküntü gibi kusurlar da bulunabilir. Bu kusurlar partiküllerin imalatından kaynaklı olabilmektedir.

Malzemelerin kırılma ve mukavemet dağılımları bazı denklemlerle tanımlanabilir. Aşağıda verilen Weibull dağılımı, aşınmış malzemeler için kullanılmaktadır. Kırılma mukavemeti (σ_F) ile partikül hacmi (V_P) arasındaki bağıntısını gösteren Denklem (2.1)'de;

$$F(\sigma_F)=1-\exp[-V_P.(\sigma_F/\sigma^*)^{m_W}] \quad (2.1)$$

verilmiştir.

Denklemdaki σ^* değeri sabittir ve malzemedeki kusur dağılımı ile ilgilidir. m_W , Weibull modülüdür ve Şekil 2.8'den bulunabilir. Şekil 2.8, alüminyum aşındırıcı partiküller için hesaplanmış, partikül dayanımı ile Weibull değerleri arasındaki bağıntıyı göstermekte olup, alüminyum oksit aşındırıcı partiküllerin boyutu yaklaşık olarak 10-500 μm aralığındadır.



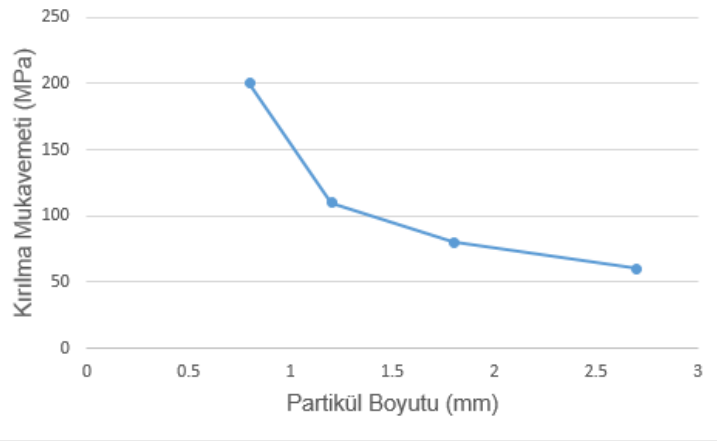
Şekil 2.8. Aluminyum oksit partiküllerinin mukavemeti (Verspui ve diğ., 1997)

Tablo 2.4'te farklı aşındırıcı malzemeler için yaklaşık olarak Weibull değerleri gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi partikül boyutu arttıkça kırılma mukavemeti ve Weibull modülü azalmakta olup aralarında ters orantı söz konusudur.

Tablo 2.4. Aşındırıcı malzemelerin mukavemet parametreleri (Yashima ve diğ., 1995)

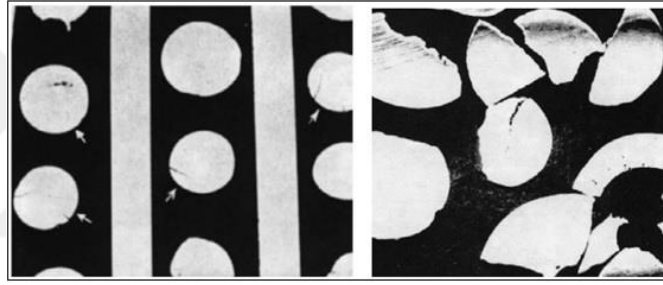
Aşındırıcı malzeme	Granül boyutu (mm)	Kırılma mukavemeti (MPa)	Weibull modülü
Kahverengi korundum	2,58	67,5	1,98
	1,85	78,6	2,47
	1,29	115,4	2,88
	0,78	200,5	3,47
Yuvarlak korundum	1,85	96,1	3,41
Beyaz korundum	1,29	79,5	2,57
Sinterli korundum	1,85	110,8	3,85
Yeşil silisyum karbür	1,85	62,2	1,92
Kuvars	0,1-2,0	-	21,0
Cam küreler	-	-	5,90

Şekil 2.9'da aşındırıcı partikül boyutu ile kırılma mukavemeti arasındaki ilişki gösterilmiştir. Buradan, daha büyük boyutlu partiküllerde daha çok çatlak görülür sonucu çıkarılabilir. Aynı zamanda çatlak sayısı arttıkça partikül üzerindeki kusurun boyutu kritik seviyeye gelebilir.



Şekil 2.9. Partikül kırılma mukavemeti ile partikül boyutu arasındaki bağıntı (Huang ve diğ.,1995)

Küresel yapıdaki dökme çelik %15, grit yapıdaki dökme çelik ise %40'tan fazla kırık partikül içermemelidir. (Şekil 2.10)

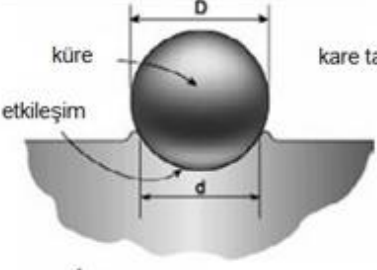
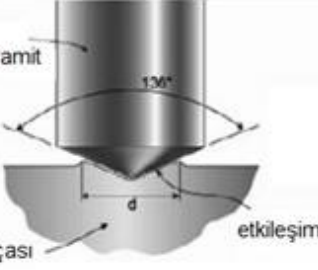
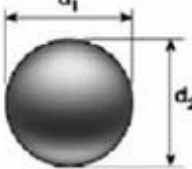
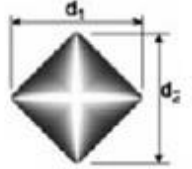


Şekil 2.10. Küresel ve grit partiküllerdeki çatlaklar

Aşındırıcı malzemelerin sertliği ile ilgili malzemelere sıklıkla uygulanan iki farklı (Brinell ve Vickers) indentasyon testi mevcut olup prensipleri Şekil 2.11'de gösterilmektedir. Laboratuvar uygulamalarında, aşındırıcı partikül, özel bir reçine matrisine daldırılır ve daha sonra indentasyon testinin yapıldığı düz bir kesit elde etmek için parlatılır.

Brinell sertlik ölçme yöntemi, kalibrasyonu yapılmış bir cihaz kullanılarak deneyi yapılacak malzemenin yüzeyine belirli bir yükün, belirli çaptaki sert malzemeden yapılmış bir bilya yardımıyla belirli süre uygulanması ve sonuç olarak meydana gelen iz'in çapının ölçülmesidir.

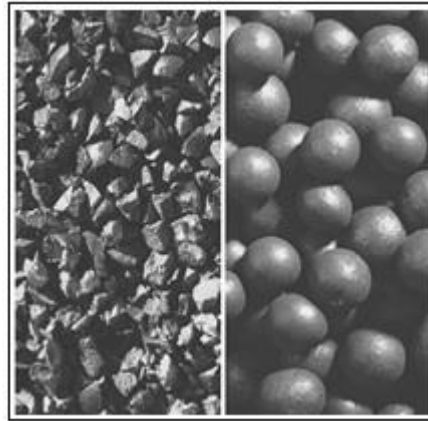
Vickers sertlik ölçme yöntemi ise, sertliği ölçülecek malzeme parçasının yüzeyine, tabanı kare olan piramit şeklindeki bir ucun belirli bir yük altında daldırılması ve yük kaldırıldıktan sonra meydana gelen izin köşegenlerinin ölçülmesidir.

Metod	Brinell	Vickers
Kural		
Ölçekleme		
Hesaplama	$H_B = \frac{F}{\frac{\pi}{2} \cdot D \cdot [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]}$	$H_V = \frac{2 \cdot F \cdot \sin(136^\circ/2)}{d^2}$

Şekil 2.11. Sertlik ölçme metodları Brinell ve Vickers

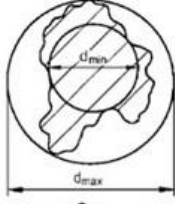
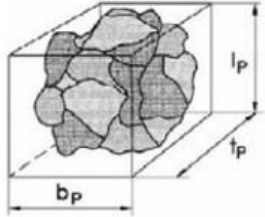
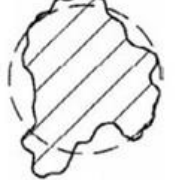
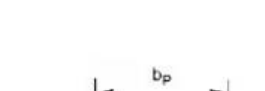
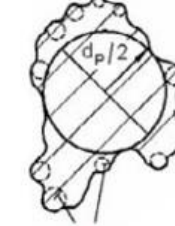
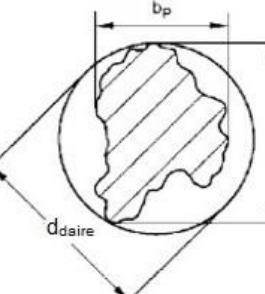
2.2.2.2. Aşındırıcı partikül şekil parametreleri

Katı partikül erozyonu ile temizleme işlemlerinde, aşındırıcı partiküllerin şekilleri çok önemlidir. Aşındırıcı partiküller küresel ve grit şeklinde sınıflandırılır (Şekil 2.12). Küresel yapı çapı 2 mm'den küçük küre şeklinde, grit yapı açısallıkta olup keskin kenarlı ve kırık yapıdadır.



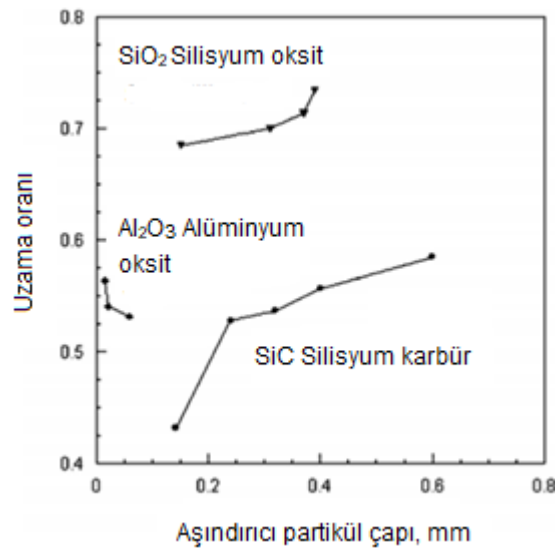
Şekil 2.12. Aşındırıcı malzemeler; grit ve küresel yapıdaki partiküller

Şekil parametreleri her bir partikülün şeklini tanımlar. Şekil parametreleri; uzunluk, kalınlık ve genişlik oranları ile geometrik şekil olmak üzere 2 farklı özelliğe sahiptir. Partiküllerin bağıl oranı, uzama oranı (r_E) ve düzlemsellik oranı (r_F) olmak üzere 2 parametre içerir. Şekil 2.13 aşındırıcı partiküllerin şekil parametrelerini göstermektedir.

Parametre ve tanımı	Grafiksel ifade	Parametre ve tanımı	Grafiksel ifade
şekil faktörü $F_{\text{şekil}} = d_{\text{min}}/d_{\text{max}}$		uzama oranı $r_E = l_P/b_P$	
dairesellik $F_0 = (4\pi A_P)/\text{çevre}^2$		düzlemsellik $r_F = l_P/t_P$	
yuvarlaklık $S_R = [\sum (2 \cdot \frac{r_{\text{köşe}}}{d_P})] / N_{\text{köşe}}$		küresellik $S_P = (4 \cdot b_P \cdot l_P / \pi)^{1/2} / d_{\text{dsire}}$	

Şekil 2.13. Aşındırıcı partiküllerin şekil parametreleri (Bahadur ve Badruddin, 1990)

Partikül erozyonu esnasındaki uzama oranının ve aşındırıcı partikül şeklinin etkisi incelenmiş ve aşındırıcı tipi, aşındırıcı partikül çapı ve aşındırıcı partikül şekli arasında bir bağıntı olduğu bulunmuştur. Yapılan bu çalışmanın (Bahadur ve Badruddin, 1990) sonuçları Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



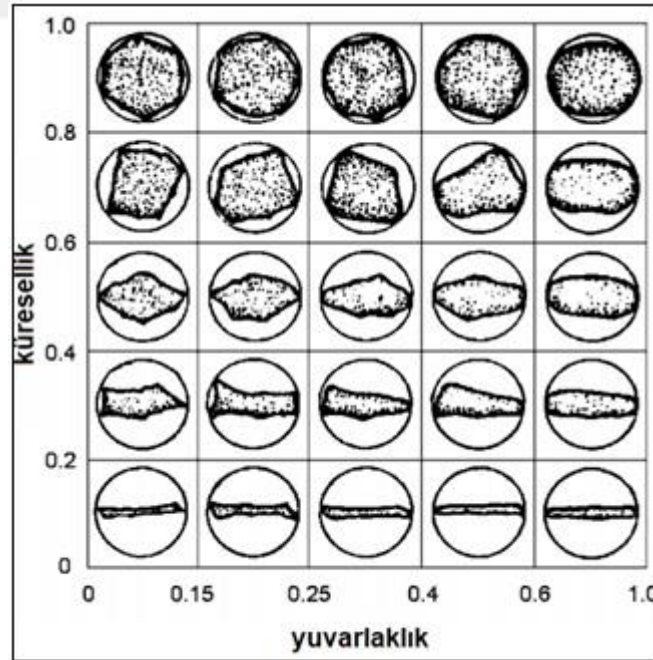
Şekil 2.14. Aşındırıcı malzemenin, partikül boyutu ve şekli arasındaki ilişkisi (Bahadur ve Badruddin, 1990)

Silisyum karbür (SiC) partiküllerinin uzama oranı ve partikül boyutu yüksek ve daireselliği düşükken, Alüminyum oksit (Al_2O_3) partiküllerinde durum tam tersidir. Silisyum oksit (SiO_2) ile silisyum karbür (SiC) partikülleri benzerlik gösterse de sistematik olarak aynı değildir.

Silisyum karbür ve Alüminyum oksitin uzama oranları partikül boyutlarının küçük olduğu aralıkta hassastır. Küçük partiküllerin uzama oranı büyük partiküllerin uzama oranından daha azdır. Örneğin, $d_p=300\ \mu m$ partikül çapında, uzama oranı silisyum karbür için yaklaşık $r_E=0,53$, silisyum oksit için $r_E=0,7$ olarak görülür. Burada partikül şeklinin aşındırıcı malzeme karakteristiği için önemli bir etken olduğu görülmektedir.

Partikül erozyonunda partiküllerin geometrik formları da çok önemlidir. Geometrik faktör, partiküllerin ideal geometrik formlara (küp, küre, silindir, vs) yakınlık derecesini belirleyen bir hacimsel şekil faktörüdür. Küresellik (S_P) ve yuvarlaklık (S_R) faktörleri partiküllerin geometrik formlarını tarif eder.

Şekil 2.15, iki boyutta yuvarlaklığı sağlayan küre alanının izdüşümü ile ilgilidir. Küresellik ve yuvarlaklık için kullanılan “0” sayısı açısallık için, “1” sayısı ise ideal şartlardaki yuvarlak partiküller için kullanılır.



Şekil 2.15. Aşındırıcı bir malzemenin küresellik-yuvarlaklık diyagramı (Vasek ve Martinec,1994)

Şekil 2.16, aşındırıcı partiküllerin şekillerini değerlendirmek için kullanılan bir yuvarlaklık skalasıdır. Bu skala açısallık ve yuvarlaklık terimlerini tanımlar.

Tasarım	Yüksek açılı	Acılı	Düşük Açılı
Tanım	0.5	1.5	2.5
Şekil resmi			

Tasarım	Yuvarlak (düşük)	Yuvarlak	Yuvarlak (yüksek)
Tanım	3.5	4.5	5.5
Şekil resmi			

Şekil 2.16. Açılı ve yuvarlak şekilli partiküllerin tasarımları (Hansink,1998)

Dairesellik faktörü (F_0), Şekil 2.17’de gösterilen aşındırıcı partiküllerin şekillerini tanımlamak için kullanılmıştır. Kusursuz yuvarlak bir partikül için dairesellik faktörü 1’dir. İdeal ölçüden uzaklaştıkça dairesellik faktörü azalır. Dairesellik faktörü $F_0 > 0.83$ ise katı partikül erozyonu ile temizleme uygulamalarında kullanılmak üzere kabul edilebilir bir değerdir.

0.958	0.923	0.921
0.921	0.872	0.858
0.849	0.823	0.799
0.772	0.717	0.704

Şekil 2.17. Çelik küresel partiküllerin dairesellik faktörü (Gillespie, 1996)

2.2.2.3. Aşındırıcı partikül boyut dağılımı ve partikül çapı

Çap ifadesi boyutlara sahip her partikül için tanımlanabilir. Partiküller boyutlarla veya farklı birimlerle ifade edilebilir. Büyük boyuttaki partiküller milimetre ya da inç, küçük boyuttaki partiküller mikrometre ile ölçülebilir. Partiküllerin hacmi, yüzey alanı ve çevresi gibi özellikleri onları daha iyi tanımlar. Katı partikül erozyonu ile temizleme uygulamalarında partikül boyutu dağılımı, Denklem (2.2)'deki gibi;

$$d_p = 17,479 \cdot \text{mesh}^{-1,0315} \quad (2.2)$$

olacaktır.

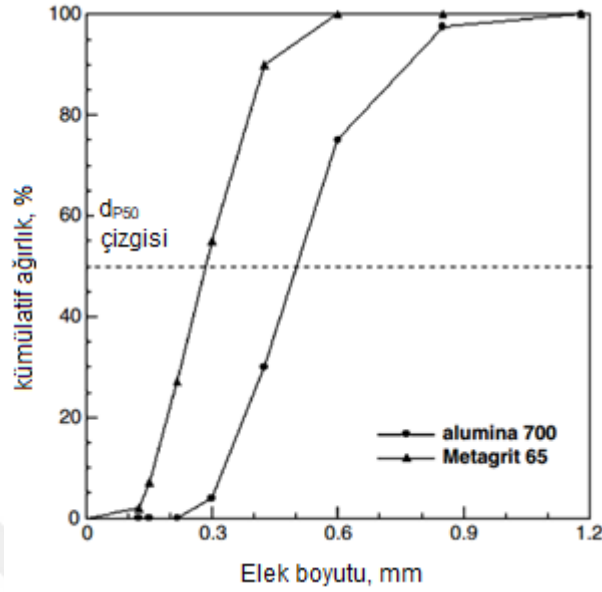
Örneğin, mesh sayısı 120 kabul edildiğinde partikül çapı (d_p) yaklaşık $d_p = 125 \mu\text{m}$ olacaktır. Şekil 2.18'de mesh boyutu ve mikron ölçüsündeki partiküller yaygın örnekleri ile gösterilmektedir.

Mesh boyutu	Partikül boyutu	Mikron μm	Yaygın örnekler
20		841	Toz şeker
30		595	
40		400	Kahve
50		297	Karabiber
60		250	
70		210	
80		177	
100		149	
120		125	Tuz
140		105	Pudra şekeri
170		88	Saç teli

Şekil 2.18. Mesh boyutunun mikron ölçüsündeki karşılığı ve yaygın örnekleri

Partiküllerin boyutlarının tayin edilmesinde elek analizi kullanılmaktadır. Her partikülün çaplarının ayrı ayrı hesaplanması mümkün olamayacağından bu analiz,

partikülleri uygun aralığa bölerek uygulanır. Şekil 2.19, alümina 700 ve metagrit 65 malzemeleri için kümülatif dağılım eğrisini göstermektedir.



Şekil 2.19. Elek analiz sonucunun grafiksel gösterimi (Wellinger, 1962)

Eğer partikülün elek analizinde boyut dağılımı bilinirse, ortalama çapı bulunabilir. Şekil 2.19'da %50 kümülatif dağılım çizgisine göre çap ölçüleri Alumina 700 için $d_{P50} = 510 \mu\text{m}$, ve Metagrit 65 için $d_{P50} = 280 \mu\text{m}$ 'dir. Ortalama geometrik çap d_{PG} minimumdan maksimuma kadar olan değer aralığının ortalaması olarak Denklem (2.3)'deki gibi;

$$d_{PG} = (d_{Pmax} + d_{Pmin}) / 2 \quad (2.3)$$

hesaplanır. Şekil 2.19 dikkate alındığında ortalama geometrik çaplar Alumina 700 için $d_{PG} = 740 \mu\text{m}$ ve Metagrit 60 için $d_{PG} = 362 \mu\text{m}$ bulunur.

2.2.2.4. Aşındırıcı partiküllerin yoğunluğu

Aşındırıcı malzemeler için yoğunluk tanımı tek bir aşındırıcı partikül için kütle/hacim oranıdır. Bu oran, aşındırıcı partiküllerdeki kusurları, gözenekleri ve çatlakları da kapsayan genel bir ifadedir. Bir partikülün kinetik enerjisinin hesaplanmasında bu yoğunluk değeri kullanılmaktadır. Bir partikülün yoğunluğu (ρ_P) Denklem (2.4)'te;

$$\rho_P = m_P / V_P = (6 \cdot m_P) / (\pi \cdot d_P^3) \quad (2.4)$$

olduğu gibidir.

2.2.2.5. Aşındırıcı partiküllerin sayısı ve kinetik enerjisi

Katı partikül erozyonu ile temizlemede yaklaşık olarak partikül sayısı, N_P , (küresel partiküller için) Denklem (2.5)'deki gibi;

$$N_P = m'_P \cdot t_E / m_P \quad (2.5)$$

Hesaplanır. Denklemde; m'_P partikül debisi, t_E zaman ve m_P partikül kütlesidir.

Her bir aşındırıcı küresel partikülün kütlesi, Denklem (2.6)'da;

$$m_P = \pi \cdot d_P^3 \cdot \rho_P / 6 \quad (2.6)$$

gösterilmiştir.

Denklemde eğer ortalama partikül çapı d_{P50} kullanılırsa temizleme nozulundan çıkan y eksenindeki partikül sayısı (N_P), Denklem (2.7)'deki gibi;

$$N_P = 6 \cdot m'_P \cdot y / (\pi \cdot \rho_P \cdot d_{P50}^3 \cdot v_T) \quad (2.7)$$

olmaktadır. Denklemdeki v_T nozul frekansıdır.

Herhangi bir mesafede aşındırıcı partikül debisi ne kadar fazla ise aşındırıcı partikül kütlesi de fazladır. Aşındırıcı partikülün yoğunluğu ve aşındırıcı partikülün çapı ne kadar fazlaysa aşındırıcı partikül sayısı ise o kadar azdır. Aşındırıcı partikülün hedef yüzeye çarpma sıklığı (N'_P), Denklem (2.8)'deki gibi;

$$N'_P = N_P / t_E = m'_P / m_P \quad (2.8)$$

ifade edilir.

Belirli bir zamandaki çarpma sıklığı aşındırıcının debisinin artmasıyla artar, ortalama partikül çapının artmasıyla azalır. Eğer aşındırıcı malzemenin yoğunluğu yüksek ise çarpma sıklığı düşer. Partikül sıklık sayısı (n'_P), Denklem (2.9)'da;

$$n'_P = N'_P / A_C \quad (2.9)$$

verilmiştir. Denklemdeki A_C , hedef yüzeyin kesit alanıdır. Yüzeye doğru gelen ve yansıyan aşındırıcı partiküllerin boyutsuz çarpışma sayısı (c_K), Denklem (2.10)'da;

$$c_K = (C_R \cdot d_N) / (d_P \cdot \cos \varphi) \quad (2.10)$$

verilmiştir. Denklemdeki φ partikül çarpma açısı, d_N nozul çapıdır. Akıştaki partikül derişimi değişken C_R , Denklem (2.11)'deki gibi;

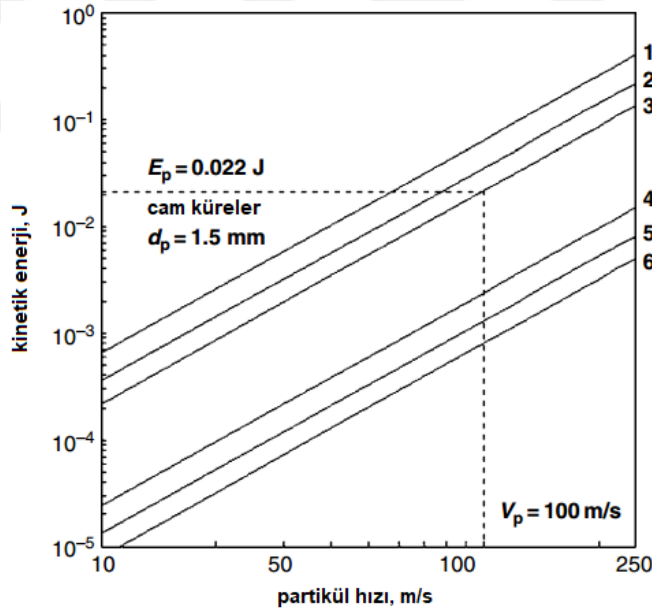
$$C_R = 4 \cdot m'_P / (\pi \cdot v_P \cdot \rho_P \cdot d_N^2) \quad (2.11)$$

hesaplanır. Çarpışma sayısı; yüksek partikül derişiminde, küçük nozul çapında, küçük boyutlu aşındırıcı partiküllerde ve yüksek çarpma hızında yüksektir. Aşındırıcı küresel bir partikülün kinetik enerjisi (E_p), Denklem (2.12)'de;

$$E_p = \pi \cdot \rho_p \cdot d_p^3 \cdot v_p^2 / 12 \quad (2.12)$$

olduğu gibidir.

Şekil 2.20'de bazı malzemelerin kinetik enerjileri gösterilmektedir. Şekildeki 1,2,3 eğrileri için partikül çapı $d_p = 1,5$ mm; 4,5,6 için partikül çapı $d_p = 0,5$ mm; 1 ve 4 için çelik küreler $\rho_p = 7,300$ kg/m³; 3 ve 6: cam küreler $\rho_p = 2,450$ kg/m³; 2 ve 5: garnet $\rho_p = 4,000$ kg/m³'dür. Cam kürelerinin yoğunluğu $\rho_p = 2,450$ kg/m³, çapı $d_p = 1,5$ mm, çarpma hızı $v_p = 100$ m/s olduğunda grafikte gösterildiği gibi kinetik enerjisi $E_p = 0,022$ J olur. Şekilden de görüldüğü üzere farklı tip malzemenin eşit partikül hızlarındaki kinetik enerjileri farklıdır. Bunun sebebi malzemelerin yoğunluklarının farklıdır. Çoğu katı partikül erozyonu ile temizleme uygulamalarında aşındırıcı partikül hızı ve boyutu birbirleri ile bağıntılıdır.



Şekil 2.20. Aşındırıcı partiküllerin kinetik enerjisi (Ciampini ve diğ., 2003)

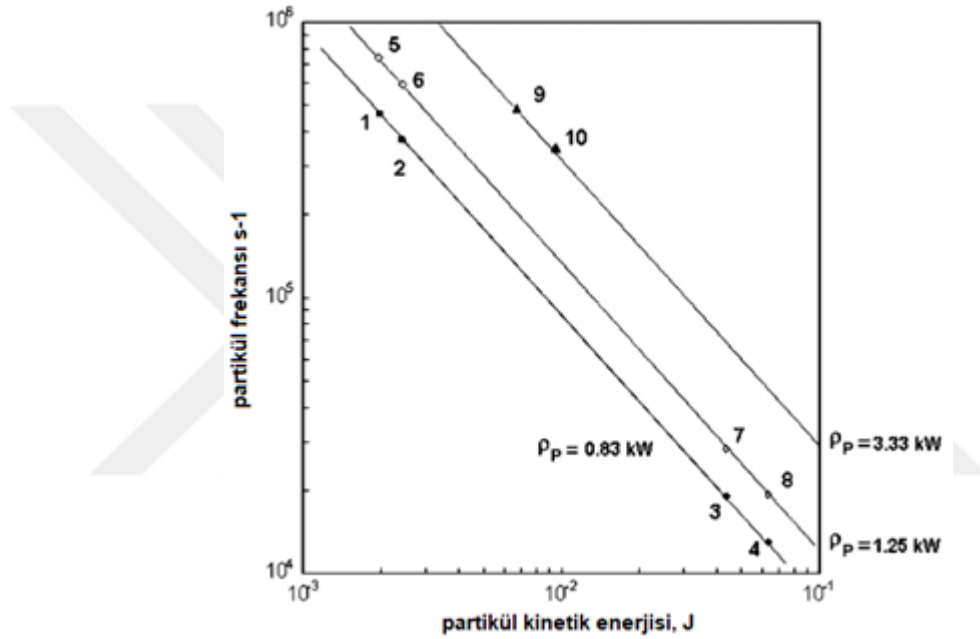
Nozul çıkışındaki aşındırıcı partikülün gücü (P_p), Denklem (2.13)'te;

$$P_p = m'_p \cdot v_p^2 / 2 = E_p \cdot N'_p \quad (2.13)$$

olduğu gibidir. Bu denklemde, aşındırıcı partiküllerin eşit boyutlarda olduğu varsayılmıştır.

Şekil 2.21 incelendiğinde, Eğer nozul çıkışındaki güç $P_P=1,25$ kW ise, nozuldan saniyede 765000 partikül yayılır (frekans) ve her birinin kinetik enerjisi $E_P=0,002$ J'dür. Ya da nozuldan saniyede 19400 partikül yayılırsa her birinin kinetik enerjisi 0,06 J olur. Onun için partiküllerin kinetik enerji ve partikül sayısının hangi aralıkta olduğu kontrol edilmelidir. Bu kontrol temelde aşındırıcı partikül boyutu ve aşındırıcı partikül malzeme yoğunluğundaki değişkenliğe bağlıdır.

Şekilde 10 farklı malzeme ve 3 farklı güç değeri için 1,2,3,4: $m_P = 10$ kg/dk, $v_P = 100$ m/s; 5,6,7,8: $m_P = 15$ kg/dk, $v_P = 100$ m/s; 9,10: $m_P = 10$ kg/dk, $v_P = 200$ m/s'dir.



Şekil 2.21. Partikül kinetik enerji ve frekans değerleri (Ciampini ve diğ., 2003)

2.2.2.6. Aşındırıcı partiküllerdeki kirlilik

Katı partikül erozyonu ile temizlemede eğer tekrar dönüştürülebilen aşındırıcı malzeme kullanılırsa aşındırıcı partiküllerin kalitesini ve verimliliğini düşürebilir. Aşındırıcı partiküller içinde aşındırıcı olmayan kalıntılar, kurşun, suda çözünebilen atıklar ve yağ gibi maddeler içerebilir.

Aşındırıcı partiküllerdeki kirliliğin bazı limit değerleri yüzdelik olarak Tablo 2.5'te gösterilmiştir. Aşındırıcılar içindeki yabancı metalik partiküller mıknatıs kullanılarak kolayca ayrıştırılabilir. Suda çözülebilen tuz gibi yabancı maddelerin ayrıştırılması zor olduğundan kimyasal analiz ve iletkenlik ölçümü gereklidir.

Tablo 2.5. Aşındırıcı malzeme içeriğindeki kirliliğin limit değerleri (Society for Protective Coatings, 2004)

Madde	Limit değeri
Aşındırıcı kalıntıları	Ağırlığın %1'i
Kurşun	Ağırlığın %0,1'i
Suda çözünebilen	1000 $\mu\Omega/\text{cm}$ (elektrik iletkenlik)

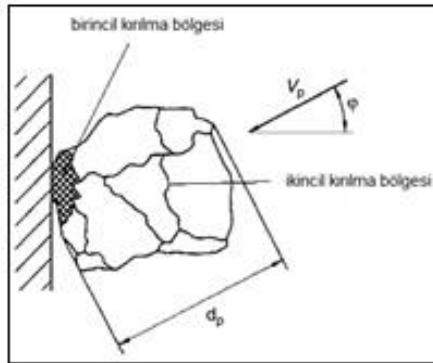
Tablo 2.6'daki liste, aşındırıcı malzeme içeriğindeki aşılması gereken tehlikeli maddelerin kritik miktarlarını göstermektedir.

Tablo 2.6. İzin verilen maksimum tehlikeli maddeler (Johnson,1990)

Malzeme	Limit ağırlık, %
Antimon, Arsenik, Berilyum, Kurşun, Kadmiyum, Krom, Kobalt, Nikel, Kalay	% 2
Arsenik, Berilyum, Krom, Kobalt, Nikel	% 0,2
Berilyum	% 0,1
Kadmiyum	% 0,1
Krom	% 0,1
Kobalt	% 0,1

2.2.2.7. Aşındırıcı partikül malzeme davranışları

Aşındırıcı partiküller, katı partikül erozyonu ile temizleme işlemi süresince kırılmalara maruz kalır. Bu kırılma süreci bazı partiküllerin şekli ve boyutu gibi özelliklerine göre değişir. Bu değişimler malzemelerin tekrar kullanılabilirliğini etkiler. Şekil 2.22'de hedef malzemeye çarpan bir aşındırıcı partikülün kırılma yapısı gösterilmektedir. Birincil kırılma bölgesi, çarpma boyunca yüksek hız gerilim dalgalarına maruz kalmış bölgeyi gösterir. Partikül boyunca yansıyan dalgalar partikülün gerisine doğru azalır. Partikülün gerisindeki dalgalar, kırılmaları öne doğru iter. Partikülün arka tarafındaki kısmı ikincil bölge olarak tanımlanır.

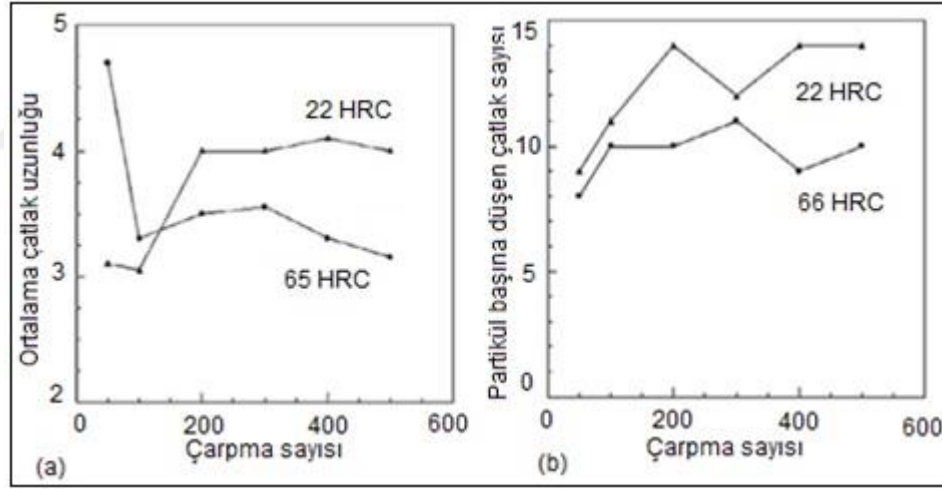


Şekil 2.22. Hedef yüzeye çarpmış bir partikülün kırılma yapısı ve şekli (Buhlmann, 1970)

Hedef yüzeye çarpan aşındırıcı partiküllerden cam kürelerin kırılma özelliği ve hasarın görünüşü incelendiğinde partikülün kırılma görüntüsünün çarpma hızına bağlı olduğu görülmüştür. Düşük çarpma hızında ($v_p = 25$ m/s), sadece çatlak izleri gözlenirken, yüksek çarpma hızında ise ($v_p=98$ m/s), hedef yüzeye çarpan cam kürelerinin kırılmasıyla yarı küresel parçalar ve bu parçaların çoğu keskin ve düz kenarlı olduğu gözlenmiştir.

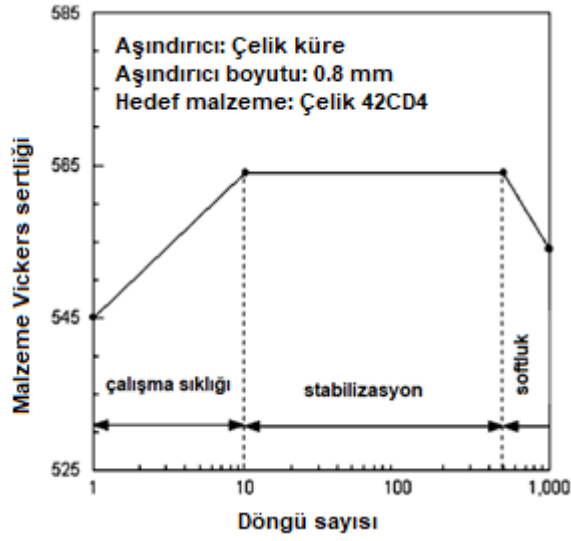
Çelik partiküllerinin sert (65 HRC) ve yumuşak (22 HRC) bir hedef yüzeye çarpması durumunda davranışlarında ciddi farklar bulunmuştur. Küresel çelik partiküllerin sert hedef yüzeye çarpması durumunda belirgin deformasyonlar meydana getirdiği, yumuşak hedef yüzeye çarpan küresel çelik partiküllerin ise 50-100 μ m uzunluğunda küçük radyal çatlaklar meydana getirdiği gözlemlenmiştir.

Küresel çelik partiküllerin yumuşak yüzeylerde sert yüzeylere nazaran daha geniş boyutta izler taşıdığı Şekil 2.23'te gösterilmiştir. Çarpma hızı 61 m/s; (a) Ortalama çatlak uzunluğu; (b) Ortalama çatlak sayısını göstermektedir.



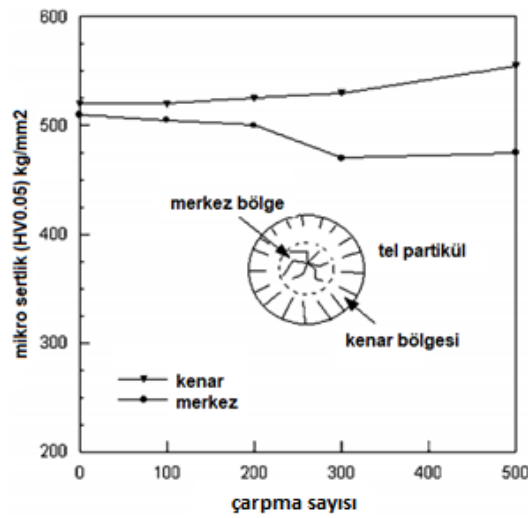
Şekil 2.23. Hedef malzeme sertliği ve çarpma sayısının çelik kürelere etkisi, (Calboreanu, 1991)

Şekil 2.24'te bir çok çarpmadan sonra çelik kürelerin sertlik değişimleri gösterilmiştir. Çalışma sıklığının fazla olmasından ötürü ilk 10 döngünün sertlik değerinin yüksek olduğu görülmektedir. Sertlik değeri 10 ile 500 döngü aralığında dengelenir, yaklaşık 1000.ci döngüde de düşmeye başlar, yüksek döngü sayısından sonra malzeme yumuşamaya başlar.



Şekil 2.24. Çelik partiküllerinin temizleme esnasındaki sertlik değişimi, (Flavenot ve Lu, 1990)

Aşındırıcı çelik kürelerin hedef yüzeye çarpma sayısı ile partiküllerin merkezinden kenar bölgesine kadarki sertlik değerleri değişkenlik gösterir. Şekil 2.25'te çarpma sayısı ile partiküldeki sertlik değişimi gösterilmiştir. Çarpma sayısı arttıkça partikülün kenar bölgesindeki sertlik artışı olduğu görülmektedir. Merkez bölgedeki sertlik değerinin düşüşü malzeme yorulması olarak düşünülebilir. Kenar ve merkez bölgesindeki sertlik değerlerindeki fark, çarpma sayısındaki artışla artar ancak yaklaşık 500.cü çarpmada doyma noktasına ulaşır. 500.cü çarpmada aşındırıcı partiküllerdeki deformasyon süreci son halini alır.

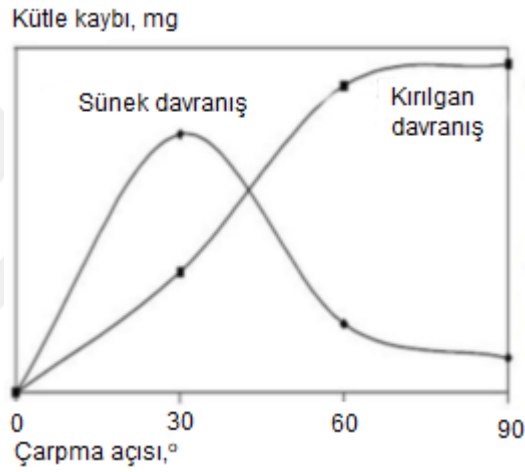


Şekil 2.25. Çelik telin çelik plakaya çarpması ile oluşturduğu sertlik değişimi (Wellinger ve Gommel, 1967)

2.2.2.8. Aşındırıcı partikül çarpma açısı

Aşındırıcı partikülün hedef malzeme yüzeyindeki bölgesel enerji yoğunluğu, boyut, yüzey topografyası ve sertliği erozyon aşınması için çok önemli bir etkidir. Bir partikülün yüzeye çarpması, yüzeye büyük bir kuvvetin uygulanması anlamına gelir.

Çarpma açısına (ϕ) bağlı olarak, katı partikül erozyonu Dik çarpma açılarındaki erozyon ($\phi \sim 90^\circ$) ve eğik çarpma açılarındaki erozyon ($0^\circ < \phi < 90^\circ$) olmak üzere iki türde incelenebilir. Çarpma açısı ve çarpma sürelerinin değişimi, farklı malzemelerde farklı karakteristiklerde sonuçlanırlar. Şekil 2.26'da sünek ve gevrek (kırılgan) malzemelerdeki erozyon süresince ve çarpma açısına bağlı olarak kütle kaybı gösterilmiştir.



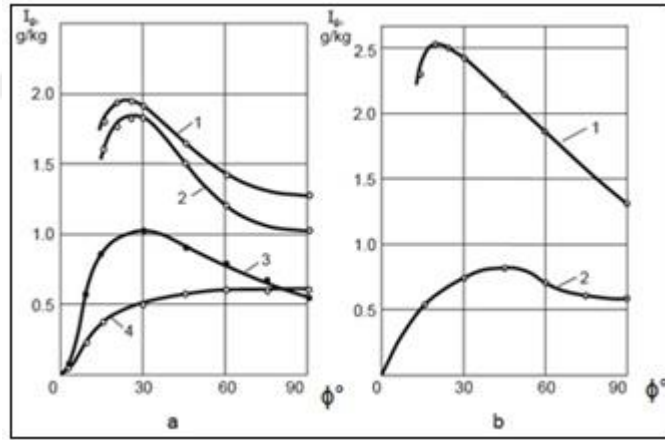
Şekil 2.26. Sünek/gevrek malzemelerin partikül erozyonu karakteristikleri, (Hutchings I.M. 1992)

Şekil 2.26'da görüldüğü gibi kırılgan malzemelerde maksimum malzeme kaybı yüksek çarpma açılarında ortaya çıkarken, sünek malzemelerde ise malzeme kaybının en fazla düşük çarpma açılarında ortaya çıktığı görülmektedir.

Çarpma enerjisindeki kaybın büyük kısmı hedef malzeme yüzeyini pürüzlendirirken ortaya çıkar. Hedef malzemeye partikülün çarpması sonrası ortaya çıkan etkileşim oldukça karmaşık bir alt yapıya sahiptir. Katı partikül tüm enerjisi ile hedef malzemeye çarptığında enerjisini malzemeyi elastik ve plastik deformasyona uğratmaya, sürtünme ile ortaya çıkan ısı oluşumu ile de yapıyı moleküler anlamda deforme etmeye harcarlar.

Partiküllerin hareket hızı bileşenlerini yatay ve dikey bileşenler olarak ayrılması durumunda, 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. Açılı büyüdükçe partikül hızının dikey bileşeni artmakta ve daha ağırlıklı çarpma etkisine benzer bir etki mekanizması ağırlık kazanmaktadır.

Şekil 2.27'de 17° ile 45° arasındaki çarpma açılarında yumuşak çeliğin (Şekil 2.27a eğri 1 ve 2) aşınma oranının maksimum olduğunu göstermektedir. Sertleştirilmiş çeliklerde ise (Şekil 2.27a eğri 4) yaklaşık 60° ile 90° arasındadır. Belirli bir çarpma hızında yumuşak çeliğin maksimum değerini partikülün şekli belirler. Daha keskin yapıdaki partiküllerin daha küçük çarpma açılarındaki aşınma oranı maksimum olur. Şekilde a- 1 -% 0,2 C çelik (130 HV) cam kumu, 2 - %0,2 C çelik (130 HV) korundum kumu, 3-% 0,2 C kuvars kumu , % 4 – 0,8 C çelik (850 HV) kum partiküllerin çapı 0,4-0,6 mm. b- Eğri 1 -% 0,2 C çelik keskin kenarlı partiküller halinde, 2 -% 0,2 C çelik dökme demir partiküllerin çapı 0,4-0,6 mm'dir.

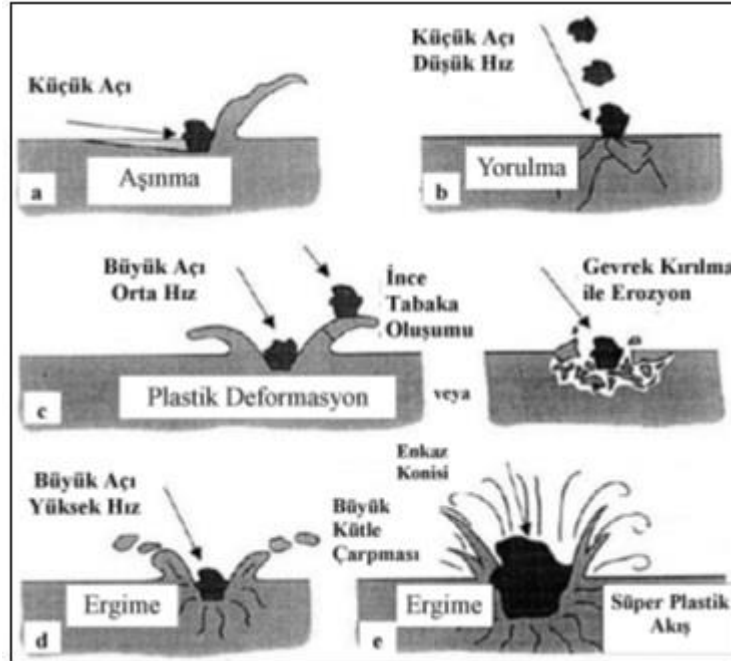


Şekil 2.27. Aşınma hızının 120 m/s hızında çarpma açısına göre değişimi, (Tadolder J.,1966)

Polimer esaslı malzemelerde dik açılı ve esnek çarpmada; partikülün kinetik enerjisi çarpmadan sonra malzeme içerisinde elastik deformasyonlar şeklinde biriktirilir ve geri dönüş safhasında tekrar partikül kinetik enerjisine dönüşür. Yüksek dayanımlı sert malzemelere, düşük darbe enerjili partiküller çarptığında elastik darbe etkisi baskın gelir. Dik açılı ve plastik çarpmada; metal ve seramik bazlı malzemelerde enerjinin tümü plastik deformasyona dönüşmesi daha az rastlanmaktadır. Dik açılı ve esnek/plastik çarpma; en sık rastlanan çarpma türüdür. İlk çarpma enerjisinin büyük kısmı ısı enerjisine çevrilirken enerjinin kalanı plastik deformasyonlara

harcanır. Partikülün geri sekme kinetik enerjisi göreceli olarak azalır. Tek bir çarpma genellikle malzemede kırılma ve deformasyona neden olmazken çarpma alanında tekrarlanan darbeler malzemenin aşınmasına sebep olur. Malzemenin içerisinde, malzemenin aşınmasına yol açan küçük mikro-çatlaklar ortaya çıkabilir. Eğik ve esnek/plastik çarpma; çok genel bir tip çarpışma şeklidir. Başlangıçtaki mikro-kesme ve mikro yarık mekanizmalarından dolayı dik çarpmadan farklıdır. Malzeme dik çarpmadakine benzer şekilde deforme olur fakat ek olarak özellikle keskin kenarlı aşındırıcı partiküller tarafından kesilir ve yarılr. Mikro kesilme ve mikro yarıma olayları, hedef yüzeylerin içine nüfuz edebilen partiküllerin sertliği ile ilgilidir. Çarpma yönüne paralel doğrultuda uzanan bir dizi oluk, erozyonun başlangıç safhasında ortaya çıkar. Çarpan partiküller yüzey üstünde kayar ve her oluğun tabanında oluşan yorulma çatlaklarının büyümesine sebep olarak olukları deforme eder. Bu yorulma çatlaklarının büyümesi, gerilme zorlanmaları tarafından sürülen erozyon aşınması sürecinde bir basamak olarak varsayılabilir.

Şekil 2.28'de Stachwiak erozyon aşınmasının bilinen mekanizmalarını şematik olarak özetlemiş olup a- küçük çarpma açılarında aşınma, b- düşük hız, büyük çarpma açısında yüzey yorulması, c- orta hız, büyük çarpma açısı boyunca gevrek kırılma veya çoklu plastik deformasyon, d,e- yüksek çarpma hızlarında yüzey ergimesi, ikincil etkilerle makroskopik erozyonu göstermektedir.

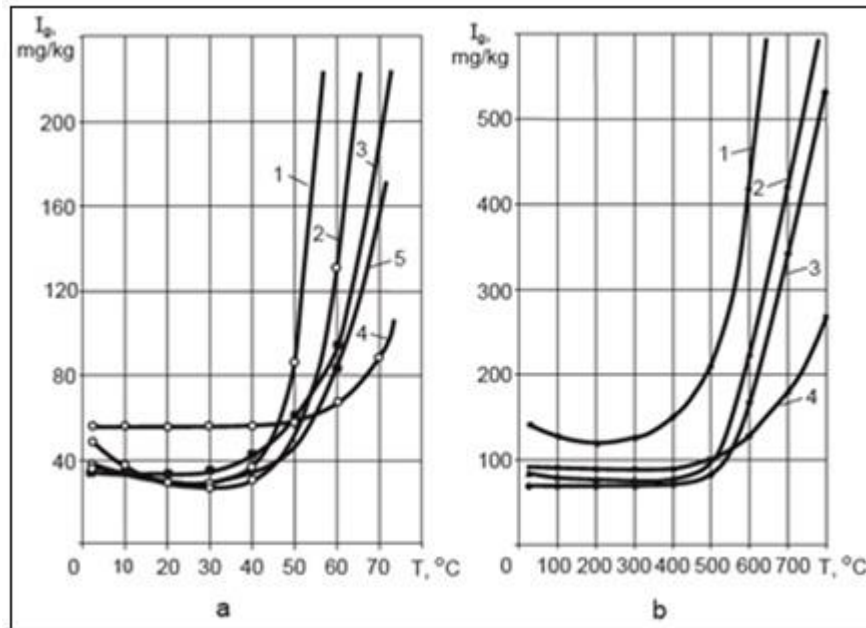


Şekil 2.28. Katı partikül erozyonunun olası mekanizmaları (Barkoula ve Karger Kocsis, 2002)

2.2.2.9. Sıcaklık

Hedef malzemeye bir aşındırıcı partikülün çarpması sonucu oluşan bölgesel deformasyon ve düşük termal iletkenliğe sahip bir malzemedeki yüksek gerinim oranlarında baş gösteren adyabatik şartlar yüksek sıcaklıklar ortaya çıkarabilir. Maksimum sıcaklık, hedef malzeme üzerinde yapılan iş ve malzemenin özgül ısıyla yoğunluğuna bağlıdır. Yapılan iş çarpma boyunca maksimum basıncın bir fonksiyonudur ve sırasıyla hedef malzemenin ve aşındırıcı partikülün sertliğine bağlıdır. Sıcaklık, çarpma bölgesinden, oluşum zamanından daha kısa sürede uzağa akabiliyorsa sıcaklık artışı küçük olur. Yüksek sıcaklıklar kısaca malzemeyi yumuşatabilir.

Şekil 2.29'da, $v_p = 48$ m/s, kuvars 1- çelik St3, 2- çelik U8A, 3- çelik R9, 4- dökme demir Ch34L, 5- çelik 9ChS olup, aşınma hızı ve sıcaklık arasındaki ilişkiyi incelemek için 5 adet malzeme ile yapılan testte, 1 numaralı malzemenin (Çelik St-3) 450°C den sonra keskin bir şekilde yükseldiği; 2,3 ve 4 numaralı malzemelerin ise yaklaşık 450°C'ye kadar sabit kalıp sonra yükseldiği görülmektedir. Malzemelerin bu şekildeki davranışı aşınma esnasında yüzeyde ortaya çıkan oksit tabakasının etkisi vardır. Sıcaklıktaki yükseliş oksit filminin ani büyümesini sağlar. Sonuç olarak sıcaklık artışıyla malzeme üzerindeki ergime artar ve daha çok aşınma meydana gelir.



2.2.3. Havanın etkisi

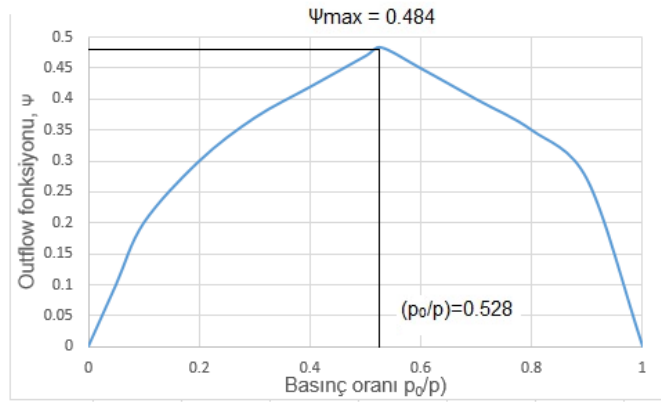
2.2.3.1. Nozuldaki hava debisi

Hava sıkıştırılabildiğinden hacimsel debi değeri sabit değildir ve hesaplamalarda kütleli debi kullanılır.

Teorik olarak nozuldan geçen havanın kütleli debi (m'_A) formülü Denklem (2.14)'te;

$$m'_A = \pi/4 \cdot d_N^2 \cdot (2 \cdot \rho_A \cdot p)^{1/2} \cdot \left\{ \frac{k}{k-1} \cdot \left[(p_0/p)^{2/k} - (p_0/p)^{(k+1)/k} \right] \right\} \quad (2.14)$$

verilmiştir. Denklemdaki ρ_A havanın yoğunluğu, p statik hava basıncı, p_0 atmosfer basıncı, $\left\{ \frac{k}{k-1} \cdot \left[(p_0/p)^{2/k} - (p_0/p)^{(k+1)/k} \right] \right\}$ kısmı outflow $\Psi = f(p_0/p)$ fonksiyonu ve Şekil 2.30'da outflow fonksiyonunun $\Psi = f(p_0/p)$ grafiği gösterilmiştir. Outflow fonksiyonu, kritik basınç oranının (p_0/p) maksimum değerli parabolik fonksiyonudur.



Şekil 2.30. Hava için outflow (çıkış) fonksiyonu $\Psi = f(p_0/p)$, (Bohl, 1989)

Aşağıda verilen bu kritik basınç oranı Laval basınç oranına (p_0/p) karşılık gelir. Bahse konu ifade, Denklem (2.15)'te;

$$(p_0/p)_{\text{krit}} = (2/(k+1))^{k/(k-1)} \quad (2.15)$$

olduğu gibidir. Hava için $k=1,4$ alındığında, Laval basınç oranı $(p_0/p)_{\text{krit}}=0,528$ olmaktadır. Grafiğe göre $\Psi_{\text{max}}(0,528) = 0,484$ 'tür ancak gerçekte kütleli debi basınç oranı 0,528 in altına düşmemelidir. $p_0/p < 0,528$ olduğunda $p_0=0,1$ MPa için $p > 0,19$ MPa olur ve (2.14) denklemi aşağıdaki gibi sadeleştirilir.

(2.16) denklemi teorik olarak kütleli debiyi verir.

$$m'_A = (\pi/4) \cdot d_N^2 \cdot (2 \cdot \rho_A \cdot p)^{1/2} \cdot 0,484 \quad (2.16)$$

Gerçek kütleli debi nozul çıkış parametresi Denklem 2.17’de;

$$m_A = 0,121 \cdot \alpha_N \cdot d_N^2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot p_A \cdot p)^{1/2} \quad (2.17)$$

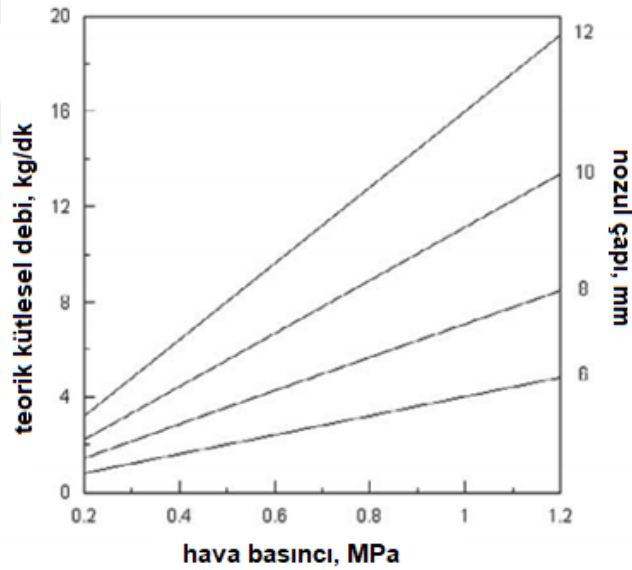
olduğu gibidir.

Nozul çıkış katsayısı α_N nozul geometrisine bağlıdır. α_N ile ilgili bazı değerler Tablo 2.7’de gösterilmiştir.

Tablo 2.7. Nozul çıkış katsayısı, α_N (Schwate, 1986)

Nozul geometrisi	α_N -değeri
Girişi keskin kenarlı	0,6
IN = 1,5 dN	0,8
Konik girişli yuvarlak kenarlı	0,9
Pürüzsüz yüzey, yuvarlak kenarlı r=0,5 dN	0,95

Şekil 2.31’de hesaplanan teorik hava kütleli debisi gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kütleli debi nozulun hava basıncının artmasıyla lineer olarak artmaktadır.



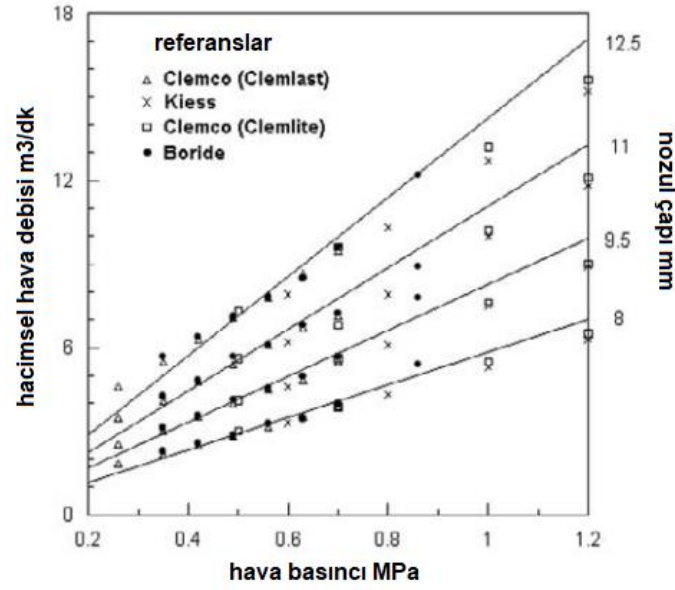
Şekil 2.31. Nozul hava basıncı, nozul çapı ve kütleli debi ilişkisi (hava sıcaklığı 20°C) (Schwate, 1986)

2.2.3.2. Hacimsel debi

Katı partikül erozyonu ile temizlemede nozuldaki hacimsel debi, Denklem (2.18)’de;

$$Q'_A = m'_A / \rho_A \quad (2.18)$$

olduğu gibidir.



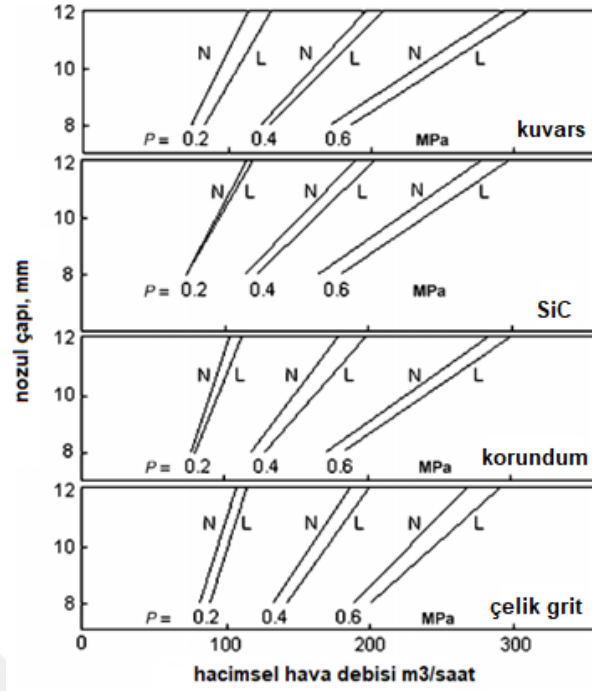
Şekil 2.32. Kompresörün teorik hacimsel debisi ve önerilen değerler (çevre sıcaklığı 20°C) (Schwate, 1986)

Hacimsel debi, kompresörün sıkıştırdığı havanın yoğunluğundan ve sıcaklığından etkilenmektedir. Hava sıcaklığındaki 10°K'lık bir değişim hacimsel debide % 3 lük bir değişime neden olur.

(3.14) ve (3.15) denklemlerinin sonucunda, ilgili üretici tarafından Şekil 2.32'deki kompresör için teorik hacimsel debi ve 4 farklı üretici tarafından tavsiye edilen değerler referans olarak alınabilir. Şekildeki grafiğe göre 0,5 MPa basınç ve $d_N=10$ mm değerleri alındığında hacimsel debi değeri yaklaşık $Q= 5,65 \text{ m}^3/\text{dk}$ olarak hesaplanabilir.

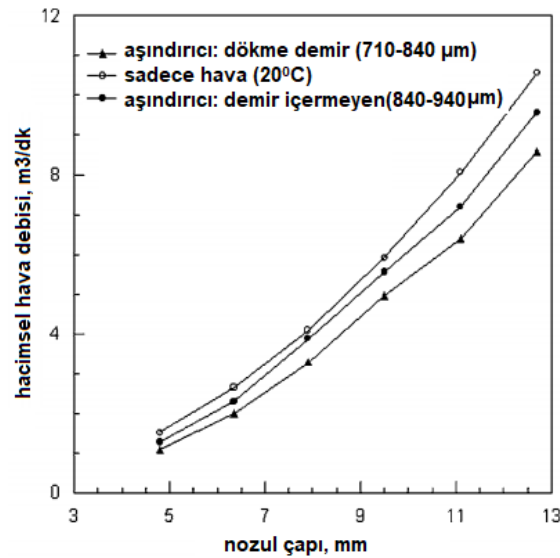
Şekil 2.33 ve Şekil 2.34'te nozul çapına bağlı olarak değişen hacimsel hava debisinin ölçüm sonuçları gösterilmiştir. Şekil 2.34'te, hacimsel hava debisi, nozulun çapı, aşındırıcının tipi ve nozul tipinin hava basıncı ile olan bağıntısı gösterilmektedir. Aşındırıcı malzeme tipinin etkisi küçük çaplı nozullarda benzerlik gösterebilmektedir.

Eğer standart bir nozul yerine Laval (yakınsak-ıraksak) nozulu kullanılırsa hava debisindeki değişim daha fazla olmaktadır. Laval nozulları eğer aşındırıcılar kuvars, Silisyum karbür (SiC), korundum ve grit ise sıradan silindirik nozullara göre, yaklaşık %10 daha fazla hava harcar. Şekilde "N"- silindirik nozul, "L"- yakınsak-ıraksak nozulu (Laval) temsil etmektedir.



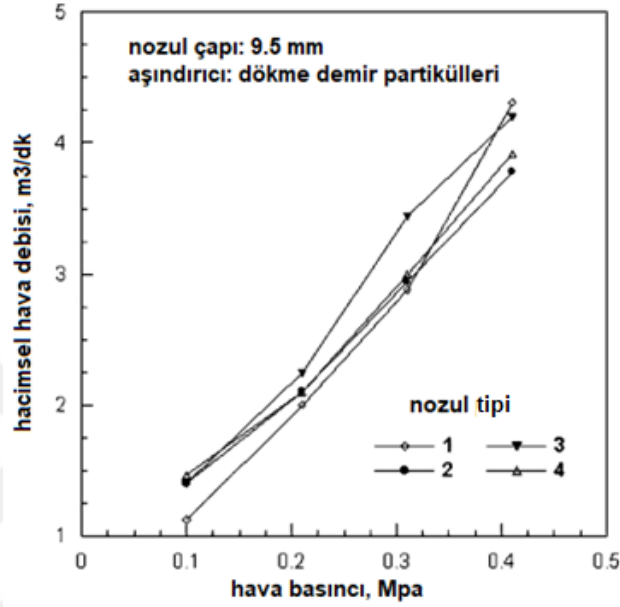
Şekil 2.33. Hava basıncı, nozul çapı, nozul geometrisi ve aşındırıcı tipinin hacimsel debi üzerindeki etkisi (Lukschandel, 1973)

Şekil 2.34'te farklı aşındırıcı tipinin, hacimsel akış debisi üzerindeki etkilerini gösterir. Dökme demir esaslı malzemeler, demir içermeyen aşındırıcı malzemelere göre kıyaslandığında aynı nozul çapında hacimsel debisinin daha düşük olduğu görülmektedir.



Şekil 2.34. Aşındırıcı tipinin hacimsel hava debisi üzerindeki etkisi (Plaster, 1973)

Şekil 2.35, aşındırıcı malzeme olarak dökme demir partikülleri kullanıldığında hava debisi ve hava basıncının nozul geometrisine olan etkisini göstermektedir. Eğrilerin birbirine paralel olması nozul tipinin fazla bir etkisinin olmadığını göstermektedir. Aşındırıcı tipi dökme demir partikülleri; $d_N = 9,5$ mm, nozul tipi: 1- yakınsak-ıraksak; 2- çan şekilli yakınsak; 3- çan şekilli ıraksak; 4- çan şekilli yakınsak-ıraksaktır.



Şekil 2.35. Nozul geometrisinin hacimsel hava debisi üzerindeki etkisi; (Plaster, 1973)

2.2.3.3. Havanın nozuldan çıkış hızı

Havanın nozuldan çıkış hızı (v_A), Denklem (2.19)' da;

$$v_A = (2 \cdot k / (k-1)) \cdot (p/p_A) \cdot [1 - (p_0/p)^{(k-1)/k}]^{1/2} \quad (2.19)$$

olduğu gibidir. Örneğin, eğer basınçlı havanın sıcaklığı nozul boyunca $T = 27^\circ\text{C}$ (300 K) ve $p = 0,6$ MPa basınçta olursa, teorik olarak havanın nozuldan çıkış hızı yaklaşık $v_A = 491$ m/s'dir.

Havanın maksimum çıkış hızı, maksimum kütleli debide ve $\Psi_{\max}$ ve $(p_0/p)_{\text{kritik}}$ olduğunda meydana gelir. Eğer Laval basınç oranı $(p_0/p)_{\text{kritik}}$ (2.19) denkleminde yazılırsa, silindirik nozullardaki havanın hızı için maksimum limit denklemi elde edilir. Bu ifade, Denklem (2.20)'de;

$$v_{A\max} = v_L = (k \cdot R_i \cdot T)^{1/2} \quad (2.20)$$

olduğu gibidir. Bu kritik havanın hızı, sıklıkla Laval hızına (v_L) tekabül eder. Basınca bağlı olmayıp havanın sıcaklığına bağlıdır.

Eğer havanın çıkış hızı artırılmak istenirse, nozul çıkışının farklı bir şekilde tasarlanması gerekmektedir.

2.2.3.4. Laval (yakınsak-ıraksak) nozullardaki hava akışı

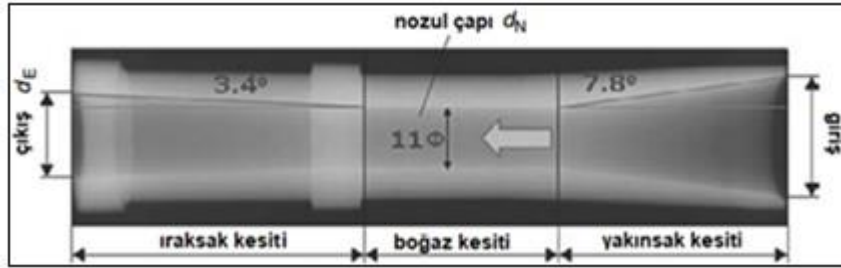
Havanın hızı, Laval hızından büyük olduğu durumda ($v_A > v_L$) nozul kesit alanı genişletilmiş nozul geometrisi Laval (yakınsak-ıraksak) olarak adlandırılır.

Şekil 2.36, X-ray'den alınmış Laval nozulunu göstermektedir. Nozul, yakınsak, boğaz ve ıraksak kısımlarından oluşur. Nozulun boğaz çapı sistemdeki en küçük kesite sahiptir.

Nozul katsayısı olan ϕ_L , nozuldaki havanın çıkış hızının hesaplanmasında kullanılır. Havanın nozuldan çıkış hızı, Denklem (2.21)'de;

$$v_A = \phi_L \cdot (2 \cdot k / (k-1) \cdot (p/p_A) \cdot [1 - (p_0/p)^{(k-1)/k}])^{1/2} \quad (2.21)$$

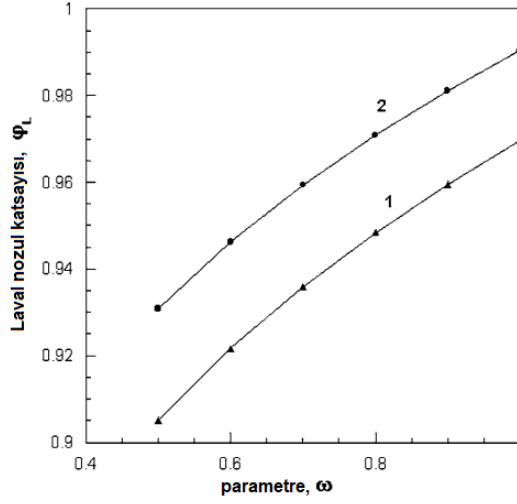
olduğu gibidir.



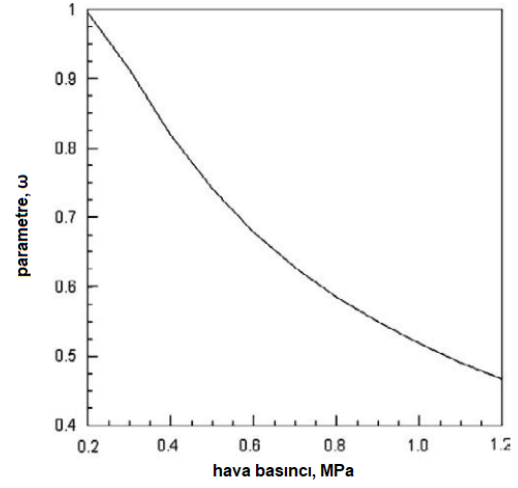
Şekil 2.36. Laval nozulun X-ray den çekilmiş resmi (Baeve diğ., 2007)

Laval nozul katsayısı ϕ_L boyutsuz parametrenin (ω) bir fonksiyonudur. Şekil 2.37'de, 2 farklı tip nozulun ϕ_L ile ω arasındaki bağıntısı gösterilmiştir. ω parametresi basınç oranı p_0/p' 'ye bağlıdır. Şekilde 1- pürüzsüz cidarlı düz nozul ve 2- pürüzlü cidarlı eğri nozuldur.

Şekil 2.38'de nozuldaki hava basıncının ω parametresiyle olan bağıntısı gösterilmiştir. Boyutsuz parametre olan ω değeri genelde katı partikül erozyonu ile temizleme uygulamalarında 0,5 ile 1 aralığındadır. Nozuldaki hava basıncının artarmasıyla ω değeri düşer. Genel olarak nozul verimliliği yüksek hava basıncında düşmektedir.

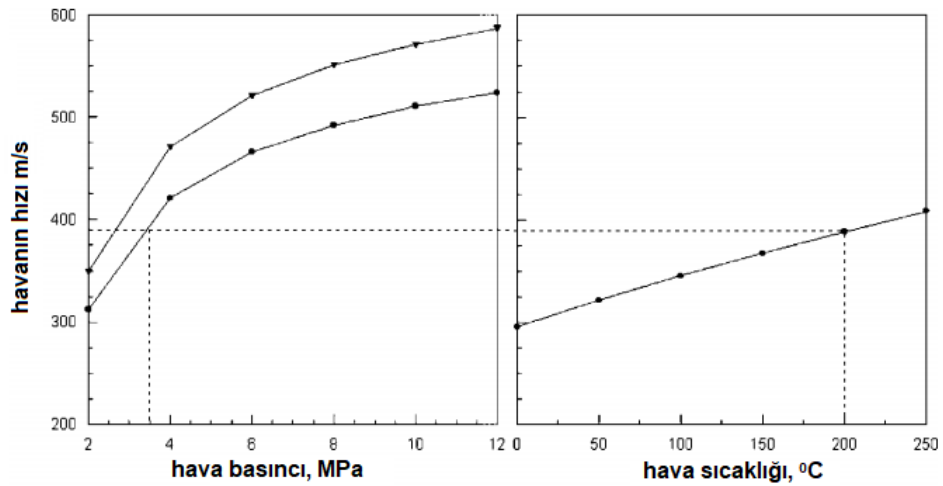


Şekil 2.37. ϕ_L ve ω arasındaki bağıntı (Kalide, 1990)



Şekil 2.38. $p_0 = 0,1$ Mpa için $\omega=f(p)$ fonksiyonu (Kalide,1990)

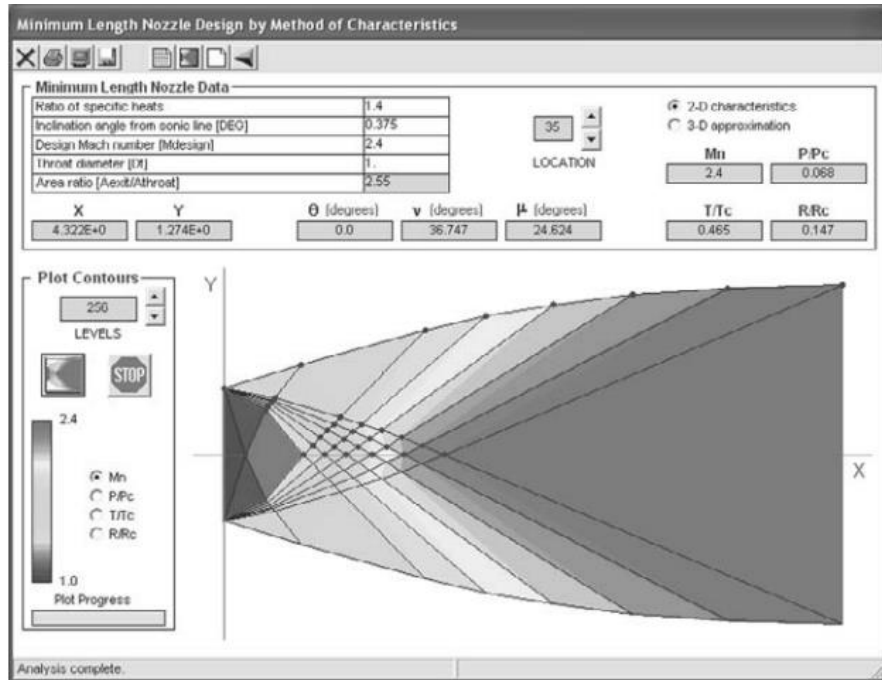
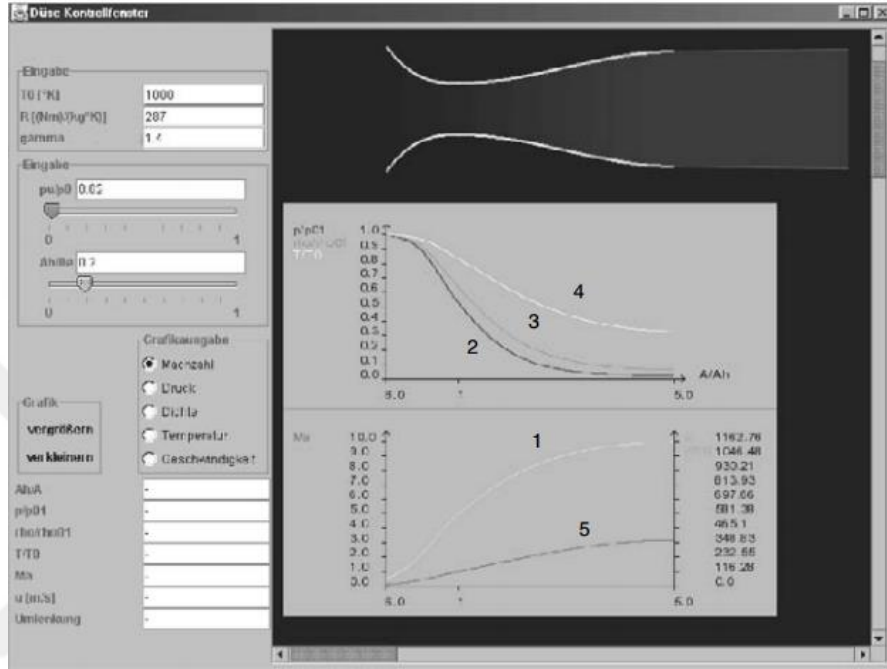
Şekil 2.39'daki sağdaki grafik (2.20) denkleminin sonuçlarını (havanın hızı ile hava sıcaklığı arasındaki bağıntı), soldaki grafik (2.21) denkleminin sonuçlarını (havanın hızı ile hava basıncı arasındaki bağıntı) göstermektedir. Sonuç olarak, silindirik bir nozul boyunca $T = 200^\circ\text{C}$ 'deki sıcaklık ve $p = 0,2$ MPa basınçtaki hava ile Laval nozulu boyunca 20°C sıcaklıktaki ve $p = 0,35$ MPa basınçtaki havanın nozuldan çıkış hızları eşittir. Aşağıdaki soldaki grafik: hava basıncı etkisini; $p = 0,2$ MPa, Sağdaki grafik: hava sıcaklığının etkisini; alttaki eğri: $T = 20^\circ\text{C}$; göstermektedir.



Şekil 2.39. Laval nozullarındaki teorik olarak havanın çıkış hızı, (Kalide, 1990)

Silindirik ve Laval nozullardaki akış ve termodinamik eğrileri, Şekil 2.40'da bir örneği gösterilen nümerik simulasyon programı ile gösterilmiştir.

Örneğin, Mach sayısının geliştirilmesiyle hava yoğunluğu, hava basıncı ve hava sıcaklığı nozul uzunluğu boyunca üzerinde çalışılmış ve havanın basıncının, yoğunluğunun ve sıcaklığının nozuldaki hava akışı boyunca tamamen düştüğü görülmüştür. Şekilde 1- Mach sayısı, 2- basınç, 3- yoğunluk, 4- sıcaklık, 5- havanın hızı ve diğer şekil nümerik nozul tasarımı hesabını göstermektedir.



Şekil 2.40. Yakınsak-ıraksak (Laval) nozullarındaki hava akışının nümerik simülasyon sonuçları, (Aerorocket Inc., Citrus Springs, ABD)

2.2.3.5. Güç, itici akış ve sıcaklık

Bir nozul çıkışıındaki havanın akış gücü aşağıda verilmiştir. (2.19) denkleminde hesaplanan $v_A=491$ m/s ile (2.17) denklemine göre hesaplanan kütleli debi $m'_A=0,133$ kg/s olması durumunda akış gücü formülü, Denklem (2.22)'de;

$$P_A=(m'_A \cdot v_A^2)/2 \quad (2.22)$$

olduğu gibidir ve havanın akış gücü $P_A=16$ kW bulunur. Nozul çıkışıındaki havanın itici akışı, Denklem (2.23)'te;

$$i_A=m'_A \cdot v_A \quad (2.23)$$

olduğu gibidir. Yukarıda bahsedilen değerler için itici akış yaklaşık $i_A=65$ N'dur. Havanın genleşmesinden dolayı hava sıcaklığı nozul boyunca düşer.

Nozul çıkışıındaki hava sıcaklığı için, Denklem (2.24);

$$T_E=T_N-v_A^2/(2 \cdot C_P) \quad (2.24)$$

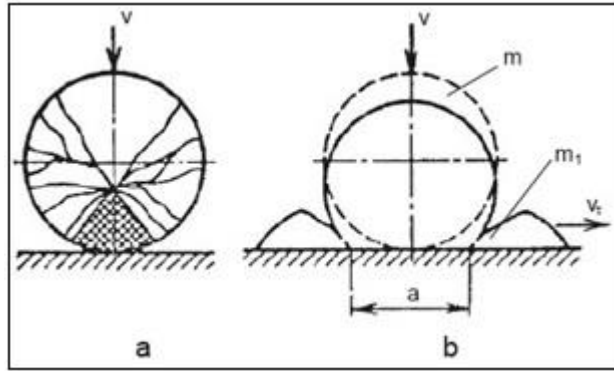
kullanılmaktadır. Denklemdaki T_N havanın giriş sıcaklığıdır. Havanın izobarik ısı kapasitesi değeri $C_P=1,004$ N.m/(kg°K)'dir. Denkleme göre nozul çıkışıındaki havanın sıcaklığı $T_E=180^\circ\text{K}$ olarak bulunur.

2.2.4. Nozuldaki aşındırıcı partikül hızı

Aşındırıcı partikül hızı, aşınma süreci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Hızın düşük olduğu durumda çarpma anındaki gerilmeler plastik deformasyon oluşumu için yetersiz kalır ve aşınma yüzey yorulması şeklinde devam eder. Eğer hız artırılırsa, aşınan malzeme partikül çarpmasına bağlı olarak plastik deformasyona uğrayabilir.

Bu sistemde, aşınma tekrarlanan plastik deformasyonla oluşur. Kırılgan aşınma davranışında, aşınma alt yüzey kırılması şeklinde meydana gelir. Çok yüksek partikül çarpma hızlarında, yüzeyde ergime ortaya çıkabilir.

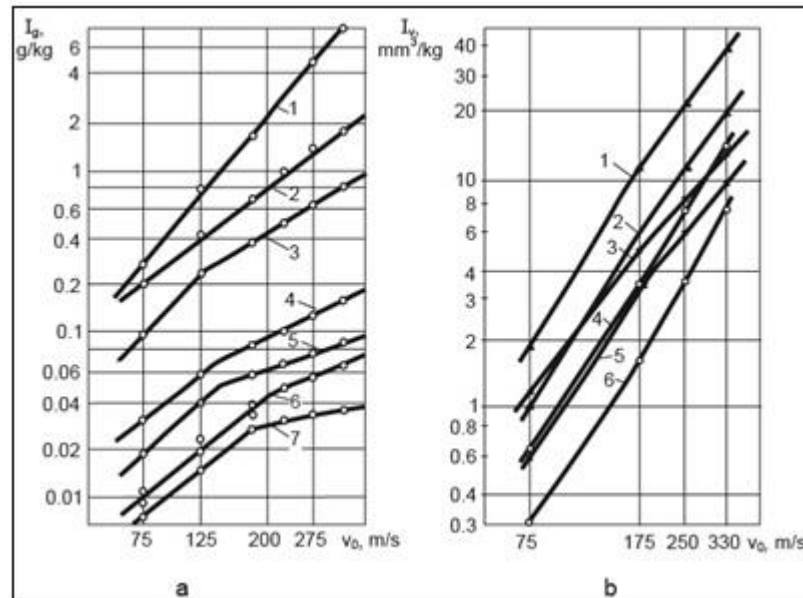
Katı partiküller eşik çarpma hızını aşarak hedef malzemeye çarpıp parçalanırken oldukça fazla enerji harcar ve malzeme üzerindeki gerilme yoğunluğu, kırılmaya sebep olur. Şekil 2.41'de a- çatlaklar, b- çarpışma sürecindeki kütle ve hızların dağılımı, m: toz halindeki parçanın kütlesi ve v_T - yüzey boyunca m_1 kütlesinin yayılma hızını göstermektedir.



Şekil 2.41. Kırılgan bir parçacığın davranışı
(Reiners E.,1962)

Şekil 2.42'de sert metallerin ve çeliğin yüzeye çarpma hızlarında aşındırdıkları oran gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde kaba taneli sert metal kumlar, ince taneli metal kumlara göre yüzeyden daha çok malzeme kaldırdığı görülmektedir.

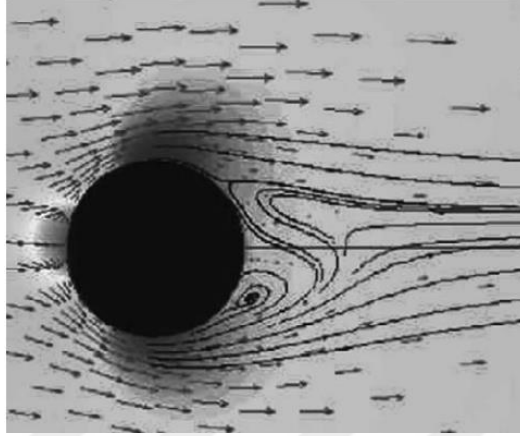
Şekilde a- taş ocağı kuvars kumu çarpma açısı $\phi = 90^\circ$; 1- % 0,2 C çelik, 2- sert metal WC - 20Co, 3- sert metal WC -15Co, 4- kaba taneli sert metal WC-6Co, 5- sert metal WC-6Co, 6- ince taneli sert metal, WC-6Co ve 7- ince taneli sert metal WC-3Co. b - korundum kumu; 1- sert metal WC-15Co, $\phi = 90^\circ$, 2 - 1 ile aynı, $\phi = 30^\circ$, 3 - ince taneli sert metal WC-3Co, $\phi = 90^\circ$, % 4 - 0,2 C çelik, $\phi = 30^\circ$, 5- ince taneli sert metal WC-3Co, $\phi = 30^\circ$ ve % 6 - 0,2 C çelik, $\phi = 90^\circ$ gösterilmektedir.



Şekil 2.42. Sert metallerin ve çeliğin v_P çarpma hızındaki aşındırma oranı (Langeberg I.,1968)

2.2.4.1. Genel görünüm

Katı aşındırıcı partiküller hava ile itilir ve hava tarafından zorlanan direnç kuvvetinden dolayı hızlanır. Şekil 2.43'te bir aşındırıcı partikül küre etrafındaki hava akışı ve basınç şeklinin simulasyonu gösterilmiştir.



Şekil 2.43. Bir partiküldeki basınç hareketi ve yüksek hızdaki hava akışı (H.A. Dwyer,1994)

Newton'un hareketin 2.ci yasasından aşındırıcı partikülün hızlanması, Denklem (2.25)'te;

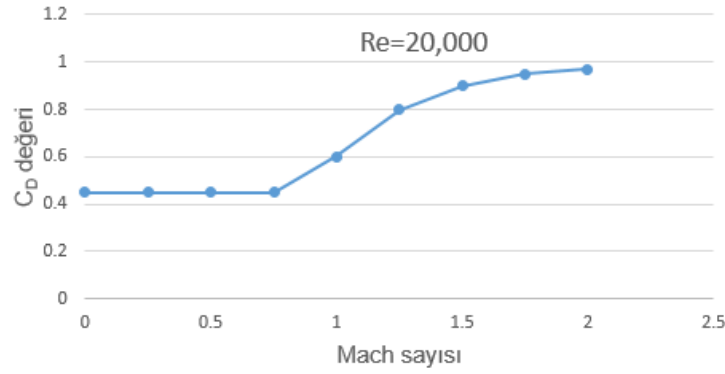
$$m_P.(dv_P/dt)=F_D=C_D.A_P. (\rho_A/2).|v_A-v_{P0}|^2 \quad (2.25)$$

olduğu gibidir.

Direnç kuvveti F_D ; partikülün direnç katsayısı (C_D), partikülün ortalama kesit alanı (A_P), hava ile partikül arasındaki bağıl hız ve havanın yoğunluğuna (ρ_A) bağlıdır. $|v_A - v_{P0}|$ ifadesi, hava ile partikül arasındaki bağıl hızdır.

Direnç katsayısı (C_D), akışın Reynolds sayısına ve Mach sayısına bağlıdır. Havanın sıkıştırılabildiği durumlarda Mach sayısı önemlidir.

Şekil 2.44'da direnç katsayısı ve Mach sayısı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Direnç katsayısı kısmen Reynolds sayısına bağlıdır. C_D değeri düşük Mach sayısında düşüktür ama bu değer yaklaşık $Ma=1$ değerinden sonra önemli ölçüde artar. Sonunda Mach sayısının $Ma=1,4$ 'ten büyük olduğu değerlerde sabit konuma gelir.



Şekil 2.44. Mach ve Reynold sayısının sürtünme üzerindeki etkisi (Settles ve Geppert, 1997)

2.2.4.2. Aşındırıcı partiküllerin 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.

Belirli bir akış oranı eşik değerine kadar erozyon aşınma miktarının akış debisiyle doğru orantılı olduğu rapor edilmiştir. Süreç, her çarpmadan sonra oluşan bir geçici reaksiyonlar dizisi olarak değerlendirilebilir. Akış debisi arttığında, ilgili yüzeydeki çarpmalar arası zaman azalır. Bundan dolayı bir sonraki çarpmadan önce bozulma reaksiyonu için daha az zaman kalacaktır ve böylece bozulmanın derecesi ve ona bağlı olarak da erozyon aşınması miktarı düşecektir. Bu analizlerden; seçilen malzemenin erozyon davranışını etkilememesi için, partikül etkileşimi ve çevresel bozulma etkilerini ortadan kaldıracak bir özel debi miktarı seçilmesi gereklidir sonucu çıkarılabilir.

2.2.4.3. Aşındırıcı partikül boşluğu

Katı partikül erozyonu ile temizleme nozulunda her bir aşındırıcı partikül arasındaki ortalama mesafe (L_P), Denklem (2.26)'daki gibi;

$$L_P = (m_P \cdot \pi \cdot V_P \cdot r_N^2 / m'_P)^{1/3} \quad (2.26)$$

hesaplanmaktadır. Denklemdaki r_N nozul yarıçapıdır. Tablo 2.8'de aşındırıcı partikül çapı, partikül hızı ve aşındırıcı kütleli debiye bağlı olarak bir nozuldaki partiküller

arası yaklaşık mesafeler gösterilmiştir. Aşındırıcı partikül çapı ve aralarındaki boşluğun mesafesinin oranı genel olarak $L_p/d_p=15$ 'tir. Düşük kütleli debi için bu değer $L_p/d_p=23$ 'e kadar çıkabilir.

Tablo 2.8. Bir nozulda bulunan partiküllerin arasındaki ortalama mesafesi (Shipway and Hutchings, 1994)

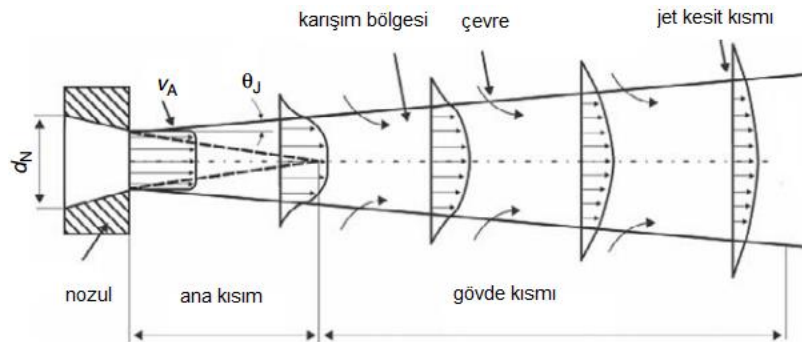
Partikül çapı d_p (μm)	Partikül hızı v_p (m/s)	Aşındırıcı kütleli debi m_p (g/dk)	Ortalama mesafe L_p (μm)	L_p/d_p
63-75	70	50	900	~13
125-150	52	6	3.200	~23
212-250	45	31	4.000	~17
650-750	29	37	7.900	~13

2.2.5. Nozul-jet yapısı

2.2.5.1. Havanın nozuldan çıkış yapısı

Şekil 2.45'de, jetlerde olduğu gibi bir nozuldan çıkan yüksek hızdaki akışkanın yapısı gösterilmektedir.

Jet yapısında 2 ana kısım mevcut olup bunlar ana kısım ve gövde kısmıdır. Ana kısımda ortalama hız aynıdır ve çıkış hızına eşittir. Bu bölgede hız profili düzgündür. Çevre ve jet arasındaki hız farkından dolayı ince bir tabaka formu oluşur. Bu tabaka düzensizdir, akış kararsızlığına bağlıdır ve dikey yönde yapısal formasyonlara neden olur. Gövde kısmında, radyal hız dağılımı Şekil 2.45'deki gibi çan şeklindedir. θ_j , jetteki genişleme açısıdır. Bu açıyı hesaplamak için, jet ve çevre arasındaki hava akışının sınırları bilinmesi gerekmektedir. Genellikle θ_j açısı $12,5^\circ$ ve 15° aralığındadır.

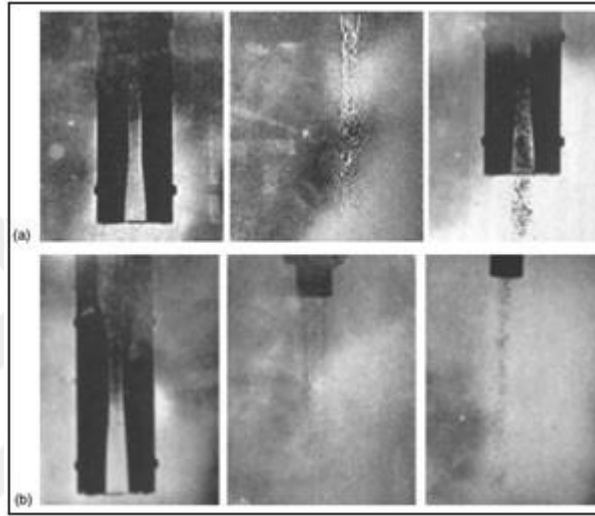


Şekil 2.45. Bir nozuldan çıkan yüksek hızdaki havanın yapısı (Achtnick, 2005)

2.2.5.2. Nozuldaki hava-partikül yapısı

Katı partikül erozyonu ile temizlemede nozul tasarımının hava-partikül yapısına olan etkisi önemlidir.

Şekil 2.46.a'da kötü tasarlanmış bir nozuldan çıkan düzensiz hava-partikül karışımı görülmektedir. Ortadaki şekilde şok dalgalı, sağdaki şekilde düzensiz aşındırıcı partikül dağılımı görülmektedir. Şekil 2.46.b'de ise aşındırıcı dağılımı düzgün olan iyi tasarlanmış bir nozul görülmektedir.



Şekil 2.46. Nozul tasarımının jet yapısı ve aşındırıcı hızlanmasına etkisi (Plaster, 1972)

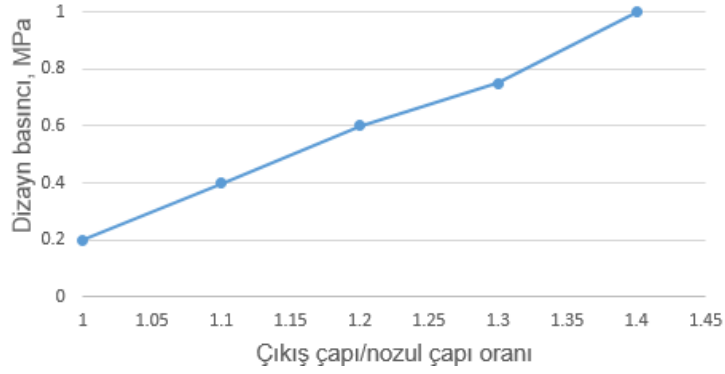
2.2.5.3. Nozul basıncı tasarımı

Tasarım kriteri olarak nozul çıkışındaki hava basıncı (p_E) kullanılır. Katı partikül erozyonu ile temizleme uygulamalarında bu basınç, literatürde geri basınç olarak adlandırılan çevre basıncına eşittir. Bu durumda hava basıncı nozul boyunca düşer. Tasarım kriteri olarak, Denklem (2.27);

$$(d_E/d_N)^2 = [(k+1)/2]^{1/(k-1)} \cdot (p_E/p)^{1/k} \cdot \left\{ (k+1)/(k-1) \cdot [1 - (p_E/p)^{(k-1)/k}] \right\}^{1/2} \quad (2.27)$$

kullanılmaktadır. Denklemdeki d_E Laval nozulunun çıkış çapıdır. $p_E = p_0$ için bu eşitlik boğazdaki nozul çapı ve nozul çıkış çapı arasındaki oranı verir. Bu denklemin grafiğe dökülmüş hali Şekil 2.47'de gösterilmiştir.

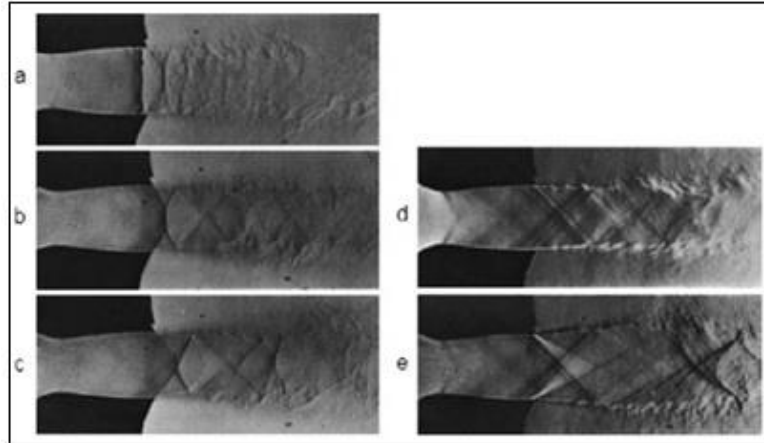
Eğer nozul boyutları bilinirse (d_N, d_E) dizayn basıncı Şekil 2.47a daki grafiğe göre bulunabilir.



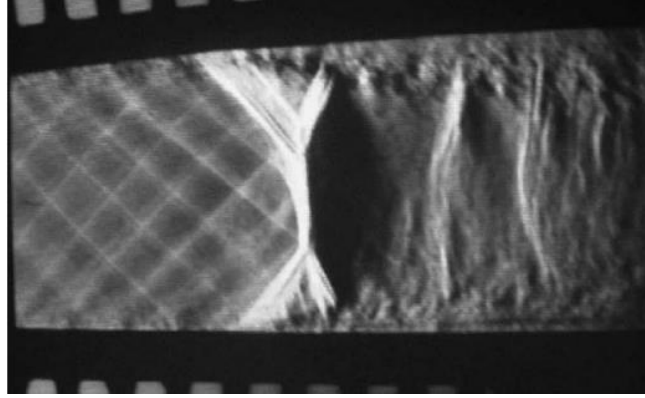
Şekil 2.47. Laval nozulların geometrisi ve dizayn basıncı arasındaki bağıntı

Bir araştırmada (Fokke, 1999), nozuldaki akışın nümerik simülasyonları incelenmiş ve aşındırıcı partiküller (çelik küreler $d_p=50-1.000 \mu m$, $R_m=0,1-6$) eklenerek nozul çıkış basıncına olan hassaslığına bakılmıştır. Tüm değerler için, çıkış basıncı partikül boyutunun azalmasıyla artış göstermiştir. Nozul çıkış basıncının ayrıca aşındırıcı kütsel debinin artmasıyla arttığı, havanın çıkış basıncının aşındırıcı partikül eklendikçe atmosfer basıncının altına düştüğü görülmüştür.

Laval nozulunun en az nozul dizayn basıncında ya da mümkünse daha yüksek basınçta kullanılması tavsiye edilir. Nozul, dizayn basıncının altında çalıştırılırsa aşındırıcı partiküller ve hava akışı şok dalgaları şeklinde yavaşlar. Bu şok dalgalarının yapıları Şekil 2.48'de gösterilmiştir. Şekilde a- nozul çıkışı önü şok ayrılmalı aşırı genişlemiş akışlı, b- nozul çıkışı normal merkezi şoklu aşırı genişlemiş akışlı, c- şok meyilli nozul dış tarafı aşırı genişlemiş, d- izotropik nozul akışı, e- nozul dışı keskin genişli dalgalı az genişlemiş akışlı resmi gösterilmiştir. Şekil 2.49'de bir nozulun iraksak kesitindeki şok dalgası gösterilmiştir.



Şekil 2.48. Yakınsak-ıraksak nozulun çıkış tarafındaki akış durumu (Oosthuizen ve Carscallen, 1997)



Şekil 2.49. Bir nozulun ıraksak kesitindeki şok dalgası (Settles ve diğ., 1995)

Şekil 2.50, nozul giriş basıncı ve çevre basıncı arasında çalışan yakınsak-ıraksak nozul boyunca düşük basıncı özetler.

Tüm akış koşullarında boğaza kadar yakınsak kısımda nozul basıncı düşer. Eğer nozul çıkışıyla atmosfer basıncı eşit olacak şekilde tasarlanırsa, hava, nozuldan paralel olarak doğrusal bir şekilde çıkar. Bu durum Şekil 2.50 eğri 1'de gösterilmiş ve resim olarak Şekil 2.48d'dedir. Şekil 2.48.d'de katı çizgi üzerindeki hatlar belirgindir.

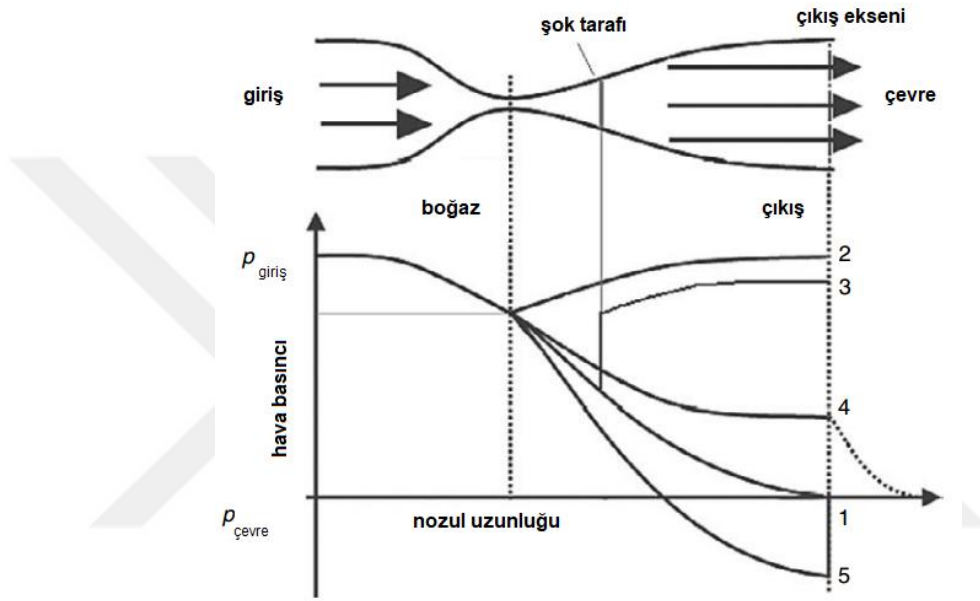
Eğri 2'de, çevre basıncı nozul çıkış basıncından yüksektir, ancak nozulun boğaz kısmında ($Ma=1$) ses koşullarına ulaşan akış rejimi için basınç düşer. ıraksak bölgedeki akış hala subsoniktir çünkü geri basınç hala yüksektir. İdeal akış koşullarında (sürtünmesiz) nozul çıkış basıncı giriş basıncına eşittir (Eğri 1).

Eğri 3, çevre basıncı düşürüldüğündeki durumu göstermektedir. Bu durumda nozulun ıraksak kısmındaki akışta bir sıkışma şoku meydana gelir. Bu şokun örneği Şekil 2.49'da gösterilmiştir. Bu sıkışma şoku nozulun ıraksak kısmında gerçekleşir ve akışa diktir.

Sıkışma şoku, Şekil 2.52'de basınç atlama olarak 1 ve 3 numaralı eğriler arasındaki dikey eğri olarak gösterilmiştir. Bu şokun ön tarafındaki akış süpersonik hızında olup şokun arkasındaki akış subsonik hızında taşınır. Şokun mukavemeti ve konumu çevre basıncına bağlıdır. Çevre basıncı azaltılırsa şok dalgası akış yönünde hareket eder ve akış nozul çıkış düzlemine ulaşır (Şekil 2.48.a). Böylece basınç atlama eğimli şok dalgalarının yerini alır. Bu tip akışlı nozul aşırı genişlemiş nozul olarak adlandırılır.

Eğri 4 ile Şekil 2.48.b ve c bu duruma örnektir. Normal konumdaki merkezi şok dalgası Şekil 2.48.b'de gösterilmiştir. Daha düşük çevre basıncı için şok yörüngesi Şekil 2.48.c'deki gibi eğimli olmaya başlar.

Eğer çevre basıncı düşürülür ve nozul çıkış basıncından düşük olursa, akış genişler ve nozul çıkışında genişleme dalgaları serisi yerini alır. Bu durum eğri 5 ile ifade edilmiştir. Şekil 2.48.e' de gösterilen böyle bir akışlı nozul genişlemiş olarak adlandırılır.



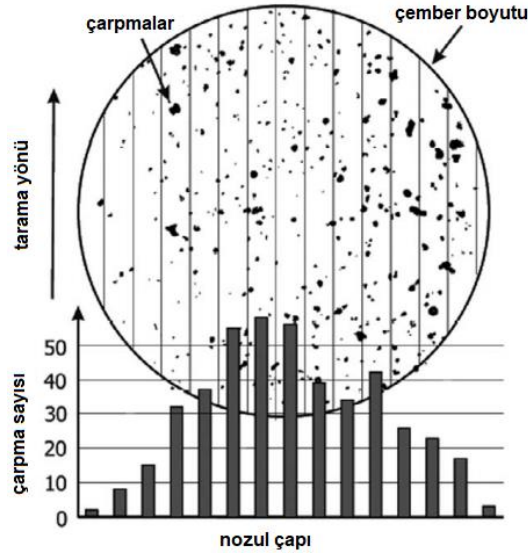
Şekil 2.50. Yakınsak-ıraksak nozulun çalışma koşulları (Oertel, 2001)

2.2.6. Aşındırıcı partiküllerin dağılımı

2.2.6.1. Radyal aşındırıcı partikül dağılımı

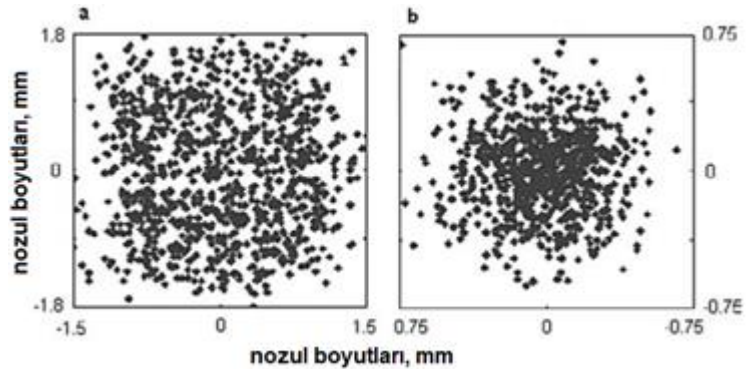
Katı partikül erozyonu ile temizleme nozullarından çıkan aşındırıcı partiküllerin radyal dağılımını değerlendirmek için özel bir cihaz tasarlanmıştır.

Nozul çıkışındaki partiküllerin yoğunluk dağılımını direkt olarak ölçmek zor olduğundan, cam bir plakaya nozuldan aşındırıcı partikül püskürtülmüştür. Partiküller mikroskopik olarak boyutlarına bakılmaksızın sayılmış ve Şekil 2.51'de sonuçları gösterilmiştir. Partiküller genel olarak nozul ekseninin merkezine yakın bölgesinde kümелendiği ve merkezin dışına doğru çarpma sayısının düştüğü görülmüştür.



Şekil 2.51. Nozul çıkışındaki yaklaşık aşındırıcı partikül dağılımı (Achtsnick, 2005)

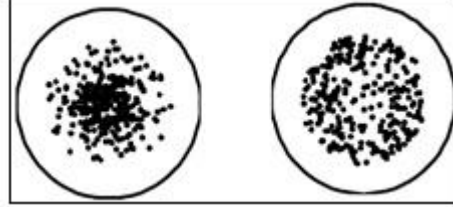
Partikül dağılımı ile ilgili farklı nozul tiplerinde nümerik simülasyonlar geliştirilmiştir. Örnekleri Şekil 2.52 ve 2.53'te gösterilmiştir. Şekillerde aşındırıcı partikül yoğunluk dağılımının nozul tipi ve aşındırıcı partikül boyutuna bağlı olduğu görülmektedir. Nozul tipinin etkisi Şekil 2.52'de gösterilmiştir. Buna göre Laval tipi nozulda aşındırıcı giriş kanalı ve nozul çıkışı kesit kısmı değişimi ile daha geniş konsantrasyonlu partikül dağılımı sağlayabilir. Silindirik nozulda ise, nozul kesitinin merkezinde aşındırıcı konsantrasyonunun yüksek olduğu görülür ve bu da nozul tasarımı açısından önemlidir. Şekilde a- karesel yakınsak-ıraksak nozul, b- standart silindirik nozulu göstermektedir.



Şekil 2.52. Nozul çıkışındaki aşındırıcı partikül dağılımı (Achtsnick ve diğ., 2005)

Şekil 2.53'te klasik yuvarlak kesitli nozullardaki partikül yoğunluk dağılımı üzerinde aşındırıcı partikül çaplarının etkisini göstermektedir. Her iki durumda da partiküller

nozul kesitinin merkezinde toplanmıştır ancak partikül dağılımı açısından küçük çaplı aşındırıcılar daha homojen bir dağılım gösterdiğinden daha çok tercih edilmektedir. Şekilde aşındırıcı malzeme: çelik grit çapları; 820 µm ve 300 µm'dir.



Şekil 2.53. Yuvarlak kesitli nozul çıkışındaki aşındırıcı partikül dağılımı. (McPhee, 2001)

2.2.6.2. Partikül hız dağılım fonksiyonu

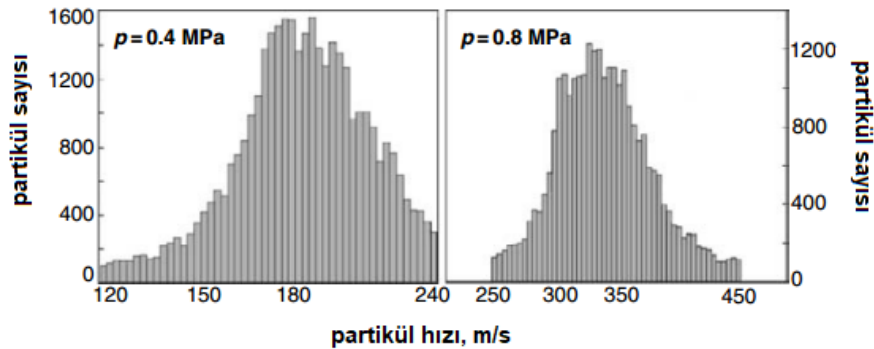
Deneyssel olarak yapılan bir çalışmada (Achtnick ve diğ., 2005), nozuldaki aşındırıcı partiküllerin hızlarının istatistik hız dağılımları Şekil 2.54 ve 2.55'de gösterilmiştir.

Şekil 2.54'te iki farklı hava basıncında yakınsak-ıraksak bir nozulda alüminyum oksit partikül (mesh 360) hızlarının ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Görüldüğü gibi, yüksek hava basıncıyla ortalama partikül hızı arasında doğru orantı vardır.

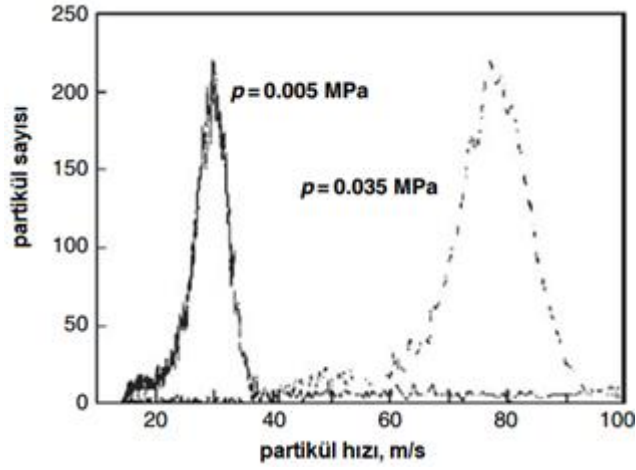
Şekil 2.55'deki iki grafik için de durum aynıdır. Bu durumda Silisyum kum partiküllerinin silindirik nozulda düşük hava basıncında hızları daha düşüktür. Şekil 2.55'te Silisyum partikülleri ölçümü ($d_p = 125-150 \mu m$) silindirik bir nozuldaki iki farklı düşük basınç seviyesini göstermektedir. Aşındırıcı partikül hız dağılım fonksiyonu, Denklem (2.28)'de;

$$f(v_p) = 1/(\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_{v_p}) \cdot \exp [-(v_p - v'_p)^2 / (2 \cdot \sigma_{v_p}^2)] \quad (2.28)$$

olduğu gibidir.



Şekil 2.54. 2 farklı basınçta nozuldaki aşındırıcı partikül hızı (Achtnick, 2005)

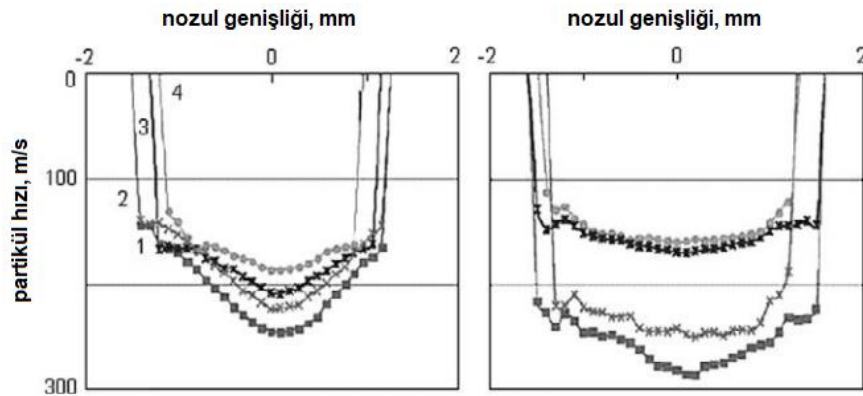


Şekil 2.55. Hava jetindeki aşındırıcı partikül dağılımı (Stevenson ve Hutchings, 1995)

2.2.6.3. Radyal aşındırıcı partikül hız dağılımı

Yapılan bir çalışmada (Achtnick ve diğ., 2005), İki farklı nozul kesiti için aşındırıcı partikül hızları ölçülmüş ve sonuçları Şekil 2.56'da gösterilmiştir. Radyal aşındırıcı hızı, nozul tasarımına ve hava basıncına bağlıdır. Silindirik nozulda Şekil 2.56'daki 1. grafik çan şeklinde hız profili olduğu görülmektedir. Bu tür profiller standart Laval nozullarıyla benzerlik gösterir.

Şekil 2.56'daki 2. grafik dik kesit alanlı Laval nozuludur ancak dik şekilli hız profili daha verimlidir. Yüksek basınçlı hava, partikül hız profilini olumsuz etkilemektedir. Profil, çok yüksek hava basıncı için çan şeklinde olmaktadır. Şekilde Sol grafik standart nozul; Sağ grafik kare Laval nozul, basınç seviyesi: 1- $p=0,8$ MPa; 2- $p=0,6$ MPa; 3- $p=0,5$ MPa; 4- $p=0,4$ Mpa'dır.

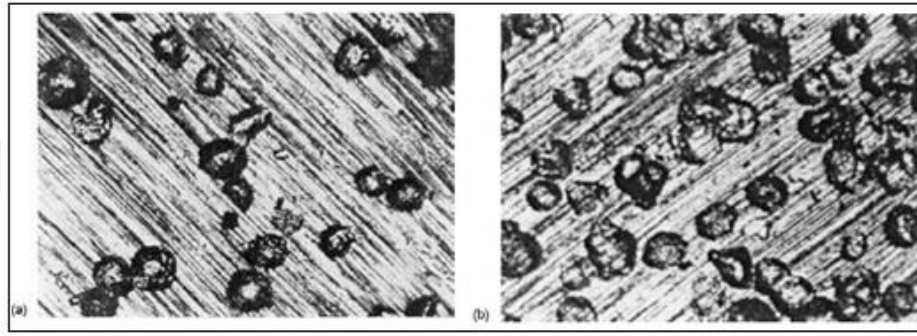


Şekil 2.56. Nozullardaki radyal aşındırıcı partikül hız dağılımı, (Achtnick ve diğ., 2005)

2.2.6.4. Aşındırıcı partikül kaplama alanı

Aşındırıcı partiküllerin hedef yüzeyinin kaplama alanı Şekil 2.57 ve 2.58'de gösterildiği gibidir. Şekil 2.57, iki adet çökme dağılımının resmini göstermektedir. Çökmeler, aşındırıcı partiküllerin sıkışmasından dolayı hedef yüzeyin değişme formudur.

Deneysel olarak yapılan ölçümlerde aşındırıcı partikül çap değerinin artmasıyla ve aşındırıcı partikül sayısının azalmasıyla çökme yoğunluk dağılımının düştüğü görülmüştür. Şekilde partikül oranı a- %16; b- %52'dir.



Şekil 2.57. Aşındırıcı partikül kaplama alanı görüntüsü (Meguid ve Rabie, 1986)

Şekil 2.58, kaplama alanı grafiği olup, kaplama alanı değeri C_A , Denklem (2.29)'da;

$$C_A(t_E) = 100 \cdot [1 - \exp(-3 \cdot r_1^2 \cdot m'_p \cdot t_E) / (4 \cdot A_G \cdot r_p^3 \cdot \rho_p)] \quad (2.29)$$

olduğu gibidir.

Denklemde görülen r_1 değeri girinti yarıçapını, A_G değeri ise dağılmış partikül alanını ifade etmektedir.

Şekil 2.58, Aşındırıcı partikül kaplama alanı ve süresi arasındaki bağıntıyı göstermektedir. Kplama alanının fonksiyonu iki kısma ayrılabilir. Şekil 2.58'de gösterildiği gibi ilk kaplama alanı (1) ve tüm kaplama alanı (2)'dir.

Deneysel olarak yapılan bir çalışmada (Tosha ve Lida, 2001), ilk kaplama alanının, aşındırıcı çapı artmasıyla düştüğü, aşındırıcı partikül hızının yükselmesi ile arttığı ve zamanla hedef malzeme yüzeyi üzerindeki aşındırıcı partikül kaplama alanının arttığı görülmüştür.

$$r_p^* = N'_p \cdot r_p / V_p \quad (2.32)$$

olduğu gibidir. Püskürtülen partiküller, ortalama hızda nozul yarıçapı izdüşümündeki mesafede hareket eder. Boyutsuz nozul mesafesi x^* , Denklem (2.33)'te

$$x^* = x \cdot N'_p / V_p \quad (2.33)$$

gösterilmiştir.

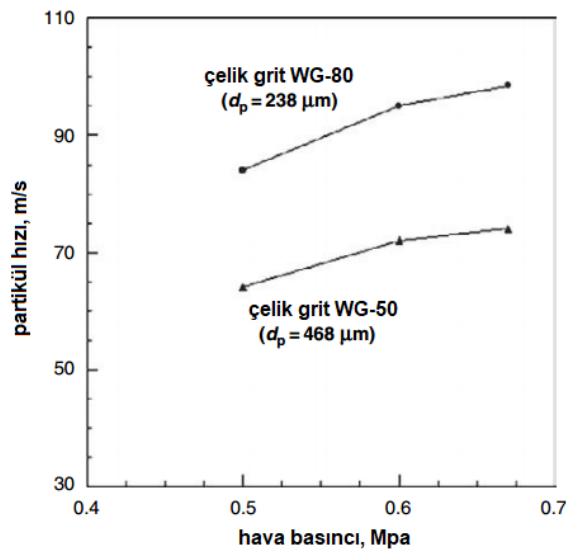
2.2.7. Aşındırıcı partikül hızına etki eden parametreler

2.2.7.1. Hava basıncının partikül hızına etkisi

Nozul basıncının artmasıyla, aşındırıcı partiküllerin hızlarının arttığı bilinmektedir. Genellikle, hava basıncı ile partikül hızı arasındaki bağıntı, Denklem 2.34'te;

$$v_p \propto p^{n_v} \quad (2.34)$$

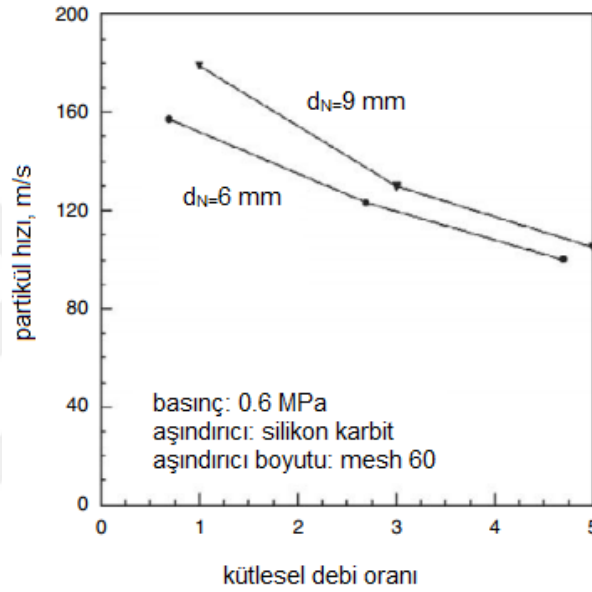
olduğu gibidir. Buradaki n_v birçok parametreye bağlıdır, bunlar arasında aşındırıcı kütleli debi de vardır. Yapılan bir çalışmada (Fokke, 1999), hava basıncı ile aşındırıcı partikül hızı arasında lineer ($n_v = 1$) bir bağıntı olduğunu ve orantılı olarak aşındırıcı tipine bağlı olduğunu bulunmuştur. Şekil 2.60'da çelik grit malzemesi için, hava basıncı ve aşındırıcı partikül boyutunun partikül hızına etkisi gösterilmiştir. Hava basıncındaki artış, hava yoğunluğu kadar havanın hızını da artırır. Yapılan ölçümlerde, hava basıncının $p=0,2$ 'den $0,4$ MPa'ya yükselmesiyle aşındırıcı kütle hızının da +%35 oranında yükseldiği, hava basıncının $p=0,4$ 'ten $0,6$ MPa'ya yükselmesiyle aşındırıcı partikül hızının da +%25 oranında arttığı bildirilmiştir.



Şekil 2.60. Hava basıncı ve partikül boyutunun partikül hızına etkisi (Fokke, 1999)

2.2.7.2. Aşındırıcı kütleli debinin partikül hızına etkisi

Deneysel çalışmalar sonucunda (Wolak ve diğ., 1977), aşındırıcı kütleli debi oranının artmasıyla aşındırıcı partikül hızının düştüğünü göstermiştir. Şekil 2.61’de partikül hızıyla aşındırıcı kütleli debi oranı arasındaki ters orantı gösterilmektedir. Aşındırıcı malzeme olarak mesh 60 boyutunda silikon karbit kullanılmış ve aşındırıcı kütleli debinin partikül hızı üzerindeki değişimin etkisi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere kütleli debinin yükselmesiyle partikül hızı düşmektedir. Ayrıca nozul çapının da etkisinin de olduğu görülmektedir.

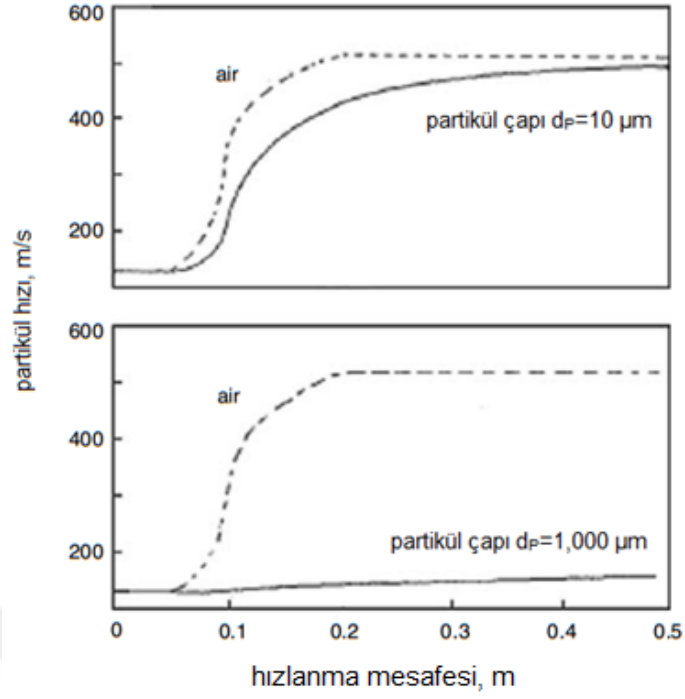


Şekil 2.61. kütleli debinin partikül hızına ve nozul çapına etkisi (Wolak ve diğ., 1977)

2.2.7.3. Aşındırıcı partikül boyutunun partikül hızına etkisi

Aşındırıcı partikül boyutundaki artış ile aşındırıcı partikül hızının düştüğü yapılan araştırmalar (Fokke, 1999), sonucunda bulunmuştur. Şekil 2.60’da gösterilen örnekte büyük boyutlu (468 μm) çelik grit malzemesinin düşük boyutlusuna (238 μm) göre partikül hızlarının daha yavaş oldukları görülmektedir.

Ayrıca, Laval tipli nozullar için nümerik simülasyonlar uygulamış ve daha küçük aşındırıcı partiküllerin yüksek hızda oldukları kanıtlanmıştır (Şekil 2.62). Çapı $d_p=10 \mu\text{m}$ olan partikül için nozul çıkış hızı yaklaşık olarak $v_p= 500\text{m/s}$ ye ulaşırken, çapı $d_p=1.000 \mu\text{m}$ olan bir partikülün hızı $v_p=150 \text{ m/s}$ 'ye ulaşmaktadır.



Şekil 2.62. Aşındırıcı partikül boyutunun Laval nozullarındaki partikül hızına etkisi (Settles ve Garg, 1995)

2.2.7.4. Aşındırıcı partikül şeklinin partikül hızına etkisi

Eski tarihli deneysel bir araştırmaya göre (Rosenberger, 1939), aşındırıcı partikül şeklinin partikül hızı üzerindeki etkisi ile ilgili “Küresel partiküller açısallara göre daha yavaş hareket eder.” ifadesi tanımlanmıştır.

Çoğu nozul türleri için belirli bir hava basıncında, cam kürelerin hızları düzensiz silisyum partiküllerinden daha düşüktür. Bunun iki sebebi vardır. Bunlardan birincisi, silisyum şekillerinin düzensizliği yani aşındırıcı partiküllerin kütlelerinin birbirinden farklı olması ve ayrıca daha büyük direnç katsayısına sahip olması.

İkinci olarak, aşındırıcı kürelerin ve açısallara nozul duvarlarındaki sekme hareketinin farklı olmasıdır. Açısallara bir partikül çarpma etkisiyle dönebilir. Bu, nozul boyunca yüksek hızlanmaya sebep olur.

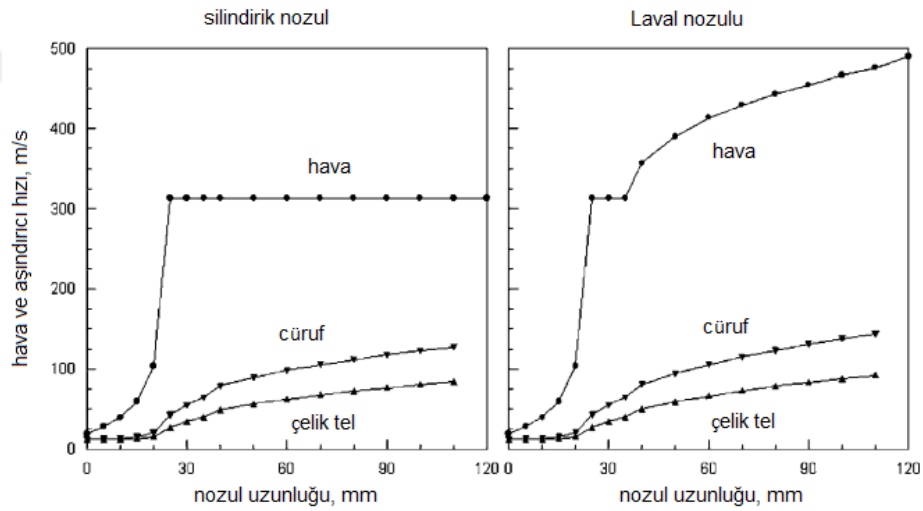
Küresel çelik partikülleri ile düzensiz çelik grit partikülleri kıyaslanarak nümerik deneysel sonuçlar gözlenmiş ve küresel çelik partiküllerin hedef malzemede daha düzgün ve pürüzsüz yüzey bıraktığı görülmüştür.

2.2.7.5. Aşındırıcı partikül yoğunluğunun partikül hızına etkisi

Eski tarihli bir deneysel araştırmaya göre (Rosenberger, 1939), aşındırıcı malzeme yoğunluğunun partikül hızı üzerindeki etkisi “Aşındırıcı hızının, aşındırıcı malzemenin spesifik gravitesi ile ilişkisi vardır, spesifik gravite yüksek olduğunda aşındırıcı hızı düşük olur.” ifadesi tanımlanmıştır. Bilim adamları tarafından yapılan araştırmalarda partikül malzeme yoğunluğu arttığında partikül hızının düştüğünü göstermişlerdir.

Şekil 2.63'teki grafiğe göre cüruf partikülleri ($\rho_P=2900 \text{ kg/m}^3$) ile çelik tellerin ($\rho_P=7800 \text{ kg/m}^3$) farklı tip nozuldaki partikül hızları gösterilmektedir. Şekle göre yoğunluğu daha düşük olan cüruf malzemesinin partikül hızı daha yüksek olmaktadır.

Daha ağır partiküller (yüksek yoğunluklu ve geniş çaplı) hafif partiküllere göre daha büyük hızlanma mesafesine sahip olacaktır. Verilen bir hızlanma mesafesi için daha ağır partiküllerin partikül hızı daha düşüktür. Bu da partikül malzeme yoğunluğu ve partikül çapının etkisiyle açıklanabilir.



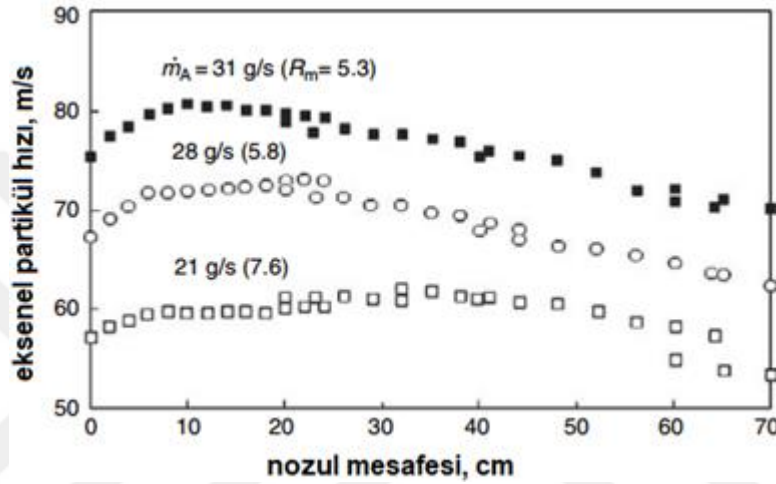
Şekil 2.63. Nozul tipinin ve farklı tip aşındırıcının partikül hızına etkisi (Uferer, 1993)

2.2.7.6. Nozul mesafesinin partikül hızına etkisi

Yapılan bir araştırmada (Bothen ve diğ., 2000) nozul mesafesinin aşındırıcı partikül hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Nozul mesafesinin optimum düzeyde olması halinde, aşındırıcı partikül hızının maksimum olduğu kanıtlanmıştır.

Aşındırıcı partikül hızının dengelenmesi, nozul çıkışından belirli kritik mesafede meydana gelir. Eğer bu nozul mesafesi aşılsa, partikül hızı hava sürtünmesinden dolayı düşmeye başlar.

Şekil 2.64'de gösterilen grafik kütleli debi ve nozul mesafesinin aşındırıcı partikül hızı üzerindeki etkisini göstermektedir. Grafiğe bakıldığında kütleli debiye göre belirli bir nozul mesafesinden sonra (eşik değeri) partikül hızının düştüğü görülmektedir.



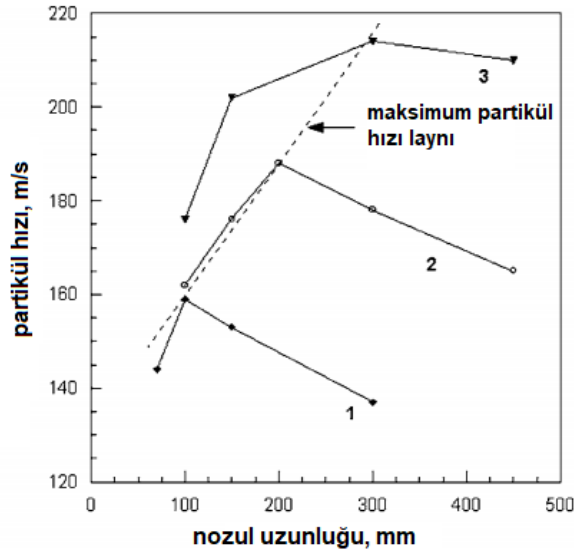
Şekil 2.64. Nozul mesafesinin ve kütleli debinin partikül hızına etkisi (Fokke, 1999)

2.2.7.7. Nozul boyutunun ve nozul çapının partikül hızına etkisi

Nozul boyutunun aşındırıcı partikül hızı üzerindeki etkisinin sonuçları Şekil 2.65'de gösterilmiştir.

Optimum nozul uzunluğu, partikül hızının en yüksek olduğu noktadadır. Buradaki optimum değer, nozul çapı ve nozul uzunluğunun değişmesi durumunda değişmektedir. Aşındırıcı partiküllerin maksimum hıza ulaşması için nozul uzunluğunun yaklaşık olarak bir silindirik nozulun 20 kat iç çapı ölçüsüne eşit olması gerekmektedir.

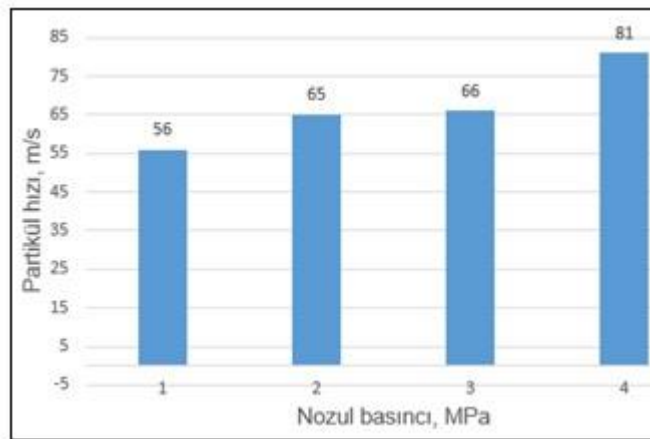
Hava tarafından hızlandırılan aşındırıcı partiküller daha uzun mesafeli nozullarda daha yüksek hava sürtünmesine maruz kalacaktır. Bunun sonucunda havanın ve aşındırıcı partiküller üzerindeki direnç artacak dolayısıyla aşındırıcı partikül hızlarını düşürecektir.



Şekil 2.65. Nozul uzunluğu, çapı ve kütlele debinin partikül hızına etkisi, (Wolak ve diğ., 1977)

2.2.7.8. Nozul tasarımının partikül hızına etkisi

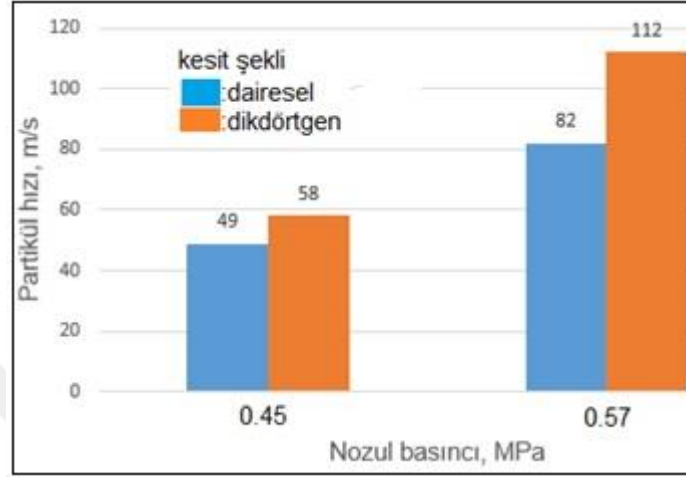
Şekil 2.66'da farklı türde tasarlanmış nozulların aşındırıcı partikül hızı ölçüm sonuçları gösterilmektedir. Şekilde, nozul tipi: 1- çan şekilli silindir; 2- çan şekilli yakınsak; 3- standart yakınsak ıraksak; 4- giriş kısmı özel dizayn edilmiş yakınsak-ıraksak nozuldur. Aşındırıcı partikül hızının en yüksek olduğu nozul tipi, girişi özel olarak tasarlanmış 4 numaralı nozuldur. En düşük aşındırıcı partikül hızına sahip silindirik nozul girişi çan şekilli olan nozul tipi 1 olmaktadır.



Şekil 2.66. Nozul tipinin aşındırıcı partikül hızına etkisi, (Hamann, 1987)

Şekil 2.67'de, nozul basıncı ve nozul kesitinin aşındırıcı partikül hızına etkisi gösterilmektedir. Dik kesit alanlı nozulların kullanılması dairesel kesitlilere kıyasla

partikül hızını artırmaktadır. Nozul kesit alanının aşındırıcı partikül hızı üzerindeki etkisi, nozul hava basıncına da bağlıdır. Nozul basıncının 0,12 MPa artışıyla, dairesel ve dikdörtgen kesitli nozullardaki aşındırıcı partikül hızı oranındaki artış sırayla % 15,5 ve % 27 olmaktadır.



Şekil 2.67. Nozul basıncı ve nozul kesitinin aşındırıcı partikül hızına etkisi (McPhee ve diğ., 2000)

2.2.7.9. Nozul cidarı pürüzlülüğünün partikül hızına etkisi

Silindirik paslanmaz çelik bir nozuldaki cam kürelerin hızlarının nozul iç cidarının pürüzlülüğüne bağlı olarak değiştiği deneylerce (Shipway ve Hutchings, 1993), kanıtlanmıştır. Daha pürüzsüz bir cidarda partiküllerin çıkış hızlarının daha yüksek olduğu bulunmuştur. Örneğin, $p=0,06$ MPa basınçta cam küreler için ($d_p=125-150$ μm) teorik olarak partikül hızı $v_p=100$ m/s dir. Gerçek deney şartlarında pürüzsüz bir nozulda $R_a=0,25$ μm ve $v_p=85$ m/s olarak ölçülmüştür. Nozul pürüzlülüğü yüksek $R_a=0,94$ μm olan bir nozuldaki partikül hızı ise $v_p=65$ m/s olarak ölçülmüştür.

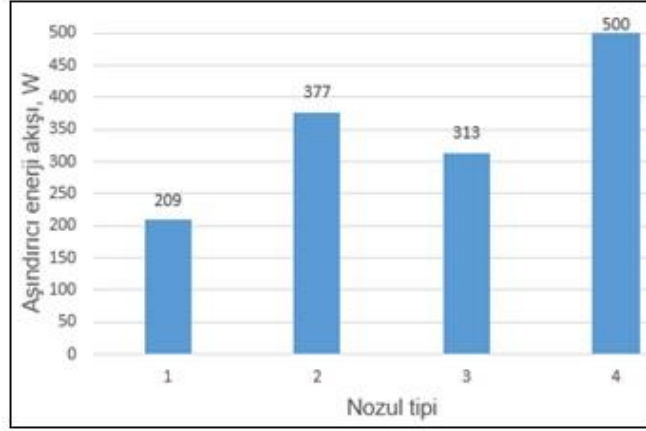
2.2.8. Aşındırıcı enerji akışı ve nozul verimliliği

Aşındırıcı partikül hızı ve aşındırıcı kütledebinin bilinmesi durumunda enerji akışı yaklaşık olarak hesaplanabilir. Bir nozul çıkışındaki aşındırıcı enerji akışı E'_p , Denklem (2.35)'te;

$$E'_p = (m'_p \cdot v_p^2) / 2 \quad (2.35)$$

olduğu gibidir. Şekil 2.68'de aşındırıcı enerji akışının nozul tasarımına bağlı olduğu görülmektedir. Giriş kısmı özel olarak tasarlanmış yakınsak - ıraksak bir nozulun enerjisi $E_p=500$ Nm/s iken, çan şekilli silindirik nozulun enerjisi $E_p=209$ Nm/s olmaktadır. Bu fark yaklaşık olarak % 240'tır. Şekilde, nozul tipi: 1- çan şekilli

silindirik; 2- çan şekilli yakınsak; 3- standart yakınsak-ıraksak; 4- giriş kısmı özel dizayn edilmiş yakınsak-ıraksak nozuldur.

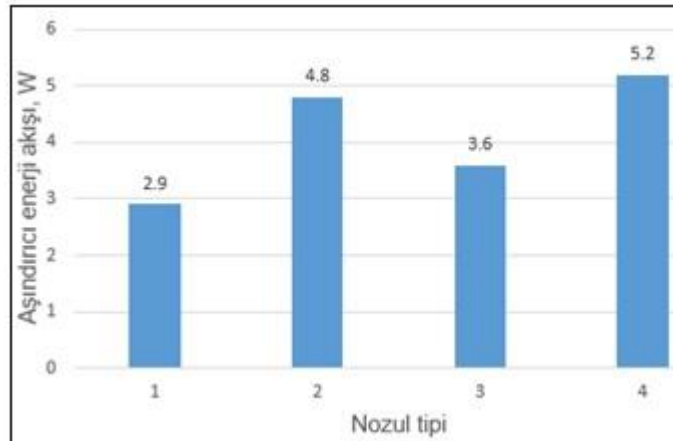


Şekil 2.68. Nozul tipinin aşındırıcı enerji akışına etkisi (Hamann, 1987)

Nozul verimliliği (η_N) ise aşındırıcı enerji akışı ile kompresörün sıkıştırma gücüne (P_H) bağlı olup genel olarak $\eta_N = \% 3$ ve $\% 5$ arasındadır. Denklem (2.36)'da;

$$\eta_N = \frac{m'_P \cdot V_P^2}{2 \cdot P_H} \quad (2.36)$$

nozul verimliliği ifadesi gösterilmiştir. Bu parametre basınçlı hava ile aşındırıcı partikül arasındaki güç transferini tanımlar. Bu parametrenin verimliliği ne kadar yüksek ise güç transferi o kadar yüksek olur. Şekil 2.69'da nozul verimliliğinin çeşitli nozullar üzerindeki etkileri gösterilmiştir. Buna göre en iyi kalitedeki nozul tipi giriş kısmı özel dizayn edilmiş yakınsak-ıraksak “nozul 4” tür. Şekilde, nozul tipi: 1- çan şekilli silindirik; 2- çan şekilli yakınsak; 3- standart yakınsak-ıraksak; 4- giriş kısmı özel dizayn edilmiş yakınsak-ıraksaktır.



Şekil 2.69. Nozul tipinin verimliliğe etkisi, (Hamann, 1987)

3.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ekler bölümünde verilen şekillerde, gerek denizcilik gerekse endüstri alanında ortaya çıkan korozyona uğramış parça ve mekanizmalar görünmektedir. Bu mekanizmaların içinde bulunan parçalar özellikle servis süresi içerisinde minimum zamanda ve efektif bir şekilde temizlenerek asli görevlerini yapmak üzere ilgili yerlere monte edilmesi gereklidir. Bakım süresinin kısılmasının getireceği artı değer yerine göre çok yüksek olacaktır. Yüksek lisans tezi kapsamında ticari bir ürün olan GMT1 aşındırıcı ürünü korozyona uğramış ve endüstriyel temizlenme ihtiyacı olan bölgelere püskürtülmüştür.

Bu esnada mobil sistemler kullanılmış ve yüzeye püskürtülme elle yapılmıştır. 10-15 saniye gibi kısa sürelerde halen kullanılan yüzey temizleme yöntemlerinden çok daha kısa sürelerde ve çok yüksek kalitede temizleme yapılmıştır. Burada vurgulanması gereken en önemli husus temizlemenin ana malzemeyi etkilememiş olmasıdır. Yüzeydeki korozyon ve kirlilik yaratan unsurlara yapılan püskürtmelerde ana malzemenin (hedef malzeme) türü azami olarak dikkate alınmıştır.

Yapılan çalışmaların tümünde ana malzeme yumuşak çelik ve alüminyum gibi yumuşak malzemelerdir. Ana malzemeye yaklaşık 30 derece çarpma açısında püskürtülen aşındırıcı partiküller, erozyon aşınmasının maksimum seviyede olmasını sağlamıştır.

Ana malzemeye püskürtülen partiküllerin 30 derecede olmaması, yani dik açı ile yüzeye yapılmış olmasının ciddi getirileri söz konusudur. Özellikle piston ve manifoldların yüzeyinde biriken kurumlar, zaman içerisinde camlaşmış yapılardır ve oldukça rijittirler. Bu durumda ise 90 derecede yapılan işlemler, birikmiş malzemelerde ciddi anlamda etkili olmuştur. 90 derecenin etkisi ile kirli yüzey efektif bir şekilde temizlenmiş fakat ana malzemedede bir hasar söz konusu olmamıştır.

Mermilerin temizlenmesinde son derece başarılı olduğu görülmüştür. Özellikle paslanmış yüzeylerin normalde fırça ile temizlenmesi öngörülürken, bu şekilde temas etmeden ve kontrollü bir şekilde, istenilen derinlikte temizleyebilmek, bu esnada olabilecek kaza risklerini de minimize etmektedir.

Özellikle gemi güvertelerinde duran malzemeler korozyonlu deniz suyundan etkilenebilirler. Tuzlu suyun etkisi ile malzemeler ciddi anlamda korozyona uğramaktadır. Bu malzemeler içinde sıradan gemi konstrüksiyonuna dahil aletler olmakla birlikte seyirüsefer cihazları, ya da silahlar da olabilmektedir. Diğer yandan endüstriyel temizlik yapılırken malzemenin ana yapısı konusunda da ciddi bir farklılık mümkündür. Örneğin tarihi bir ahşap malzemedan ileri seramiklere kadar ciddi bir spektrumda malzemelerin temizlenebilmeleri söz konusudur. Burada dikkat edilecek husus ana malzemenin (tahta, metal ya da seramik) farklı özelliklere sahip olabilmesidir. Aşırı sünek ile aşırı gevrek arasında değişen bu sıralamada yine temizliği yapacak kişinin ana malzemenin etkilendiği açılarda püskürtmeyerek temizliği yapması halinde başarılı olunacaktır.

Örneğin seramik malzeme üzerinde bir temizlik yapılacak ise ana malzemeye zarar verecek şekilde atış 90 derecede değil, yüzeydeki malzemeyi temizlemek adına küçük çarpma açılarında (tercihen 30 dereceden düşük) temizleme yapılmalıdır.

Yapılan temizlik son derece kontrollü ve hassastır. Örnek olarak bir alüminyum meşrubat kutusu üzerinden boyayı kaldırmak gösterilebilir. Buradaki sünek alüminyum kap son derece ince olmasına rağmen üzerindeki boya tamamen kaldırılmış ve ana malzeme zarar görmemiştir.

KAYNAKLAR

Bağcı M., CuZn10 Pirinç Malzemede Kayma Hızının Aşınmaya Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2005, 167640.

Bayındır M. K., Katı Partikül Erozyon Aşınmasının Alüminyum Alaşımları Üzerindeki Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2009, 237493.

Bose K., Wood R.J.K., Wheeler D.W, High Energy Solid Particle Erosion Mechanisms of Superhard CVD Coatings, *Wear*, 2005, **259**(10), 135-144.

Fidan S., Sınmazçelik T., Polimerler ve Polimer Kompozitlerde Katı Partikül Erozyonunun Mekanizmaları ve Malzeme Performansını Etkileyen Faktörler, *XIII. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, İstanbul, 9-11 Kasım 2006.

Kaplan M., Karaoğlu A.C., Uyaner M., Katı Partikül Erozyonu ve Mühendislik Malzemeleri Üzerindeki Önemi, *Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 2016, **4** (1), 31-34.

Kleis I., Kulu P., *Solid Particle Erosion Occurrence - Prediction and Control*, 1st ed., Springer, Estonia, 2008.

Laguna-Camacho J. R., Vite-Torres M., Gallardo-Hernández E.A., Vera-Cárdenas E.E., Solid Particle Erosion on Different Metallic Materials, Editor: Pıhtılı H., *Tribology in Engineering*, Kindle ed., Intech, London, 63-78, 2013.

Momber A., *Blast Cleaning Technology*, 1st ed., Springer, Germany, 2008.

Momber A., Effects of Target Material Properties on Solid Particle Erosion of Geomaterials at Different Impingement Velocities, Editors:Blau P.J.,Shipway P.H., *Wear*, Elsevier, Germany, 69-83, 2014.

Ruff W., Wiederhorn S.M., *Erosion by Solid Particle Impact*, 1st ed., NBS Publication, Virginia, 1979.

Schmitt G.F., *Liquid and Solid Particle Impact Erosion*, 1st ed., USA, 1979,

Sundararajan G., Roy M., Solid Particle Erosion Behaviour of Metallic Materials at Room and Elevated Temperatures, Editor:Biswas S.K., *Tribology International*, vol, Elsevier, Britain, 339-359, 1997.

URL-1:http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Yüzey%20%20Temizleme.pdf, (Ziyaret tarihi:14 Ocak 2018)

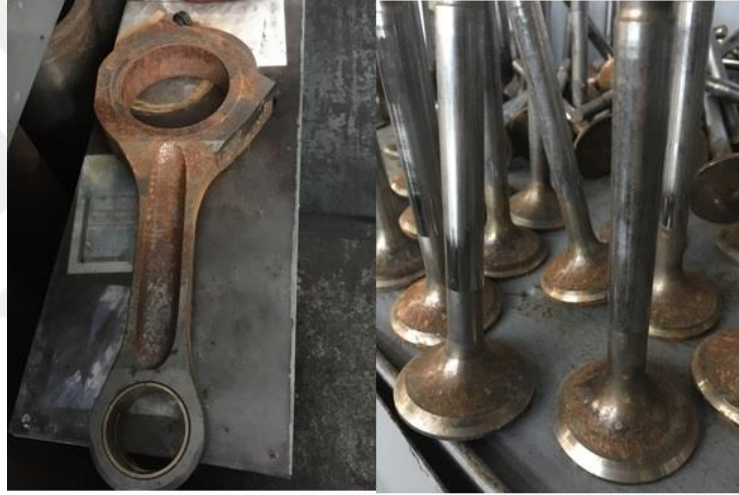
URL-2:<http://www.izmiregekumlama.com/index.php/kumlama-nedir-nasil-yapilir/>, (Ziyaret tarihi: 15 Ocak 2018)



EK-A



Şekil A.1. Çalışma sonucu karbonlaşmış egzost manifoldu ve motor kaveri



Şekil A.2. Aşınmış biyel kolu ve emme manifoldu



Şekil A.3. Aşınmış baba (halat sarmak için) ve demir çipa

EK-B



Şekil B.1. A ınmı  basıncılı hava tüpleri ve süzgeç



Şekil B.2. A ınmı  silindir g mle i ve itici makara



Şekil B.3. A ınmı  muhtelif boru ve mapa

EK-C



Şekil C.1. Muhtelif aşınmış mermiler

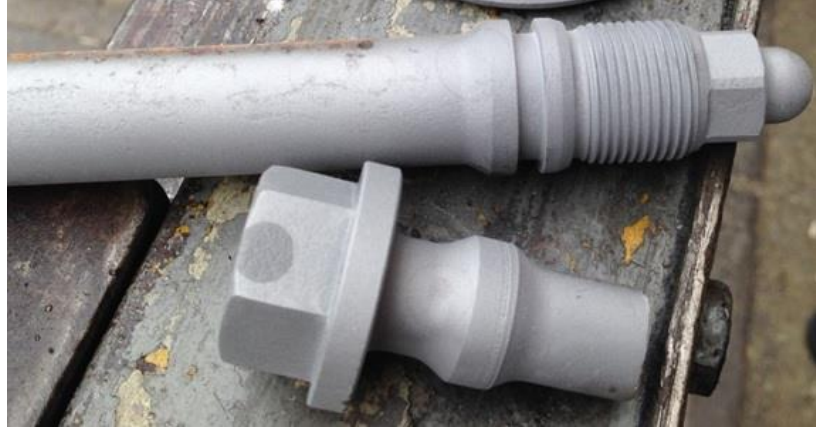


Şekil C.2. Aşınmış buharlı devre valfi ve rocker-arm parçası



Şekil C.3. Aşınmış dişli civata ve somunu

EK-Ç



Şekil Ç.1. Temizlenmiş dişli civata ve somunu

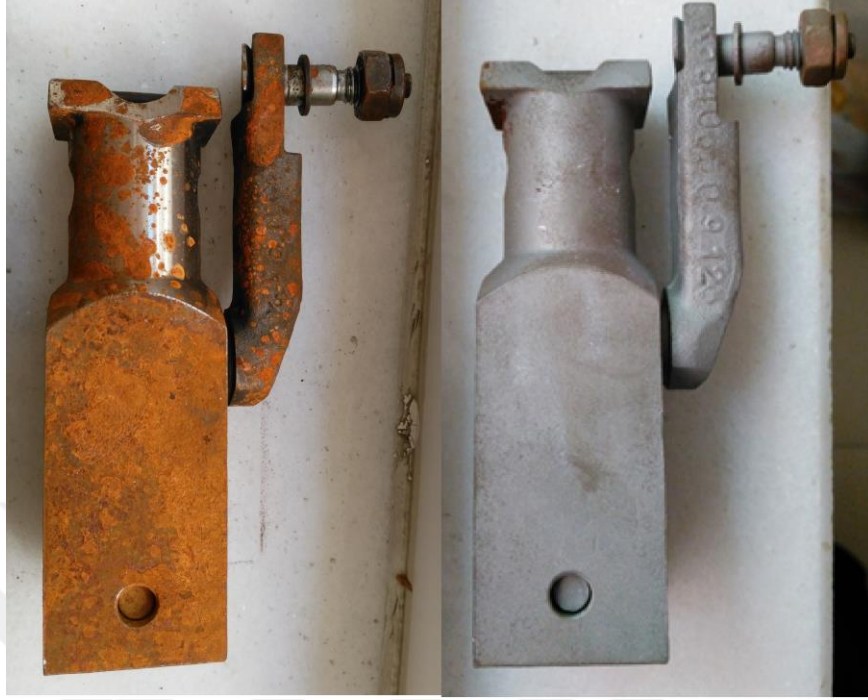


Şekil Ç.2. Temizlenmiş egzost manifoldu ve motor kaveri



Şekil Ç.3. Temizlenmiş civata

EK-D



Şekil D.1. Temizlenmiş kam mekanizması parçası



Şekil D.2. Temizlenmiş emme manifoldu

EK-E



Şekil E.1. Silindirik metal parça



Şekil E.2. Karbonlaşmış tahta parçası



Şekil E.3. Boyası kaldırılmış
meşrubat kutusu

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] Sınmazçelik T., **Yavuz A.**, Importance of Solid Particle Erosion in Industrial Areas, *Turkeytrib' 18 2nd International Conference on Tribology*, İstanbul-Turkey, 18-20 April 2018.



ÖZGEÇMİŞ

1990 yılında İstanbul'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini İstanbul'da tamamladı. 2009 yılında girdiği Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2014 yılında mezun oldu. 2015 yılında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 4 yıldır kamu kurumunda görev yapmaktadır.

