



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**NOZUL GEOMETRİSİNİN AŞINDIRICI
PARTİKÜL ÇARPMA HIZINA ETKİSİNİN
EROZYON AŞINMA DENEYLERİ İLE
BELİRLENMESİ**

Bekir DUVARCI

YÜKSEK LİSANS

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Ocak-2026
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Bekir DUVARCI tarafından hazırlanan “Nozul Geometrisinin Aşındırıcı Partikül Çarpma Hızına Etkisinin Erozyon Aşınma Deneyleri İle Belirlenmesi” adlı tez çalışması 30/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Musa DEMİRCİ
(KTO Karatay Üniversitesi)

.....

Danışman

Prof. Dr. Mehmet BAĞCI
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ
(Konya Teknik Üniversitesi)

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 251010009 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Bekir DUVARCI

30.01.2026

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

NOZUL GEOMETRİSİNİN AŞINDIRICI PARTİKÜL ÇARPMA HIZINA ETKİSİNİN EROZYON AŞINMA DENEYLERİ İLE BELİRLENMESİ

Bekir DUVARCI

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Mehmet BAĞCI

2026, 65 Sayfa

Jüri

**Prof. Dr. Mehmet BAĞCI
Dr. Öğr. Üyesi Musa DEMİRCİ
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf YILMAZ**

Yüksek hızla taşınan aşındırıcı partiküllerin yüzeylere çarpması sonucu meydana gelen ve birçok endüstriyel uygulamada ekipman ömrünü sınırlayan erozyon aşınması sektörel olarak birçok farklı alanda karşılığı olan önemli bir aşınma mekanizmasıdır. Bu aşınma mekanizmasına etki eden değişkenliğe sahip farklı parametreler ayrıntılı biçimde incelenmiş olsa da nozul geometrisinin partikül çarpma hızı ve buna bağlı erozyon davranışı üzerindeki etkisinin deneysel olarak araştırıldığı çalışmalar sınırlı sayıda kalmıştır. Bu tez çalışmasında da özellikle nozul geometrisinin aşındırıcı partikül çarpma hızına ve erozyon aşınmasına etkisini incelemek amacıyla katı partikül erozyon aşınması test cihazı güncelleme çalışmaları yürütülerek deneysel tutarlılığın artırılmasının önceliklendirildiği tasarım ve üretim işlemleri gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla üç eksenli hareket kabiliyetine sahip, elektronik izleme ve kontrol altyapısı ile donatılmış, uluslararası standartlara uyumlu bir erozyon test cihazına geçiş sürecinin geliştirilmiş olması kritik öneme sahiptir. Ayrıca tasarlanan sistemin, nozul geometrisi ile partikül hızı arasındaki değişimlere bağlı olarak erozyon aşınması çıktılarının güvenilir ve tekrarlanabilir biçimde incelenmesine olanak sağlaması hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında, farklı çıkış çaplarına sahip (Ø3,2 mm, Ø4,8 mm, Ø6,4 mm ve Ø8,5 mm) nozulların imalatları yaptırılarak aşındırıcı olarak 300–425 µm boyut aralığında alüminyum oksit (Al₂O₃) partiküller tercih edilmiş olup partiküllerin taşınmasında akışkan olarak hava kullanılması planlanmıştır. Partikül hareketlerinin incelenmesinde debi değişimlerine bağlı olarak aşındırıcı hızlarının belirlenmesinde çift disk yönteminin deney düzeneğine entegre edilmesi ile ölçüm altyapısı tez faaliyetleri ile geliştirilmiştir. Deneylerde ulaşım sektörü önceliğinde EN 10025-2 standardında tanımlanan S355J2+N yapısal çelik malzemesinin kullanımı sağlanarak mikroyapı karşılaştırmaları ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Nozul geometrisi, Partikül çarpma hızı, Erozyon aşınması, Test cihazı güncellemesi.

ABSTRACT

MS THESIS

DETERMINATION OF THE EFFECT OF NOZZLE GEOMETRY ON ABRASIVE PARTICLE IMPACT VELOCITY BY EROSION WEAR TESTS

Bekir DUVARCI

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering**

Advisor: Prof. Dr. Mehmet BAĞCI

2026, 65 Pages

**Jury
Prof. Dr. Mehmet BAĞCI
Asst. Prof. Dr. Musa DEMİRCİ
Asst. Prof. Dr. Yusuf YILMAZ**

Erosion wear, caused by the impact of high-speed abrasive particles on surfaces, is a significant wear mechanism with numerous applications across various sectors, limiting equipment life in many industrial settings. While the various parameters affecting this wear mechanism have been studied in detail, studies experimentally investigating the effect of nozzle geometry on particle impact velocity and related erosion behavior remain limited. This thesis focuses on updating a solid particle erosion wear testing device to investigate the effect of nozzle geometry on abrasive particle impact velocity and erosion wear. Design and manufacturing processes prioritizing increased experimental consistency were implemented. Therefore, the development of a transition process to an erosion testing device with three-axis movement capability, equipped with electronic monitoring and control infrastructure, and compliant with international standards is of critical importance. Furthermore, the designed system aims to enable reliable and repeatable analysis of erosion wear outputs based on variations between nozzle geometry and particle velocity.

In this study, nozzles with different outlet diameters (Ø3.2 mm, Ø4.8 mm, Ø6.4 mm, and Ø8.5 mm) were manufactured, and aluminum oxide (Al_2O_3) particles with a size range of 300–425 μm were chosen as abrasives. Air was planned to be used as the fluid for particle transport. In the investigation of particle movement, the measurement infrastructure was developed through the thesis activities by integrating the double-disk method into the experimental setup to determine abrasive velocities depending on flow rate variations. In the experiments, microstructure comparisons were made using S355J2+N structural steel material, defined in the EN 10025-2 standard, primarily for the transportation sector.

Keywords: Nozzle geometry, Particle impact velocity, Erosive wear, Test equipment upgrade.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan, tezin her aşamasında yönlendirmesini eksik etmeyen, karşılaştığım sorunların çözümünde yol gösterici olan Sayın Prof. Dr. Mehmet BAĞCI'ya, erozyon aşınma deneyleri ile belirlenmesi kapsamında görüş alışverişinde bulunduğum Sayın Arş. Gör. Mehmet Esat AYDIN'a teşekkür ederim.

Tez faaliyetlerinde önemli bir yere sahip olan erozyon test cihazının hazırlanması ve otomasyon sisteminin oluşturulması ve deney cihazının aktif olarak katkı sağlayan Sayın Usame SALMAN'a, tez süreci içinde maddi ve manevi anlamda desteklerini esirgemeyen eşim ve aileme şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmasında gerekli maddi imkanların oluşturulması için Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 251010009) de teşekkürü bir borç bilirim.

Bekir DUVARCI
KONYA-2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1. Literatür Araştırması	3
3. TEORİK ESASLAR	14
3.1. Aşınma Türleri	14
3.1.1. Adhezif aşınma	15
3.1.2. Abrazif aşınma	16
3.1.3. Yorulma aşınması	17
3.1.4. Korozyon aşınması	18
3.1.5. Kavitasyon aşınması	19
3.1.6. Erozyon aşınması	20
3.1.6.1. Çamur (slurry) erozyonu.....	20
3.1.6.2. Katı partikül erozyon aşınması	21
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
4.1. Nozul Tasarımı ve Üretimi	25
4.2. Erozyon Deney Numunelerinin Üretimi	29
4.3. Partikül Hız Ölçümü	30
4.4. Aşındırıcı Katı Partiküller.....	32
4.5. Erozyon Deney Parametreleri	333
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	34
5.1. Deney Seti Güncelleme Faaliyetleri	34
5.2. Partikül Hız Ölçüm Sonuçları	36
5.3. Erozyon Aşınması Sonuçları	38
5.4. Erozyona Bağlı Oluşan Yüzey Hasarı	51
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
6.1 Sonuçlar	60
5.2 Öneriler	62
KAYNAKLAR	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ΔW :	Ağırlık kaybı
mp:	Toplam Kütle
E:	Erozyon Oranı
$\dot{m}$:	Kütleli Debi
Cd:	Boşluk Katsayısı
At:	Nozul Çıkış Kesit Alanı
P0:	Giriş Durgun Basıncı
T:	Giriş Durgun Sıcaklığı
Γ :	Özgöl Isı Oranı
R:	Gaz Sabiti
ϑ_p :	Partikül Hızı
CD:	Sürüklenme Katsayısı
ρ_g :	Gaz Yoğunluğu
Ap:	Partikül Kesit Alanı
U:	Gaz Hızı
τ_q :	Partikülün Karakteristik Cevap Zamanı
ρ_p :	Partikül Yoğunluğu
dp:	Karakteristik Partikül Çapı
$\emptyset$:	Çap
ω :	Açısal Hız
L:	Diskler Arasındaki Mesafe
r:	Erozyon İzlerinin Yarıçapı
S:	İki İz Arasındaki Doğrusal Mesafe

Kısaltmalar

VMD:	Hacimsel Medyan Çapı
DEM:	Ayrık Elemanlar Yöntemi
FEM:	Sonlu Elemanlar Yöntemi
ASTM:	Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
CFD:	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
AISI:	Amerikan Demir ve Çelik Endüstrisi
PDPA:	Faz Doppler Parçacık Analizörü
ISO:	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
SEM:	Taramalı Elektron Mikroskopi

1. GİRİŞ

Endüstriyel sistemlerde kullanılan birçok makine ve ekipman, çalışma koşulları gereği katı partiküller içeren akışlara maruz kalmaktadır. Bu tür sistemlerde karşılaşılan en önemli hasar mekanizmalarından biri katı partikül erozyon aşınmasıdır. Katı partikül erozyon aşınması, katı taneciklerin bir yüzeye belirli bir hız ve açıyla çarpması sonucu yüzeyden malzeme kopması, plastik deformasyon oluşması veya mikro çatlakların gelişmesiyle meydana gelen ilerleyici bir hasar türü olarak tanımlanmaktadır. Bu aşınma mekanizması, özellikle yüksek hızlarda taşınan aşındırıcı partiküllerin etkisiyle kısa sürede ciddi malzeme kayıplarına ve bileşen ömründe önemli azalmalara yol açabilmektedir.

Katı partikül erozyon aşınması; enerji, otomotiv, madencilik, havacılık, savunma sanayi, termik santraller, hidrolik sistemler ve pnömatik taşıma hatları gibi birçok sektörde yaygın olarak karşılaşılan bir problemdir. Örneğin; kömür yakıtlı termik santrallerde kül partiküllerinin boru ve kazan yüzeylerinde oluşturduğu aşınma, petrol ve gaz endüstrisinde kum içeren akışların vanalar ve boru hatlarında yol açtığı hasarlar veya kum püskürtme sistemlerinde nozul ve hedef yüzeylerde meydana gelen aşınmalar bu mekanizmanın tipik örnekleridir. İlk olarak erozyon aşınması kavramı havacılık ve enerji sektörlerinde karşılaşılan problemlerle birlikte sistematik olarak incelenmeye başlanmıştır. Özellikle türbin kanatlarında, boru hatlarında ve akış yönlendirme elemanlarında meydana gelen hızlı aşınmalar, bu mekanizmanın anlaşılmasını zorunlu kılmıştır. Zamanla yapılan deneysel ve teorik çalışmalar, erozyon aşınmasının yalnızca malzeme özelliklerine bağlı olmadığını; aynı zamanda partikül özellikleri, akış koşulları ve geometrik parametreler gibi çok sayıda faktörün etkileşimi sonucu ortaya çıktığını göstermiştir.

Katı partikül erozyon aşınmasını etkileyen başlıca faktörler; partikül çarpma hızı, çarpma açısı, partikül boyutu, partikül şekli, partikül sertliği, akışkan özellikleri, malzemenin mekanik özellikleri ve akış geometrisi olarak sıralanabilir. Bu faktörler arasında literatürde en baskın etkenlerden biri olarak partikül çarpma hızı öne çıkmaktadır. Yapılan birçok çalışmada, erozyon aşınma hızının partikül çarpma hızının üstel bir fonksiyonu olduğu ve hızdaki küçük artışların dahi aşınma miktarında büyük artışlara neden olabildiği ortaya konmuştur. Bu durum, partikül hızını etkileyen parametrelerin detaylı olarak incelenmesini kritik hale getirmektedir.

Aşındırıcı partiküllerin çarpma hızı doğrudan akışkanın basıncı, debisi ve akış yolu üzerindeki geometrik kısıtlamalarla ilişkilidir. Bu noktada nozul geometrisi, partikül hızının belirlenmesinde temel rol oynayan unsurlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Nozul; akışkanın yönlendirilmesi, hızlandırılması veya basıncının ayarlanması amacıyla kullanılan, geometrisi özel olarak tasarlanmış bir akış elemanıdır. Nozulun giriş ve çıkış çapları, uzunluğu ve iç yüzey geometrisi gibi parametreler, akışkanın hız dağılımını ve buna bağlı olarak taşınan partiküllerin hızını doğrudan etkilemektedir. Nozul geometrisindeki değişimler, akışkanın hız profilinde ve türbülans yapısında farklılıklara neden olarak partiküllerin yüzeye çarpma hızını ve çarpma açılarını değiştirebilmektedir. Bu durum, erozyon aşınmasının miktarı ve dağılımı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir. Özellikle daralan veya genişleyen kesitlere sahip nozullarda, partiküllerin ivmelenme davranışı farklılaşmakta ve bu da yüzeylerde oluşan aşınma mekanizmalarının değişmesine yol açmaktadır. Bu nedenle, nozul geometrisinin partikül çarpma hızı üzerindeki etkisinin deneysel olarak belirlenmesi, erozyon aşınmasının kontrol altına alınabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu kapsamda, erozyon aşınmasının azaltılması veya kontrol altına alınabilmesi için aşınma mekanizmasının daha iyi anlaşılması ve etkili tasarım kriterlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Nozul geometrisinin seçimi, partikül çarpma hızının ve açısının kontrol edilmesi sayesinde aşınma miktarının azaltılabileceği sağlanacaktır. Ancak literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde, nozul geometrisinin partikül çarpma hızı üzerindeki etkisinin çoğunlukla teorik veya sayısal analizlerle ele alındığı, deneysel verilerin ise sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, deneysel erozyon aşınma testleri ile desteklenen kapsamlı çalışmalara olan ihtiyacı ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, nozul geometrisinin aşındırıcı partikül çarpma hızına olan etkisini erozyon aşınma deneyleri ile belirlemek ve elde edilen deneysel bulgular ışığında nozul tasarımının erozyon aşınması üzerindeki rolünü ortaya koymaktır. Bu kapsamda, farklı geometrik özelliklere sahip nozul çapları (3,2 – 4,8 – 6,4 ve 8,5 mm) kullanılarak gerçekleştirilen erozyon aşınma deneyleri ile partikül çarpma hızındaki değişimlerin aşınma davranışına olan etkileri incelenecektir. Nozul tasarımı ile beraber, erozyon aşınmasının ortaya çıktığı bir sektör olan ağır vasıta araçların dış gövde malzemesinin de erozyon davranışı incelenmiş olacaktır. Elde edilecek sonuçların, erozyona maruz kalan sistemlerde daha dayanıklı tasarımların geliştirilmesine katkı sağlaması hedeflenmektedir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Katı partikül erozyon aşınma mekanizması ağır vasıta araçlarda, özellikle treyler ve dorse şasesi ile yük taşıma bölgelerinde önemli problemlere yol açmaktadır. Bu tür aşınma, araçların kullanım koşullarına bağlı olarak özellikle toprak yollar, inşaat alanları ve madencilik bölgelerinde yoğun olarak gözlemlenmektedir. Ayrıca, ince taneli yüklerin (kum, taş, moloz vb.) taşınmasında tercih edilen bu araçlarda, yükleme esnasında erozyon aşınmasının etkileri daha belirgin hale gelmektedir. Araç hareket halindeyken, yüksek hızda taşınan ve hareket eden partiküller, araç yüzeylerinde mekanik gerilmeler ve mikro çatlaklar oluşturur, bu da malzeme yorgunluğunu hızlandırarak parçaların ömrünü kısaltır. Erozyonun yol açtığı yüzey bozulmaları, araçların genel performansını düşürür, güvenlik risklerini artırır ve bakım maliyetlerini yükseltir. Söz konusu araçların seyir halindeyken sahip oldukları hız seviyeleri partikül çarpma hızını etkilemekte ve dolayısıyla partikül çarpma hızının erozyon aşınması üzerinde bıraktığı etkiyi sektörel olarak yansıtmaktadır. Partikül çarpma hızı, erozyon aşınması özelinde değerlendirildiğinde; partikülleri hareket ettiren gaz basıncı ve partiküllerin püskürdüğü nozul geometrisi, parçacık hızını önemli ölçüde etkilemektedir. Literatür incelendiğinde, katı partikül erozyonuna etki eden birçok çalışma mevcut olmakla birlikte, bu çalışmalar nozul geometrisi ile erozyonu direkt olarak birleştirmemektedir. Söz konusu çalışmalarda çarpma hızı ile erozyon arasındaki ilişki teorik olarak incelenmekle birlikte deneysel yönüyle zayıftır. Ayrıca ağır vasıta araçlardaki erozyon konusu da pek fazla irdelenen konular arasında değildir. Bu kapsamda, bu tez çalışmasında nozul geometrisinin erozyon aşınmasına olan etkisi deneysel olarak incelenmiş ve ağır vasıta araç bileşenleri üzerindeki erozyon araştırılmıştır. Bu yönüyle tez çalışmasının birden çok özgün yönü bulunmaktadır.

2.1. Literatür Araştırması

Literatür incelendiğinde farklı nozul tasarımlarının yüksek hızların elde edilmesine olan etkisi kısmi olarak araştırılmıştır fakat söz konusu çalışmalar partikül hızı ve katı partikül erozyonu başlığı adı altında toplanmamaktadır. Bu doğrultuda, söz konusu alanda bir açık söz konusudur. Son teknolojinin hangi seviyede olduğu, erozyon aşınması ile ilgili çalışmaların ne yönde ve hangi parametrelerle değerlendirildiği bu tez çalışması ile incelenmiştir.

Yapılan bir çalışmada, debi ve damlacık boyutu kontrolü sağlayabilen yeni bir nozul tasarımı geliştirilmiş ve performansı deneysel olarak incelenmiştir. Nozul, değişken kesitli ön orifis ve püskürtme orifisinin birlikte çalıştığı bir yapıdan oluşmakta olup, farklı çalışma koşullarında sabit püskürtme açısı ve optimize edilmiş damlacık boyutu elde edilmiştir. Basıncın 15–50 psi aralığında değiştirilmesiyle debinin 0,15–0,80 GPM arasında değiştiği, hacimsel medyan çapın (VMD) sistemik pestisitler için 425–325 μm , temas etkili pestisitler için ise 240–200 μm aralığında olduğu belirlenmiştir. Tüm debi aralığında püskürtme açısının 110° olarak sabit kaldığı ve püskürtme dağılımının homojen olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca debi değişimlerine tepki süresinin 0,25 saniyeden kısa olduğu ve nozülün konvansiyonel püskürtme sistemleriyle uyumlu olduğu gösterilmiştir (Bui, 2005).

Bir diğer çalışmada, uzay keşif araçları için tasarlanan bir tekerlek ve sondaj matkabının granüler zeminle etkileşimi sayısal olarak incelenmiştir. Çalışmada, ayrık elemanlar yöntemi (DEM) ve sonlu elemanlar yöntemi (FEM) birlikte kullanılarak lastik–zemin ve matkap–zemin etkileşimleri modellenmiştir. DEM analizlerinde tekerleğin 1.15 rad/s açısal hız altında maksimum 180.70 N brüt çekiş kuvveti ve 183.22 N maksimum çekme kuvveti üretebildiği, zemin sıkışmasının ise yaklaşık 1,36 cm seviyesine ulaştığı belirlenmiştir. Matkap için gerçekleştirilen DEM–FEM bağlaşıklık analizlerinde, granüler zeminin yoğunluğunun delme işlemi sırasında 1493,99 kg/m³’ten 1645,03 kg/m³’e yükseldiği, gerilme ve deformasyonların helis bölgesinde yoğunlaştığı ancak güvenlik katsayısının 15 olduğu rapor edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geometrik tasarımın granüler ortamlarla etkileşimde performans ve dayanım açısından kritik rol oynadığını göstermiştir (Castañeda ve diğ., 2021).

Başka bir çalışmada, otomotiv astar ve baz boya kaplamalarının katı partikül erozyonuna karşı davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde ASTM G76 standardına uygun gaz-jetli erozyon düzeneği kullanılmış, aşındırıcı olarak 200–400 μm boyutlarında silika partikülleri tercih edilmiştir. Testler 23 m/s partikül hızı ve 30° ile 90° çarpma açıları altında, 1–5 kg aralığında aşındırıcı miktarı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, en yüksek kütle kaybı ve erozyon iz çapının 30° çarpma açısında oluştuğunu ve bu davranışın sünek malzeme karakteristiğiyle uyumlu olduğunu göstermiştir. Tek katmanlı astar kaplamada yüzeye tutunmanın zayıf olduğu, çift katmanlı sistemlerde ise katmanlar arası yapışmanın daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Demirci ve Bağcı, 2018).

Nozul geometrisinin akış ve jet özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmada, 120–170 μm çap aralığına sahip küçük ölçekli düz orifisli nozullar deneysel olarak araştırılmıştır. Dairesel kesitli konik, konik-kapiler ve kapiler eksenel tasarımlar ile eliptik kesitli nozullar kullanılarak geometriye bağlı akış kararlılığı ve jet bütünlüğü değerlendirilmiştir. Deneyler 3–12 MPa besleme basıncı aralığında gerçekleştirilmiş, debi ve jet darbe kuvveti ölçümlerinden C_d , C_v ve C_c katsayıları hesaplanmıştır. Sonuçlar, konik açı, giriş kenarı yuvarlatması ve çap toleranslarındaki küçük değişimlerin jet hızını ve koherensini belirgin şekilde etkilediğini göstermiştir. Ayrıca çok delikli nozullarda delikler arası etkileşimin jet karakteristiğini değiştirdiği ortaya konmuştur (Ghassemieh ve diğ., 2006).

Başka bir çalışmada, süpersonik nozulların tasarımına yönelik teorik ve deneysel bir yaklaşım geliştirilmiştir. Eksenel simetrik akış alanı karakteristikler yöntemi kullanılarak hesaplanmış, elde edilen akış çizgileri boyunca geriye izleme yapılarak eliptik kesitli ve iki boyutlu kama tipinde üç boyutlu nozul geometrileri tasarlanmıştır. Tasarlanan nozullardaki akış yapıları üç boyutlu CFD analizleri ile incelenmiş ve eliptik kesitli nozul prototipi üretilerek deneysel testlere tabi tutulmuştur. Deneysel ölçümler ile sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum sağlandığı ve tasarlanan üç boyutlu nozulların hedeflenen Mach sayısı ve akış performansını başarıyla sağladığı belirlenip karmaşık geometrilili nozulların etkin şekilde tasarlanabileceği gösterilmiştir (Haddad, 1988).

Nozuldan çıkan akışın katı partikül erozyonu üzerindeki etkisini çevresel bozulma koşulları altında inceleyen bir çalışmada, otomotiv boya kaplamalarının erozyon dayanımı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada, tipik bir otomotiv kaplama sistemi yapay yaşlandırma (UV ışınımı ve yapay asit yağmuru) öncesi ve sonrası olmak üzere ASTM G76 standardına uygun katı partikül erozyon testlerine tabi tutulmuştur. Deneyler 30° ve 90° çarpma açıları, 25°C ve 60°C yüzey sıcaklıkları ve ortalama 22 m/s partikül hızı altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, yaşlandırmaya maruz kalan numunelerde kütle kaybının belirgin şekilde arttığını ve özellikle asit yağmuru etkisinin erozyon direncini ciddi ölçüde düşürdüğünü göstermiştir. Kimyasal bozulmanın kaplama-altlık tutunumunu zayıflattığı ve bu durumun erozyon aşınmasını hızlandığı rapor edilmiştir (Hernández-Peña ve diğ., 2023).

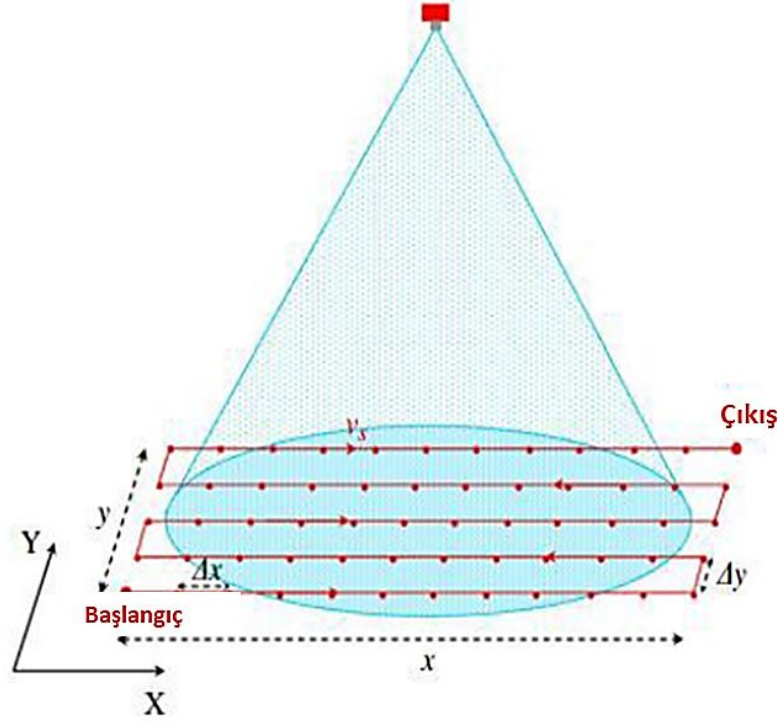
Nozuldan çıkan çok fazlı jet altında katı partikül erozyon davranışını inceleyen kapsamlı bir çalışmada, SiC partikül takviyeli Si matrisli kompozit (RB-SiC/Si) ile saf Si malzemenin erozyon aşınması karşılaştırmalı olarak deneysel şekilde araştırılmıştır. Deneyler 0,1–0,6 MPa basınç aralığında, 13–80 μm boyutlarında SiC ve sentetik elmas

partikülleri kullanılarak ve 70°–90° çarpma açıları altında gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, saf Si için maksimum erozyonun 90° açıda gerçekleştiğini ve tipik gevrek davranış sergilediğini, RB-SiC/Si için ise küçük partiküllerle maksimum erozyonun 75°–80° aralığına kaydığını ve yarı-gevrek bir davranış oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca partikül boyutunun artmasıyla erozyon mekanizmasının tekrar gevrek karaktere döndüğü ve nozuldan çıkan jet açısının malzeme mikro yapısına bağlı olarak erozyon derinliği ve yüzey pürüzlülüğünü önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir (Hu ve diğ., 2022).

Bir diğer çalışmada, farklı metalik malzemelerin katı partikül erozyon davranışları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışmada paslanmaz çelikler (AISI 304, 316 ve 420) gibi çeşitli metaller üzerine silika gibi erozyon partikülleri çarptırılarak testler gerçekleştirilmiş; çarpma açısı ve malzeme tipi gibi parametrelerin erozyon hızı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlarda AISI 304 ve 316'nın 60° çarpma açısında daha yüksek erozyon oranı sergilediği, AISI 420'nin ise en yüksek hasarı 30° açıda gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca metal yüzeylerde plastik deformasyon, kazıma ve mikro çatlaklar gibi aşınma mekanizmalarının malzeme özelliği ve çarpma açısının erozyon performansı üzerindeki etkisi gösterilmiştir (Laguna-Camacho ve diğ., 2013).

Bir başka çalışmada, hava destekli ve desteksiz hidrolik nozullar kullanılarak püskürtme sırasında damlacık birikimi yatay ve düşey hedefler üzerinde incelenmiştir. Konvansiyonel püskürtmede, düşey hedeflerde yüksek ilerleme hızı ve küçük damlacık boyutlarında birikimin arttığı, yatay hedeflerde ise belirgin bir değişim olmadığı görülmüştür. Hava desteği kullanıldığında hedef yüzeylerde birikim artmış ve sonuçlardaki değişkenlik azalmıştır. Bu durum, uygun nozul–hava desteği kombinasyonlarıyla uygulama hacminin düşürülebileceğini göstermiştir (Nordbo, 1992).

Nozul tipi, boyutu ve çalışma basıncının püskürtme damlacık özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen kapsamlı bir çalışmada, farklı tarımsal nozullar için damlacık boyutu ve hız dağılımları deneysel olarak belirlenmiştir. Faz Doppler Parçacık Analizörü (PDPA) kullanılarak 32 farklı nozul–basınç kombinasyonu test edilmiş ve 3,0 bar basınçta hacimsel medyan çap ($Dv_{0,5}$) değerlerinin yaklaşık 214,2–345,4 μm aralığında değiştiği rapor edilmiştir. Sonuçlar, nozul tipinin ve ISO nozul boyutunun damlacık boyutu ve hız spektrumu üzerinde basınca kıyasla daha baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Şekil 2.1'de nozul ile tarama mesafesi gösterilmiştir. Ayrıca damlacık boyutu ile damlacık hızı arasında güçlü bir korelasyon bulunduğu ve bu durumun sürüklenme ve hedef yüzeye taşınım açısından kritik olduğu belirtilmiştir (Nuyttens ve diğ., 2007).



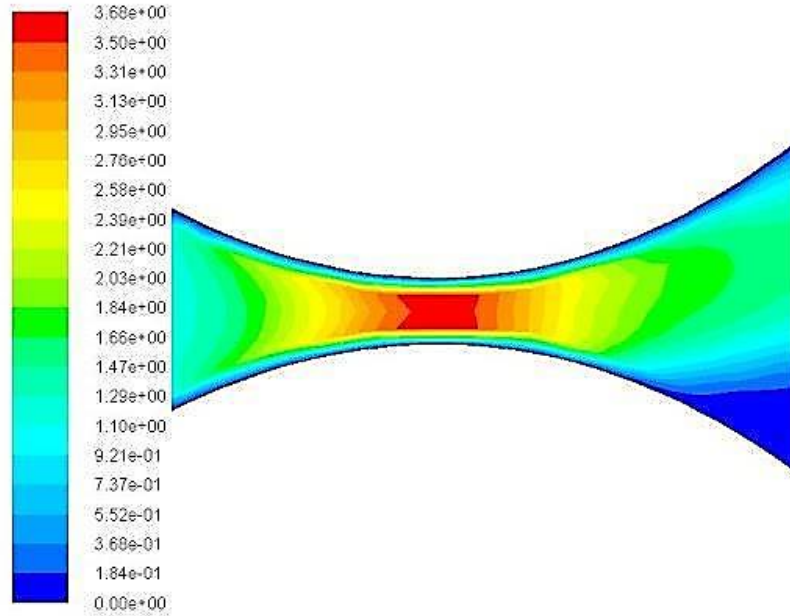
Şekil 2.1. Nozul çıkışı ile tarama alanı şematik gösterimi (Nuyttens ve diğ., 2007)

Yüksek hız ve büyük aşındırıcı partiküller altında erozyon davranışını inceleyen bir çalışmada, yeni tasarlanmış bir yüksek hızlı pin-mill tip slurry-pot test düzeneği geliştirilmiş ve performansı değerlendirilmiştir. Geliştirilen sistem ile numune uç hızları 20 m/s seviyesine kadar çıkarılabilmiş ve 8–10 mm boyutlarında granit partiküller kullanılarak endüstriyel koşullara yakın testler gerçekleştirilmiştir. Sabit numune konumlu deneylerde farklı seviyelerde aşınma oranlarının ciddi şekilde değiştiği, buna karşılık numune döndürme yöntemi kullanıldığında kütle kaybı sapmalarının $\pm 0,35$ –3 % aralığına düştüğü belirlenmiştir. Sonuçlar, yüksek hız ve büyük partiküller altında aşınma mekanizmasının baskın olarak aşındırıcı erozyon karakterinde olduğunu ve geliştirilen yöntemin tekrarlanabilir sonuçlar sağladığını göstermiştir (Ojala ve diğ., 2015).

Nozul geometrisinin iç akış yapısı ve püskürtme karakteristikleri üzerindeki etkisini inceleyen kapsamlı bir çalışmada, silindirik ve konik delikli iki dizel enjektör nozulu deneysel ve sayısal olarak karşılaştırılmıştır. Nozul iç geometrileri silikon kalıp yöntemiyle hassas biçimde belirlenmiş, ardından CFD analizleri ile kavitasyon başlangıç koşulları hesaplanmıştır. Sonuçlar, düşük koniklik ve küçük giriş yuvarlatma yarıçapına sahip silindirik nozulda kavitasyonun başladığını, konik nozulda ise 80 MPa enjeksiyon basıncına kadar kavitasyon oluşmadığını göstermiştir. Kavitasyonun ortaya çıkmasıyla çıkış hızının arttığı ve püskürtme koni açısının yaklaşık %15 oranında genişlediği

belirlenmiştir. Ayrıca konik nozulda daha yüksek çıkış hızı ve daha dar püskürtme açısı elde edilmiştir (Payri ve diğ., 2004).

Bir diğer çalışmada, süpersonik ve hipersonik akış elde etmek amacıyla De Laval (yakınsak–ıraksak) nozulunun tasarımı ve sayısal analizi gerçekleştirilmiştir. Nozul geometrisi karakteristikler yöntemi kullanılarak belirlenmiş ve Matlab ortamında çıkış Mach sayıları 2,5–5,5 aralığında olacak şekilde yedi farklı tasarım oluşturulmuştur. Tüm tasarımlarda boğaz yüksekliği 0,005 m ve genişliği 0,05 m sabit tutulmuş, izentropik ilişkilerle çıkış alanı ve basınç oranları hesaplanmıştır. Çıkış Mach sayısı 5,5 olan nozul için ANSYS Fluent kullanılarak yapılan CFD analizlerinde Spalart–Allmaras ve k- ϵ türbülans modelleri uygulanmış ve tasarımın akış hızlandırma performansı doğrulanmıştır (Ramji ve diğ., 2016). Hesaplanan sonuçların özet niteliğindeki analiz görselleri Şekil 2.2’de sunulmuştur.



Şekil 2.2. Nozul geometrisi ile akış alanı arasındaki ilişkinin analiz görünümü (Ramji ve diğ., 2016)

Atomizasyon rejiminde sıvı jetlerin parçalanma davranışını inceleyen bir çalışmada, yüksek hızlı ve kıvılcım fotoğrafçılığı teknikleri birlikte kullanılarak sprey oluşumu deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler 500–2500 psi basınç aralığında, farklı gaz türleri ve sıvı viskoziteleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gaz yoğunluğunun artmasıyla sprey açısının büyüdüğü ve jet sapmasının nozul çıkışına yaklaştığı belirlenmiştir. Ayrıca atomizasyon mekanizmasında kavitasyonun önemli rol oynadığı bulunmuştur (Reitz ve Bracco, 1979).

Katı partikül hızının belirlenmesine yönelik bir çalışmada, gaz-partikül akışı içindeki partikül hızının ölçümü için uçuş süresine dayalı deneysel bir yöntem geliştirilmiştir. Döner iki disk arasında tanımlanan kontrollü bir yol uzunluğu kullanılarak farklı test düzeneklerinde partikül hızları ölçülmüştür. Sonuçlar, partikül hızının gaz akış hızından farklılık gösterebildiğini ve bu farkın nozul tasarımına güçlü biçimde bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca nozul geometrisinin erozyon testlerinde partikül çarpma hızını belirleyen kritik bir parametre olduğu vurgulanmıştır (Ruff ve Ives, 1975).

Son yıllarda gerçekleştirilen kapsamlı bir çalışmada, katı partikül erozyon aşınmasının deneysel yöntemler ve Ayrık Elemanlar Yöntemi (DEM) kullanılarak modellenebilirliği ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Çalışmada St37 yapı çeliği üzerine Al_2O_3 partikülleri 30° , 60° ve 90° çarpma açıları ile ~ 20 m/s partikül hızında çarptırılmış, deneysel erozyon oranları DEM tabanlı simülasyonlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, DEM analizlerinin özellikle 60° ve 90° çarpma açılarında deneysel verilerle %5–15 sapma aralığında iyi uyum sağladığını, düşük açılarda ise sürtünmeye bağlı sünek aşınmanın yeterince temsil edilemediğini göstermiştir (Aydin ve diğ., 2025).

Katı partikül erozyonunun katkılı imalatla üretilmiş polimerlerdeki davranışını inceleyen bir çalışmada, tamamen geri dönüştürülmüş PA 3200 GF malzemesinden seçici lazer sinterleme yöntemiyle üretilen numuneler ASTM G76 standardına göre test edilmiştir. Deneyler 30° , 45° , 60° ve 90° çarpma açıları ile 1–3 bar basınç aralığında gerçekleştirilmiş, basınç artışıyla partikül hızının yükselmesinin erozyon direncini belirgin şekilde azalttığı görülmüştür. En yüksek erozyonun 30° çarpma açısında meydana geldiği, 45° x-y düzleminde üretilen numunelerin ise 1, 2 ve 3 bar için sırasıyla 0,050 – 0,100 – 0,220 mg/g erozyon oranlarıyla en iyi direnci gösterdiği rapor edilmiştir. Sonuçlar, baskı yönü ve nozuldan çıkan partikül hızının erozyon aşınması üzerinde kritik etkiye sahip olduğunu ortaya koymuştur (Demirci ve diğ., 2025).

Nozul geometrisinin aşındırıcı su jeti içerisindeki partikül hızlanması ve iç yüzey erozyonu üzerindeki etkisini inceleyen kapsamlı bir çalışmada, farklı silindirik nozul uzunlukları (6 mm, 12 mm ve 18 mm) deneysel ve sayısal yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Fluent ve MATLAB tabanlı analizlerde, 12 mm uzunluğa sahip nozülün aşındırıcı fazın yeterli şekilde hızlandığı ve iç yüzeyde oluşan erozyon şiddetinin en düşük seviyede olduğu belirlenmiştir. 480 saatlik erozyon deneyleri sonucunda, 18 mm uzunluktaki nozullarda sürtünme kaynaklı enerji kayıpları nedeniyle daha şiddetli iç yapı aşınması gözlenmiş olup nozul geometrisinin partikül hız dağılımı ve dolayısıyla erozyon aşınması üzerinde belirleyici bir rol oynadığını açıkça ortaya koymuştur (Chen ve diğ., 2025).

Nozul geometrisinin yüksek sıcaklık katı partikül erozyon testlerindeki akış hızları üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmada, 900 °C sıcaklık ve 300 m/s'ye kadar partikül hızları sağlayabilen yeni bir erozyon test nozulu tasarlanmış ve sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışmada nozul geometrisi, giriş basıncı, sıcaklık, standoff mesafesi ve çarpma açısının numune yüzeyine ulaşan gaz hızları üzerindeki etkileri parametrik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, sıcaklık ve giriş basıncı arttıkça nozul çıkış hızının yükseldiğini, standoff mesafesi arttıkça numune üzerindeki hızın belirgin şekilde azaldığını göstermiştir. Ayrıca düşük çarpma açıları ($\approx 30^\circ$) için yüzey boyunca daha kararlı hız dağılımları elde edildiği ve bunun erozyon testleri açısından avantaj sağladığı belirlenmiştir (Crocker ve Smith, 2016).

Aşındırıcı su süspansiyon jeti (AWSJ) akışında giriş basıncının jet performansı üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışmada, nozul içindeki cilt sürtünmesi ve çıkış kinetik enerjisi analitik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, giriş basıncının artmasıyla cilt sürtünme katsayısının belirgin şekilde yükseldiğini ve buna paralel olarak jet çıkış kinetik enerjisinin arttığını göstermiştir. Buna karşılık aşındırıcı hacim oranının artması durumunda hem cilt sürtünme katsayısının hem de jet çıkış kinetik enerjisinin önemli ölçüde azaldığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, nozul içi aşınma ve partikül–duvar etkileşimlerinin jet ömrü ve etkinliği üzerinde kritik rol oynadığını ortaya koymuştur (Deepak ve diğ., 2012).

Katı partikül erozyonunda akış koşulları ve malzeme kaldırma mekanizmalarını inceleyen temel bir çalışmada, sünek ve gevrek malzemeler için farklı aşınma davranışları analitik olarak değerlendirilmiştir. Sünek malzemelerde, partikül hızının ve çarpma yönünün malzeme kaldırma mekanizmasını belirlediği ve erozyon davranışının metal kesme verileriyle korelasyon gösterdiği ortaya konmuştur. Gevrek malzemelerde ise erozyonun ilk çatlak oluşum koşullarına bağlı olduğu ve malzeme kaybının daha sınırlı doğrulukla tahmin edilebildiği belirtilmiştir (Finnie, 1960).

Nozuldan çıkan aşındırıcı su ve aşındırıcı bulamaç jetlerinde partikül hızının ve hız dağılımının belirlenmesine yönelik bir çalışmada, çift diskli anemometre (DDA) yöntemi geliştirilmiş ve ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Çalışmada 125 μm orifis çapına sahip mikro-nozul kullanılarak 134–263 MPa basınç aralığında deneyler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, ortalama partikül hızının basınç artışıyla yaklaşık doğrusal şekilde yükseldiğini, standoff mesafesinin 2–10 mm aralığında artmasıyla ise ilk deney grubunda hızın yaklaşık 317 m/s'den 289 m/s'ye, ikinci deney grubunda ise 227 m/s'den 177 m/s'ye düştüğünü görülmüştür. Ayrıca partiküllerin büyük çoğunluğunun ortalama hızın

%80–120 aralığında dağıldığı ve daha büyük partiküllerin daha düşük hızlara sahip olduğu belirlenmiştir (Haghibin ve diğ., 2019).

Katı partikül erozyonunun akışkan hareketiyle ilişkisini ele alan bir derleme çalışmasında, erozyonun yalnızca malzeme özellikleriyle açıklanmasının yetersiz olduğu vurgulanmıştır. Özellikle türbülanslı akış koşullarında akışkan hareketinin partikül çarpma hızını ve yönünü belirleyerek erozyon davranışını önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca partikül ve akışkan hızlarının eşzamanlı ölçümüne olanak sağlayan temassız optik yöntemlerin en umut verici deneysel teknikler olduğu ifade edilmiştir (Humphrey, 1990).

Metal yüzeylerin küresel partiküllerle normal çarpma altındaki erozyonunu inceleyen teorik bir çalışmada, malzeme kaldırma koşulu kritik plastik şekil değiştirme kriterine dayandırılmıştır. Model, erozyon hızının partikül hızının küpüyle (v^3) orantılı olduğunu ve malzeme kaldırma için gerekli partikül kütlesinin hızla ters orantılı olarak (v^{-2}) değiştiğini öngörmüştür. Metal davranışı dinamik sertlik ve erozyon koşullarındaki süneklik parametreleriyle tanımlanmış, model sonuçları alüminyum alaşımları üzerinde elde edilen deneysel verilerle uyumlu bulunmuştur (Hutchings, 1981).

Sünek alaşımlarda katı partikül erozyon davranışını modellemeye yönelik kapsamlı bir çalışmada, erozyonun yüksek şekil değiştirme hızlarında malzemenin mekanik özellikleriyle ilişkisi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Çalışmada Ni-, Co- ve Fe-tabanlı alaşımlar için mikro sertlik ölçümleri ve yüksek hızda basma testleri kullanılarak plastik deformasyon bölgesi ve enerji soğurma kapasitesi belirlenmiştir. Sonuçlar, erozyon direncinin yalnızca sertlikle değil, yüksek şekil değiştirme hızlarında sertlik–tokluk kombinasyonu ile belirlendiğini göstermiştir. Geliştirilen erozyon parametresinin deneysel erozyon hızlarıyla iyi korelasyon sağladığı ve özellikle yüksek sertlik/modül oranına sahip malzemelerin daha düşük erozyon sergilediği ortaya çıkmıştır (Levin ve diğ., 1999).

Kompozit malzemelerde katı partikül erozyon davranışını ele alan kapsamlı bir derleme çalışmasında, polimer, metal ve seramik matrisli kompozitlerin yanı sıra bu malzemeler için geliştirilen kaplamaların erozyon özellikleri sistematik olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada erozyon davranışının; takviye tipi, takviye miktarı, fiber yönelmesi ve matris–takviye ara yüzey dayanımı gibi kompozite özgü parametrelere ek olarak çarpma açısı, partikül hızı ve aşındırıcı özelliklerinden güçlü biçimde etkilendiği vurgulanmıştır. Literatür sonuçları bir araya getirilerek kompozit malzemeler için genel erozyon karakteristikleri ortaya konmuştur (Miyazaki, 2016).

Farklı fiziksel özelliklere sahip malzemelerin partikül yüklü gaz akışı altında erozyon davranışını inceleyen bir çalışmada, partikül şekli, çarpma hızı ve çarpma açısının aşınma üzerindeki etkileri deneysel olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar, erozyon miktarının malzeme tipine bağlı olarak farklı çarpma açılarında maksimuma ulaştığını ve geliştirilen basit teorik ilişkilerin deneysel verilerle uyumlu tahminler sunduğunu göstermiştir (Neilson ve Gilchrist, 1968).

Katı partikül çarpmasına bağlı erozyon hasarının çarpma açısına bağımlılığını inceleyen bir çalışmada, metalik, plastik ve seramik malzemeler için deneysel erozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, metalik malzemelerde maksimum erozyonun genellikle 20° – 30° gibi sığ açılarda meydana geldiğini ve bu açının malzeme sertliği azaldıkça daha da küçüldüğünü göstermiştir. Ayrıca erozyon–çarpma açısı ilişkisi, malzeme sertliğini içeren trigonometrik tabanlı basit bir denklemle başarıyla modellenmiştir. Geliştirilen yaklaşım sayesinde normal çarpma açısındaki erozyon verilerinden diğer açılardaki erozyon miktarının tahmin edilebildiği belirtilmiştir (Oka ve diğ., 1997).

Katı partikül erozyonunda malzeme kaldırma mekanizmalarını açıklamaya yönelik bir çalışmada, özellikle eğik çarpma açıları için mevcut modellerin yetersiz kaldığı vurgulanmıştır. Çalışmada, partikül–yüzey etkileşimi sırasında oluşan yüzeye yakın kayma tabakasının rolü ele alınmış ve plastik deformasyonun yerleşmesi ile yığılma oluşumunu esas alan kapsamlı bir teorik model geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin, farklı çarpma açıları ve partikül geometrileri için geçerli olduğu ve enerji soğurma ilişkileriyle uyumlu şekilde erozyon davranışını açıklayabildiği belirtilmiştir (Sundararajan, 1991).

Aşındırıcı su jeti (AWJ) nozullarında erozyon davranışını inceleyen bir çalışmada, nozul içindeki parçacık hareketleri CFD ile modellenmiş ve deneysel ölçümlerle doğrulanmıştır. Sonuçlar, en şiddetli erozyonun daralan ve doğrusal kesitlerin birleşim bölgesinde meydana geldiğini ve maksimum erozyon hızının yaklaşık $1,15 \times 10^{-3}$ – $1,22 \times 10^{-3}$ kg/(m²·s) aralığında olduğunu göstermiştir. Duyarlılık analizleri, erozyon oranının en çok pompa basıncına, çarpma hızının pompa basıncına ve çarpma açısının ise partikül boyutuna bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca düşük açılı ($<7^{\circ}$) çarpmaların baskın olduğu bu bölgede erozyon mekanizmasının mikro-kesme (micro-cutting) karakterinde olduğu belirlenmiştir (Shao ve diğ., 2023).

Literatürde katı partikül erozyon aşınması; malzeme özellikleri, partikül hızı, çarpma açısı ve akış koşulları bağlamında kapsamlı biçimde incelenmiş olmasına rağmen, nozul geometrisinin aşındırıcı partikül çarpma hızı üzerindeki etkisinin doğrudan

deneysel verilerle ortaya konduğu çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Mevcut çalışmaların önemli bir kısmı sayısal modellere odaklanmakta veya nozul içi aşınmayı ele almakta, partikül çarpma hızının nozul çıkış geometrisine bağlı değişimi ve bunun erozyon aşınmasıyla doğrudan ilişkilendirilmesi yeterince ele alınmamaktadır. Bu tez çalışmasında, farklı nozul çıkış çaplarının partikül çarpma hızı ve buna bağlı erozyon aşınması üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, 300–425 μm boyutlarında alüminyum oksit partiküller, hava akışı içerisinde 3,2 – 4,8 – 6,4 ve 8,5 mm çıkış çaplarına sahip nozullar kullanılarak erozyon aşınma deneyleri gerçekleştirilmiş ve bu amaçla özgün bir deney düzeneği tasarlanıp imal edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile nozul geometrisi, partikül çarpma hızı ve erozyon aşınması arasındaki ilişki nicel olarak ortaya konmuş olup, çalışmanın hem literatürdeki deneysel veri eksikliğini gidermesi hem de erozyona maruz kalan sistemler için nozul tasarımına yönelik özgün ve uygulanabilir çıktılar kazandırılmıştır.

3. TEORİK ESASLAR

Katı partikül erozyon aşınması, malzemelerin yüzeylerinde meydana gelen, partiküllerin çarpması ve sürtünmesi sonucu oluşan aşınma türüdür. Bu aşınma mekanizması, özellikle endüstriyel uygulamalarda, metalürji, madencilik, otomotiv ve havacılık sektörlerinde önemli bir sorun teşkil eder. Katı partiküller, genellikle yüksek hızlarda yüzeye çarparak mekanik gerilmeler oluşturur ve yüzeyin zamanla aşınmasına yol açar. Bu süreç, yüzeyde mikro çatlakların ve aşınma izlerinin oluşmasına neden olarak, malzemenin yapısal bütünlüğünü ve performansını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, aşınma hızı, partiküllerin boyutu, şekli, sertliği ve hızına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu sebeple malzeme seçiminde, yüzey kaplamalarında veya malzeme yöneliminde özel önlemler alınmasını gerektirerek aşağıdaki türlerinin de uygulama sahasında ciddiye alınması oldukça önemli görülmektedir.

3.1. Aşınma Türleri

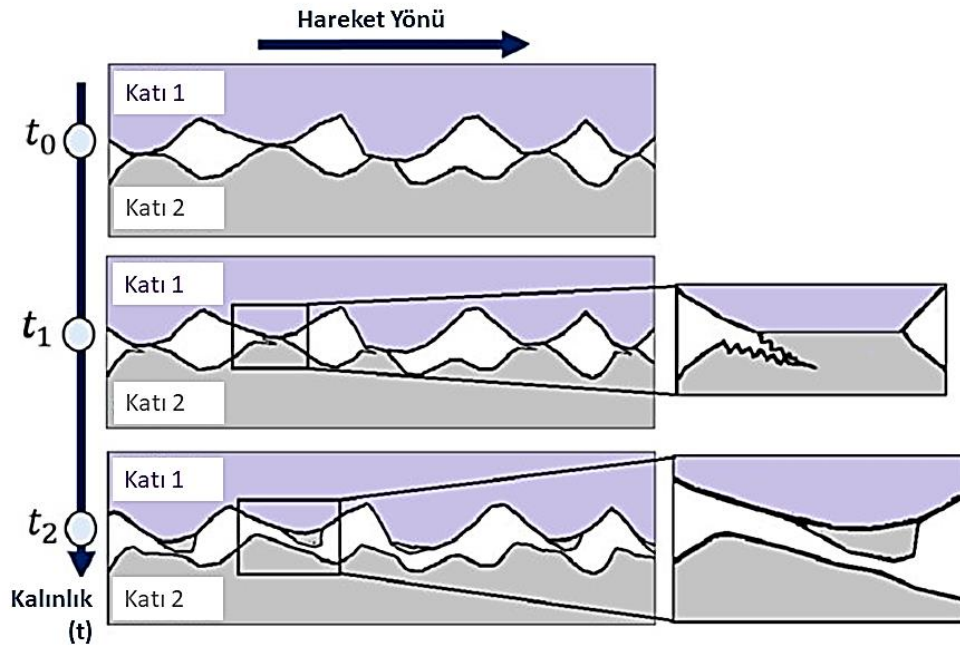
Makine elemanlarının çalışma sırasında maruz kaldığı yükler ve temas koşulları nedeniyle, yüzeylerinde zamanla malzeme kaybı meydana gelmekte ve bu durum elemanların işlevsel ve geometrik özelliklerinin bozulmasına yol açmaktadır. Bu tür yüzey hasarları genel olarak aşınma olarak tanımlanmakta olup, aşınma olgusu yalnızca sürtünme kaynaklı bir problem olarak değerlendirilmemelidir. Geleneksel yaklaşımlarda aşınma mekanizmaları kuru, ıslak ve karma sürtünme koşulları altında ele alınsa da bu sınıflandırma aşınmanın ortaya çıkış nedenlerini kapsamlı biçimde açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Çünkü bazı durumlarda yüzeyler arasında doğrudan temas ve bağlı hareket bulunmasına rağmen belirgin bir aşınma oluşmazken, bazı aşınma türleri ise sürtünme etkisi olmaksızın gelişebilmektedir (Kato ve Adachi, 2000).

Örneğin sıvı ortamlarında kabarcık oluşumu ve ani çökmesiyle meydana gelen kavitatif aşınma ya da akışkan içinde taşınan partiküllerin yüzeye yüksek hızla çarpması sonucu oluşan erozyon aşınması, klasik sürtünme temelli aşınma mekanizmalarından farklı karaktere sahiptir. Bu nedenle aşınma türleri; temas koşulları, çevresel etkiler, akışkan varlığı ve partikül etkileşimleri gibi çok sayıda faktörün bir arada değerlendirilmesini gerektiren karmaşık bir süreçtir. Endüstriyel uygulamalarda aşınma, yalnızca bakım ve onarım gereksinimini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda makine elemanlarının ömrünü kısaltarak performansının düşmesine neden olmaktadır. Bu doğrultuda, sistemlerdeki aşınma olayının ve türünün en doğru biçimde tanımlanması, sistemin çalışabilirliğini artırma konusunda önem arz etmektedir.

3.1.1. Adhezif aşınma

Adhezif aşınma, birbirleri ile izafi hareket hâlinde bulunan iki katı yüzeyin doğrudan teması sonucunda meydana gelen bir aşınma türüdür. Temas sırasında yüzeyler arasında oluşan yerel bağlanmalar, hareketin devam etmesiyle kopmakta ve bu kopma esnasında bir yüzeyden diğerine malzeme transferi veya yüzeyden malzeme ayrılması gerçekleşmektedir. Bu süreç, zamanla yüzeylerde malzeme kaybına, düzensiz aşınma izlerine ve yüzey bütünlüğünün bozulmasına neden olmaktadır. Adhezif aşınma çoğunlukla sürtünme katsayısında artış ve yüzeylerde sıvama şeklinde kendini göstermektedir. Bu aşınma türünün oluşumu ve ilerleme hızı; temas eden malzeme çiftlerinin mekanik ve kimyasal özellikleri, uygulanan normal yük, izafi hareket hızı ve çalışma ortamı koşullarına bağlıdır. Özellikle benzer özelliklere sahip malzemelerin birlikte çalıştığı ve yüzeyler arasında yeterli ayırıcı ortamın bulunmadığı durumlarda adhezif etkileşimler daha baskın hâle gelmektedir.

Yağlama koşullarının yetersiz olması veya tamamen kuru sürtünme altında çalışan sistemlerde bu aşınma türü hızla ilerleyebilmektedir. Adhezif aşınma, endüstriyel uygulamalarda kaymalı yataklar, kızak sistemleri, mil-burç çiftleri ve dişli temas yüzeyleri gibi izafi hareketin sürekli olduğu makine elemanlarında yaygın olarak görülmektedir (Podgornik, 2022).



Şekil 3.1. Adhezif aşınmanın temsili gösterimi (Trevisiol, 2018)

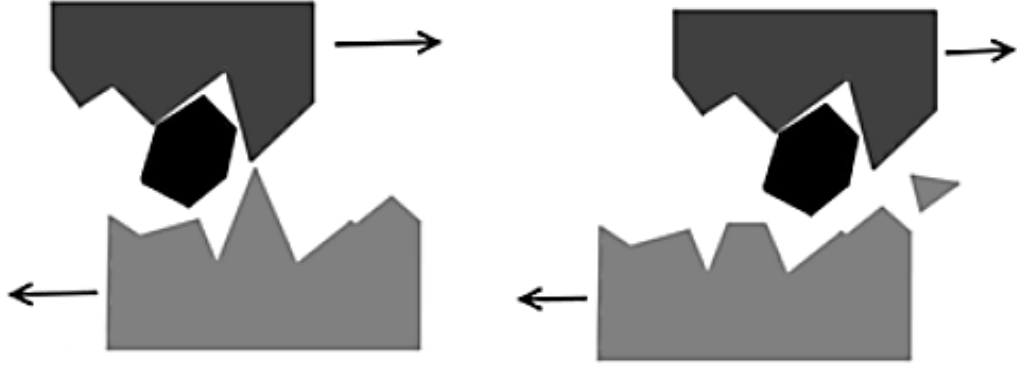
Özellikle endüstride metal malzeme çiftleri birbirleri ile çalışması sebebiyle bu tür aşınmalar yoğun şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu aşınma mekanizması kontrol altına alınmadığında, yüzey hasarlarının artmasıyla birlikte sürtünme kuvvetleri yükselmekte, titreşim ve gürültü seviyeleri artmakta ve nihayetinde makine elemanlarının servis ömrü önemli ölçüde kısalmaktadır.

Bu nedenle adeziv aşınmanın doğru şekilde tanımlanması ve uygun tasarım önlemlerinin alınması, güvenilir ve uzun ömürlü sistemlerin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 3.1’de adeziv aşınmayı temsil eden şematik görünüm verilmiştir.

3.1.2. Abrazif aşınma

Abrazif aşınma, yüzeyler arasında gerçekleşen izafi hareket sırasında, sert bir yüzeyin veya sert parçacıkların daha yumuşak bir yüzey üzerinde çizme, oyma veya kesme etkisi oluşturmasıyla meydana gelen bir aşınma türüdür. Bu aşınma mekanizmasında malzeme kaybı, genellikle yüzeyden küçük parçacıkların kopması veya yüzeyin plastik deformasyona uğraması sonucunda oluşmaktadır. Abrazif aşınma, temas eden yüzeylerden birinin diğerine kıyasla daha sert olması ya da yüzeyler arasında serbest veya bağlı halde bulunan sert parçacıkların varlığı durumunda ortaya çıkmaktadır. Abrazif aşınma temel olarak iki farklı şekilde gerçekleşmektedir (Torrance, 2005). İki cisimli abrazif aşınmada, sert yüzey veya sert çıkıntılar doğrudan karşı yüzey üzerinde çizme etkisi oluşturarak malzeme kaybına neden olmaktadır. Şekil 3.2’de gözlemlenen üç cisimli abrazif aşınmada ise yüzeyler arasına giren serbest sert partiküller, izafi hareket sırasında yuvarlanarak veya kayarak yüzeylerde aşınmaya yol açmaktadır. Bu ikinci durumda aşınma genellikle daha yaygın bir alana dağılmakta ve aşınma izleri daha düzensiz bir karakter sergilemektedir.

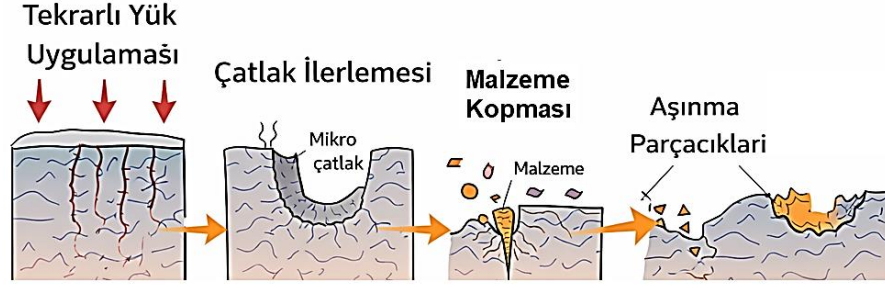
Abrazif aşınmanın şiddeti; partikül sertliği, boyutu, şekli, temas basıncı ve izafi hareket hızı gibi birçok parametreye bağlıdır. Sert ve köşeli partiküller, daha yuvarlak yapıları partiküllere kıyasla yüzeylerde daha fazla malzeme kaybına neden olmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda madencilik ekipmanları, taşımacılık sistemleri, değirmenler ve aşındırıcı ortamda çalışan boru hatları gibi birçok sistemde abrazif aşınma yaygın olarak görülmektedir. Bu nedenle abrazif aşınmanın mekanizmasının anlaşılması, uygun malzeme seçimi ve yüzey iyileştirme yöntemlerinin geliştirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3.2. Abrazif aşınmanın temsili görünümü

3.1.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, temas hâlinde ve izafi hareket eden yüzeylerin tekrarlı veya periyodik yükler altında çalışması sonucunda ortaya çıkan bir aşınma türüdür. Bu mekanizmada yüzeyler, her bir yükleme çevriminde elastik ve plastik deformasyonlara maruz kalmakta, zamanla yüzey altı bölgelerde gerilme birikimi meydana gelmektedir. Bu gerilmelerin belirli bir seviyeyi aşmasıyla birlikte mikro çatlaklar oluşmakta ve bu çatlakların ilerlemesi sonucunda yüzeyden parçacıklar koparak malzeme kaybı gerçekleşmektedir. Yorulma aşınması genellikle temas basıncının yüksek olduğu ve yüklerin sürekli olarak değiştiği sistemlerde daha belirgin hâle gelmektedir. Yuvarlanma veya yuvarlanmalı kayma hareketinin birlikte bulunduğu temaslarda, yüzey altında oluşan gerilmeler yüzeye paralel çatlakların gelişmesine neden olmaktadır (Horng ve diğ., 2025). Bu çatlakların yüzeye ulaşmasıyla birlikte pul pul dökülme şeklinde karakteristik aşınma izleri ortaya çıkmaktadır. Bu aşınma türü, ani bir yüzey hasarı yerine zamanla biriken hasar sonucunda ilerlediğinden, başlangıç aşamalarında fark edilmesi zor olabilmektedir. Endüstriyel uygulamalarda yorulma aşınması; rulmanlar, dişliler, raylı sistem temasları ve haddelme elemanları gibi tekrarlı yük altında çalışan makine elemanlarında sıkça görülmektedir. Bu aşınma türü kontrol altına alınmadığında, yüzey bütünlüğünün bozulmasıyla birlikte titreşim, gürültü ve performans kaybı gibi problemlere yol açabilmektedir. Bu nedenle yorulma aşınmasının anlaşılması, özellikle uzun süreli ve güvenilir çalışması beklenen sistemlerde uygun malzeme seçimi ve tasarım kriterlerinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Şekil 3.3’de yorulma aşınmasının gelişimi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Yorulma aşınmasının şematik gösterimi

3.1.4. Korozyon aşınması

Korozyon aşınması, malzeme yüzeylerinin bulunduğu ortamla kimyasal veya elektrokimyasal etkileşime girmesi sonucunda meydana gelen ve çoğunlukla mekanik etkilerle birlikte ilerleyen bir aşınma türüdür. Bu mekanizmada, yüzey üzerinde oluşan kimyasal reaksiyonlar malzemenin yapısını zayıflatmakta ve yüzey bütünlüğünü bozarak malzeme kaybına neden olmaktadır. Korozyon aşınması, yalnızca kimyasal etkileşim sonucu oluşan saf korozyondan farklı olarak, mekanik yükler veya izafi hareketin varlığıyla hızlanan bir süreçtir. Korozyon aşınmasında mekanik ve kimyasal etkiler birbirini karşılıklı olarak etkilemektedir. Kimyasal reaksiyonlar sonucu yüzeyde oluşan oksit veya reaksiyon ürünleri genellikle gevrek bir yapıya sahiptir ve izafi hareket veya akış etkisiyle yüzeyden kolaylıkla uzaklaştırılmaktadır (Song ve diğ., 2025).

Bu tabakanın sürekli olarak uzaklaştırılması, alttaki taze malzemenin yeniden kimyasal etkileşime girmesine neden olmakta ve aşınma süreci hızlanmaktadır. Bu nedenle korozyon aşınması, özellikle akışkan ortamlar, yüksek sıcaklık veya kimyasal bileşenlerin bulunduğu koşullarda daha belirgin hâle gelmektedir. Endüstriyel uygulamalarda korozyon aşınması; boru hatları, vanalar, ısı değiştiriciler ve kimyasal proses ekipmanları gibi hem mekanik etkilere hem de kimyasal ortamlara maruz kalan sistemlerde yaygın olarak görülmektedir. Bu aşınma türü kontrol altına alınmadığında, yüzey hasarlarının hızla ilerlemesine, sızdırmazlık problemlerine ve ekipman ömrünün ciddi ölçüde azalmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle korozyon aşınmasının anlaşılması, uygun malzeme seçimi, kaplama teknolojileri ve çalışma ortamının kontrolü açısından büyük önem taşımaktadır.

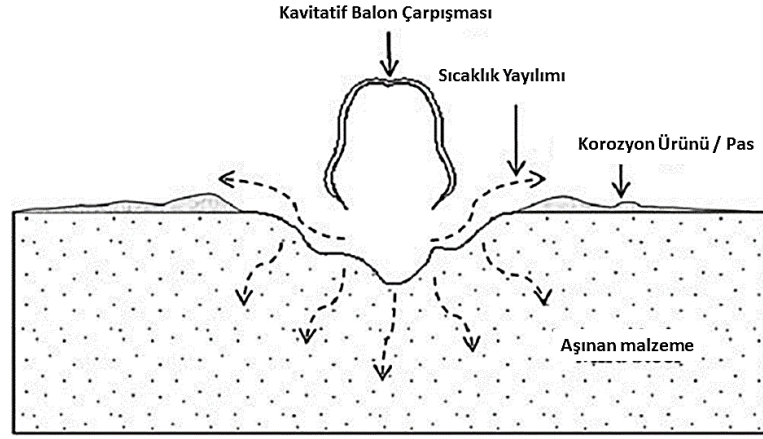
Şekil 3.4'te korozyona ve dolayısıyla korozyon aşınmasına uğramış makine elemanı örneği verilmiştir.



Şekil 3.4. Korozyon aşınmasına uğramış makine elemanı örneği

3.1.5. Kaviteasyon aşınması

Kaviteasyon aşınması, sıvı ortamda çalışan makine elemanlarının yüzeylerinde, akış koşullarına bağlı olarak oluşan buhar kabarcıklarının ani çökmesi sonucunda meydana gelen bir aşınma türüdür. Şekil 3.5'deki aşınma sürecinin gelişim süreci incelendiğinde, akışkan basıncının yerel olarak buharlaşma basıncının altına düşmesiyle oluşan kabarcıklar, daha yüksek basınçlı bölgelere taşındıklarında hızla çökmekte ve bu çökme sırasında yüzeylere darbe etkileri uygulanmaktadır. Bu darbeler, yüzeyde plastik deformasyonlara ve zamanla malzeme kaybına yol açmaktadır. Kaviteasyon aşınması süreci, yüzey üzerinde tekrarlayan darbe etkileri nedeniyle ilerlemektedir. Kabarcıkların sürekli olarak oluşması ve çökmesi, yüzeyde mikro çatlakların gelişmesine ve bu çatlakların birleşmesiyle malzemenin kaldırılmasına neden olmaktadır (Yu ve diğ., 2024). Bu aşınma türü, mekanik temas veya sürtünme olmaksızın gerçekleşmesi bakımından diğer aşınma mekanizmalarından ayrılmaktadır. Özellikle yüksek akış hızları, basınç dalgalanmaları ve ani kesit değişimlerinin bulunduğu sistemlerde kaviteasyon etkisi daha belirgin hâle gelmektedir. Endüstriyel uygulamalarda kaviteasyon aşınması; pompa çarkları, türbin kanatları, vanalar ve hidrolik sistem bileşenleri gibi sıvı akışı altında çalışan ekipmanlarda sıkça karşılaşılan bir problemdir. Bu aşınma türü kontrol altına alınmadığında, yüzey hasarlarının ilerlemesiyle performans kayıplarına, titreşim artışına ve ekipman arızalarına yol açabilmektedir. Bu nedenle kaviteasyon aşınmasının anlaşılması, uygun tasarım kriterlerinin belirlenmesi ve akış koşullarının optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3.5. Kavitezyon aşınmasının şematik olarak gelişim süreci (Wang ve diğ., 2014)

3.1.6. Erozyon aşınması

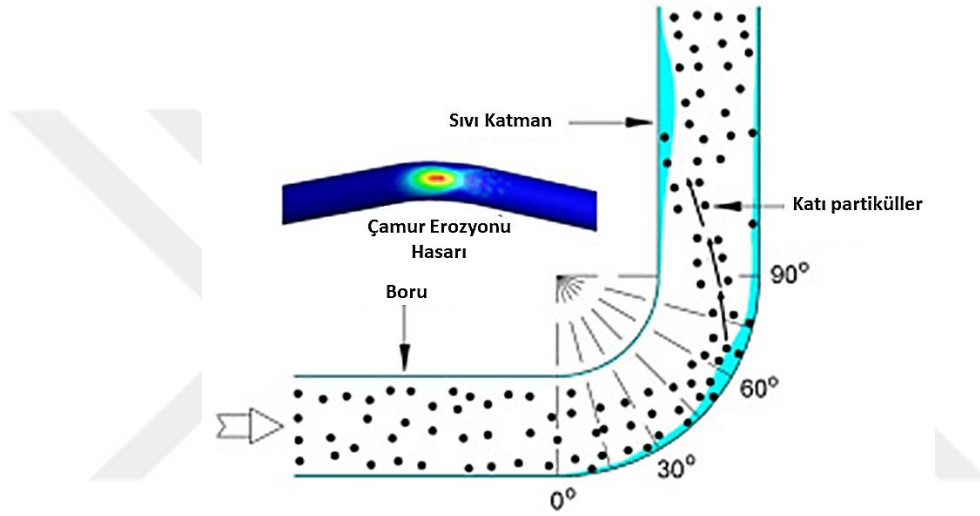
Erozyon aşınması, akışkanlar veya akışkan içerisinde taşınan partiküllerin yüzeye yüksek hızla çarpması sonucu meydana gelen ve kısa sürede ciddi malzeme kayıplarına yol açabilen tehlikeli bir aşınma türüdür. Bu aşınma mekanizması, sürtünmeye dayalı aşınmalardan farklı olarak darbe etkisiyle ilerlemektedir. Erozyon aşınması, taşıyıcı ortamın özelliklerine bağlı olarak sıvı ortamda gerçekleşen çamur (slurry) erozyonu ve gaz veya hava ortamında gerçekleşen katı partikül erozyon aşınması olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır.

3.1.6.1. Çamur (slurry) erozyonu

Çamur erozyonu (slurry erosion), sıvı bir akışkan içerisinde taşınan katı partiküllerin yüzeye çarpması sonucu meydana gelen bir erozyon aşınması türüdür. Bu mekanizmada, sıvı faz yalnızca partiküllerin taşınmasını sağlamakla kalmamakta, aynı zamanda partikül hızını, çarpma açısını ve yüzeye etkileşim süresini de belirleyerek aşınma davranışını doğrudan etkilemektedir. Partiküllerin yüzeye tekrarlı olarak çarpması, yüzeyde plastik deformasyon, mikro çatlak oluşumu ve zamanla malzeme kopmasına neden olmaktadır. Çamur erozyonunun şiddeti; partikül boyutu, şekli, sertliği, yoğunluğu, akışkan hızı, partikül konsantrasyonu ve çarpma açısı gibi birçok parametreye bağlıdır.

Sıvı fazın varlığı, partiküllerin yüzeye olan darbe enerjisini kısmen sönmüleyebilmekte, ancak yüksek hızlar ve yüksek partikül konsantrasyonları altında

aşınma etkisi önemli ölçüde artmaktadır (Duan ve diğ., 2024). Bu nedenle çamur erozyonu, özellikle boru hatları, pompalar, vana sistemleri ve hidrolik ekipmanlar gibi sıvı ve katı karışımların taşındığı sistemlerde ciddi bir aşınma problemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda çamur erozyonu; madencilik, petrokimya, enerji üretimi ve atık su sistemleri gibi birçok alanda ekipman ömrünü kısaltan temel hasar mekanizmalarından biridir. Bu aşınma türünün kontrol altına alınabilmesi için uygun malzeme seçimi, akış hızının sınırlandırılması ve sistem geometrisinin optimize edilmesi büyük önem taşımaktadır. Şekil 3.6'da çamur erozyonunun bir boru içinde ortaya çıkışı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Çamur (slurry) erozyonunun temsili gösterimi (Peng ve diğ., 2023)

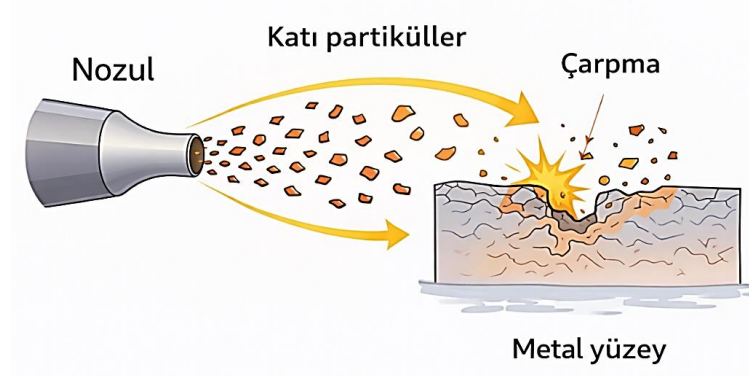
3.1.6.2. Katı partikül erozyon aşınması

Bu tez çalışmasının da konusu olan katı partikül erozyon aşınması, gaz veya hava gibi bir taşıyıcı faz içerisinde hareket eden katı partiküllerin bir yüzeye belirli bir hız ve açıyla çarpması sonucunda yüzeyden malzeme kaldırılmasıyla karakterize edilen bir aşınma türüdür. Bu aşınma mekanizması, sürekli yüzey teması gerektirmemesi ve darbe etkisiyle ilerlemesi bakımından sürtünmeye dayalı aşınma türlerinden ayrılmaktadır. Yüksek kinetik enerjiye sahip partiküllerin yüzeye tekrarlı olarak çarpması; plastik deformasyon, mikro çatlak oluşumu ve malzeme kopması gibi hasar mekanizmalarını tetikleyerek ilerleyici bir yüzey hasarına neden olmaktadır (Qaderi ve diğ., 2025). Katı partikül erozyon aşınmasının şiddeti, çok sayıda parametrenin birlikte etkisiyle belirlenmektedir. Bunlar arasında partikül çarpma hızı, erozyon davranışını belirleyen en baskın parametrelerden biri olarak öne çıkmaktadır. Literatürde, erozyon oranının çoğu

durumda partikül hızının üstel bir fonksiyonu olduğu kabul edilmekte ve hızdaki artışların aşınma miktarında belirgin artışlara yol açtığı bildirilmektedir (Oka ve diğ., 2005). Çarpma açısı ise hedef malzemenin sünek veya gevrek karakterine bağlı olarak erozyon davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. Sünek malzemelerde maksimum erozyon genellikle daha düşük çarpma açılarında meydana gelirken, gevrek malzemelerde bu durum normale yakın açılarda gerçekleşmektedir. Bunun yanı sıra partikül boyutu, şekli, sertliği, yoğunluğu ve partikül debisi gibi faktörler, yüzeye aktarılan enerji miktarını değiştirerek aşınma mekanizmasını doğrudan etkilemektedir.

Erozyon aşınmasının değerlendirilmesinde yalnızca partikül özellikleri değil, hedef malzemenin mekanik ve yapısal özellikleri de belirleyici rol oynamaktadır. Malzemenin sertliği, tokluğu, elastisite modülü ve mikroyapısı; çarpma sonucu oluşan deformasyonun türünü ve malzeme kaldırma mekanizmasını belirlemektedir. Bu nedenle katı partikül erozyonu, tek bir parametre ile açıklanamayacak kadar karmaşık bir hasar mekanizmasıdır. Deneysel çalışmalarda bu karmaşık etkileşimlerin kontrol altına alınabilmesi amacıyla uluslararası standartlar geliştirilmiştir. ASTM G76 standardı, gaz jeti altında katı partikül erozyon testlerinin gerçekleştirilmesine yönelik temel referans niteliğinde olup, partikül hızı, çarpma açısı ve aşındırıcı özelliklerinin kontrollü şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. ASTM G211 standardı ise katı partikül erozyonun yüksek sıcaklık altındaki cevabını ölçmede kullanılmaktadır. Bu standartlar, katı partikül erozyonuna ilişkin deneysel çalışmaların güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini artırmaktadır.

Katı partikül erozyon aşınmasının endüstriyel önemi, bu mekanizmanın pnömatik taşıma sistemleri, boru hatları, dirsekler, vanalar, türbin bileşenleri ve akış yönlendirme elemanlarının yanı sıra otomotiv ve ağır vasıta uygulamalarında, özellikle ağır vasıta araç dorseleri, şasi bileşenleri ve alt gövde bölgeleri gibi dış ortam koşullarına maruz kalan yüzeylerde yaygın olarak görülmesinden kaynaklanmaktadır. Erozyon hasarı çoğu zaman belirli bölgelerde yoğunlaşarak kaplama hasarlarına ve zamanla ani ekipman arızalarına yol açabilmektedir. Bu kapsamda akışkanın ve partiküllerin hareketini belirleyen geometrik elemanlar, özellikle de akış yönlendirme ve püskürtme elemanları olan nozul yapıları, erozyon davranışında kritik bir rol oynamaktadır. Nozul geometrisi; partiküllerin hızlanma süresini, hız dağılımını ve yüzeye ulaşma koşullarını doğrudan etkileyerek çarpma hızını ve dolayısıyla erozyon aşınmasının şiddetini belirleyen temel faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Şekil 3.7’de katı partikül erozyon aşınmasının temsili olarak gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.7. Katı partikül erozyon aşınmasının şematik gösterimi.

Katı partikül erozyon aşınmasının nicel olarak değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan parametre erozyon oranıdır. Erozyon oranı, bir yüzeyden kaldırılan malzeme miktarının, yüzeye çarpan aşındırıcı partikül miktarıyla ilişkilendirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yaklaşım, farklı deney koşulları, partikül özellikleri ve akış parametreleri altında elde edilen sonuçların karşılaştırılabilir olmasını sağlamaktadır. Hutchings ve Finnie tarafından önerilen bu yöntem, literatürde katı partikül erozyon deneylerinin değerlendirilmesinde temel referanslardan biri olarak kabul edilmektedir (Hutchings, 1979). Deneysel çalışmalarda erozyon oranının belirlenebilmesi için öncelikle numunede meydana gelen ağırlık kaybı tespit edilmektedir.

Ağırlık kaybı (ΔW), numunenin erozyon deneyinden önceki ağırlığı ($W_{Aşınma \text{ Öncesi}}$) ile deney sonrasındaki ağırlığı ($W_{Aşınma \text{ Sonrası}}$) arasındaki fark olarak tanımlanmakta ve Denklem (3.1) ile ifade edilmektedir. Bu büyüklük, erozyon etkisiyle yüzeyden kaldırılan toplam malzeme miktarını temsil etmektedir. Deneyler öncesinde ve sonrasında yapılan hassas tartım işlemleri, ölçüm doğruluğu açısından büyük önem taşımaktadır.

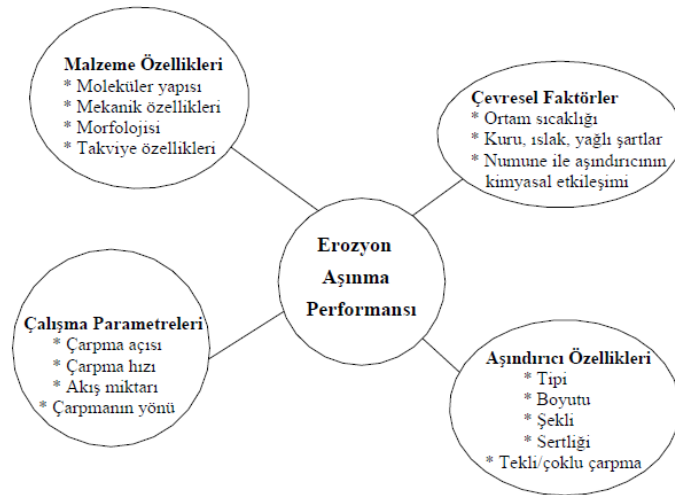
$$\Delta W = W_{Aşınma \text{ Öncesi}} - W_{Aşınma \text{ Sonrası}} \quad (3.1)$$

Erozyon oranı (E) ise, kaldırılan malzeme kütlesinin, deney süresince yüzeye çarpan aşındırıcı partiküllerin toplam kütlesine (m_p) oranlanmasıyla hesaplanmaktadır. Bu ilişki Denklem (3.2) ile ifade edilmekte olup, erozyon davranışının deney süresinden ve partikül besleme miktarından bağımsız olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece erozyon oranı, yüzeyin aşındırıcı etkilere karşı gösterdiği direncin doğrudan bir göstergesi hâline gelmektedir. Bu yöntem sayesinde farklı malzemeler, nozul geometrileri ve deney parametreleri altında elde edilen erozyon sonuçları güvenilir ve tutarlı bir şekilde karşılaştırılabilmektedir.

$$E = \frac{\Delta W}{m_p} \quad (3.2)$$

Erozyon aşınmasını daha ayrıntılı biçimde açıklamak amacıyla farklı deneysel koşullara dayanan çok sayıda ampirik ve yarı-ampirik erozyon modeli geliştirilmiştir. Bu modellerde erozyon oranı; partikül hızı, çarpma açısı, partikül boyutu ve malzeme özellikleri gibi parametrelerle ilişkilendirilmekte ve çoğunlukla deneysel olarak belirlenen sabitler içermektedir. Bu modellerin geliştirilmesinde temel amaç, erozyon aşınmasını etkileyen parametrelerin sistematik olarak tanımlanması ve bu parametrelerin erozyon davranışı üzerindeki göreceli etkilerinin ortaya konulmasıdır. Ancak katı partikül erozyon aşınması, çok sayıda değişkenin aynı anda etkileşimde bulunduğu karmaşık bir mekanizma olduğundan, tek bir parametreye indirgenerek açıklanması mümkün değildir. Bu nedenle literatürde, erozyon aşınma performansını belirleyen faktörler çoğunlukla bütüncül bir bakış açısıyla ele alınmaktadır. Şekil 3.8’de gösterildiği üzere, erozyon aşınma performansı; malzeme özellikleri, çalışma parametreleri, aşındırıcı özellikleri ve çevresel faktörler olmak üzere dört ana grupta toplanan parametrelerin ortak etkisiyle belirlenmektedir.

Hedef malzemenin mekanik ve yapısal özellikleri, aşındırıcı partiküllerin tipi ve boyutu, çarpma hızı ve açısı gibi çalışma koşulları ile ortam sıcaklığı ve çalışma ortamının kimyasal yapısı, erozyon davranışının şiddetini ve karakterini doğrudan etkilemektedir. Bu faktörlerin birlikte değerlendirilmesi, erozyon aşınmasının doğru şekilde anlaşılması ve deneysel sonuçların sağlıklı biçimde yorumlanabilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.



Şekil 3.8. Katı partikül erozyon aşınması performansına etki eden faktörler (Bağcı, 2010)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında farklı nozul tasarımlarına sahip partikül püskürtme elemanlarının, yapısal çelik (EN 10025-2 standardında tanımlanan S355J2+N) numunelerin katı partikül erozyon aşınması davranışına etkisi incelenmiştir. Bu kapsamda, üretimi yapılan nozulların tasarım ve üretim süreci, katı partikül erozyon aşınması deney setinin tasarım süreci, katı partikül erozyon aşınması deney parametreleri, aşındırıcı katı partiküllerin boyut ve malzeme bilgisi, deneysel süreçten elde edilen bilgilerin hangi yönüyle yorumlanacağı ve hız ölçümü için kullanılan yöntemin detayları verilmiştir.

4.1. Nozul Tasarımı ve Üretimi

Katı partikül erozyon aşınması davranışını belirleyen en kritik parametrelerden biri, partiküllerin yüzeye çarptıkları andaki hızlarıdır. Bu hız, erozyonun şiddetini ve malzeme yüzeyinde meydana gelen deformasyonun türünü doğrudan etkileyen bir faktör olarak öne çıkar. Çarpma hızını kontrol etmek, deneysel çalışmalarda güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar elde edebilmek açısından büyük önem taşır. Partikül hızını etkileyen iki temel değişken bulunmaktadır. Bunlardan ilki, partiküllerin taşındığı akışkanın basıncıdır. Bu tez çalışmasında kullanılan deney düzeneğinde taşıyıcı akışkan olarak hava tercih edilmiştir. Havanın basıncı arttırıldığında, akış hattı boyunca akışkanın hızı yükselmekte ve bu da partiküllerin çıkışta daha yüksek kinetik enerjiye sahip olmasına neden olmaktadır. Böylece, partiküllerin numune yüzeyine çarptıkları hız seviyesi doğrudan hava basıncına bağlı olarak değişmektedir.

Çarpma hızını etkileyen ikinci önemli parametre ise nozul geometrisi ve tasarımıdır. Nozul, basınçlı havayı hızlandırarak partikülleri belirli bir yön ve hızda yüzeye ileten bileşen olduğundan, bu parçanın geometrik özellikleri akışın karakterini belirleyen başlıca unsurdur. Özellikle nozulun çıkış çapı, uzunluğu ve şekli, akışın sıkışma–genleşme oranını ve dolayısıyla partikül hızını önemli ölçüde etkiler. Çıkış çapı küçüldükçe akışkan daha yüksek hızla dışarı püskürürken, daha büyük çıkış çaplarında basınç kayıpları artmakta ve hız düşmektedir.

Nozul tasarımı yapılırken, öncelikle literatürdeki izentropik sıkıştırılabilir akış denklemleri kullanılmış ve nozul çıkış çapı değerinin partikül hızına etkisi teorik olarak belirlenmeye çalışılmıştır. İlk olarak tıkanmış akış koşullarındaki kütleli debi Denklem

(4.1) ile ifade edilmiştir (Cengel ve Boles, 2015). Partikül hızının değişimi konusunda izentropik sıkıştırılabilir ve tıkanmış akış koşullarının seçimi konusunda partiküllerin nozul içinde hava ile yönlendirilerek bir sıkışma ve nozulda bir tıkanma meydana gelmesi daha önce karşılaşılan problemler olduğu bilindiğinden bu model seçilmiştir.

$$\dot{m} = C_d A_t \frac{P_0}{\sqrt{T}} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\left(\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)} \right)} \quad (4.1)$$

Burada ($\dot{m}$) kütleli debi, (C_d) boşluk katsayısı, (A_t) nozul çıkış kesit alanı, (P_0) giriş durgun basıncı, (T) giriş durgun sıcaklığı, (γ) özgül ısı oranı ve (R) gaz sabitidir. Denklemin hesaplanabilmesi için nozul üretici firmaların üretimini yapabildikleri en düşük çıkış çaplarına sahip (Ø3,2 mm, Ø4,8 mm, Ø6,4 mm ve Ø8,5 mm) nozullar esas alınarak denklem çözülmüştür.

3 bar giriş basıncı için yapılan hesaplamalarda Ø3,2 mm çaplı nozulda kütleli debi yaklaşık 0.0072 kg.s⁻¹, 4,8 mm çaplı nozulda 0.0162 kg.s⁻¹, Ø6,4 mm çaplı nozulda 0.0289 kg.s⁻¹ ve Ø8.5 mm çaplı nozulda 0.0509 kg.s⁻¹ olarak bulunmuştur. Görüldüğü üzere nozul çapı arttıkça gaz çıkış hızı tıkanmış akış koşullarında yaklaşık sabit kalmakta (sonik hız ~313 m.s⁻¹) ancak taşınan debi ve dolayısıyla jetin momentum büyüklüğü debi artışı sebebiyle belirgin şekilde artmaktadır.

Momentum artışı partiküllerin enerjisini artıracak ve dolayısıyla da erozyon aşınmasının artacağı beklenmektedir. Denklem (4.1)'deki model devam ettirilerek, partiküllerin hızlanma süreci Denklem (4.2)'de ifade edilen momentum denklemi ile bulunabilir.

$$m_p \frac{d\vartheta_p}{dt} = \frac{1}{2} C_D \rho_g A_p (u - \vartheta_p)^2 \quad (4.2)$$

Burada m_p partikül kütlesi (kg), ϑ_p partikül hızı (m.s⁻¹), C_D sürüklenme katsayısı, ρ_g gaz yoğunluğu (kg.m⁻³), A_p partikül kesit alanı (m²) ve u gaz hızıdır (m.s⁻¹). Bu denklemin çözülmüş hali olan parçacık hızının zamana bağlı değişimi Denklem (4.3) ile ifade edilmektedir.

$$\vartheta_p(t) = u \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_q} \right) \right] \text{ ve } \tau_q = \frac{4\rho_p d_p}{3C_D \rho_g u} \quad (4.3)$$

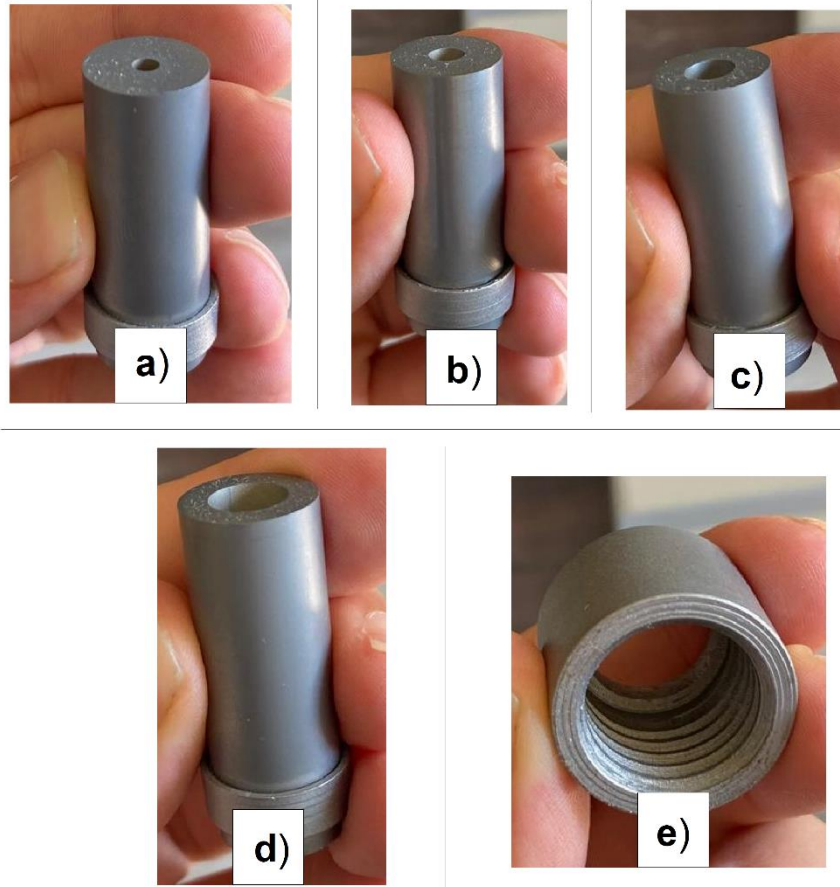
Denkleimde gösterilen τ_q partikülün karakteristik cevap zamanı (saniye-s), ρ_p partikül yoğunluğu (kg.m^{-3}) ve d_p karakteristik partikül çapını ifade etmektedir. Yapılan hesaplamalarda, 300–425 μm boyut aralığındaki alüminyum oksit partiküller için nozul içinde kalma süresi yaklaşık 1.1×10^{-4} s olarak belirlenmiştir. Bu süre 3.2 mm çaplı dar nozul için partiküllerin gaz hızıyla ~ 550 m/s hızlara ulaştığı tespit edilmiştir. Daha geniş nozul çaplarında, özellikle 8.5 mm nozulda, artan kütleli debi sayesinde partikül daha çabuk püskürmekle birlikte hız seviyeleri düşmeye başlamıştır.

Sonuçlar genel olarak göstermektedir ki giriş basıncı sabit tutulduğunda gaz çıkış hızı yaklaşık sabit kalsa da nozul çapı küçüldükçe çıkış kesit alanı azaldığından akış hızı artmaktadır. Dar kesitli 3.2 mm çaplı nozullarda akışkan daha yüksek hızlara ulaşmakta, buna karşılık taşınan toplam debi daha düşük olmaktadır. Geniş çaplı nozullarda ise artan kesit alanı nedeniyle gaz ve partikül hızları düşmekte, ancak kütleli debi artmaktadır. Dolayısıyla küçük çaplı nozullar yüksek partikül çarpma hızları üretirken, büyük çaplı nozullar daha fazla akış miktarı sağlamaktadır.

Yapılan teorik hesaplamalar sonucunda nozul geometrisinin, özellikle çıkış çapının partikül çarpma hızları üzerinde etkisi olduğu anlaşılmış ve dolayısıyla üretim aşamasına geçilmiştir. Nozulların çalışma koşulları ilerleyen süreçte yüksek sıcaklıklara maruz kalabileceği öngörülerek malzemesi tungsten karbür olarak belirlenmiştir. Tungsten karbürün erime sıcaklığı yaklaşık $\sim 1450^\circ\text{C}$ seviyesindedir.

Teorik partikül hızı hesabında tercih edilen nozul çıkış çapı değerlerinin ($\emptyset 3,2$ mm, $\emptyset 4,8$ mm, $\emptyset 6,4$ mm ve $\emptyset 8,5$ mm) tercih edilmesinin sebebi, nozul üretici firmaların üretimini yapabildikleri en düşük çap değerleri bu değerler olduğu için seçilmiştir. Dolayısıyla da nozul üretimi için bu değerler göz önünde bulundurulmuştur.

Bu kapsamda SAYKAR firmasından hizmet alımı yapılarak nozul tedariki sağlanmıştır. Üretilen nozulların görseli Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1.(a-d)’ye kadar sırasıyla $\emptyset 3,2$ mm, $\emptyset 4,8$ mm, $\emptyset 6,4$ mm ve $\emptyset 8,5$ mm’lik nozulların perspektif görünüşü verilmiştir. Şekil 4.1.(e)’de ise nozulların katı partikül erozyon test cihazına bağlantısı için kullanılan bağlantı somununun görseli paylaşılmıştır.



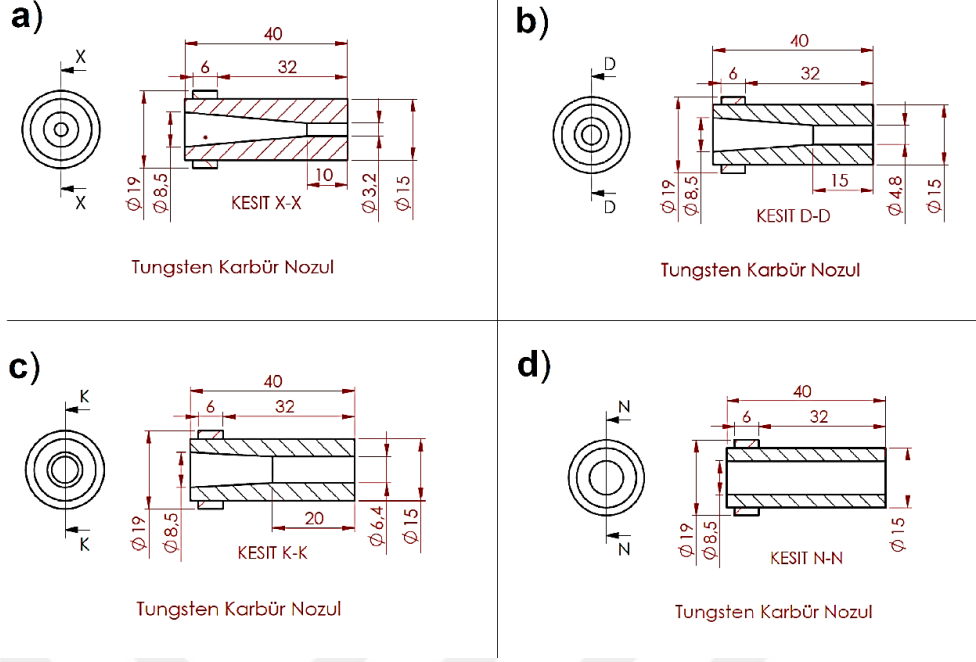
Şekil 4.1. Nozul ve bağlantı elemanı görünüşleri; a) Ø3.2 mm, b) Ø4.8 mm, c) Ø6.4 mm, d) Ø8.5 mm, e) Nozul bağlantı somunu

Üretimi tamamlanan nozulların tasarımsal detaylarını anlamlandırmak ve iç kesit görünümünü temsil edecek gösterimler, Şekil 4.2’de nozulların teknik resimleri ile birlikte sunulmuştur.

Şekil 4.2. (a), (b), (c) ve (d)’de ise sırasıyla çıkış çapları 3.2 mm, 4.8 mm, 6.4 mm ve 8.5 mm olan dört farklı nozul görselini ifade etmektedir.

Şekiller incelendiğinde nozulun başlangıç bölümü önce büyük çapta (Ø8.5 mm), daha sonra nozulun çıkışına doğru daralarak daha düşük çap seviyelerine oluşan iç kesit yapısı sağlanmıştır. Bu sayede, partiküller nozula kolay biçimde girmiş olup, daha sonra yığılma ve kendi aralarındaki etkileşimleri minimuma indirgeyen bir tasarım oluşmuştur.

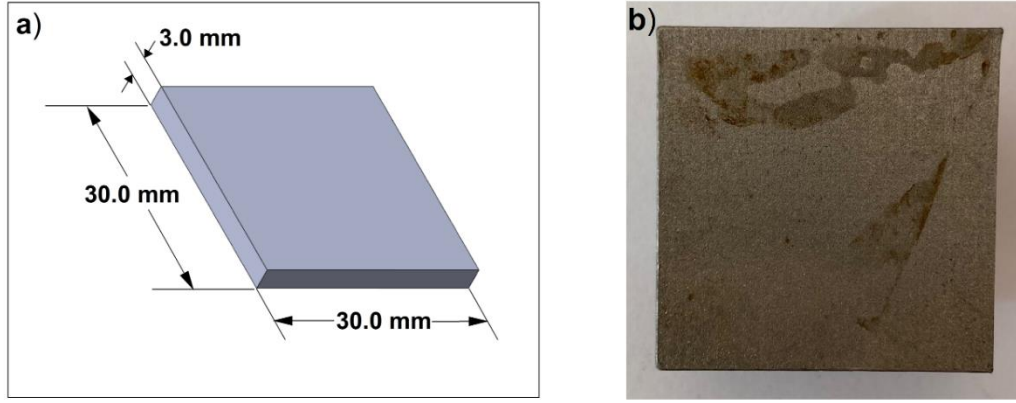
İç kesitteki konikliğin bir diğer avantajı ise partikül birikimini ve tıkanmayı azaltacak olmasıdır. Sonuç olarak nozul üretimi tamamlanmış olup, deneylerde kullanılabilecek fiziki modeller elde edilmiştir.



Şekil 4.2. Nozulların tam kesit görünüşleri; a) Ø3.2 mm, b) Ø4.8 mm, c) Ø6.4 mm, d) Ø8.5 mm

4.2. Erozyon Deney Numunelerinin Üretimi

EN 10025-2 standardında tanımlanan S355J2+N özellikteki numuneler, katı partikül erozyon aşınması için üretilmiştir. Numunelerin deney özelinde tercih edilen boyutları 30 mm × 30 mm × 3 mm olarak belirlenmiştir. Bu boyutlandırma, hem test cihazının numune tutucu sistemine uygunluk hem de elde edilecek verilerin tekrarlanabilirliği açısından tercih edilmiştir. Numune kalınlığının 3 mm olarak seçilmesinin temel nedeni, bu kalınlık değerinin erozyon etkisinin yalnızca yüzey tabakasında sınırlı kalmasını ve malzemenin derin bölgelerine mekanik bir deformasyonun iletilmemesini sağlamasıdır. Böylece, yüzeysel aşınmanın etkileri net biçimde gözlemlenebilmekte ve test sonuçları yüzey erozyon mekanizmasını yansıtacak şekilde değerlendirilebilmektedir. Ayrıca bu kalınlık, numunelerin her iki yüzeyinin de deneysel çalışmalarda kullanılabilmesine olanak tanımakta, bu sayede aynı numune üzerinde iki farklı test yüzeyi elde edilerek malzeme kullanımında ekonomik ve verimli bir yaklaşım sağlanmaktadır. Numuneler, belirlenen ölçülere uygun biçimde sac levha malzemeden kesilerek üretilmiş olup, kesim işlemleri yüzey bütünlüğünü bozmayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılacak numune görseli ve 3D CAD görünümü Şekil 4.3'te sunulmaktadır.



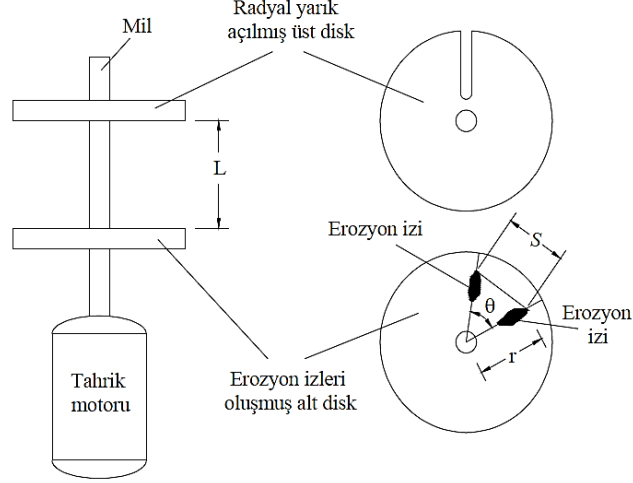
Şekil 4.3. Erozyon numunesi 3D CAD ve ön görünüşü; a) 3D CAD, b) Ön görünüş

4.3. Partikül Hız Ölçümü

Partikül hızlarının deneysel olarak belirlenmesinde literatürde PIV (Particle Image Velocimetry) ve LDA (Laser Doppler Anemometry) gibi görüntüleme ve lazer tabanlı ölçüm teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemlerin kurulum maliyetlerinin yüksek olması, hassas hizalama gerektirmeleri ve özellikle yoğun partikül ortamlarında ölçüm belirsizliklerinin artması gibi dezavantajları bulunmaktadır. Bu nedenlerle, söz konusu sensörlere dayalı bir deneysel ölçüm yaklaşımı bu çalışmada tercih edilmemiştir. Optik tabanlı bu yöntemlere alternatif olarak, katı partikül hızlarının belirlenmesinde literatürde sıklıkla başvuru ve mekanik temelli bir ölçüm yaklaşımı sunan çift disk yöntemi kullanılmaktadır (Hagbin ve diğ., 2019).

Çift disk yöntemi, Şekil 4.5'te şematik olarak gösterildiği üzere, aynı eksen üzerinde yerleştirilmiş iki adet diskten oluşmaktadır. Üst disk üzerinde belirli bir geometrik açıklık (yarık) bulunurken, alt disk düz bir yüzeye sahiptir. Her iki disk de ortak bir şaft aracılığıyla tahrik motoruna bağlanmıştır. Deneysel uygulamanın ilk aşamasında, diskler durgun konumdayken nozuldan püskürtülen partiküller üst disk üzerindeki yarıktan geçerek alt disk üzerinde bir erozyon izi oluşturmaktadır. Bu iz, referans konum olarak değerlendirilmektedir. Ardından tahrik motoru, önceden belirlenen bir açısal hızda (ω) çalıştırılarak disklerin senkron şekilde dönmesi sağlanmakta ve partikül püskürtme işlemi tekrar edilmektedir. Bu durumda alt disk üzerinde ikinci bir erozyon izi meydana gelmekte ve böylece iki farklı iz elde edilmektedir. Deney sürecinin tamamlanmasının ardından, diskler arasındaki mesafe (L), erozyon izlerinin yarıçapı (r), iki iz arasındaki doğrusal mesafe (S) ve disklerin açısal

dönme hızı kullanılarak teorik bir zaman–mesafe modeli oluşturulmaktadır. Bu model yardımıyla, partiküllerin diskler arasındaki geçiş süresi hesaplanmakta ve buna bağlı olarak partikül çarpma hızları belirlenmektedir. Bu yaklaşım sayesinde, nozul geometrisinin ve deney parametrelerinin partikül hızları üzerindeki etkisi deneysel olarak güvenilir bir şekilde ortaya konulabilmektedir.



Şekil 4.5. Çift disk yöntemi temsili görünümü (Bağcı, 2010)

İki erozyon izi de oluşturulduktan sonra, izler arasındaki mesafe (S) kumpas yardımıyla ölçülerek, partikül hızı ile izler arasındaki bağıntı türetilir. Çift disk yöntemine göre türetilen bağıntı Denklem (4.4)’de verilmiştir.

$$v = \left[\frac{2 * \pi * n}{60} \right] * \left[\frac{L}{S} \right] * r \quad (4.4)$$

Denklemden v ile gösterilen parametre partiküllerin hızını temsil etmektedir. Bu tez çalışmasında farklı nozul tasarımları ile çift disk metodu uygulanarak karşılaştırma yöntemine dayalı partikül hız tercihi yapılmış olup, nozul tasarımının partikül çarpma hızına ve dolayısıyla da erozyon aşınmasına etkisi anlaşılmıştır. Hız ölçümü için çift disk metodundaki parametreler Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Çift disk yöntemine ait genel ölçüm parametreleri.

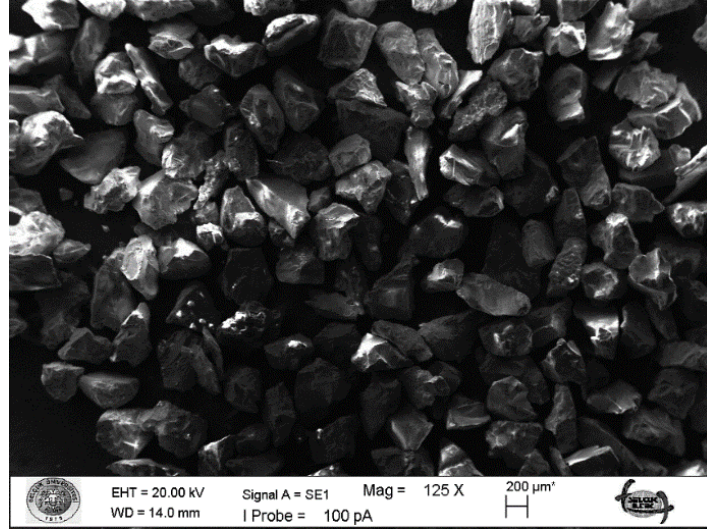
Nozul Çapı (mm)	Diskler Arası Mesafe (L) (m)	Motor Dönüş Hızı (n)
Ø 3,2	0,02	20.000 d/dk
Ø 4,8		
Ø 6,4		
Ø 8,5		

4.4. Aşındırıcı Katı Partiküller

Katı partikül erozyon aşınmasında, aşındırıcı olarak kullanılan partiküllerin malzeme türü, sertliği, boyutu, şekli ve yoğunluğu, yüzeyde meydana gelen hasarın mekanizmasını ve şiddetini doğrudan etkilemektedir. Özellikle partikül sertliği ile hedef malzemenin sertliği arasındaki fark, malzeme kaldırma mekanizmasının baskın karakterini belirleyen temel unsurlardan biridir. Bunun yanı sıra partikül boyutu ve geometrisi, yüzeye aktarılan kinetik enerji ve temas alanını değiştirerek erozyon oranı üzerinde önemli rol oynamaktadır. Köşeli ve düzensiz geometrili partiküller genellikle daha yüksek kesme ve oyma etkisi oluşturarak, yuvarlak partiküllere kıyasla daha şiddetli erozyon hasarına neden olmaktadır (Oka ve diğ., 1993).

Bu tez çalışmasında aşındırıcı katı partikül malzemesi olarak alüminyum oksit (Al_2O_3) kullanılmıştır. Alüminyum oksit, yüksek sertliği, kimyasal kararlılığı ve yaygın endüstriyel kullanımı nedeniyle katı partikül erozyon deneylerinde sıklıkla tercih edilen bir aşındırıcıdır.

Literatürde Al_2O_3 partiküllerinin sertliği mohs sertlik skalasında yaklaşık 9 olarak verilmekte olup, bu değer birçok mühendislik malzemesinden önemli ölçüde daha yüksektir. Vickers sertliği cinsinden değerlendirildiğinde ise alüminyum oksidin sertliğinin yaklaşık 1800–2200 HV aralığında olduğu bildirilmektedir. Bu yüksek sertlik seviyesi, Al_2O_3 partiküllerinin erozyon deneylerinde etkili bir aşındırıcı olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Deneylerde kullanılan alüminyum oksit partiküllerinin boyut aralığı 300–425 μm olarak seçilmiştir. Bu boyut aralığı, partiküllerin taşıyıcı gaz akışı içerisinde kararlı bir şekilde taşınabilmesini ve nozul çıkışında anlamlı hızlara ulaşabilmesini sağlamaktadır. Kullanılan Al_2O_3 partiküllerinin genel olarak köşeli ve düzensiz geometrik yapıya sahip olması, yüzey üzerinde kesilme ve oyulma mekanizmalarının baskın olmasına katkı sağlamaktadır. Bu özellikler sayesinde, nozul geometrisinin partikül çarpma hızı ve buna bağlı erozyon aşınması üzerindeki etkileri deneysel olarak daha net bir şekilde değerlendirilebilmektedir. Şekil 4.6’da erozyon aşınması deneylerinde kullanılan aşındırıcı partiküllerin 125 kat büyütme altındaki görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.6. Aşındırıcı alüminyum oksit partiküllerin SEM görüntüsü

4.5. Erozyon Deney Parametreleri

Ağır vasıta araç kasa ve şase bölümlerinde tercihe edilen S355J2+N malzemelerin uğradıkları erozyon aşınmasının tespiti için deney parametreleri belirlenmiştir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen katı partikül erozyon deneyleri, nozul geometrisinin partikül çarpma hızı ve erozyon aşınması üzerindeki etkilerini ortaya koyabilecek şekilde belirlenen deney parametreleri altında yürütülmüştür. Deneylerde kullanılan parametreler; aşındırıcı partikül özellikleri, taşıyıcı akışkan koşulları ve nozul geometrileri gibi temel değişkenleri kapsamaktadır. Çalışma boyunca tüm parametreler kontrollü tutulmuş, yalnızca incelenen değişkenler sistematik olarak değiştirilerek elde edilen sonuçların karşılaştırılabilirliği sağlanmıştır. Deneylerde kullanılan tüm parametreler Çizelge 4.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.2. Katı partikül erozyon aşınması deney parametreleri

Hedef Malzeme	Partikül Malzemesi	Nozul Çapı (Ø)-(mm)	Partikül Çarpma Hızı (m/s)	Partikül Çarpma Açısı (°)	Deney Sıcaklığı (°C)
St37	Al ₂ O ₃	3,2	Çift disk yöntemiyle tespit edilmiştir.	30	Oda Sıcaklığı (22)
		4,8		60	
		6,4		90	
		8,5			

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Söz konusu katı partikül erozyon aşınma mekanizması, ağır vasıta araçlar içerisinde özellikle treyler ve dorse vasıtaların şase ve yük taşıma bölgelerinde ciddi problemlere yol açmaktadır. Bu aşınma türü, araçların çalışma koşullarına bağlı olarak, özellikle toprak yollar, inşaat alanları ve madencilik bölgelerinde yoğun olarak görülür. Ayrıca yük taşımak içinde tercih edilen bu araçlara, ince taneli yük (kum, taş, moloz vb.) yükleme esnasında erozyon aşınmasını ortaya çıkarmaktadır. Araç hareket halindeyken, yüksek hızda hareket eden ve taşınan partiküller, araç yüzeylerinde mekanik gerilmelere ve mikro çatlaklara neden olur, bu da malzeme yorgunluğunu hızlandırır ve parçaların ömrünü kısaltır. Erozyon sonucunda meydana gelen yüzey bozulmaları, araçların performansını düşürür, güvenliği tehlikeye atar ve bakım maliyetlerini artırır.

Bu sebeple yürütülen tez çalışmasında hedeflenen iki farklı ana konu bulunmaktadır. Bu konulardan ilki, nozul tasarımındaki farklılaşmalar ile otomotiv sektöründe ortaya çıkan erozyon aşınmasının nasıl değiştiğinin ölçülmesidir. Bir diğer konu ise yeni ve daha stabil erozyon deneylerinin yürütülebilmesini sağlayacak güncellenmiş erozyon aşınma test cihazı geliştirilmesi olup erozyon davranışı içinde nozul üretimi, numune tedariki ve bu işlemlerle bağlantılı birden fazla alt parametre uygulama süreçleri yürütülmüştür.

5.1. Deney Seti Güncelleme Faaliyetleri

Bu tez çalışması kapsamında, katı partikül erozyon aşınmasının deneysel olarak incelenmesine yönelik ASTM G76 standart uyumluluğu özelinde erozyon test cihazı kullanımı önceliklendirilmiştir. Ayrıca bazı revizyonlar paralelinde mekanik, elektronik ve kontrol altyapısı güncelleme çalışmaları sayesinde, mevcut benzer sistemlere kıyasla testlerin daha yüksek hassasiyet ve tekrarlanabilirlik sunması anlaşılmıştır.

Geliştirilen test cihazı, numunelerin sabit olarak konumlandırılmasına olanak tanıyan yeteneği ve deney parametrelerinin değiştirilebilmesi sayesinde alternatif seçenekler için kontrol edildiği kontrol yapısı ile öne çıkmaktadır. Bu yapı sayesinde, deneyler sırasında basınç ve debi gibi kritik parametreler deney süresince kararlı biçimde tutulabilmekte ve ölçüm belirsizlikleri azaltılarak elde edilen sonuçların güvenilirliği önemli ölçüde artırılmıştır.

Ayrıca geliştirilen sistem; farklı deney koşullarının kontrollü biçimde uygulanmasına imkân tanıyarak, katı partikül erozyon davranışının farklı senaryolar altında değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu özellikler, cihazın yalnızca belirli bir deney setine özgü değil, farklı malzeme grupları ve test parametreleri için de kullanılabilir esnek bir yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

Bu test cihazı, yalnızca bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneyleri desteklemekle kalmamış, aynı zamanda ülkemizde sınırlı sayıda bulunan ve temini yüksek maliyet gerektiren uluslararası standartlara uygun erozyon test sistemlerine yerli ve erişilebilir bir alternatif oluşturmuştur. Bu yönüyle geliştirilen sistem hem akademik araştırmalar hem de endüstriyel uygulamalar için sürdürülebilir bir test altyapısı sunmaktadır.

Bunlara ek olarak ASTM G76 standardı kapsamında erozyon deneylerinin gerçekleştirilebilmesine olanak sağlanmakla birlikte geliştirilme sürecine dahil edilen test cihazının genel iskelet görünümüne ait detaylar Şekil 5.1’de verilmiştir.



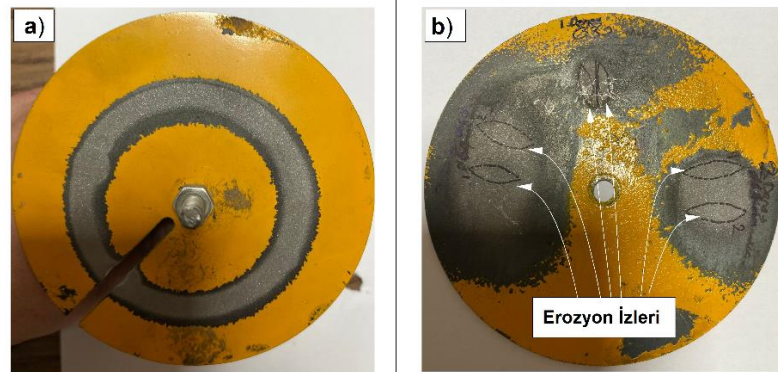
Şekil 5.1. Geliştirme işlemleri uygulanan test cihazının ana şase görseli.

Deney setinin yetenekleri özelinde;

- ❖ Kompresör 8 bar basınçtaki havayı bir tanka basmaya başlamaktadır (Tank Hacmi: 1000 litre)
- ❖ Tank dolduktan sonra, elde edilen basınçlı hava erozyon test cihazına yönlendirilmektedir (8 bar basıncı emniyetli olarak iletebilecek, hortum ve borular yardımıyla iletim yapılır).
- ❖ Cihazın içerisine giren hava, yine cihaz içerisindeki pnömatik hortumlar vasıtasıyla bir nozula yönlendirilmektedir.
- ❖ Nozul açıldığında 8 bar seviyesinde olan hava maksimum 4 bar olacak şekilde püskürmektedir (Burada ayarlı vanaların kullanılması sayesinde 4 bardan daha düşük seviyelere ayarlama imkânı mevcuttur).
- ❖ Hava püskürmeye başlarken, toz partiküllerin bulunduğu hazneden hava akışına besleme yapılarak püsküren hava içerisinde katı partiküller bulunmaktadır.
- ❖ Katı partiküllü hava akışının karşısına numuneler bağlanarak (Dikdörtgensel plaka biçimli numuneler), püsküren hava numuneye püskürtülmüş olur ve bu sayede katı partikül erozyon deneyleri yapılabilir.

5.2. Partikül Hız Ölçüm Sonuçları

Çift disk yönteminin uygulanması için parametrelerin belirlenmesinde ilk olarak motor dönüş hızının belirlenmesinde bir adet kesici taş zımpara (vız vız) kullanılmış olup, dönüş hızı Fluke marka takometre kullanılarak tespit edilmiştir. Alt disk ve üst disk arası mesafe 20 mm olarak ayarlanarak deneysel sürece geçilmiştir. Deneysel süreç sonucunda Şekil 5.2’da ki erozyon izleri elde edilmiştir. Şekil 5.2. (a) da gösterilen üst diskte sürekli bir iz oluşurken, Şekil 5.2. (b)’deki alt diskte iki ayrı erozyon izi oluşmuştur.



Şekil 5.2. Çift disk deneyleri ile oluşan erozyon izlerinin görünümü; a) Üst disk, b) Alt Disk

Deneyler sonucunda Denklem (4.4)'ün hesaplanabilmesi için erozyon izleri arası mesafe (S) ve iz yarıçapları (r) ölçülmüştür. Erozyon izleri arası mesafenin ölçümünde oluşan izin en üst konumu ile en alt konumunun ortalaması alınmış ve aradaki mesafe bu şekilde ölçülmüştür. Ölçülen S ve r değerleri ve bunlara bağlı hesaplanan partikül çarpma hızı değerleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Partikül çarpma hızı değerleri

Nozul Çapı (Ø-mm)	Erozyon İzleri Arası Mesafe (S-m)	Erozyon İzi Yarıçapı (r-m)	Partikül Çarpma Hızı (m.s ⁻¹)
3.2	0.00531	0.03033	239.25
4.8	0.1191	0.03211	112.93
6.4	0.1258	0.03180	105.88
8.5	0.03268	0.02773	35.54

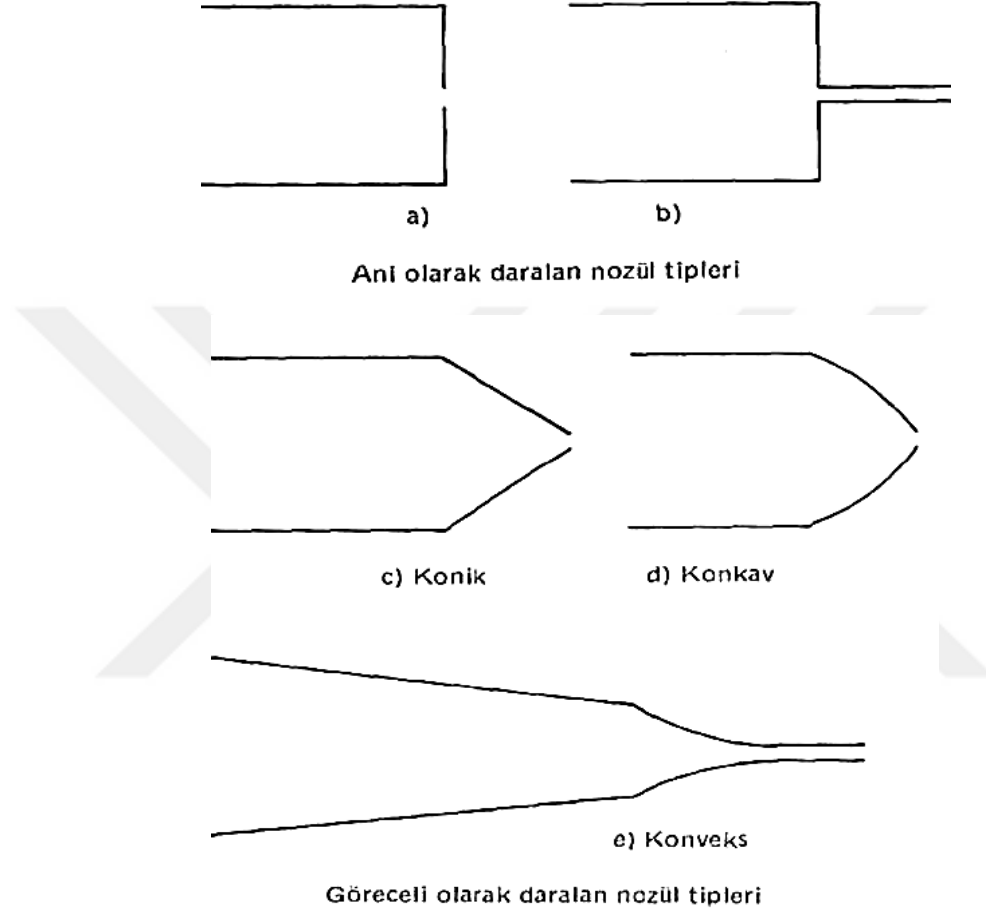
Ortaya çıkan sonuçlar incelendiğinde nozul çapındaki değişim çarpma hızı seviyesini oldukça değiştirmekte ve ayrıca hız seviyelerinin daha önceki erozyon cihazlarına kıyasla artış gösterdiği anlaşılmıştır. Çift disk yönteminin kendi içinde %5-%8 arasında sapma gösterdiği bilinmesiyle birlikte bu sonuçlar kesin ve nihai sonuçlar olmayıp yaklaşık veriler olarak kaydedilmiştir.

5.3. Nozul Tasarımının Yüksek Hızlı Partikül ve Hava Püskürtmesine Etkisi

Nozul geometrisi tasarımı, bir akışkanın hızını etkileyen kritik bir faktördür. Nozul, akışkanın hızını artırmak veya azaltmak için özel olarak şekillendirilmiş bir bileşendir. Nozulun yakınsama bölgesinde, akışkanın çapı daralır. Bu daralma, akışkanın hızının artmasına neden olur. Bernoulli prensibine göre, akışkanın hızı, çapın daraldığı bölgelerde artar. Bu, akışkanın potansiyel enerjisinin kinetik enerjiye dönüşmesini sağlar. Yakınsama bölgesinden sonra, nozul genişler (çarpışma bölgesi). Bu bölgede, akışkanın hızında bir değişiklik gözlemlenir. Eğer akışkan süpersonik hızlara ulaşmışsa, genişleme bölgesi hızı azaltmak yerine genellikle sabitler veya az bir artış sağlar. Bu, akışkanın yüksek hızda genişlemesiyle ilişkilidir. Bu aşamaya kadar olan durumda akışkan nozul içerisinde, lüle ve difüzör etkisine maruz kalmaktadır. Bunların yanı sıra akışkanın, nozul geometrisinden kaynaklı olarak, hız ifade etmede kullanılan Mach sayısı da değişkenlik gösterebilir.

Nozul geometrisinin değişimlerine ait görseller Şekil 5.3.'de verilerek karşılaştırma bilgisi yanında akışkanın hızıyla birlikte akışkanın enerjisini ve basıncını etkileyeceği sonuç aşikardır. Yakınsama bölgesinde basınç düşerken, hız artar. Çarpışma

bölgesinde ise, basınç yükselir ve hız değişebilir. Bu değişiklikler, nozulun tasarımına göre farklılık gösterebilir. Tez çalışması faaliyetleri içerisinde farklı nozul geometrilerinin akışkanın hızına ve basıncına olan etkisi katı partikül erozyon test cihazında deneysel olarak çalışılmış olup test çıktılarına yönelik elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tutarlılık sağlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 5.3. Nozul türleri; Ani olarak daralan: a) Borusuz, b) Borulu, Göreceli olarak daralan: c) Konik, d) Konkav, e) Konveks

5.3. Erozyon Aşınması Sonuçları

Katı partikül erozyon aşınması deney faaliyetleri gerçekleştirilmeden önce deneylerde kullanılacak aşındırıcı partikül miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Jet erozyonuna veya diğer bilindik adıyla katı partikül erozyon aşınmasına etki eden parametrelerden biri de aşındırıcı miktarıdır.

Çizelge 4.2’de yer alan deney parametreleri kullanılarak ön aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ön aşınma deneylerinde 500 gr ve 1000 gr aşındırıcı alüminyum oksit

partiküller tercih edilmiştir. İki farklı miktarda aşındırıcı kullanımıyla ağırlık kayıpları ölçülmüş ve daha sonrasında oluşan farklılığa göre nihai deney faaliyetlerine geçilmiştir.

Çizelge 5.2’de 90° çarpma açısında 500 gr. ve 1000 gr. aşındırıcı kullanımı ile gerçekleştirilen ön aşınma deneyleri incelendiğinde, partikül miktarının iki katına çıkarılmasıyla ağırlık kayıplarında iki katı bir artış oluşmamıştır.

Ø3,2’lik nozul kullanılan deneyde 500 gr. Al₂O₃ kullanımı ile 4,4 mg ağırlık kaybı ölçülürken, aşındırıcı miktarı 1000 gr. tutulduğunda ~%10 seviyesinde bir artış oluşmuştur. Ø4,8 mm nozul çapına geçildiğinde 500 gr. aşındırıcı kullanımında 3,2 mg ağırlık kaybı ölçülürken, 1000 gr seviyesine çıkıldığında ise ~%34,3 seviyesinde bir artış oluşmuştur. Son olarak Ø6,4’lük nozul tercih edildiğinde 500 gram için ağırlık kaybı 1,8 mg olarak tespit edilmişken, 1000 gr’a çıkıldığında bu miktar ~%16,6 seviyesinde artmıştır.

Deneylerin her birinde çarpma açısı sabit tutulmuş ve nozul çapı ile partikül miktarı değiştirilmiştir. Nozul çıkış çapındaki değişimin etkisiyle partikül çarpma hızlarının değiştiği belirlenmiştir. 3 farklı nozul çapında, sabit çarpma açısında (90°) ve 500 gr. partikül kullanımlı deney sonuçları incelendiğinde, en fazla aşınma 4,4 mg ile Ø3,2 nozul çapında oluşmuştur. Nozul çapı arttıkça da sırasıyla bu aşınma miktarı ~%27 ve ~%59 oranında düşüş göstermiştir. Buradan yola çıkarak nozul çapında değişimin doğrudan partikül çarpma hızına etki ettiği kanıtlanmış ve aşınma farklılığı oluşturduğu anlaşılmıştır.

Ön aşınma deneyleri sonuçlarının ortaya çıkardığı bir diğer durumda, partikül miktarının artırılması direkt olarak lineer biçimde sonuçlara etki etmemekte, partikül miktarı lineer artırılsa bile sonuçları non lineer biçimde değiştiğini göstermiştir. Ayrıca fazla partikül kullanımının, numuneler erozyon doygunluğuna ulaştıktan sonra bir etki yaratmadığı sonucunu da ortaya çıkarmıştır. Ön aşınma deneyleri neticesinde nozul çapının değişikliği aşınma miktarlarında farklılıklar ortaya çıkardığı için bu tez çalışmasının araştırdığı konunun önemini uygulamalı biçimde göstermiştir. Ayrıca belirli bir erozyon doygunluğu ile ilgili kavramı da düşündürmektedir.

Çizelge 5.2. Ön aşınma deneyleri sonuçları

Çarpma Açısı (°)	Nozul Çapı (Ø-mm)	Aşındırıcı Mik. Bağlı Ağırlık Kaybı (mg)	
		500 gr.	1000 gr.
90	3.2	4.4	4.8
	4.8	3.2	4.1
	6.4	1.8	2.1

Ön aşınma deney faaliyetleri neticesinde, 500 gr ve 1000 gr partikül kullanımı ile temel ve nihai erozyon deneylerinin yürütülmesi gerekliliğine sonucunda varılmıştır. Bu aşamada hem katı partikül erozyon yüzey hasarındaki farklılıklar ölçülecek hem de aşırı partikül kullanımı ile ilgili gereklilik sorgulanmış olacaktır.

İlk olarak 500 gr. Al_2O_3 aşındırıcı partiküller kullanılarak ve 30° , 60° ve 90° partikül çarpma açısında gerçekleştirilen deney sonuçları Şekil 5.4’de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde ortaya çıkan ilk bulgu, sünek malzemeler için düşük çarpma açılarında ($<30^\circ$) erozyon miktarının yüksekliği ve daha sonrasında çarpma açısı arttıkça erozyon oranının düştüğü olgusudur. Her bir nozul çapı için 30° çarpma açısında ağırlık kayıpları $\sim 9-14$ mg seviyesinde ölçülmüşken, çarpma açısı 60° ’ye getirildiğinde bu değerler $\sim 5-7$ mg’a ve son olarak ise 90° çarpma açısında $\sim 2-5$ mg seviyesine düşmüştür. Ortaya çıkan bu durum literatürle uyumludur (Aydin ve diğ., 2025).

Nozul çapındaki farklılığa bağlı olarak 30° çarpma açısında gelişen sonuçlar incelendiğinde ise en düşük nozul çapında ($\varnothing 3.2$) ağırlık kaybı ~ 12 mg seviyesinde ölçülmüşken, nozul çapı $\varnothing 4,8$ mm’ye getirildiğinde ağırlık kaybı ~ 9 mg seviyesinde kaydedilmiştir. Aralarında yaklaşık %25 farklılık vardır. Sonuç üzerinden yine değerlendirilmeler yapıldığında, nozul çapının küçük tutulması partikül çarpma hızını $\varnothing 4,8$ mm’ye göre %25 seviyesinde artırmakta ve dolayısıyla erozyon hasarı artmaktadır. $\varnothing 6,4$ mm’lik nozul çapındaki deney sonucunu incelendiğinde ise ağırlık kaybı $\sim 12,2$ mg seviyesinde oluşmuştur. $\varnothing 3,2$ mm nozul kullanımındaki oluşan sonuca kıyasla neredeyse aynı miktarda bir ağırlık kaybının tespit edilmesi, nozul çapındaki değişimin hedef malzeme yüzeyindeki etkilenen bölge ile ilişkilendirilmiştir. Nozul çapının düşük tutulması ile partikül çarpma hızları artmakta fakat hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge seviyesi küçüldüğü için de ağırlık kaybı sınırlanmaktadır. Nozul çapı yaklaşık 2 katına çıktığında partikül çarpma hızı düşmüş fakat etkilenen yüzey alanı arttığı içinde birbirine çok yakın aşınma miktarı oluşmuştur. $\varnothing 8,5$ mm’lik nozula geçildiğinde ise $\varnothing 3,2$ mm’lik nozula kıyasla $\sim 16,6$ seviyesinde bir artışla ~ 14 mg seviyesinde daha fazla ağırlık kaybı ölçülmüştür. Oluşan durumda partikül çarpma hızları düştüğü belirgindir ancak hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge alanı arttığı için aşınma miktarı artmıştır. Bu durumda 30° çarpma açısı verilerinden yola çıkarak, katı partikül erozyon aşınmasına etki eden parametrelerden partikül çarpma hızı ve yüzeyde etkilenen alan arasında, etkilenen alan aşınma miktarında belirleyicilik oranı yüksektir.

Partikül çarpma açısı 60° seviyesine getirildiğinde her bir nozul çapı için aşınma miktarları düşmüştür. Oluşan düşüş oranları $\varnothing 3.2$, $\varnothing 4.8$, $\varnothing 6.4$ ve $\varnothing 8.5$ mm’lik nozul

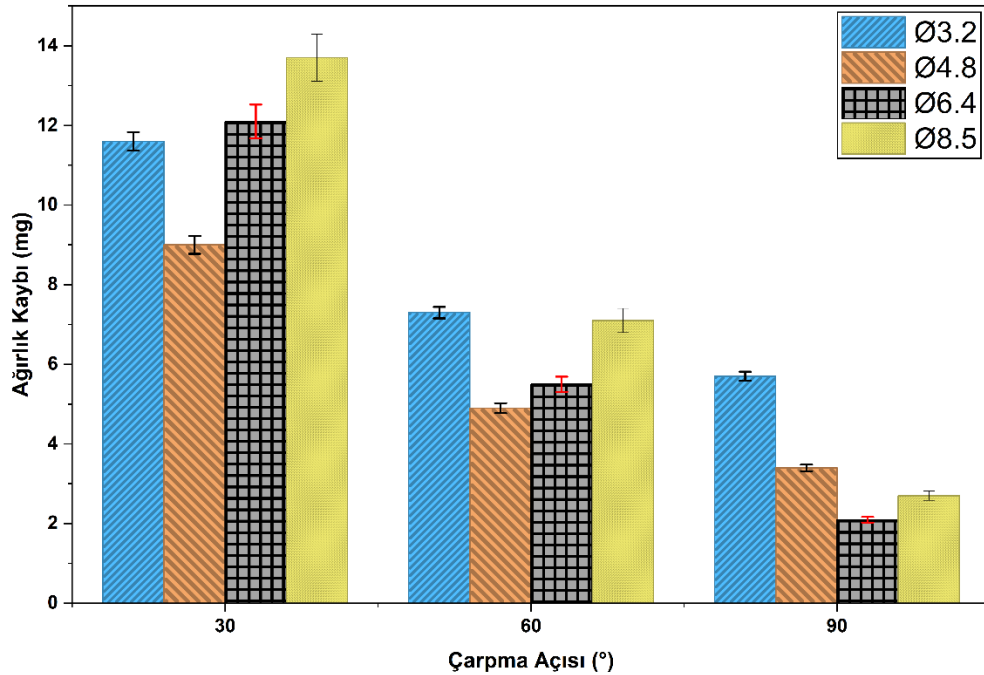
Çapları için sırasıyla yaklaşık olarak %33.3, %44.4, %50 ve %52 seviyesinde gerçekleşmiştir. Nozul çapındaki farklılık dikkate alındığında ise Ø3.2 mm nozul çapında ~7,5 mg seviyesinde bir ağırlık kaybı oluşurken, Ø4.8'lik nozulda ~5 mg seviyesinde bir ağırlık kaybı oluşmuştur. Oluşan eğilim 30° çarpma açısıyla benzerdir. Düşük nozul çapında (Ø3.2 mm) partikül çarpma hızının yüksekliği ve etkilenen bölgenin azlığı, Ø4.8 mm için farklılaşmıştır. Nozul apı arttığında ağırlık kaybına etki eden iki parametre için (Partikül arpma hızı ve hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge) belirli bir artışa kadar çarpma hızı baskınken, belirli bir değerin üstüne çıkıldığında etkilenen bölge parametresi erozyon oranında söz sahibi olduğu anlaşılabilir. Tespit edilen bu bulgu 30° ve 60° çarpma açısından belirlenmiştir. Her iki çarpma açısında da aynı eğilim oluşmuş ve bu çıkarım desteklenmektedir. Ancak 60° arpma açısındaki bir farklılık ele alınırsa, çarpma açısı yükseldikçe etkilenen bölge parametresi etkisini yitirmekte ve çarpma hızı parametresi ise durumunu korumaktadır. 60° çarpma açısında Ø3.2 mm de ölçülen ~7,5 mg ağırlık kaybına karşın, Ø6.4 mm nozulda ~5,8 mg ve Ø8.5'luk nozulda ~7,5 mg seviyesinde ağırlık kaybı ölçülmüştür. 30° çarpma açısında nozul çapı yükseldikçe çarpma hızı azalmakta ve etkilenen bölgedeki artışa kıyasla, aynı durum 60° çarpma açısı içinde geçerlidir. Ancak 60° arpma açısında yine aynı eğilim oluşmakla beraber düşün nozul çapında daha fazla aşınma oluştuğunu göstermiştir.

Son olarak 500 gr. partikül kullanımlı deneylerdeki 90° çarpma açısındaki deney sonuçları ele alındığında yine çarpma açısındaki artışa bağlı olarak ağırlık kayıpları her bir nozul için azalmıştır. Nozulların kendi aralarındaki farklılığa bağlı olarak, Ø3.2 mm nozul çıkışında ~6 mg ağırlık kaybı ölçülürken, Ø4.8 mm nozulda bu değ er ~3,5 mg olarak oluşmuştur. Nozul apı arttıkça partikül çarpma hızının ve etkilenen bölge alanının belirli seviyede değ işmesi sadece Ø3.2 ve Ø4.8 nozul incelenerek; nozul çapı arttıkça partikül çarpma hızı etkisini yitirmekte etkilenen bölge miktarı artmaktadır. ap değ eri düşük miktarda arttığında çarpma hızı, etkilenen bölgeye kıyasla daha baskın biçimde erozyon üzerinde söz sahibi olmaktadır. Ancak yapılan bu çıkarımlara ek olarak çarpma açısının değ işimi bu iki parametrenin etkisini de değ iş tirmektedir. Nozul apı Ø3.2 mm seviyesinden Ø6.4 mm seviyesine getirildiğinde 30° çarpma açısında neredeyse aynı miktarda bir aşınma oluşmuş (~12 mg), 60° çarpma açısında Ø3.2 mm daha fazla aşınmış (~2 mg), 90° çarpma açısında da yine Ø3.2'lik nozul daha fazla erozyon etkisi oluşturmuştur. Burada söz konusu aşınma farklılığı, nozul çapı değ işiminin partikül çarpma hızını ve hedef malzeme yüzeyindeki etkilenen alanı değ iş tirdiği hipotezi öne

atılmıştır. Düşük çarpma açılarında ($<30^\circ$) ve düşük nozul çaplarında ($\varnothing 3.2$) erozyon hasarında etkilenen bölge ve çarpma hızı parametresi için hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge parametresi, çarpma hızına göre daha baskın ancak çarpma açısı yükseldikçe çarpma hızı parametresi daha baskınlaşmıştır.

Şekil 5.4'teki $\varnothing 3.2$ mm'lik nozul ile $\varnothing 6.4$ mm ve $\varnothing 8.5$ mm nozul bunu ortaya çıkarmaktadır.

Sonuç olarak nozul çapının değiştirilmesi katı partikül erozyon aşınması parametrelerinden; partikül çarpma hızı ve hedef malzeme yüzeyindeki etkilenen bölge alanını direkt olarak etkilemektedir. Düşük nozul çaplarında çarpma hızı yüksekken, etkilenen bölge düşük; yüksek nozul çaplarında ise etkilenen bölge yüksekken, çarpma hızları düşüktür. Ayrıca bu iki parametrenin erozyon hasarındaki baskınlığı çarpma açısına göre değişmektedir. Düşük çarpma açılarında ($<30^\circ$) erozyon hasarının oluşumunda etkilenen bölge parametresi söz sahibi olurken, çarpma açısı yükseldikçe çarpma hızı parametresi belirleyici rol üstlenmektedir. Yapılan bu çıkarım 500 gr partikül kullanımlı deneylerden elde edilebilir.



Şekil 5.4. 500 gr. katı partikül kullanımı ile gerçekleştirilen deney sonuçları

Ön araştırma deneyleri sonucunda 1000 gr partikül kullanımında, ağırlık kayıplarında lineer bir artış oluşmaması sebebiyle 3 farklı partikül çarpma açısında (30° , 60° , 90°) ve 1000 gr partikül kullanılarak temel erozyon deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları Şekil 5.5'de sunulmuştur. Sonuçlar incelendiğinde, ilk olarak 30° çarpma

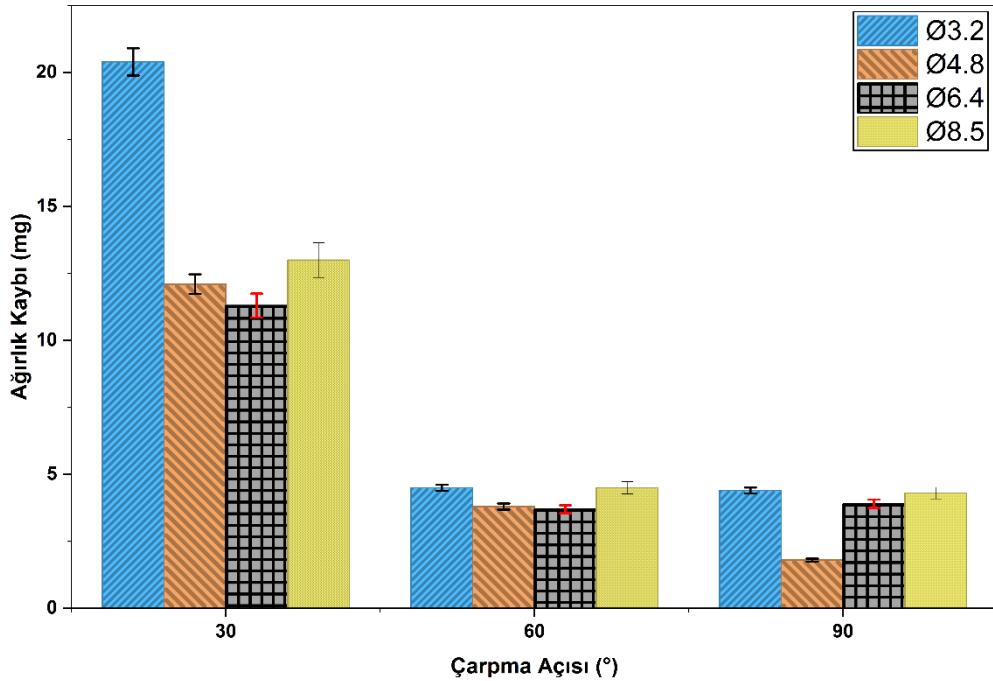
açısının verileri ele anırsa; en fazla aşınma Ø3.2 mm'lik nozul çapında elde edilmiştir. Ø 3.2 mm'de ~20 mg bir ağırlık kaybı oluşmuştur. Bu sonucun oluşmasında düşük nozul çapından kaynaklanan yüksek çarpma hızı rol üstlenmiştir. Ø4.8 mm nozula geçildiğinde çarpma hızının etkisinin düşerek etkilenen bölgenin artması beklenmektedir.

Sonuca göre Ø4.8 mm'lik nozulda ağırlık kaybı ~15 mg seviyesinde ölçülmüştür. Buradan yola çıkarak nozul çapının artması etkilenen bölgeyi artırsa da hala erozyon hasarının oluşmasında çarpma hızı belirleyici rol üstlenmektedir. Çap artışı, çarpma hızını azaltması sebebiyle de ağırlık kaybı azalmıştır. Ø6.4 mm'lik nozula geçildiğinde etkilenen bölge etkisi artacağı beklenmekle birlikte, sonuçlara göre ~13 mg ağırlık kaybı ölçülmüştür. 500 gr deneylerine kıyasla burada bir farklılık oluşmuş, nozul çapı Ø6.4 mm'de Ø3.2 mm ve Ø4.8 mm'ye göre yaklaşık %20 ve %35 daha düşük çıkmıştır. 500 gr deneylerinde bir düşüşten ziyade artış oluşması sebebiyle, 1000 gr partikül miktarına çıkıldığında erozyon hasarının oluşmasında üçüncü bir parametre etkisi ortaya çıkmıştır. Artık çarpma hızı, etkilenen bölge ve partikül miktarı birlikte değerlendirilmelidir. Partikül miktarının artışı ile birlikte etkilenen bölge parametresinin baskın oluşu, etkisini yitirmekte ve dolayısıyla da erozyon hasarının oluşmasında çarpma açısını belirleyici role getirmektedir. 500 gr ve 30° çarpma açısı deneylerinde etkilenen bölge parametresi daha baskın oluşurken, aşındırıcı miktarındaki artış durumu değiştirmiştir. Ø8.5 mm nozulda etkilenen bölgenin artışı tekrar ağırlık kaybı miktarını artırmış ve ~17 mg bir ağırlık kaybı oluşmuştur. Buradan yola çıkarak, partikül miktarının artışı etkilenen bölge alanı parametresi etkisini azaltarak, hasarın oluşmasında belirleyici rolü çarpma açısına vermiştir. 30° çarpma açısının ortaya çıkardığı bir diğer durum ise 500 gr deneylerinde Ø3.2, Ø4.8, Ø6.4 ve Ø8.5 mm çapa sahip nozullar için ağırlık kayıpları sırasıyla ve yaklaşık olarak 12 mg, 9 mg, 12.2 mg, 14 mg ölçülmüşken; 1000 gr partikül kullanımlı deneylerde sırasıyla ~20 mg, ~15 mg, ~13 mg ve ~17 mg ölçülmüştür. Partikül miktarı iki katına çıkartılmasıyla hiçbir nozul çapında hasar miktarı iki katına çıkmamış, doğrusal olmayan bir artış gerçekleştirmiştir.

Partikül çarpma açısı 60°'ye getirildiğinde, 4 farklı nozul içinde oldukça yakın ağırlık kayıpları sonuçları oluşmuştur. 500 gr deney sonuçlarından yararlanılarak, çarpma açısı yükseldikçe çarpma hızı parametresi baskın rol üstlendiği tespit edilmiştir. Ancak 1000 gr. deneylerinde nozullar arasında çok yakın bir ağırlık kaybı oluşmuştur. En fazla ağırlık kaybı ~5 mg ile Ø3.2 ve Ø8.5 mm nozulda oluşurken, Ø4.8 mm ve Ø6.4 mm'de ~4 mg ağırlık kaybı oluşmuştur. Buradan yola çıkarak çarpma hızı daha baskın hale gelerek düşük nozul çapında daha fazla aşınma oluşacağı görüşü, partikül miktarının artışı

ile değişmiştir. Çarpma açısı artmış fakat partikül miktarının artması çarpma hızı etkisini de gölgelemiştir. Ayrıca 500 gr deneylerinde gözlemlenen ağırlık kaybı sonuçları ~5-8 mg arasındayken, partikül miktarının artırılmasına rağmen ağırlık kaybı sonuçları ~4-5 mg arasında değişmiştir. Oluşan bu durumda, numunelerin çarpma açısı ve partikül miktarı arttıkça belirli bir seviyede erozyon doygunluğuna ulaştığını desteklemektedir. Bunlara ek olarak ağırlık kaybının daha düşük çıkması, 500 gr gibi bir seviyede yüzeyde yeterli bir gömülmenin oluştuğunu ve 500 gr'dan sonra bu gömülmüş bölgenin dolduğunu düşündürmektedir. Yüzey hasar görüntülerinde söz konusu görüş daha detaylı ele alınmıştır.

Son olarak 90° çarpma açısı deney sonuçları incelendiğinde, neredeyse 60° çarpma açısındaki sonuçlarla benzer sonuçlar oluşmuştur. Ø3.2 mm nozul çapında 60° çarpma açısında ~5 mg ağırlık kaybı oluşurken, 90° çarpma açısında da bu durum oluşmuştur. 500 gr. deneylerinde bir düşüş oluşurken burada neredeyse aynı ağırlık kaybı ortaya çıkmıştır. 500 gr. deneylerinde belirlenen çarpma açısı artışı, çarpma hızı parametresinin (nozul çapındaki değişime bağlı olarak gelişen çarpma hızı) etkisini artırırken; partikül miktarı artışı çarpma hızı etkisini yine gölgelendirmiş ve etkilen bölge etkisini daha baskın kılmıştır. Bu sebeple de 60° ve 90° gibi yüksek çarpma açılarında hem tüm sonuçlar birbirine yakın oluşmuş hem de iki parametre eşitlenmiş gibi bir duruma evrilmiştir.

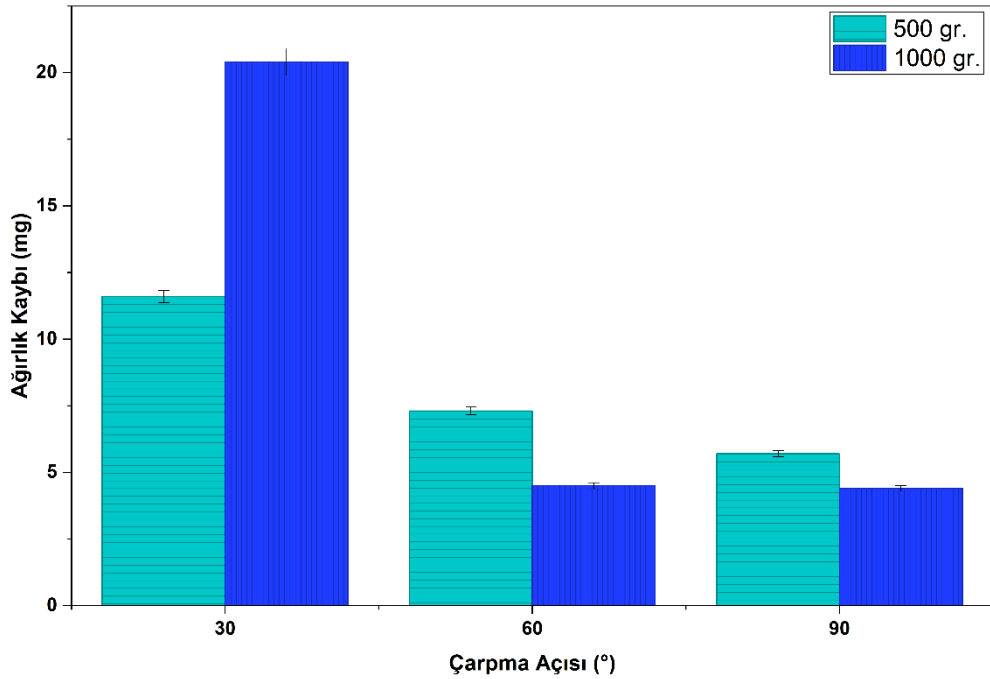


Şekil 5.5. 1000 gr. katı partikül kullanımı ile gerçekleştirilen deney sonuçları

500 gr ve 1000 gr partikül kullanımı ile elde edilen sonuçlar özetlendiğinde; nozul çapının değişimi, partikül çarpma hızını ve hedef malzeme yüzeyindeki etkilenen bölge alanını değiştirmektedir. Düşük çaplarda ($\varnothing 3.2$ mm) çarpma hızı yüksekken, etkilenen bölge alanı düşük; yüksek çaplarda ($\varnothing 8.5$ mm) çarpma hızı düşükken, etkilenen bölge alanı büyümektedir. Erozyon hasarının oluşumunda bu iki parametre söz sahibidir. Erozyona etki eden diğer bir parametre olan çarpma açısı parametresi olaya eklendiğinde, düşük çarpma açıları ($<30^\circ$), nozul çapına bağlı olarak etkilenen bölge alanı parametresi erozyon hasarında belirleyici rol üstlenirken; çarpma açısı yükseldikçe çarpma hızı parametresi etkinleşmektedir. Ancak partikül miktarı artırıldığında söz konusu durum değişmektedir. Düşük çarpma açıları (30°) etkilenen bölgenin baskınlığı gölgelenmekte, yüksek çarpma açıları ise çarpma hızının etkinliği düşmektedir. Bu sebeple sektörel anlamda özellikle ağır vasıta araçlar düşünüldüğünde düşük çarpma hızları, yüksek partikül miktarları ve etkilenen bölgeler oluştuğu göz önünde bulundurularak; partiküllerle araç etkileşimi düşük çarpma açıları oluştuğunda etkilenen bölge alanındaki aşınma miktarları azaltılabilir. Sonuçlara ek olarak tespit edilen bir diğer durum ise partikül miktarının artışı ile birlikte aşınma miktarlarında artış beklenirken, düşüşler gözlenmiştir. Söz konusu durumun doğruluğu için her bir deney 3 defa tekrar edilmiş ve 500 gr. deneyleri için yaklaşık olarak %2-%4.3 arasında bir değişim oluşmuştur. Üç tekrar durumu deney grafiklerine hata çubuğu olarak eklenmiştir. $\varnothing 3.2$ mm nozul ile gerçekleştirilen deneylerde hata payı %2 seviyesinde, $\varnothing 4.8$ mm'de hata payı %2.5, $\varnothing 6.4$ mm'lik nozulda %3.5 ve $\varnothing 8.5$ mm'lik nozulda %4.3 seviyesinde bir hata payı oluşmuştur. Bu oran, 1000 gr deneylerinde ise ~%2.5-5 arasında gözlenmiştir. Bu sebeple deneylerin güvenilirliği mühendislik hata sınırları içerisindedir. Partikül miktarında ki artışa bağlı gelişen durumun daha detaylı tespit edilebilmesi için her bir nozulun 500 ve 1000 gr'daki sonuçları bireysel olarak karşılaştırılmalıdır.

Şekil 5.6'de $\varnothing 3.2$ mm nozul çıkışı ile 500 gr. ve 1000 gr. aşındırıcı ile gerçekleştirilen deney sonuçları sunulmuştur. $\varnothing 3.2$ mm'lik nozulda etkilenen bölge alanı parametresi düşükken, partikül çarpma hızı parametresi yüksektir. İlk olarak 30° çarpma açısındaki sonuçlar incelendiğinde, 500 gr partikül kullanımında ~12 mg ağırlık kaybı oluşmuşken, 1000 gr partikül kullanımında ~20 mg ağırlık kaybı oluşmuştur. Partikül miktarının artmasıyla oluşması muhtemel ağırlık kaybı artışı 30° çarpma açısına rastlamıştır. Ancak partikül miktarı iki katına çıkartıldığında, ağırlık kaybı ~%53 seviyesinde artmıştır. Beklenti yönünden kabul edilebilir bir orandır fakat non lineer artış durumu da tespit edilmiştir. Çarpma açısı 60° seviyesine getirildiğinde ise 500 gr'da

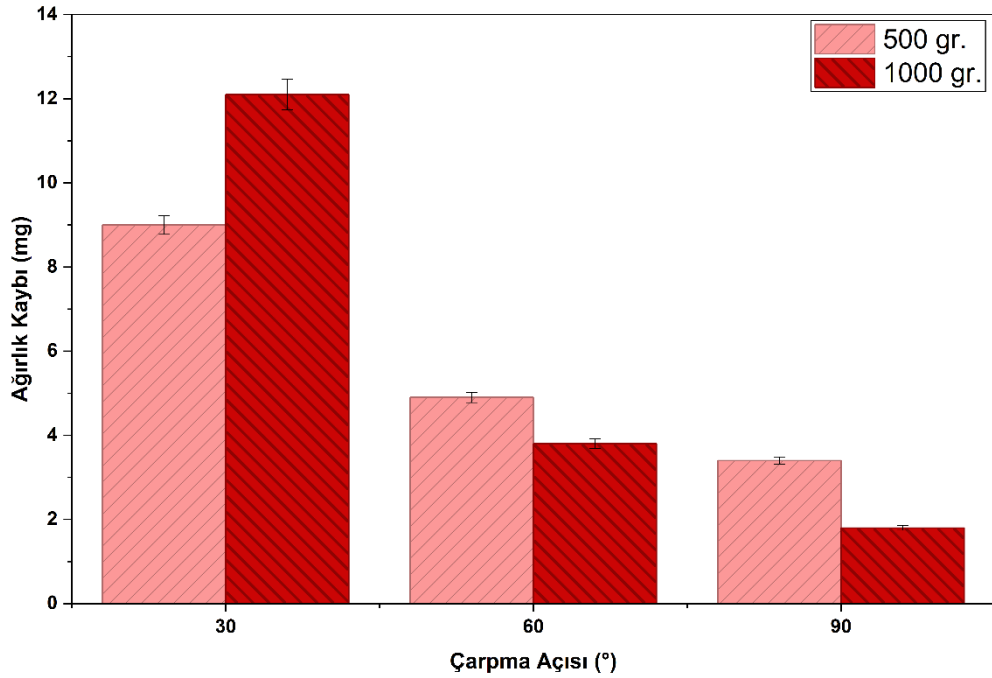
ağırlık kaybı ~ 7.5 mg ölçülürken, 1000 gr partikül kullanımında bu değer artma beklentisinin tersine düşmüş ve ~ 5 mg olarak ölçülmüştür. Buradan yola çıkarak 500 gr'da yüzeyde maksimum gömülme ve sürüklenme hasarının olduğu, 500 gr.'dan sonra ki yüzeye isabet eden partiküllerin ekstra bir hasar sunmak yerine yüzeyden bir birikime sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır. 500 gr.'da erozyon hasarı doygunluğa ulaşmış, daha fazla partikül miktarında ekstra hasar oluşmamıştır. Ağırlık kaybı ölçümleri de bu sonucu desteklemiştir. 90° çarpma açısında ise hem en düşük ağırlık kayıplarının oluşacağı hem de gömülme hasarının pik seviyeye ulaşacağı ön görülmektedir. Sonuçlara göre en düşük ağırlık kayıpları 90° 'de oluşmuştur. Ancak yine 1000 gr. aşındırıcılı deneylerde daha az aşınma gözlenmiştir. Ayrıca 1000 gr.'ın, 60° ve 90° çarpma açısındaki sonuçları neredeyse aynı oluşmuştur. Buradan yola çıkarak fazla partikül miktarının tercih edilmesi aşınmayı artıracığı görüşünün bir yanılğı oluşturduğu tespit edilmiştir. Belirli bir partikül miktarına kadar erozyon hasarı maksimuma ulaşmakta; belirli bir seviyeden sonraki partiküller yüzeye ya gömülerek ağırlık artışı oluşturmakta ya da yüzeye bir etki bırakamamaktadır.



Şekil 5.6. Nozul çapı Ø3.2 mm olan deneylerin farklı partikül miktarlarında ağırlık kaybı sonuçları

Nozul çapı Ø4.8 mm tutulduğundaki deneylerden elde edilen sonuçların kendi aralarındaki farklılıkların görülmesi için Şekil 5.7'de 500 gr ve 1000 gr. partikül kullanımlı deney sonuçları sunulmuştur. Sonuçlar değerlendirildiğinde, çarpma açısının 30° tutulduğu deneyde yine fazla partikül kullanımlı deneyde fazla ağırlık kaybı

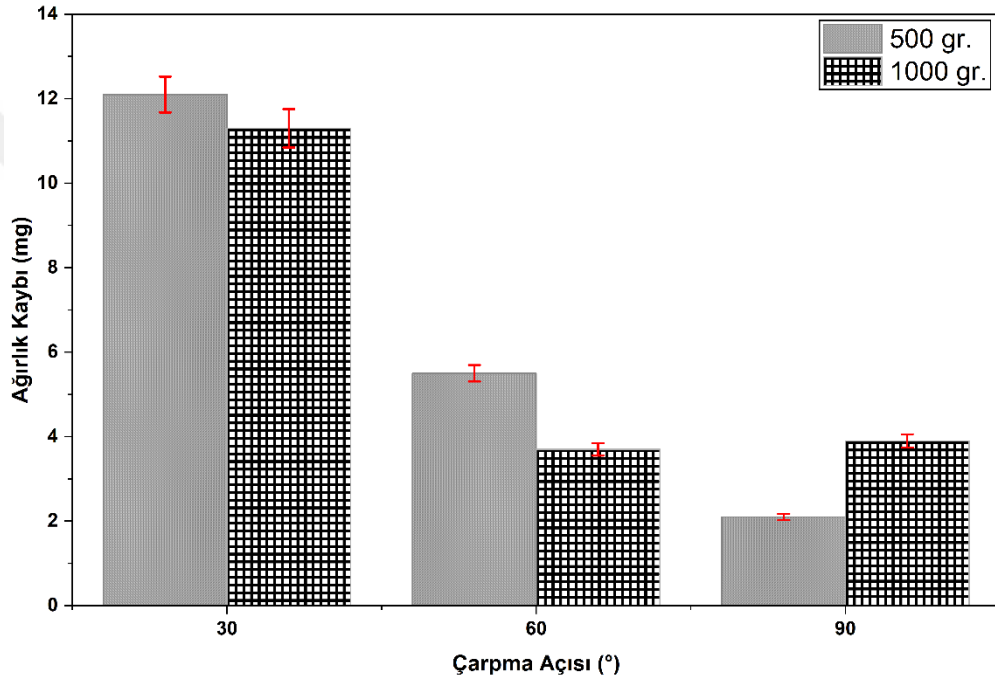
oluşturmuştur. 60° ve 90° deneyleri dikkate alındığında ise yine 1000 gr. partikül kullanımlı deneylerde daha düşük bir aşınma oluşmuştur. Buradan yola çıkarak fazla partikül kullanımının; çarpma açısı yükseldikçe ve gömülme hasarı (etkileşimin dik doğrultuya yaklaşmasıyla ortaya çıkan) belirginliğinin artmasıyla, erozyon hasarına ekstra bir etki yaratmadığı ve hatta yüzeyde oluşan gömülmüş bölümün partikülle dolarak ağırlık kazanımı oluşturduğu anlaşılmaktadır. Gömülmüş alana, partikül dolma konusu bir hipotez olmakla beraber, bundan sonraki çalışmalarda EDX analizi gibi yüzey karakterizasyonlarıyla tespit edilecektir. Ø4.8 mm’lik nozul kullanılan deneylerde her iki partikül miktarında da çarpma açısı yükseldikçe ağırlık kayıpları azalmıştır. Bu durum Ø3.2 mm’ye kıyasla bir farklılık oluşturmaktadır. Söz konusu farklılıkta, düşük nozul çapında çarpma hızının baskınlığı olurken; nozul çapı arttıkça etkilenen bölge etkisi görülmektedir. Ø4.8 mm’de etkilenen bölge arttığı içinde her çarpma açısı için azalmıştır.



Şekil 5.7. Nozul çapı Ø4.8 mm olan deneylerin farklı partikül miktarlarında ağırlık kaybı sonuçları

Partikül miktarı artışının etkisini detaylı görebilmek amacıyla Şekil 5.8’de Ø6.4 mm’lik nozulun 500 gr. ve 1000 gr. partikül kullanımıyla oluşan ağırlık kaybı sonuçları verilmiştir. Nozul çıkış çapının Ø6.4 mm’ye yükselmesiyle hedef malzeme yüzeyinde etkilenen alan artmış, çarpma hızı etkisi azalmıştır. 30° çarpma açısında diğer iki tip nozula (Ø3.2 ve Ø4.8 mm) kıyasla yüksek farklar oluşmamıştır. 500 gr.’da ~12 mg ağırlık kaybı ölçülürken, 1000 gr.’da ~11 mg ile daha düşük kayıp oluşmuştur. Burada partikül artışına bağlı olarak 30° çarpma açısında direkt düşüş gözlenmesi; partikül

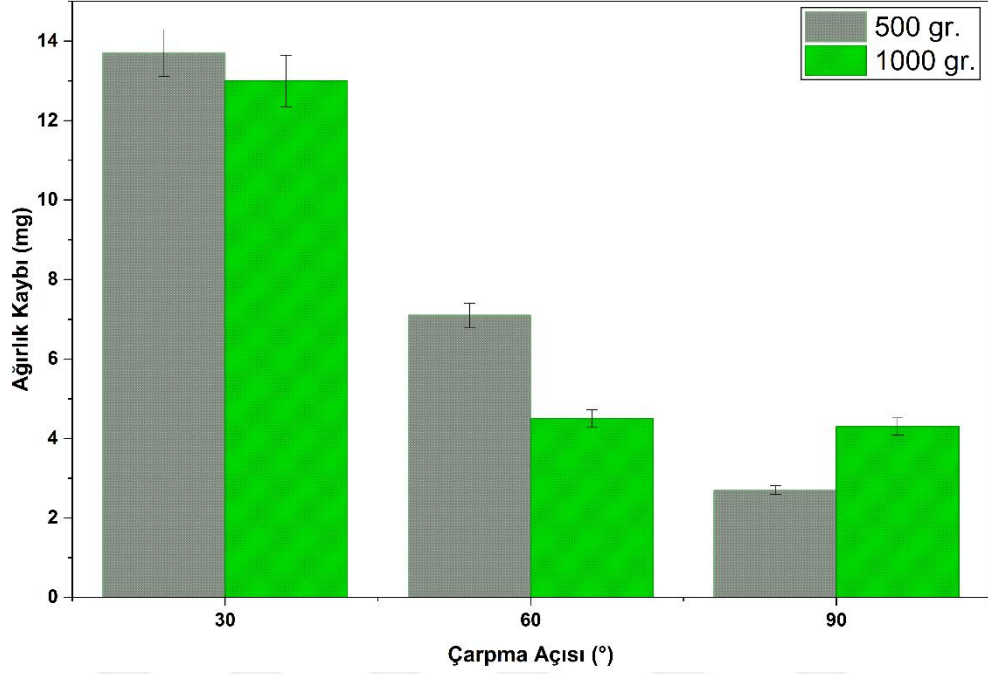
miktarındaki artışın sonuçlara olan etkisine hızlı cevap oluşturmuştur. Ø3.2 ve Ø4.8 mm'lik nozulda 60° ve 90°'de daha düşük oluşurken, Ø6.4'lük çap için 30° çarpma açısında bu sonuç oluşmuştur. Çarpma açısı 60°'ye yükseldiğinde, diğerlerine kıyasla 500 gr. partiküllü deneylerde daha fazla aşınma gerçekleşmiştir. Son olarak 90° çarpma açısında ise 1000 gr'da aşınma daha yüksek kaydedilmiştir. Oluşan sonuçlardan yola çıkarak, çarpma açısının ve nozul çapının birlikte artmasıyla çarpma hızı baskınlığı tespiti kanıtlanırken, partikül miktarının artışı çarpma hızı etkisini azaltmıştır. Ayrıca yine erozyon doygunluğu hipotezi bu çap içinde desteklenmiştir.



Şekil 5.8. Nozul çapı Ø6.4 mm olan deneylerin farklı partikül miktarlarında ağırlık kaybı sonuçları

Son olarak Ø8.5 mm'lik nozul kullanımında, 500 gr. ve 1000 gr. aşındırıcı ile gerçekleştirilen deney sonuçları Şekil 5.9'de verilmiştir. Ø8.5 mm'lik çapa bağlı oluşan sonuçlar, Ø6.4'lük çapa bağlı oluşan sonuçlara benzerdir. İki tip nozulda da aynı eğilimde aşınma sonuçları oluşmuştur. Buradan yola çıkarak etkilenen bölge parametresi varlığı ve partikül miktarı artışına bağlı olarak, bu parametrenin etkin erozyon mekanizması olduğu anlaşılabılır. Sonuçlar sayısal olarak incelendiğinde 30° çarpma açısında 500 gr.'da 1000 gr.'a kıyasla ~%7 daha fazla aşınma oluşması, 60° çarpma açısında bu oran ~%28 ve 90° çarpma açısında ise bu oran 1000 gr. lehine ~%40 olarak sonuçlanmıştır. Oluşan duruma bağlı olarak ve tüm nozul tipleri içinde geçerli olmak üzere, partikül miktarının 500 gr. tutulduğu seviyelerde erozyon hasar süreci tamamlanmakta, ancak 500 gr. üstüne çıkıldığında püskürtülen partiküller ekstra bir hasar oluşturmamakla birlikte 500 gr.

oluşan gömülmüş yüzey bölgesine, 500 gr. üstüne çıkıldığında bir partikül dolması durumu söz konusu olmaktadır. Sonuçlarda ortaya çıkan 1000 gr. partikül kullanımlı deneylerde daha az aşınma durumunun oluşması bu yorumu desteklemektedir.



Şekil 5.9. Nozul çapı Ø8.5 mm olan deneylerin farklı partikül miktarlarında ağırlık kaybı sonuçları

Nozul çapı ve erozyon ilişkisi hakkında yapılabilecek bir diğer yorumda partikül akış debisidir. Deney faaliyetleri sürecinde her bir nozula bağlı olarak deney süresi kaydedilmiştir. Deney başladığı andan (partikül boşalmaya başladığından), deney bitişine (partikül boşalması tamamlanıncaya kadar geçen süre) kadar oluşan süreler her bir deney ölçülmüştür. Buradan yola çıkarak nozul çapına bağlı olarak kaydedilen deney süreleri Çizelge 5.3’de verilmiştir. Çizelgedeki nozul çapına bağlı deney süreleri incelendiğinde, en yüksek deney süreleri, nozul çapının en düşük olduğu Ø3.2 mm’lik deneylerde oluşmuştur. Çapın küçük olması sebebiyle partikül akışı sınırlanmış ve dolayısıyla deney süresi uzamıştır. Ø3.2 mm’lik nozulda 15 s. Olarak ölçülen süresi, Ø4.8, Ø6.4 ve Ø8.5 mm’lik nozula kıyasla ~%30 seviyesinde daha yüksek oluşmuştur. Nozul çapı büyüdükçe aralarında yine doğrusal bir düşüş oluşmamakla birlikte birbirine yakın deney süreleri ölçülmüştür. Partikül miktarı iki katına çıkmasıyla, deney süreleri her bir deney için yaklaşık 2 kat artmıştır. Ø3,2 mm çaplı nozullarda çıkış kesitinin dar olması nedeniyle, aşındırıcı partiküllerin nozuldan daha sınırlı sayıda ve büyük ölçüde ardışık (tekil) şekilde geçmesi olasıdır. Bu durumda partiküller arasındaki etkileşimlerin sınırlı olması, partiküllerin taşıyıcı akışkan tarafından daha kararlı biçimde hızlandırılmasına ve hedef

yüzeye daha düzenli bir şekilde ulaşmasına neden olmaktadır. Buna karşılık nozul çapının 4,8 mm, 6,4 mm ve özellikle 8,5 mm değerlerine çıkmasıyla birlikte, çıkış kesitinin genişlemesi daha fazla partikülün aynı anda nozuldan geçmesine olanak tanımakta ve bu durum çoğul partikül etkileşimini beraberinde getirmektedir. Partiküller arasındaki çarpışmalar, hız kayıpları ve akış yönündeki sapmalar, taşıyıcı akış içerisindeki momentum aktarımını değiştirebilmekte ve partikül hızlarının düşmesine yol açabilmektedir. Bu çoğul partikül etkileşimi, literatürde de belirtildiği üzere, yüksek partikül yoğunluklarında partikül-partikül çarpışmalarının artmasıyla birlikte etkin çarpma hızlarının azalmasına ve erozyon etkinliğinin değişmesine neden olabilmektedir. Deney süresinin, özellikle büyük nozul çaplarında ve yüksek aşındırıcı miktarlarında (1000 g) daha kısa ölçülmesi, birim zamanda yüzeye ulaşan toplam partikül sayısının artmasına rağmen, tekil partiküllerin yüzeye aktardığı etkin enerjinin azalmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu durum, nozul çıkış çapının yalnızca kütleli debiyi değil, aynı zamanda partikül etkileşim rejimini de belirleyen kritik bir geometrik parametre olduğunu göstermektedir.

Çizelge 5.3. Erozyon deney süreleri

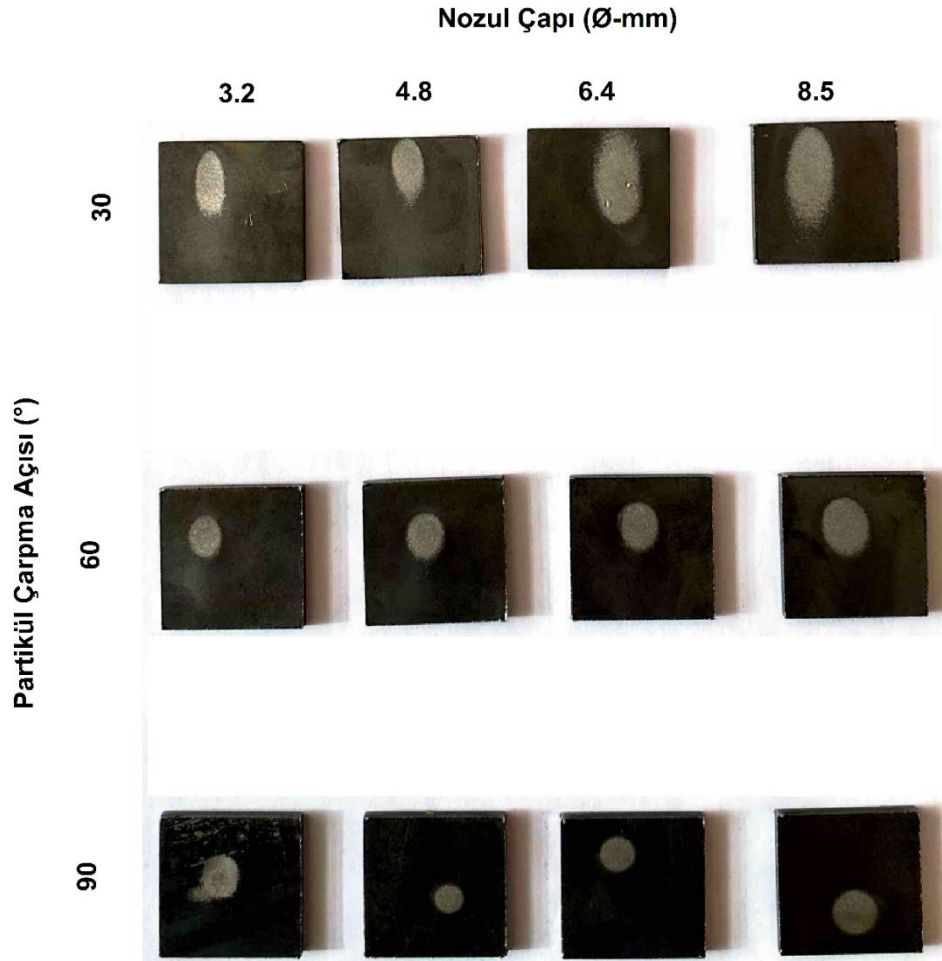
Partikül Miktarı (gr.)	Çarpma Açısı (°)	Nozul Çapı (Ø-mm)	Deney Süresi (s)
500	30	3.2	15
		4.8	10
		6.4	11
		8.5	8
	60	3.2	16
		4.8	10
		6.4	10
		8.5	10
	90	3.2	18
		4.8	12
		6.4	11
		8.5	11
1000	30	3.2	32
		4.8	23
		6.4	21
		8.5	20
	60	3.2	34
		4.8	25
		6.4	24
		8.5	19
	90	3.2	37
		4.8	26
		6.4	24
		8.5	22

Sonuç olarak, nozul çıkış çapının artmasıyla birlikte partikül akış rejiminin değiştiği ve tekil partikül hareketinden çoğul partikül etkileşiminin baskın hâle geldiği değerlendirilmektedir. Dar çıkış çaplarında partiküllerin daha düzenli ve sınırlı

etkileşimle ilerlemesi, geniş çıkış çaplarında ise partikül–partikül etkileşimlerinin artması, partikül hızları ve yüzeye aktarılan etkin enerji üzerinde belirleyici olmaktadır. Elde edilen bulgular, katı partikül erozyon aşınmasının değerlendirilmesinde nozul tasarımının incelenmesi gerekliliğini göstermektedir.

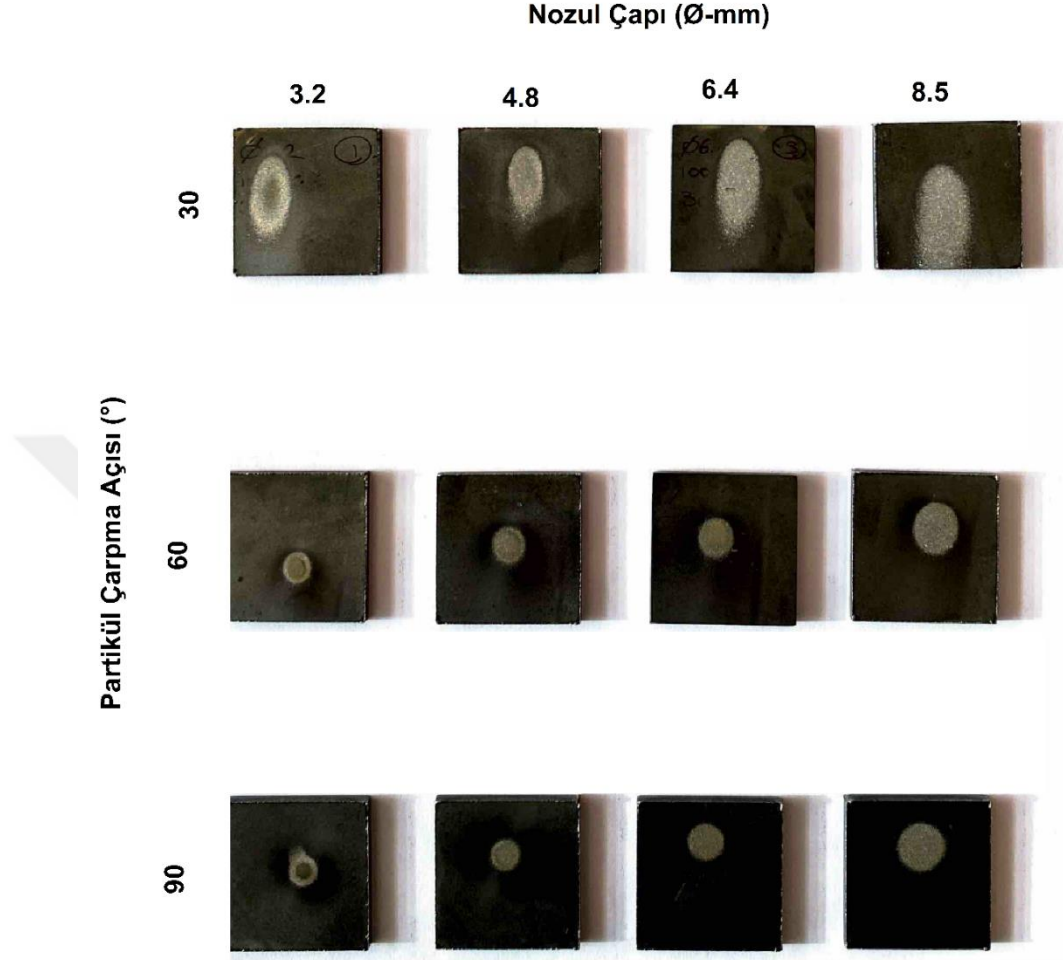
5.4. Erozyona Bağlı Oluşan Yüzey Hasarı

Nozul çapındaki değişim, çarpma hızı ile beraber hedef malzeme yüzeyindeki etkilenen bölge alanını da değiştirmektedir. Oluşan değişim erozyon aşınması sonuçlarıyla niceliksel olarak kanıtlanmıştır. Etki bölge alanının değişimini fiziki olarak değerlendirmek içinse her bir numunenin yüzeyi görüntülenmiş ve erozyon izi çapı ölçülmüştür. Şekil 5.10 ve 5.11’da 500 gr. ve 1000 gr. partikül kullanımı ile aşındırılmış numunelerin yüzey görüntüleri sunulmuştur.



Şekil 5.10. 500 gr. partikül kullanımında aşınmış numunelerin yüzey görüntüsü

Şekillerden görüleceği üzere, nozul çapı değişikçe erozyon izlerinin yayıldığı bölge değişmektedir. Etkilenen bölge alanının ölçümünde bu değişimde sayısal olarak desteklenmektedir.

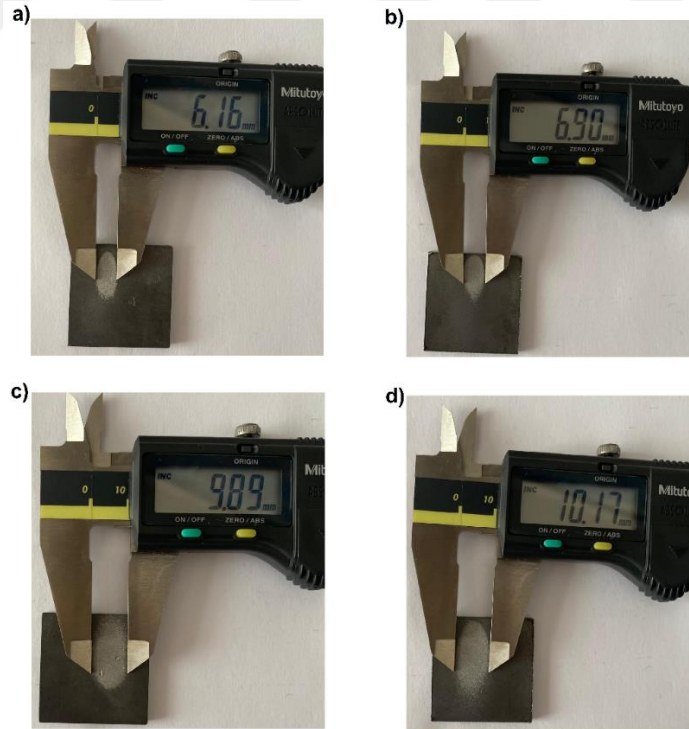


Şekil 5.11. 1000 gr. partikül kullanımında aşınmış numunelerin yüzey görüntüsü

Yüzeylerdeki erozyon izlerinin ve etki bölgesinin değişimini nozul çapına göre değerlendirebilmek adına, Mitutoyo CD-15CPX model numaralı kumpasla ölçüm yapılmıştır. Etki alanı ölçümleri ± 0.1 mm hassasiyetle yapılmıştır.

Şekil 5.12’de 500 gr. aşındırıcı alüminyum oksit partikülün kullanıldığı ve 30° çarpma açısında gerçekleştirilen erozyon deneyleri neticesinde aşınmış numunelerin yüzey görünüşleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde, numune yüzeylerinde nozul çapına bağlı olarak etkilenen bölge alanlarının kumpas yardımıyla ölçümleri gözükmemektedir. Erozyon deneyleri neticesinde 500 gr partikül kullanımlı deneylerde, düşük çarpma açılarında ($<30^\circ$) erozyon hasarının, çarpma hızından çok etkilenen bölgeye bağlı olarak geliştiği anlaşılmıştır. Şekil 5.12.(a)’da $\varnothing 3.2$ mm’lik nozulda ki etkilenen bölge 6.16 mm olarak ölçülmüştür. Bu değeri kıyaslamak için ilk olarak Şekil

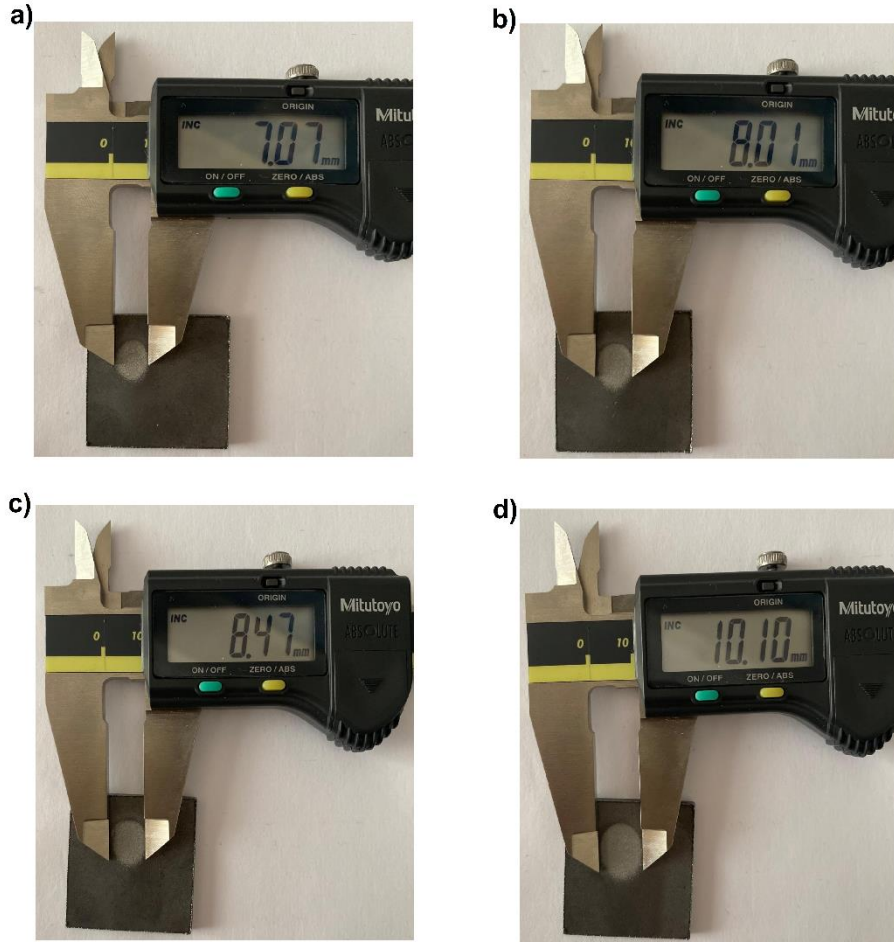
5.12.(b)'de ki Ø4.8 mm'lik nozul ele alındığında etki bölgesi 6.90 mm olarak oluşmuştur. Etki bölgesi ~%12 artmıştır. Aşınma sonuçlarında Ø4.8 mm'lik nozul daha az aşınmıştır. Bu artışa göre etki alanı yeterli miktarda artmamış, ancak çarpma hızı düşmüştür. Bu sebeple de aşınma miktarı düşmüştür. Şekil 5.12.(c)'deki Ø6.4 mm'lik nozul ele alındığında; Ø3.2 mm'lik nozul ile neredeyse aynı miktarda (~12 mg) aşınma göstermiştir. Çap artışı 2 kat olmasına karşın; çarpma hızı ciddi miktarda düşmüş ve etki bölgesi ~%55-60 seviyesinde artmıştır. Etki bölgesi daha az artmasına rağmen erozyona etkisi büyük olmuştur. Buradan yola çıkarak, erozyon deneylerinde tespit edilen olgunun doğruluğu desteklenmektedir. Son olarak Şekil 5.12.(d)'deki Ø8.5 mm'lik nozul ele alındığında; Ø3.2 mm de oluşan 6.16 mm'lik etki bölgesi, 10.17 mm'ye ulaşmıştır. Yaklaşık %75 seviyesinde bir artış meydana gelmiştir. Sonuçlara göre Ø8.5 mm daha fazla aşınmıştır. Tüm bunlar birlikte değerlendirildiğinde, çap artışı çarpma hızı seviyesini düşürmekte fakat etki alanı bölgesini artırdığı gerçeği doğrulanmaktadır. Ancak düşük çarpma açıları ve düşük partikül miktarında, hasarda etki bölgesi alanı daha belirleyici rol üstlendiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.12. 500 gr. aşındırıcılı ve 30° çarpma açısında, nozul tipine göre hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge alanının ölçümü; a) Ø3.2 mm, b) Ø4.8 mm, c) Ø6.4 mm, d) Ø8.5 mm

Çarpma açısı yükseldikçe hasarın oluşmasında etkin mekanizma, çarpma hızı parametresi olduğu erozyon deneylerinden anlaşılmıştır. Şekil 5.13'de 500 gr aşındırıcılı

ve 60° çarpma açısında aşınmış numunelerin yüzey görünüşleri sunulmuştur. Çarpma açısının yükselmesiyle, erozyon hasarında belirleyici rolün çarpma hızına geçtiği deneyler sonucu ölçülen ağırlık kayıplarıyla anlaşılmıştır. İlk olarak, 60° çarpma açısındaki etkilenen bölgeler 30° çarpma açısına göre karşılaştırıldığında; Ø3.2 mm ve Ø4.8 mm gibi düşük nozul çaplarında yaklaşık %15 seviyesinde artmıştır. Ø6.4 mm nozulda ise etkilenen bölge, 30°'ye göre %10 seviyesinde azalmıştır. Ø8.5 mm'de ise neredeyse aynı kalmıştır. Bunlardan yola çıkarak, çarpma açısının yükselişi, düşük çaplı nozullarda (Ø3.2-Ø4.8 mm gibi) çarpma hızını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda etkilenen bölge alanını da artırmıştır. Ancak düşük çaplı nozullarda çarpma hızındaki düşüşler ve etki alanındaki düşüş eğilimi aşınma seviyesini azaltmıştır. Erozyon sonuçlarında en fazla aşınma Ø3.2 ve Ø8.5 mm'lik nozulda oluşmuş olmakla birlikte Şekil 5.13.(a) ve (d)'deki görsellere göre bu oluşum doğrulanmaktadır.



Şekil 5.13. 500 gr. aşındırıcı ve 60° çarpma açısında, nozul tipine göre hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge alanının ölçümü; a) Ø3.2 mm, b) Ø4.8 mm, c) Ø6.4 mm, d) Ø8.5 mm

500 gr. aşındırıcılı ve 90° çarpma açısındaki numunelerin görünüşleri Şekil 5.14'te verilmiştir. Çarpma açısının dikey doğrultuya getirilmesiyle, yüzeyde gömülme hasarının oluşmasına sebebiyet verdiği bilinmektedir. Şekillerdeki görüntüler incelendiğinde, çarpma açısının en yüksek pozisyonunda tüm nozullar için etki bölgesi düşmüştür. Erozyon sonuçlarına göre en düşük aşınmalar bu çarpma açısında oluşmakla beraber, erozyon hasarının oluşumu çarpma hızına bağlı duruma gelmiştir.

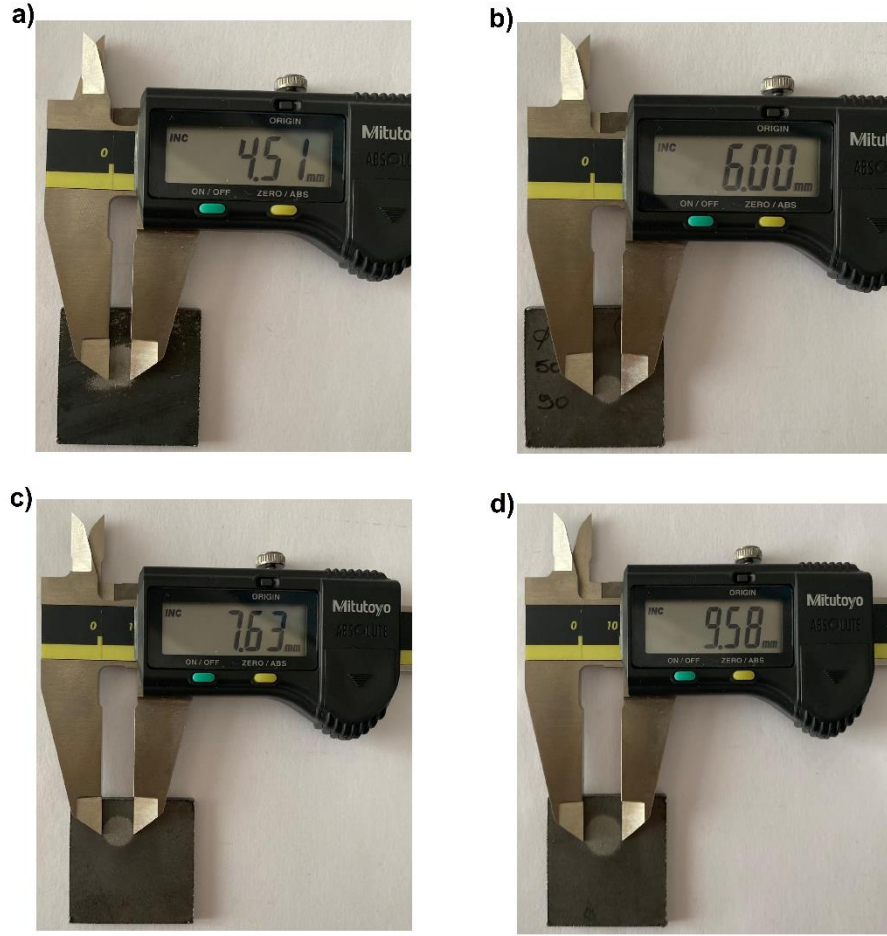
Etki bölgesi açısından Şekil 5.14.(a)'da Ø3.2 mm'lik nozul için en düşük etki alanı oluşmuştur. 90°'deki aşınma sonuçları açısından Ø3.2 mm'lik nozul en fazla aşınmayı meydana getirmekle birlikte, artık hasar konusunda etkilenen bölge alanı parametresi yerini çarpma hızına bıraktığı teyit edilmiştir.

Şekil 5.14.(b)'de verilen Ø4.8 mm'lik nozul, Şekil 5.14.(c) ve (d)'deki Ø6.4 mm ve Ø8.5 mm'lik nozula kıyasla düşük çap'a sahip olduğu için bu iki yüksek çaplı nozuldan da daha yüksek çarpma hızına ulaştığı için Ø3.2 mm'den sonra en fazla aşınan numuneler olmuştur. 90° çarpma açısında belirginleşen bir diğer durum erozyon izlerindeki gömülme ve sürüklenme hasarıdır. Ø3,2 mm nozulda (Şekil 5.14.(a)) yüzeyde oluşan hasarın daha lokalize, belirgin bir gömülme karakteri sergilediği, malzemenin merkez bölgede yoğun şekilde deforme olduğu ve çevresel sürüklenmenin sınırlı kaldığı gözlenmektedir. Ø4,8 mm nozulda (Şekil 5.14.(b)) gömülme etkisi korunmakla birlikte, deformasyon bölgesinin çevreye doğru yayıldığı ve yüzeyde akma-sürüklenme izlerinin daha belirgin hâle geldiği görülmektedir.

Nozul çapının Ø6,4 mm (Şekil 5.14.(c)) değerine çıkarılmasıyla birlikte gömülme merkezinin daha geniş bir alana yayıldığı, yüzeyde malzemenin darbe yönünde plastik akma ve yığılma eğiliminin arttığı anlaşılmaktadır.

Ø8,5 mm nozulda (Şekil 5.14.(d)) ise hasar bölgesi belirgin biçimde genişlemiş, keskin bir gömülme yerine daha yaygın bir yüzey bozulması ve sürüklenme ağırlıklı hasar morfolojisi oluşmuştur. Bu durum, nozul çapının artmasıyla birlikte partikül akışının yüzeyle daha geniş bir temas alanı üzerinden etkileşime girmesi ve darbe enerjisinin lokal bir noktada yoğunlaşmak yerine yüzeye dağıtılmasıyla ilişkilendirilebilir.

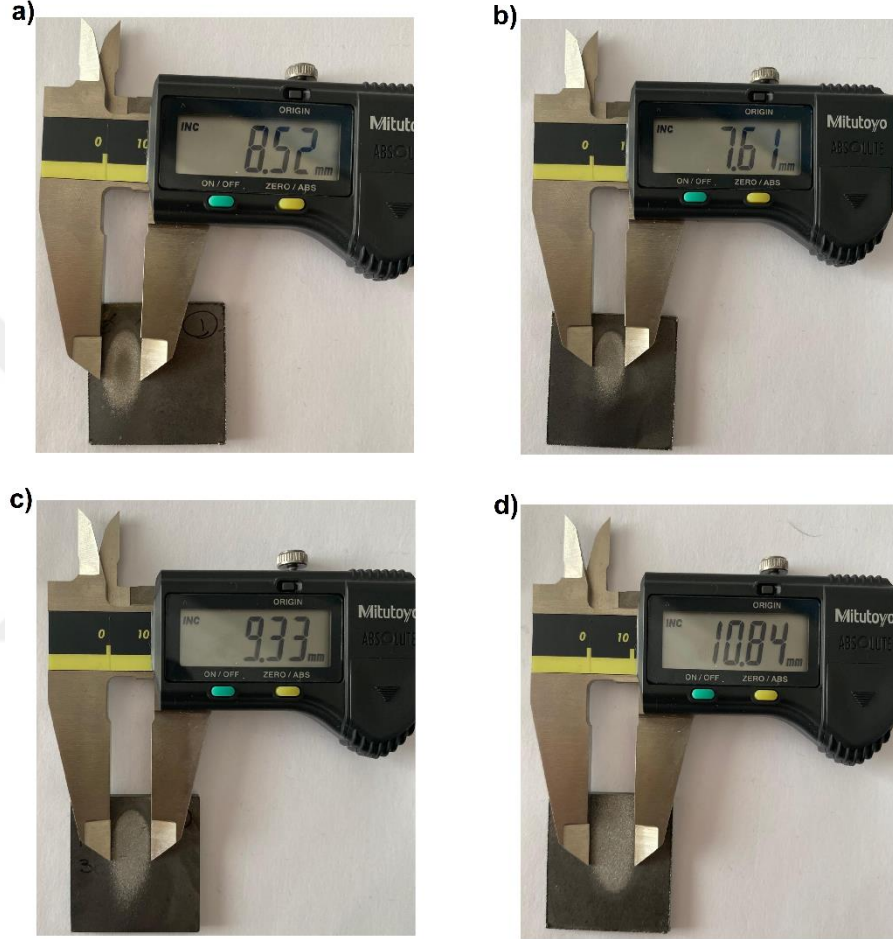
Elde edilen gözlemler, nozul geometrisinin yalnızca erozyon miktarını değil, aynı zamanda yüzeyde oluşan hasarın tipini ve morfolojisini belirleyen temel bir tasarım parametresi olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.14. 500 gr. aşındırıcılı ve 90° çarpma açısında, nozul tipine göre hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge alanının ölçümü; a) Ø3.2 mm, b) Ø4.8 mm, c) Ø6.4 mm, d) Ø8.5 mm

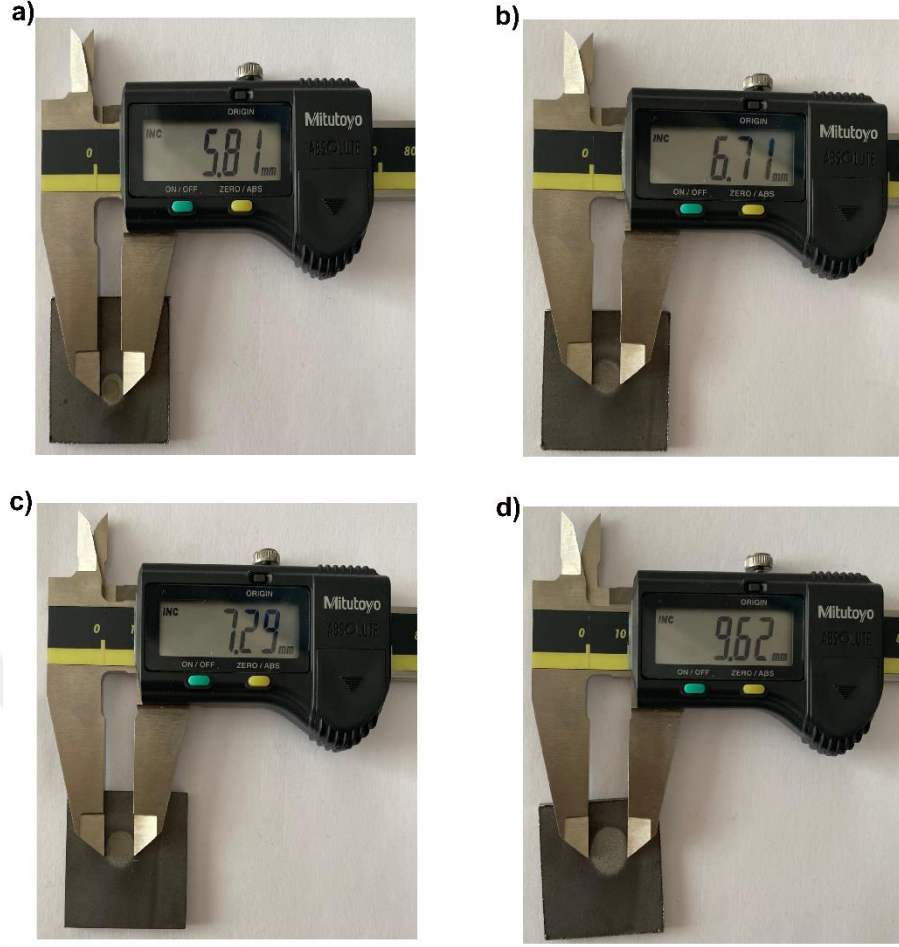
Partikül miktarının 1000 gr.'a çıkartılmasıyla erozyon hasarının belirleyiciliği konusunda ki çarpma hızı ve etkilenen bölge parametrelerinin rolü değiştiği erozyon deneylerinde anlaşılan bir diğer durumdur. Şekil 5.15'de 1000 gr. aşındırıcı tercihli ve 30° çarpma açısındaki numune görünüşleri sunulmuştur. Şekil 5.15.(a) ve (b)'de verilen Ø3.2 mm ve Ø4.8 mm'lik nozula bağlı gelişen etki alanı büyüklüğü dikkate alındığında, 500 gr. deneylerine kıyasla etki alanı büyümüştür. Her iki nozul içinde etki alanı ~%15-20 seviyesinde bir artış göstermiştir. Ancak Şekil 5.15.(c) ve (d)'deki Ø6.4 mm ve Ø8.5 mm'lik nozullar yaklaşık olarak aynı (500 gr.'a göre) kalmıştır. Erozyon sonuçlarında Ø3.2 mm'lik nozul en fazla aşınırken diğerleri daha az aşınmaktadır. Ø3.2 mm çapta, çarpma hızının yüksek oluşu ve etki bölgesi alanının artması da bu yüksek sonucu doğrulamaktadır. Ø6.4 mm ve Ø8.5 mm'lik nozulda etki alanının aynı kalması ve 500 gr.'a göre hız seviyesinin de değişmemesi, bu yüksek çaplı nozullarda aşınma miktarlarının aynı seviyede oluşmasına sebebiyet vermiştir. Ø4.8 mm'de etki alanının artışı ise 500 gr.'a göre aşınmayı artırmıştır.

Buradan, daha önce erozyon hasarında yüksek partikül miktarlı (1000 gr.) deneylerde iki parametre etkisinin değiştiği gözükmeyle beraber, aslında 1000 gr. deneylerinde etki alanı değiştiği için aşınma miktarları değişmiştir. Yani düşük çarpma açılarında baskın mekanizma hala etki alanı büyüklüğüdür. Çarpma hızına doğru bir kayma oluşmamaktadır.



Şekil 5.15. 1000 gr. aşındırıcılı ve 30° çarpma açısında, nozul tipine göre hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge alanının ölçümü; a) Ø3.2 mm, b) Ø4.8 mm, c) Ø6.4 mm, d) Ø8.5 mm

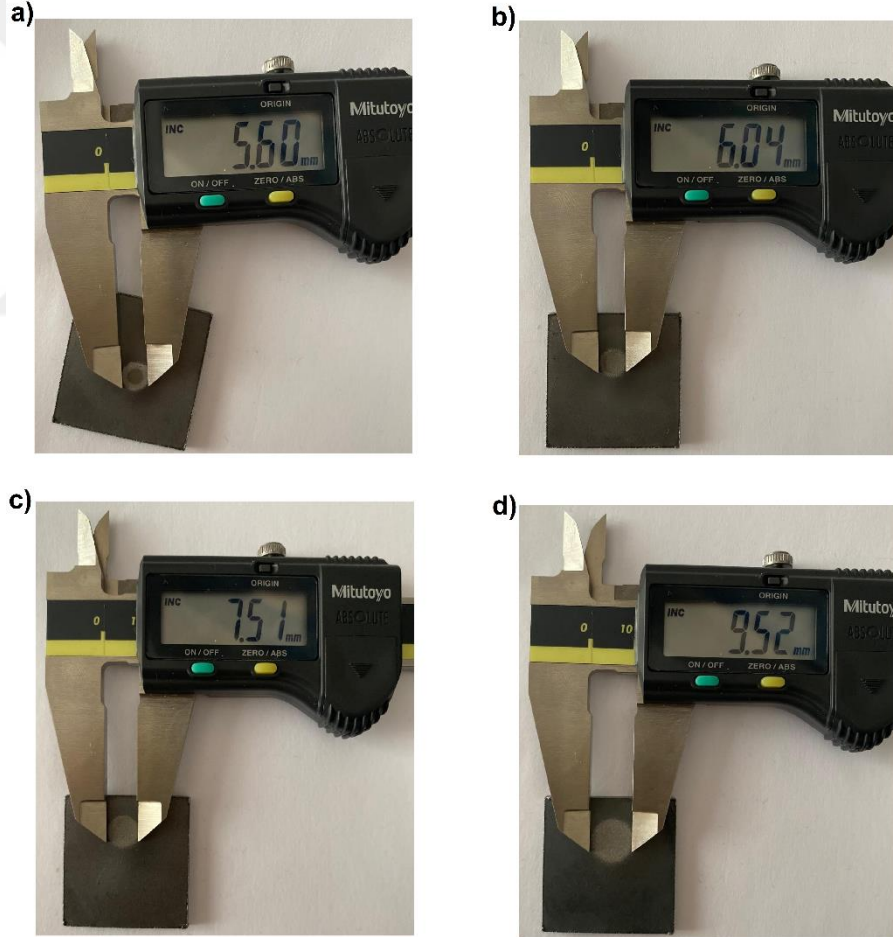
1000 gr. partikül kullanımlı ve çarpma açısının 60° getirilmesiyle aşınmış yüzeylerin görünüşleri Şekil 5.16'de verilmiştir. Görseller incelendiğinde; 500 gr. partikül, 30° ve 60° çarpma açısına göre tüm nozullar için etkilenen bölge alanları küçülmüştür. 30° çarpma ve 500 gr. aşındırıcılı deneylere kıyasla bu küçülme miktarı ~%10 seviyesinde, 60° çarpma açısına sahip deneylere kıyasla ~%20 seviyesindedir. Çarpma açısı ve partikül miktarı artışıyla etkilenen bölgenin küçülmesi ağırlık kaybı sonuçlarını azaltmıştır. Bu azalış yüksek çarpma hızına sahip nozullar için daha düşük seviyede olsa da yüksek çaplı nozullarda daha fazla oluşmuştur.



Şekil 5.16. 1000 gr. aşındırıcı ve 60° çarpma açısında, nozul tipine göre hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge alanının ölçümü; a) Ø3.2 mm, b) Ø4.8 mm, c) Ø6.4 mm, d) Ø8.5 mm

Son olarak 1000 gr. aşındırıcı Al_2O_3 katı partikülün kullanıldığı ve 90° çarpma açısında gerçekleşen deneyler sonucu aşınmış numunelerin görünüşleri Şekil 5.17’de sunulmuştur. Aşınma sonuçlarına göre 1000 gr. aşındırıcı ve 60° çarpma açısının sonuçları ile 90° çarpma açısına sahip numunelerin ağırlık kayıpları %10’dan daha düşük miktarda farklı olmuştur. Neredeyse çok yakın sonuçlar olduğu görülmüştür. Bu durum Şekil 5.17’deki görüntülerden yorumlanırsa; Şekil 5.16’deki 60° çarpma açısına sahip numunelerdeki etki alanı ile 90° çarpma açısındaki etki alanları birbirlerine çok yakın olmuştur. Daha önce fazla partikül miktarında, çarpma açısı yükseldikçe çarpma hızının etkisinin gölgelendiği söylenmekle beraber, bu yoruma ek olarak etki alanının aynı kalmasıyla birlikte sonuçlar birbirlerine oldukça yakın olmuştur. 90° çarpma açısında yüzey hasarı ele alındığında; Ø3,2 mm nozulda (Şekil 5.17.(a)) yüzeyde oluşan hasarın, 500 g koşuluna kıyasla daha belirgin bir derin gömülme ve merkezde yoğunlaşmış plastik deformasyon sergilediği gözlenmektedir. Ø4,8 mm nozulda (Şekil 5.17.(b)) gömülme etkisi korunmakla birlikte, hasar bölgesinin çevreye doğru yayıldığı

ve merkezden dışa doğru malzeme akması ve sürüklenme izlerinin daha belirgin hâle geldiği görülmektedir. Nozul çapının $\text{Ø}6,4$ mm (Şekil 5.17.(c)) değerine çıkarılmasıyla birlikte yüzeydeki hasarın daha geniş bir alana dağıldığı, merkezdeki çukurlaşmanın sınırlarının büyüdüğü ve çevresel bölgelerde yüzey bozulması ve yığılma karakterinin baskın hâle geldiği anlaşılmaktadır. $\text{Ø}8,5$ mm nozulda (Şekil 5.17.(d)) ise keskin bir gömülme yerine, geniş alanlı ve daha homojen bir yüzey deformasyonu olduğu, sürüklenme ve yayılma etkilerinin gömülme etkisine kıyasla ön plana çıktığı görülmektedir. Bu gözlemler, artan aşındırıcı miktarıyla birlikte nozul çıkış çapının, yüzeyde oluşan hasarın yalnızca şiddetini değil, aynı zamanda gömülme–sürüklenme dengesini ve hasarın yayılım karakterini belirleyen temel bir parametre olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.17. 1000 gr. aşındırıcılı ve 90° çarpma açısında, nozul tipine göre hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge alanının ölçümü; a) $\text{Ø}3.2$ mm, b) $\text{Ø}4.8$ mm, c) $\text{Ø}6.4$ mm, d) $\text{Ø}8.5$ mm

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1 Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, erozyon aşınma davranışı test yeteneklerinin geliştirilmesi önceliğinde deneysel yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Farklı çarpma açıları (30°, 60°, 90°) ve parçacık miktarları (500 gr. ve 1000 gr.) kullanılarak EN 10025-2 yeteneğindeki S355J2+N çeliği üzerinde yapılan deneyler, malzemenin erozyon özelliklerini belirlemiştir. Deneysel süreçte farklı nozul çaplarının (Ø3.2 mm, Ø4.8 mm, Ø6.4 mm ve Ø8.5 mm) katı partikül erozyonuna ve erozyon hasarına olan etkisi incelenmiştir. Deneysel süreç sonucunda numunelerdeki ağırlık kayıpları ölçülmüş ve numune yüzeylerindeki erozyon izleri ölçülmüştür. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda paylaşılmıştır:

- Yapısal çelik malzemelerin süneklik karakter sınırları, katı parçacık erozyon aşınma testlerinde gösterilmiştir. Deneysel süreç boyunca, düşük partikül miktarında (500 gr. vb.) erozyon oranı değerleri çarpma açısının artmasıyla birlikte azalarak literatürdeki sünek malzeme eğilimini doğrulamıştır.
- Partikül miktarının artışına bağlı olarak numunelerdeki erozyon oranları sabit kaldığı tespit edilmiştir. Buradan yola çıkarak, belirli bir seviyeye kadar erozyon aşınmasının doygunluğa ulaştığı ve o seviyeden sonra püskürtülen partiküllerin numuneler üzerine niceliksel olarak ekstra bir etki oluşturmadığı tespit edilmiştir.
- Nozul geometri değişimindeki lüle formunun farklılıkları hem çarpma hızına baskın rolde etkisi olmuş hem de erozyon aşınmasında değişiklikler oluşturmuştur.
- Düşük çaplı nozullarda (Ø3.2 mm vb.) partikül çarpma hızları yüksek olmakla beraber, nozul çapı büyüdükçe partikül çarpma hızı düşmektedir.
- Nozul çapına bağlı olarak erozyon hasarının oluşmasında iki farklı belirleyici parametrenin ortaya çıktığı tespit edilmiştir. Bu parametreler, partikül çarpma hızı ve hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge alanıdır. İki parametrede nozul çapı ile kontrol edilmektedir.

- Düşük çarpma açılarında ($<30^\circ$) ve az partikül kullanımında (500 gr.) erozyon hasarında belirleyici rol hedef malzeme yüzeyinde etkilenen bölge alanıdır.
- Partikül miktarı düşük tutularak, çarpma açısı artırıldıkça; erozyon hasarında belirleyici rol çarpma hızına doğru kaymaktadır.
- Yüksek partikül miktarında (1000 gr. gibi) ve düşük çarpma açılarında, erozyon hasarında etkilenen bölge etkisi devam etmekle birlikte çarpma hızı faktörü de söz sahibi olmaya başlamaktadır.
- Yüksek partikül miktarında ve çarpma açısı artırıldığında, erozyon hasarının oluşmasında hala hedef malzeme yüzeyindeki etkilenen bölge alanı parametresi belirleyici roldedir.
- Düşük çaplı nozul tercihinde deney süreleri uzamakla birlikte partikül akış debisi azalarak tekil partikül etkileşimi yakalanmaktadır.
- Tez çıktıları ile birlikte testlerde kullanılan aşınma modelinin mühendislik uygulamalarında aşınmayı tahmin etmek için güvenilir bir sayısal araç sağladığı sonucuna varılmıştır.
- Yapısal çelik malzeme grubuna ait S355J2+N malzemesinin yüzeyi, erozyon aşınması nedeniyle parçacıkların sürüklenmesi ve kayması sonucu oluşan plastik deformasyon hasarına maruz kalmaktadır.

5.2 Öneriler

Ulaşım sektörüne hitap etme ölçeğinde yapı çeliği tercihi ile birlikte deneyler sonunda numunelerdeki erozyon oranı ölçülerek, malzemenin erozyon davranışı belirlenmiş olmakla birlikte mekanik özellik değişkenliğine de odaklanması değerlendirilmesi düşünülmelidir.

Deneylerin sağlıklı yapılabilmesi amacıyla ortaya konulan güncellenmiş erozyon cihazının uluslararası akreditasyonuna yaklaşması için test cihazında numunenin sabitlendiği bölümün hareketlendirilme önceliği gözetilerek bir iklimlendirme kabini içerisine alınması sayesinde numune ortam şartlarının kontrol edilmesi ve yine deneylerdeki sıcaklık ve çok daha fazla değişkenin hız ölçümleri yapılarak kontrollü deneylerin uygulanması sorgulanması planlanabilir.

Deney setinde özgün veri alabilecek sensör kullanımının derinleştirilmesi sayesinde TR Test yönüne odaklanılabilir.

Deney seti revizyonu ile birlikte erozyon aşınma sürecinde hibrit tip parçacık püskürtme de kullanılabilir. Bu bağlamda, simülasyon faaliyetleri, parçacıkların hibrit bir şekilde modellenmesiyle yönetilebilir ki bu sayede değişken boyutlara ve farklı malzemelere sahip parçacık çarpışmaları yakından analiz edilebileceği öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Aydin, M. E., Firat, V., ve Bagci, M. (2025). Simulation of solid particle erosion wear using Discrete Element Method: Comparison of experimental and analysis results. *Particuology*.
- Bağcı, M. (2010). *Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Performansının İncelenmesi* Konya Teknik Üniversitesi]. Konya.
- Bui, Q. D. (2005). VariTarget–A new nozzle with variable flow rate and droplet optimization. 2005 ASAE Annual Meeting,
- Castañeda, E. A., León, R. P., ve Cornejo, J. (2021). FEM and DEM Simulations of Tire-Soil and Drill-Soil Interactions in Off-Road Conditions for Mechanical Design Validation of a Space Exploration Rover. 2021 12th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE),
- Cengel, Y. A., ve Boles, M. A. (2015). Gas-vapor mixtures and air-conditioning. *Thermodynamics and Engineering Approach, 8th ed.*; McGraw Hill: New York, NY, USA, 725-729.
- Chen, X., Pan, H., ve Chen, L. (2025). Effect of Nozzle Geometry on Erosion Characteristics in Abrasive Water Jet: Experimental and Numerical Analysis. *Lubricants*, 13(3), 132.
- Crocker, L., ve Smith, N. (2016). Parametric study on erosion rig nozzle.
- Deepak, D., Anjaiah, D., Karanth, K. V., ve Sharma, N. Y. (2012). CFD simulation of flow in an abrasive water suspension jet: the effect of inlet operating pressure and volume fraction on skin friction and exit kinetic energy. *Advances in Mechanical Engineering*, 4, 186430.
- Demirci, M., ve Bağcı, M. (2018). Investigation of automotive primer and basecoat paint surface's adhesion by solid particle erosion. AIP Conference Proceedings,
- Demirci, M., Bağcı, M., ve Nesimioğlu, B. S. (2025). Surface Analysis of Erosion Resistance of Recycled PA 3200 GF Powders Produced by Selective Laser Sintering. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 1-9.
- Duan, A., Lin, Z., Chen, D., ve Li, Y. (2024). A review on the hydraulic performance and erosion wear characteristic of the centrifugal slurry pump. *Particuology*, 95, 370-392.
- Finnie, I. (1960). Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, 3(2), 87-103.
- Ghassemieh, E., Versteeg, H. K., ve Acar, M. (2006). The effect of nozzle geometry on the flow characteristics of small water jets. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 220(12), 1739-1753.
- Haddad, A. (1988). Supersonic nozzle design of arbitrary cross-section.
- Haghibin, N., Khakpour, A., Schwartzentruber, J., ve Papini, M. (2019). Measurement of abrasive particle velocity and size distribution in high pressure abrasive slurry and water micro-jets using a modified dual disc anemometer. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 164-175.
- Hernández-Peña, A., Gallardo-Hernández, E., Farfan-Cabrera, L., Vite-Torres, M., ve Muñoz-Saldaña, J. (2023). Solid particle erosion evaluation of automotive paint coatings under the influence of artificial weathering. *Wear*, 532, 205105.
- Horng, J.-H., Ta, T.-N., Kuo, C.-W., Liao, S.-J., ve Chen, Y.-Y. (2025). Development of wear and pitting curves with vibration analysis for lubricating grease under contamination conditions. *Wear*, 560, 205625.

- Hu, Y., Pan, J., Dai, Q., Huang, W.,ve Wang, X. (2022). Solid particle erosion-wear behaviour of SiC particle-reinforced Si matrix composite and neat Si—a comparison. *Wear*, 496, 204286.
- Humphrey, J. (1990). Fundamentals of fluid motion in erosion by solid particle impact. *International journal of heat and fluid flow*, 11(3), 170-195.
- Hutchings, I. (1979). *Mechanisms of the erosion of metals by solid particles*. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
- Hutchings, I. (1981). A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence. *Wear*, 70(3), 269-281.
- Kato, K.,veAdachi, K. (2000). Wear mechanisms. In *Modern tribology handbook: volume one: principles of tribology* (pp. 273-300). CRC press.
- Laguna-Camacho, J. R., Vite-Torres, M., Gallardo-Hernández, E.,ve Vera-Cárdenas, E. (2013). Solid particle erosion on different metallic materials. *Tribology in engineering*, 5, 63-78.
- Levin, B., Vecchio, K., DuPont, J.,ve Marder, A. (1999). Modeling solid-particle erosion of ductile alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30(7), 1763-1774.
- Miyazaki, N. (2016). Solid particle erosion of composite materials: A critical review. *Journal of Composite Materials*, 50(23), 3175-3217.
- Neilson, J.,veGilchrist, A. (1968). Erosion by a stream of solid particles. *Wear*, 11(2), 111-122.
- Nordbo, E. (1992). Effects of nozzle size, travel speed and air assistance on deposition on artificial vertical and horizontal targets in laboratory experiments. *Crop Protection*, 11(3), 272-278.
- Nuytens, D., Baetens, K., De Schampheleire, M.,ve Sonck, B. (2007). Effect of nozzle type, size and pressure on spray droplet characteristics. *Biosystems engineering*, 97(3), 333-345.
- Ojala, N., Valtonen, K., Kivikytö-Reponen, P., Vuorinen, P.,ve Kuokkala, V.-T. (2015). High speed slurry-pot erosion wear testing with large abrasive particles. *TRIBOLOGIA-Finnish Journal of Tribology*, 33(1), 36-44.
- Oka, Y., Ohnogi, H., Hosokawa, T.,ve Matsumura, M. (1997). The impact angle dependence of erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*, 203, 573-579.
- Oka, Y. I., Matsumura, M.,ve Kawabata, T. (1993). Relationship between surface hardness and erosion damage caused by solid particle impact. *Wear*, 162, 688-695.
- Oka, Y. I., Okamura, K.,ve Yoshida, T. (2005). Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. *Wear*, 259(1-6), 95-101.
- Payri, R., Molina, S., Salvador, F.,ve Gimeno, J. (2004). A study of the relation between nozzle geometry, internal flow and sprays characteristics in diesel fuel injection systems. *KSME International Journal*, 18(7), 1222-1235.
- Peng, W., Ma, L., Wang, P., Cao, X., Xu, K.,ve Miao, Y. (2023). Experimental and CFD investigation of flow behavior and sand erosion pattern in a horizontal pipe bend under annular flow. *Particuology*, 75, 11-25.
- Podgornik, B. (2022). Adhesive wear failures. *Journal of failure analysis and prevention*, 22(1), 113-138.
- Qaderi, A. R., Chitrakar, S., Neopane, H. P.,ve Dahlhaug, O. G. (2025). Comprehensive Review of Sediment Erosion Mechanisms and Their Impact on Francis Turbines. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,

- Ramji, V., Mukesh, R., ve Hasan, I. (2016). Design and numerical simulation of convergent divergent nozzle. *Applied Mechanics and Materials*, 852, 617-624.
- Reitz, R. D., ve Bracco, F. (1979). *On the dependence of spray angle and other spray parameters on nozzle design and operating conditions* (0148-7191).
- Ruff, A., ve Ives, L. (1975). Measurement of solid particle velocity in erosive wear. *Wear*, 35(1), 195-199.
- Shao, C., Ge, Z., Zhou, Z., Liu, W., Li, Z., Tian, C., ve Chang, W. (2023). Experimental and numerical investigation of abrasive water jet nozzle erosion. *Powder Technology*, 430, 119031.
- Song, P., Cheng, J., Wang, X., Zhang, Z., Shao, L., Xue, L., Jing, Z., Zhang, B., Wu, Y., ve Hong, S. (2025). Corrosion and corrosion-wear behavior of the (FeCoCrNi) 75B15Si10 high-entropy amorphous alloy coatings prepared by plasma spraying. *Corrosion Science*, 253, 113013.
- Sundararajan, G. (1991). A comprehensive model for the solid particle erosion of ductile materials. *Wear*, 149(1-2), 111-127.
- Torrance, A. (2005). Modelling abrasive wear. *Wear*, 258(1-4), 281-293.
- Trevisiol, C. (2018). *Effet de la microstructure et de la rugosité sur le comportement au frottement et à l'usure d'aciers faiblement alliés* Université de Technologie de Compiègne].
- Wang, Q.-Y., Bai, S.-L., ve Liu, Z.-D. (2014). Study on cavitation erosion–corrosion behavior of mild steel under synergistic vibration generated by ultrasonic excitation. *Tribology Transactions*, 57(4), 603-612.
- Yu, D., Wang, R., Wu, C., Wang, Z., Zhao, X., Zhang, S., Zhang, C., ve Tao, X. (2024). Wear, corrosion and cavitation erosion behavior of WC-reinforced FeCrNiMnAl ceramic-high entropy alloy composite coatings by laser cladding. *Ceramics International*, 50(24), 55790-55800.