



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**EKLEMELİ İMALAT VE DÖKÜM YÖNTEMİ
İLE ÜRETİLEN ALSİ10MG ALAŞIMLARININ
KRİYOJENİK ORTAMLARDAKİ EROZYON
AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Mehmet Esat AYDIN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Temmuz-2025
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet Esat AYDIN tarafından hazırlanan “Eklemeli İmalat Ve Döküm Yöntemi İle Üretilen AlSi10Mg Alaşımlarının Kriyojenik Ortamlardaki Erozyon Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” adlı tez çalışması 16/06/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

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)

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mevlüt UYAN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 241010026 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.

Mehmet Esat AYDIN

07.07.2025

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EKLEMELİ İMALAT VE DÖKÜM YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN ALSİ10MG ALAŞIMLARININ KRİYOJENİK ORTAMLARDAKİ EROZYON AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mehmet Esat AYDIN

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

Danışman: Prof. Dr. Mehmet BAĞCI

2025, 153 Sayfa

Jüri

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

Bu tez çalışmasında, son yıllarda hızla yaygın kullanımı artarak havacılık, uzay, otomotiv, tarım, madencilik, medikal ve dişçilik gibi sektörlerde tercih edilen metal eklemeli imalat yöntemi ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlarının erozyon aşınma davranışları incelenmiştir. Eklemeli ve geleneksel imalat yöntemlerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla deney numuneleri, toz temelli eklemeli imalat uygulaması olan seçici lazer ergitme yöntemi ve alüminyum enjeksiyon döküm yöntemiyle üretilmiştir. Tekrarlı testler için üretilen numunelerin bir grubuna ısıtma işlemi (T6) uygulanarak ısıtma işleminin, erozyon davranışına etkisi araştırılmıştır.

Partikül etkisinin erozyon deneylerinde etkisinin belirlenmesinde $\sim 350 \mu\text{m}$ boyutuna sahip Silisyum Karbür (SiC) aşındırıcı partiküller kullanılmış olup farklı parametreler özelinde katı partikül erozyon aşınma sonuçlarına ulaşılmıştır. Aşındırıcı partiküllerin, hedef malzeme yüzeyine çarpma hızlarının belirlenebilmesinde hava akış hızı, sensör yardımıyla 60 m/s olarak bulunmuştur. Partiküllerin havaya karışma anındaki hızlarının tespiti içinde Ayırık Elemanlar Metoduna (AEM) bağlı simülasyonlarla, serbest düşme hızı yaklaşık 2,24 m/s olarak tespit edilmiştir. Simülasyon ve sensör yardımıyla ölçülen değerler, Euler'in Langerian Parçacık Takibi (LPT) akış modeliyle birleştirilerek, partiküllerin çarpma hızları teorik olarak $\sim 25 \text{ m/s}$ olarak hesaplanmıştır. Partikül çarpma hızı aynı zamanda çift disk metoduyla da ölçülerek teorik ve deneysel yakınsama sonuçlarına ulaşılmıştır. Katı partikül erozyon aşınma parametreleri arasında bir diğer önemli parametre olan çarpma açısı karşılaştırmalarında ise altı farklı çarpma açısından (15° ile 90° sabit artış) faydalanılmıştır.

Deneyler oda sıcaklığında ve kriyojenik ortam şartlarında ($\leq -100^\circ\text{C}$) gerçekleştirilmiş olup kriyojenik ortam şartlarının sağlanabilmesi amacıyla belli gruptaki deney numunelerinin dekar kabı özelliğini temsil etme yeteneğine sahip strafor kapalı hazne içerisinde sıvı azot (-196°C) ile kontrollü olarak teması sağlanarak sensör hassasiyeti ile kriyojenik şartlar doğrulanmıştır.

Deneyler ASTM G76/G211 standartları yeteneğine sahip özel olarak tasarlanmış test cihazında gerçekleştirilmiş olup ağırlık kaybı verileri ile uluslararası literatür uyumluluğu önceliğinde alternatif imalat yöntemi, ısıtma işlemi etkisi karşılaştırmaları sonunda çarpma açısı – erozyon oranı grafikleri oluşturulmuştur. Deney numunelerinin erozyon aşınma davranışlarını anlamlandırmak ve istatistiksel veri ortaya koymak adına korelasyon analizi uygulanmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçların karşılaştırılması için ısıtma işlemi uygulanmamış eklemeli imalat numuneleri üzerinden Ansys Rocky DEM yazılımı ile ayırık elemanlar temelli simülasyon faaliyetleri yürütülerek simülasyona bağlı erozyon oranları hesaplanmış olup erozyon oranının tespitinde ilgili yazılımın çeşitli sınırlar dahilinde kullanışlı olabileceği anlaşılmıştır.

Üç tekrarlı olacak şekilde tüm deneylerin tamamlanmasından sonra aşınmış numunelerin yüzeylerinden çeşitli büyültme ölçeklerinden SEM görüntüleri alınmış ve numunelere XRD analizi uygulanmıştır. Yüzey incelemeleri sonucunda, yüzeylerde yoğun olarak plastik deformasyona bağlı yüzey yapısının bozulduğu ve partiküllerle etkileşim sonucunda yüzeylerde çökmelere, partikül gömülmesine ve ezilme izlerine rastlanılmıştır. Ortaya çıkan yüzey hasarları, erozyon deneylerinden elde edilen sünek ve tam sünek malzeme karakteristiğini desteklemektedir.

Bu tez çalışmasına ait çıktıların ortaya konulması kapsamında ise deneysel faaliyetlere ve simülasyon çalışmalarına bağlı olarak eklemeli imalat ile üretilmiş AlSiMg10 alaşımlarının katı partikül erozyon aşınma sonuçları açısından geleneksel imalatla üretilen yöntemlerden daha fazla erozyon direnci sağlayabildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca T6 ısıtılmasının özellikle eklemeli imalat ile üretilmiş AlSi10Mg numunelerin erozyon aşınma direncini de iyileştirdiği belirlenmiştir. Son olarak kriyojenik ortam şartlarının da katı partikül erozyon aşınma miktarını artırdığı verisine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: AlSi10Mg, Eklemeli İmalat, Döküm, Isıl İşlem (T6), Katı Partikül Erozyon Aşınması, Kriyojenik Ortam, Seçici Lazer Ergitme (SLE), Erozyon Direnci.

ABSTRACT

MS THESIS

EXAMINATION OF EROSION WEAR BEHAVIOR OF ALSI10MG ALLOY PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING AND CASTING METHODS IN CRYOGENIC ENVIRONMENTS

Mehmet Esat AYDIN

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

Advisor: Prof. Dr. Mehmet BAĞCI

2025, 153 Pages

Jury

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

In this thesis, the erosion wear behaviour of AlSi10Mg alloys produced by metal additive manufacturing method, which is preferred in sectors such as aviation, aerospace, automotive, agriculture, mining, medical and dentistry, has been investigated. In order to compare additive and conventional manufacturing methods, test specimens were produced by selective laser melting method and aluminium injection casting method, which are powder-based additive manufacturing applications. The effect of heat treatment on erosion behaviour was investigated by applying heat treatment (T6) to a group of specimens produced for repeated tests.

Silicon Carbide (SiC) erosive particles with a size of $\sim 350 \mu\text{m}$ were used to determine the effect of particle effect in erosion tests and solid particle erosion wear results were obtained for different parameters. In order to determine the impact velocity of erosive particles on the surface of the target material, the air flow velocity was found to be 60 m/s with a sensor. In the determination of the velocities of particles at the moment of mixing with air, the free fall velocity was determined to be approximately 2,24 m/s by simulations based on Discrete Element Method (DEM). The values measured by simulation and sensor were combined with Euler's Langerian Particle Tracking (LPT) flow model to theoretically calculate the particle impact velocity of $\sim 25 \text{ m/s}$. Particle impact velocity was also measured by double disc method and theoretical and experimental convergence results were obtained. Another important parameter among the solid particle erosion wear parameters, the impact angle, was compared using six different impact angles (15° to 90° constant increase).

The experiments were carried out at room temperature and cryogenic ambient conditions ($\leq -100^\circ\text{C}$). In order to ensure cryogenic conditions, cryogenic conditions were verified with sensor sensitivity by providing controlled contact of the test samples in certain groups with liquid nitrogen (-196°C) in a styrofoam closed chamber capable of representing the container feature.

The experiments were carried out on a specially designed test machine capable of ASTM G76/G211 standards and the impact angle- erosion rate graphs were created at end of the impact angle-erosion rate graphs at end of the weight loss data and alternative manufacturing method, heat treatment effect comparisons in the priority of international literature compatibility. Correlation analysis was applied in order to make sense of the erosion wear behaviour of the test specimens and to provide statistical data.

In order to compare the results obtained from the experiments, discrete element based simulation activities were carried out with Ansys Rocky DEM software on non-heat treated additive manufacturing

specimens and simulation related erosion rates were calculated and it was understood that the relevant software can be useful within various limits in determining the erosion rate.

After the completion of all experiments with three repetitions, SEM images were taken from the surfaces of the eroded samples at various magnification scales and XRD analysis was applied to the samples. As a result of the surface analyses, it was observed that surface structure was intensely degraded due to plastic deformation on the surfaces and collapses, particle embedment and crushing marks were observed on the surfaces as a result of interaction with particles. The resulting surface damages support the ductile and fully ductile material characteristics obtained from erosion tests.

Within the scope of presenting outputs of this thesis study, it has been concluded that AlSiMg10 alloys produced by additive manufacturing can provide more erosion resistance than those produced by conventional manufacturing methods in terms of solid particle erosion wear results depending on experimental activities and simulation studies. It is also determined that T6 heat treatment improves the erosion wear resistance of AlSi10Mg samples produced by additive manufacturing. Finally, cryogenic conditions were also found to increase the amount of solid particle erosion wear.

Keywords: AlSi10Mg, Additive Manufacturing, Casting, Heat Treatment (T6), Solid Particle Erosion Wear, Cryogenic Conditions, Selective Laser Melting (SLM).



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, katı partikül erozyon aşınma test cihazı kapsamında görüş alışverişinde bulunduğum Sayın Dr. Öğr. Üyesi Musa DEMİRCİ'ye teşekkür ederim.

Tez faaliyetlerinde önemli bir yere sahip olan kriyojenik şartların oluşturması konusunda ise sıcaklık ölçümlerini yapabilmek amacıyla sensör hazırlama sürecine katkı sağlayan Sayın Usame SALMAN'a, tez süreci içinde maddi ve manevi anlamda desteklerini esirgemeyen aileme şükranlarımı sunarım.

Tez çalışmasında gerekli maddi imkanların oluşturulması için Konya Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 241010026) ve TÜBİTAK BİDEB (2210-C) kurumlarına teşekkürü bir borç bilirim.

Mehmet Esat AYDIN
KONYA-2025

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	vi
ÖNSÖZ	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. Literatür Araştırması.....	4
2.1. Piyasa Araştırması	17
3. AŞINMA MEKANİZMALARİ VE EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİ....	22
3.1. Adhezif Aşınma	22
3.2. Abratif Aşınma.....	23
3.3. Yorulma Aşınması	24
3.4. Korozyon Aşınması	25
3.5. Kaviteasyon Aşınması	26
3.6. Erozyon Aşınması.....	27
3.6.1. Erozyon aşınmasına bağlı gelişen hasar mekanizmaları.....	28
3.6.2. Erozyon aşınmasına etki eden faktörler	31
3.6.3. Katı partikül erozyon aşınmasının ortaya çıktığı endüstri alanları	33
3.6.4. Erozyon aşınmasının teorik esasları	36
3.6.5. Erozyon aşınmasının uluslararası standartlara göre belirlenmesi.....	39
3.7. Eklemeli İmalata Geçiş	41
3.7.1. Toz temelli eklemeli imalat yöntemleri	42
3.7.2. Foto polimerizasyon temelli eklemeli imalat yöntemleri	43
3.7.3. Materyal ekstrüzyonu esaslı eklemeli imalat yöntemleri	45
3.7.4. Malzeme püskürtme esaslı eklemeli imalat yöntemleri.....	46
3.7.5. Bağlayıcı püskürtme esaslı eklemeli imalat yöntemleri	47
3.7.6. Enerji esaslı eklemeli imalat yöntemleri.....	48
3.7.7. Sac laminasyonu ile eklemeli imalat	49
3.7.8. Eklemeli imalatın avantaj ve dezavantajları	49
4. MATERYAL VE METOT.....	51
4.1. Deney Numunelerinin Hazırlığı.....	51
4.1.1. Numunelere uygulanan ısıl işlem bilgisi ve numunelerin mekanik özellikleri	54

4.2. Deneysel Tertibat	57
4.3. Aşındırıcı Katı Partikül Bilgileri.....	63
4.4. Partikül Çarpma Hızının Belirlenmesi.....	65
4.4.1. Nozul içi hava akış hızının ölçümü.....	66
4.4.2. Ayırık elemanlar yöntemiyle partiküllerin hava akışı içine karışma anındaki hız seviyesinin belirlenmesi.....	68
4.4.3. Partikül hızlarının teorik olarak belirlenmesi	70
4.4.4. Deneysel olarak partikül hız ölçümü	73
4.5. Kriyojenik Ortam Şartlarının Oluşturulması ve Sıcaklıkların Tespiti	78
4.6. Deneysel Parametreler	81
4.7. Deneysel Süreç Sonrasında Erozyon Oranlarının Belirlenmesi	82
4.8. Numune Yüzeylerindeki Hasarın İncelenmesi	83
4.9. Ayırık Elemanlar Analizi Kurulumu	83
4.9.1. Ansys LPBF simülasyonları ile analiz geometrisinin oluşturulması	85
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	88
5.1. Üretim Yöntemiyle Erozyon Oranı Arasındaki İlişki.....	91
5.2. Isıl İşlem Varlığı ile Erozyon Oranı Arasındaki İlişki.....	95
5.3. Kriyojenik Sıcaklıkların Erozyon Oranına Etkisi.....	98
5.3.1. Kriyojenik ortam şartlarının numunelerin sertliği ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi.....	103
5.4. Korelasyon Analizine Bağlı İstatistiklerle Erozyon Davranışının Açıklanması	105
5.5. Ayırık Elemanlar Analizi ile Erozyon Oranı Sonuçları	108
5.6. Yüzey Hasar Mekanizmalarının Belirlenmesi.....	118
5.6.1. Numunelere uygulanan XRD analizi sonuçları	119
5.6.2. SEM görüntüleri	124
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	139
6.1. Sonuçlar	139
6.2. Öneriler	141
KAYNAKLAR	142
EKLER	148

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A_p	: Partiküllerin Kesit Alanı (mm^2)
C_d	: Sürüklenme Katsayısı
D'	: Partikül Çapı (mm)
d_p	: Partikül Çapı (mm)
E	: Erozyon Oranı (mg/kg)
F	: Yüzeye Uygulanan Normal Kuvvet (N)
F_{drag}	: Sürüklenme Kuvveti (N)
$F_{\text{kütle}}$	: Partiküllerin Ağırlığı Sebebiyle Oluşan Kuvvet (N)
$F_{\text{yüzey}}$	: Temas Kuvveti (N)
H	: Yüzey Sertliği
K, k_1, k_2, k_3, a, b	: Aşınma Sabiti
L	: Diskler Arası Mesafe (mm)
m_p	: Tek bir partikülün kütlesi (mg)
n_1, n_2	: Deneysel Sabitler
Θ	: Erozyon İzleri Arasında Kalan Açı (Radyan)
Θ_p	: Partikül Çarpma Açısı ($^\circ$)
P	: Basınç (Bar)
p_t	: Partikül Yoğunluğu (Kg/m^3)
ρ	: Yoğunluk (Kg/m^3)
ρ_f	: Hava Yoğunluğu (Kg/m^3)
R	: Hava Gaz Sabiti (J/Kg. K)
r	: Erozyon İzi Yarıçapı (mm)
Re	: Reynolds Sayısı
S	: Erozyon İzleri Arasındaki Mesafe (mm)
s	: Kayma Mesafesi (mm)
T	: Sıcaklık ($^\circ\text{C}$)
U, V', v_p	: Partikül Çarpma Hızı (m/s)
v_f	: Hava Akış Hızı (m/s)
W	: Ağırlık Kaybı (mg)
ω	: Açısal Hız (rad/s)
$\emptyset$	: Çap (mm)

Kısaltmalar

Al	: Alüminyum
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
D	: Döküm
Eİ	: Eklemeli İmalat
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HB	: Brinell Sertliği
HV, H _{Vt}	: Vickers Sertliği
İİ	: Isıl İşlem Yok
K	: Kriyojenik
LPBF	: Laser Powder Bed Fusion
LPT	: Langerian Parçacık Takibi
Mg	: Magnezyum
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopi
Si	: Silisyum
SLE	: Seçici Lazer Ergitme
T6	: Isıl İşlem Var
XRD	: X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Geçmişten günümüze teknolojik gelişmeler birçok uygulama ortaya çıkarmakla birlikte yeni imalat yöntemleri üretmiştir. Yıllar içinde geleneksel yöntemlerin ihtiyaçlara cevap vermesi giderek zor hale gelmiştir. Döküm, talaşlı işlem, toz metalürjisi gibi üretim süreçleri barındırdıkları çeşitli sebepler vasıtasıyla yerini başka üretim yöntemlerine bırakmaktadır. Bu kapsamda, katmanlı üretim olarak da bilinen eklemeli imalat (Eİ) yöntemleri ile malzemeler birleştirilerek nihai parça şekli oluşturulabilmektedir. Eklemeli üretim süreciyle kompleks geometriler, hızlı prototip üretimi, hafif yapıların elde edilmesi mümkün kılınmış olup söz konusu imalat yöntemi giderek popüler hale gelmektedir.

Eklemeli imalat süreçleri son yıllarda hem Dünya’da hem Türkiye’de giderek yaygınlaşmaktadır ve 3D baskı teknolojisi savunma, havacılık, otomotiv, elektronik, medikal gibi sektörlerin çeşitli uygulama alanlarında giderek gelişmiştir. Eklemeli imalatın geçtiğimiz 20 yılda büyük gelişme kaydetmesi, teknolojinin daha güvenilir ve verimli olması bu üretim tekniğine olan talebi de artırmıştır. 3D baskı ya da eklemeli imalat giderek tanınmakta ve yaygınlaşmakta, bu talebin çoğu da endüstriden gelmektedir. Gündelik yaşamda kişisel yaşam alanlarında bile katmanlı üretim teknikleri kullanılmaktadır. Bu konuda akla gelen ilk örnek 3D yazıcılardır. Günümüzde birçok yaş grubundan insan 3D yazıcı kullanarak istedikleri modelleri hızlı şekilde üretmektedirler. 3D yazıcı ile yapılan eklemeli imalat süreci FDM olarak isimlendirilmektedir ve kullanımı oldukça yaygındır. Ancak söz konusu eklemeli üretim tekniği ile plastik ve kısıtlı sayıda kompozit malzeme üretilabilmektedir. Bu kapsamda endüstriyel ihtiyaçların karşılanmasında söz konusu yöntem yeterli değildir. Endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla metal ve metal türevli malzemelerin tercih edilmesi toz temelli eklemeli imalat tekniklerini geliştirmiştir. Metalik malzeme tozları kullanımıyla, lazer veya elektron demeti ışını kullanılarak malzemeye şekil verme sürecini kapsayan toz temelli eklemeli imalat teknolojilerinin endüstriyel uygulamalarda kullanımı yaygındır. Seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi olarak bilinen toz esaslı katmanlı üretim süreci endüstride kendine yer bulmaktadır. Titanyum, nikel, alüminyum alaşımları ve paslanmaz çelik üretiminde dahi söz konusu yöntem kullanılabilir. Ülkemizde mevcutta üretimi yapılan en yaygın alaşımlar Ti6Al4V, AlSi10Mg, Inconel 718 ve paslanmaz çelik grubu malzemelerdir. Ancak küresel ölçekte malzeme grubu daha çeşitlidir. Ancak hem eklemeli imalat süreçlerinin yeni popüler hale gelen bir teknoloji olması ve konu

hakkında bilinen literatürün azlığı, eklemeli imalatın geleneksel yöntemler kadar yaygın kullanılmadığını göstermektedir.

Savunma, havacılık, medikal, uzay gibi özel parça üretimini yoğun barındıran sektörlerle cevap verme açısından eklemeli imalat yöntemleri yoğun biçimde tercih edilmektedir. Bu tip sektörlerde; parça geometrisi, hafiflik, özel prototip ihtiyacı gibi parametreler üretilebilirlik açısından imalat yöntemlerini kısıtlamaktadır. Özellikle havacılık ve uzay sektöründeki araçlar, bulundukları atmosferik ortam sebebiyle de düşük sıcaklıklarda çalışmaktadır. Dolayısıyla da sıcaklık bu uygulamalarda tasarım sürecinde dikkate alınması gereken bir parametredir. Ayrıca uzay ortamındaki bir uydu veya yerden kilometre mertebesinde yüksekte uçan bir uçağın hız seviyeleri dikkate alındığında, hava aracının kendi boyutundan kat kat düşük boyutlu bir nesne ile çarpışması, aracın bileşen bazında hasara uğramasına sebebiyet vermektedir. Yüksek çarpışma hızı etkisiyle bileşenin şiddetli aşınmalara maruz kalabileceği düşünülürse; söz konusu durum bir problem meydana getirebilir. Hava aracının katı partiküllerle çarpışması ile ortaya çıkacak aşınma mekanizması katı partikül erozyon aşınması olarak isimlendirilmektedir.

Hava ve uzay araçlarının çalışma ortamı düşünüldüğünde; mikron boyutlarında göktaşı benzeri sert katı partiküllerin olduğu bilinmektedir. Aracın yüksek hızlarda çalışması ile partikül etkisi birleştirilirse araç komponentleri şiddetli erozyon aşınmasına maruz kalabilir. Ayrıca, bu tip hava araçlarında jet motor gövde malzemesi, uydu yakıt eşanjörü ve dış lamel yüzeylerde AlSi10Mg alaşımı tercih edilmektedir. Hafifliğin önemli bir parametre olmasından dolayı malzeme olarak alüminyum alaşımlarının kullanımı yaygındır. Bu kapsamda parçaların barındırdığı kompleks geometri de düşünülürse yapının nihai şeklinin oluşturulmasında toz temelli bir eklemeli imalat yöntemi olan seçici lazer ergitme (SLE) yöntemini işe dâhil etmektedir. Genellikle alışıla gelmiş olarak döküm yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımı bu kapsamda kullanılabilir fakat dökümün getirdiği sınırlamalar eklemeli imalatı bir alternatif olarak düşündürmektedir. Ayrıca uzaydaki sıcaklık değerlerinin -100°C gibi sıcaklıklara ulaşması ortamın kriyojenik şartlara ulaşmasına ve dolayısıyla da uydunun mekanik bileşenleri arasında bulunabilecek AlSi10Mg alaşımının kriyojenik şartlara maruz kaldığını göstermektedir.

Katı partikül erozyon aşınması, temelde belirli bir hıza sahip katı mikron boyutlu sert partiküllerin malzeme yüzeyine çarpması ile yüzeyin üst tabakasında malzeme kaybı meydana getirmesi sonucu oluşmaktadır. Yüzeyin üst katmanlarında malzeme kaybının devam etmesi sonucu makine elemanında hasar mekanizması gelişerek olumsuzluklar meydana gelebilir. Partiküllerin yüzeye çarpma hızı, çarpma açısı, partikül malzemesi ve

miktarı, partikül boyutu, partiküllerin sertliği, aşınan malzemenin sertlik ve mekanik özellikleri ve ortam sıcaklığı gibi parametreler katı partikül erozyon aşınmasını etkileyen en önemli parametrelerdir. Partiküllerin yüzeye çarpması ile birlikte yüzeyden yaygın olarak malzeme kaybı gözlenmektedir ve malzeme kaybı etkisiyle aşınan numune de ağırlık kaybı oluşmaktadır Katı partikül erozyon aşınmasının tespitinde de söz konusu ağırlık değişimi kullanılarak erozyon oranı belirlenmektedir. Bazı özel durumlarda aşınan malzeme yüzeylerine partikül saplanması veya gömülmesi oluşabilir. Bu gibi durumlar erozyon aşınması için özel bir hal olup inkübasyon periyodu olarak isimlendirilmektedir.

Partiküllerle çarpışma temeline dayanan erozyon aşınmasının tespitinde jet erozyon test makineleri kullanılmakla birlikte, çeşitli teorik matematiksel modellerde geliştirilmiştir. Aşınan malzemenin sertliği, partikül akış hızı, aşınma katsayısına bağlı erozyon oranı tespit edilebilir. Ayrıca malzemedeki ağırlık değişimi ve malzemeyi aşındıran partikül miktarının bilinmesiyle de erozyon oranı tespit edilmektedir. Teorik olarak erozyon aşınmasının tespitiyle birlikte çeşitli sonlu elemanlar, sonlu hacimler ve ayırık elemanlar metodlarıyla analiz çalışmaları da uygulanmaktadır. Ansys Fluent ve LS-DYNA yazılımları sonlu hacimler ve sonlu elemanlar yazılımlarına örnek oluşturmaktadır. Ayırık elemanlar yöntemi esasına dayanan simülasyon çalışmaları katı partikül erozyonunu tespit edebilmede sonlu elemanlar ve sonlu hacimler yöntemine göre daha başarılı sonuçlar vermektedir. Ansys Rocky DEM yazılımı ile ayırık elemanlar temeliyle erozyon aşınması simülasyonları yürütülebilmektedir.

Bu çalışmada deneysel, teorik ve ayırık elemanlar analizi esasına dayanan simülasyon çalışmaları yürütülmüştür. Seçici lazer ergitme ve döküm olarak üretilen AlSi10Mg alaşımlarına ısıtma işlemi (T6) yapılmıştır. Üretilen numunelere çeşitli partikül çarpma açıları ve kriyojenik şartlar dahilinde katı partikül erozyon aşınması deneyleri uygulanmıştır. Deneyler ile birlikte numune üretim yönteminin, numuneye uygulanan ısıtma işlemi ve kumlama operasyonlarının erozyon aşınmasına olan etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kriyojenik şartların malzemenin erozyon aşınma davranışına olan etkisi de araştırılmıştır. Aşınan numunelerin yüzeylerindeki durum detaylı mikroskop görüntüleri ile gözlenerek erozyon aşınma hasarının malzemeye olan etkisi görülmüştür. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile birlikte literatürde ki teorik modeller kullanılarak erozyon aşınması tespit edilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayırık elemanlar analizleriyle de simülasyon çalışmaları uygulanarak ayırık elemanlar yönteminin katı partikül erozyon aşınmasını belirlemedeki başarısı da tartışılmıştır.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Hava ve uzay uygulamalarında hafiflik önemli bir parametre olduğu için alüminyum alaşımları günümüzde tercih edilmektedir. Bu çalışmaya da konu olan AlSi10Mg alaşımları özellikle yüksek irtifa ortam şartlarında maruz kaldığı düşük sıcaklıklar, sert partiküllerle çarpışma esasına dayanan erozyon aşınması gibi etkiler sebebiyle incelenmesi gerekmektedir. Ayrıca söz konusu malzemenin üretim yönteminde, gelişen teknolojinin etkisiyle farklılaşmalar mevcut olup eklemeli olarak üretimi mümkün kılınmaktadır. Ancak eklemeli imalatın yeni bir yöntem olması sebebiyle, geleneksel yöntemlere kıyasla nasıl bir aşınma davranışı sergileyeceği konusunda bilinmezlikler oluşmaktadır. Bu konu kapsamında literatürde mevcut çalışmalar bulunmaktadır. Söz konusu çalışmalar bu tez çalışması kapsamında ilgilenilen konu ile birebir örtüşmemekle birlikte, alüminyum alaşımlarının karşılaşılabileceği katı partikül erozyon aşınmasını, kriyojenik ortam şartlarında yapının mekanik özelliklerinin nasıl etkilendiğini ve üretim yönteminin malzemeye olan etkisini kapsamaktadır. Projenin sahip olduğu birden çok konu bu tez çalışmasında ele alınmış olup, hava ve uzay uygulamalarında karşılaşılan bir probleme direkt cevap vermesi ile birlikte özgün bir değer oluşturmaktadır.

2.1. Literatür Araştırması

AlSi10Mg alaşımlarının havacılık ve uzay uygulamalarında kendisine yer bulduğu en önemli bileşenler yakıt eşanjörleri ve jet motor gövde malzemesidir. Yapılan bir tez çalışmasında, insansız hava araçlarında kullanılan bir yakıt eşanjörü eklemeli imalat yöntemiyle çeşitli geometrik farklılıklarla üretilerek, üretim yönteminin ve geometrik farklılıkların ısı transferine olan etkisi ölçülmüştür. Söz konusu çalışmada rüzgâr tüneli kullanılarak deneysel faaliyetler yürütülmüş olup, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleriyle simülasyon çalışmaları uygulanmıştır. Çalışma sonucunda optimum eşanjör geometrisi geliştirilmiş olup, eklemeli üretimin geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi soğutma performansı geliştirdiği sonucuna ulaşılmıştır (Topcu, 2023).

Yapılan bir diğer çalışmada, seçici lazer ergitme (SLE) yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımlarının, üretim parametrelerindeki farklılıklarla mekanik özellikleri belirlenmeye çalışılmıştır. Eklemeli üretim sürecinde katman kalınlığı, lazer gücü ve tarama hızı değiştirilerek yapının akma, çekme ve yüzde uzama değerlerini tespit etmeye

yönelik deneyler uygulanmıştır. Ayrıca SLE yöntemindeki tavlama prosesi aşamasında 275°C sıcaklıktaki tavlamanın malzemenin mikro yapısında değişiklikler oluşturduğu da gözlemiştir (Pan ve diğ., 2022).

Bir grup araştırmacının yaptıkları bir çalışmada, AlSi10Mg alaşımını toz metalürjisi (PM) ve eklemeli imalat (AM) ile üreterek iki yapının mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını karşılaştırmıştır. Mekanik özellikleri belirlemek için çekme testi ve vickers sertlik ölçümü yapılmıştır. Mikro yapılar ve hasar bölgesindeki detaylı durum için TEM, spektro analiz ve XRD analizi uygulanmıştır. Sonuçta ise eklemeli olarak üretilmiş numunelerdeki alüminyum (Al) taneleri daha iri olmakla birlikte silisyum (Si) çökeltisi daha ince taneli yapıya sahip olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca eklemeli üretilmiş AlSi10Mg alaşımı toz metalürjisi ile üretilmiş alaşıma kıyasla %100 daha fazla sertlik ve mekanik özellikler sergilemiştir (Chen ve diğ., 2018).

Başka bir çalışmada ise SLE yöntemiyle ve döküm olarak üretilen AlSi10Mg alaşımlarının mikro yapıları karşılaştırılmıştır. Eklemeli üretilen yapıların tane boyutları daha küçük oluşmakla birlikte, tane sınırı fazlalığından dolayı mukavemeti daha yüksek oluşmuştur. Ayrıca katmanlı oluşmuş yapıda anizotropi olduğu da anlaşılmıştır (Rosenthal ve diğ., 2014).

Seçici lazer ergitme yöntemi toz esaslı eklemeli imalat yöntemleri arasında en yaygın kullanılan üretim yöntemidir. Yapılan bir çalışmada AlSi10Mg alaşımı SLE yönetimiyle üretilerek yorulma dayanımı belirlenmeye çalışılmıştır. Ancak çalışmada ki farklılıklardan biri AlSi10Mg alaşımı eklemeli imalat ile 0°, 45° ve 90° yönelim açısında üretilmiştir. Üretim aşamasında ön ısıtma işleminde sıcaklıklar 30°C'den başlayarak aşırı ısıtma sıcaklıklarına (300°C) kadar artırılmıştır. Ayrıca yapılara ısıtma işlemi de (T6) uygulanmıştır. Sonuçta aşırı ısıtmanın yorulma dayanımı üzerinde, yönelim açısından daha önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır. 300°C aşırı ısıtma ile üretilen numunelerin yorulma dayanımları en yüksek olarak ölçülmüştür (Brandl ve diğ., 2012).

Eklemeli imalatın havacılık uygulamalarında ortaya çıktığı en yaygın bileşenler jet motor türbinleridir. Yapılan bir çalışmada lazer katkılı eklemeli üretimle (LPBF) gaz türbini motorlarda kullanılan Al-Si alaşımı üretilmiştir. Geleneksel yöntemlerle üretime kıyasla yapılar %15 oranında hafifletilmiş ve bu hafiflikle beraber dayanım seviyesi kaybolmamıştır. Ayrıca eklemeli üretim süreci sonlu elemanlar yazılımı ile simüle edilerek alüminyum alaşımı için üretim parametreleri optimize edilmiştir (Magerramova ve diğ., 2021).

Başka bir çalışmada AlSi10Mg alaşımı eklemeli ve geleneksel yöntemle üretilmiştir. İki farklı yapının çekme, basma ve yorulma dayanımları karşılaştırılmıştır. Sonuçta eklemeli üretimde anizotropi davranışın (diğer çalışmalara benzer şekilde) geleneksel yöntemlere kıyasla daha baskın gerçekleştiği fakat dayanım seviyesi açısından da geleneksel yönteme kıyasla %20 seviyesinde daha yüksek mukavemet değerlerinin olduğu gözlenmiştir (Chmelko ve diğ., 2023).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, eklemeli imalat ve geleneksel yöntemlerle üretilen AlSi10Mg alaşımlarının mekanik ve metalürjik farklılığı oldukça geniş biçimde araştırılmıştır. Bir çalışmada, LPBF yöntemiyle üretilmiş alüminyum alaşımının, döküm olarak üretilen numunelere kıyasla %14 daha az poroziteye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca eklemeli imalat numunelerin döküm numunelere göre çekme dayanımı %28,6, sertliği %23,69, kırılma tokluğu %50 ve kayma gerilmesinde %32,55 daha yüksek performans sergilediği görülmüştür. Sonuç olarak LPBF eklemeli imalat yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımlarının geleneksel bir yöntem olan döküm numunelere kıyasla daha üstün mekanik ve morfolojik özellikler sergilediği anlaşılmıştır (Saravana Kumar ve diğ., 2022).

Yapılan bir diğer çalışmada, seçici lazer ergitme ile üretilen AlSi10Mg alaşımlarının elektron demeti kaynağı (EBW) ile kaynaklanabilirlik özellikleri araştırılmıştır. Araştırma sonuçları döküm AlSi10Mg alaşımlarının kaynak performansı ile karşılaştırılmıştır. Eklemeli imalat numunelerin kaynak metalinde porozite oranı dökümlere kıyasla daha az oluşmuştur. Isıdan etkilenen bölge için eklemeli imalat numunelerde daha az bölge oluşmuştur. Yapılan araştırma ile seçici lazer ergitme EBW kaynak metodunun eklemeli imalat AlSi10Mg alaşımlarının kaynak süreçlerinde uygun olacağını ortaya koymuştur (Nahmany ve diğ., 2015).

Yapılan bir diğer çalışmada ise SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg malzemesine sahip numunelerin basma yükleri altındaki sürünme davranışları incelenmiştir. 175°C-225°C sıcaklıkta, 100-130 MPa altındaki uygulanan sürünme testlerinde, numunelere 2,63-3,26 A/mm² elektrik akımı verilmiştir. Sonuçta, elektrik akımının sürünme hızını artırdığı tespit edilmiştir. Elektrik akımı uygulanan numunelerde gerilmeli üsteli 19,6 bulunurken, akım uygulamayan numunelerde 16,2 olarak bulunmuştur. Ayrıca numunelerin sürünme aktivasyon enerjileri de ölçülmüş ve akım uygulananlarda 142 KJ/mol enerji seviyesi bulunurken, akım uygulanmayanlarda aktivasyon enerjisi 150 KJ/mol olarak tespit edilmiştir. Elektrik akımının sürünmeyi hızlandırmasının dislokasyon hareketlerini yok ettiği de belirlenmiştir (Uzan ve diğ., 2019).

Endüstriyel uygulamalarda zaman zaman küçük makine elemanlarına ihtiyaç oluşmaktadır. Söz konusu küçük bileşenler AlSi10Mg alaşımından üretilebilir. Bir çalışmada, döküm ve seçici lazer ergitme eklemeli imalat yöntemiyle üretilmiş parçaların mekanik özellikleri karşılaştırılarak, eklemeli imalatın döküm yöntemine yeterli bir alternatif oluşturup oluşturmayacağı araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan döküm ve SLE numunelere T6 ısıtıl işlemi de uygulanarak numunelere sertlik, çekme ve darbe testleri yapılmıştır. Ayrıca mikro yapılar ve numunelerdeki porozite miktarı da araştırılmıştır. Çalışma sonucunda eklemeli imalat ile üretilen numunelerin döküm numunelere kıyasla bir adım önde olabileceği ortaya çıkartılmıştır fakat eklemeli imalat üretim parametreleri doğru ayarlanmadığında döküme kıyasla daha geride bir cevap oluşturacağı da belirlenmiştir (Zygula ve diğ., 2018).

AlSi10Mg alaşımı endüstriyel uygulamalarda çoğunlukla T6 ısıtıl işlemi ile tercih edilmektedir. Literatürde söz konusu alaşımın kullanıldığı çalışmalarda ısıtıl işlemin etkisi sıklıkla incelenmiştir. Yapılmış bir akademik çalışmada, SLE ve geleneksel bir üretim yöntemi olan SLE ile AlSi10Mg numuneler üretilmiş ve numunelere yine T6 ısıtıl işlemi uygulanmıştır. Numunelerin mekanik özellikleri mikro ve makro ölçekte karşılaştırılmıştır. Nanoindentasyon testi ile numunelerin sertlikleri ölçülmüş ve eklemeli imalat numunelerin sertlikleri daha homojen olarak ölçülmüştür ve mikro sertlik açısından 12571 HV vickers sertliği olduğu belirlenmiştir. Ancak T6 ısıtıl işlemi sonrasında faz dönüşümü olduğundan SLE numunelerin sertliği 10071 HV'ye gerilemiştir. Uygulanan çekme testi ile SLE numunelerin çekme dayanımı 333 MPa olarak belirlenmiş ve döküm numunelere kıyasla %12 daha yüksek mukavemet olduğu anlaşılmıştır. Basma testi ile de SLE numuneler daha yüksek basma dayanımı oluşturmuştur. Çalışmadan elde edilen bir diğer çıktı ise T6 ısıtıl işlemi her ne kadar sertlik değerini düşürse de mukavemeti ve numunelerin sünekliğini artırmıştır. Dolayısıyla ısıtıl işlem sonrasında numunelerin işlenebilirliği de artmıştır (Aboulkhair ve diğ., 2016).

Yapılan başka bir çalışmada yine döküm ve SLE numunelerin kırılma ve mekanik özellikleri deneysel, teorik ve simülasyonlarla incelenerek karşılaştırılmıştır. Çalışmada numunelerin çekme testine dayalı ortaya çıkartacakları hasar modeli plastisite modeli çerçevesinde bilgisayar ortamında modellenmiştir. Ayrıca 360'dan fazla çekme testi de numunelere uygulanmıştır. Çekme testleri sonucunda SLE numunelerin akma dayanımı %10, çekme dayanımı %20 daha fazla oluşmuştur. Mikroskobik incelemeler doğrultusunda, döküm numunelerdeki porozite miktarı SLE numunelere kıyasla çok daha yüksek oluşmuştur. Kırılma testleri sonucunda ise döküm numunelerin kırılmaya bağlı

birim uzama miktarları SLE numunelere kıyasla yine yüksek oluşmuştur. Geliştirilen matematiksel modellerin ise deneysel bulgulara kıyasla çok yakın doğru sonuçlar verdiği oluşturduğu gözlenmiştir (Roth ve diğ., 2021).

Yapılan başka bir çalışmada ise lazer toz yatağında birleştirme (LPBF) esasına dayalı olarak üretilen AlSi10Mg alaşımlarına top üzeri plaka (ball on plate) tribolojik testleri uygulanmıştır. Tribolojik testler için aşındırıcı malzeme çelik ve alümina olarak tercih edilmiştir. Sonuçlarda ise üretim parametrelerinin tribolojik davranış üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Üretim parametrelerine bağlı olarak numunelerde eşit dağılım göstermeyen, anizotropik aşınma davranışı ortaya çıktığı gözlenmiştir. Çelik top aşındırıcı ile yapılan testlerde adhezif aşınma gözlemlenirken, alümina top kullanılan testlerde yapışma aşınması olduğu görülmüştür. Çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç ise top üzeri plaka (ball on plate) aşınma testinde mesafenin aşınma sonuçlarını etkilediği de anlaşılmıştır (Venettacci ve diğ., 2022).

Başka bir çalışmada, LPBF ile üretilen AlSiMg10 alaşımlarına T6 ısıtım işlemi uygulanmış ve ısıtım işlem öncesi ve sonrası disk üzeri pin (pin on disk) tribometresi ile numunelerin kayma aşınma davranışları karşılaştırılmıştır. Ayrıca ısıtım işleminin numunelerin sertliği, mikro yapısı ve yoğunluğuna olan etkisi de belirlenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde katmanlı üretilmiş yapıların aşınma hızı oldukça düşük çıkmıştır. Ayrıca yapılarda porozite olması aşınma davranışına olumsuz etki yarattığı anlaşılmıştır (Tonolini ve diğ., 2021).

Seçici lazer ergitme yöntemiyle LPBF temelde aynı üretim sürecini ifade etmektedir. İki yöntemde de yapılar bir toz yatağında lazerle üretilmektedir. Çalışmalarda iki isimde kullanılabilir. Metal eklemeli imalat sürecinde en yaygın yöntem olarak bilinmektedirler ve dolayısıyla akademik çalışmalar bu yöntemler etrafında yoğunlaşmıştır. Yapılan bir çalışmada LPBF ile üretilen yapıların freze operasyonu ile işlenebilirliği araştırılmıştır. Döküm numuneler ile eklemeli imalat numunelerin freze işlemi süresince işlem kuvvetleri, çapak oluşumu, yüzey morfolojileri karşılaştırılmıştır. Sonuçta ise numune geometrisinin işlenebilirliği etkilediği anlaşılmıştır (Zimmermann ve diğ., 2021).

AlSi10Mg alaşımları geleneksel olarak çoğunlukla döküm yöntemiyle üretilmektedir. Bu doğrultuda mevcut çalışmalarda eklemeli imalat ile üretilen AlSi10Mg alaşımları çoğunlukla döküm yöntemiyle üretilen alaşımlarla karşılaştırılmaktadır. 2019 da yapılan bir çalışmada SLE ve döküm olarak üretilen numunelerin işleme esansında ortaya koyduğu davranış ve işleme sonrası yüzey yapıları araştırılmıştır. Döküm

numuneler işleme esnasında sünek davranış sergilerken, SLE numunelerin ise gevrek bir davranış oluşturduğu tespit edilmiştir. Ayrıca diğer çalışmalara benzer şekilde SLE numunelerin çekme ve akma dayanımları döküm numunelere kıyasla daha yüksek olmuştur. Çalışmadan elde edilen bir diğer sonuç ise SLE yöntemiyle üretilen AlSi10Mg kimyasal yapısında ki içerik açısından daha dengeli bir dağılımın olduğu anlaşılmıştır (Yan ve diğ., 2020).

Bu çalışmanın da temel aşınma türü olan erozyon çalışması ile ilgili olarak literatürde çeşitli faaliyetler yürütülmüştür. Kuru erozyon, bulamaç erozyonu (Slurry) ve çeşitli alaşımlara özgü erozyon aşınması çalışılmıştır. Ayrıca söz konusu kuru erozyon aşınmasına sadece döküm veya eklemeli imalat numuneler uğramamaktadır. Kompozit bileşenlerde bile çalışma ortamına bağlı olarak kuru erozyon aşınmasının ortaya çıktığı görülebilir. Borik asitin matris malzemesi olarak kullanıldığı ve cam fiberle takviye edilmiş kompozit yapılarda çalışma ortamına bağlı olarak kuru ve katı partikül erozyon aşınması oluşabilir (Bagci ve Imrek, 2011). AlSi10Mg alaşımlarının da çalışma ortamları incelendiğinde erozyon aşınmasına maruz kalabilirler. Yapılan bir çalışmada, Silisyum oksit (SiO_2) aşındırıcı kumları kullanılarak AlSi10Mg yapıların slurry erozyon aşınması test edilmiştir. Test numuneleri SLE yöntemiyle üretilmiştir. Söz konusu çalışma ile çeşitli dönme hızlarında alüminyum yapıların aşınma davranışını belirlemiştir ve ayrıca özgün yönüyle literatürde pek rastlanılmayan bir örnek teşkil etmektedir (Demirsöz ve diğ., 2022).

Yapılan başka bir çalışmada ise T6 ısıtım işlemi uygulanmış ve SLE ile üretilen AlSi10Mg yapıların, erozyona bağlı mekanik özelliklerinde oluşan değişim ölçülmeye çalışılmıştır. Alüminyum numunelerin mikro yapısı, mekanik özellikleri, darbe dayanımları ve erozyon özellikleri incelenmiştir. Ayrıca erozyona bağlı olarak numunelerde meydana gelen bozulmanın mekanik özelliklere etkisi de belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, uygulanan ısıtım işlemin numunelerin erozyon direncini artırdığını belirlemiştir. Erozyon sonucunda ısıtım işlemi uygulanmış ve uygulanmamış her iki tip numunenin de çekme dayanımı ve darbe dayanımları azalmıştır. Çünkü partikül çarpmasına bağlı olarak yüzeylerde mikro çatlaklar olduğu tespit edilmiştir. Erozyon sonucunda ulaşılan bir diğer bulgu ise, yüzeylerde oluşan silisyum nano parçacıklarının katı çözelti şeklinde alüminyum matrisine yerleşerek, matrisi yumuşattığı ve numunelerin yüzde uzama miktarlarını artırdığını göstermiştir (Huang ve Hung, 2021).

Katı partikül erozyon aşınmasının tespit edilmesinde genellikle ASTM G76 ve G211 standartları kullanılmaktadır. Konu özelinde yüksek hız, yüksek sıcaklık ve çeşitli erozyon parametrelerinin mevcut oluşu, standartlar dahilinde söylenmektedir. Ayrıca erozyon aşınmasını tespit etmeye yönelik bir test makinesinin üretilmesinde bu standartlardan yararlanılabilir. Yapılan bir çalışmada, ASTM standartları dahilinde geliştirilen bir katı partikül erozyon aşınması test cihazı ile uçak jet motorları türbin kanatlarında kullanılan Inconel 718 malzemesinin yüksek sıcaklık ve hız dahilinde ki erozyon aşınması davranışı belirlenmeye çalışılmıştır. Sonuçta ise Inconel 718 alaşımlarının erozyon cevaplarını tespit etmede başarılı sonuçlar sergileyen ve uluslararası standartlar uyumluluğunda bir katı partikül erozyon test cihazı geliştirilmiştir (Demirci ve Bağci, 2021).

Katı partikül erozyon aşınması sadece hava araçlarında ortaya çıkmamaktadır. Bir çalışmada, kuzey kutbu denizinde seyir halinde olan gemilerin, buzullarla çarpışmalarına bağlı olan parça yüzeylerinde meydana gelebilecek erozyon aşınması bilgisayar destekli yazılımlarda hesaplamalı akışkanlar mekaniği (CFD) ve ayrık elemanlar yöntemi (DEM) ile modellenmeye çalışılmıştır. Buz parçalarının hareketi ayrık elemanlar yöntemi ile modellenmiş olup, CFD simülasyonlarına bağlı gelişen aşınma sonuçlarıyla matematiksel modellerden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak tartışılmıştır (Lee ve Lee, 2023).

Katı partikül erozyon aşınması havacılık, denizcilik ve otomotiv sektöründe ortaya çıkan sorunlardan biridir. Söz konusu sektörlerde, çeşitli alüminyum alaşımları da sıklıkla tercih edilmektedir. Yapılan bir çalışmada, AA7075 alüminyum alaşımlarının uğradığı erozyon aşınmasına bağlı sert plastik erozyon aşınması incelenmiştir. Çalışmada alaşımların erozyon bağlı olarak uğradıkları hasar mekanizması, SEM ve detaylı mikroskop görüntüleri ile incelenmiştir. Ayrıca yapılara çeşitli partikül çarpma açılarında katı partikül erozyon aşınma testleri de uygulanmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler ultra ince taneli ayarlanarak aşınma cevapları da karşılaştırılmıştır. Sonuçta ise AA7075 numunelerin taneleri incelidikçe, katı partikül erozyon aşınma oranlarının azaldığı tespit edilmiştir. İnce tane yapısı malzeme özelliklerini homojenleştirmiş ve erozyon aşınmasını parça yüzeyine dağıtarak, aşınma miktarını azaltmıştır (Kaya, 2018).

AA7075 ve AlSi10Mg alaşımları endüstriyel alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Otomotiv, uzay, havacılık, askeri ve denizcilik önem arz eden sektörlerde bu iki alaşımda kullanılır ve bu sektörlerde katı partikül erozyon aşınması gözlemlenebilir. İki alaşıma da genellikle T6, yapay yaşlandırma gibi ısıt işlemler uygulanmaktadır. Bir çalışmada, AA7075 alaşımına T6, yapay yaşlandırma ve

çözündürme ısıt işlemleri uygulanarak katı partikül erozyonuna karşı numunelerin verecekleri cevap deneysel olarak incelenmiştir. Erozyon testleri 45° çarpma açısında, 75 m/sn hızda ve 180 mesh partikül boyutu ile uygulanmıştır. Sonuçta ise yapay yaşlandırma ve T6 uygulanmış numunelerdeki erozyon oranı, çözündürme uygulanan numunelere kıyasla çok daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çözündürme uygulanmış numunelerdeki erozyona bağlı yüzey hasarı çok daha şiddetli oluşmuştur (Karabay ve diğ., 2015).

Yapılan bir diğer çalışmada ise AC₄C alaşımları ile alüminyum takviyeli (Al₁₈B₄O₃₃ whisker) AC₄C kompozit yapıların katı partikül erozyon aşınma davranışları karşılaştırılmıştır. Erozyon testleri 15°- 90° arası çarpma açılarında ve 4 farklı hızda (55 m/sn, 140 m/sn, 198 m/sn, 243 m/sn) gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarda ise kompozit yapının yüksek partikül çarpma hızlarında erozyon hızlarının fazla olduğu anlaşılmıştır. Ancak düşük hızlarda kompozit numunelere daha az aşınmıştır (Tu ve diğ., 1998).

Literatürde alüminyum alaşımları haricinde metalik malzemelerin erozyon aşınması davranışlarını açıklamaya yönelik çalışmalarda mevcuttur. Bir çalışmada, metalik malzemelerin uğradıkları erozyon aşınmasına yönelik olarak teorik bir model geliştirilmiş ve geliştirilen modelin deneysel sonuçlarla kıyaslandığında başarılı olduğu da görülmüştür. Geliştiren modelde aşındırıcı partikül malzemesinin sertliği, boyutu, çarpma hızı gibi parametrelerde mevcuttur (Sundararajan, 1995).

Uygulanan bir diğer çalışmada ise jet motor türbin bileşenlerine bir alternatif oluşturmak amacıyla, titanyum alüminyum alaşımlarının katı partikül erozyon aşınması araştırılmıştır. Söz konusu alaşım plazma ark kaynağı ve süper CR teknolojisi ile Y-titanyum alüminid olarak üretilmiş ve erozyon ile beraber kavitasyon aşınması da irdelenmiştir. Sonuçlarda ise jet motor bileşenlerinde kullanılan malzemelerden daha az aşınan bir yapı olduğu ortaya çıkartılmıştır (Howard ve Ball, 1995).

Katı partikül erozyon aşınmasının oluşmasında birçok faktörün rolü bulunmaktadır. Bu faktörler arasında aşındırıcı partikül boyutları erozyon aşınmasını ciddi oranda etkilemektedir. Bu konu özelinde yapılmış bir çalışmada, 2024 Alüminyum alaşımı ile üretilen kompozit malzemesinin SiC aşındırıcı partiküllerle meydana getirdiği darbeye dayalı erozyon aşınması belirlenmeye çalışılmıştır. Erozyon testleri için kullanılan numunelerin boyutları 30mm * 25mm * 3 mm olarak ayarlanmış olup, aşındırıcı partikül boyutları ise 3.5 mikrometre (μm), 10 mikrometre ve 20 mikrometre olarak değiştirilmiştir. Partikül boyutunun erozyon üzerine olan etkisi için örnek teşkil eden bir çalışma niteliği kazanılmıştır. Partiküller 23 m/sn hızda ve 90° çarpma açısında

numuneye isabet etmektedir. Çalışma sonucunda ise erozyona bağlı gelişen ağırlık kaybı ölçülmüş olup, partikül boyutu 3.5 μm iken 2.58 miligram (mg) olarak ölçülmüştür. Partikül boyutu arttıkça da ağırlık kaybı artmıştır. Literatürde ki bilinen durumları da göz önünde bulundurarak, partikül boyutu arttıkça katı partikül erozif aşınmasının artacağı sonucuna ulaşılmıştır (Liang ve diğ., 1995).

Alüminyum alaşımları üzerine uygulanan bir diğer çalışmada ise, alüminyum matrisli kompozit (AMC) numuneler korozyon dirençleri, katı partikül erozyonları ve kayma aşınmaları açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada üretilen kompozit numuneler için MoSi₂ fazı vakum ark eritme yöntemiyle üretilmiş ve daha sonra elde edilen damlacıklar 30 saat boyunca öğütülerek ince toz haline getirilmiştir. Daha sonra MoSi₂ tozları Alüminyum 1050 alaşımına sırasıyla %2, %5 ve %10 hacimsel oranda eklenmiştir. Bu şekilde numuneler çeşitlendirilmiştir. Çalışma sonucunda tüm numunelerde homojen bir partikül dağılımı gözlenmiş olup bu dağılım çoğunlukla izole intermetalik fazlardan oluştuğu anlaşılmıştır. Kayma aşınması açısından, takviye fazının varlığı aşınmaya olumlu katkı sağlayarak daha az aşınan yapılar elde edilmesini sağlamaktadır. Katı partikül erozyon testler içinse, kullanılan partikül miktarları 0 gramdan (gr) 600 gr'a kadar değiştirilerek birçok deney yapılmıştır. Deneyler sonucunda ise %10 MoSi₂ ile üretilmiş kompozit yapı en fazla aşınan numune grubunu oluştururken, %2 MoSi₂ dahil edilmiş yapı en az aşınmayı sergilemiştir. Bunalar ek olarak saf Al1050 alaşımı %10 katkılı üretilen numunelerden de daha az aşınmıştır (Gousia ve diğ., 2016).

Yapılmış bir diğer çalışmada, SiC takviyeli Alüminyum-Silisyum (Al-Si) kompozitlerinin ve saf Al-Si alaşımlarının bulamaç (slurry) erozyon aşınması tespit edilmeye çalışılmıştır. Deneylerde iki farklı ortam simüle edilmeye çalışarak, test numuneleri deniz suyunda ve madencilik ortamında bulunabilecek tuzlu su ortamında test edilmiştir. Madencilik ortamı asidik ortamı temsil etmektedir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde ise kompozit numuneler (aşındırıcı kum ve çarpma hızından bağımsız olarak) hem deniz suyunda hem de asidik ortam da alaşım numunelerden daha iyi aşınma direnci sergilemişlerdir. Kumların boyutları, numuneye yönelme hızları arttıkça ise aşınma şiddetli olarak ortaya çıkmıştır. Kum hızlarının hızları 1100 rpm'ye ulaşmasıyla aşınma miktarları düşmüştür. Bunu sebebi olarak, partiküller belirli bir hız değerinden sonra numuneye ulaşmak yerine birbirleriyle çarpışmasıyla numuneye temas etme hızları düşmekte ve numunelerle temas azaldığı düşünülmektedir ve bu sebeple de aşınma miktarı azalmaktadır. Çalışmadan elde edilen bu bulgu farklılık oluşturmaktadır (Das ve diğ., 2006).

Katı partikül erozyon aşınması üzerine tamamlanmış bir incelemede, deneysel verilere dayalı olarak katı partikül erozyonunu açıklamaya yönelik yarı mekanistik bir model geliştirilmiştir. Deneylerde kullanılan partiküllerin hızları partikül hızı ölçer adı verilen (PIV) sensörlerle ölçülmüştür. Deneylerde kullanılan aşındırıcı partikül boyutları ise 150 μm olarak ayarlanmıştır. Deneylerde farklı malzemeler üzerine, farklı çarpma açıları ve hızlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylere bağlı geliştirilen yarı mekanistik modelde ise, erozyonun iki ana mekanizmaya dayandığı varsayılmıştır. Bu mekanizmalar kesme ve deformasyon olarak değerlendirilmiştir. Bu kabullerle ve deneysel sonuçlarla geliştirilen matematiksel modelin, deneysel sonuçlarla oldukça uyumlu sonuçlar verdiği ortaya konmuştur (Arabnejad ve diğ., 2015).

Yapılan bir diğer çalışmada ise Alüminyum 1900 (Al1900) alaşımının su ve kum karışımıyla slurry erozyon aşınması tartışılmıştır. Test numuneleri farklı açılarda deney düzeneğine yerleştirilmiş ve çeşitli hızlarda döndürülmüştür. Çalışma sonucunda ise aşınma hızıyla numunelerin uğradıkları kütle kaybı ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde ise aşınma hızının, çarpma açısının 90° 'ye kadar artmasıyla arttığı ölçülmüştür. Çalışmada beklenen durum, 45° çarpma açısına kadar sünek malzemelerde aşınma miktarı yüksek oluşurken, bu çalışmada maksimum ağırlık kaybı 90° çarpma açısında gerçekleşmiştir. Numunenin dönüş hızının artması da aşınma hızını üstel biçimde artırmıştır. Aşınma sonucunda numunelerden yüzey görüntüsü ve mikroskop görüntüsü alınarak metalografik incelemeler ile deney sonuçları desteklenmiştir (Jha ve diğ., 2011).

Katı partikül erozyon aşınmasının hangi hasar mekanizmaları ile meydana geldiği, aşınmada hangi parametrelerin baskın rol oynadığı bir tartışma konusudur. Literatürde birçok çalışma deneysel metodoloji ile işleyerek tekil bir malzeme üzerinde erozyonu açıklamaya çalışırken, bir grup çalışma ise erozyonu tespit etmeye yönelik matematiksel model geliştirmeye çalışmaktadırlar. Bu kapsamda, yapılan bir çalışmada metalik malzemeye sahip levha biçimli parçaların uğrayabilecekleri katı partikül erozyon aşınması sonlu elemanlar simülasyonları ile analiz edilmiş ve simülasyonlardan elde edilen bulgular erozyonu anlamaya yönelik bir model eldesinde kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen deneysel kurgu ve veri seti, erozyon aşınmasında akla gelen Hutchings'in 1976'da ki çalışmalarından alınmıştır. Hutchings erozyon üzerine uyguladıkları çalışmalar ile bu alanda öncü rol oynamaktadır. Çalışmadan alınan deneysel içerikle analiz çalışmaları yürütülmüş ve analiz esnasında kullanılan malzeme modellemesi; sonlu deformasyonlar, gerilme sertleşmesi (pekleşme), termal yumuşama, hız duyarlılığı, sürtünme teması, sürtünmeden kaynaklanan ısı üretimi ve iletimini içermektedir.

Sonuçlar ile yapılan modelleme ile çarpma açısı ve hızı arasındaki etkileşim incelenerek, plastik akış, sürtünme mekanizmalarının etkisi ortaya konmuştur. Ayrıca simülasyonlar ile çarpma açıları 0° - 90° arasını kapsamakta ve çarpma hızları ise 141 m/sn ile 2000 m/sn arasında değişmektedir. Bu sebeple de ortaya konan model yüksek hız olgusunu da içinde barındırmaktadır. Sonuçta simülasyonlara bağlı geliştirilen model deneysel sonuçlarla oldukça yakın sonuçlar oluşturmıştır (Molinari ve Ortiz, 2002).

Literatürde ki uygulanan çalışmalar değerlendirildiğine, alüminyum ve çeşitli alüminyum takviyeli kompozit malzemelerin katı partikül erozyon aşınması davranışları incelenmiştir. Ayrıca yine eklemeli imalat gibi yeni bir tekniğe ait mevcut çalışmalar yürütülmüştür. Ancak çalışmalarda kriyojenik ortam pek fazla gözlenmemiştir. Kriyojenik ortam olgusu malzemelerin aşınma gibi mekanik davranışlarını değiştirebilir. Sadece malzemelere etki olarak değerlendirmeyip, kriyojenik ortam şartlarını oluşturmak bile içinde zorluklar barındırmaktadır. Küresel ölçekte kriyojenik ortam yapay şekilde oluşturulabilir ancak bazı nadir örnekler kriyojenik ortam koşullarının nadirde olsa doğal biçimde oluştuğunu göstermektedir. Yapılan bir çalışmada uydu görüntüleri ve çeşitli bölgelerden alınan hava sıcaklık değerleri ölçülmüş ve özellikle Antarktika kıtası gibi buzul yoğun bölgelerde mineraller soğuk etkisiyle yeni bir bileşik haline gelmiştir. Geline nokta ile birlikte durdukça etrafa kendi ısını vererek azot benzeri bir yapının oluştuğu anlaşılmıştır. Sıcaklık değerleri azot kadar düşük olmasa da -120°C değerlerine ulaştığı ölçülerek, kriyojenik şartların doğal süreçlerle meydana gelebileceğini göstermiştir (Cudahy ve diğ., 2016).

Kriyojenik ortam koşulları dünya üzerinde nadiren ve tesadüfi olarak oluşsa da uzayda kriyojenik ortam şartları baskındır. Uygulanmış bir çalışmada uzay da bulunan meteorit, meteoroid ve mikrometeoroid gibi göktaşı benzeri yapıların uzay atmosferik koşulları sebebiyle yaşadığı değişimler ölçülmeye çalışılmıştır. Oldukça düşük sıcaklıklarda yapılan çalışmalarda büyük taneli olan meteorit ve meteoroid benzeri partiküller gevrek bir yapıya doğru evrilmiştir. Ancak mikro taneli meteoroid yapısı diğer tip numuneler kıyasla biraz da sünek karakterini korumuştur. Bunun sebebi olarak, mikro tane yapısından kaynaklı olarak yapıyı soğutmak biraz daha zorlaştığı belirtilmiştir (Rubin ve Grossman, 2010). Tez çalışmasında da incelenen erozyon aşınması uzay araçlarına yönelik olup, uzay araçları kriyojenik ortam şartlarında çalışmaktadır. Ayrıca atmosferik etkiler sebebiyle meteoroid benzeri partiküllerle çarpışma oluşabilir.

Yapılan bir diğer çalışmada ise uçak kanatlarının yine çalıştıkları ortam gereği üzerlerinde bir buzlanma oluştuğunu ve bu buzlanmanın da uçağı aerodinamik olarak

etkileyeceği tartışılmıştır. Çalışmada FAR-25/Ek C standartına göre sıvı su (sıvı azot) içeriği ve tanecik çapı gibi bağımsız değişkenler belirlenmiş ve bu faktörlerin buzlanmaya olan etkisi ölçülmüştür. Deneysel sonuçlardan ise %6,66 oranında buz alanı oluştuğu ve %11,15 seviyesinde buz çevresi oluştuğu gözlemiştir. Çalışmada sıvı azot kullanımı ile sıcaklıkların oldukça düşük seviyelere ulaşması (-196°C) ve ortaya çıkan buzlanmanın artması uçağın emniyetine zarar verdiğini göstermektedir. Bu sebeple uçak kanatlarında oluşabilecek buzlanmanın tehlikeleri ölçülmüştür (Akbal ve diğ., 2022).

Yapılan bir diğer çalışmada, cam elyaf/epoksi polimer kompozitinin (GFRP) farklı sıcaklıklardaki darbe davranışı incelenmiştir. 18 adet GFRF kompozit numunesi, vakum infüzyon yöntemi ile üretilmiştir. Bu numunelerden 9 tanesine iç kimyasal reaksiyonlarının tamamlamalarını sağlamaları amacıyla 353 Kelvin (K) de 3 saat post kürleme uygulanmıştır. Hazırlanan numuneler oda sıcaklığı (295 K), kuru buz sıcaklığı (199 K) ve sıvı azot (100 K) sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Kuru buz sıcaklığı ile sıvı azot sıcaklık değerleri kriyojenik ortam koşullarını temsil etmektedir. Bu sıcaklık değerlerinde numunelere düşük hızda darbe deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ise kriyojenik koşullarda GFRP kompozitlerin daha küçük görünür zararlar gösterdiği ve diğer koşullara kıyasla daha sert olduğu gözlemlenmiştir. Ancak kriyojenik şartlarda numunelerin enerji emilimi de azalmıştır. Post kürleme uygulanan numunelerde ise enerji emilimi daha yüksek oluşmuştur ve görünür zarar post kürlenmiş numunelerde azalmıştır. Çalışma post kürleme işleminin kriyojenik şartlarda, kompozit numunelere olumlu katkı sağladığını göstermiştir (Ma ve diğ., 2016).

Yapılan bir diğer çalışmada ise kriyojenik şartların malzemelerin tribolojik davranışlarına olan etkisi ölçülmüştür. Çalışmada polimerler, kompozitler, TiN (Titanyum Nitrür) ve karbon kaplama uygulanmış numunelere; gaz hidrojen ve sıvı hidrojen ortamlarında tribolojik davranışı anlamaya yönelik deneysel faaliyetler yürütülmüştür. Deneyler 4.2 K'den (-267°C) oda sıcaklığına kadar sürmüştür. Araştırma sonucunda ise TiN ve karbon kaplı numunelerin aşınma davranışı düşük sıcaklıklarda ($77\text{ K}=-196^{\circ}\text{C}$) pek fazla etkilenmediği görülmüştür. Ancak çalışmada kullanılan kuru helyum atmosferi sonuçları önemli oranda etkilediği anlaşılmıştır. Karbon kaplanmış numunelerin pin üzeri dik testinde çizildiği görülmüş fakat yüzey tabakanın yenilenmediğini de göstermiştir. Ayrıca düşük sıcaklıkların malzeme davranışlarını etkilediğinden adhezif aşınmayı artırdığını da göstermiştir (Hübner ve diğ., 1998).

Bir diğer çalışmada ise uzay araçlarında kullanılabilecek ve kriyojenik ortam koşullarına maruz kalan fiber takviyeli kompozitlerin dayanım, sertlik ve mekanik

yönden davranışın nasıl etkilendiğini ortaya koyan bir araştırma yürütülmüştür. Sonuçlarda ise kriyojenik şartların numunelerin sertliğini artırdığını fakat daha fazla gerek davranış sergilediğini ortaya koymuştur (Hohe ve diğ., 2021).

Bir diğer çalışmada ise inşaat sektörüne yönelik olarak, kriyojenik ortam koşullarına maruz kalan betonun davranışındaki değişiklikler, ölçülmeye çalışılmıştır. Çalışma bulguları incelendiğinde, betonun kriyojenik şartlarda mekanik özelliklerinin iyileştiği fakat donma, çözülme döngülerine karşı bozulma hızlarının çok daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca kriyojenik sıcaklıklarda, betonun termal özellikleri ortam sıcaklığına göre büyük ölçüde değişmiştir. Kriyojenik ortam birçok yönden yapıyı etkilemiştir (Jiang ve diğ., 2020).

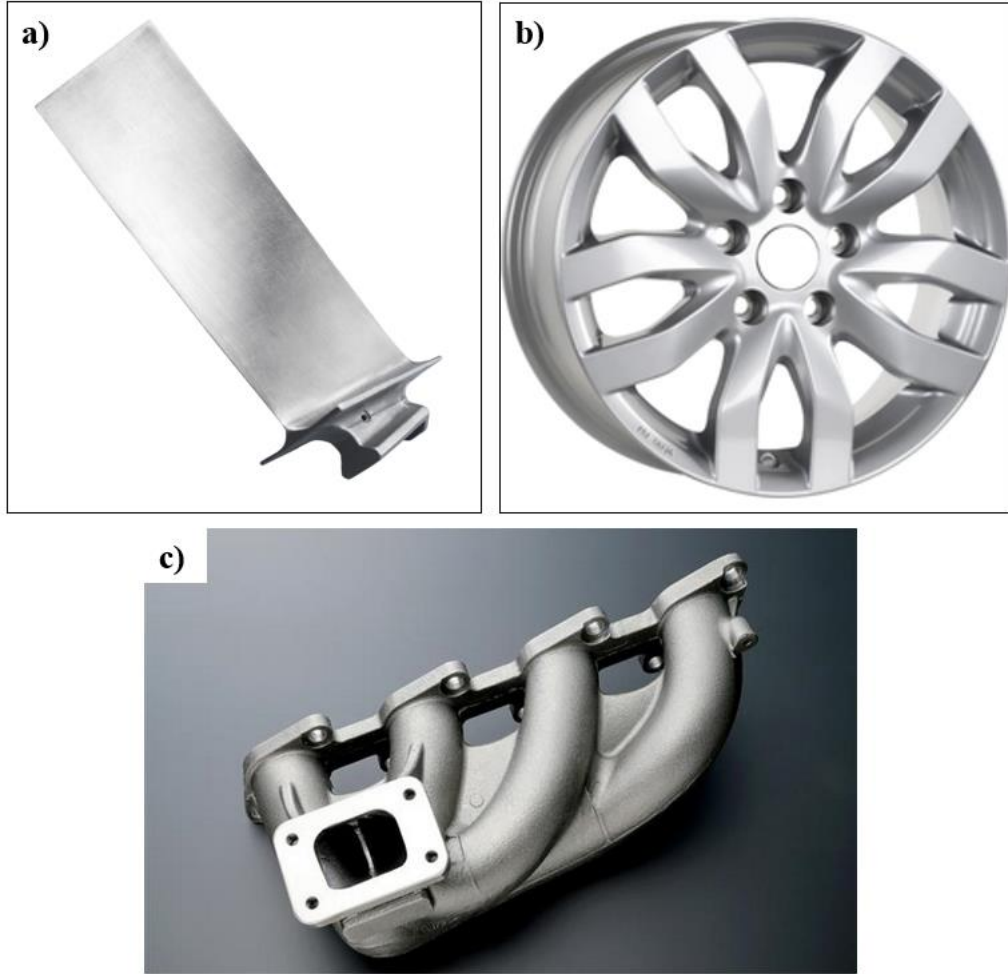
Bu tez çalışmasında seçici lazer ergitme ve döküm olarak üretilen AlSi10Mg alaşımlarının kriyojenik şartları da içinde barındıracak şekilde katı partikül erozyon aşınması cevabı araştırılacaktır. Literatür incelemeleri değerlendirildiğinde, AlSi10Mg alaşımları üzerine uygulanan mekanik özellikleri tespit etmeye yönelik çalışmalar mevcuttur fakat erozyon aşınması ile ilgili çok fazla çalışmaya ulaşılmamıştır. Üretim yönteminin ve üretim parametrelerinin yapıya olan etkisi konusunda birçok çalışma mevcuttur. Bu sebeple, tez çalışmasında elde edilen üretim yöntemine bağlı bulgular literatürle kıyaslanabilir. Bir diğer yönden ise kriyojenik şartların özellikle kompozit numunelerin mekanik davranışına olan etkisi literatürde araştırılan bir konudur. Ancak kriyojenik şartlarda gözlemlenen bir katı partikül erozyon aşınması incelemesine rastlanılmamıştır. Bu sebeple tez çalışmasının özgünlük kazandığı söylenebilir. Literatüre ek olarak eklemeli imalatı özellikle ülkemizde geldiği nokta önemlidir. Birçok sektöre cevap oluşturma potansiyeli sunan eklemeli imalat teknolojilerinin ulusal sınırlarda ne boyutlarda olduğu, hangi firmaların tercih ettiği ve hangi laboratuvarlarda üretim imkânı olması gibi konular eklemeli imalatın ülkemizdeki önemini göstermektedir.

2.1. Piyasa Araştırması

Katı partikül erozyon aşınması havacılık, uzay, otomotiv ve çeşitli sektörlerde ortaya çıkabilecek bir hasar mekanizması ifade etmektedir. Yüksek irtifa seviyelerinde seyir halinde olan bir hava aracı, uzayda bulunan bir uydu veya hareket halindeki bir araç çalışma ortamları sebebiyle bu tür aşınmalara maruz kalabilirler. Atmosferik koşulların mikro ve nano boyutlu partiküller barındırdığı bilinmektedir (Gieré ve Querol, 2010). Söz konusu ortam koşullarında, hareket halindeki bir hava aracı bu tip katı partiküllerle çarpışması sebebiyle malzeme kaybına uğramaktadır. Bu tip malzeme kayıpları bileşenler de erozyon aşınması mekanizmasının gelişmesi sebebiyle ortaya çıkmaktadır. Söz konusu aşınmalar sadece hava ve uzay şartlarında ortaya çıkmamaktadır. Hareket halinde ki bir aracın, özellikle tekerlerinde bulunan kauçuk ve jant malzemeleri toprak zeminlerde seyir halinde iken bu tip aşınmalara uğramaktadır. Özellikle otomotivlerin jant malzemeleri AlSi10Mg alaşımından üretilmektedir ve ayrıca otomotiv jantlarının toprak zeminle olan etkileşimini analiz etmek ve parça ömür seviyesini belirlemek için de sonlu elemanlar temelli analiz çalışmaları mevcuttur (Majumder ve diğ., 2023). Bu kapsamda katı partikül erozyon aşınması kritik öneme sahip sektörlerde ortaya çıkabilecek ve tasarımcıların dikkate alması gereken bir problemi ifade etmektedir. Ulusal veya uluslararası çapta otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisine oldukça geniş yatırımlar yapılmaktadır. Söz konusu alanlarda ki yatırım seviyeleri milyar dolarla ifade edilmektedir. Bu sektörlerin mühendislik ve tasarım faaliyetleri aşamalarında katı partikül erozyonu gibi spesifik bir aşınma mekanizmasının bilinmemesi, kaynakların verimsiz kullanılmasıyla sonuçlanabilir.

Yürütülmekte olan tez projesinin ilgilendiği konulardan bir diğeri ise metal eklemeli imalat sürecidir. Metallerin eklemeli imalatı, karmaşık geometrilere sahip yapıları geleneksel üretim yöntemlerine kıyasla daha hızlı, malzeme tasarruflu ve esnek bir biçimde üretmeye olanak tanıyan yenilikçi bir üretim teknolojisidir. Toz yataklı ergitme, doğrudan enerji biriktirme, seçici lazer ergitme ve birçok katmanlı üretim teknolojisiyle, yüksek hassasiyet ve mekanik dayanım gerektiren metal parçaların üretimi mümkün hale gelmiştir. Bu süreçlerde kullanılan parametreler ve hammaddeler, elde edilen parçaların mikro yapısını ve dolayısıyla mekanik performansını doğrudan etkilemektedir. Özellikle havacılık, otomotiv, savunma ve biyomedikal sektörlerinde kritik öneme sahip olan bu teknoloji, yerli üretim kapasitesinin artırılması açısından stratejik fırsatlar sunmaktadır (Gisario ve diğ., 2019). Son yıllarda popüler hale gelen

eklemeli imalat yöntemleriyle alüminyum alaşımları, paslanmaz çelikler, titanyum alaşımları veya nikelli alaşımları üretmek mümkün hale gelmiştir. Söz konusu alaşımların birçok çeşidi küresel ölçekte eklemeli olarak üretilmektedir. Ancak ülkemizde ve uluslararası ölçekte en yaygın üretimi mevcut olan malzemeler değerlendirilecek olursa; ALSi10Mg alaşımı, paslanmaz çelikler, Ti6Al4V ve Inconel 718 gibi alaşımlar karşımıza çıkmaktadır. Söz konusu alaşımlar havacılıkta jet motor türbin kanatlarında, uzay aracı dış kabuk ve panellerde, otomotiv jantları ve egzoz manifold gövdesinde tercih edilen malzeme gruplarıdır. Bileşenlerin karmaşık geometrilerden meydana gelmesi düşünüldüğünde metal eklemeli imalat süreçleri, söz konusu malzemelerin üretiminde bir tercih sebebi olarak ortaya çıkmaktadır. Metal eklemeli üretim süreçleriyle beraber kompleks geometrilere sahip bu bileşenler tek operasyonla imal edilebilir hale gelmiştir. Karmaşık geometrilerin anlatımı için Şekil 2.1’de eklemeli imalatla üretilen mevcut olan çeşitli sektör parçaları verilmiştir.



Şekil 2.1. Eklemeli imalat ile üretilmiş sektör bileşenleri, a) Jet motor türbin kanatı, b) Araba teker jantı, c) Otomotiv egzoz manifoldu

Eklemeli imalatın tek operasyonla parça üretimini mümkün kılması ve hızlı prototipleşme imkânı sunması, sektörel anlamda popüler hale gelmesinde önemli etkenlerdir. Parça üretim sürecinde operasyon sayısının artması işçilik ve zamansal maliyeti artırmasından dolayı yeni üretim süreçlerinin keşfine yol açmış ve bu sebeple de eklemeli imalat teknolojileri geliştirilmiştir. Ayrıca eklemeli üretimle üretilen parçalar mekanik özellikler açısından, geleneksel yöntemle üretilen muadillerine kıyasla geri kalmayıp, üstünlükler sergilemesi de tercih edilmesinde imkân tanımıştır. Bu gibi etkileri sebebiyle de günümüze kadar küresel piyasada önemli bir üretim yöntemi olarak karşımıza çıkmaktadır.

2025 yılında Türkiye Eklemeli İmalat Derneği tarafından yayınlanan bir raporda, eklemeli imalatın ülkemizdeki uygulayıcı kuruluşlarına geniş yer verilmiştir (Söylemez., 2025). İlgili rapor incelendiğinde uluslararası büyük ölçekli kuruluşlardan eklemeli imalat ile üretim yapan veya metal katmanlı üretim yapabilme imkânı sunan makineleri üreten firmalara geniş yer verilmektedir. Ayrıca söz konusu bu üreticilerin ülkemizde de distribütörleri bulunmaktadır. Uygulayıcı büyük kuruluşların listesi Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Uluslararası 3D baskı ve metal eklemeli imalat uygulayıcıları

ADDVALUE Eklemeli İmalat Sist.	KARFO Endüstriyel	3Dörtgen
BTECH İleri Mühendislik	NORM 3D	3Dream
DİĞİMODE Bilişim	NOVA	Whole Metal
DMG MORI	Poligon Mühendislik	DentaFab
FRONIUS	PULSE Mühendislik	Axolotl
Herding Endüstri	UPCORES Mühendislik	Coprint Mühendislik
INFO TRON 3D	VOKSEL Mühendislik	Alloya Teknoloji

Çizelgede yer alan firmaların birçoğu küresel ölçekte hali hazırda üretimi mevcuttur. Söz konusu firmaların ürünleri arasında metal eklemeli imalatın uygulanmasında kullanılan makineler ve endüstriyel tip 3D yazıcılar bulunmaktadır. Ayrıca bu firmaların ülkemizde distribütörleri de bulunmaktadır. Ülkemizde birçok sanayi kuruluşu da çizelge de yer alan firmalardan hizmet alımı veya kendi bünyelerinde katmanlı üretimi tercih etmektedir.

Ulusal ölçekte ülkemizde birçok firma eklemeli imalata yönelmiştir. Savunma, havacılık ve otomotiv de karar verici rolde gözüken firmaların üretimlerinde alt tedarikçilerinden eklemeli imalat ile parça üretimi olduğu sektör raporundan anlaşılmaktadır. Türkiye'deki firmalardan eklemeli imalatı tercih eden öncü roldeki firmalar Çizelge 2.2'de verilmektedir.

Çizelge 2.2. Türkiye eklemeli imalat kullanıcı özel sanayi büyük ölçekli sanayi kuruluşları

ASELSAN	GE Aerospace
BİAS Mühendislik	Trabtech Medikal
Earfit Akustik ve İleri Teknolojiler	TEI-TUSAŞ Motor Sanayi
Ford Otomotiv	TUSAŞ

Çizelge 2.2'de yer alan firmalar, ülkemizde sektöre yön veren firmalar olarak nitelendirilebilir. Savunma ve otomotiv alanında eklemeli imalatın kendine yer edindiği çizelgeden anlaşılmaktadır. Sadece özel sanayi kuruluşları eklemeli imalatı tercih etmemektedir. Üniversiteler, Ar-Ge merkezleri ve eğitim merkezleri de eklemeli imalat alanında hizmet vermektedir. Kamu kuruluşu olarak adlandırılan bu tip yerlerde, hem eklemeli imalat ile üretim yapılmakta hem de piyasaya hizmet verilmektedir. Bu tip hizmetleri sunan üniversite laboratuvarları, eğitim merkezleri ve Ar-Ge merkezlerinin geniş bir sunumu Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 2.3. Eklemeli imalat uygulayıcısı üniversite laboratuvarı, eğitim merkezi ve Ar-Ge merkezleri

Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi ALUTEAM
İstanbul Gedik Üniversitesi
İTÜ EKAM
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Sabancı Üniversitesi
Süleyman Demirel Üniversitesi
Yüksek Teknoloji Uygulama Ve Araştırma Merkezi
Gazi Üniversitesi EKTAM
Coşkunöz Eğitim Vakfı

Çizelge 2.3'te yer alan kuruluşlarda akademik çalışmalar ve araştırma faaliyetleri için metal eklemeli imalat ile numune üretim imkânı mevcuttur. Ayrıca söz konusu kuruluşlar sadece akademiye hizmet etmemekte, aynı zamanda özel sanayi kuruluşları içinde eklemeli üretim faaliyetleri gerçekleştirmektedir. Bu kuruluşlara ek olarak Konya Karatay Üniversitesi AKİTEK laboratuvarı, Bursa Uludağ üniversitesinde de eklemeli imalat faaliyetleri gerçekleştirilmektedir.

Dünyada ve ülkemizde, eklemeli imalat teknolojileri hızla yaygınlaşmakta ve geleneksel üretim süreçlerine stratejik bir alternatif oluşturmaktadır. Türkiye'de hem makine üreticileri hem de bu teknolojiyi nihai ürün üretiminde kullanan firmaların sayısındaki artış, ulusal sanayinin bu alanda kaydettiği ilerlemeyi açıkça göstermektedir. Savunma, havacılık, medikal ve otomotiv gibi yüksek katma değerli sektörlerde eklemeli imalatın benimsenmesi, teknolojinin endüstriyel ölçekteki etkisini giderek artırmaktadır. Ayrıca, yerli makine ve malzeme üretiminin gelişmesi, dışa bağımlılığı azaltarak ülkemizin bu alandaki rekabet gücünü pekiştirmektedir. Tüm bu gelişmeler, eklemeli imalatın yalnızca üretim yöntemlerinde değil, aynı zamanda tasarım ve mühendislik anlayışında da dönüşüm yarattığını ortaya koymaktadır

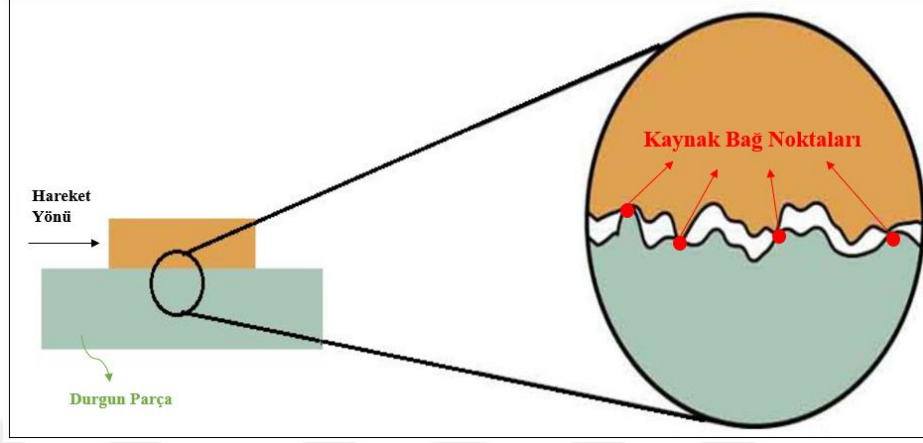
3. AŞINMA MEKANİZMALARI VE EKLEMELİ İMALAT TEKNOLOJİSİ

Sürtünmeye dayalı olarak çalışan makine elemanlarında, sürtünen yüzeylerin ayrılması veya hasarlanması sonucunda makine elemanının tasarlanmış halini kaybetmesi aşınma olarak adlandırılabilir. Aşınma mekanizmaları ise temelde kuru, ıslak ve kuru-ıslak sürtünmeye bağlı olarak gelişen mekanizmalardır. Ancak, bu üç tip sürtünmeye bağlı olarak gelişen yapılan sınıflandırma aşınma mekanizmalarını açıklamada yetersizdir. Malzemelerin sadece birbirleri ile olan izafi hareketi ve teması neticesinde aşınma meydana gelmeyebilir ve aşınmayı 3 tip sürtünmeye bağlı olarak da açıklamak yanıltıcı olmaktadır (Scherge ve diğ., 2003). Yüzeyler üzerinde su buharının patlaması ile oluşan kavitatif aşınma veya yüzeyler üzerine partikül isabet etmesi ile oluşan erozyon aşınması gibi konular sürtünmeye bağlı olarak gelişen aşınma mekanizmaları değildir. Bu kapsamda aşınma türleri ve aşınma mekanizmaları birçok yönden gelişebilir ve çeşitlenebilir. Ayrıca aşınma mekanizmaları makine elemanının çalışma ortamları gereği, her sektörde ortaya çıkan bir problemdir. Sektörel anlamda sadece ortaya çıkmayıp, makine elemanlarının ömür seviyelerini kısaltmakta ve malzemelerin beklenen performansı gösterememesine sebebiyet vermektedir. Bu kapsamda aşınma sürecinin önceden planlanarak, tasarımların bu aşınmayı çözümlemeye yönelik olması gerekmektedir.

3.1. Adhezif Aşınma

Metal çiftlerinin birbirlerine karşı kayma hareketi yapmasıyla meydana gelebilen bu tür aşınmalar; parçalar arasında kaynaklaşma ya da diğer bir adıyla kaynak bağ yapmalarını meydana getirebilirler. Ayrıca, parçaların mekanik yük altında birbirleri yüzeylerinde kaymaları sonucunda parçalar akma sınırlarına ulaşabilirler. Bu akmadan dolayı, yüzeyler birbirine yapışmaya ve kaynak bağları kurmaya başlamaktadır. Hareketin devam edebilmesi için oluşan kaynak bağlar kırılarak, yüzeylerden parça koparmaya başlamaktadır (Podgornik, 2022). Yüzeylerin birbirleri ile kurdukları bağlar ile yüzeyler birleşmeye başlamakta, ancak diğer bir yönden hareketin devam etmesiyle bu iki farklı yüzey, birleşen noktalardan ayrılmaya zorlanmaktadır. Bu aşamada, hareketin baskınlaşmasıyla oluşan bağlar kırılmakta ve kırılmanın bir ek getirisi olarak yüzeylerde deformasyonlar oluşmaktadır. Oluşan bu deformasyonlar da adhezif aşınma mekanizması olarak adlandırılmaktadır (Mishina ve Hase, 2013). Bu tip aşınma

mekanizmaları en yaygın karşılaşılan aşınma türleridir. Şekil 3.1’de iki farklı malzemeye sahip parçanın, birbirleri ile izafi hareketi ve sürtünmesi sonucu oluşan kaynak bağları görünmekte ve adhezif aşınma mekanizması şematik olarak açıklanmaktadır.

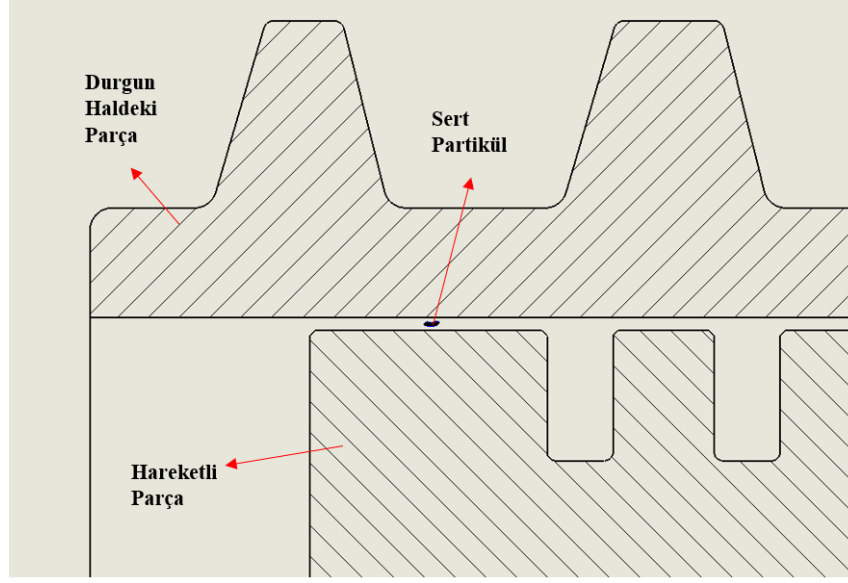


Şekil 3.1. Adhezif aşınma şematik gösterimi

İki yüzeyin birbirleri arasındaki mesafenin artması aşınmayı azaltmada en önemli faktördür. Ancak, aradaki mesafenin mümkün olmadığı değiştirilmediği durumlarda, yüzeylere kaplama uygulanması, iki malzemenin yüzey sertliğini birbirlerinden farklı seçilmesi veya uygun bir yağlama yapılması adhezif aşınmaları azaltmada etkilidir.

3.2. Abrazif Aşınma

Birbirleri ile temas halinde çalışan makine elemanlarının yüzeyleri arasındaki boşluklara dışarıdan toz, partikül, sert parçacık, talaş gibi küçük boyutlu cisimlerin girmesiyle abrazif aşınmalar ortaya çıkar (Khrushchov, 1974). Bu giren parçacıklar yüzeyi bozmaya yönelik kazıcı, çizici etki yaratmaları sebebiyle, yüzeylerde aşınma meydana gelir. Abrazif aşınmaların önüne geçmek için, yüzeylere ısıtma işlemi veya kaplama gibi aşınma önleyici işlemler yapılabilir. Isıtma işlemleri neticesinde sertliği artırılmış parça yüzeyleri, katı partiküllerle etkileşime girmeleri halinde, aşınmalar zor hale gelmektedir. Benzer şekilde kaplama çözümleriyle de yüzeyler koruma altına alınabilir (Torrance, 2005). Diğer bir yönden, yüzeyler arasına küçük partiküllerin sızmasını önlemek için sistemde sızdırmazlık sağlanması da abrazif aşınmayı önlemek için tercih edilebilen çözümlerdendir.



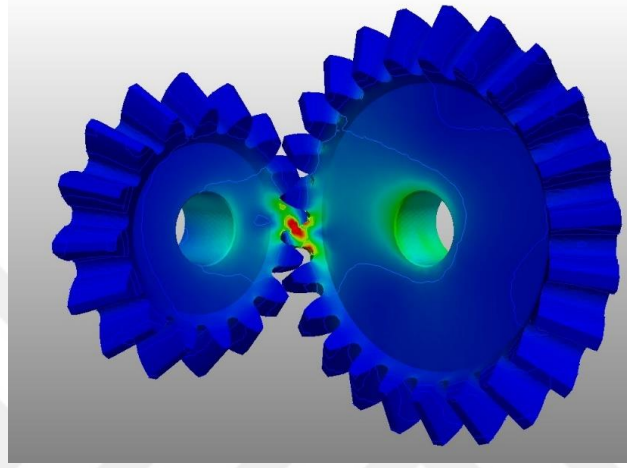
Şekil 3.2. Abrazif aşınma şematik anlatımı

Abrazif aşınma mekanizması sadece hareketli haldeki parçalarda oluşmayıp, bir tarafın durgun halde olduğu durumlarda da ortaya çıkabilir.

3.3. Yorulma Aşınması

Bir makine elemanının tekrarlı ve değişken yüklere maruz bırakılmasıyla, beklenen ömür seviyesinin altında hasara uğraması olayı yorulma olayı olarak açıklanabilir. Yorulmanın meydana gelmesiyle birlikte de oluşan aşınmalar yorulma aşınması olarak adlandırılmaktadır. Yuvarlanma hareketi yapmakta olan dişli çark, kam mekanizmaları veya rulmanlı yataklar yorulma aşınmasının ortaya çıktığı tipik örneklerdir (Choy ve diğ., 1996). Bu tip hareketli parçalar genellikle kuvvet aktarımı noktasal bölgelerden iletmesi ve değişken yükleme altında çalışmaları sebebiyle yüzeylerinde yorulma aşınma mekanizması gelişmektedir. Dişli çarklar ele alındığında, her bir diş sürekli yük altında çalışmazken, karşıt dişli ile temasa geçtiğinde bir kuvvet oluşmaya başlamaktadır (Shen ve diğ., 2021). Ayrıca oluşan kuvvet iki dişliyi de küçük temas noktalarından etkilemesi sebebiyle, yüzeylerde hertz basınçları meydana gelmektedir (Greenwood ve diğ., 1984). Hertz basınçlarının oluşmasıyla, yüzeylerle beraber yüzeyin alt kısımları da çekirdeğe doğru bu hertz basınçlarından etkilenir. Parça tekrarlı olarak bu basınca maruz kalmasıyla yüzeyin alt katmanlarında mikro çatlaklar oluşmaya başlamaktadır. Oluşan çatlaklar yüzeye doğru hareket ederek, yüzeyin plastik

deformasyona uğrama kabiliyetlerini artırır (Glodež ve diğ., 1997). Bu sebeple de yüke maruz kalan çarkların yüzeylerinden parça koparılması süreci hızlanır. Yüzeyden kopan parçaların artmasıyla birlikte ise yorulma aşınması baskın şekilde ortaya çıkmış olur. Bu tip aşınmaların önüne geçmek için malzemenin doğal sertliklerini değiştirmek en bilindik çözümdür. Şekil 3.3’de dişli çarkların çalışma esnasında aşınan bölümleri simülasyon görseli ile ifade edilmiştir.

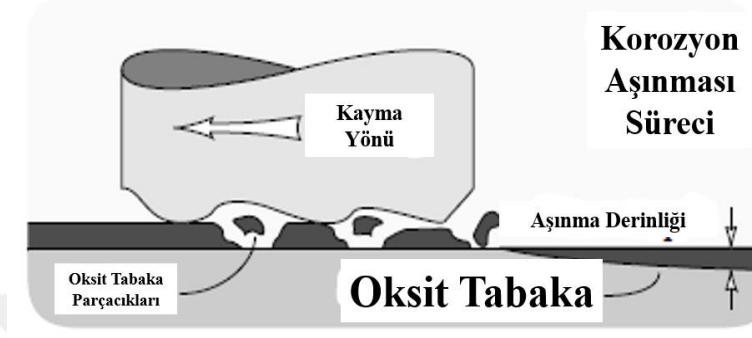


Şekil 3.3. Dişli çark aşınma bölgesi

3.4. Korozyon Aşınması

Korozyon, metallerin bulunduğu ortamda bulunan sıvı ve gaz formundaki kimyasallarla tepkimeye girerek bozulma sürecini anlatan bir terimdir. Metal makine elemanları çevresindeki havayla bile etkileşime girerek yüzeylerinde bir oksit tabakası oluşturur. Parçaların yüzeylerinde oluşan bu sert tabaka sadece hava ile oluşmayıp, aynı zamanda sıvı ile olan temas neticesinde de oluşabilir. Oluşan bu oksit tabakası sert ve parçalandığında yüzeyleri hasara maruz bırakabilir (Garcia ve diğ., 2001). Oluşan bu sert oksit tabakası endüstride, pas olarak bilinmektedir. Birbirleri ile temas halinde çalışan metal çiftleri arasında oluşan bu pas tabakası sürtünme sonucu kırılmaya başlayıp ufalanmaya başlamaktadır. Ufalanmış bu pas parçacıkları yüzey aralarına sızarak aşınma oluşumuna sebebiyet vermektedir. Bu tipte meydana gelen aşınmalar korozif aşınma olarak adlandırılır. Bu aşınma türü, özellikle nemli, tuzlu veya asidik ortamlarda çalışan sistemlerde daha hızlı ve yaygın şekilde ortaya çıkar. Korozif aşınma hem malzeme kaybına hem de yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olarak makine elemanlarının performansını ve ömrünü olumsuz etkiler (Tang ve diğ., 2009). Bu nedenle, malzeme

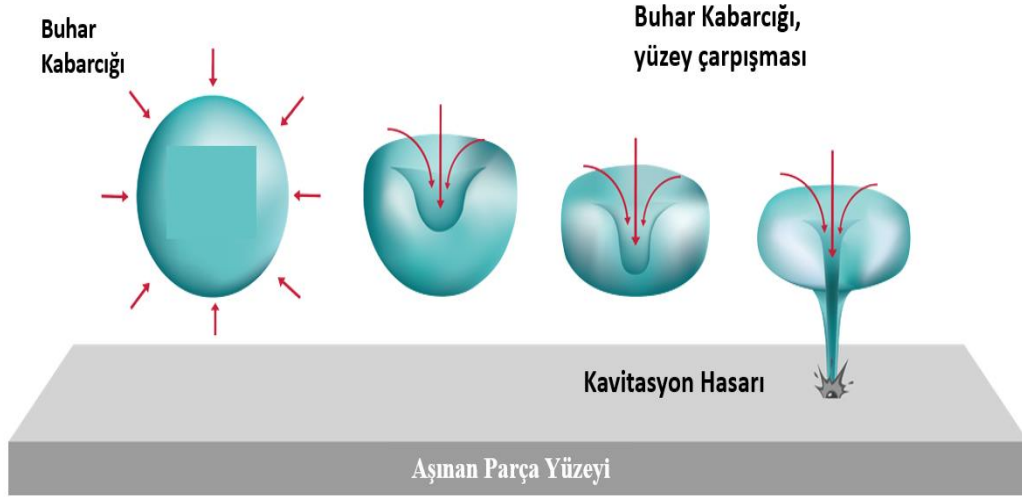
seçimi ve uygun yüzey koruma yöntemleri, korozyon kaynaklı hasarların önlenmesinde kritik rol oynar. Yüzeylerde bulunabilecek pas tabakasının oluşumunu önlemek adına fosfat veya sülfat bazlı bir kaplama uygulaması yüzeylerdeki oksitlenmelerin önüne geçebilmektedir.



Şekil 3.4. Korozyon aşınması şematik anlatımı

3.5. Kavitasyon Aşınması

Kavitasyon aşınması özellikle sıvı formunda ki akışkanların yüksek hızlarda ve sıcaklıklara maruz kalabileceği fakat gaz formundaki akışlarında yoğunlaşma göstererek sıvı fazına geçebileceği sistemlerde de meydana gelen bir aşınma türüdür. Bu tip aşınma mekanizmaları, malzeme yüzeylerinde ciddi hasarlara yol açabilmektedir. Sıvı içerisindeki lokal basınçların buharlaşma basıncının altına düşmesiyle oluşan buhar kabarcıklarının, daha sonra yüksek basınçlı bölgelere taşınarak aniden çökmesi (implozon) sonucu ortaya çıkar (Qiu ve diğ., 2015). Kabarcıkların çökmesiyle oluşan yüksek darbe basınçları, malzeme yüzeyinde tekrarlayan mikro-çatlaklara ve zamanla yüzey deformasyonuna neden olur. Başka bir ifadeyle su buharında bulunabilecek yüksek sıcaklıktaki gaz balonlarının, yüzeylere çarpması ve çarpması etkisiyle de yüzeyde bir patlama etkisi meydana getirmesi sebebiyle oluşan aşınma türüdür (Laguna-Camacho ve diğ., 2013). Özellikle pompa çarkları, türbin kanatları ve deniz taşıtlarının pervaneleri gibi sürekli sıvı akışına maruz kalan bileşenlerde görülen kavitasyon aşınması hem performans kayıplarına hem de yüzey yapılarının zedelenmesine neden olabilmektedir. Kavitasyon aşınmasının önüne geçilmesinde uygulanabilecek yöntemlerin başında, yüzey sertliklerinin birbirlerine ve ortam şartlarına göre ayarlanması gelmektedir. Şekil 3.5’de kavitasyon aşınmasının şematik anlatımı verilmektedir.

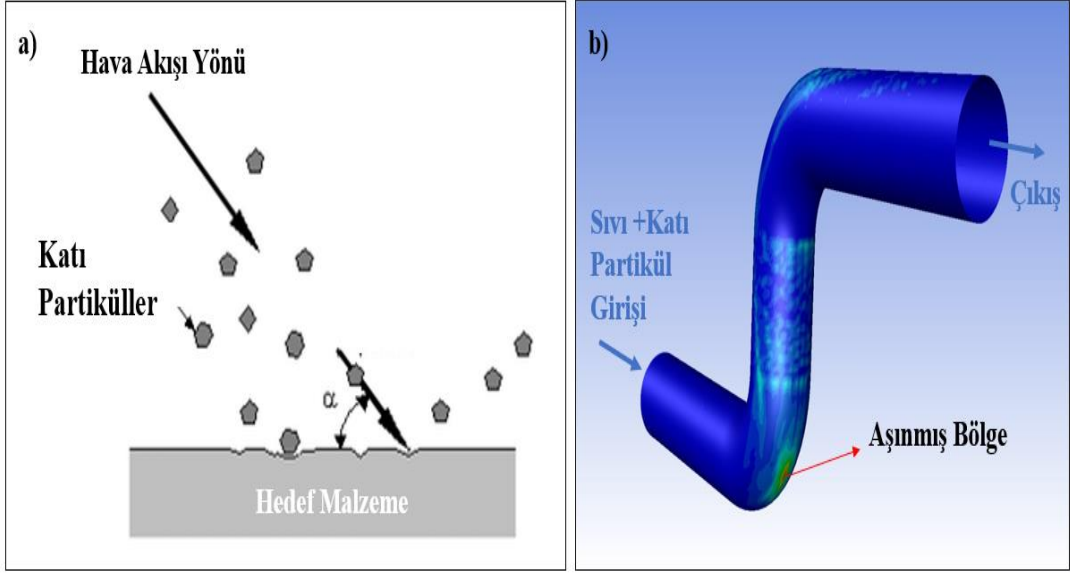


Şekil 3.5. Kavitezyon aşınması şematik anlatımı

3.6. Erozyon Aşınması

Katı partiküllerin sıvı veya gaz formundaki akışlarda taşınarak hedef yüzeylere isabet etmesiyle, yüzeylerin üst katmanlarında malzeme kaybına neden olması erozyon aşınması olarak adlandırılmaktadır. Sıvı formunda akmakta olan akışlara karışan partiküllerin yüzeylere çarpışması literatürde bulamaç erozyonu olarak bilinirken, gaz formundaki akışlarda taşınan katı parçacıkların yüzeylerde bıraktığı etki katı partikül erozyon aşınması olarak bilinmektedir. ASTM G76 standartı, bu tip aşınma mekanizmasını tanımlamada kullanılmasıyla birlikte, aynı zamanda tespit etmek için gerekli test yöntemlerini de açıklamaktadır. Boru içi akışlarda, havacılıkta, otomotivde, uzay endüstrisinde, tarımda ve madencilik gibi birçok sektörde bu tip aşınmalar ortaya çıkmaktadır. Katı parçacıklar belirli hızlarda ve rastgele biçimde, hedef malzeme yüzeylerine isabet ederek yüzeyde hasar mekanizmasının gelişmesine sebebiyet vermektedir. Gelişen hasara bağlı olarak, yüzeylerden malzeme ayrılmaya ve bu ayrılmalar sonucu, malzemeler kullanılamaz hale gelmektedir (Kleis ve Kulu, 2007).

Birçok yönden erozyon aşınması teorik temellere sahiptir. Aşınma sonucu gelişen hasar mekanizması, erozyona etki eden faktörler, matematiksel olarak modellenmesi gibi çeşitli yönlerden incelenmektedir. Bulamaç ve katı partikül erozyon aşınması şematik olarak Şekil 3.6'da açıklanmıştır.

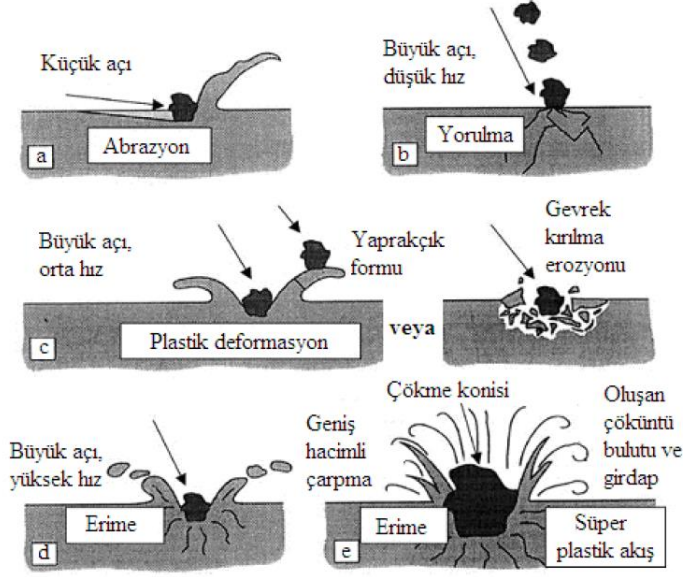


Şekil 3.6. Erozyon aşınması türleri, a) Katı partikül erozyon aşınması, b) Bulamaç erozyon aşınması

3.6.1. Erozyon aşınmasına bağlı gelişen hasar mekanizmaları

Katı partiküller gaz ve sıvı formundaki akışkanlarla taşındığı sistemlerde, belirli hız seviyelerine ulaşmaktadır. Sahip oldukları hız ve çeşitli parametreler dahilinde hedef malzeme yüzeylerine isabet etmeleri neticesinde karşıt malzeme yüzeyinin üst katmanlarında hasar mekanizmasının gelişmesine sebebiyet vermektedirler (Wang ve diğ., 2023). Oluşan hasar bir aşınma hasarıdır ve partiküllerin sahip oldukları parametreler, ortam sıcaklıkları, çarpma açısına ve çeşitli etkenlerin değiştirilmesiyle yüzeydeki aşınma mekanizması değişkenlik göstermektedir.

Partiküllerin taşındığı akışkan hareketine bağlı olarak yüzeylere tekil ve çoğul olarak isabet etmeleri mümkündür (Hadavi ve Papini, 2015). Ancak yüzeye isabet eden partiküllerin tekil biçimde, sıralı olarak çarpmasıyla; çoğul biçimde ve yüzeyin birçok farklı noktasından isabet etmesi arasında yüzeyde oluşan erozyon hasarı davranışı değişmektedir. Ayrıca yüzeyde ki etkilerden hariç olarak, partiküller taşınma esnasında birbirleri ile de etkileşime girerek, sahip oldukları hız seviyelerini de değiştirebilirler. Partiküllerin yüzeylerde oluşturduğu erozyon aşınması hasar mekanizmasındaki farklılıklar Şekil 3.7’de verilmiştir.

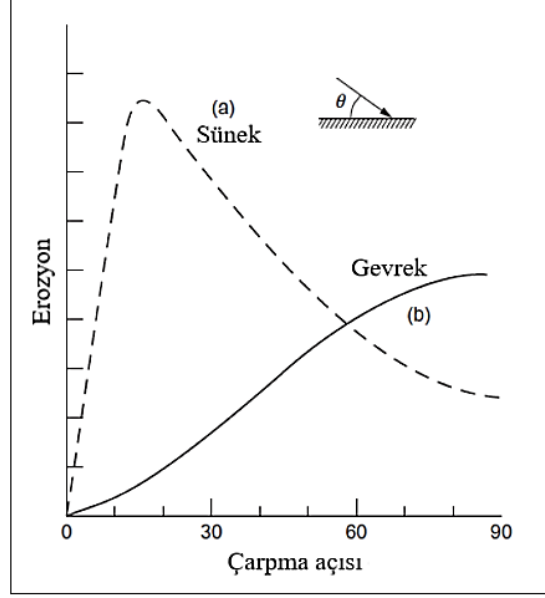


Şekil 3.7. Katı partikül erozyon aşınmasında karşılaşılan yüzeydeki hasar mekanizmaları, a) Küçük çarpma açılarındaki abrazyon, b) Düşük hız ve büyük çarpma açılarındaki yüzey yorulması, c) Orta hız ve büyük çarpma açılarındaki gevrek kırılma ve plastik deformasyon, d) Yüksek hız ve büyük çarpma açılarındaki yüzey ergimesi, e) Yüzeylerde ergime ve gömülme oluşması (Gahr, 1987)

Şekil 3.7.(a) incelendiğinde, 15 ve 30 derece çarpma açısı gibi küçük çarpma açılarındaki yüzeye isabet eden partiküller, yüzeyde bir kırılma oluşturmayıp yüzeyi sıyırıcı bir formda parça kaldırılmasına sebebiyet vermektedir. Oluşan erozif aşınma mekanizmasında partikül ile yüzeyin etkileşimi sonucu bir hasar ortaya çıktığı için sök konusu hasar mekanizması abrazyon temelli bir erozyon hasarına dönüşmektedir. Şekil 3.7.(b) deki hasar modeli incelendiğinde ise, 75 ve 90 derece çarpma açıları gibi yüksek çarpma açılarındaki yüzeye isabet eden partiküller yüzeyde sıyırıcı bir etki veya kırılma oluşturmamaları ile birlikte yüzeyde gözle görülür bir hasar oluşmamaktadır (Oka ve diğ., 1997). Ancak yüzeye büyük çarpma açılarındaki isabet etmeleri sebebiyle yüzeyden başlayıp, derinlere doğru uzanan mikro çatlaklar oluşturmaktadırlar. Malzeme içinde mikro çatlakların oluşması ve partiküllerin yüzeye, bir dişli temasına benzer şekilde, sırayla temas etmesi neticesinde yapıdaki yükleme durumu değişken ve titreşimli hal olarak tanımlanan yükleme haline gelmektedir. Sonuçta değişken yükleme ve mikro çatlakların varlığı erozyon hasarını yorulma modeline göre gelişen bir mekanizma haline dönüştürmektedir. Şekil 3.7.(c)'de büyük açı durumunun korunması fakat çarpma hızlarının yükseltilmesiyle birlikte, yüzeye isabet eden partiküller, bir suya taş atılmasına benzer şekilde, yüzeyde bir saçılma meydana getirmektedir. Yüzeyde bir oyuk bu tip hasar mekanizmasında oluşmaktadır. Ancak burada yapı gevrek veya sünek davranabilir. Oluşan oyuklar yüzeydeki kırılmaya bağlı gömülmelere veya bir plastik deformasyonun oluşması nedeniyle de meydana gelebilir. Şekil 3.7.(d) ve (e)' de ki erozyon hasar

modellerinde ise özel bir erozyon aşınma mekanizması görülmektedir. Yapılara isabet eden partikül boyutlarının küçük olduğu durumlarda, partiküller yüzeye saplanabilir (Hadavi ve diğ., 2019). Burada yapıda bir gömülme oluşur ancak oluşan gömülmeler partiküllerle etkileşim esnasında yüzeyin eriyik bir hale gelmesi sebebiyle oluşur. Eğer ki partikül boyutlarının büyümesi gibi ikincil erozyon faktörleri de aşınma hasarını etkilemektedir. Partikül boyutlarının büyümesiyle, yüzeydeki gömülme etkisi daha belirgin gözlenebilir (Kragelsky ve diğ., 1985). Ayrıca yüzeydeki gömülme durumunun artmasıyla birlikte erozyon aşınmasının farklı bir hali olan inkübasyon periyodu da oluşabilir. Yapıya saplanan partikül yoğunluğunun malzeme kaybının önüne geçtiği durumlarda numunelerde aşınmaya bağlı ağırlık kaybı oluşması beklentisinin aksine hedef malzeme de ağırlık artışı oluşmasını oluşturulabilir. İnkübasyon periyodu veya yüzeye partikül gömülme mekanizmaları, sıcaklık artışlarında baskınlaşabilir. Ortam sıcaklığı veya malzemenin yüzey sıcaklığının azaltılıp, artırılarak malzemenin sunduğu sertlik gibi mekanik özellikleri değişmektedir. Yüzey sertliğinin düşmesi, yüzeye partikül gömülme mekanizmasını baskınlaştırabilir veya ortam sıcaklıklarının kriyojenik sıcaklıklar gibi oldukça düşük seviyelere ulaşmasıyla yüzeyler daha kırılgan bir forma ulaşmaktadır. Bu sebeple sıcaklık etkisi de erozyon aşınma mekanizmasının değişmesinde rol oynamaktadır (Gietzen ve diğ., 2022). Erozyon aşınması hasar mekanizmalarının çeşitlenmesi temelde bu sebepler ile açıklanmaktadır.

Katı partikül erozyon aşınmasına bağlı gelişen yüzey hasarı ve aşınma davranışında en önemli rol oynayan parametre temelde partikül çarpma açısıdır. Farklı çarpma açılarında uygulanan neticesinde malzemenin göstereceği erozyon hasarı değişirken, malzemenin sünek veya gevrek karakterde olduğu da anlaşılabilir (Wensink ve Elwenspoek, 2002). Katı partiküllerin isabet etmesiyle ölçülen erozyon oranından yola çıkılarak malzemenin karakteristiği hakkında da fikir sahibi olunabilir. Şekil 3.8’de görüldüğü üzere, düşük çarpma açılarında ağırlık kaybı ve dolayısıyla erozyon oranının yüksek olduğu durumlarda malzemenin sünek karakter sergilemesi ile ilgili bir görüş oluşabilir. Çarpma açılarının yükselmesi sonunda aşınma miktarının azalarak malzemenin sünek karakterde olduğu doğrulanabilir. Ancak çarpma açısının artışıyla erozyon oranının arttığı durumlar oluştuğunda ise malzemenin gevrek karakterde olduğu doğrulanmış olmaktadır. Düşük çarpma açıları genellikle 15° ve 30° çarpma açıları olarak bilinirken, 60° çarpma açısı ve yukarısı yüksek çarpma açısı sınıfında yer almaktadır. Orta seviye çarpma açılarında (45° ve 60° arası) aşınmanın pik yaparak, düşmeye başladığı durumlarda ise malzemenin yarı sünek karakterde olduğu doğrulanmış olur.



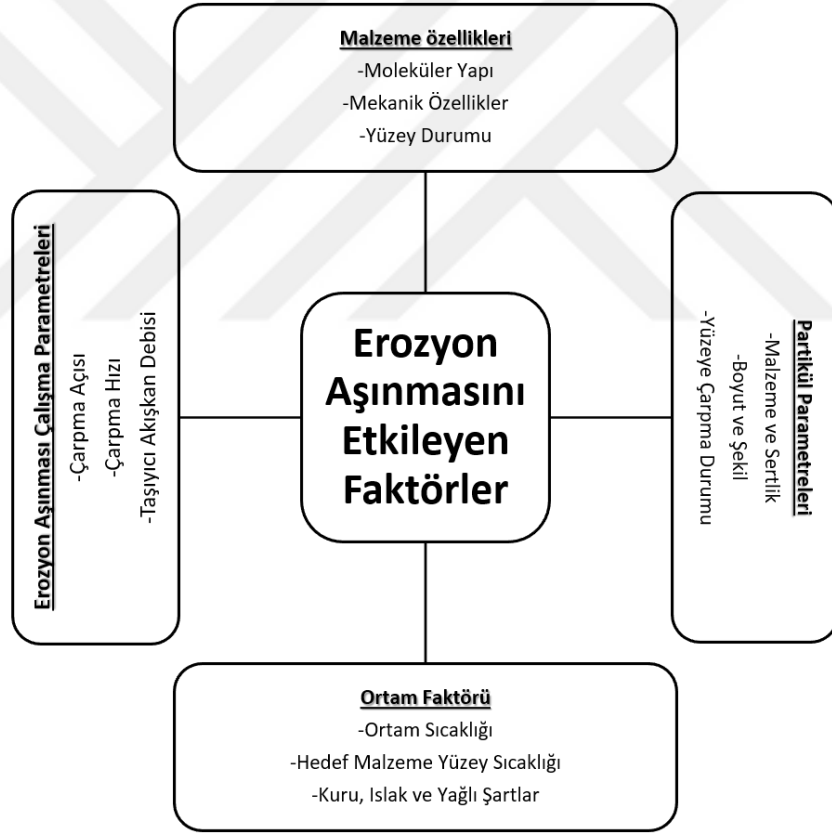
Şekil 3.8. Çarpma açısına bağlı gelişen erozyon aşınması ile malzeme karakteristiğinin belirlenmesi (Finnie, 1958)

3.6.2. Erozyon aşınmasına etki eden faktörler

Katı partiküllerin akışkanlar vasıtasıyla taşınarak, hedef yüzeylere isabet etmesi ile oluşan erozyon aşınmasını etkileyen birçok birincil ve ikincil etken bulunmaktadır. Partiküllerin sahip oldukları parametreler, çarpışma parametreleri, hedef malzemenin sahip olduğu parametreler ve ortam parametreleri temelde 4 ana etken grubu olup erozyon aşınmasını etkileyen 4 ana başlıktır (Tarodiya ve Levy, 2021). Ancak söz konusu başlıklar kendi içlerinde alt başlıklara ayrılmaktadır. Şekil 3.9’da erozyon aşınması etkileyen faktörler detaylı şekilde sunulmuştur.

Katı partikül erozyon aşınması davranışında etki sahibi 4 ana etken grup değerlendirildiğinde, aşınacak olan hedef malzemenin özellikleri önemli bir etkiye sahiptir. Malzemenin sahip olduğu çekme ve akma mukavemetinin erozyon hasarında etkisi oluşmaktadır. Ayrıca mekanik özelliklerden sertlik parametresi, direkt olarak erozyon aşınmasını ve hasar mekanizmasını etkilemektedir. Yüzeyin sert olduğu durumlarda, partiküllerle çarpışma esnasında gevrek kırılmalar meydana gelecektir. Ancak yüzey sertliğinin düşük olduğu malzemelerde ise plastik deformasyon ve gömülme durumu gözlemlenebilir (Oka ve diğ., 1993). Yüzey sertliği ile beraber çekirdek sertliği de yine yapının mekanik özelliklerini etkilediği için erozyon aşınması davranışını değiştirebilir. Partikül çarpma açısı, çarpma hızı ve partiküllerin taşındığı akışkanın

özellikleri de birincil etki olarak erozyon aşınma davranışını değiştirmektedir (Barkoula ve Karger-Kocsis, 2002). Partikül malzemeleri, parçacıkların boyut ve şekli de yine erozyonu etkilemektedir. Partikül malzemesinin değişmesi, partikül yoğunluğunu ve kütlelerini değiştireceğinden erozyon oranlarını değiştirir. Ayrıca partikül geometrisinde oluşabilecek farklılıklar erozyon aşınmasını etkiler. Örneğin, keskin köşeli bir partikül geometrisinde yüzeyde farklı hasar mekanizmaları gelişebilir (Nguyen ve diğ., 2016). Bir diğer yönden ise hedef malzemenin bulunduğu ortam sıcaklıklarının kriyojenik şartlar gibi oldukça düşük sıcaklıklara gelmesi yine erozyon oranını değiştirecektir. Sıcaklıkların yükseltilmesi de erozyon aşınmasını etkilemektedir. Partiküllerle çarpışma esnasında yüzeyin kuru veya ıslak olması durumu bile erozyon oranında ki farklılaşmalara sebebiyet vermektedir.

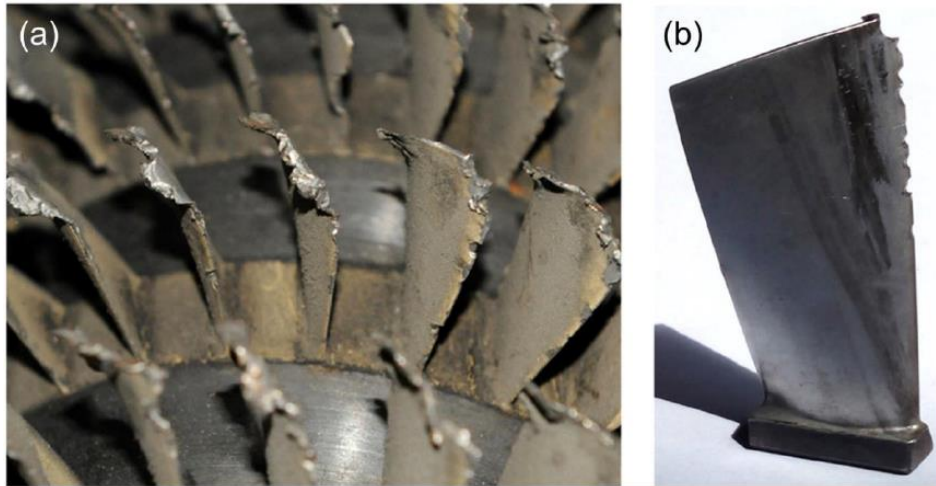


Şekil 3.9. Erozyon aşınmasını etkileyen faktörler

Erozyon aşınmasına etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerin bilinmesi erozyon aşınması davranışının açıklanmasına yönelik daha doğru yaklaşımların oluşmasını kolaylaştırır.

3.6.3. Katı partikül erozyon aşınmasının ortaya çıktığı endüstri alanları

Katı partikül erozyon aşınması sektörel anlamda havacılık, uzay ve otomotiv başta olmak üzere tarım ve madencilik sektöründe ortaya çıkan bir problemdir. Söz konusu sektörler incelendiğinde katı parçacıklar ile malzeme yüzeyleri etkileşime girmektedir. Havacılık uygulamaları ele alındığında yüksek irtifada uçmakta olan bir uçağın karşılaştığı mikron boyutlu partiküller, haça aracının dış kabuk kısımlarını ve özellikle jet motor içinde ki kompresör ve türbin kanatlarını aşındırmaktadır (Alqallaf ve Teixeira, 2022). Dış kabuk bileşenlerinin erozyon aşınmasına fazla örnek bulunmasa da jet motor kanat yapılarının aşındığı birçok örnek bulunmaktadır. Özellikle kompresör ve türbin kanatları, akışkan içindeki mikron boyutlu partiküllerin çarpması sonucu zamanla malzeme kaybına uğrayarak performans düşüşü yaşar. Bu kapsamda, malzeme seçimi ve yüzey kaplama teknolojileri, söz konusu bileşenlerin hizmet ömrünü uzatmak ve bakım maliyetlerini azaltmak açısından kritik rol oynamaktadır. Ayrıca, erozyon mekanizmasının anlaşılması ve deneysel/sayısal analizlerle modellenmesi, hava araçlarında güvenliğin artırılmasına yönelik stratejik bir gereklilik olarak değerlendirilmektedir. Bu tür aşınma, özellikle kumlu, tozlu veya volkanik partikül içeren atmosfer koşullarında daha belirgin hale gelmektedir. Katı partikül erozyon aşınması sebebiyle hasara uğramış bir jet motor kompresör kanat formunun görüntüsü Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Erozyon nedeniyle aşınmış jet motor kanat formu, a) Kompresör kanat yapısı, b) Kenarlardaki malzeme kaybı (Bonu ve Barshilia, 2022)

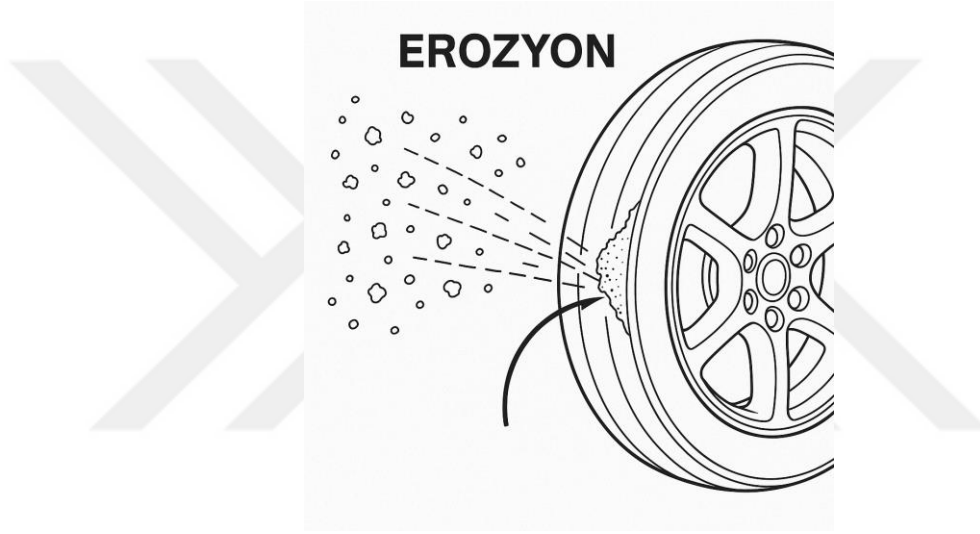
Jet motoru ve gaz türbin motorlarında bulunan türbin ve kompresör yapısı kanatçık formuna sahiptir. Bu motorların çalışma ortamları gereği tozlu ortam şartlarına maruz kalmaktadır. Ortamdaki etkileşime giren kanat geometrileri narin bir geometriye sahip oldukları için katı partiküller kanat formunu aşındırmaktadır. Kanat yapıları genellikle titanyum ve nikel alaşımlarından oluşmaktadır. Ti6Al4V ve Inconel 718 alaşımlarının kanat malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir. Söz konusu alaşımların dayanım seviyelerinin yüksek olması ve sertliklerinin yüksek olması dikkate alındığında, partiküllerle oluşan erozyon neticesinde aşınma oluşmaktadır. Ancak söz konusu aşınma sadece kanat formunda ortaya çıkmayıp, hava aracının dış kabuk yapısında da gözlenebilir ve dış kabuk yapısında alüminyum alaşımları sıklıkla kullanılmaktadır. Bu kapsamda, titanyum ve nikelli alaşımlar gibi malzeme grubunda bile erozyon aşınması gözlenirken alüminyum alaşımlarında da bu aşınma tipi baskın biçimde gözlenmektedir.

Erozyon aşınması havacılıkla birlikte sıklıkla ortaya çıktığı bir diğer önemli sektör ise uzay endüstrisidir. Uzay atmosferinde bulunabilecek gök taşı benzeri sert katı partiküller, uzay aracının dış paneli veya gövdesiyle çarpışması sonucu katı partikül erozyonu oluşturabilir (Telling ve diğ., 1997). Ortam atmosferi gereği sıcaklıklar oldukça düşük seviyelerde olduğu için, partiküllerle olan çarpışma soğuk ortam veya kriyojenik şartlarında gelişebilir. Sıcaklık seviyesinin değişmesi de katı partikül erozyonunu etkilemektedir. Ayrıca uza aracında kullanılan malzemeler incelendiğinde yine alüminyum alaşımları ve titanyum, nikel gibi elementler barındıran malzemeler kullanılmaktadır. Havacılık uygulamalarına benzer şekilde malzeme fark etmeksizin katı partikül erozyon aşınması ortaya çıkmaktadır. Uzay atmosferinde göktaşı benzeri sert partiküllerle çarpışmakta olan bir uzay roketinin uğradığı hasarı gösteren temsili resim Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Uzay atmosferinde ortaya çıkan katı partikül erozyon aşınması

Katı partikül erozyonunun ortaya çıktığı bir diğer önemli sektör ise otomotiv sektörüdür. Arazi şartlarında, taş, kayalık veya toprakta hareket halinde olan bir aracın özellikle jant ve teker bölümleri bu gibi ortamlarda bulunan parçacıklarla etkileşime girerek aşınmalar oluşturabilir. Ortaya çıkan aşınmalarda sert parçacıklar rastgele biçimde, araca isabet etmekte ve aracın partikülle etkileşime giren bölümlerini erozyon nedeniyle hasara uğratmaktadır. Şekil 3.12’de ki temsili resimden görüleceği üzere, araca isabet eden partiküller hem jantları hem de kauçuk lastikleri aşındırmaktadır. Jant malzemesi olarak genellikle AlSi10Mg alaşımları tercih edilmektedir (Wang ve diğ., 2025).



Şekil 3.12. Araç tekerlerinin uğradıkları erozyon aşınması

Katı partikül erozyon aşınması otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisi haricinde tarım ve madencilik sektörlerinde de ortaya çıkan bir durumdur. Tarım araçlarının genellikle toprakla etkileşime girmesi ve madencilikte alanında da sürekli sert kaya parçacıklarının bulunmasıyla katı partikül erozyon aşınması kaçınılmaz şekilde oluşabilir. Burada bu tip aşınmaların önüne geçebilmek adına malzeme yüzeylerine kaplama uygulamalarının yapılması veya yüzeylerin sertleştirilmesi bir çözüm olarak sunulmaktadır. Ancak bu gibi çözümler her zaman sonuç oluşturmamaktadır. Bu kapsamda, eklemeli imalat gibi yeni üretim yöntemlerinin geliştirilmesi, katı partikül erozyonunu minimize etmek için kullanılabilecek bir teknik olarak tercih edilebilir.

3.6.4. Erozyon aşınmasının teorik esasları

Aşınmaları anlayabilmek ve sayısal olarak ifade edebilmek için çeşitli metotlar bulunmaktadır. Aşınma iz çapı, aşınma derinliği, ağırlık kaybı veya hacim kaybı gibi parametreler ölçülerek aşınma olayı sayısal biçimde ifade edilmiş olur. Erozyon aşınması içinde bu ifade biçimlerinden genellikle ağırlık kaybı ölçülür. Erozyona uğraması planlanan parça veya numunelerin erozyona uğramadan önceki ağırlığı ölçülür. Daha sonra erozyon aşınması gerçekleştikten sonraki ağırlık ölçülerek, numunelerde ki ağırlık kaybı belirlenmiş olur. Ağırlık kaybı sadece erozyonu ifade etmek için yeterlidir ancak erozyon oranı olarak adlandırılan bir kavram literatürde daha fazla tercih edilir. Ağırlık kaybı veya erozyon oranı bu iki kavram da genellikle deneysel ölçümü göstermektedir. Erozyon aşınması davranışının belirlenmesinde bilinmesi gereken en önemli parametrelerdir. Ağırlık kaybı ve erozyon oranının formülize edilmiş hali Denklem (3.1) ve (3.2) de verilmiştir (Hutchings, 1979).

$$\text{Ağırlık Kaybı (W)} = \text{Aşınma Öncesi Ağırlık} - \text{Aşınma Sonrası Ağırlık} \quad (3.1)$$

$$\text{Erozyon Oranı (E)} = \frac{\text{Kaldırılan Malzeme Kütlesi}}{\text{Yüzeye Çarpan Partikül Toplam Kütlesi}} \quad (3.2)$$

Erozyon oranı değerinin bir diğer özelliği de boyutsuz bir aşınma göstergesidir. Aşınma miktarının miligram seviyesinde olması ile birlikte, malzemeleri aşındırmak için kullanılan katı partikül miktarı da kilogram veya gram seviyesinde olduğu için erozyon oranı değeri boyutsuzdur.

Erozyon oranının deneysel olarak bulunması ile beraber teorik olarak da tespit edilmesi mümkündür. Erozyon aşınmasına yönelik, literatürde Hutchings veya Oka gibi araştırmacıların erozyon modelleri mevcuttur. İki modelde de erozyon oranı tespit edilebilmekle birlikte, teorik olarak bulunan sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması yapılarak erozyon modellerinin başarılarını ölçmek mümkündür.

Hutchings erozyon modeli ele alındığında, numunelerin uğradıkları erozyon miktarının; aşınma sabiti (K), numunelerin yüzey sertlikleri (H), partiküllerin yoğunluğu (ρ) ve partiküllerin yüzeye çarpma hızları (U) dikkate alınmaktadır. Ancak çarpma açısı direkt olarak bir parametre olarak ortaya çıkmamaktadır. Denklem (3.3) incelendiğinde, Hutchings erozyon modeli anlaşılabilir.

$$E = \frac{K * \rho * U^2}{2 * H} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3) içerisinde ki parametrelerden aşınma sabiti (K) değeri $5*10^{-3}$ ile 10^{-1} arasında değişmektedir. Ancak net bir değer olarak tespit edilmesi için deneysel olarak bulunan bir erozyon oranı ile deneylerde kullanılan numune ve partikül parametreleri Denklem (3.3)'e göre düzenlenerek aşınma sabiti kesin bir değer olarak bulunabilir.

Erozyon oranının teorik olarak tespit edilmesinde kullanıma sahip bir diğer model ise Oka erozyon modelidir. Oka erozyon modelinde erozyon oranı, kullanılan partikül miktarının hacim kaybına oranı olarak ifade edilir. Bu modelde çarpma açısı, partikül çarpma hızı ve diğer partikül parametreleri dikkate alınmaktadır. Ayrıca yine aşınma sabiti mevcuttur. Oka modeline göre erozyon oranının formülüne edilmiş hali Denklem (3.4) ve (3.5)'de verilmiştir (Oka ve diğ., 2005).

$$E = 10^{-9} * m_p * \rho_t * K * (a * HV_t)^{-b*k_1} * \left(\frac{V_p}{V'}\right)^{k_2} * \left(\frac{d_p}{D'}\right)^{k_3} * f(\theta_p) \quad (3.4)$$

$$f(\theta_p) = (\sin\theta_p)^{n_1} * [1 + HV_t * (1 - \sin\theta_p)]^{n_2} \quad (3.5)$$

Oka modeli için verilen denklemler, erozyon oranına ait birçok parametreyi kapsamakla birlikte, denklemdeki parametrelerden bazılarının belirlenebilmesi için deneysel süreçten elden edilen bilgilerin bilinmesi gerekmektedir. Denklemler incelendiğinde, aşınma sabitleri (K, k_1 , k_2 , k_3 , a ve b) için birçok parametre kullanılmaktadır. Ayrıca hedef malzemeye ait deneysel sabitlerin (n_1 ve n_2) bilinmesi gerekmektedir. Bunlar haricinde partikül çarpma açısı (θ_p), partikül çarpma hızı (V_p), partikül çapı (d_p) refereans partikül hızı ve çapının (V' ve D') da bilinmesi gerekmektedir. Ayrıca partiküllerin kütleli debisi (m_p), hedef malzemenin yoğunluğu (ρ_t) ve sertliğinin (HV_t) da bilinmesi gerekmektedir. Bu parametreler içerisinde aşınma ve deneysel sabitler harici diğer terimler malzeme özellikleri veya deneysel süreç ile belirlenebilir (Oka ve Yoshida, 2005). Ancak sabitlerin belirlenebilmesi için kapsamlı bir deney sistemi kurulması gerekmektedir. Erozyon oranı ölçülürken, hız, çarpma açısı, hedef malzeme sertliği ve partikül boyutu değiştirilerek, bu sabitler hakkında doğrusal olmayan eğrilerle

regresyon analizleri uygulanarak aşınma ve deneysel sabitlerin değerine yakınsama yapılır. Oka, bu sabitleri bir çalışmada genel ve tipik olarak belirlemiştir. Yapılan çalışmada birçok deney yaparak, tipik ve genele uygulanabilecek şekilde bu sabitlerin değerini bulmuştur. Tipik aşınma ve deneysel sabitlerin değeri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. OKA’nın belirlediği tipik aşınma ve deneysel sabitler (Oka ve diğ., 2005)

Sabit	Tipik Değer
a	1 (Ölçekleme Sabiti)
$b \cdot k_1$	0,59
k_2	2,41
k_3	1,23
n_1	3
n_2	2

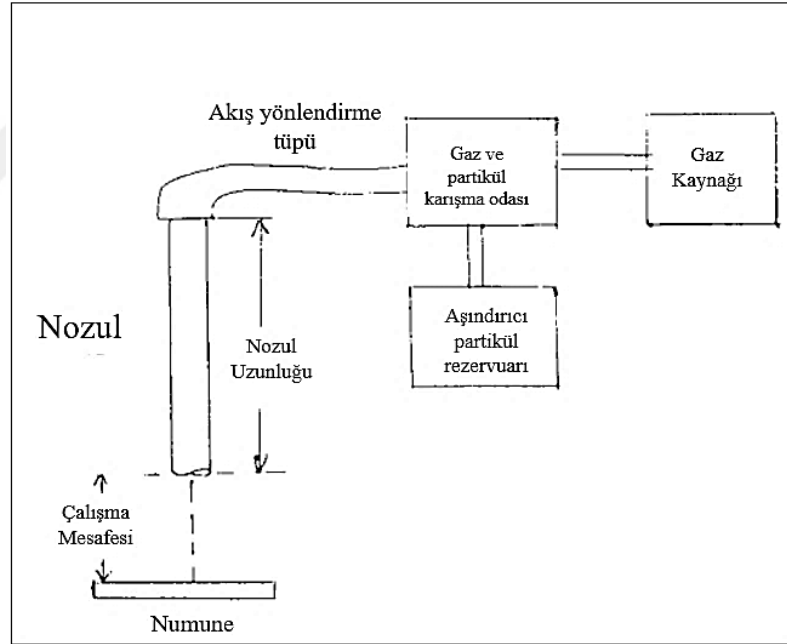
Oka’nın belirlediği genele uyarlanabilen tipik sabitler ve deneysel süreçteki bulunanlar ile erozyon oranı büyük ölçekte hesaplanabilir. Ancak denklemlerde bilinmeyen bir parametre olarak genel aşınma sabiti (K) parametresi yine de bilinmemektedir. Bu doğrultuda aşınma sabiti (K) değeri için, Hutchings erozyon modelinin deneysel erozyon sonucu ile teorik denklemi (3.3) ile genel aşınma sabiti (K) hesaplanabilir. Hutchings erozyon modeli ile aşınma sabiti (K) bulunarak, (3.4) ve (3.5) denklemiyle Oka erozyon modeli uygulanarak erozyon oranı hesaplanabilmektedir.

Oka ve Hutchings erozyon modelleri katı partikül erozyon aşınmasında genellikle teorik çalışmalarda tercih edilen modellerdir. İki modelde ayrı ayrı kullanılabilmelerine rağmen, birbirleriyle tümleşik kullanımları sonucunda erozyon oranının bulunmasında deneysel sonuçlara yakın bilgiler ortaya çıkarmaktadır. Deneysel süreç erozyon oranını belirlemede en kesin sonucu vermesine rağmen, deney sürecinin yönetilmesi, deneylerin uluslararası standartlara göre uygulanması ihtiyaç oluşturmaktadır. Teorik erozyon modellerinin, deneylerle paralel ve yakın sonuç sunması da deneysel süreçte oluşacak maliyet ve zaman kaybını minimuma indirecektir. Ayrıca teorik modellerin deneysel sonuçlara yakınlığının artırılması veya deneysel sonuçlarla kabul edilebilir miktarda sapmaların oluşmasını sağlayacak biçimde düzeltme katsayıları ile revize edilmesiyle literatüre konfigüre edilmiş yeni modeller kazandırılabilir.

3.6.5. Erozyon aşınmasının uluslararası standartlara göre belirlenmesi

Katı partikül erozyon aşınmasının deneysek şartlarla Denklem (3.1) ve (3.2) kullanılarak belirlenmesi için deneysel sürecin yönetilmesi gerekmektedir.

Deneysel süreçte kullanılacak erozyon aşınması test makinesi bile uluslararası standartlara göre ayarlanmaktadır. Erozyon aşınmasının belirlenmesinde kullanılan temel iki uluslararası standart ASTM G76 ve ASTM G211 standartıdır. ASTM G76 standardı daha genel bir kullanıma sahip olmakla birlikte, G211 standardı G76'dan farklı olarak erozyon aşınmasında ki sıcaklık etkisini de bir düzene koymaktadır. İki standart için de test makinesinin kurulumu neredeyse birbirine yakındır fakat G211 standardında test makinesinde püsküren havanın ısıtıldığı bölüm bulunmaktadır. ASTM G76 standardına göre test makinesinin şematik görünümü Şekil 3.13'de verilmiştir (G76-95, 2000; G211-14, 2014).



Şekil 3.13. ASTM G76 standardına göre katı partikül erozyon aşınması test düzeneği

Cihazın çalışması incelenirse, bir basınçlı gaz üreten kaynaktan basınçlı gaz üretilerek nozul'a doğru yönlendirilir. Basınçlı hava, yönlendirme aşamasındayken bir partikül rezervuarından aşındırıcı partiküller, basınçlı havanın geçtiği kanal içine aktarılır. Burada basınçlı gaz partiküllerle karışarak, nozul'a doğru beraber yönlenmiş olur. Nozul'a ulaşan gaz ve katı akışı nozzle içinden geçerek püskürmeye başlamaktadır.

Nozul çıkışına numune farklı açılarda konularak, püsküren gaz ve partikül karışımı numuneye çarpmaktadır. Partiküllerle olan etkileşim sonucunda, numune erozyon aşınmasına uğrayarak malzeme kaybına uğramaktadır. Bu şekilde katı partikül erozyon aşınması meydana gelirken, aşınma süreci de ASTM standartı dahilinde meydana gelmiş olur. ASTM G211 standartında da prosedür aynı şekildedir fakat basınçlı gaz kanal içinden geçerken ısıtılır ve bu sayede erozyon aşınmasında sıcaklık etkisi de gözlenebilir. İki farklı standart'a ait deney parametreleri Çizelge 3.2'de sunulmuştur. ASTM G76 ve G211 standartları, katı partikül erozyonuna karşı malzeme davranışlarını değerlendirmek amacıyla yürütülen deneysel çalışmalar için uluslararası kabul görmüş temel yöntemleri tanımlar. Bu standartlar, erozyon testlerinde kullanılan partikül türü, hız, çarpma açısı ve deneysel düzenek gibi kritik parametreleri sistematik şekilde belirleyerek, elde edilen verilerin karşılaştırılabilirliğini ve tekrarlanabilirliğini sağlar. Özellikle mühendislik malzemelerinin aşınma performanslarının objektif olarak ölçülmesinde ve farklı malzeme kombinasyonlarının erozyona karşı dayanıklılığının analizinde önemli bir referans teşkil eder. Bu yönüyle, akademik ve endüstriyel araştırmalarda güvenilir veri üretiminin temelini oluşturur.

Çizelge 3.2. ASTM G76 ve ASTM 211 erozyon test parametreleri

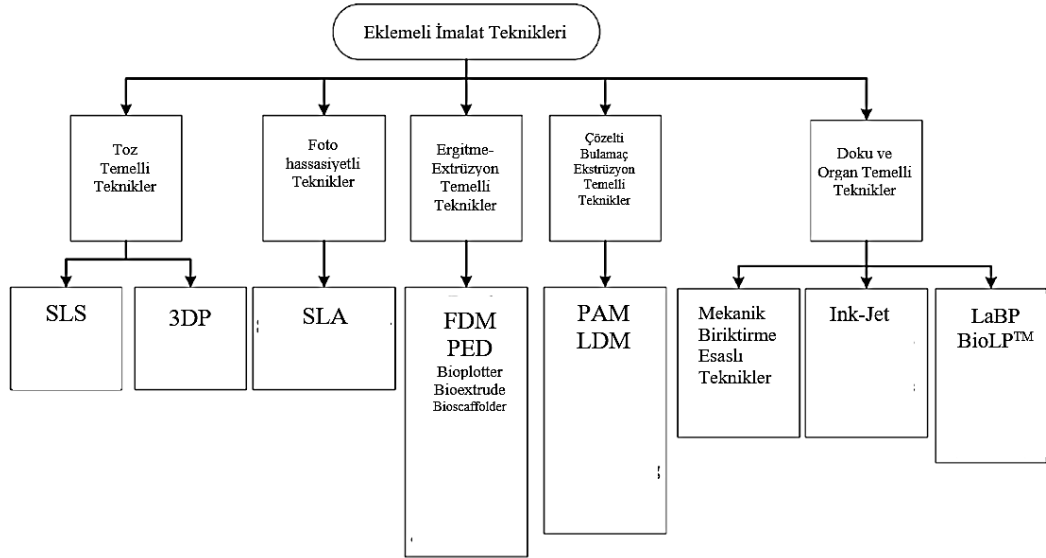
Erozyon Test Parametreleri	ASTM G76	ASTM G211
Nozul Çapı (mm)	1-8	1-8
Partikül Hızı (m/sn)	15-75	75-250
Sistem Basıncı (Bar)	0-10	0-10
Test Açıları (°)	Maksimum 90	Maksimum 90
Test Sıcaklığı (°C)	18-28	600 ±5
Numune-Nozul Arası Mesafe (mm)	<20	<20
Erozyon Oranı	mg/g; mg/kg; g/kg	mg/g; mg/kg; g/kg

ASTM G211 standartının G76 standartına göre farklılığı genel anlamda hız ve sıcaklık farklılığıdır. G211 standartında erozyon testlerinin yüksek hız ve sıcaklıkta gerçekleşmesine yönelik parametreler bulunmaktadır.

3.7. Eklemeli İmalata Geçiş

Geometri ve boyut olarak nihai şeklini almış parçaların; bilgisayar kontrollü olarak katmanlı biçimde (3D baskı) üretildiği imalat yöntemi, literatürde eklemeli imalat (AM) olarak bilinmektedir. Bu imalat yönteminde herhangi bir kalıp, model gerekmediği veya talaş kaldırma operasyonun yapılmamasından kaynaklı olarak eklemeli sıfatıyla isimlendirilmektedir. İlk ürün (prototip), düşük hacimli üretim ihtiyacı, karmaşık geometriye sahip parça üretimi gibi konularda avantajlara sahiptir. Alüminyum, çelik, titanyum gibi birçok metalik malzeme eklemeli imalat yöntemi ile 3D basılabilir (Herzog ve diğ., 2016). Dolaylı olarak bu metalik malzemelerin tozları eklemeli imalat için hammadde oluşturmaktadır.

Şekil 3.14’de eklemeli imalat yöntemlerinin genel soyağacı verilmiştir. Bu soyağacında gösterilmeyen ve yine eklemeli imalat yöntemi olan bazı yöntemlerde mevcuttur.



Şekil 3.14. Eklemeli imalat yöntemlerinin sınıflandırılması (Herzog ve diğ., 2016)

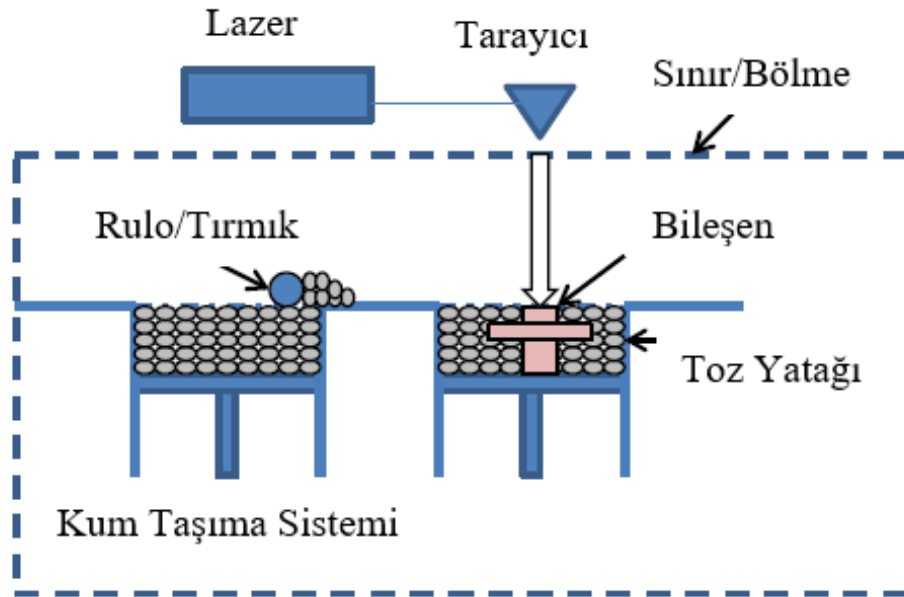
Bir yapı platformu üzerinde nihai ürün oluşuncaya kadar; seramik, polimer, metal veya kompozit tozu kullanılarak katmanlı olarak birleştirme yapılması eklemeli imalatı ifade etmektedir. Malzeme platform üzerine katmalı biçimde birikirken ısıtma, kurlama maddesiyle, lazerle veya gün ışığı ile sertleştirilir.

3.7.1. Toz temelli eklemeli imalat yöntemleri

Toz esaslı yöntemler yaygın olarak kullanılan eklemeli imalat yöntemleridir. Bu yöntemlerde, malzeme tozunun eritilmesi veya bir araya getirilmesi için lazer veya elektron ışını kullanılmaktadır. Metal tozu eritilerek ilk katman tamamlandığında daha sonra diğer katmanlar her seferinde bir öncekinin üzerine ergitilerek nihai yapı oluşturulur. Adım adım anlatılacak olursa;

- Yapı platformunun üzerine tipik olarak 0,1 mm kalınlığında malzeme tabakası toz olarak yayılır.
- Lazer veya elektron ışını ile ilk katman ergitilerek birleştirilir.
- Bir rulo kullanılarak ilk katmanın üzerine ikinci katman toz olarak yayılır ve ergitilip hem kendi arasında hem de ilk katman üzerine birleştirilir
- Nihai geometri oluşturuluncaya kadar süreç tekrarlanır.

Şekil 3.15' toz temelli katmanlı üretim sürecinin şematik olarak uygulanması şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.15. Toz esaslı eklemeli imalat şematik anlatımı (Frazier, 2014)

Toz esaslı yöntemler kendi içlerinde birkaç sınıfa ayrılmaktadırlar. DMLS (Direk Metal Lazer Sinterleme), EBM (Elektron Işını İle Ergitme), SLS veya SLE (Seçici lazer sinterleme veya ergitme), MJF (Multi Jet Birleştirme) yöntemleri toz esaslı yöntemlerdir. Bu yöntemler genel olarak birbirlerine çok benzemekle birlikte birkaç noktada

ayrışmaktadır. Alışlagelmiş olarak en fazla DMLS ve SLE yöntemleri daha yoğun olarak karşımıza çıkmaktadır. Özel uzay ve havacılık uygulamalarında EBM yöntemi son zamanlarda kullanılmaktadır. Ancak, seçici lazer ergitme (SLE) genel anlamda endüstri de diğer yöntemlere kıyasla daha fazla tercih edilmektedir. SLE yöntemi ile metal tozlarından parça üretiminin mümkün olması, endüstride kullanıma daha uygun bir zemin hazırlamaktadır.

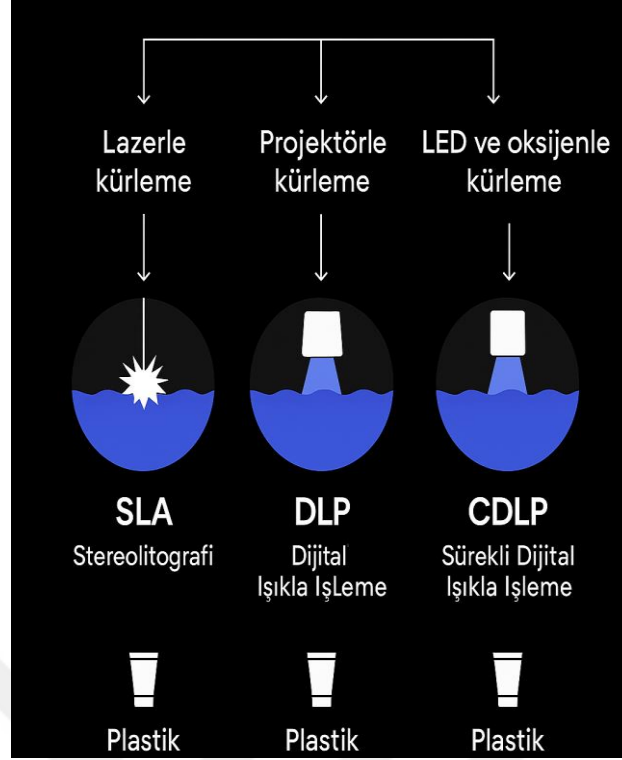
3.7.1.1. Seçici lazer ergitme yöntemi (SLE)

SLS yöntemi 1989 yılında Decard tarafında geliştirilerek, patentlenmiştir. Yöntemde karbondioksit (CO₂) türevli bir lazer; seramik, polimer ve hibrit tozlara gönderilerek, ergitme ve katılma sürecini yerine getirir. Eritilen toz materyal ilk katmanı yapı platformuna oluşturduktan sonra, ünite de ki rulo tarafından, diğer katman için gerekli toz platforma alınır ve burada ikinci katman ergitilerek birleştirilir. Bu işlem parça nihai şeklini alına kadar katmanlı biçimde devam eder.

3.7.2. Foto polimerizasyon temelli eklemeli imalat yöntemleri

Foto hassasiyetli eklemeli imalat yöntemlerinde bir reçine kazanı kullanılır. Lazer veya ultraviyole (UV) ışık ile reçine tankında bulunan reçine sertleştirilerek, kürlenir ve böylelikle ilk katman ortaya çıkmış olur. Daha sonra platform hareket ederek sertleşen katman üzerine, yeni katman için gerekli reçine alınır ve yine aynı şekilde sertleştirilerek ikinci katman da ortaya çıkmış olur. Nihai parça geometrisine ulaşıncaya kadar işlem katmanlı olarak devam eder. Yöntemde kullanılan materyal polimer olup, ışığa karşı duyarlı olmalıdır.

Şekil 3.16’da görüldüğü üzere SLA, DLP ve CDLP yöntemleri foto polimerik yöntemler sınıfına girmektedir. Söz konusu yöntemlerden SLA yöntemi, literatürde oldukça fazla biçimde karşımıza çıkmaktadır. Metalik malzemeler için bu yöntemler kullanılmamaktadır. Üç yöntemde ya UV ışınları ya da lazer ışını kürlenme işlemi için kullanılmaktadır. Birbirlerinden ayırdıkları noktalara bakıldığında; lazer etki etme biçimi karşımıza çıkmaktadır. SLA yönteminde direkt ışın gönderilirken, DLP ve CLDP yöntemlerinde ışın düşük şiddetli ve geniş bir alana yayılarak, sürekli biçimde gönderilmektedir.



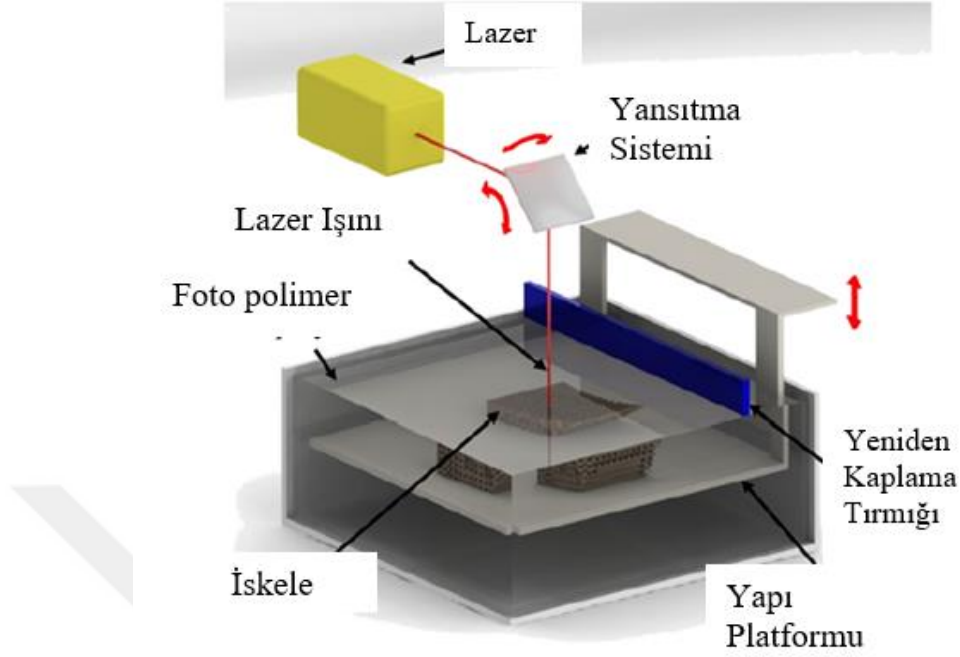
Şekil 3.16. Foto polimerizasyon temelli eklemeli imalat yöntemleri (Serrati ve diğ., 2023)

3.7.2.1. Stereolitografi (SLA)

Stereolitografi (SLA), foto polimer reçinelerin katmanlı biçimde selektif olarak sertleştirilmesi esasına dayanan yüksek çözünürlüklü bir eklemeli imalat teknolojisidir. Bu yöntem, özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların yüksek yüzey kalitesiyle üretimine olanak tanımakta olup, hassas prototipleme ve biyomedikal uygulamalar gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. SLA ile üretilen malzemeler genellikle ışığa duyarlı termoset reçineler olup, mekanik ve ısıl dayanımları uygulamaya özel reçine formülasyonları ile optimize edilebilmektedir. Sürecin temel avantajları arasında ince detayların üretilmesi ve düşük yüzey pürüzlülüğü yer almaktadır.

Şekil 3.17’de ki SLA eklemeli üretim yönteminde kullanılan yöntem ve sistem elemanları açıklanırsa, yöntemde ışığa duyarlı bir reçine öncelikle bir kazan içerisine alınır. Kazan içinde hareket edebilen bir platform üzerine biriken reçine lazer veya UV ışını ile temas ettirilerek, kürlenip sertleşir ve böylelikle ilk katman oluşmuş olur. Daha sonra platform aşağı doğru hareket ederek ikinci katman için gerekli reçine, önceki sertleşen katman üzerine birikir. Burada yine lazer veya UV ışını ile sertleştirilerek, ikinci

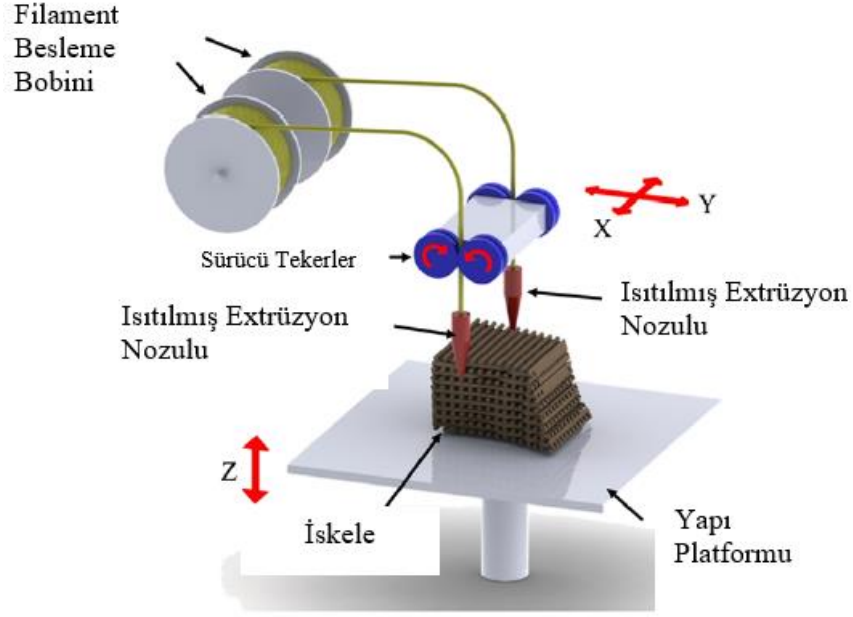
katman ortaya çıkar. Bu işlem parça, nihai geometriye ulaşıncaya kadar devam eder (Martín-Montal ve diğ., 2021).



Şekil 3.17. SLA yöntemi şematik gösterimi (Mota ve diğ., 2015)

3.7.3. Materyal ekstrüzyonu esaslı eklemeli imalat yöntemleri

Bu tip eklemeli imalat yönteminin 3D Yazıcı mantığını en iyi yansıtan yöntem olduğu söylenebilir. Yöntem polimerik veya kompozit malzemelere uygulanmaktadır. Tek çeşit ekstrüzyon esaslı eklemeli imalat yöntemi olup, FDM yöntem, olarak isimlendirilmektedir. Yöntemde iki ayrı nozuldan biri destekleyici, diğeri 3 boyutlu nesneyi üretmek için kullanılan eriyik halde filament kullanılmaktadır. Yapı platformu üzerine iki ayrı eriyik haldeki filament, tekerlekli sistem vasıtasıyla önce nozul'a, daha sonra da platform üzerine biriktirilir. Düzenegın bilgisayar kontrollü hareket etmesi sebebiyle, nozuldan çıkan filamentler parça geometrisini oluşturmaya başlar. Katmanlı baskı işlemi gerçekleştikten sonra parça geometrisi oluşur. Geleneksel 3 boyutlu yazıcılara baktığımızda destek filamenti harici olarak geri kalan tüm sistem neredeyse aynı olduğu kabul edilebilir. Düzenekte bulunan destek filamenti, 3D baskı filamentinin sertleşmeden, devrilip yıkılmasını önlemek amacıyla kullanılmaktadır. Nihai şekil oluştuktan sonra geometriden sökülebilir. Şekil 3.18'de materyal ekstrüzyonu temelli katmanlı süreci anlatılmaktadır.

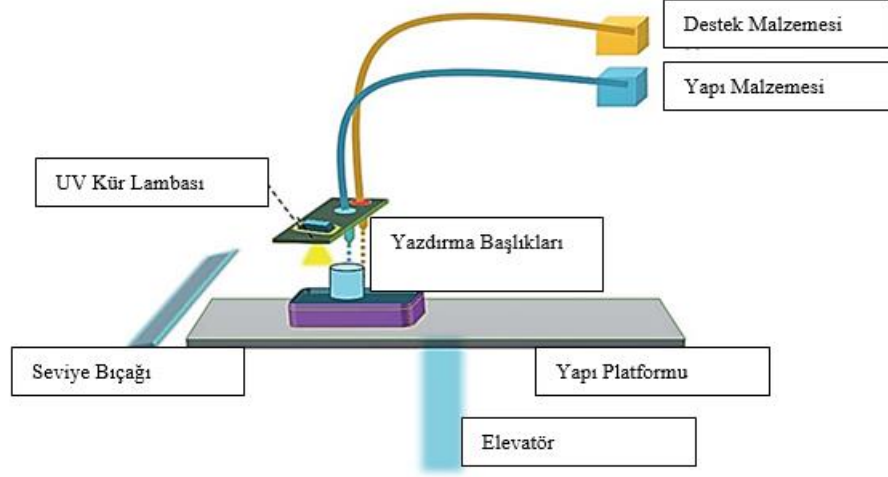


Şekil 3.18. Eriyik biriktirme yöntemi (FDM)

3.7.4. Malzeme püskürtme esaslı eklemeli imalat yöntemleri

Malzeme püskürtme esaslı eklemeli imalat yöntemleri, yapı malzemesinin kontrollü biçimde püskürtülerek yüzey üzerine katmanlı olarak biriktirilmesi prensibine dayanan yenilikçi üretim teknolojileridir. Bu yöntemler, özellikle çok malzemeli üretim ve biyolojik yapıların oluşturulması gibi alanlarda yüksek esneklik sunmaktadır. Malzeme tüketiminin minimize edilmesi, üretim sırasında farklı malzemelerin kombinasyonuna olanak tanınması ve mikro düzeyde hassas yapıların üretilebilmesi, bu teknolojilerin araştırma ve sanayi uygulamalarındaki önemini artırmaktadır. Bu yönüyle, ileri fonksiyonel malzeme üretimi ve özelleştirilmiş tasarımların hayata geçirilmesinde kritik rol oynamaktadır. Şekil 3.19'da yöntemin şematik anlatımı verilmektedir.

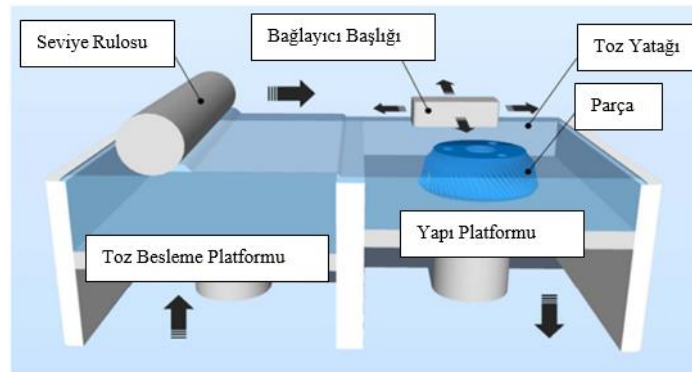
Malzeme püskürtme yöntemi, FDM teknolojisine benzemektedir. Yöntemde eriyik haldeki filamentler sürekli olarak sisteme verilmez. Damlama şeklinde yapı platformu üzerine beslenen destekleyici ve 3D Baskı materyalleri, yine iki farklı nozuldan, X ve Y Kartezyen hareketine sahip bir lineer araba takımından platforma akmaya başlar. FDM'ye göre bir diğer farklılığı da metal ve mum türevli malzemelerde bu yöntemle basılabilir. Malzemenin damlalar halinde bırakılmasından dolayı, kullanılacak malzeme sınırlıdır.



Şekil 3.19. Püskürme esaslı eklemeli imalat yöntemlerinin uygulanması

3.7.5. Bağlayıcı püskürtme esaslı eklemeli imalat yöntemleri

Bağlayıcı püskürtme yöntemi (BJ), malzemeyi bir toz yatağında birleştirmek için sıvı bazlı bir bağlama maddesinin kullanıldığı eklemeli imalat biçimidir. Metal, seramik ve polimerler olmak üzere çeşitli malzemelerden karmaşık şekiller üretmede başarılıdır (Li ve diğ., 2020). Bağlayıcı malzeme, toz katmanları arasında bir yapıştırıcı görevi görmektedir. Bağlayıcı genellikle sıvı formda iken, yapı malzemesi genellikle toz formdadır. Bu yöntem toz esaslı yöntemlere benzerlik gösterirken, ısı gerektirmemesinden kaynaklı olarak tercih edilmektedir.

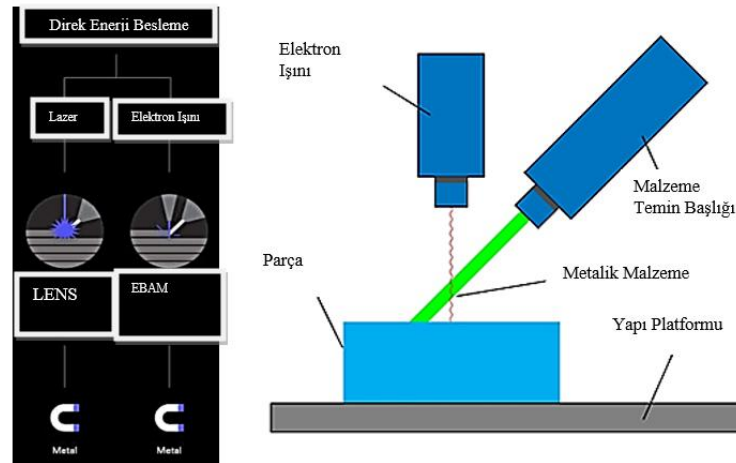


Şekil 3.20. Bağlayıcı püskürtme (BJ) yöntemi

Şekil 3.20’de sistem elemanları detaylı olarak gözlenmekte ve sistemin işleyişi görülmektedir.

3.7.6. Enerji esaslı eklemeli imalat yöntemleri

Doğrudan enerji biriktirme temeline de dayanan eklemeli imalat yöntemleri, FDM'ye kısmi olarak benzemektedir. Yapı üzerine eriyik filament (sürekli biçimde), çok eksenli bir nozzle kol tarafından bırakılır. Elektron ışını vasıtasıyla da platform üzerinde biriken eriyik malzeme kürlenir. Bu sayede nihai yapı oluşturulur. FDM 'ye göre daha avantajlıdır. Çünkü kolun 5 eksenli hareketi vasıtasıyla hem istenilen bölgeler daha kolay doldurulur hem de daha hızlı işlem gerçekleştirilebilir fakat daha maliyetli bir yöntem olduğu da tartışmasıdır. İşlemin bir diğer pozitif özelliği de metalik malzemelerin bu yöntem temeli ile basılabilesidir. Şekil 3.21'de görüldüğü üzere enerji esaslı yöntemler LENS ve EBAM olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İki yöntemde de metalik malzemeler basılırken, LENS yönteminde elektron ışını yüzeye geniş bir şekilde gönderilirken, EBAM yönteminde daha ince bir ışın demeti gönderilir. EBAM yönteminde daha yavaş bir sertleşme oluşurken, yüzey kalitesinin daha iyi olduğu söylenebilir. Bu yöntemlerin bir diğer önemli avantajı, geleneksel talaşlı imalatla üretimi zor olan kompleks iç geometrilere ve fonksiyonel gradyanlı yapılara olanak sağlamasıdır (Khodabakhshi ve diğ., 2019). Özellikle havacılık ve biyomedikal sektörlerinde, kişiye özel veya yüksek mukavemet/düşük ağırlık oranına sahip parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Ayrıca proses parametrelerinin hassas şekilde kontrol edilebilmesi, malzeme özelliklerinin bölgesel olarak optimize edilmesine imkân sunar. Ancak, bu teknolojilerin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği için üretim sonrası işlemlerin (örneğin, yüzey düzeltme, gerilim giderme vb.) dikkatle planlanması gerekmektedir. Elektron ışını ile kürlleme meydana gelmiş yapılar uzay ve havacılık uygulamalarında karşımıza çıkar.



Şekil 3.21. Enerji esaslı yöntemler ve şematik anlatımı

3.7.7. Sac laminasyonu ile eklemeli imalat

Bu tip üretimlerde mekanik üstünlük beklenmemelidir. Sac Laminasyonu (LOM) ile üretilmiş parçalar daha çok estetik ve görüntünün ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilebilir ancak çok kullanılan bir yöntem olduğu da bilinmektedir. Lamine şeklinde parça platform üzerine serildikten sonra üzerine yapıştırıcı görevi gören bağlayıcı damlatılır. Daha sonra ikinci katman lamine serilerek tekrar damlatma yapılır. Bu şekilde yapı inşası tamamlanır. Kürleşme ışını olarak lazer veya UV ışını kullanılır (Ge ve diğ., 2024).

3.7.8. Eklemeli imalatın avantaj ve dezavantajları

Son 20 yılda geliştirilmiş ve hala gelişimi devam eden eklemeli üretim yöntemleri çeşitli konularda avantaj ve dezavantajlar sunmaktadır (Shabani ve Dukovski, 2020).

Avantajları yazılacak olursa;

- Prototipleşme: Eklemeli üretim, geleneksel imalat yöntemlerine kıyasla daha hızlı ve ucuz imalat imkânı sunduğundan, prototip oluşturma konusunda daha avantajlıdır.
- Özel Parça İmalatı: Uzay, havacılık, otomotiv ve savunma sektörünün yer yer özel uygulamalara ihtiyacı olmaktadır. Bu kapsamda eklemeli imalatın tasarım kısıtlamalarını ortadan kaldırması, geleneksel yöntemlere karşı eklemeli üretimi ön plana çıkarır.
- Hurda Azlığı: Diğer yöntemlere kıyasla, parça oluşturulurken atık malzeme büyük oranda azılır. Bu durum Avrupa yeşil mutabakatına ve çevre korunmasına hizmet etmektedir.
- Nakliye Giderinin İndirgenmesi: Eklemeli imalatla az sayıda parça üretilmesi ve üretilen parçaların hafifliği sebebiyle, geleneksel yöntemlere karşı nakliye giderleri büyük oranda azalmaktadır.
- Malzeme Çeşitliliği: Söz konusu imalat ile birçok malzeme basılabilmektedir.
- Karmaşık Geometri Üretimi: İçyapının boş olduğu, birçok yarıçap, oyuk, gibi karmaşık geometriye sahip parçayı çıkarmada oldukça avantajlıdır. Döküm ile de karmaşık geometri çıkartılabilir fakat eklemeli imalata göre daha sınırlıdır.
- Kendinden Montaj: İki veya daha fazla parçadan oluşan bir yapıyı tek operasyonda basabilir.

- Takım Maliyetlerinin İndirgenmesi: Eklemeli imalat da talaş kaldırma işlemine gerek kalmadığından takım maliyetine gerek kalmaz. Üretim sektörü için belki de en önemli avantaj olduğu söylenebilir.

Dezavantajlar yazılacak olursa;

- Yüksek Hacimli Üretim: Eklemeli imalat ile az sayıda üretim gerçekleştirilir. Eğer yüksek adetlerde üretim yapılmak istenirse ciddi maliyetler ortaya çıkacaktır.
- Seri İmalata Uygun Olmama: Her ne kadar özgür bir üretim imkânı sunsa da bir fabrika ortamı için yavaş kalacak üretim yöntemidir.

Eklemeli üretimin geleneksel yöntemlere karşı sağladığı üstünlük ve dezavantajlar mevcuttur. Makine elemanları geleneksel yöntemlerle üretilbilirken, aynı zamanda eklemeli imalat ile de üretilir. Bu kapsamda ortaya farklılıklar çıkmaktadır.



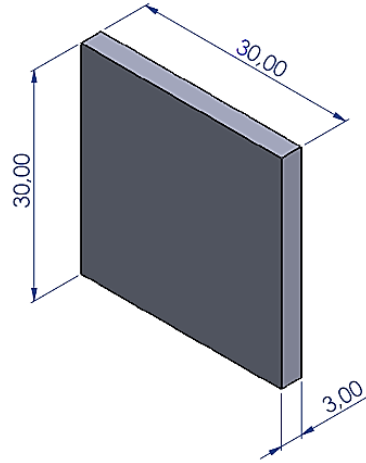
4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde eklemeli imalat ve döküm yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımlarının kriyojenik ortam ve normal ortam şartlarındaki katı partikül erozyon aşınması davranışlarını incelemek için kullanılan deneysel tertibat, numune hazırlığı, aşındırıcı partiküllerin özellikleri, partiküllerin sahip oldukları hızın ölçümü, kriyojenik şartların nasıl sağlanması ve numunelerin yüzey sertliklerinin ölçümünün nasıl yapıldığı hakkında bilgilere yer verilmiştir.

4.1. Deney Numunelerinin Hazırlığı

Katı partikül erozyon aşınmalarında kullanılmak için tedarik edilen AlSi10Mg alaşımı numuneler iki farklı üretim yöntemiyle üretilmiştir. Geleneksel bir üretim yöntemi olan enjeksiyon kalıba döküm olarak dökme AlSi10Mg numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında ise bu tez çalışmasında da araştırılan temel konu olan seçici lazer ergitme (SLE) eklemeli imalat yöntemiyle numune üretimi yapılmıştır. Üretilen numunelerin belirli bir kısmına T6 ısıtıl işlemi uygulanmış ve erozyon aşınması sonuçlarında ısıtıl işlemin de etkisi ölçülmüştür.

İki tip üretim yöntemiyle de aynı boyutlarda numune üretimi gerçekleştirilmiş olup, numune boyutları 30 mm*30 mm*3 mm olarak ayarlanmıştır. Numune geometrisini daha iyi şekilde ifade etmek adına, numunelerin perspektif görünüşü ve 3D Cad görseli Şekil 4.1’de verilmiştir.



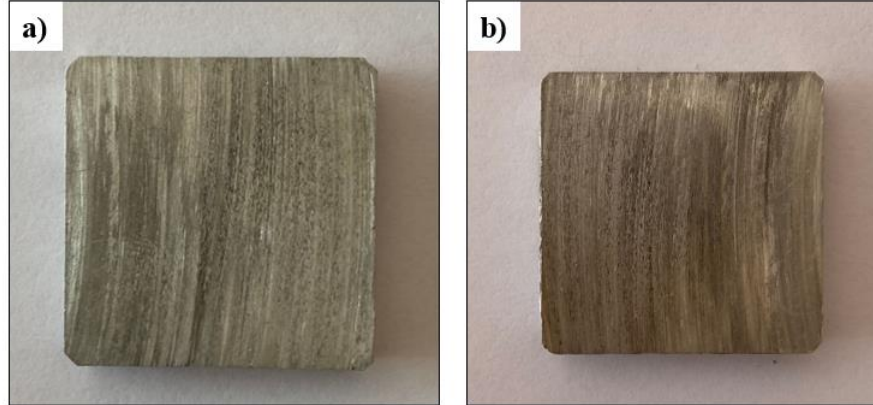
Şekil 4.1. Üretilen numunelerin 3D CAD çizimine ait perspektif görünüşü

Döküm yöntemiyle üretilen AlSi10Mg numuneler, alüminyum enjeksiyon kalıplarında üretilmiştir. İlk olarak lama biçiminde üretilmiş numuneler, dökümden sonra kesime alınmıştır. Döküm üretim parametreleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Döküm AlSi10Mg numunelerin üretim parametreleri

Döküm Üretim Parametreleri	Değer
Ergitme Sıcaklığı (°C)	~ 680
Kalıp Ön Isıtma Sıcaklığı (°C)	~ 200
Enjeksiyon Basıncı (MPa)	~ 55
Kalıp Soğutma Bilgisi	Hava soğutma kanalları bulunmakta
Kalıptan Ayırma Kimyasalı	FUCHS marka su bazlı ayırıcı
Kalıptan Ayırma Süresi (sn)	~ 5

Çizelge 4.1’de verilen parametrelerle üretilen daha sonrasında istenilen ölçülere getirilmek için kesilmiştir. İstenilen ölçülere getirilen numuneler katı partikül erozyon deneylerinde kullanılabilir ve ısıtıl işlem için hazır hale gelmiştir. Üretilen döküm numunelerin görünümü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Döküm yöntemiyle üretilmiş numunelerin yüzey görünüşleri, a) Ön yüzey, b) Arka yüzey

Döküm numunelerin üretimi için DÖKSAN firmasından hizmeti alımı yapılmıştır. Dökme olarak üretilen AlSi10Mg alaşımına sahip numunelerin üretimi tamamlandıktan sonra, eklemeli imalat süreci başlamıştır.

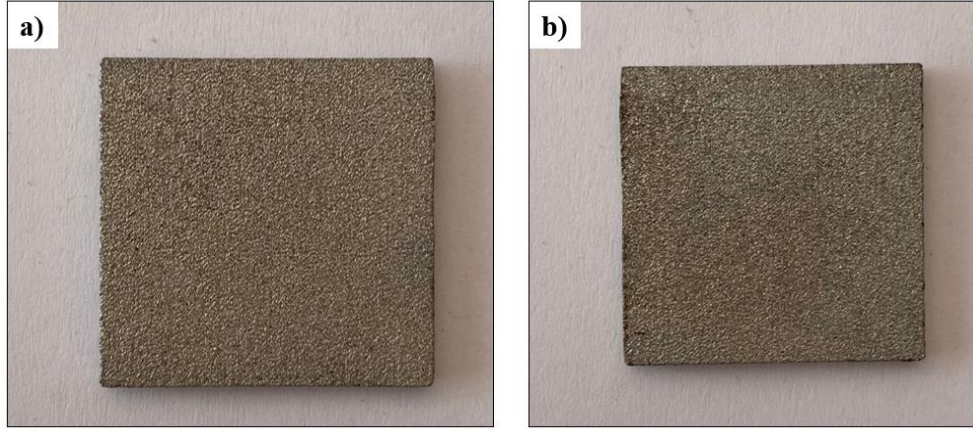
Eklemeli imalat ile AlSi10Mg alaşımı numunelerin üretimi için seçici lazer ergitme (SLE) methodu tercih edilmiştir. Eklemeli imalat ile numunelerin üretimi için Fatih Sultan Mehmet üniversitesi ALUTEAM laboratuvarından hizmet alımı yapılmıştır. Laboratuvar imkanları dahilinde numune üretim süreci tamamlanmıştır. Numunelerin katmanlı olarak üretimi için lazer gücü, katman kalınlığı gibi üretim parametreleri aynı

tutulmuştur. Bu sebeple, erozyon davranışının belirlenmesinde eklemeli imalat parametrelerinin etkisi incelenmemiştir. Eklemeli üretimin, geleneksel üretim yöntemiyle olan aşınma farklılığı ve erozyon aşınmasında ısıtma işlemi ile kriyojenik şartların etkisi bu tez kapsamında sorgulanmıştır. Seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilen AlSi10Mg alaşımların, katmanlı üretim aşamasında ki kullanılan üretim parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Eklemeli imalat sürecinde tercih edilen üretim parametreleri

Üretim Parametreleri	Değer
Katman Kalınlığı (μm)	30
Numune Yönelim Doğrultusu ve Açısı ($^{\circ}$)	Yatay – 0°
Lazer Gücü (Watt-W)	370
Lazer Tarama Hızı (mm/sn)	1300
Lazer Tarama Mesafesi (mm)	0,19
Üretimde Kullanılan Alüminyum Toz Partiküllerinin Boyutları (μm)	20-63

Üniversite laboratuvarında üretimleri tamamlanan AlSi10Mg numuneler istenilen ölçülerde üretimi tamamlanmıştır. Bu sebeple ilave bir kesme veya başka bir proses gerçekleştirilmemiştir. Üretilen numunelerin ön ve arka görünüşü Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Seçici lazer ergitme yöntemiyle üretilmiş numunelerin yüzey görünüşleri, a) Ön yüzey, b) Arka yüzey

Eklemeli olarak üretilmiş numunelerin üretimi de tamamlandıktan sonra, iki farklı yöntemle üretilmiş numunelerin belirli miktarına T6 ısıtma işlemi uygulanmıştır. Uygulanan ısıtma işlemi sonucunda, yapıların erozyon davranışında bir değişiklik oluşup, oluşmadığı sorgulanmıştır.

EK 1 ve EK 2 içerisinde uygulanan spektrometre analizi sonucu, ısıtma işlemi yapılmamış döküm ve eklemeli imalat numunelerin kimyasal yapısı gösterilmektedir.

4.1.1. Numunelere uygulanan ısıt ışlem bilgisi ve numunelerin mekanik  zellikleri

Katı partikül erozyon aşınması deneylerinde tespit edilmek istenen numune parametrelerden bir diğeri de numunelere uygulanan ısıt ışlemin erozyon davranışı üzerine etkisi olup olmadığını araştırmaktır. Bu kapsamda eklemeli imalat ve döküm ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlarının belirli bir kısmına T6 ısıt ışlemi uygulanmıştır

T6 ısıt ışleminin genel uygulama alanları incelendiğinde alüminyum alaşımlarına sıklıkla uygulanan bir ısıt ışlem türüdür. Özellikle AlSi10Mg, Al 2000 serisi ve AlZnMgCu alaşımlarında sıklıkla tercih edilmektedir (Aboulkhair ve diğ., 2016). T6 ısıt ışleminin uygulama amacı incelendiğinde, alüminyum yapıların mekanik özellikleri içinde sertlik ve dayanımını artırmak başta gelmektedir. Ayrıca ısıt ışlem sonucu da yapıların mikro yapısı değişmektedir (Liu ve diğ., 2022).

T6 ısıt ışleminin numunelere uygulanma biçimi değerlendirildiğinde, ışlem 3 aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada çözeltiye alma ışlemi uygulanmaktadır. Çözeltiye alma aşamasında alaşım içinde bulunan magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) elementleri α -Al matrisinde çözdürülerek yapının homojen bir dağılıma sahip olması sağlanır. Homojen yapının elde edilmesi için numuneler çözelti içinde 1-4 saat arasında alaşıma bağlı olarak 500 C-550 C sıcaklıkta bekletilir. Daha sonra ikinci aşamaya geçilir. Numunelere su verme ışlemi gerçekleştirilir ve su verme ile soğutulma sağlanmış olur. Bu aşamada alüminyum içinde çözünmüş elementlerin çözelti halinde kalması ve soğutulması sağlanmış olur. Su verme ışleminde soğutulma hızı çok hızlı olmaktadır. Örneğin saniyede 50 C/sn gibi bir hızda gerçekleşir. En son olarak ise numunelere yapay yaşlandırma uygulanır. Bu aşama tavlama aşaması olarak da bilinmektedir. Numuneler ısıtıcı fırın içinde 160 C-180 C arasında yaklaşık 4-18 saat arası bekletilir. Yapay yaşlandırma ışlemi tamamlandıktan sonra numuneler fırından alınarak kendiliğinden soğumaya bırakılır ve yaşlandırma sonrasında numune içinde Mg₂Si benzeri ince taneli   keltiller oluşmaktadır. Oluşan bu   keltiller plastik deformasyonu sağlayan dislokasyon hareketini zorlaştırarak hem yapının dayanım seviyesini hem de sertliğini artırmaktadır. Uygulanan ışlemin bir diğeri özelliği ise yapı hem çekirdek hem de yüzey de aynı sertliği ve dayanımı kazanmış olmaktadır (Di Egidio ve diğ., 2022).

Tez projesi kapsamında numunelere T6 ısıt ışleminin uygulanması için D KSAN firmasından hizmet alımı yapılmıştır. Numuneler literatürde tarif edildiği şekilde ve  izelge 4.3’de gösterilen parametreler ile ısıt ışleme alınmıştır. Seçici lazer ergitme ve

döküm ile üretilmiş numunelerin belirli bir miktarına ısıtma işlemi uygulanarak, erozyon aşınması testlerinde aşınma miktarında farklılığın değişip değişmediği araştırılmıştır. Ayrıca yüzeyde meydana gelen hasar mekanizmasında ki durum da taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve XRD analizi ile irdelenmiştir.

Çizelge 4. 3. AlSi10Mg numunelere uygulanan ısıtma işlem bilgisi

T6 Isıl İşlem Aşaması	Parametre
Çözeltiye Alma	520°C – 3 Saat
Su Verme	Su Banyosu (~20°C)
Yapay Yaşlandırma	165°C – 5 Saat

Isıl işlem sonucunda numunelerde ki dayanım ve sertlik seviyesinin değiştiği bilinmektedir. Sertlik değerleri için ölçüm yapılmıştır. Ancak dayanım seviyesi için herhangi bir çekme numunesi üretilmediği için çekme deneyi gerçekleştirilmemiştir. Literatürde seçici lazer ergitme ve dökme olarak üretilen numunelere ısıtma işlem öncesi ve ısıtma işlem sonrası dayanım seviyesinin ölçüldüğü çalışmalar bulunmaktadır. Bu kapsamda literatürde ki çalışmalar incelenmiştir. Numunelerin dayanım seviyesi hakkında fikir sahibi olmak adına ısıtma işlem öncesi ve sonrası eklemeli imalat ve döküm numunelerde ki dayanım seviyeleri Çizelge 4.4’de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Isıl işlem öncesi ve sonrası numunelerin dayanım seviyesi (Aboulkhair ve diğ., 2016; Iturrioz ve diğ., 2018; Kempen ve diğ., 2012; Neuser ve diğ., 2022; Tradowsky ve diğ., 2016)

Numune Bilgisi	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
AlSi10Mg Döküm	300-325	2,5-3,5
AlSi10Mg Döküm + T6	263	2.3
AlSi10Mg SLE	333±15	1.5±0.3
AlSi10Mg SLE + T6	300±8	6±3

Döküm ve seçici lazer ergitme üretilen AlSi10Mg alaşımlarının ısıtma işlem öncesi ve sonrasında ki dayanım seviyesinin belirlenmesi için uygulanan çekme deneylerinde farklı çalışmalar olunmasına rağmen yakın sonuçlar oluşmuştur. Ancak seçici lazer ergitme aşamasında ki üretim parametrelerinin değiştirilmesi, ısıtma işlem aşamalarında ki sıcaklık ve sürelerin değiştirilmesi veya çekme numunelerinin geometrisinin değişkenlik göstermesi bile sonuçları değiştirecektir.

Numunelerin dayanım seviyesinin yaklaşık olarak belirlenmesiyle birlikte, üretilen numunelerden sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümü için 62.5 N ön yükleme altında Brinell sertliği alınmış olup numunelerin sertliğinin ölçülebilmesi için Konya

Teknik Üniversitesi Makine Laboratuvarında bulunan AFFRI marka sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Numunelerden sertlik ölçüm sürecinin görseli Şekil 4.4’de verilmiştir.



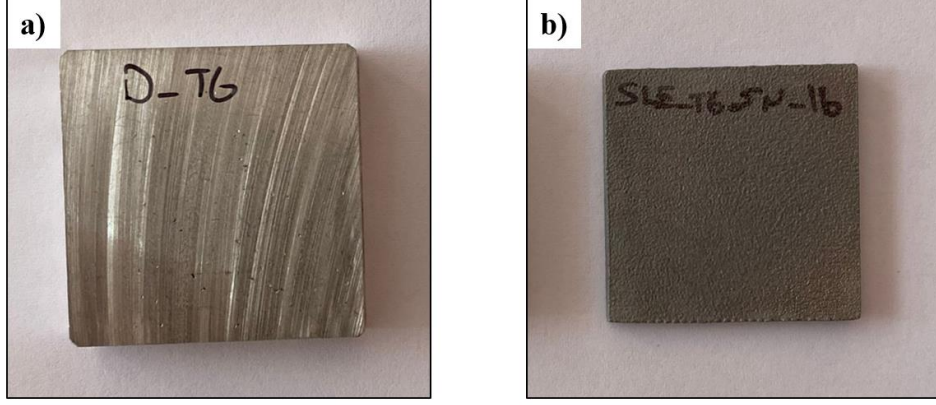
Şekil 4.4. Sertlik ölçüm cihazı ve sertlik ölçüm süreci

Her bir numuneden 7 tekrarlı sertlik ölçümü yapılarak, ortaya çıkan sonuçların ortalama olarak değeri Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5. Brinell sertliği ölçüm sonuçları

Ön Yükleme (N)	Numune Bilgisi	Sertlik Ölçüm Sonucu (HB)
62,5	AlSi10Mg Döküm	53
	AlSi10Mg Döküm + T6	88
	AlSi10Mg SLE	90
	AlSi10Mg SLE + T6	85

Numunelerden elde edilen sertlik sonuçları ve dayanım seviyesi irdelendiğinde, uygulanan ısıtma işlemi numunelerin sertliğini artırmakta, ancak dayanım seviyesi üzerinde direkt söz sahibi değildir. Ayrıca eklemeli imalat ile üretilmiş numunelerin sertlik seviyesi, dökümlere kıyasla daha yüksek olmuştur. Isıtma işlemi sonrasında döküm ve eklemeli imalat numunelerin görüntüsü Şekil 4.5’de verilmektedir. Isıtma işleminin tamamlanmasıyla numune hazırlama süreci tamamlanmıştır. Bundan sonraki aşamada katı partikül erozyon aşınması deney parametreleri ve deneysel süreçteki ekipman, partikül ve teorik esasların belirlenmesine geçilecektir.



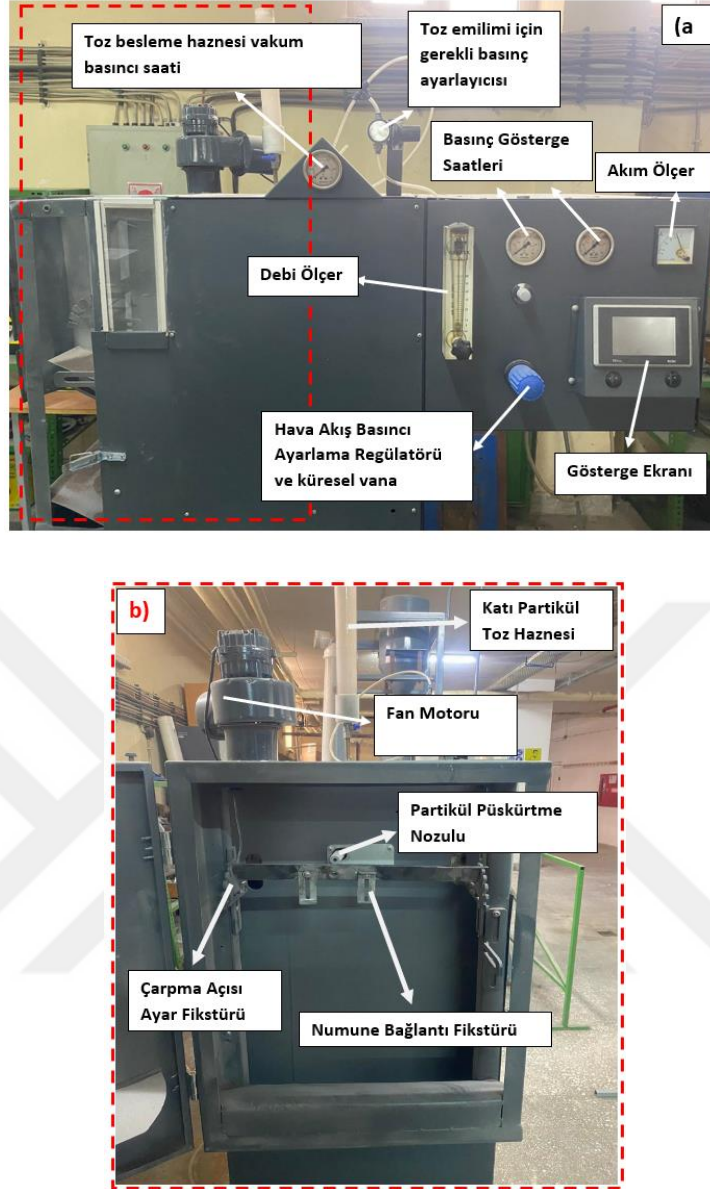
Şekil 4.5. Isıl işlem uygulanmış eklemeli imalat ve döküm AlSi10Mg numunelerinin görünüşü

4.2. Deneysel Tertibat

Katı partikül erozyon aşınması deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için çeşitli test cihazı üretici firmalar bulunmaktadır. Test cihazı üreticileri Avrupa ve Kuzey Amerika kıtalarında faaliyet gösteren firmalardır ve sayıları azınlıktadır. Az sayıda üretici olmasından kaynaklı olarak erozyon test cihazlarının fiyatları yüksektir.

Ulusal ölçekte herhangi bir üretici bulunamamaktadır. Ancak üniversite laboratuvarlarında çeşitli erozyon aşınması test cihazları geliştirilmiştir. Bu kapsamda tez projesi içerisinde deneysel faaliyetlerin gerçekleştirilebilmesi için kullanılacak test cihazı Konya Teknik Üniversitesi makine mühendisliği laboratuvarında bulunan katı partikül erozyon aşınması test cihazıdır. Laboratuvar imkanları dahilinde mevcutta iki adet erozyon test cihazı bulunmakta olup, cihazların birinde aşındırıcı partiküller düşey olarak deney numunelerine isabet ederken, diğer cihazda yatay biçimde partikül çarpması gerçekleşmektedir. Ayrıca yatay şekilde partiküllerin isabet ettiği cihazın yüksek sıcaklıklarda (600°C - 700°C) erozyon testlerinin gerçekleştirilebilmesi yeteneği en büyük farklılıklardandır. İki tip cihazda uluslararası standartlar dahilinde üretilmiş olup, cihazların ülkemizde test hizmeti veren kuruluşlarca akredite olmasını sağlayabilecek revizyon çalışmaları da devam etmektedir.

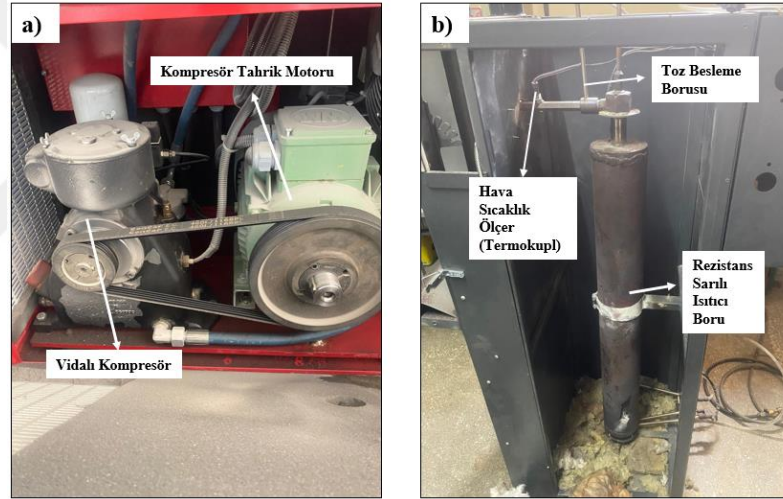
Eklemeli ve döküm olarak üretimleri tamamlanan AlSi10Mg alaşımı numunelerin deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için yatay partikül çarpması ve yüksek sıcaklık yeteneği sunan katı partikül erozyon aşınması test cihazı kullanılacaktır. Test cihazının dış görünüşü ve üzerindeki bileşenlerin tanımı Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.6. Katı partikül erozyon aşınması test cihazı; a) Cihaz genel yan görünüşü, b) Hava püskürtme ve nozul bölümü

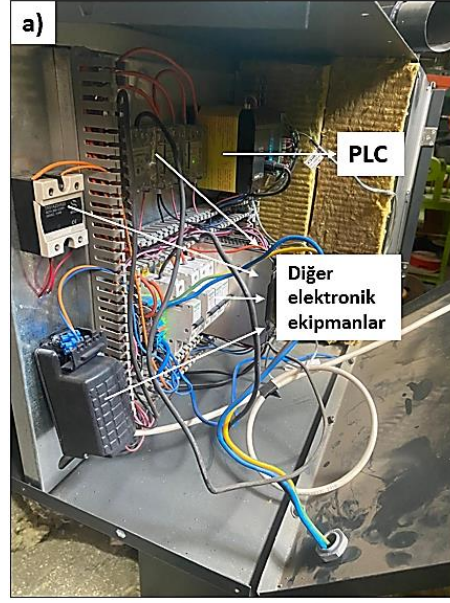
Deneysel cihazın çalışması ve üzerindeki bileşenlerin görevleri incelendiğinde, Şekil 4.7.(a)'da görülen bir adet vidalı kompresör atmosferden emdiği havayı basınçlandırarak bir hava tankına göndermektedir. Kompresör havayı 8 bar basınca kadar ulaştırmaktadır. Tank içerisindeki basınç 8 bar seviyesine ulaştığında kompresör otomatik olarak kendini durdurmakta ve tank içindeki basınç daha yüksek seviyeye ulaşmamaktadır. Daha sonrasında hava tankından hava Şekil 4.6'daki cihaza gönderilmektedir. Test cihazının dışındaki bir küresel vana aktif edilerek, basınçlı hava, kanal akışı ile cihaz içerisine girmektedir. Şekil 4.6.(a)'da gösterilen hava akış basıncı ayarlama regülatörü ile havanın basıncı istenilen seviyelere getirilerek, basınçlı hava Şekil 4.7.(b)'deki bölüme gönderilir. Bu bölümde havanın geçtiği bölümün dışına bir adet

rezistans sarılı olup, basınçlı hava burada ısıtılır ve sıcaklık olarak istenilen değerlerin yakalanması sağlanır. Basıncı ve sıcaklık seviyesi ayarlanmış hava artık nozula ulaştırılarak püskürmeye hazır hale gelmiş olur. Isıtılmış hava nozula gönderilirken, Şekil 4.6.(b)'de gösterilen katı partikül toz haznesi içerisine doldurulmuş aşındırıcı parçacıklar, hava akışı içerisine karıştırılır. Katı partikül toz haznesi havaya karışırken, içeride bir adet vakum oluşmakta ve oluşan vakum basıncı için vakum basıncı ölçer manometre bulunmaktadır. Partiküllerle karışmış hava, Şekil 4.6.(b) bölümüne ilerleyerek burada nozuldan, numuneye doğru püskürmektedir. Bu bölümde numunelerin cihaza bağlanması için numune bağlantı fikstürü ve numunelere istenilen çarpma açısında partiküllerin çarpması için açısal ayar fikstürü bulunmaktadır. Ayrıca partiküllü havanın püskürmesiyle ortamı bir adet toz bulutunun kaplamasını önlemek için bir adet fan ve fan motor kullanılmış olup, oluşan toz bulutu ortamdaki çekilmektedir.



Şekil 4.7. Hava basınçlandırma ve ısıtma bölümü, a) Vidalı kompresör, b) Rezistans bölümü

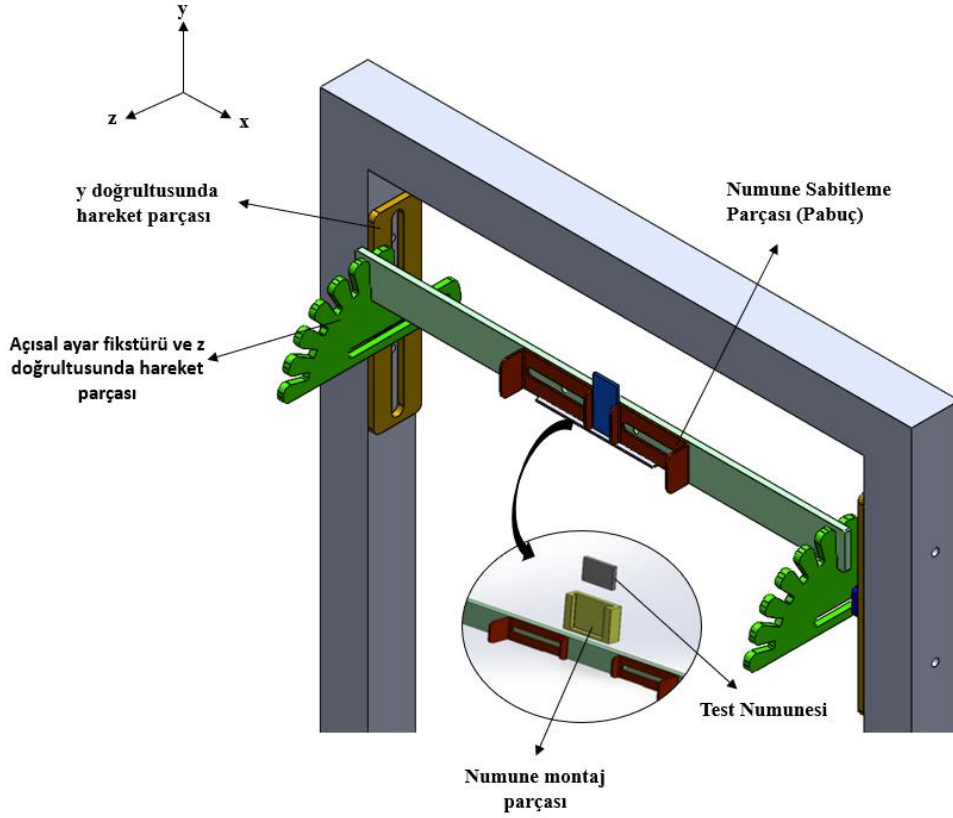
Şekil 4.6.(a) ve Şekil 4.7.(b)'de gösterilen cihaz bileşenlerinden akım ölçer, debi ölçer, gösterge ekranı, basınç gösterge saatleri ve sıcaklık ölçerler ile havanın akış basıncı ve sıcaklık seviyesi kontrol edilebilmektedir. Basınç gösterge saatleri ile analog bir şekilde gözleme dayalı kontrol yapılırken, sıcaklık ölçerlerden sağlanan veriler Şekil 4.8.(a)'daki elektronik kontrol ünite bölümünde bulunan programlanabilir mantıksal denetleyici (PLC) sayesinde okunup işlenerek, cihaz gösterge ekranında gösterilir. Ayrıca kullanılan PLC sayesinde cihazdaki sıcaklık seviyeleri ayarlanabilir.



Şekil 4.8. Erozyon test cihazı elektronik bölüm, a) Elektronik kontrol ünitesi ve PLC, b) Gösterge ekranı

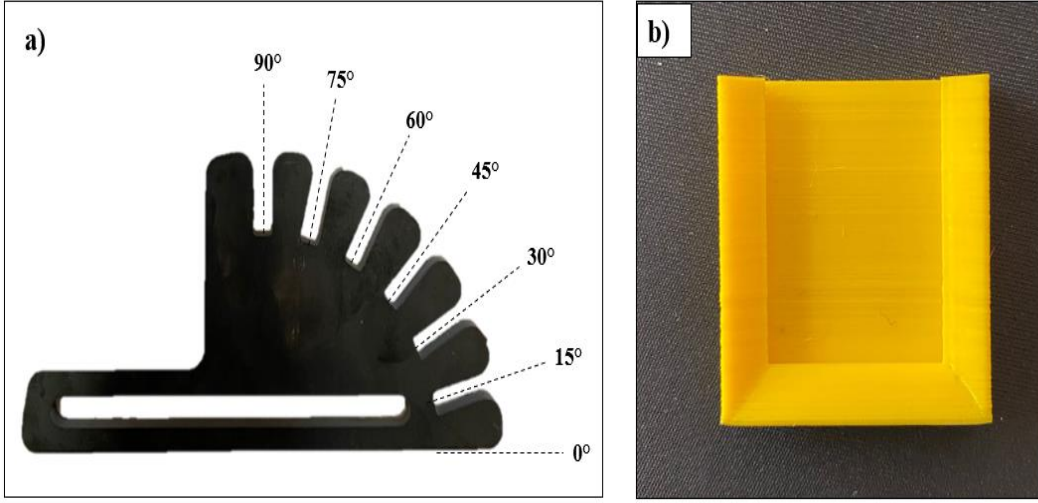
Şekil 4.8.(b)'de gösterilen ekran üzerinden ısıtıcı çıkış sıcaklığı istenilen seviyelere ayarlanarak, sıcaklık seviyeleri kontrol edilebilmektedir. 500°C ve üstü sıcaklık seviyelerine ulaşılması yaklaşık 7-8 saat seviyelerinde sürmekteyken, 100-200°C sıcaklık seviyelerine 4-5 saat içerisinde ulaşılmaktadır.

Cihazdaki önemli bölümlerden bir diğeri de hava püskürme ve numune bağlantı bölümleridir. Bu bölümde partiküllerin numunelere istenilen ölçülerde çarptırılmasını sağlamak için açılabilir ayar fikstürü ve numune bağlantı kısımları bulunmaktadır. Tez kapsamındaki deneysel faaliyetlerin gerçekleştirilebilmesi için numune tutma parçasına ekstra parça ilave edilmiştir. Numune bağlantı bölümünün 3D CAD çizimi Şekil 4.9 içinde verilmiştir.



Şekil 4.9. Erozyon test cihazı numune bağlantı bölümü

Test numunelerinin cihaza bağlantı aşamasında, bir adet parça ile y doğrultusunda hareket sağlanırken, partikül çarpma açısının ayarlanabilmesi için bir adet açısal ayar parçası kullanılmaktadır. Açısal ayar parçası ayrıca numunelerin z doğrultusunda ki hareketini kontrol etmektedir. Test numunelerinin nozul çıkışına denk gelecek şekilde bağlanması için iki adet numune sabitleme parçası (pabuç) kullanılarak bağlanması mümkündür. Ancak bu bağlantı aşamasında direkt olarak numuneleri pabuçlar arasına sabitlemek yerine, 3D yazıcı kullanılarak ek bir sabitleme parçası üretilmiş ve test numuneleri direkt bu ek montaj parçasına bırakılarak, deneylere hazır hale getirilmektedir. 3D yazıcı ile üretilen bu parçanın diğer bir amacı ise, deneysel süreçteki deneylerin bir kısmı kriyojenik sıcaklıklarda yapılacaktır. Kriyojenik sıcaklıklar için sıvı azot kullanılacak olup, sıvı azot içinden çıkarılan numunelerin cihaza bağlantısı için montaj süresini kısaltmak amacıyla ek montaj parçası üretilmiş ve bu sayede numunelerin bağlantı süreleri 25 saniye seviyelerine gerilemiştir. Deneylerin kriyojenik sıcaklıklarda gerçekleştirilmesi bu bileşen sayesinde gerçekleştirilmektedir. Üretilen ek montaj parçası ve açısal ayar parçasının görseli Şekil 4.10’da verilmiştir.

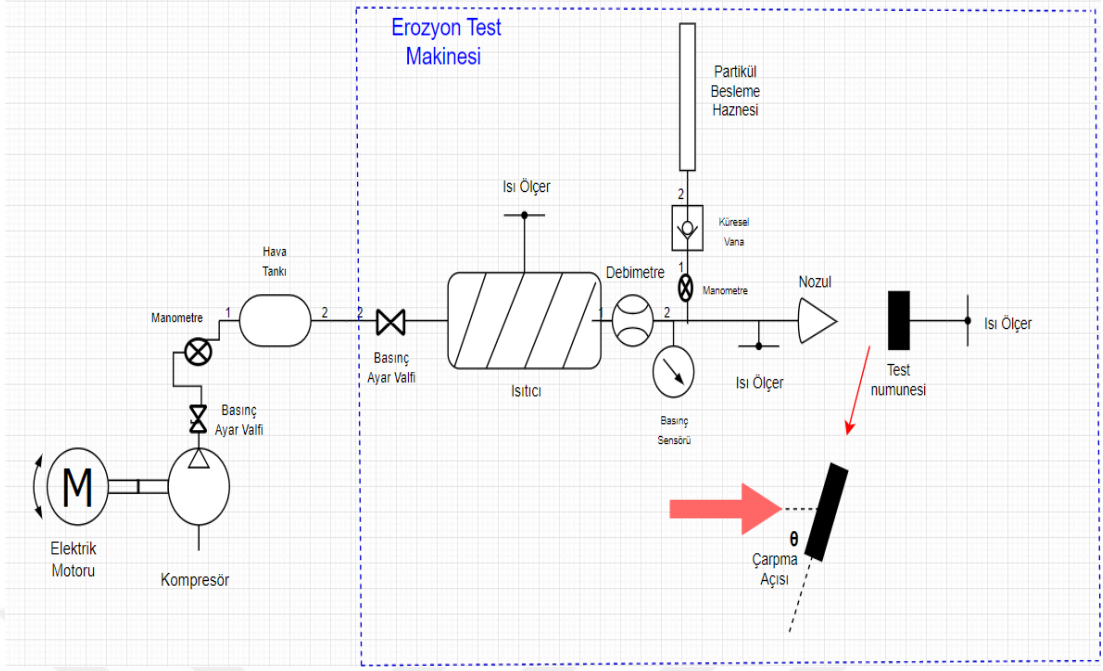


Şekil 4.10. Numune bağlantı parçaları, a) Açısal ayar parçası, b) Numune ek montaj parçası

Açısal ayar ve bir doğrultuda (z) öteleme hareketinin yapılmasını sağlayan Şekil 4.10.(a)'da ki parça incelendiğinde, numuneyi tutan parça farklı doğrultularda parça üzerine bağlanabilmektedir. Açısal ayar için parça üzerine 6 farklı boşluk genel erozyon çarpma açıları için açılmıştır. 15° çarpma açısından, 90° çarpma açısına kadar toplam da 6 farklı çarpma açısında erozyon aşınması deneyleri gerçekleştirilebilmektedir. Literatür incelemeleri ile birlikte erozyon deneyleri genellikle 30° , 60° ve 90° çarpma açısında gerçekleşmekte fakat davranışın belirlenemediği durumlarda 15° , 45° ve 75° çarpma açıları da deneysel çalışmalar gözlenmektedir. Bu kapsamda tez projesinin deneysel çalışmaları için 6 farklı çarpma açısında deneyler gerçekleştirilerek numunelerin erozyon davranışı derinlemesine irdelenecektir.

Test cihazının genel anlamda çalışması ve cihaz bileşenleri hakkında bilgi ve görüş sahibi olunmuştur. Deneysel çalışmalar söz konusu cihazla gerçekleştirilecektir. Anlatılanlardan yola çıkılarak, test cihazının tesisat şeması Şekil 4.11'de verilmektedir.

Tesisat şemasında gösterilen bazı detaylar ele alındığında, test numunesinin sıcaklığının ölçümü için bir adet sıcaklık ölçer kullanılmaktadır. Bu yetenek kullanılan test cihazında mevcuttur. Numune sıcaklığı ölçülerek PLC sisteminde işlenip ekranda görülmektedir.



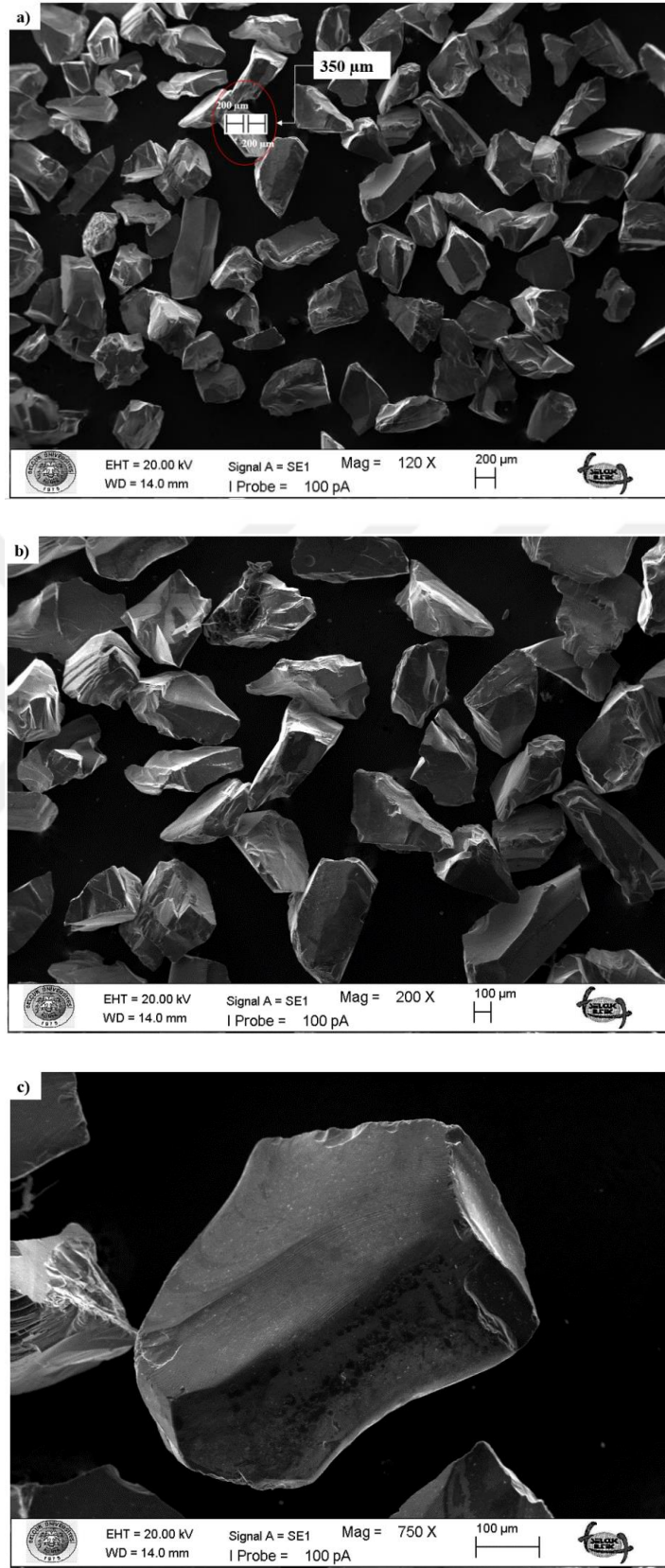
Şekil 4.11. Katı partikül erozyon test cihazı tesisat şeması

Deneyisel süreçte kullanılacak erozyon cihazı ASTM G76 ve G211 standartları kapsamında deneyisel faaliyetlerin yürütülmesi imkânı sunmaktadır. Bu kapsamda tez projesinin deneyisel faaliyetleri söz konusu cihaz ile gerçekleştirilecektir. Deneyisel parametreler ile açıklanacaktır.

4.3. Aşındırıcı Katı Partikül Bilgileri

Deneyisel faaliyetlerin gerçekleştirilmesinde önemli parametrelerden bir diğeri ise aşındırıcı partikül özellikleridir. Partikül boyutları, partikül geometrisi gibi parametreler erozyon oranına etki eden birincil önemdeki parametrelerdir.

Katı partikül erozyon aşınmasında kullanılan partiküller Silisyum Karbür (SiC) malzemeye sahip olup, partikül boyutları 300–425 μm aralığındaki boyutlar tercih edilmiştir. Partiküller Çin merkezli FUTONG firmasına ait olup EK 3 içinde partiküllerin detaylı özellikleri ve adlandırılması hakkında gerekli dokümanlar verilmiştir. Partiküllerin boyutunu ve şekli daha iyi tespit edebilmek adına partiküllerden farklı büyütme ölçeklerinde SEM mikroskopu ile detaylı görüntüler çekilmiştir. Partikül SEM görüntüleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.12.(a)'dan partiküllerin ortalama boyutlarının 350 μm 'luk teorik bir dairesel çapta olduğu anlaşılmaktadır. Çekilen görüntüler Selçuk Üniversitesi İLTEK laboratuvarından alınmıştır.



Şekil 4.12. Aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüleri, a) 120X büyültme, b) 200X Büyültme, c) 750X Büyültme

Aşındırıcı partiküller yaklaşık 350 μm 'lik bir dairesel alan kaplamaları ile birlikte, bu değer partiküllerin hepsi için geçerli değildir. Ancak dağılımın çoğunluğu bu teorik çap etrafında olduğu görüntülerden anlaşılmaktadır.

Aşındırıcı partikül malzemesi olarak alümina (Al_2O_3) ve silisyum karbür (SiC) literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu proje kapsamında kullanılan silisyum karbür aşındırıcıların kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.6. Aşındırıcı SiC partiküllerin kimyasal kompozisyonu

Kimyasal İçerik	Oran (%)
SiC	Min. 98
Fe_2O_3	Max. 0.2
F, C ve diğer elementler.	Max 0.2

Çizelge 4.7. Aşındırıcı SiC partiküllerin mekanik özellikleri

Mekanik Özellikler	Değer
Gerçek Yoğunluk (g/cm^3)	3.2
Aralıklı Yoğunluk (Bulk Density- g/cm^3)	1.45-1.60
Sertlik (Mohs)	9.5
Genel Şekil ve Renk	Kübik ve Siyah

4.4. Partikül Çarpma Hızının Belirlenmesi

Katı partikül erozyon aşınması davranışında önem arz eden parametrelerden biri aşındırıcı partiküllerin numune yüzeyine çarpma hızlarıdır. Çarpma hızlarının belirlenmesi için geçerliliği yüksek yöntemlerin başında partikül görüntü hız ölçüm (PIV) sensörleri ve lazer doppler ivme ölçer (LDA) sensörleri gelmektedir. Söz konusu sensörler her ne kadar doğru ölçüm yapıyor gibi görünse de hız ölçümünde sapmalar meydana getirdiği bilinmektedir (Timmins ve diğ., 2012). Ayrıca bu sensörler oldukça pahalı ve maliyetli sensörlerdir. Bu kapsamda hem çeşitli teorik modellerle ölçüm yapılabilmeyle birlikte akış analizleriyle hız seviyesinin ölçümü hakkında fikir sahibi olunabilir. Ayrıca sadece hava akışının hız seviyesini belirlemek debimetre veya çeşitli akış hız ölçüm sensörleriyle hem doğruluğu yüksek hem de maliyeti düşük biçimde gerçekleştirilebilir.

Bu tez çalışmasında partikül çarpma hızlarının belirlenebilmesi için öncelikle hava hız seviyesi sensör temeliyle ölçülmüştür. Hız seviyesi ölçümlerinden sonra, partiküllerin hava akışına karışma anındaki hızların tespiti için ayırık elemanlar yöntemi

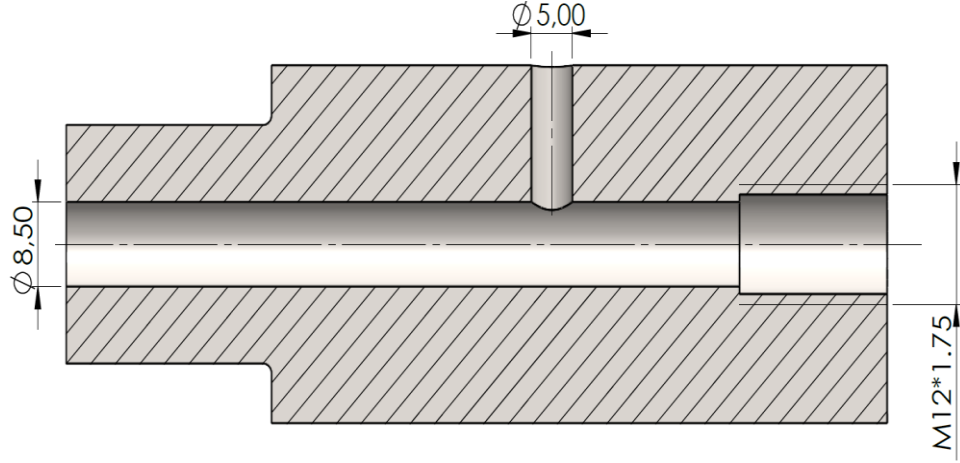
temelli analiz çalışmalarıyla partiküllerin sahip olduğu ilk hız seviyesi belirlenmiştir. Bu iki yöntemden bulunanlar ile gaz ve katı fazlarının birlikte dolaştığı kanal içi akışlarda geçerliliği yüksek Eulerian Langerian Particle Tracking (LPT) yaklaşımıyla partikül hızları kanal çıkışında teorik olarak belirlenmiştir. Daha sonrasında partikül hızlarının tespiti için literatürde sıklıkla kullanılan çift disk metodu ile deneysel hız ölçüm çalışmaları yürütülerek sonuçların tutarlılığı tartışılmıştır.

4.4.1. Nozul içi hava akış hızının ölçümü

Katı partikül erozyon test cihazının çalışmasında en önemli faktör basınçlı havadır. Bir kompresör tarafından basınçlandırılan hava nozula doğru yönlendirilerek, buradan püskürmektedir. Püskürme esnasında hava akışı için katı partiküller karıştırılarak partiküllerin numuneye belirli bir hız seviyesinde çarptırılması sağlanmaktadır.

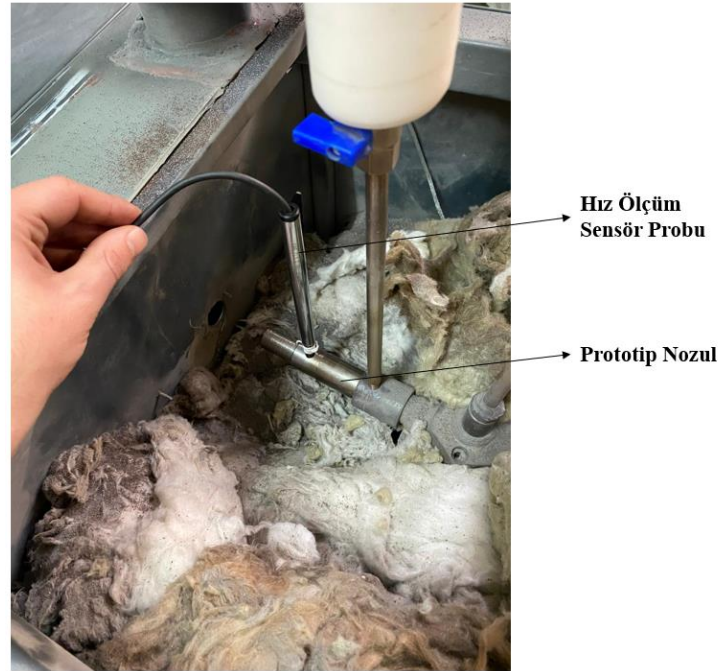
Partiküllerin ulaştığı hız seviyesini belirlemek için hava akış hızının belirlenmesi önem arz etmektedir. Hava akış hızının değişimi ise akışkan basıncına bağlıdır. Hava akış basıncı düşük olduğu durumlarda hız seviyesi düşerken, basıncın yükseltilmesiyle havanın hızı yükselmektedir. Ancak havanın akış hızları ile partiküllerin sahip olduğu hız seviyesi birbirleriyle aynı olmamaktadır. Partiküllerin sahip olduğu katı form ve kütle etkisiyle akışkan hızından daha düşük seviyelerde bir hız seviyesine ulaşması mümkündür. Bu doğrultuda partiküllerin sahip olabileceği maksimum hız seviyesi hava akış hızına eşit olabilir.

Havanın hız seviyesinin ölçülmesi için TESTO 435 marka bir adet hava hız ölçüm sensörü kullanılmıştır. Şekil 4.13’de verilen bir adet prototip nozul üretilerek, hız ölçüm sensörü bu prototip üzerinde kullanılmıştır. Üretilen prototip nozul, cihaz üzerinde kullanılan nozul ile aynı boyutlara sahip olup, prototip nozul iç çapı Ø8.5 mm’dir. Nozul üzerine hava akışına dik doğrultuda bir adet Ø5 mm çapında delik açılmış olup, açılan delik partiküllerin mevcut cihazda kullanılan nozula benzer şekilde, kanal içi akışa beslendiği deliği temsil etmektedir.



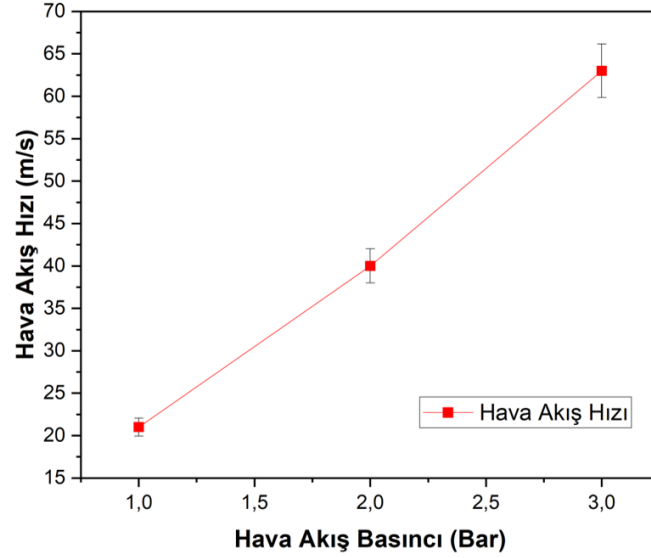
Şekil 4.13. Hava hız ölçümü için üretilen prototip nozulun 3D CAD çizimi

Nozul içine, partikül besleme deliğinden sensörün probu sarkıtılarak, minimum 3 tekrarlı biçimde hız ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm esnasında delikten hava kaçaklarının olduğu ve hız seviyesinin değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu kapsamda kaçak problemlerinin önüne geçilmek adına, sensör üzerine teflon sarılmış ve delik civarı o-ring ile baskılanmıştır. Ölçüm anına ait görsel Şekil 4.14’de verilmiştir. Kaçak problemlerinin önüne geçildikten sonra akışkan basıncı 1 bar, 2 bar ve 3 bar olarak ayarlanarak ölçümler yapılmıştır.



Şekil 4.14. Hava akış hızı ölçümü

Tekrarlı hız ölçümleri sonucunda havanın sahip olduğu hız seviyesi, akışkan basıncına bağlı olarak tespit edilmiştir. Havanın basınç ile hız ilişkisi Şekil 4.15'te sunulan grafikte gösterilmektedir.

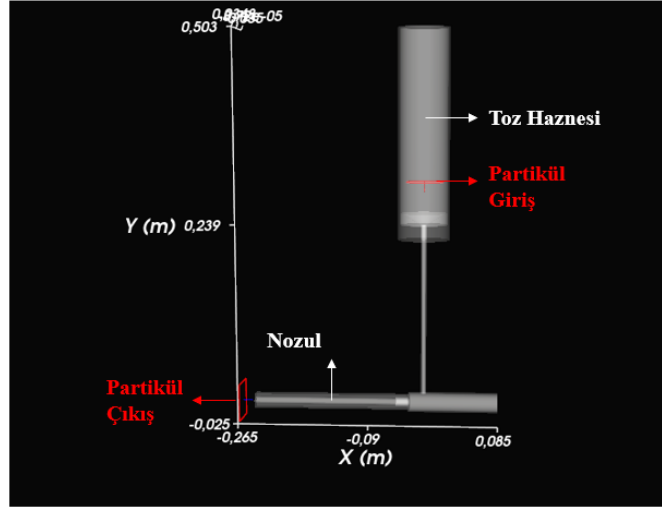


Şekil 4.15. Hava akış hızı ölçüm sonuçları

Ölçüm sonuçlarına göre hava hızı basınca bağlı olarak lineere yaklaşık sonuçlarda oluşmaktadır. 1 bar akışkan basıncında 21 m/s olarak ölçülen hız seviyesi, 3 bar akışkan basıncında yaklaşık 60 m/s olarak ölçülmüştür. Katı partikül erozyon cihazında 3 bar'a kadar stabil bir akış basıncı sağlanması ve partiküllerin numune yüzeylerine maksimum etkiyi bırakması için deneyler süresince akışkan basıncı 3 bar olarak ayarlanacaktır. Bu sebeple de hava akış hızı da 60 m/sn olduğu söylenebilir. Ancak partikül hız seviyesinin bu değerlere ulaşamayacağı düşünülmektedir.

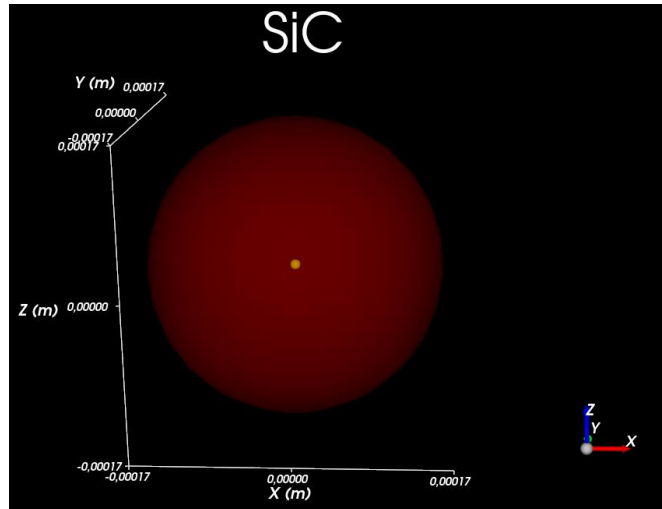
4.4.2. Ayrık elemanlar yöntemiyle partiküllerin hava akışı içine karışma anındaki hız seviyesinin belirlenmesi

Aşındırıcı katı partiküllerin, hava akışına karışma anında ki sahip oldukları hız seviyesi teorik model için önem arz etmektedir. Bu kapsamda hız seviyesinin belirlenebilmesi için ayrık elemanlar metodu (DEM) ile analiz çalışmaları yürütülmüştür. Ayrık elemanlar analiz çalışmasının uygulanabilmesi için Ansys Rocky DEM yazılımı kullanılmıştır. Yazılım içinde partikül besleme bölümü ve hava akışı öncelikle modellenmiştir. Şekil 4.16 içerisinde modellenen nozul ve partikül besleme haznesi görülmektedir.



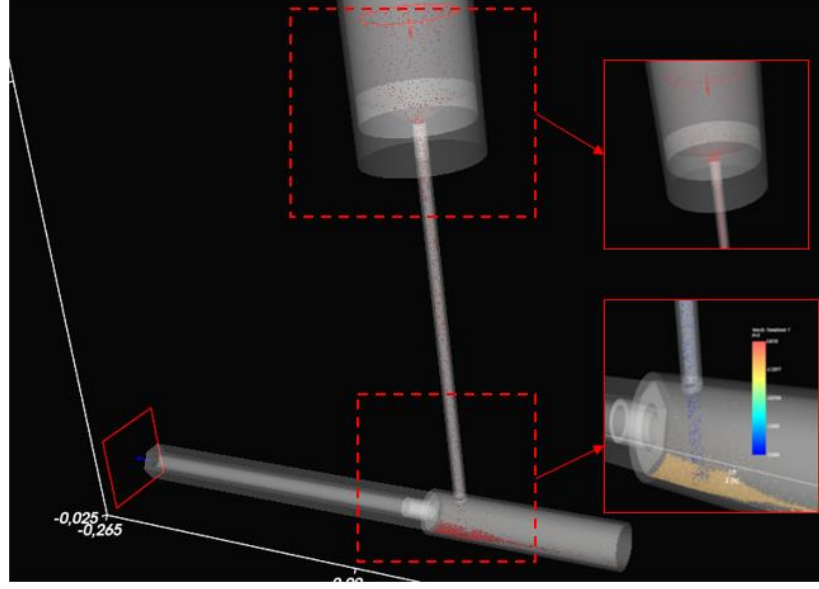
Şekil 4.16. Ayırık elemanlar yazılımı için modellenen hava ve partikül akış kanalları

Şekil 4.16’da gözüken 3D Cad çizimler deneylerde kullanılan katı partikül erozyon test cihazı ile aynı olacak şekilde çizilmiştir. Yazılım içinde problem oluşturan bir bölüm partiküllerin modellemesidir. Partikül miktarı ve partiküllerin sahip olduğu yüzey sayısı artırıldığında analiz süreleri günlerce sürebilmektedir. Bu kapsamda partiküllerin serbest düşmeye bağlı hız seviyesinin tespiti için partikül debisi 1 gram/saniye olarak ayarlanmış olup, partikül hareketi partikül girişinden başlamaktadır. Analiz süresi de 10 saniye olarak ayarlanmıştır. Partikül şekli olarak 350 μm çapında küresel olacak şekilde tanımlanmıştır. Partikül şekli, çok yüzeyli polyhedron olarak ayarlandığında analiz sürelerinin haftalara çıktığı gözlemlenmiş ve bu sebeple küresel geometrideki partiküller tanımlanmıştır. Partiküllerin sahip olduğu geometri Şekil 4.17’de verilmiştir.



Şekil 4.17. Modellenen partikül geometrisi

Partikül çapı olarak 350 μm değerinin seçilmesinde, Şekil 4.12'deki SEM görüntülerinden yararlanılmıştır. Partiküllerin toz haznesi içerisinde yer çekimi etkisi dahilinde serbest düşmeye bırakılmasıyla, hava akışı içine karıştıkları andaki hız seviyeleri ilgili analiz yardımıyla tespit edilmiştir. Bu kapsamda partiküllerin maksimum 2,24 m/s hıza ulaştığı görülmüştür. Partiküllerin hava akış kanalına çarptığı andaki görünümü Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18. Partiküllerin ayırık elemanlar analiziyle serbest düşme hızlarının tespit edilmesi

Sonuç olarak, partiküllerin hava akışına karıştığı andaki hız seviyesinin belirlenmesi ile teorik akış modeline ait hız seviyesinin tespit edilebilmesi sağlanmıştır.

4.4.3. Partikül hızlarının teorik olarak belirlenmesi

Mikron boyutlu katı partiküllerin gaz fazı içindeki hareketine bağlı olarak ulaşabileceği hız seviyesinin tespit edilmesinde genellikle tercih edilen akış modeli Euler modelidir. Söz konusu modelde partiküllerin sahip olduğu kütle, akışkan hızları ve partikül başlangıç hız seviyesi, sürüklenme kuvvetleri ile beraber Newton'un ikinci yasası birleştirilerek hibrit bir model türetilmiştir (Balakin ve diğ., 2010). Akademik çalışmalar, Euler'in önerdiği akış modelini kullanarak türetilmiş ve hata ve sapma miktarlarını azaltan bir çerçeve etrafına toplanmıştır. Euler' önerdiği bu modelde yüksek akış hızlarında ki partikül hareketinin tespit edilmesinde kullanışlı senaryolar matematiksel ifadelerle yansıtılmıştır (Khare ve diğ., 2015).

Euler akış modelinin literatürdeki tam karşılığı “Langerian Parçacık Takibi (LPT)” olarak bilinmektedir. Oluşturulan modelde genel matematiksel ifade Newton’un 2. Yasasından türetilmektedir ve partiküller bu modelde ayırık olarak izlenmektedir. Denklem (4.1) de LPT akışkan modelinin genel ifadesi verilmiştir (Crowe ve diğ., 1998).

$$m_p * \frac{dv_p}{dt} = F_{drag} = \frac{1}{2} * C_d * \rho_f * A_p * (V_f - V_p)^2 \quad (4.1)$$

Denklem (4.1) içindeki parametreler incelendiğinde, partiküllerin kütlesi (m_p) ve partiküllerin hızının zamana bağlı türevi çarpılmasıyla sürüklenme kuvveti (F_{drag}) tespit edilmektedir. Sürüklenme kuvveti aynı zamanda, sürüklenme katsayısı (C_d), hava akış yoğunluğu (ρ_f), partiküllerin kesit alanı (A_p) ve partiküller hareket başlangıç hızı (V_p) ve hava akış hızına (V_f) bağlı olarak tespit edilmektedir.

Denklem (4.1) deki parametrelerin tespit edilmesi için öncelikle daha önce ölçtüğümüz ve simülasyona bağlı bulduğumuz sonuçları kullanmak gereklidir. Nozul çapı Ø8.5 mm olarak ölçülmüş hava akış basıncının 3 bar olduğu bilinmektedir. Hava akış sıcaklığı ise 298 K (25°C) olduğu bilinmektedir. Bu bilinenler ile havanın yoğunluğu Denklem (4.2) kullanılarak belirlenebilir.

$$\rho_f = \frac{P}{RT} \quad [Hava \text{ gaz sabiti } R = 287 \frac{J}{Kg} \cdot K] \quad (4.2)$$

Denklem (4.2) ile havanın yoğunluğu 3,5 kg/m³ olarak bulunmaktadır. Partiküllerin sahip olduğu çap değeri (d_p) daha önceden 350 µm olarak belirlenmiştir. Denklem (4.3) ile partiküllerin kesit alanı 9,62E-8 m² olarak tespit edilmiştir.

$$A_p = \frac{\pi * dp^2}{4} \quad (4.3)$$

Partiküllerin sahip olduğu yoğunluk (ρ_p) değeri Çizelge 4.7’den 3200 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Partiküllerin hacmi ise Denklem (4.4) ile hesaplandığında 2,24E-11 m³ olarak bulunmaktadır.

$$V_p = \frac{4}{3} * \pi * \left(\frac{dp}{2}\right)^3 \quad (4.4)$$

Partiküllerin hacmi ve yoğunluğunun bilinmesiyle birlikte tek bir partikül kütlesi $7,07E^{-8}$ Kg olarak hesaplanır. Bunlarla beraber hava akış hızı daha önceden yapılan ölçümlerle yaklaşık 60 m/s olarak belirlenmiştir. Havanın dinamik viskozitesinin (μ) ise $1,8E^{-5}$ Pa.s olduğu bilinmektedir.

Akışın reynolds sayısının hesaplanması için Denklem (4.5) kullanılabilir. Denklemin kullanılmasıyla akışın reynolds değeri 408 olarak hesaplanır. Reynolds birimsiz bir değerdir ve akışın laminar olduğu anlaşılmaktadır.

$$Re = \frac{\rho_f * V_f * d_p}{\mu} \quad (4.5)$$

Sürüklenme katsayısının bulunması için Denklem (4.6) kullanılır (Crowe ve diğ., 1998).

$$C_d = \frac{24}{Re} * (1 + 0,15 * Re^{0,687}) \quad (4.6)$$

Denklem (4.6) ile sürüklenme katsayısı 0,55 olarak tespit edilir. Denklem (4.1) içindeki bilinmeyen parametreler tespit edilmiştir fakat bulunan sonuç partikül hızının zamana bağlı türevi şeklinde ifade edilmektedir. Zamana bağlı ifadenin konuma bağlı dönüşümü için Denklem (4.7) kullanılabilir. Bu kapsamda Denklem (4.1) içindeki ifade artık hava konumuna bağlı hale gelmiştir. Hava konumu için nozul uzunluğu 210 mm olarak ölçülmüştür. Denklem (4.8) ve Denklem (4.9) de ise başlangıçtaki denklemin daha genel sade bir biçimini ifade etmek için bazı parametrelere değişken atanmıştır (Crowe ve diğ., 1998). Denklemin sağ tarafı bu şekilde daha sade bir görünüme kavuşmuştur.

$$\frac{dV_p}{dx} = \frac{dV_p}{dx} * \frac{dx}{dt} \quad \left[\frac{dx}{dt} = V_p \text{ (Partikül hızı)} \right] \quad (4.7)$$

$$k = \frac{C_d * \rho_f * A_p}{2 * m_p} \quad (4.8)$$

$$\frac{dV_p}{dx} = \frac{k}{V_p} * (V_f - 2,24)^2 \quad (4.9)$$

Denklem (4.9) ile ifade edilen matematiksel ifadenin her iki tarafının da konuma göre integrali alınarak, genel partikül hızını veren matematiksel model Denklem (4.10) ile ifade edilmiştir (Crowe ve diğ., 1998).

$$V_p = [V_f * (1 - e^{-kx})] \quad (4.10)$$

Denklem (4.10) daha önceden bulunan akış ve partikül parametreleri kullanılarak çözüldüğünde partiküllerin sahip olduğu hız seviyesi 25,2 m/s olarak tespit edilir.

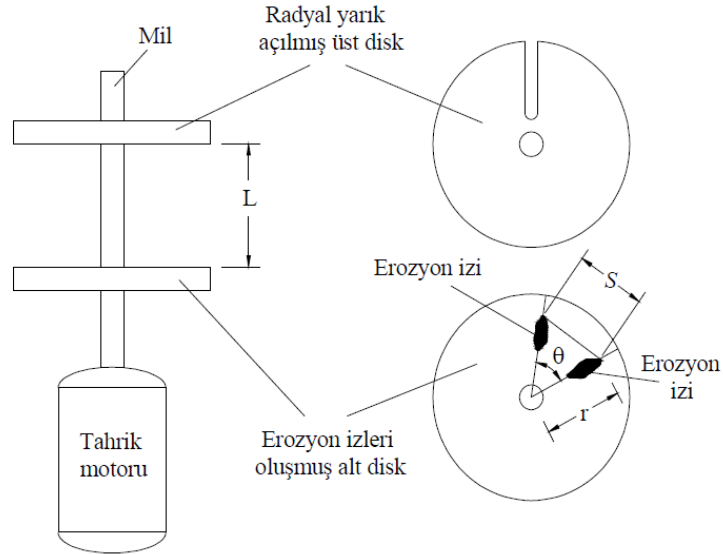
Ortaya çıkan sonuç değerlendirildiğinde ASTM G76 kapsamında hız seviyelerine ulaşıldığı tespit edilmiş olup LPT akış modelinde sapmalar olabileceği öngörüsüyle katı partikül erozyon aşınması deneylerinde partiküllerin birbirleri ile etkileşime girerek hız seviyesinde farklılıklar oluşturabileceği de mutlaka göz önüne alınmalıdır.

4.4.4. Deneysel olarak partikül hız ölçümü

Deneysel olarak partikül hızını ölçmek için PIV ve LDA sensörleri kullanılabilir. Ancak iki tip sensörün de hem maliyetinin yüksek olması hem de ölçümlerinde sapmaların olduğu bilindiği için bu iki tip sensöre bağlı deneysel çalışma gerçekleştirilmemiştir. Bu iki tip görüntüleme ve lazer teknolojisine bağlı sensörler haricinde sıklıkla kullanılan bir diğer yöntem çift disk metodudur (Ruff ve Ives, 1975).

Çift disk metodu özellikle katı partikül erozyon aşınması deneylerinde, partikül çarpma hızlarını belirlemek için oldukça kullanışlıdır. Yöntemin bilimsel temeli araştırıldığında %5-%8 arasında sapmaların olduğu bilinmektedir fakat partikül hızlarının tespiti için maliyet açısından tercih edilebilir. Ayrıca yüksek maliyetli PIV ve LDA sensörlerinde bile aynı oranlarda sapmaların olduğu literatürde mevcuttur.

Çift disk metodu Şekil 4.19’da görüleceği üzere, iki adet diskten oluşmaktadır. İki diskten üstteki disk üzerine bir yarık açılmış olup, alttaki disk üzerinde herhangi bir yarık mevcut değildir. İki disk te aynı şaft üzerine bağlanarak bir tahrik motoruna bağlanmaktadır. Öncelikle tahrik motoru çalıştırılmayıp, diskler durgun haldeyken üstteki disk’e doğru partikül püskürtülmesi gerçekleştirir. Üstteki diskte bulunan yarık içinden geçen partiküller alttaki disk üzerine bir iz oluşturmaktadır. Daha sonra tahrik motoru bilinen bir açısal hızda (ω) döndürülmeye başlanarak iki diskte dönmeye başlamaktadır. İki disk birlikte senkron olarak dönerken bu sefer partiküller tekrar püskürtülmeye başlamaktadır. Partiküller alttaki disk üzerine yine bir iz meydana getirerek, alttaki disk üzerinde toplamda iki adet erozyon izi oluşmuş olur. Bu aşamada çift disk metodunun deneysel süreci tamamlanmış olur. Daha sonrasında iki disk arası mesafe (L), erozyon izlerinin yarıçapı (r), oluşan iki erozyon izi arasındaki mesafe (S) ve dönüş hızları arasında teorik matematiksel model kullanımı ile partiküllerin çarpma hızları bulunmuş olur.



Şekil 4.19. Çift disk metodu şematik anlatımı (Bağcı, 2010)

Alt disk üzerinde oluşan iki iz arasındaki mesafenin (S) bulunması için çembersel yay uzunluğundan yola çıkılarak Denklem (4.11) türetilmiştir.

$$S = \theta * r \quad (4.11)$$

Denklem (4.11) de çembersel yay uzunluğundan yola çıkılarak iki erozyon izi arasındaki mesafenin bulunabilmesi için izler arasındaki açığı (θ) radyan cinsinden ve iz yarıçapını (r) milimetre olarak kullanılarak bulunabilir. Çift disk metodundaki %5-%8 arasındaki sapmaların sebebi, iz yarıçapından dolayı oluşmaktadır. İz yarıçapı, izin en üst noktasından ölçülmesiyle en alt noktasından ölçülmesi arasında farklar oluşmaktadır ve bu sebeple hız ölçümünde sapmalar oluşmaktadır. Denklem (4.11) de izler arasındaki açı yerine açısal hız (ω - radyan/saniye) ile diskler arası partikül geçiş süresi (t - saniye) yazılarak Denklem (4.12) türetilmiş olur.

$$S = (\omega * t) * r \quad (4.12)$$

Denklem (4.12)'de açısal hız yerine, disklerin dönüşünü sağlayan tahrik motorunun dönüş hızı (n) radyan/saniye cinsinden yazılarak ve t zamanı yerine de yol/hız temeli ile L/v yazıldığında Denklem (4.13) bulunmuş olur.

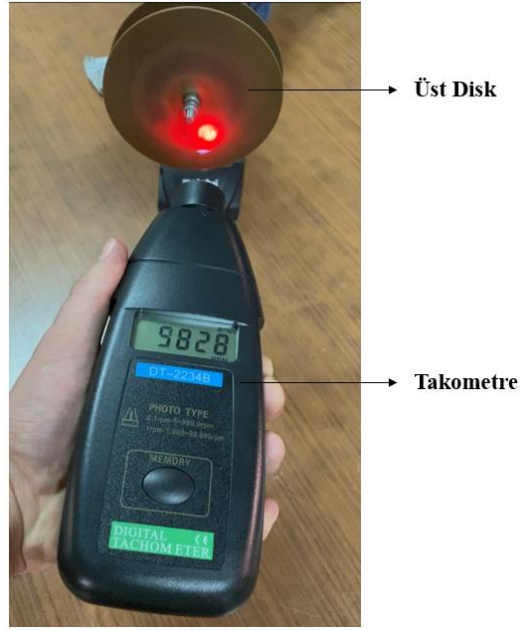
$$S = \left[\frac{2 * \pi * n}{60} \right] * \left[\frac{L}{v} \right] * r \quad (4.13)$$

Denklem (4.13) içerisinde partikül çarpma hızı (v) değerini yalnız bırakarak, Denklem (4.14) yazılarak partikül çarpma hızı belirlenmiş olur.

$$v = \left[\frac{2 * \pi * n}{60} \right] * \left[\frac{L}{S} \right] * r \quad (4.14)$$

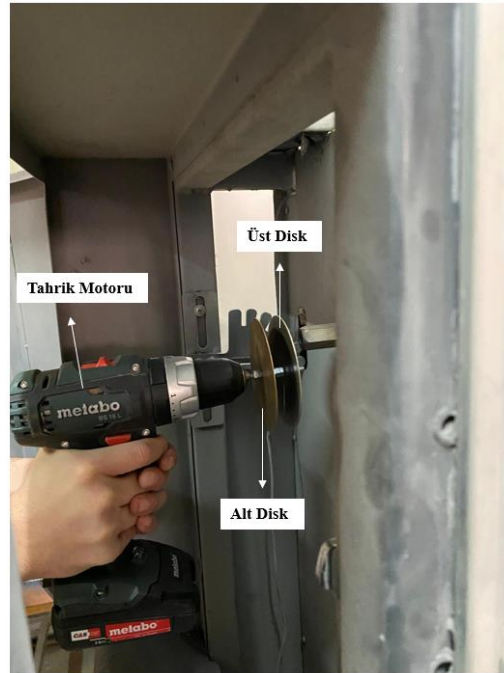
Denklem (4.14) içerisindeki bilinmeyen parametreleri tespit etmek için öncelikle tahrik motorunun dönüş hızı tespit edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda diskler tahrik motoruna bağlanmış olup, bir takometre yardımıyla disklerin dönüş hızı, devir/dakika cinsinden tespit edilmiştir. Şekil 4.20'de takometre yapılan ölçümün görseli verilmiştir.

Takometre ile yapılan ölçümlerde tahrik motoru dönüş hızı 9800 RPM civarında bulunmuştur. Ancak tahrik motoru kataloğunda sağlanan veri incelendiğinde dönüş hızının 10000 RPM olduğu bilinmektedir. Aradaki sapma, takometre lazerinin disklerle tutulması sebebiyle oluşmuştur.



Şekil 4.20. Takometre ile tahrik motoru dönüş hızı ölçümü

Tahrik motoru dönüş hızı bulunduğundan sonra, çift disk metodunun uygulanması için Şekil 4.21’de gösterilen deneysel çalışma yapılmıştır. Diskler üzerinde erozyon izlerinin net olarak görülebilmesi için fosfor diskler kullanılmıştır. Alt disk üzerinde biri durağan haldeyken, diğeri de dönüş esansında oluşmak üzere iki adet erozyon izi oluşturulduktan sonra çift disk metodunun deneysel süreci sonlandırılmıştır. Deneylerden elde edilen izler ile ilgili gerekli ölçümler gerçekleştirilerek Denklem (4.14) ile partikül çarpma hızları tespit edilmiştir.



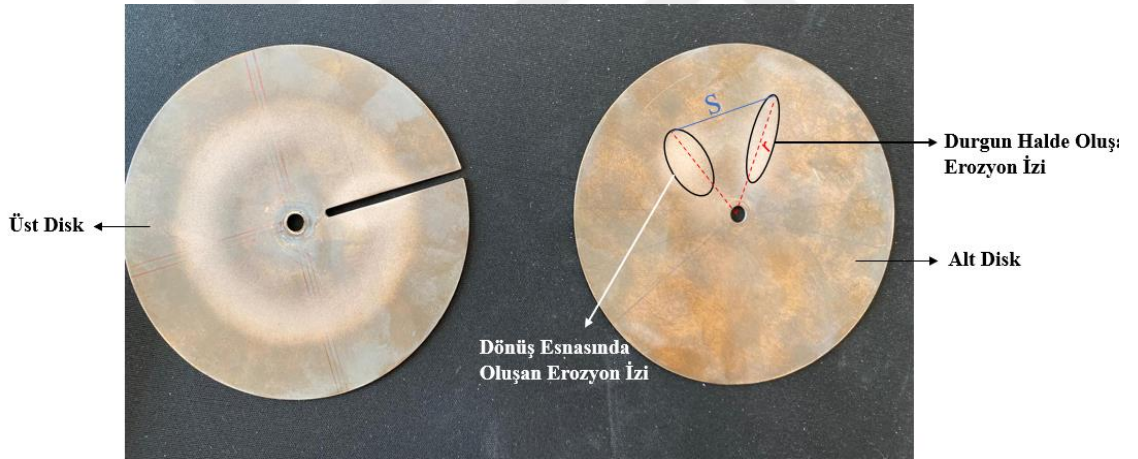
Şekil 4.21. Çift disk metodunun deneysel sürecinin uygulanması

Deneyisel süreç tamamlandıktan sonra disklerin son durumu ve alt disk üzerinde oluşan erozyon izleri Şekil 4.22’de verilmiştir.

Şekilden ölçülen erozyon izleri (S) arası mesafe, iz yarıçapı (r) ve diğer parametreler Çizelge 4.8’de ifade edilmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçlarıyla Denklem (4.14) kullanılarak partikül çarpma hızları tespit edilmiştir.

Çizelge 4.8. Çift disk metodu sonrası ölçülen değerler ve hesaplanan hız değerleri

Deney No	Hava Akış Basıncı [Bar]	Dönme Hızı (n), [RPM]	Diskler Arası Mesafe (L), [m]	İz Yarıçapı (r), [m]	Erozyon İzleri Arası Mesafe (S), [m]	Partikül Hızı (m/s)	Ortalama Hız Değeri (m/s)
1	3	10000	0,02	0,029	0,0310	19,55	~19,5
2	3	10000	0,02	0,031	0,0315	20,62	~21
3	3	10000	0,02	0,029	0,0308	19,71	~20



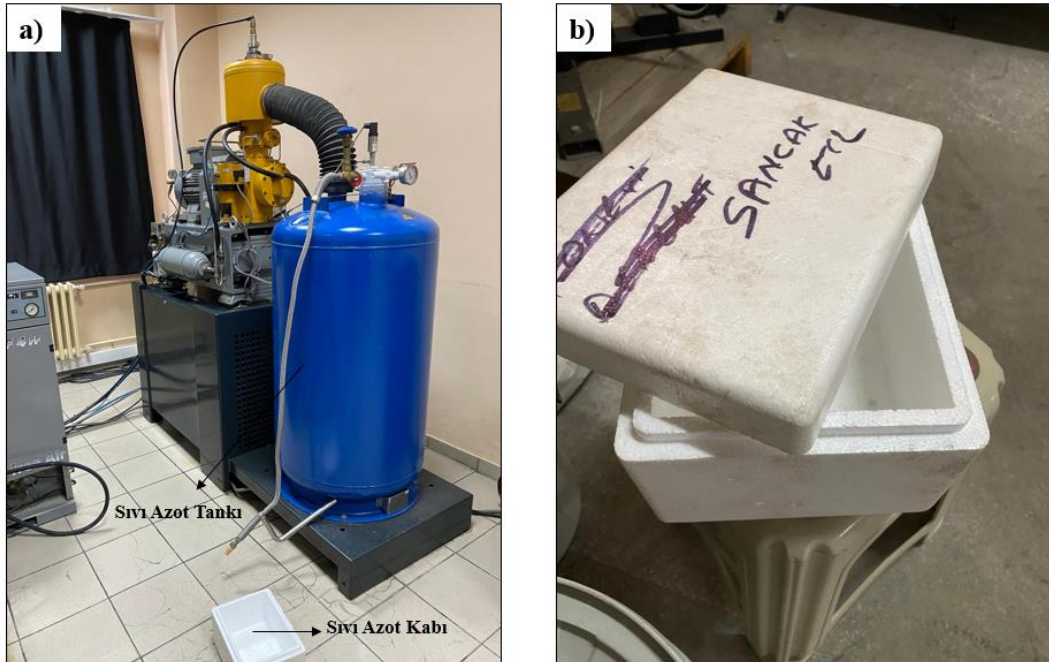
Şekil 4.22. Çift disk deneyleri sonucu disklerde oluşan erozyon izleri

Uygulanan deneyler ve hesaplana değerler değerlendirildiğinde, partikül hızları yaklaşık 20 m/sn olarak bulunmuştur. Euler’in LPT akış modeli ile bulunan sonuçlarla kıyaslandığında, yakın sonuçlar oluşmuştur. Çift disk metodu ve LPT modeli ile hesaplanan sonuçlarda sapma miktarı olduğu bilinmektedir. Bu kapsamda partikül hız seviyesinin 20–25 m/sn civarında olduğu tespit edilmiştir. İki farklı yönteme bağlı sonuçlar birbirini desteklemektedir. Bu kapsamda deneysel parametrelerde partikül hızları için çift disk metodu ile bulunan sonuçların kullanılmasına karar verilmiştir.

4.5. Kriyojenik Ortam Şartlarının Oluşturulması ve Sıcaklıkların Tespiti

Katı partikül erozyon aşınmasının ortaya çıktığı sektörlerden biri de uzay alanıdır. Uzay atmosferinde sıcaklıkların düşerek çok düşük seviyelere gerilemesiyle kriyojenik şartlar hâkim olmaktadır. Sıcaklık seviyeleri -100°C altına inmesiyle kriyojenik sıcaklıklar başlamış olmaktadır (Sotoodeh, 2022). -100°C sıcaklıklardan daha düşük seviyeler kriyojenik ortam şartlarına girmektedir. Uzayda hareket halindeki bir aracın dış panelleri ve ortamla etkileşime giren diğer parçalar kriyojenik şartlara maruz kalmaktadır. AlSi10Mg alaşımlarının yüksek korozyon direnci yeteneği sayesinde uzay aracında kendine yer edinmesiyle kriyojenik şartlara maruz kaldığı anlaşılmaktadır. Ayrıca uzay atmosferinde mikron boyutlu partiküllerle çarpışma ile meydana gelen erozyon aşınması nedeniyle söz konusu alaşımın kriyojenik şartlardaki erozyon davranışının incelenmesi gerekmektedir.

Deneyisel süreçte kriyojenik şartların oluşturulması için sıvı azot kullanılmıştır. Selçuk Üniversitesi İL TEK laboratuvarından sıvı azot temin edilerek, test numuneleri sıvı azot içinde belirli sürelerde bekletilmiştir. Sıvı azotun kaynama sıcaklığı -196°C olması sebebiyle, -196°C altındaki sıcaklıklarda sıvı formda, sıcaklıkların yükselmesiyle gaz fazına geçiş yapmaktadır. Temin edilen sıvı azot tankının ve sıvı azotun muhafaza edildiği sıvı azot kabı Şekil 4.23'te gösterilmiştir.



Şekil 4.23. Sıvı azot tankı ve muhafaza kabı, a) Sıvı azot tankı, b) Sıvı azot kabı

Sıvı azot tankından, muhafaza kabına sıvı azot boşaltıldıktan sonra, sıvı azotun dış ortam ile etkileşimi olduğu için sıcaklık seviyesi -196°C üstüne çıkmakta ve dolayısıyla sıvı azot buharlaşarak kaybolmaktadır. 1 litrelik bir sıvı azotun muhafaza kabından buharlaşarak kaybolma süresi yaklaşık 5 saat olarak ölçülmüştür. Bu ölçüm esnasında muhafaza kabının kapağı açılmamıştır. Ancak kabın yapısından kaynaklı oluşan boşluklar sebebiyle buharlaşma kaçınılmazdır. Özel olarak üretilmiş sıvı azot kapları bulunmaktadır fakat maliyetler yüksek seviyededir.

Erozyon aşınması deneylerinin kriyojenik şartlarda yapılabilmesi için üretilen numuneler sıvı azot kabına atılarak yaklaşık 5 dakika bekletilmiştir. Ancak sıvı azot içerisinden çıkartılan numunelerin ısınma sürelerinin ölçülerek deneylerin kriyojenik şartlarda yapılıp yapılmadığı teyit edilmesi gerekmektedir. Sıvı azot muhafaza kabı içinden çıkartılan numuneler oda sıcaklığında olan atmosfer şartlarına girmesiyle -196°C derecelere ulaşsa bile, oda sıcaklığı ile sıvı azot sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkının yüksek olması sebebiyle hızla ısınmaya başlamaktadır. Katı partikül erozyon deneyleri süresince de kriyojenik ortam şartlarında deneylerin gerçekleştirmesi planladığı için numunelerin kriyojenik şartlardan ($-100^{\circ}\text{C}<$) ne kadar sürede çıktığı tespit edilmelidir.

İlk olarak eklemeli imalat ile üretilmiş numuneler sıvı azot kabı içinde 5 dakika bekletilmiş ve 5 dakika sonrasında sıcaklık değişimini belirlemek için FLIR marka termal kamerayla sıcaklık ölçümleri yapılmaya çalışılmıştır. Şekil 4.24'de ölçüme ait görsel paylaşılmıştır.

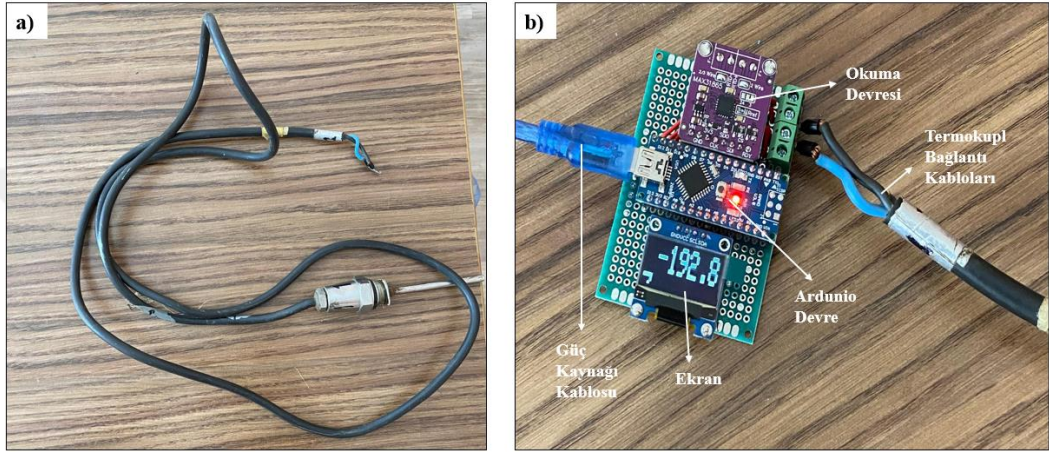


Şekil 4.24. Termal kamera ile sıcaklık ölçümü

Sıvı azot muhafaza kabından çıkartılan numune için termal kamera ile sıcaklık ölçümü başlatılmıştır. Ancak termal kameranın algılayabildiği en düşük sıcaklık

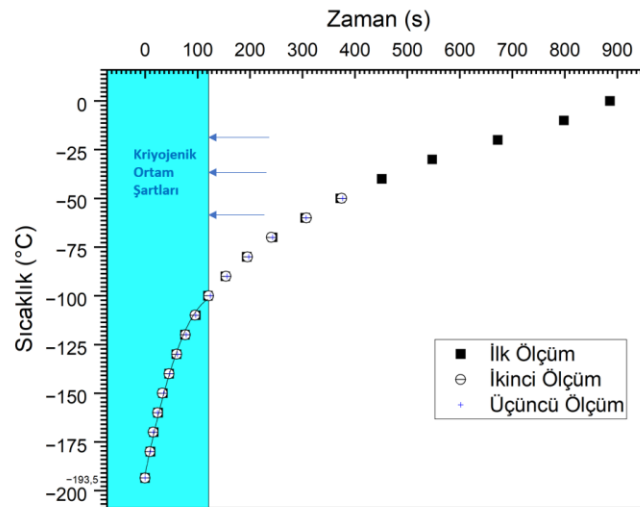
değerinin -45°C olması sebebiyle, test numunesi sıvı azot kabından çıkartıldıktan sonra termal kamera göstergesi üzerinde sıcaklığı yaklaşık 160 saniye boyunca -45°C altında gözükmiştir fakat net bir değer oluşmamıştır.

Sıvı azot içerisinde çıkartılan numunenin zamana bağlı sıcaklık değerinin net ifade edilebilmesi için bir adet sıcaklık sensörü (termokupl) temin edilmiş olup, sıcaklık sensörünün verisini işleyebilecek bir okuyucu devre tasarlanmıştır. Tasarlanan okuyucu devre arduino temelli bir devre olup Şekil 4.25'te görseli verilmiştir.



Şekil 4.25. Sıcaklık ölçüm ekipmanları, a) Sıcaklık sensörü (Termokupl), b) Sıcaklık okuyucu devre

Sıcaklık değerlerinin tam olarak tespit edilebilmesi için gerekli ekipmanlar oluşturulduktan sonra sıvı azot içerisine atılarak 5 dakika süre beklenilerek numune yüzeyi ile teması hiç bozmayacak şekilde numunelerdeki sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. 3 tekrarlı ölçümler sonucunda numunelerdeki ısınma süreleri zamana bağlı olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.26'da grafik halinde zamana bağlı sıcaklık değişimi verilmiştir.



Şekil 4. 26. Numunelerin zamana bağlı sıcaklık ölçüm sonuçları

Yapılan 3 farklı tekrarlı ölçüm sonucunda termokupl okuma devresinin minimum $-193,5^{\circ}\text{C}$ derece okuduğu görülmüştür. Sıvı azot sıcaklığının -196°C olduğunun bilinmesiyle, üretilen okuyucu devrenin yeterli hassasiyet değerlerinde çalıştığı anlaşılmıştır.

5 dakika sıvı azota maruz bırakılan numunelerin, sıvı azot kabından çıkartılmasıyla başlayan sıcaklık ölçüm sonuçları incelendiğinde yaklaşık 127 saniye içerisinde, numune yüzeylerinin sıcaklıkları -100°C sıcaklığının üstüne çıkarak, kriyojenik ortam şartları kaybolmaktadır. Bu kapsamda katı partikül erozyon aşınması deney süresince, test numuneleri sıvı azot kabından alındıktan sonra yaklaşık 2 dakika içinde test edilmesi gerektiği anlaşılmıştır.

2 dakikalık süre içinde deneylerin gerçekleştirilmesi için, Şekil 4.10.(b)'de gösterilen ek montaj aparatı üretilmiş ve sıvı azot içinden alınan numuneler, hiç süre kaybetmeksizin direkt gerekli çarpma açısına ayarlanmış fikstüre takılmaktadır. Bu sayede bağlantı süreleri oldukça kısaltılmıştır. Aşındırıcı partikül miktarı deneylerde 1 kilogram olarak tercih edilmiş ve partiküllerin deneyler süresince püskürme süresi ölçüldüğünde yaklaşık 75-80 saniye arasında püskürmesini tamamladığı anlaşılmıştır. Bu kapsamda, numune montaj süresinin 30 saniye ve deney süresinin 80 saniye (maksimum süreler alınmıştır) gerçekleşmesi ile kriyojenik ortamda gerçekleştirilen bir deneyin yaklaşık 110 saniye içerisinde tamamlandığı anlaşılmıştır. Numunelerin 127 saniye içinde kriyojenik şartlardan çıktığının anlaşılmasıyla birlikte, deney süresince kriyojenik sıcaklık seviyesinin yakalandığı görülmüştür.

4.6. Deneysel Parametreler

Eklemeli imalat ve döküm yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımına sahip numunelerin katı partikül erozyon aşınması davranışlarının belirlenebilmesi için gerekli partikül hızı, ortam sıcaklıkları, aşındırıcı partikül bilgileri, kullanılacak test cihazı ve numune üretim parametreleri tespit edilmiştir. Bilinenler öncülüğünde oda sıcaklığında ve kriyojenik şartlarda üretilen numunelere katı partikül erozyon aşınması deneyleri uygulanarak deneyler sonunda numunelerdeki aşınma miktarları ölçülerek ve erozyon oranları tespit edilmiştir. Oluşan sonuçlara göre eklemeli imalatın döküm yöntemiyle üretime göre kıyaslaması, ısıtılma işlemin erozyon aşınma davranışı üzerinde etkisi olup olmadığı ve kriyojenik şartların aşınmaları etkileyip etkilemediği araştırılmıştır. Deneylerde erozyon davranışı tespit edilecek numunelerin üretim bilgisi ve isimlendirilmesi Çizelge 4.9'da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Numune üretim parametreleri ve isimlendirilmesi

Numune Üretim Yöntemi ve Isıl İşlem Bilgisi	Numune Kısa Adlandırılması
Döküm (D) AlSi10Mg (Isıl işlem yok-II)	D_II
Seçici Lazer Ergitme (SLE) AlSi10Mg (Isıl işlem yok)	SLE_II
Döküm AlSi10Mg + T6	D_T6
Seçici Lazer Ergitme AlSi10Mg + T6	SLE_T6
Kriyojenik ortam şartlarına maruz bırakılmış D_II	K_D_II
Kriyojenik ortam şartlarına maruz bırakılmış SLE_II	K_SLE_T6
Kriyojenik ortam şartlarına maruz bırakılmış D_T6	K_D_T6
Kriyojenik ortam şartlarına maruz bırakılmış SLE_T6	K_SLE_T6

Katı partikül erozyon aşınması deneysel parametreleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10. Katı partikül erozyonu aşınması deneysel parametreleri

Numune Adı	Partikül Malzemesi	Partikül Miktarı (Kg)	Hava Akış Basıncı (Bar)	Partikül Çarpma Hızı (m/s)	Partikül Çarpma Açısı (°)	Deney Sıcaklığı (°C)
D_II	SiC	1	3	~20	15°- 30°- 45°- 60°- 75°- 90°	Oda Sıc. (20)
SLE_II						Oda Sıc. (20)
D_T6						Oda Sıc. (20)
SLE_T6						Oda Sıc. (20)
K_D_II						≤ -100
K_SLE_II						≤ -100
K_D_T6						≤ -100
K_SLE_T6						≤ -100

Çizelge 4.9’deki eklemeli imalat ve döküm olarak üretilmiş numunelerin, ısıtım işlem ve kriyojenik şartlara maruz bırakılmasına göre isimlendirilmesi değişmektedir. Toplamda 8 tip numune elde edilmiş numune olup, bu numune tiplerinden 4 çeşidi oda sıcaklığında, 4 çeşidi de kriyojenik şartlarda tekrarlı biçimde test edilecektir. Testlerde hava ve partikül akış hızları, partikül malzemesi ve partikül miktarı sabit tutularak, numune üretim sürecinde ki farklılıkların erozyon aşınmasına olan etkisi ölçülecektir. Bu doğrultuda sadece çarpma açısı ve sıcaklıklar değişik olarak ayarlanmıştır.

4.7. Deneysel Süreç Sonrasında Erozyon Oranlarının Belirlenmesi

Deneysel sürecin tamamlanmasıyla birlikte erozyon aşınma davranışının belirlenebilmesi için erozyon oranının ve numunelerdeki ağırlık kaybının bulunması gerekmektedir. Numunelerde ki ağırlık kaybı kullanılarak erozyon oranı tespit edilmektedir.

Deneysel süreç esnasında numunelerin aşınma öncesi ağırlığı ve aşınma sonrası ağırlığı hassas terazi ile tartılarak numunelerde ki ağırlık kaybı ortaya çıkartılacaktır. Numunelerin ağırlık kaybının tespit edilmesiyle Denklem (3.2) kullanılarak erozyon oranı tespit edilecektir.

4.8. Numune Yüzeylerindeki Hasarın İncelenmesi

Deneysel süreç sonrasında erozyona uğrayarak aşınmış numunelerden X Işınımı kırınımı analizi (XRD), detaylı elektron mikroskopu (SEM) ile yüzeyde ki durumun görüntülenmesi elde edilerek yüzeyde partikül saplanıp saplanmadığı durumu, yüzeyde kırılma veya sıyrılma mekanizmasının gelişimi ile ilgili durum ve aşınmaya bağlı malzeme karakteristiğinin belirlenmesi gibi hasar mekanizmaları ortaya çıkartılacaktır. Elde edilen bilgiler ışığında numunelerde meydana gelen erozyon aşınma davranışı tespit edilecektir.

Yüzey incelemeleri için Konya Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarı ve Necmettin Erbakan Üniversitesi BİTAM Laboratuvarından hizmet alımı yapılacaktır

4.9. Ayırık Elemanlar Analizi Kurulumu

Ayrık Elemanlar Yöntemi (Discrete Element Method) ile analiz çalışmalarının yürütülebilmesi için Ansys Rocky DEM yazılımı kullanılacaktır. Söz konusu yazılım ayırık elemanlar esaslı ile partikül modellemesi sayesinde son zamanlarda tercih edilmektedir. Tarım, madencilik gibi parçacık esaslı sektörlerde kendine yer bulan bir analiz programıdır. Program temeli incelendiğinde yine Newton'un 2. Kanunu karşımıza çıkmaktadır. LPT yöntemiyle de partikül akış hareketi ve hızları hesaplanırken, partiküller ayırık olarak incelenmekte ve temelde Newton'un 2. kanunu türetilerek oluşturulan bir akış modeli irdelenmiştir. Rocky DEM içinde de Newton yasalarına bağlı hesaplama süreci gerçekleşmektedir. Denklem (4.15)'de Rocky DEM programının temelini oluşturan Newton'un 2. Kanunu verilmektedir.

$$\sum F = F_{küt\le} + F_{yüzey} = m * \frac{dv}{dt} = m * a \quad (4.15)$$

Newton kanununun Rocky DEM programı içindeki karşılığı dikkate alındığında partiküllerin sahip oluğu kütle (m) ve hızının çarpımı, partiküllerin kütlesi kaynaklı oluşan kuvvetlerle ($F_{küt\le}$) partiküllerin yüzeylerle olan etkileşimi esnasında oluşan temas kuvvetlerinin ($F_{yüzey}$) toplamı sonucu oluşmaktadır.

Rocky DEM programı içinde bir diğer önemli parametre ise Archard aşınma yasasıdır. Archard aşınma esası ile malzemelerin teması bağılı olarak aşınması tespit edilebilmektedir. Katı partikül erozyon aşınması analizlerinde Archard yasası içinde bulunan ve yine erozyon modellerinde de ortaya çıkan K aşınma sabiti üzerinden bir analiz süreci gerçekleştirilecektir. Archard'ın aşınma yasası incelendiğinde, numunelerin uğradığı ağırlık kaybının (W); malzeme sertliği (H), yüzeye uygulanan normal kuvvet (F), kayma mesafesi (s) ve aşınma sabitine (K) bağılı olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Archard aşınma yasası Denklem (4.16) ile ifade edilmiştir.

$$W = K * \frac{F * s}{H} \quad (4.16)$$

Analiz çalışmaları için eklemeli imalat (SLE) ile üretilmiş ve ısıtıl işlem uygulanmamış (İİ) numuneler Ansys Laser Powder Bed Fusion (LPBF) simülasyonu ile üretim simülasyonu gerçekleştirilerek modellemesi yapılacaktır. Daha sonra 3D CAD çizimi LPBF simülasyonlarında oluşturulan geometri Rocky DEM programı içerisine alınarak burada ayırık elemanlar temeli ile erozyon simülasyonları gerçekleştirilecektir.

Rocky DEM programında katı partikül erozyon deneyleri parametreleri birebir aynı olacak şekilde tanımladığında, analiz süreleri aynısı bulmaktadır. Partikül miktarı, partikül şekli ve K aşınma sabiti değeri Rocky DEM programı içinde ayarlanabilen parametrelerdir. Deneysel parametrelerle, analiz parametreleri aynı tanımlanarak çözülmesi planlanan bir analiz için yüksek GPU sunan bilgisayara ihtiyacı oluşmaktadır. Bu kapsamda Rocky DEM programında numune malzemesi, LPBF simülasyonlarından elde edilen numune geometrisi, partikül malzemesi tanımlamaları deneysel süreç ile aynı olarak tanımlanacaktır.

Partikül şekli için 350 µm çapta küresel şekilli partiküller tercih edilmiş olup partikül miktarı için deneysel süreç tamamlanıp, ortaya çıkan erozyon oranları ile Denklem (3.3) kullanılarak öncelikle K aşınma sabitleri bulunacak ve daha sonra bulunan K aşınma sabitleri Rocky DEM içinde tanımlanarak, minimum miktarda deneysel sonuçlara yakınsayabilen bir partikül miktarı kullanımı önceliklendirilerek analizler tek tip numune için uygulanmıştır.

Rocky DEM yazılımı ile numunelerde oluşan ağırlık kaybı da tespit edilerek deneysel sonuçlarla kıyaslama yapılması planlanmıştır.

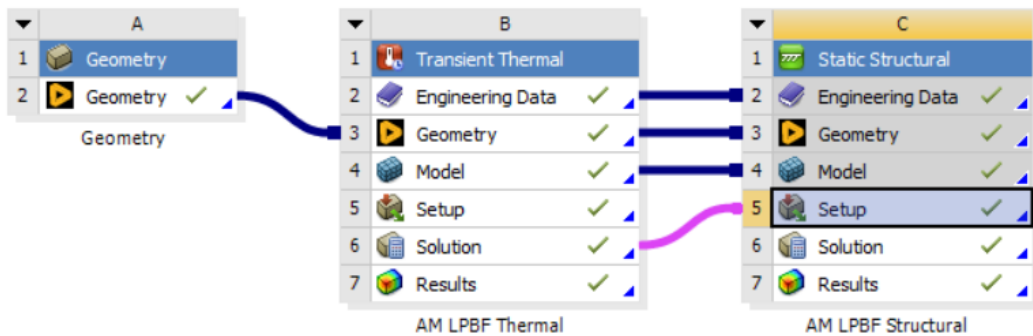
4.9.1. Ansys LPBF simülasyonları ile analiz geometrisinin oluşturulması

Toz esaslı eklemeli imalat ile parça geometrilerinin oluşturulması ve modellemesi oldukça zorlu işlem ve yazılım yetenek beklentileri olup NX, Solidworks veya Catia programları içinde 3D katı parça oluşturma ile eklemeli imalat modellemesini yansıtmak mümkün değildir. FUSION 360 veya Ansys Space Claim çizim modülü kullanılarak hazırlanabilir fakat yine oldukça zorlayıcıdır. Eklemeli imalatın üretim süreci gereği yapı katman katman oluşturulmaktadır ve her bir katmanın kalınlığı 20-100 mikron boyutlarındadır. Herhangi bir çizim programı ile katmanlı yapı eldesini sağlamak ekstra uğraş ve yüksek bilgisayar hacmi istemektedir.

Bu kapsamda katı partikül erozyon aşınması simülasyonlarının gerçekleştirilmesi için kullanılacak eklemeli imalat ile üretilmiş AlSi10Mg numuneler Ansys Laser Powder Bed Fusion (LPBF) simülasyonları ile üretilmektedir. Simülasyon süresince eklemeli imalat üretim parametreleri yazılım içine tanıtılarak simülasyon tamamlanacaktır. Katmanlı üretim sürecindeki lazer gücü, katman kalınlığı, lazer tarama mesafesi gibi üretim parametrelerinin yapının oluşturulması aşamasında yapıya ne kadar bir gerilme yüklediği de tespit edilerek sonuçlara ortaya konulmuştur.

LPBF analizlerinin bir diğer faydası, üretim sürecinde yapıda oluşan termal gerilmeleri tespit edebilmektedir. Lazerin yüzeyi katılaştırırken ortaya çıkardığı ısı etkisiyle sinterleme ve kürleşme sürecinde oluşan ve yapıya meydana getirilen termal gerilme etkisi de ölçülmüş olmaktadır. Numunelere uygulanabilecek kalıntı gerilim analizi ile LPBF sürecinde yapının meydana gelmesi için harcanan gerilme belirlenebilir.

LPBP sürecinde termal ve statik gerilmeler birbirleri ile senkron çalışmaktadır. Analiz kurgusu Şekil 4.27’de gösterilmektedir.



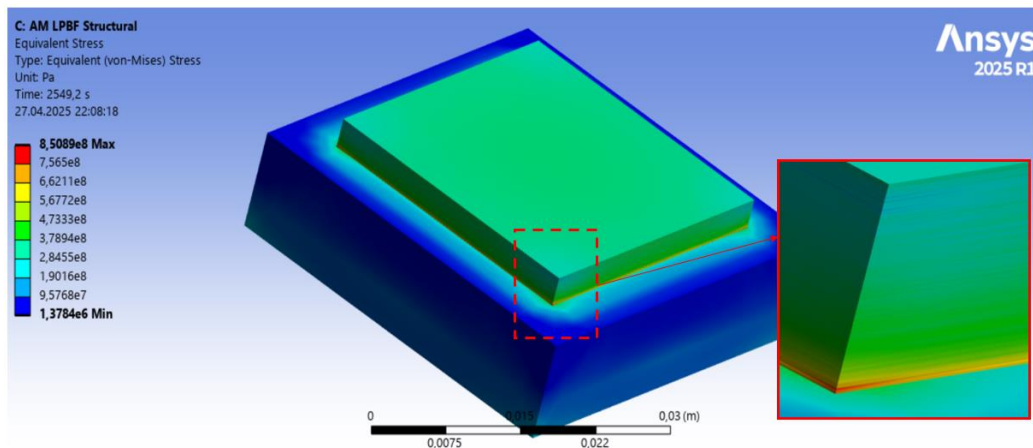
Şekil 4.27. Ansys LPBF analiz kurgusu

LPBF analizi için tanımlanan eklemeli imalat üretim parametreleri Çizelge 4.2 ile aynı olacak şekilde ayarlanarak LPBF üretim parametreleri Şekil 4.28’de verilmiştir.

Details of "Build Settings"	
Simulation Settings	
Additive Process	Laser Powder Bed Fusion
Inherent Strain	No
Layer Height	Manual
-- Height	3,e-005 m
Calibration Settings	
☐ Thermal Strain Scaling Factor	1,
Machine Settings	
Heating Method	Melting Temperature
☐ Hatch Spacing	1,9e-004 m
☐ Deposition Thickness	3,e-005 m
☐ Scan Speed	1,3 m/s
Dwell Time	10, s
Dwell Time Multiple	1,
Number of Heat Sources	1
Build Conditions	
☐ Preheat Temperature	175, °C
Gas/Powder Temperature	Use Preheat Temperature
Gas Convection Coeff	20000 W/m ² .°C
Powder Convection Coeff	5000, W/m ² .°C
Powder Property Factor	1,e-002
Cooldown Conditions	
Room Temperature	22, °C

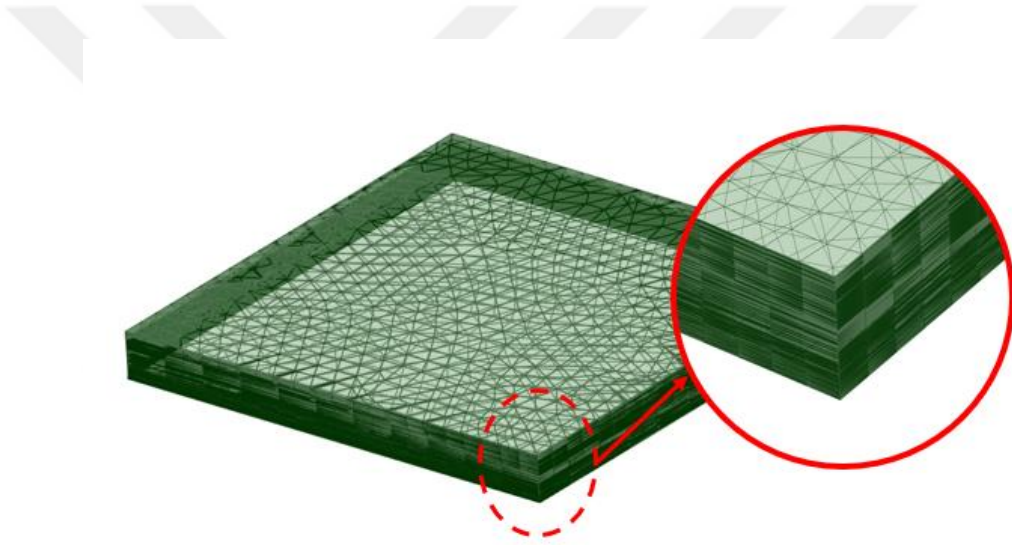
Şekil 4.28. LPBF eklemeli imalat üretim parametreleri

Üretim parametreleri de programa tanıtıldıktan sonra analiz süreci başlamış olup üretilen numunenin gerilme dağılımı durumu Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. LPBF analiz sonucu numune geometrisi ve gerilme seviyesi

LPBF üretim simülasyonu sonucu elde edilmek istenilen geometri oluşturulmuştur. Analiz sonucunda istenilen katmanlı yapı numunelerde oluşturulmuştur. Numune bu hali ile Rocky DEM programında kullanılabilir. Analiz ile birlikte katmanlı üretim sonucunda yapının genelinde yaklaşık 400 MPa seviyesinde gerilme olduğu gözlenmiştir. Ayrıca yapının en alt katmanlarında ve dolayısıyla da tabla ile ayrılma bölümlerinde gerilme dağılımı 850 MPa seviyelerine ulaşmaktadır. Ortaya çıkan sonuçların doğrulanabilmesi için kalıntı ölçümü yapılarak bir kıyaslama sağlanabilir. Bu doğrultuda söz konusu çalışma tez projesi sonrasında irdelenecek olup elde edilen geometri dışı aktarılarak Ansys Space Claim programında açıldığında elde edilen görünüşü Şekil 4.30’da verilmiştir.



Şekil 4.30. LPBF analizi sonucu dışı aktarılan geometrinin görünümü

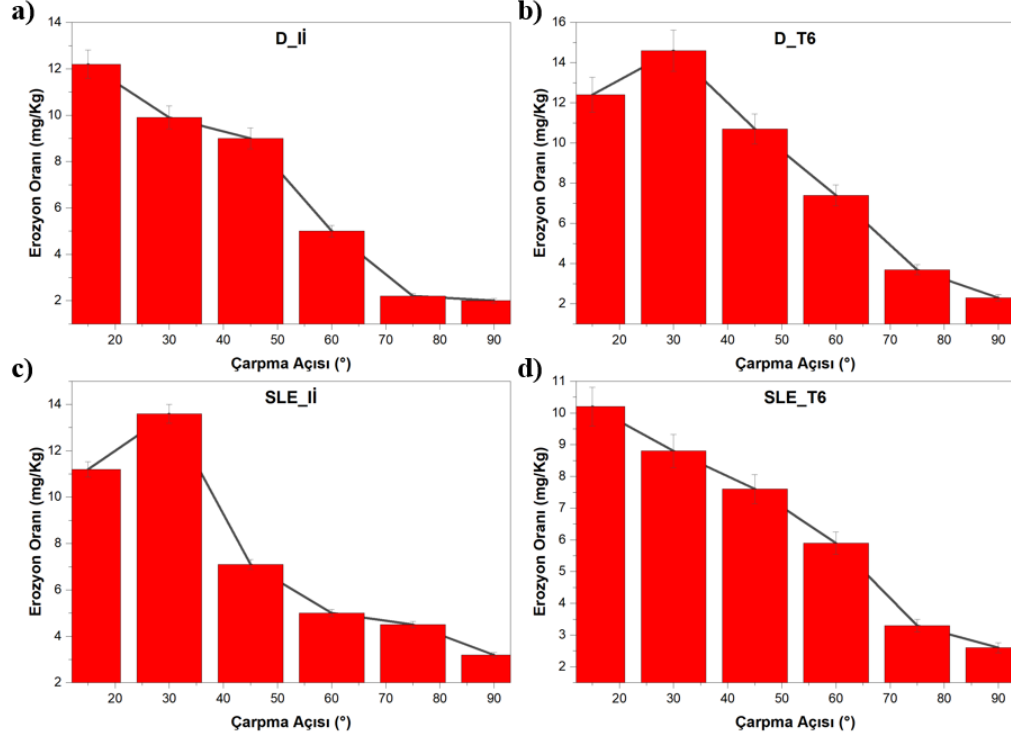
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Malzemelerin partiküllerle etkileşimi sonucu aşınmalara uğramaları sonucunun kaçınılmaz olacağı öngörüsü yanında deneysel numunelerin yüzeylerinde aşınma sonucunda hasar meydana gelmekte ve parça kaybetmeye başlamaktadırlar. Kaybettikleri parça sebebiyle de ağırlık kaybına uğramaktadırlar. Uğradıkları ağırlık kaybı erozyon aşınmasının en büyük temsilcisidir. Numunelerin kaybettikleri ağırlığın, numuneyi aşındırmak için kullanılan partikül miktarına oranı ise erozyon oranını ifade ettiği bilgisi Denklem (3.2.) ile tanımlanmıştır. Partiküllerin numunelere çarpma açısına bağlı olarak sünek, gevrek veya yarı sünek karakter sergilediği anlaşılabilmektedir. Ayrıca yine uğradıkları ağırlık kaybindan ve partiküllerle etkileşim sonucu yüzeylerinin durumu detaylı incelenerek erozyon aşınması mekanizmaları çıkarılabilmektedir. Hutchings erozyon modelinde de önceliklendirilerek Denklem (3.1) ile Denklem (3.2) kullanılarak erozyon oranı ve ağırlık kaybı değerleri hesaplanabilmektedir.

Deneysel parametrelere göre 3 tekrarlı deney uygulanarak AlSi10Mg numunelerde meydana gelen erozyon oranları hesaplanmış ve grafikler halinde sunulmuştur. Grafiklerde tekrarlı deneylerin ortalaması verilmiş ve verilmeyen deneyler hata çubukları ile ifade edilmiştir. Tekrarlı deneysel çalışmalar ile her bir çeşit numuneye 3 adet deney uygulanmış ve deney sonuçlarının ortalama değeri, alt sınır ve üstü sınır açısından %5-%8 arasında değişkenlik göstermiştir. 8 çeşit numune içinde alt ve üst sınır değerleri birbirinden çok ayırık sonuçlar oluşturmayacak ölçekte değişkenlik oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Bu kapsamda tekrarlı deney sonuçlarının birbirlerine yakın sonuçlar sergilediği anlaşılarak tutarlı deneylere ait çıktı bilgisine ulaşılarak numunelerin erozyon oranları özelinde farklı davranış karakteristiklerine ulaşılmıştır.

Şekil 5.1’de oda sıcaklığında uygulanan deneyler sonucunda numunelerin erozyon oranları sunulmuştur. 4 çeşit numunenin erozyon oranları hesaplanmıştır. 4 çeşit numune arasında döküm ile üretilmiş ve ısıtma işlemi uygulanmamış (D_II), döküm ile üretilmiş ve ısıtma işlemi uygulanmış (T6), seçici lazer eritme esaslı eklemeli olarak üretilmiş ve ısıtma işlemi uygulanmamış (SLE_II), seçici lazer eritme yöntemiyle üretilmiş ve ısıtma işlemi uygulanmış (SLE_T6) numunelerin erozyon oranları hesaplanmıştır. Numunelerin erozyon cevapları yüzeysel olarak ifade edilirse, literatürle sünek malzeme eğilimlerine benzerlikler barındırmakta olup çarpma açısı yükseldikçe, erozyon oranının düştüğü anlaşılmaktadır. Ancak literatürden ayrılan noktalara odaklanıldığında ise 15° ve 30° çarpma açısında farklı durumlar oluşmuştur. Literatürde çarpma açısının 60°, 75°

ve 90° tutulduğu durumlarda genel olarak neredeyse birçok malzemelerin erozyon oranlarının düştüğü bilinmektedir. Eğer ki inkübasyon gibi özel bir durumun oluşmadığı durumlarda bu kural geçerli sayılabilir. AlSi10Mg numuneler için de aynı durum söz konusu olmuştur.

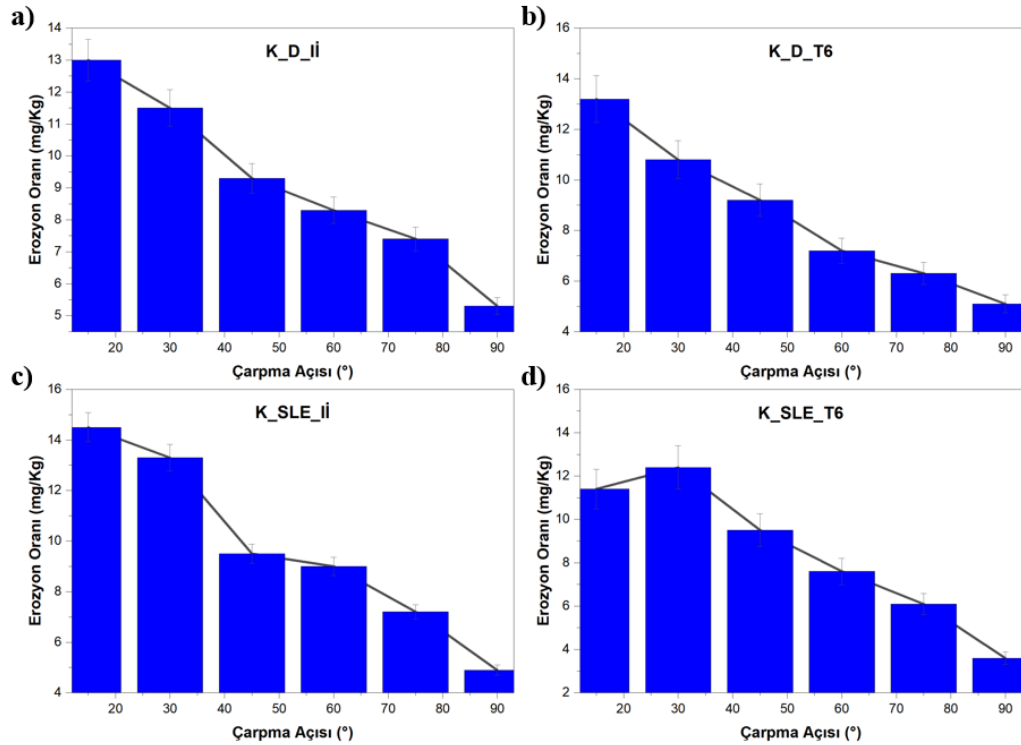


Şekil 5.1. Oda sıcaklığında uygulanan deneylerle numunelerde oluşan çarpma açısı- erozyon oranı ilişkisi; a) D_İİ, b) D_T6, c) SLE_İİ, d) SLE_T6

Şekil 5.1.(a)'da D_İİ grubunun erozyon cevabı ısıtma işlemi, üretim yöntemi ve kriyojenik sıcaklık etkisinden bağımsız olarak değerlendirildiğinde, çarpma açısındaki yükselişe bağlı olarak, erozyon oranı düşmüştür. Ortaya çıkan düşüş, doğrusal olmayan biçimde düşmesiyle beraber, 45° çarpma açısına kadar yavaş oluşmakta iken, 60° ve sonrasında düşüş hızı yükselmiştir. 75° çarpma açısında iken numunenin uğradığı erozyon aşınması periyodu sonlanmaya başlamış ve 90° çarpma açısında en düşük erozyon oranını oluşturarak, D_İİ numunelerin erozyon periyodu sonlanmıştır. Oluşan erozyon eğilimi incelendiğinde ise D_İİ numune grubunun tam sünek davranışta bir karakteristiğe sahip olduğu anlaşılmaktadır. 15° partikül çarpma açısından itibaren düşüş başlamasıyla tam sünek davranış grafikten anlaşılmaktadır. Şekil 5.1.(b)'de D_T6 numune grubunun erozyon davranışları değerlendirildiğinde, numunelerde oluşan erozyon periyodu, Şekil 3.8'de Finnie'nin erozyon modeline göre sünek malzeme grubunu temsil etmektedir. Orta çıkan erozyon eğilimi sünek malzeme davranışıyla

uyuşmaktadır. 30° çarpma açısına kadar numunelerin erozyon oranı artmakta ve daha sonra çarpma açısının yükselişi ile beraber erozyon oranı düşmektedir. Döküm numunelere uygulanan ısı işlem varlığının davranışta değişiklik oluşturduğu grafiklerden görülmekle birlikte ısı işlem varlığı bu bölümde sorgulanmamış olup bu bölümde ortaya çıkan sonuçların eğilim ve malzeme karakteristiği açısından bir değerlendirmesi ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Şekil 5.1.(c)'de oluşan grafik değerlendirildiğinde ise SLE_İİ grubunun erozyon eğilimi, D_T6 grubuna benzer oluşmuştur. Erozyon oranı 30° çarpma açısına kadar artmış ve daha sonrasında çarpma açısındaki yükselişe bağlı olarak erozyon oranı düşmeye başlamıştır. Ortaya çıkan malzeme karakteristiği yine sünek davranış olarak karşımıza çıkmaktadır. Numune davranışlarında oluşan farklılıklarda, uygulanan ısı işlem ve üretim yönteminin etkisi fazladır. Şekil 5.1.(d)'den görüleceği üzere yine davranışta değişiklik oluşmuş olup, SLE_T6 grubunun erozyon davranışı tam sünek malzeme grubunu temsil etmektedir. Ortaya çıkan bu sonuçlarda göz ardı edilemeyecek bir parametrede deneylerin gerçekleştirildiği sıcaklık seviyeleridir. Sıcaklıkların kriyojenik şartlara getirilmesiyle oluşan durumlarda değişkenlik oluşabilir. Şekil 5.2'de kriyojenik sıcaklık şartlarında numunelere uygulanan deneylere bağlı oluşan erozyon oranları sunulmuştur.



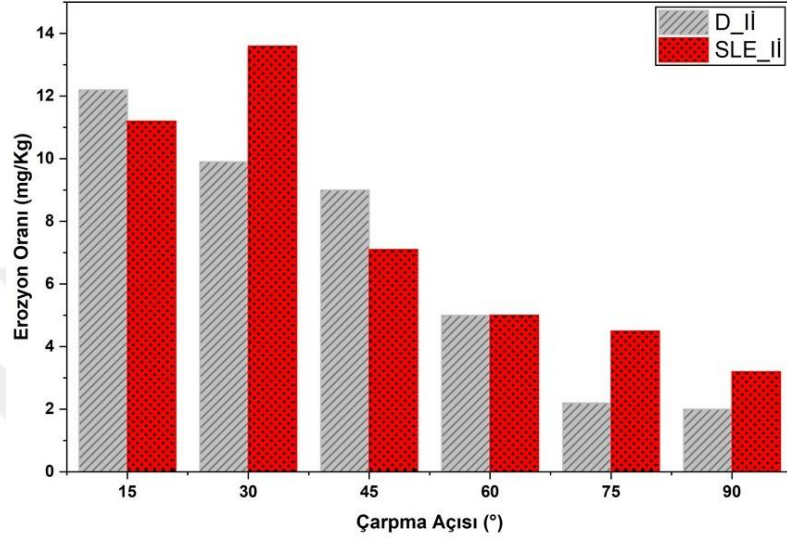
Şekil 5.2. Kriyojenik sıcaklık şartlarında uygulanan deneylerle numunelerde oluşan çarpma açısı- erozyon oranı ilişkisi; a) K_D_İİ, b) K_D_T6, c) K_SLE_İİ, d) K_SLE_T6

Kriyojenik sıcaklık etkisinin numune davranışı etkisine çok fazla dikkat etmeyerek Şekil 5.2'den anlaşılabilecek durumlardan biri, her bir numunenin kriyojenik şartlarda deneylerinin gerçekleştirilmesiyle, ortaya çıkan erozyon oranı artmıştır. Şekil 5.2.(a)'da K_D_İİ grubu numunelerin erozyon cevabı, oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerle benzer oluşmuştur. Ancak her bir çarpma açısında oluşan erozyon oranı, kriyojenik şartlarda artmıştır. Malzeme karakteristiği açısından tam sünek davranış oluşmuştur. Şekil 5.2.(b)'de ise K_D_T6 grubunun erozyon cevabı, oda sıcaklığına kıyasla değişmiştir. Sünek davranıştan, tam sünek davranışa doğru bir geçiş oluşmuştur. Davranış değişikliği sebebiyle de erozyon oranı direk artış göstermeyip, 30° ve sonrasında daha düşük oluşmuştur. K_SLE_İİ grubunun erozyon eğilimi Şekil 5.2.(c)'den görüleceği üzere, değişkenlik göstermiştir. Oda sıcaklığında sünek davranış sergileyen numuneler, kriyojenik şartlarda tam sünek davranışa doğru evrilmiştir. Erozyon oranı da 15° çarpma açılarında artış göstermiştir. Davranış değiştiren bir diğer numune grubu ise K_SLE_T6 grubudur. Şekil 5.2.(d)'de ki grafik incelendiğinde, kriyojenik şartlar dahilinde K_SLE_T6 grubunda sünek davranışın baskın geldiği görülmektedir. Ancak oda sıcaklığında uygulanan deneyler neticesinde, numunede tam sünek davranış olduğu görülmektedir. Ortaya çıkan davranış değişikliği ve erozyon oranı değerlerindeki farklılıkların sebebi sadece kriyojenik sıcaklıklarla açıklanamamaktadır. Numunelerde üretim yöntemi değişikliği, ısıtma işlem uygulanıp uygulanmaması gibi farklı değişkenlikler mevcuttur. Bu sebeple numunelerin erozyon davranışının, birçok etken dahilinde incelenmesi tutarlı yorumların oluşması açısından daha fazla önem arz etmektedir.

5.1. Üretim Yöntemiyle Erozyon Oranı Arasındaki İlişki

Bu tez çalışmasının ana amaçlarından biri olan ve bu konuda motivasyonun oluşmasında önemli yer teşkil eden durum, eklemeli imalatın geleneksel imalatın yerini alabilmesi ve mekanik özellikler açısından geri kalmayan, daha üstün davranışlar sergileyebilen bir üretim yöntemi potansiyelini ortaya çıkarmaktır. Eklemeli imalatın hızlı prototipleşme ve üretim operasyon sayısını tek'e düşürmesi gibi avantajları katmanlı üretimi bir adım öne taşıırken, aşınma gibi mekanik özellikler açısından geleneksel yöntemlerden geri kalmadığının kanıtlanması söz konusu üretim yönteminin, sektörel anlamda tercih edilebilir kılınmasını sağlayacaktır. Tez içinde toz temelli bir eklemeli imalat türü olan seçici lazer ergitme metoduyla üretilmiş AlSi10Mg alaşımlarıyla, döküm

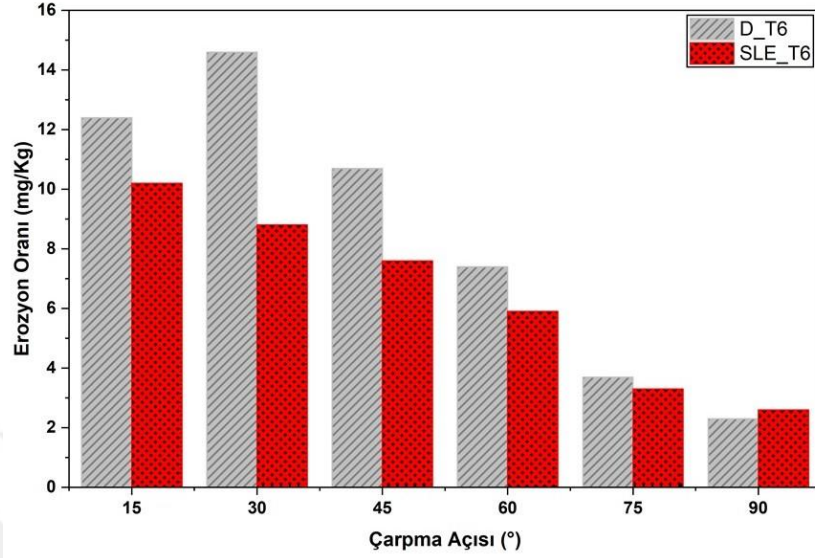
yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımı numunelerin erozyon aşınması davranışları karşılaştırılmıştır. Bu sebeple sadece üretim yöntemi değiştirilip, kriyojenik sıcaklık ve ısıtım işlem uygulanıp uygulanmadığı senaryolar sabit tutularak numunelerin erozyon cevapları değerlendirilmiştir. Şekil 5.3'te ısıtım işlem uygulanmamış (İİ), döküm ve eklemeli imalat numunelerin erozyon oranları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 5.3. D_II ve SLE_II numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

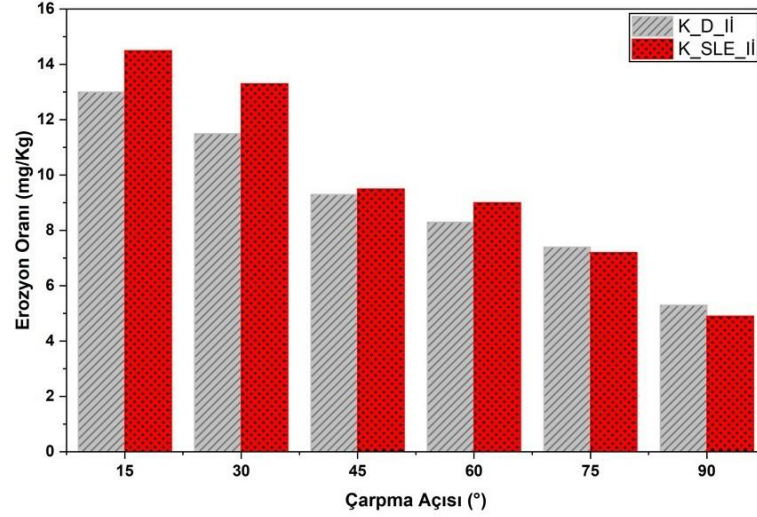
Oda sıcaklığında uygulanan deneyler neticesinde, üretim yöntemine bağlı olarak malzemelerin davranış tipi değişik olmuştur. Döküm numuneler tam sünek davranış sergilemişken, eklemeli imalat numune grubu sünek davranış sergilemiştir. Bu kapsamda eklemeli imalat ile üretilmiş numunelerin malzeme karakteristiği gevrek karaktere dönmeye daha yakındır. Yüzey hasar mekanizması açısından, döküm numunelerde abrazyon tipi bir hasar mekanizması gelişirken, SLE numunelerde yüzeyde gevrek kırılma veya yorulma başlangıcı gözlemlenebilir. Erozyon oranı açısından döküm numuneler 15° çarpma açısı gibi düşük çarpma açılarında 12-13 mg/kg seviyelerinde erozyona uğrarken, SLE numuneler 11 mg/kg seviyesinde erozyona uğramıştır. Ancak 75° ve 90° çarpma açısı gibi yüksek çarpma açılarında SLE numuneler daha fazla aşınmıştır. Orta seviye çarpma açılarında ise SLE numunelerin aşınması dökümlerden daha iyi seviyelerde oluşmuştur. Bu kapsamda orta seviye ve küçük çarpma açılarında eklemeli imalat daha az aşınırken, yüksek çarpma açılarında döküm ile üretilmiş numuneler bir adım öne çıkmaktadır. Numunelere ısıtım işlem uygulanması ile numunelerin davranışının değişebileceği Şekil 5.4'den anlaşılmaktadır. Şekilde, ısıtım işlem uygulanmış

döküm ve SLE grubunun oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneyler sonucunda oluşturdukları erozyon oranı değerleri sunulmaktadır.

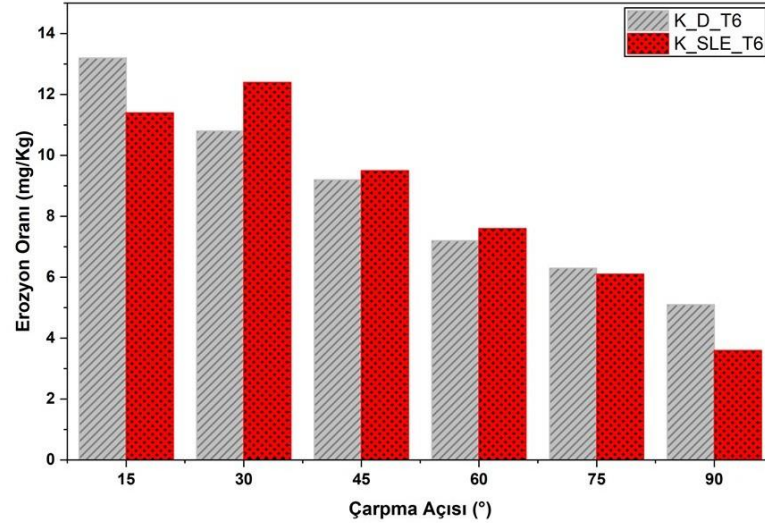


Şekil 5.4. D_T6 ve SLE_T6 numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

Döküm ve SLE numunelere aynı ısıtma işlemi (T6) uygulanmasıyla, numunelerin davranışı değişmiştir. Döküm numuneler tam sünek davranıştan sünek davranışa dönerken sünek karakteristiği değişmeye başlamıştır. SLE numuneler ise sünek davranıştan, tam sünek davranışa geçmiştir ve süneklik derecesi artmıştır. Aşınma açısından ısıtma işlemi uygulanması, SLE numunelerin aşınmasını ciddi orandan düşürmüştür. Döküm numunelerde ise ısıtma işlemi etkisiyle aşınma miktarı gözle görülür düzeyde azalmayıp, 30° çarpma açısı gibi değerlerde artmıştır. Bu kapsamda ısıtma işlemi uygulanmış eklemeli imalat AlSi10Mg numune grubu en az aşınan numuneleri temsil etmektedir. Ancak kriyojenik ortam varlığı ile söz konusu durum değişebilir. SLE_İI grubunda ısıtma işlemi yokken 30° çarpma açısında maksimum 14 mg/kg seviyesinde aşınma gözlemlenirken, ısıtma işlemi uygulanmasıyla bu değer 9 mg/kg seviyelerine gerilemiştir. Kriyojenik ortam varlığı ile üretim yönteminin erozyona ilişkisini ifade etmek için Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da verilen grafikler K_D_İI, K_SLE_İI ve K_D_T6, K_SLE_T6 gruplarının erozyon oranlarını karşılaştırmaktadır.



Şekil 5.5. K_D_II ve K_SLE_II numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi



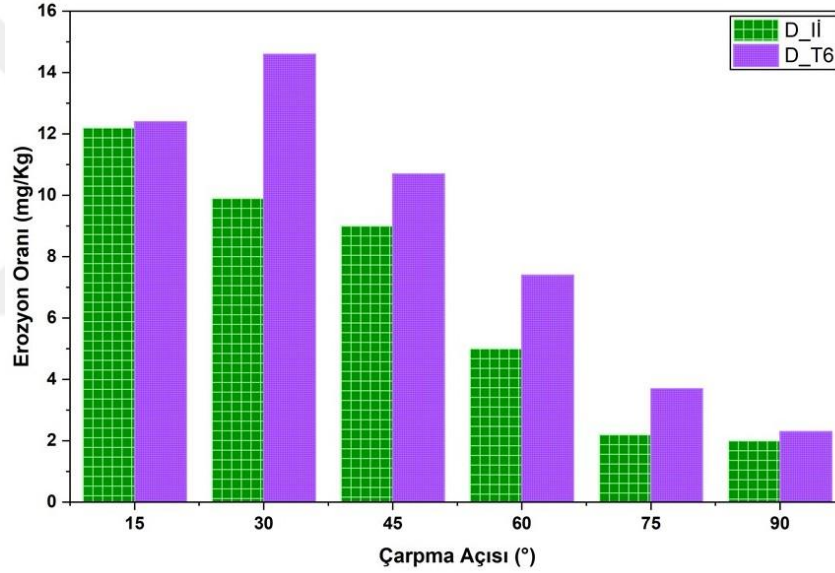
Şekil 5.6. K_D_T6 ve K_SLE_T6 numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

Kriyojenik ortam etkisiyle oluşan durumlara göz atıldığında, döküm ve SLE ile üretilmiş numunelerin davranışı genel anlamda tam sünek davranışa yaklaşmıştır. Ayrıca kriyojenik sıcaklıkların etkisiyle aşınma miktarları her numune için artmıştır. Oda sıcaklığında uygulanan deneylerde maksimum 14 mg/kg seviyesinde erozyon oranı oluşurken, kriyojenik sıcaklıklarda erozyon oranı 16 mg/kg'a yaklaşmaktadır. Bu kapsamda kriyojenik sıcaklıklarda üretim yönteminde ki farklılığın erozyon cevapları değerlendirildiğinde, SLE numuneler çok küçük bir fark da olsa daha fazla aşınmaktadır. Ayrıca SLE_T6 grubu numuneler kriyojenik sıcaklıklarda davranış değiştirmektedir. Kriyojenik sıcaklıklarda oluşan bir diğer durum ise yüzeydeki hasar mekanizmasıdır. Çok

düşük sıcaklıklarda ($<-100^{\circ}\text{C}$), soğumanın etkisiyle yüzeyde parçalanmaların meydana gelebilmesi muhtemeldir. Yüzeylerin durumu SEM mikroskobu ile sorgulanmıştır.

5.2. Isıl İşlem Varlığı ile Erozyon Oranı Arasındaki İlişki

Malzeme davranışı üzerinde üretim yönteminin etkisi grafiklerden görülmüş olsa da oluşan farklılıklarda ısıtıl işlem varlığının etkisi ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. T6 ısıtıl işleminin uygulanmasının temel sebebi yüzey sertliğini artırmaktır. Dolayısıyla malzemelerde ki gevrek ve sünek karakteristiğinin oluşmasında etkisi büyüktür. Şekil 5.7’de döküm numunelere ısıtıl işlem uygulanıp uygulanmamasına göre oluşan erozyon oranı farklılığı sunulmuştur.

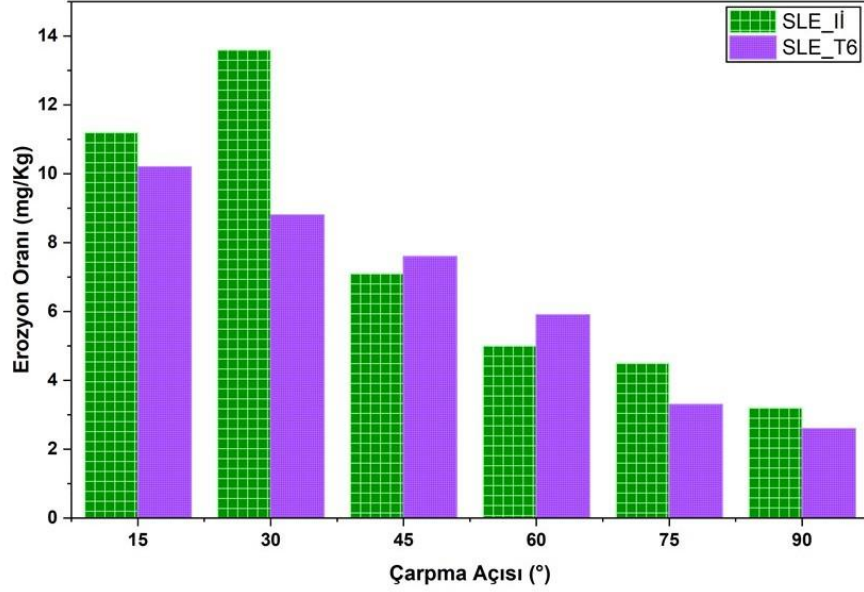


Şekil 5.7. D_II ve D_T6 numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

Isıl işlem varlığı ile numunelerin erozyon oranındaki farklılık incelendiğinde, ısıtıl işlem yokken döküm numuneler daha az aşınırken, ısıtıl işlem varlığı ile numunelerdeki erozyon oranı artmıştır. Ayrıca malzeme davranışı da ısıtıl işlem etkisiyle tam sünekten, sünek davranışa dönmüştür. Isıl işlemin gevrekliğe olan katkısı Şekil 5.7’den anlaşılabilir. Isıl işlem etkisiyle numune yüzeyinin sertliğinin arttığı Çizelge 4.5’den görülmektedir. Oluşan erozyon aşınması sonuçlarında da ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin aşınmalarının fazla olduğu görüldüğü için ısıtıl işlem etkisi gevrek karaktere doğru eğilimde baskın bir mekanizmadır. Ayrıca yüzeydeki hasar mekanizması

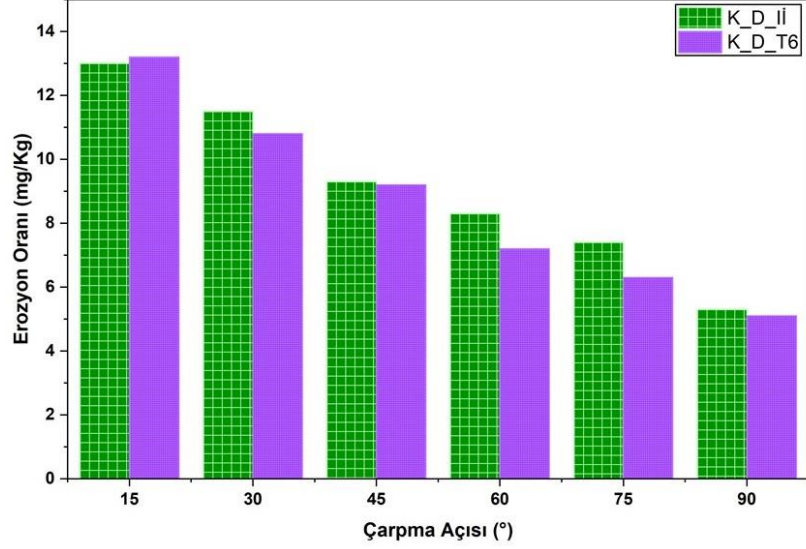
incelemelerinden sonra gevrek kırılmaların veya plastik deformasyon hasarının olup olmadığı anlaşılabacaktır.

SLE tip numuneler üzerinde daha öncede görülmüştür ki ısıtıl işlem uygulanması SLE numunelerin erozyon cevaplarını gözle görülür biçimde iyileştirmektedir. Şekil 5.8’de ısıtıl işlem uygulanmış ve uygulanmamış numunelerin SLE numunelerin çarpma açısına bağlı erozyon oranları sunulmuştur.

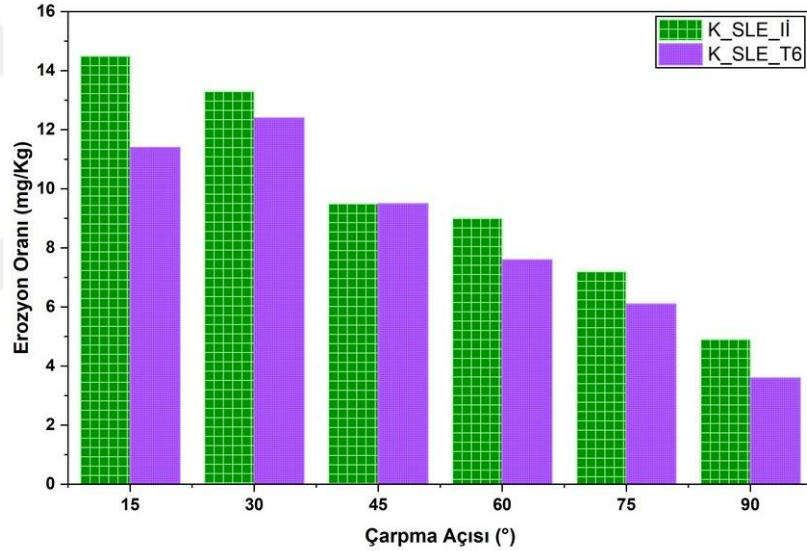


Şekil 5.8. SLE_II ve SLE_T6 numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

Isıl işlem varlığı ile SLE numunelerin davranışı tam sünek davranışa dönmüştür. Erozyon oranı açısından küçük çarpma açılarında, ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin aşınması daha düşük olmuştur. Ancak orta seviye çarpma açılarında ise aşınma miktarı küçük farklarla olsa da ısıtıl işlem uygulanmamış numunelerin lehine dönmüştür. Sektörel anlamda AlSi10Mg alaşımları genellikle T6 ısıtıl işlem uygulanarak kullanılmaktadır. Bu kapsamda eklemeli olarak üretilmiş AlSi10Mg alaşımlarının erozyon davranışı açısından ısıtıl işlem varlığı pozitif yönde etki etmektedir. Ancak döküm numunelerin erozyon davranışı açısından belirgin fark oluşmamaktadır. Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’de erozyon oranları verilen numune gruplarının, kriyojenik sıcaklıklarda ki erozyon oranları Şekil 5.9 ve Şekil 5.10’da verilmiştir.



Şekil 5.9. K_D_II ve K_D_T6 numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi



Şekil 5.10. K_SLE_II ve K_SLE_T6 numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

Kriyojenik ortam şartlarında uygulanan deneyler neticesinde, Şekil 5.9’da görüleceği üzere döküm numunelerdeki ısıtma işlem varlığı, oda sıcaklığına nazaran daha pozitif katkı sağlamaktadır. Kriyojenik şartlarda ısıtma işlem varlığı davranışı etkilememektedir. Isıtma işlem uygulanmamış numunelerin de erozyon davranışı tam sünek oluşmuş, ısıtma işlem uygulanmış numunelerinde erozyon cevabı tam sünek olarak oluşmuştur. Ancak oda sıcaklığında oluşan duruma göre ısıtma işlem varlığının kriyojenik şartlarda olması davranışa olan etkiyi değiştirmektedir. Şekil 5.7’de oda sıcaklığında ısıtma işlem uygulanmış numuneler sünek davranıştayken, kriyojenik şartlar ile beraber

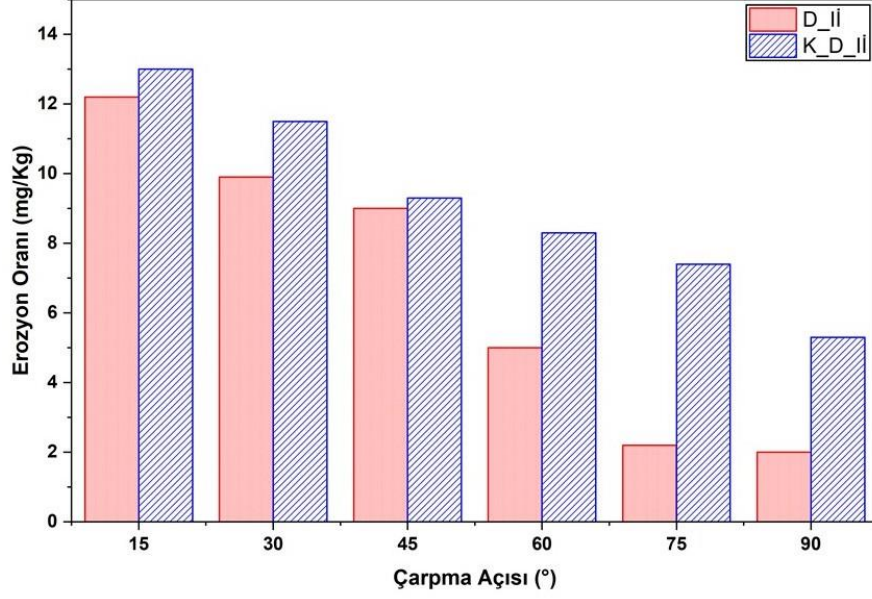
uygulandığı durumda tam sünek davranışı oluşturmıştır. Ayrıca erozyon oranı açısından kriyojenik şartlarda ısıtıl işlemin varlığı değerler çok fazla artmamıştır.

Numunelerin erozyon davranışı üzerinde ısıtıl işlem ve üretim yöntemi farklılıklar oluşturmaktadır. Ancak kriyojenik sıcaklıklarda uygulanan deneyler göstermiştir ki sadece üretim yöntemi ve ısıtıl işlem varlığına göre erozyon oranı ve davranış değişmemektedir. -196°C gibi oldukça düşük sıcaklıklar ısıtıl işlemin veya üretim yönteminin etkisini bile değiştirmektedir.

5.3. Kriyojenik Sıcaklıkların Erozyon Oranına Etkisi

Numunelerin tam sünek veya gevrekliğe doğru adım atarak sünek davranışı üzerinde etki eden önemli parametrelerden biri de kriyojenik sıcaklıklardır. Numuneler kriyojenik ortam şartlarına getirilmek için öncelikle sıvı azot kabına daldırılmış ve 5 dakika beklenildikten sonra sıvı azot kabından alınmıştır. Numuneler sıvı azot kabından çıkarıldıktan sonra yapılan sıcaklık ölçülerine göre yaklaşık 130 saniye içinde kriyojenik ortam şartlarından çıkmaktadır. Bu kapsamda kriyojenik ortam sıcaklıklarında deneylerin gerçekleşme süresi yaklaşık 110 saniye sürmüştür ve dolayısıyla numunelerin kriyojenik şartlara maruz bırakılarak erozyon davranışı ölçülmemiş, kriyojenik sıcaklıklardaki erozyon davranışı ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde genel anlamda kriyojenik ortam sıcaklıkları numunelerin erozyon oranını artırmıştır fakat kriyojenik sıcaklıklarla oda sıcaklığında numune tiplerinin karşılaştırılması açısından ikili grafik sunulması davranışı ve erozyon oranındaki değişiklikleri gözleme dayalı olarak açıkça gösterecektir.

Şekil 5.11’de döküm yöntemiyle üretilmiş ve ısıtıl işlem uygulanmamış numunelerin kriyojenik sıcaklıklarda ve oda sıcaklığında oluşturdıkları erozyon oranları gösterilmiştir.

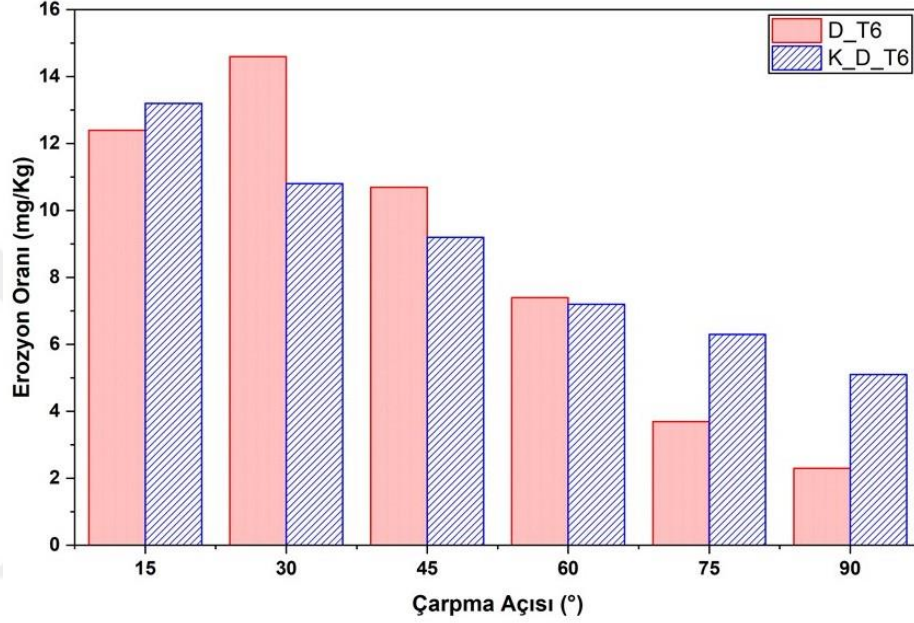


Şekil 5.11. D_II ve K_D_II numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

Oda sıcaklığı ve kriyojenik ortamlarda uygulanan katı partikül erozyon aşınması deneyleri sonucunda, ısıtıl işlem uygulanmamış döküm numunelerin erozyon oranları incelendiğinde, kriyojenik şartların erozyon oranını artırdığı net olarak gözlenmektedir. Ancak kriyojenik sıcaklıklar etkisiyle malzeme davranışı değişmemiştir. Erozyon oranı açısından döküm numunelerin oda sıcaklığında en yüksek oluşturduğu 15° çarpma açısında 12 mg/kg seviyesinde oluşmuşken, kriyojenik şartlarda maksimum 15° çarpma açısında ve 13 mg/kg seviyesinde oluşmuştur. Aradaki fark ihmal edilebilir fakat, çarpma açısının yükselmesiyle, özellikle 75° ve 90° çarpma açısı gibi yüksek çarpma açısında aradaki fark ihmal edilemeyecek kadar fazla oluşmuştur. Yüzeyler deki hasar durumu incelenmesiyle beraber yüzeyde gelişen aşınma mekanizması ile ilgili daha belirgin yorumlar yapılabilir.

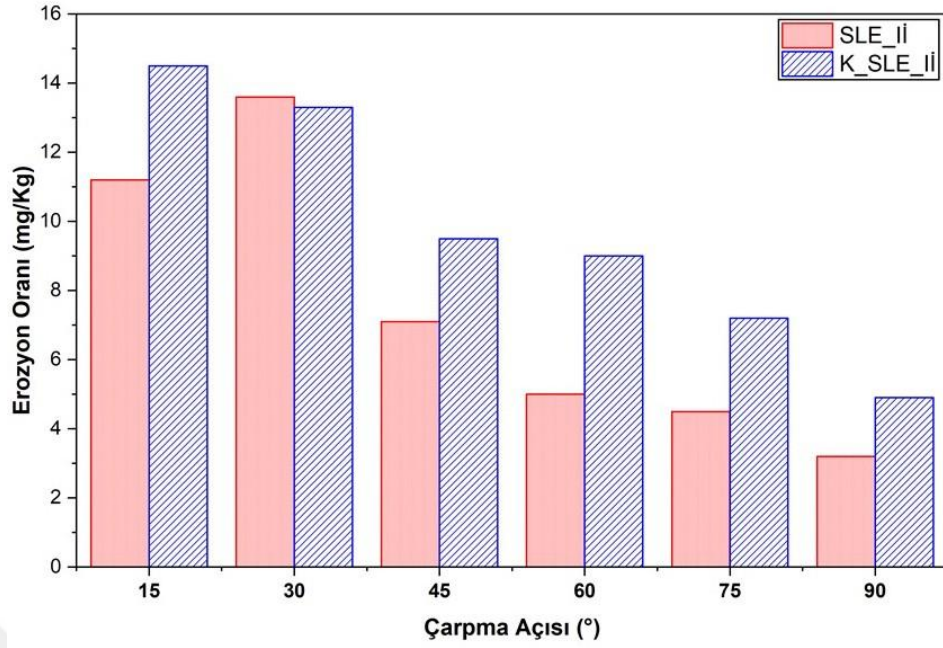
Şekil 5.12’de ki grafik incelendiğinde ise, ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin erozyon oranları, kriyojenik sıcaklıklarda daha düşük seviyelerde oluşmuştur. Bu kapsamda kriyojenik şartlarda şimdiye kadar ortaya çıkan aşınma sonuçları açısından, kriyojenik şartların ısıtıl işlem uygulanmış döküm numunelere pozitif katkı sağladığı anlaşılmaktadır. Davranış açısından ise ısıtıl işlem varlığı döküm yönteminin karakteristiğini değiştirirken, kriyojenik şartlar durumu tekrar eski haline döndürmektedir. Oda sıcaklığında ısıtıl işlem uygulanmamış numuneler tam sünek davranış gösterirken, ısıtıl işlem varlığı ile tam sünek davranış, yarı sünekliğe doğru geçmeye başlayarak sünek olarak karakterize edilmektedir. Ancak hem ısıtıl işlem hem de

kriyojenik ortam etkisi ile davranış tekrar tam sünek davranışa doğru değiştiği görülmüştür. Erozyon oranları açısından ise D_T6 grubu maksimum 30° çarpma açısında aşınarak yaklaşık 15 mg/kg seviyesinde erozyon oranı oluştururken, K_D_T6 grubu numuneler 30° çarpma açısında 11 mg/kg seviyesinde erozyon oranı oluşturmuştur. Ayrıca yüksek çarpma açılarındaki kriyojenik ortamda gerçekleştirilen deney sonuçları daha yüksek olmuştur.



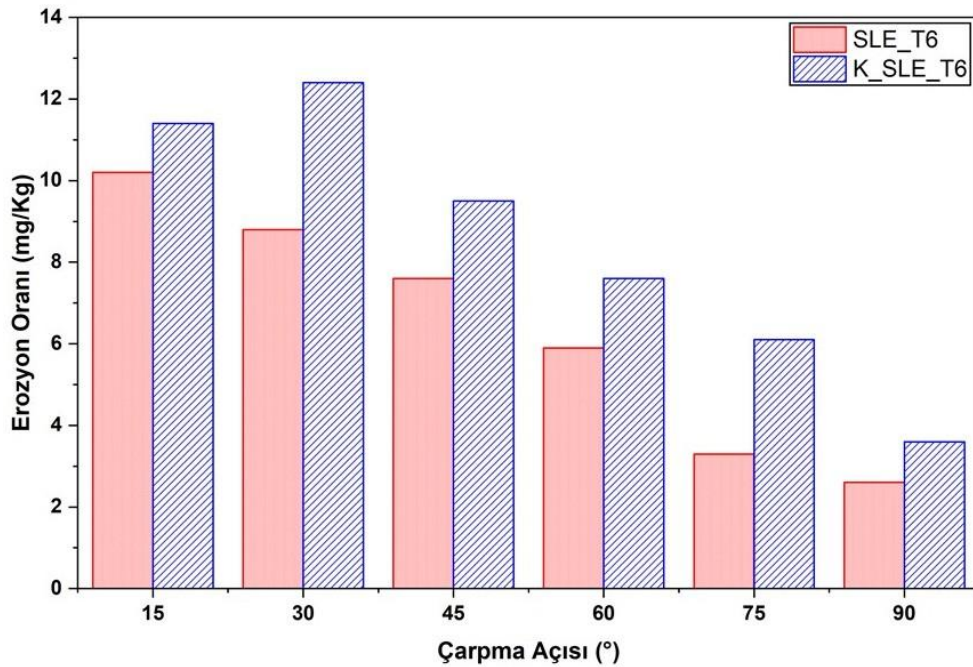
Şekil 5.12. D_T6 ve K_D_T6 numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

Kriyojenik ortam şartları, eklemeli imalat ile üretilmiş numunelerin de erozyon davranışlarına etki etmiştir. Oda sıcaklığında erozyona uğramış numunelerin davranış karakteri sünek oluşturmaktayken, kriyojenik sıcaklıklarda davranış sünek karaktere doğru dönmüştür. Ayrıca yine uğranılan erozyon açısından kriyojenik sıcaklıklarda gerçekleştirilmiş deneylerde daha fazla erozyon oranı oluşmuştur. Isıl işlem uygulanmamış eklemeli imalat numunelerinde ki erozyon durumu Şekil 5.13’de gösterilmektedir. Isıl işlem uygulanmamış SLE numunelerinin erozyon oranı değerlendirildiğinde, SLE_II grubu maksimum 30° çarpma açısında 14 mg/kg seviyesinde erozyona uğramaktayken, kriyojenik şartlarda maksimum aşınma açısı 15° de oluşmuştur. Ayrıca 30° çarpma açısında her iki numunede neredeyse aynı aşınmış olsa da, çarpma açısı yükseldikçe kriyojenik sıcaklıklarda eklemeli imalat (SLE_II) numunelerin daha fazla aşındığı Şekil 5.13’ten anlaşılmaktadır.



Şekil 5.13. SLE_II ve K_SLE_II numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

Kriyojenik ortam varlığı ile beraber, eklemeli imalat numunelerdeki ısıtıl işlem etkisine göre oluşan erozyon aşınması durumu Şekil 5.14’de sunulmuştur.



Şekil 5.14. SLE_T6 ve K_SLE_T6 numunelerin çarpma açısı ve erozyon oranı arasındaki ilişkisi

Kriyojenik ortamın varlığı ısıtıl işlem uygulanmış numunelerde araştırıldığında, erozyon oranı açısından olumsuz katkı sunulmuştur. Ayrıca davranış karakteri de değişmiştir. Oda sıcaklığında aşınmış SLE_T6 grubu tam sünek davranış gösterirken, kriyojenik ortamda gevrekliğe doğru eğilim sergileyerek sünek davranışa geçmiştir. Oda sıcaklığında sadece ısıtıl işlem uygulanarak eklemeli imalat AlSi10Mg numunelerde aşınma miktarı ciddi miktarda azaltılırken, kriyojenik ortam etkisinde ısıtıl işlem varlığı eklemeli imalat numunelere çok iyi katkı sağlamamıştır. Ayrıca kriyojenik ortamın erozyon oranını artırdığı en belirgin numune grubu ise SLE_T6 grubu olmuştur. 30° çarpma açısı harici tüm çarpma açılarında yaklaşık 2 mg/kg seviyesinde erozyon oranını artırmıştır.

Kriyojenik ortam şartlarının oldukça düşük sıcaklık seviyeleri içermesiyle birlikte numune yüzeylerinin aşırı soğuması ve soğuma sebebiyle yapıların yüzeylerinde sertlik durumu değişmesi yapıların davranışına ve aşınma karakterine etki etmektedir. Yüzeylerdeki hasar mekanizması, kriyojenik sıcaklıklarda aşınan numunelerde, parçalanma ve sürüklenme hasarına doğru eğilim sergilediği yüzey incelemeleri ile belirlenebilecek olsa da erozyon oranları ve davranıştaki değişiklikler değerlendirildiğinde tam sünek davranış, kriyojenik sıcaklıklarla beraber sünek davranışa doğru geçmiştir.

Numunelerin erozyon oranları ve davranışları 3 farklı parametrenin ciddi orandan etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Üretim yöntemi, kriyojenik sıcaklıklar ve ısıtıl işlem varlığından her biri ayrı ayrı aşınma davranışına etki edebilirken, birlikte uygulanması da farklı etkiler oluşturmaktadır. AlSi10Mg numuneler sadece üretim yöntemine veya sıcaklık seviyesine veya ısıtıl işlem varlığına göre davranış değiştirebilirken, iki farklı parametrenin birlikte uygulanmasıyla davranışın yine değişebileceği görülmektedir.

Çizelge 4.5’de ısıtıl işlemlili ve ısıtıl işlemsiz AlSi10Mg numunelerin sertlik değerleri verilmiştir. Ancak kriyojenik sıcaklıklarda ortaya çıkan durumun değerlendirilmesi açısından sertlik seviyesinin kriyojenik şartlarda tekrar ölçülmesi numunelerin kriyojenik şartlarda ki erozyon aşınması davranışının değerlendirilmesi açısından daha doğru yorumların yapılması ihtimalini kazandıracaktır.

4 çeşit numunenin oda sıcaklığında ve kriyojenik şartlarda, üretim yöntemi ve ısıtıl işlem varlığı ile oluşan erozyon oranları farklı çarpma açılarında ölçülmüştür. Uygulanan deneyler neticesinde AlSi10Mg alaşımının erozyon aşınması davranışı, davranışa etki eden parametreler ve nasıl etki ettiği gibi kalitatif sorgulanmış uygulanmıştır. Bu kapsamda numunelerin erozyon aşınması davranışlarında genel yorumlar oluşmuştur.

5.3.1. Kriyojenik ortam şartlarının numunelerin sertliği ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi

Erozyon oranı üzerinde yüzey pürüzlülüğü ve yüzey sertliğinin önemi fazladır. Sertlik seviyesi yüksek yüzeylerde gevrek kırılma hasar mekanizması baskınlaşırken, daha yumuşak yüzeylerde gömülme veya abrazyon esaslı bir hasar mekanizması gelişebilir. Ayrıca sertlik ve yüzey pürüzlülüğünün oda sıcaklığı ve kriyojenik sıcaklıklarda değişip değişmediğinin belirlenmesi, malzemenin mekanik özelliklerinin ve erozyon davranışının açıklanmasında kullanışlı olacaktır. Deneysel süreç başlamadan önce oda sıcaklığında, ısıtıl işlem uygulanmış uygulanmamış döküm ve SLE numunelerin yüzey sertliği Çizelge 4.5’de verilmiştir. Kriyojenik sıcaklıkların numunelerin sertliğine nasıl etki ettiğinin gösterilmesi amacıyla Çizelge 5.1’de oda sıcaklığında ve kriyojenik şartlara maruz bırakılarak, kriyojenik sıcaklıkların etkisinin devam ettiği süreç içerisinde ölçülen sertlik değeri sunulmaktadır. Oluşan sonuçlar Brinell sertliği olarak ölçülmüş ve dönüşüm tabloları yardımıyla Vickers sertliğine dönüştürülmüştür.

Çizelge 5.1. Numunelerin oda sıcaklığında ve kriyojenik sıcaklıklarda sertlik değerleri

Brinell de Ön Yüklem (N)	Numune Adı	Ölçüm Sonucu	
		Brinell (HB)	Vickers (HV)
62,5	D-II	53	57
	D-T6	88	91
	SLE-II	89	92
	SLE-T6	85	88
	K-D-II	54	58
	K-D-T6	90	93
	K-SLE-II	90	93
	K-SLE-T6	86	89

Sertlik sonuçları incelendiğinde, kriyojenik ortam yorumlarından önce, en belirgin söylenebilecek durum ısıtıl işlem uygulanmamış döküm numuneler, ısıtıl işlem uygulanması ile birlikte ciddi oranda sertlik artışı kazanmıştır. Ancak ısıtıl işlem uygulanmasıyla eklemeli imalat numunelerin sertlik değerinde bariz bir artış ortaya çıkmadığı yorumu yapılmıştır. Kriyojenik şartlarda numunelerin sertliği açısından ise yine belirgin bir artış veya düşüş gözlemlenmemektedir. Bu sebeple erozyon oranların daki farklılıkların oluşmasında, kriyojenik ortam, ısıtıl işlem ve üretim yöntemi etki eden

parametreler grubunda iken kriyojenik ortam etkisinde numunelerin sertliklerinde ciddi oranda artışlar gözlemlenmemektedir.

Kriyojenik ortamın etki edebileceği bir diğer yüzey özelliği ise pürüzlülük değeridir. Yüzey pürüzlülüğünün erozyon oranı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Çizelge 5.2’de numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri gösterilmektedir. Yüzey Pürüzlülüğünün ölçümü için EK 4 de yer alan ölçüm aleti kullanılmış olup, ölçüm numunelerin orta bölümlerinden ve 2 mm’lik tarama mesafesinden elde edilmiştir. EK 5’de ölçümün yapıldığı bölge gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Numunelerin yüzey pürüzlülüğü değerleri

Numune Adı	Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Sonuçları			
	Ra	Rk	Rpk	Rvk
D-II	0,809	2,158	1,562	1,72
D-T6	0,655	2,071	0,809	0,905
SLE-II	8,248	17,721	22,969	25,551
SLE-T6	13,886	46,013	15,427	14,008
K-D-II	1,577	4,011	2,963	4,099
K-D-T6	0,7	1,893	0,761	1,699
K-SLE-II	18,417	59,017	24,283	24,89
K-SLE-T6	10,668	33,383	18,104	14,986

Kriyojenik ortamın yüzey pürüzlülüğüne olan etkisine geçilmeden önce döküm numunelerin üretim aşamasında kesimi ile yüzey pürüzlülük değerleri ciddi oranda düşük çıkmıştır. Ancak eklemeli imalat AlSi10Mg numunelerin yüzey pürüzlülüğü, dökümlere kıyasla oldukça yüksek olmasına rağmen erozyon oranlarında dökümlerden daha iyi gelebildiği veya döküm numunelerle arasında çok fazla farkların oluşmadığı görülmüştür. Eklemeli imalat numuneler üzerine de ekstra bir kumlama işlemeli uygulanması veya yüzeyin taşlanmasıyla pürüzlülük değeri düşürülebilir. Tez kapsamında eklemeli imalat süreçleri ile ilgili bir sorguya girilmesi bile tez çalışmasını sonrasında eklemeli üretim süreçleri irdelenecektir. Kriyojenik ortamın pürüzlülüğe olan etkisi incelendiğinde ise, numunelerin pürüzlülük değerinin arttığı görülmektedir. Döküm numunelerde artış miktarı ihmal edilebilecek düzeyde oluşmuşken, eklemeli imalat numunelerde ciddi oranda artışların olduğu gözlemlenmektedir. Ancak ortaya çıkan erozyon sonuçları açısından yüzey pürüzlülüğü düşük olan döküm numuneler ile katmanlı yapıdaki SLE numunelerin aşınmaları birbirlerine yakın, döküm numunelerin öne geçtiği veya eklemeli imalatın daha az aşındığı durumların oluştuğunu göstermiştir. Bu kapsamda SLE

numunelerin daha pürüzlü yüzeye sahip olsalar da aşınma açısından dökümlere geçebilmektedir.

5.4. Korelasyon Analizine Bağlı İstatistiklerle Erozyon Davranışının Açıklanması

Deneylerinin numunelerinin erozyon oranlarına etki eden birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler arasında üretim yöntemi, ısıtma işlem varlığı ve kriyojenik sıcaklıkların erozyon oranına etkisi büyüktür. Ancak 3 farklı etken ile numunelerin erozyon oranı arasındaki ilişkiyi belirlerken ve hangi tip numunelerin birbirleri ile benzer cevaplar verdiği anlamak için istatistik analizlerine başvurmak sonuçları anlamlandırmak için kullanışlı olacaktır. Ayrıca ısıtma işlem varlığı ve eklemeli imalat süreçleri maliyet oluşturan üretim parametreleridir. Bu kapsamda numuneler arasında benzer davranış sunan numuneler istatistiklere bağlı olarak belirlenebilirse ekstra maliyetlerin önüne geçilebilir.

Numunelerin erozyon oranları arasındaki ilişkiyi anlamlandırmak için Pearson korelasyon analizi uygulanmıştır. Pearson korelasyon analizi ile bir korelasyon matrisi oluşturularak değişkenler arasında ki belirlenebilmektedir. Ortaya çıkan matristen ısı haritası oluşturularak ve Denklem (5.1) ile korelasyon katsayısı (r) her numune erozyon oranı hesaplanarak;

- +1 ve kırmızı: Numunelerin benzer ve paralel eğilimde aşınmıştır
- 0 ve renk yok: Numuneler arasında bir ilişki yoktur
- -1 ve mavi: Numuneler arasında ki eğilim farklıdır

Sonucuna varılmaktadır. Korelasyon katsayısının -1 ile +1 arasındaki değişimi ile numuneler arasındaki ilişki istatistiksel olarak ortaya konmuş olmaktadır. Pearson korelasyon katsayısı Denklem (5.1) ile ifade edilmiştir.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n=6} (X_i - \bar{X}) * (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n=6} (X_i - \bar{X})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^{n=6} (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (5.1)$$

Denklem (5.1) kullanılarak her bir numune arasındaki benzerlik ve farklılık eğilimi korelasyon katsayısına (r) bağlı olarak anlaşılmaktadır. Denklem (5.1) her bir numune birbirine göre kıyaslamasına göre değerlendirilmiştir. Denklem içindeki

parametrelerin kullanımı açısından, her bir numunenin 6 farklı çarpma açısında (i), 6 farklı gözleme (n) bağlı olarak erozyon oranlarının (X_i) bilinmesi gerekmektedir. Örneğin SLE_İİ grubunun 15°, 30°, ..., 90° çarpma açısındaki erozyon oranı değeri bilindiği için 6 farklı X_i oluşmaktadır. SLE_İİ grubunun 6 farklı açıdaki ortalama erozyon oranı değeri ise $\bar{X}$ ile ifade edilmektedir. Burada örneğin SLE_İİ grubunun D_İİ grubuyla olan benzerliklerinin belirlenebilmesi için korelasyon matrisi oluşturulmak istenildiği düşünülün. D_İİ grubunun 6 farklı açıda ki erozyon değerleri de Y_i ile ifade edilir. D_İİ grubun da 6 farklı açıdaki erozyon değerlerinin ortalaması ise $\bar{Y}$ ile ifade edilmektedir. Bu aşamada 6 farklı erozyon değerine (X_i ve Y_i) göre genel toplam içinde Denklem (5.1) uygulanarak numuneler arasında korelasyon katsayısı çıkartılarak birbirlerine göre benzerlikleri anlaşılabilir. Korelasyon matrisi ve ısı haritasının oluşturulması için daha önce deneysel sonuçlarla bulunmuş erozyon oranları Çizelge 5.3’de ifade edilmiştir.

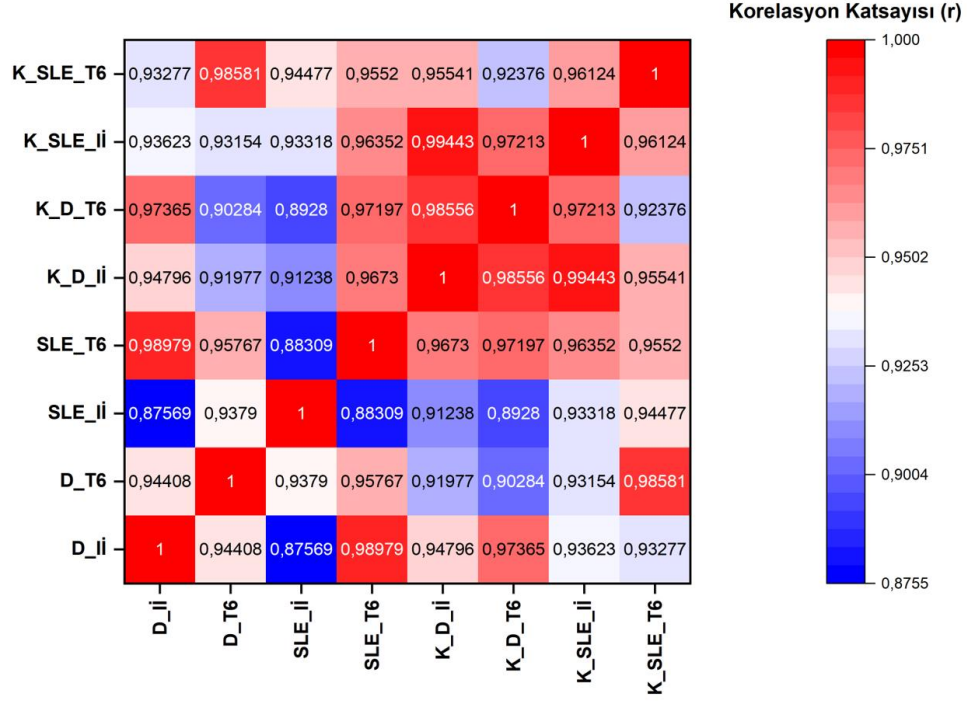
Çizelge 5.3. Çarpma açısına bağlı erozyon oranı değerleri (mg/kg)

Numune Adı	Partikül Çarpma Açısı (°)					
	15°	30°	45°	60°	75°	90°
D_İİ	12,2	9,9	9	5	2,2	2
D_T6	12,4	14,6	10,7	7,4	3,7	2,3
SLE_İİ	11,2	13,6	7,1	5	4,5	3,2
SLE_T6	10,2	8,8	7,6	5,9	3,3	2,6
K_D_İİ	13	11,5	9,3	8,3	7,4	5,3
K_D_T6	13,2	10,8	9,2	7,2	6,3	5,1
K_SLE_İİ	14,5	13,3	9,5	9	7,2	4,9
K_SLE_T6	11,4	12,4	9,5	7,6	6,1	3,6

Çizelge 5.3’de ki değerler Denklem (5.1) ile çözülerek numunelerin birbirleri ile arasındaki korelasyon katsayısı hesap edilerek her bir numunenin erozyon eğilimleri değerlendirilmiştir. Yapılan hesaplar sonucunda 8×8 korelasyon matrisi oluşturulmuştur. Şekil 5.15 ile korelasyon matrisi ve her bir numune arasındaki korelasyon katsayısı gösterilmiştir. Ayrıca numuneler arasındaki ilişki ısı haritası olarak da verilmiştir. Numuneler arası ısı haritası ve korelasyon katsayıları incelendiğinde;

- SLE_İİ grubu ile D_İİ grubunun davranışları birbirinden farklı olduğu anlaşılmaktadır. Aralarındaki korelasyon değeri açısından daha düşük bir katsayı oluşmuştur. Ortaya çıkan davranış farklılığı Şekil 5.3 ile de doğrulanmaktadır.

- SLE_T6 numuneleriyle SLE_İİ grubunun da aşınma davranışları yine birbirinden farklı olduğu Şekil 5.15'den anlaşılabılır. Ortaya çıkan erozyon oranları Şekil 5.8'de sunulmakla birlikte, davranış farklılığının olduğu arasında ilişki iki şekilden de anlaşılabılır.
- K_D_İİ, K_D_T6 ve D_T6, SLE_İİ grupları arasında da yine davranış farklılıkları yüksektir. Bu sebeple bu 4 tip malzeme grubu birbirleri yerine kullanıldığında farklı aşınma cevapları oluşturacaktır.
- K_SLE_T6 ile D_T6 açısından sonuçlar yorumlanır ise korelasyon katsayısı 1'e oldukça yakın oluşmuştur. Bu sebeple iki tip numunenin davranışı birbirine yakındır.
- K_SLE_İİ ve K_D_T6 grupları ile K_D_İİ grubunun aşınma davranışları değerlendirildiğinde ise yine benzer cevap oluşmaktadır. Bu sebeple bu 3 tip numune erozyon aşınmasının ortaya çıktığı durumlarda benzer cevap verebilir. Ortaya çıkan sonuçlar Şekil 5.9'da doğrulanmaktadır. Bu sebeple maliyet açısından en düşük numune grubuna yönelim daha fazla tercih edilebilir.
- Şekil 5.15 kullanılarak numeneler arasındaki ilişki istatistiksel veriye bağlı olarak, her bir numunenin erozyon oranı dikkate alınarak hesaplanmıştır. Numunelerin benzerlik ve farklılığını ifade etmede Şekil 5.3 ile Şekil 5.14 arasındaki grafiklerde gözlenen durumlardan sapma oluşmayarak özet bir matris şeklinde her bir numunenin birbiri arasındaki ilişki ortaya çıkartılmıştır.



Şekil 5.15. Korelasyon matrisi ve ısı haritası

5.5. Ayırık Elemanlar Analizi ile Erozyon Oranı Sonuçları

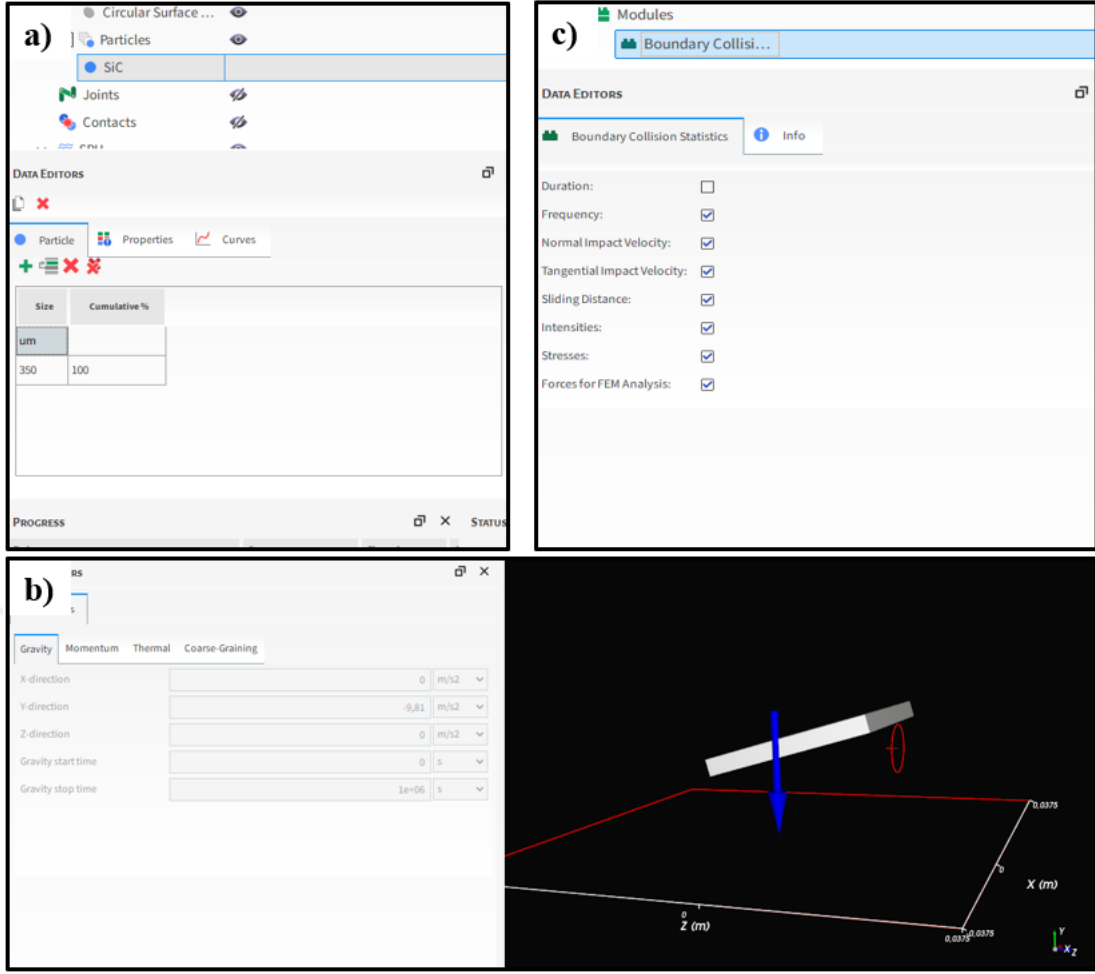
Ayrık elemanlar metoduyla simülasyon çalışmalarının yürütülebilmesi için Ansys Rocky DEM yazılımı kullanılmıştır. Partiküllerin numunelere çarpma hızlarının belirlenebilmesi için ilk hızlarının tespitinde aynı yazılım tercih edilmiştir.

Program dahilinde partikül modellemesi istenilen geometri ve boyutlarda tanımlanabilmektedir. Partiküllerin serbest düşmeye bağlı ilk hızlarının tespitinde programın kullanışlı olduğu anlaşılmıştır. Erozyon oranının belirlenmesi içinde bir dizi analiz faaliyeti yürütülmüştür.

Rocky içinde öncelikle daha önce Ansys LPBF simülasyonu ile üretilen numune geometrisi aktarılmıştır. LPBF simülasyonlarından dışa aktarılan 3D Cad görseli Şekil 4.30'da sunulmuştur. Rocky içinde analiz modellemesi birebir deneysel süreç ile aynı tanımlandığında, analiz sürelerinin aylarca sürdüğü anlaşılmıştır. Deneysel süreçte kullanılan köşeli partikül yapısı, bir kilogramlık partikül miktarı ve malzemenin aşınma sabiti veya diğer adıyla Archard'ın K aşınma sabiti analiz sürelerini uzatan en büyük parametrelerdir. Söz konusu parametreler deneysel süreçlerle aynı olarak tercih

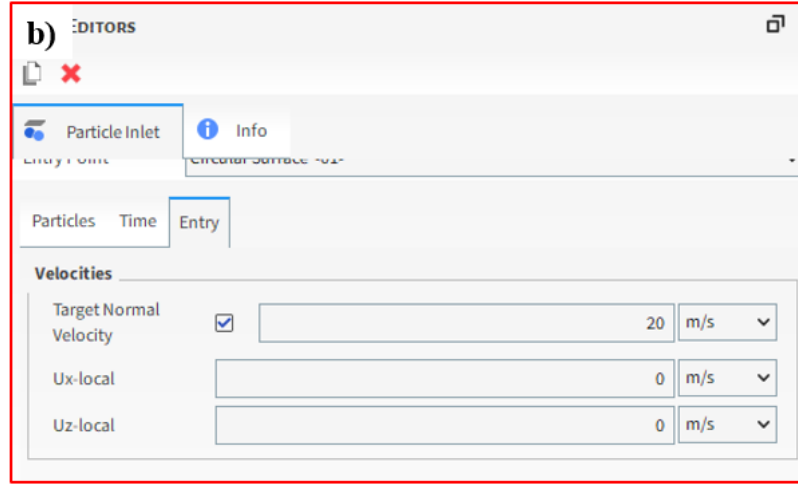
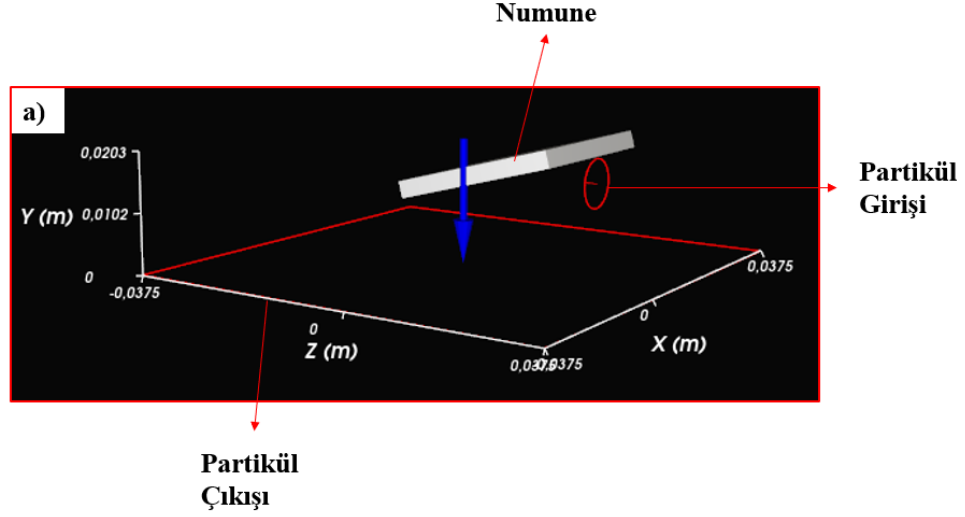
edildiğinde, analizlerin kısa sürelerde çözülebilmesi için ciddi bilgisayar maliyetleri oluşmaktadır. Rocky programı ekran kartı (GPU), işlemci (CPU) ve çoklu GPU ile simülasyonları çözümlenmektedir. Yüksek partikül miktarı ve köşeli partikül geometrisinin kullanıldığı simülasyonlarda ekran kartı çözücü ile analizlerin çözülmesi süreleri daha kısaltmaktadır. Ancak analiz sürelerinin gün seviyesine indirilebilmesi için yüksek kapasiteli (RTX 6000, RTX 8000, H100, A100...vb.) ekran kartlarına ihtiyaç bulunmaktadır. Bu ekran kartlarının maliyetleri çok yüksek olmakla birlikte tedarik süreci zorlayıcıdır. Bu kapsamda ayrı elemanlar analizlerin gerçekleştirilebilmesi için bir dizi yakınsama çalışması yürütülmüştür.

Rocky esaslı analizler için simülasyon sürelerini kısaltmak adına partiküller dairesel olarak ve 350 μm olarak modellenmiştir. Modellenen partikül geometrisi, hız ölçümüyle aynı olarak tercih edilmiştir. Partiküllerin boyutları program içinde tanımlanabilmektedir. Şekil 5.16.(a)'da partikül boyutlarının programa tanıtıldığı ara yüz gösterilmektedir. Partikül şekli ve boyutu analiz sürelerini kısaltmak adına uygulanmıştır. Partiküller konusunda yapılan iyileştirme ile beraber, yer çekimi etkisi program içinde tanımlanmıştır. Yer çekimi deneysel şartlarla aynı olacak şekilde program içinde tanımlanmıştır. Yer çekiminin tanımlandığı ara yüz Şekil 5.16.'(b) ile ifade edilmiştir. Ayrıca erozyon numunelerinin partikülle etkileşimi sonucu ne kadar bir gerilmeye maruz kaldığı anlayabilmek adına program modülleri Şekil 5.16.(c)'de gösterilmiştir.



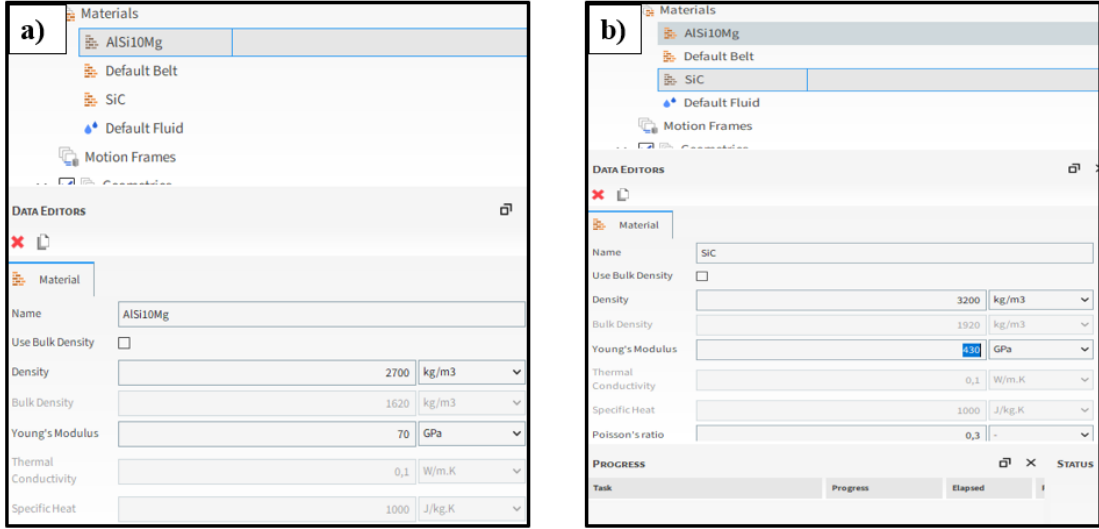
Şekil 5.16. Ansys Rocky simülasyon ayarı ara yüzleri; a) Partikül boyutu, b) Yer çekimi, c) Gerilim hesaplama modülü

Partiküllerin nozuldan çıkışındaki havanın hızı daha önceki çift disk metoduyla yapılan ölçümlere göre 20 m/s olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda partiküller için öncelikle bir adet partikül girişi tanımlanmış olup, partikül hızları 20 m/s olarak program içinde tanımlanmıştır. Partiküller numuneye çarptıktan sonra herhangi bir etki oluşturmayacağı için bir adet partikül çıkışı tanımlanmıştır. Numuneye çarpan partiküller bu partikül çıkışından silinerek, analiz sürelerinin kısaltılması sağlanmıştır. Şekil 5.17’de partikül girişi, partikül çıkış ve numune gösterilmektedir. Erozyon numunesi ilk olarak 15° çarpma açısına göre ayarlanmış ve deneysel sonuçlarla oluşan K aşınma sabiti ve erozyon oranı ile oluşan sapması araştırılmıştır. Ayrıca partiküllerin hızlarının tanıtıldığı ara yüz de Şekil 5.17 ile gösterilmiştir.



Şekil 5.17. Rocky ara yüzünde hız ve numune ayarları; a) Numune ve partikül giriş-çıkışı, b) Partikül hız tanımlaması

Numune malzemesi ve partikül malzemesi için de program içinde tanımlama yapılmıştır. Numune malzemesi AlSi10Mg alaşımı olup, malzeme yoğunluğu 2700 kg/m^3 ve malzemenin elastisite modülü 70 GPa olarak programa tanıtılmıştır (Kempen ve diğ., 2012). Partikül malzemesi içinse silisyum karbür (SiC) partiküller programa tanıtılmıştır. Partiküllerin yoğunluğu 3200 kg/m^3 ve elastisite modülleri 430 GPa olarak program içinde verilmiştir. Yoğunluk ve elastisite modülleri program için analiz süreleri için önemlidir. Yoğunluk değeri ile partiküllerin aşınmaya bağlı ağırlık kaybı hesaplanacaktır. Elastisite modülü ise partiküllerle numunenin etkileşimi sonucu numune de ne kadar gerilme oluştuğunun hesaplanmasında önemlidir. İki taraf içinde, değerlerin programa tanıtılması yine analiz sürelerine etki etmektedir. Şekil 5.18’de malzemelerin tanıtıldığı ara yüz hem partiküller hem de AlSi10Mg numune için verilmiştir.



Şekil 5.18. Malzemelerin Rocky içinde tanıtılması; a) AlSi10Mg, b) SiC

Malzeme tanıtımı da tanımlandıktan sonra analiz sürelerinin uzamasına en fazla etki eden parametre partikül miktarıdır. Deneysel faaliyetlerde 1 kilogramlık partikül miktarı 80 saniye içinde püskürmekte ve partikül boyutları 350 µm olarak SEM görüntüsü ile belirlenmiştir. Bu kapsamda deneysel şartlarla aynı parametreler kullanılarak, Rocky programında gerekli partikül tanımlaması yapıldığında yaklaşık 11 milyon partikülün modellenmesi gerektiği anlaşılmıştır. Söz konusu partikül seviyesi ile analizin çözüm süresi yaklaşık 60 günde tamamlanmaktadır. Bu kapsamda analiz sürelerinin kısaltılması için deney şartlarında ki partikül sayısına çeşitli ölçekler eklenmiştir ve erozyon oranındaki yakınsama K aşınma sabiti ile kontrol edilmiştir. Isıl işlem uygulanmamış eklemeli imalat AlSi10Mg (SLE_II) numunelerin deneysel sonuçlarından elde edilen K aşınma sabitinin bulunması için Denklem (3.3) kullanılarak, Denklem (5.2) türetilmiştir.

$$K = \frac{E * 2 * H}{\rho * U^2} \quad (5.2)$$

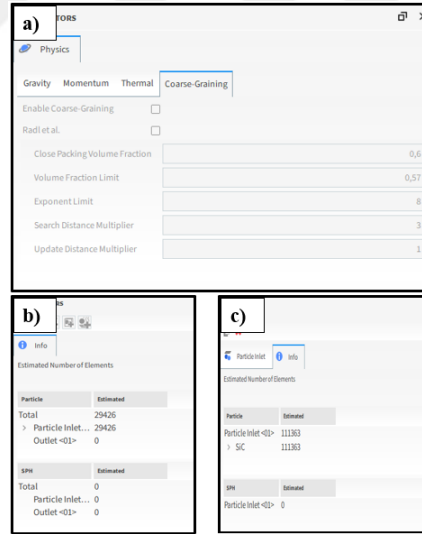
K aşınma sabitinin belirlenebilmesi için partikül yoğunluğu (ρ), partiküllerin çarpma hızı (U), partiküllerin sertliği (H), ve erozyon oranının (E) bilinmesi gerekmektedir. Partikül sertliği için Oka'nın erozyon modelinde sertlik için Vickers sertliği kullanıldığı için, K aşınma değerinin hesaplanmasında Çizelge 5.1'de ki Vickers sertliği sonuçları hesaplarda dikkat edilmiştir. SLE_II grubunun erozyon oranları daha önceden deneysel çalışma ile tespit edilmiştir. Partikül yoğunluğu ve çarpma hızlarının

bilinmesiyle, çarpma açısına bağlı SLE_II grubu için belirlenen K aşınma katsayıları Çizelge 5.4’de verilmiştir.

Çizelge 5.4. SLE_II grubunun deneysel sonuçlara göre hesaplanan K katsayısı

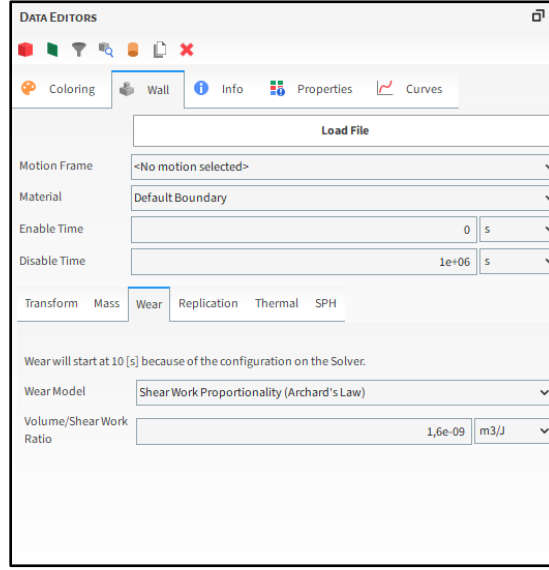
Numune Adı	K Aşınma Sabiti (m^3/J)					
	15°	30°	45°	60°	75°	90°
SLE II	$1,61 \cdot 10^{-9}$	$1,96 \cdot 10^{-9}$	$1,02 \cdot 10^{-9}$	$7,2 \cdot 10^{-10}$	$6,47 \cdot 10^{-10}$	$4,6 \cdot 10^{-10}$

Analizlerin deneysel şartlarla aynı şartlarda gerçekleştirilebilmesi için Rocky içinde aktif olan “Coarse-Graining Factor (CGM)” bölümü aktif edilmiştir. Bu modül sayesinde 11 milyon partikül sayısı düşürülmektedir. 350 μm ’lik partiküller birleştirilerek aynı partikül miktarının aşınmaya olan etkisi analizlere yansıtılmıştır. Burada ortaya çıkan sonuçlarda hassasiyet azalmış olsa da deneysel şartlar korunarak analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. CGM faktörünün ayarlandığı, CGM aktif edilmeden önceki partikül sayısı ve CGM faktörünün artırılmasıyla yeni oluşan partikül miktarı Şekil 5.19’da verilmiştir.



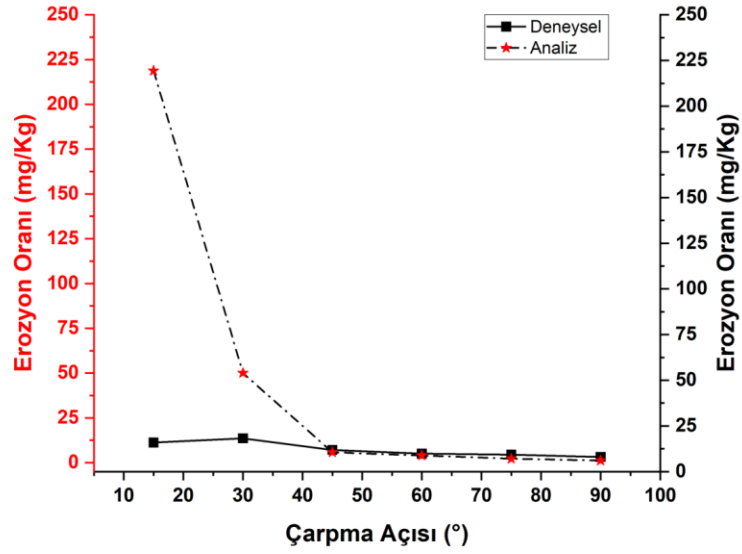
Şekil 5.19. Rocky partikül ayar ara yüzleri; a) CGM ara yüzü, b) CGM aktif olduktan sonraki partikül miktarı, b) CGM aktif edilmeden önce ki partikül miktarı

SLE_II grubu numuneler için gerekli analiz parametreleri Rocky içinde kurgulanmıştır. 6 farklı çarpma açısında Çizelge 5.4’de ki K aşınma katsayıları da numunelere tanıtılarak analiz çalıştırılmıştır. K aşınma katsayısının Rocky içinde numuneye tanıtıldığı ekran Şekil 5.20’de verilmektedir.



Şekil 5.20. K aşınma katsayısının numunelere tanıtım ara yüzü

K aşınma katsayılarının tanıtımı ile 6 farklı analiz çalışması yürütülmüş ve 6 farklı çarpma açısındaki sonuçlar karşılaştırmalı grafik halinde Şekil 5.21’de sunulmuştur.



Şekil 5.21. Analiz ve deneysel sonuçlarla elde edilen çarpma açısı-erozyon oranı ilişkisi

Analizler sonucunda erozyon oranının hesap edilmesi için, öncelikle oluşturulan geometrinin ilk ağırlığı ölçülmüştür. Şekil 4.30’da LPBF analizi ile elde edilen geometriye AlSi10Mg malzeme tanımlaması ile hesaplanan ilk ağırlık 7,29 gram olarak belirlenmiştir. Analiz sonucunda aşınan geometrinin ağırlığı SOLIDWORKS programı

yardımıyla belirlendikten sonra analizlere bağlı numunelerin uğradığı ağırlık kaybı ortaya çıkartılmıştır. Daha sonra aşındırıcı partikül miktarının bilinmesi ile Denklem (3.2) kullanılarak erozyon oranları hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarının deneysel sonuçlara göre farklılıkları değerlendirildiğinde, 15° ve 30° çarpma açısı gibi küçük çarpma açılarında sapma miktarı aşırı yüksek oluşmuştur. 15° çarpma açısında, deneysel sonuçlarla 11,2 mg/kg erozyon oranı tespit edilirken, analiz sonucunda erozyon oranı 225 mg/kg seviyesinde tespit edilmiştir. Sapma oranı oldukça yüksek seviyede olduğu için analiz verisi uygun sonuç ortaya çıkarmamıştır. 30° çarpma açısında da değerler her ne kadar yakınsamaya başlamış gibi gözükse de yine aşırı sapmalar meydana getirmiştir. Ancak çarpma açısı 45° gibi orta seviyeye getirildiğinde, analiz sonucu ile deneysel sonuç yaklaşık %5 sapma ile tespit edilmiştir. Bu kapsamda ciddi bir yakınsama elde edilmiştir. Çarpma açısının yüksek olduğu durumlarda da sapma miktarı %5-%10 seviyesinde oluşmuş olup, deneysel değerlere yakınsamaların olduğu doğrulanmıştır. 60° çarpma açısında %2 sapma ile ideal durum yakalanmıştır. 75° ve 90° çarpma açılarında ise sapma miktarı %6 ve %7 olarak ölçülerek kabul edilebilir sınırlar dahilinde analizlerin yakınsadığı görülmüştür. Ortaya çıkan sonuçlara CGM faktörü aktifken ulaşılmıştır ve partikül geometrisi küresel olarak tercih edilerek analizler hesaplanmıştır. Ancak CGM faktörü, partikül miktarı yüksek seviyede olduğu durumlarda tercih edilen ve yüksek partikül miktarını düşürmek için kullanılan bir katsayı olduğu unutulmamalıdır. Bu kapsamda, CGM faktörü küçük çarpma açılarındaki sapmalara etki etmektedir. Ayrıca, küresel partikül yapısı, deneylerde kullanılan partikül geometrisinden farklıdır. Bu sebeple partikül geometrisi de oluşan sapmalara etki eden bir diğer parametredir. Oluşan sonuçlardan yola çıkarak, Rocky programı ile ayırık elemanlar esaslı analiz çalışmaları uygulanarak, deneysel süreçteki erozyon değerlerine orta ve yüksek çarpma açılarındaki yakınsama olduğu ortaya çıkmıştır fakat düşük çarpma açılarındaki analiz yönteminin kullanışlı olmayacağı görüşü oluşmaktadır.

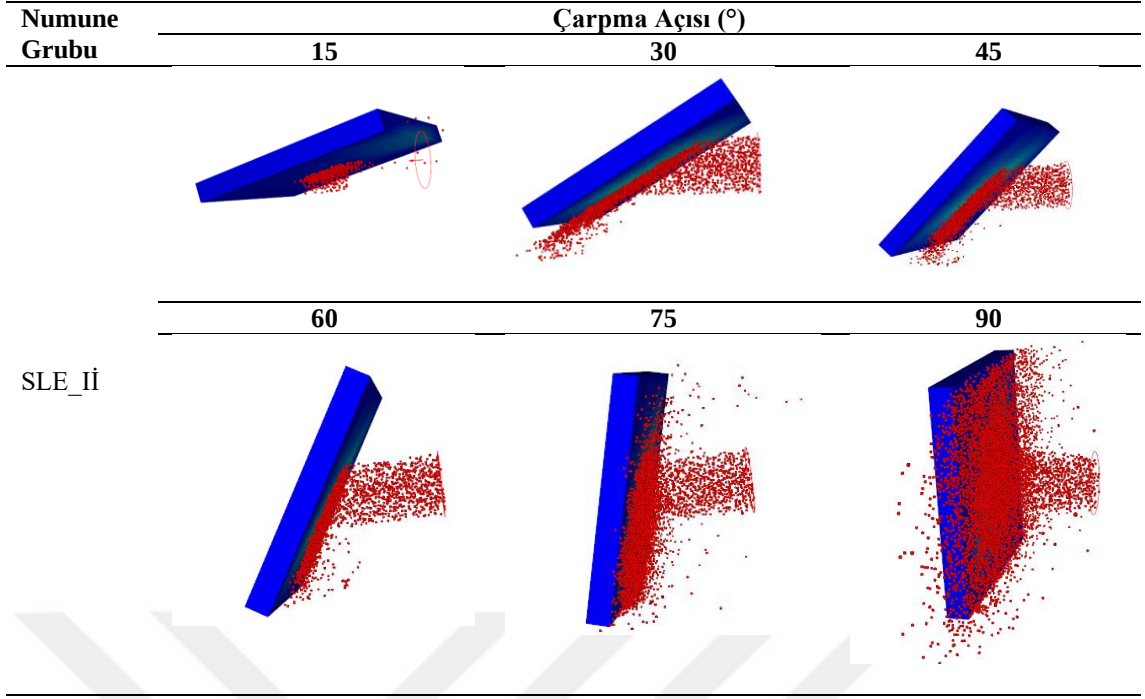
Yapılan analizler sonucunda ayırık elemanlar metoduyla simülasyon faaliyetlerinin yürütülebileceği fakat çarpma açısı seviyesine dikkat edilmesi gerektiği anlaşılmaktadır. Ayrıca analiz süreci, deneysel süreçle birebir aynı olacak şekilde modellenmesi için bilgisayar altyapısının yeterli olması gerekmektedir. Bilgisayar ekipman altyapısının kurulabilmesi için maliyet arttığı için CGM faktörü gibi katsayılar kullanılarak, simülasyon çalışmaları deneysel şartlarda yapılabilir fakat ortaya çıkan sonuçlarda sapmaların olduğu göz ardı edilmemelidir.

CGM faktörü kullanılmadan analiz çalışmaları yine uygulanabilir. Ancak, bunun için sonuç odaklı bir analiz gerçekleştirilmiştir. CGM kullanılmadığında, deneysel sonuçlardan herhangi bir çarpma açısı referans alınarak, K aşınma katsayısı ve partikül miktarı üzerinden analiz sonuçları değerlendirilebilir. Bu kapsamda 15° çarpma açısındaki erozyon oranı değeri kullanılarak yeni bir analiz yürütülmüştür.

Analizin yürütülebilmesi için:

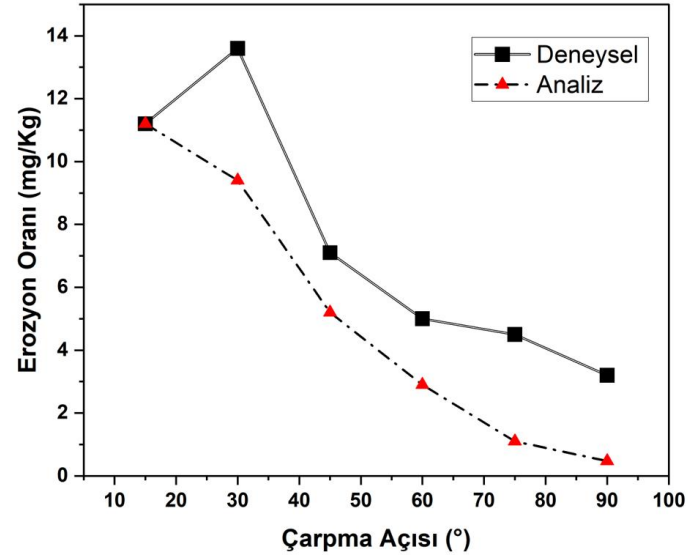
- K Aşınma Katsayısı: $1,2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3/\text{J}$
- Partikül Debisi: 96,083 g/s

olarak değerler revize edilmiştir. Güncellenen değerler konusunda bir dizi analiz çalışması yürütülmüş ve 15° çarpma açısında deneysel olarak ortaya çıkan erozyon oranı değeri ile aynı sonucu veren K aşınma katsayısı bulunmuştur. K değeri, deneylerle elde edilen K katsayısından farklıdır. K değerinin bulunabilmesi içinde partikül miktarı düşürülmüş ve daha sonrasında deneysel 15° çarpma açısındaki erozyon değerini oluşturan partikül miktarı değeri ve K değeri tespit edilmiştir. 15° çarpma açısının referans alınması sebebiyle erozyon oranında analiz sonucu, deneysel sonuç ile birebir aynı olmuştur. Ancak 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açısında ki sonuçlar 15° referansından elde edilen K ve partikül miktarı ile tanımlanmıştır. Bu sebeple de diğer açılarda sapmalar mevcuttur. Analizlerin uygulama anlarına ait görseller Şekil 5.22’de paylaşılmıştır. Analizlerde kullanılan diğer parametreler ise CGM aktifken kurgulanmış analizlerle aynı tutulmuştur. Partiküllerin malzemesi, numune malzemesi, numune geometrisi, partikül hızları, yer çekimi etkisi gibi parametrelerin hepsi deneysel süreçle aynı bırakılmıştır. Aşınma miktarına etki eden numune yüzey sertliğinin tanımlanabilmesi için Rocky programı dahilinde bir ara yüz bulunmamaktadır. Rocky içinde bu parametreler harici diğer tüm deney parametrelerinin tanımlanma yeteneği mevcuttur. Numune yüzey sıcaklıklarını tanımlama yeteneği de mevcut olmakla birlikte kriyojenik şartlarda gerçekleştirilen deney süreçleri Rocky programında modellenenebilir. Ancak sıcaklık tanımı da analiz sürecini uzattığı için, bu çalışmada kriyojenik şartlarda gerçekleştirilen deneyler modellenmemiştir. Tez çalışmasının tamamlanmasıyla birlikte gerekli analiz faaliyetleri gerçekleştirilerek sorgulanacak ve akademik faaliyet olarak çalışılacaktır.



Şekil 5.22. Rocky analiz görselleri

K aşınma sabitinin ve partikül miktarının yeni değerlerine revize edilmesiyle analizler tamamlanmıştır. Analizler sonucu bulunan erozyon değerleriyle deneysel sonuçlardan elde edilen erozyon değerlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 5.23’de verilmiştir.



Şekil 5.23. SLE_II numune grubunun analizlerle elde edilen erozyon oranı karşılaştırılması

K katsayısının sabit bir değer olarak ($1,2 \cdot 10^{-8}$) yürütülen ayırık elemanlar analizleri neticesinde analize bağlı erozyon oranları hesaplanmıştır. 15° çarpma açısındaki deneysel değerin referans alınmasıyla belirlenen K katsayısına göre uygulanan analizler sonucunda, Rocky programı erozyon oranını birebir aynı olarak tespit etmiştir. Ancak belirlenen K katsayısı 15° için referans alındığı için diğer çarpma açılarında sonuçlar birebir aynı oluşmamıştır. Özellikle 30° çarpma açısında ki durum değerlendirildiğinde yaklaşık %30 sapma meydana gelmiştir. 30° çarpma açısının bir diğer önemi davranış karakterini belirlemek için kullanıldığı için analiz sonucuna göre davranış tipi farklı tespit edilmiştir. Genel anlamda diğer çarpma açılarında da %20-%30 arasında sapmalar oluşmuştur. Bu kapsamda Rocky programı ile uygun K katsayısı ayarlanarak birebir sonuçların oluştuğu görülmüştür.

Rocky programı ve ayırık elemanlar metodunun erozyon oranını tespit edebilmesinde gerekli K katsayısının bulunması sonuçların doğruluğunu artırmıştır. Deneysel süreç, analizlere yansıtıldığında direkt yansıtıldığında, çözüm sürelerini oldukça uzatmaktadır. Bu kapsamda Rocky içinde CGM gibi faktörler bulunmaktadır fakat sonuçların yakınsaması konusunda daha fazla deneylerle karşılaştırılması yapılarak doğrulması gerekmektedir. Bu kapsamda Rocky ile analiz süreçleri ile ilgili daha fazla deneysel ve simülasyon çalışması yapılarak, ayırık elemanlar metodunun erozyon aşınması problemlerinde kullanılabilirliği ilerleyen çalışmalarda sorgulanacaktır. Özellikle K katsayısının ayarlanması, sonuçlara doğru bir yakınsama belirtisi göstermiştir.

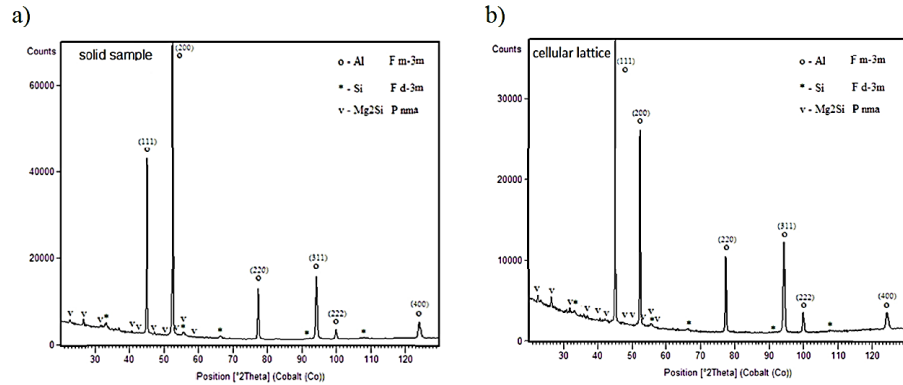
5.6. Yüzey Hasar Mekanizmalarının Belirlenmesi

Katı partikül erozyon aşınması deneyleri sonucunda eklemeli imalat ve döküm AlSi10Mg yapıların çeşitli sıcaklık ve üretim süreçleri etkisi altındaki erozyon davranışları hakkında genel bir davranış karakteristiği, aşınma miktarları gibi davranışa yönelik özellikleri konusunda genel görüş oluşmuştur. Ortaya çıkan sonuçlar analiz çalışmalarıyla sorgulanarak, ayırık elemanlar temelli simülasyonların erozyon oranını belirlemede ki başarısı tartışılmıştır. Bu kapsamda yapıların erozyon aşınması davranışları hakkında birçok bilgi edinilmiştir. Ancak erozyona bağlı yüzeylerde oluşan hasar mekanizmasını tanımlamak, konuyu bütünleştirmektedir. Bu doğrultuda numunelere öncelikle X ışını kırınımı (XRD) analizleri uygulanmış ve yapıların hem kimyasal kompozisyonu belirlenmiş hem de yüzeyin durumu malzeme fazları ile

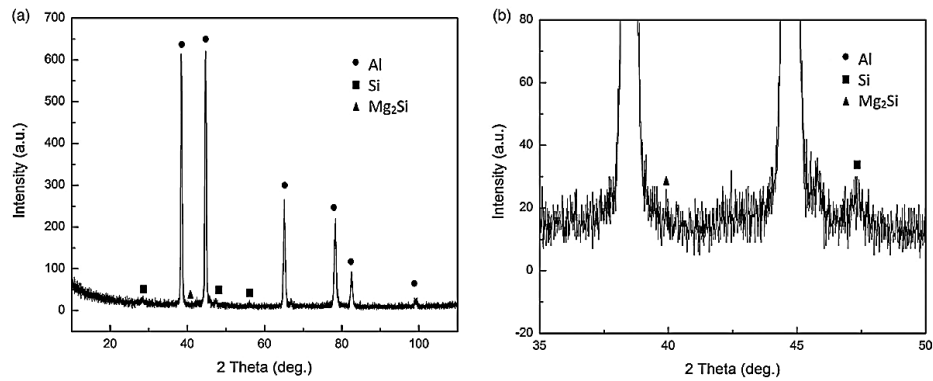
açıklanmaya çalışılmıştır. Ayrıca yüzeyden SEM mikroskopu ile detaylı mikroskop görüntüleri elde edilerek hasar mekanizmaları detaylı olarak gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde numunelerin erozyon davranışı hakkında oluşturulan hipotez ve yorumların hem doğrulaması yapılmış hem de malzemenin erozyon hasar mekanizması tespit edilmiştir.

5.6.1. Numunelere uygulanan XRD analizi sonuçları

Numunelere uygulanan X ışını kırınımı (XRD) analizleri yardımıyla, yapıların aşınma öncesi ve sonrasındaki faz durumu sorgulanmıştır. Ayrıca yapıların kimyasal durumu da araştırılmıştır. İki ayrı çalışmadan AlSi10Mg numunelere uygulanan XRD analizi öncelikle araştırılarak, yapıdaki elementlerin hangi açıda pik yapacağı gözlenmiştir. Şekil 5.24 ve Şekil 5.25’de seçici lazer ergitme ile üretilmiş AlSi10Mg yapılar üzerine uygulanmış XRD sonuçları verilmiştir.



Şekil 5.24. SLE ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımı XRD sonucu (Karolus ve diğ., 2019)



Şekil 5.25. SLE ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımının XRD sonuç örneği (Lam ve diğ., 2015)

Seçici lazer ergitme ile üretilmiş AlSi10Mg yapıların örnek XRD sonuçları incelendiğinde;

- En yüksek pikler Alüminyum elementini temsil etmektedir ve iki çalışmada da yaklaşık 38°, 45°, 65°, 78°- 83° civarında alüminyum varlığının olduğu görülmektedir.
- Düşük şiddetli pikler ise Silisyumu temsil etmektedir ve yaklaşık 30°, 48° ve 60° civarında olduğu görülmüştür
- Mg₂Si fazlarının ise pik seviyesi oldukça düşük çıkmış olup, anlaşılması program yardımıyla yapılmıştır.

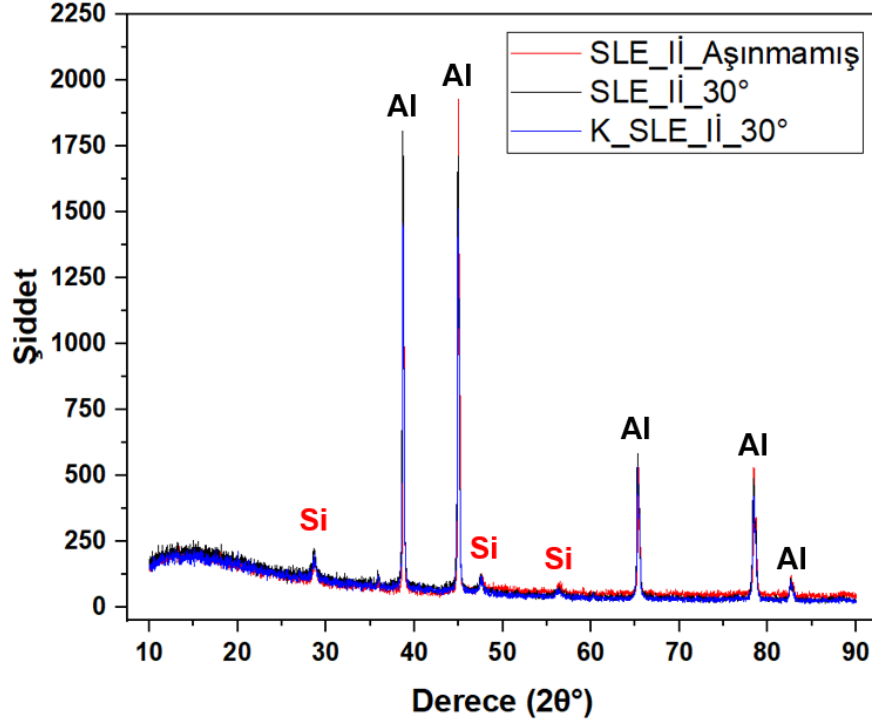
XRD analizi sonucunda, yüzeyin pürüzlülüğü ve yapıdaki kristal yapıların düzenliliğine göre pik şiddetleri artıp azalmaktadır. Bu kapsamda, XRD analizi ile kristal yapılar ve yüzeydeki pürüzlülük dağılımı hakkında fikir sahibi olunmaktadır.

Erozyon aşınmasına uğratılmış numunelerden öncelikle seçici lazer ergitme ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımlarına XRD analizi uygulanmıştır. Analiz uygulanan numune bilgileri:

- ✓ Aşınmamış, seçici lazer ergitme ile üretilmiş ve ısıtma işlem uygulanmamış AlSi10Mg alaşımları (SLE_II_Aşınmamış)
- ✓ Oda sıcaklığında, 30° çarpma açısında aşındırılmış, seçici lazer ergitme ile üretilmiş ve ısıtma işlem uygulanmamış AlSi10Mg alaşımları (SLE_II_30°)
- ✓ Kriyojenik şartlarda, 30° çarpma açısında aşındırılmış, seçici lazer ergitme ile üretilmiş ve ısıtma işlem uygulanmamış AlSi10Mg alaşımları (K_SLE_II_30°)

Aşınmamış numuneler ile oda sıcaklığında ve kriyojenik şartlarda aşındırılmış numunelerin aynı çarpma açısına bağlı olarak oluşturdukları XRD sonuç grafikleri Şekil 5.26'da verilmiştir. SLE grubu numunelerin sonuçları değerlendirildiğinde 38°, 45°, 65°, 78° ve 83° civarlarında genel piklerin olduğu görülmüştür. Ayrıca bu piklerin literatürde bulunan çalışmalarla aynı noktalarda oluşması sebebiyle oluşan pikler alüminyum elementini temsil etmektedir. Benzer şekilde silisyum pikleri de literatürle benzer noktalarda bulunmuştur. Bu kapsamda yapıların AlSi10Mg yapısını temsil ettiği doğrulanmıştır. Ayrıca söz konusu elementler, XRD analizinin uygulandığı cihaz ile uyumlu olan MATCH 3 programında da kontrol edilmiştir. Kriyojenik ve oda sıcaklığında aşınmış numuneler ile aşınmamış numunelerin pik şiddetleri değerlendirildiğinde ise, pik seviyeleri yakın olmuştur. Çizelge 5.2'de ki yüzey pürüzlülük değerleri değerlendirildiğinde, SLE grubunun yüzey pürüzlülüğü oldukça yüksektir. Bu sebeple aşınmamış numunelerde ki XRD şiddet yoğunluğu ile aşınmış

numunelerde oluşan şiddet yoğunluğu yakın olmuştur. Yüzeylere partikül saplanıp saplanmadığı ile ilgili olarak da bir sorgu yapılmıştır fakat ortaya çıkan element pikleri literatürle aynı benzer noktalarda olduğu için direkt partikül gömülme durumu gözlenmemektedir. Ancak partikül saplanmasıyla ilgili durum detaylı olarak SEM görüntüleri ile belirlenebilir. Bu kapsamda, SEM görüntülerinde partikül varlığı sorgulanmıştır.



Şekil 5.26. SLE_II grubu numunelerin XRD sonuçları

SLE numunelerin XRD sonuçları bütünleyici biçimde birleştirildiğinde, yüzeyin aşınma öncesi ve sonrası pürüzlülük değeri yüksek olduğu için aşınmamış ve aşınmış numunelerdeki şiddet değerleri birbirine yakın olmuştur. Ayrıca, sıcaklığın şiddet seviyesinde gözle görülür bir fark oluşturmadığı görülmüştür. Ancak döküm numunelerde durum farklı oluşması düşünülmektedir.

Döküm yöntemiyle üretilmiş numunelerin aşınma öncesi ve sonrasında yüzey pürüzlülüğü ciddi oranda değişmektedir. Çizelge 5.2’de ki yüzey pürüzlülük değerlerine bakıldığında, aşınmamış döküm numunelerin pürüzlülüğü 1’den küçük olmuştur. Aşınma sonrasında ise yüzey ciddi oranda etkilendiği için pürüzlülük artmıştır. Bu kapsamda, döküm numunelerin XRD sonuçlarında ciddi farklılıkların oluşması

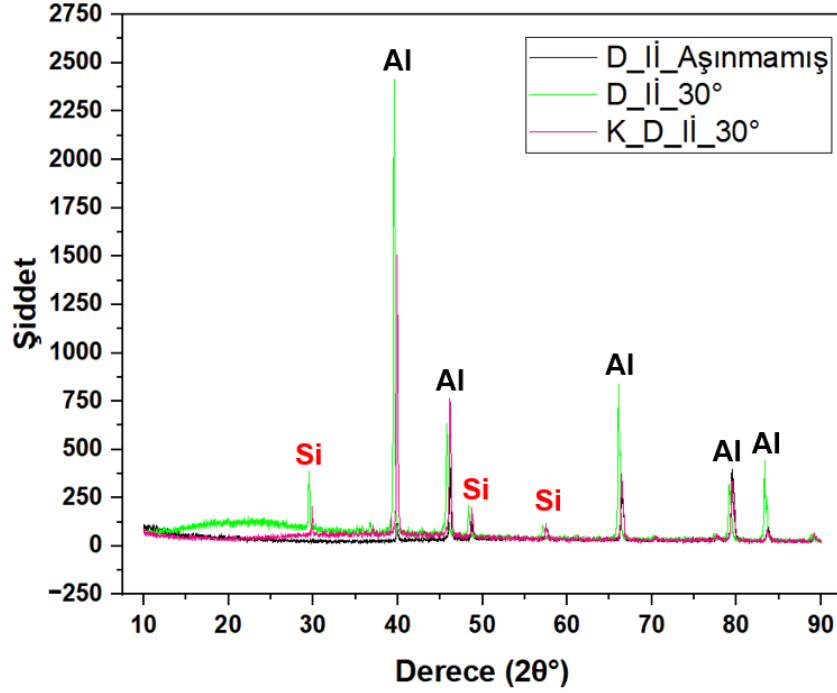
beklenmektedir. XRD analizi uygulanmış döküm yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg numunelerin detayları ifade edilecek olursa:

- ✓ Aşınmamış, döküm olarak üretilmiş ve ısıt işlemler uygulanmamış AlSi10Mg alaşımları (SLE_II_Aşınmamış)
- ✓ Oda sıcaklığında, 30° çarpma açısında aşındırılmış, seçici lazer ergitme ile üretilmiş ve ısıt işlemler uygulanmamış AlSi10Mg alaşımları (D_II_30°)
- ✓ Kriyojenik şartlarda, 30° çarpma açısında aşındırılmış, seçici lazer ergitme ile üretilmiş ve ısıt işlemler uygulanmamış AlSi10Mg alaşımları (K_SLE_II_30°)

Toplamda 3 adet döküm numunesine XRD analizi uygulanmıştır. Döküm numunelerle, SLE numune tipi numuneler aynı tutularak, döküm ile SLE grubunun XRD cevapları da karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.27’de aşınmış ve aşınmamış 3 tip numunenin XRD sonuçları grafik olarak verilmiştir. Dökümlerin XRD sonuçları değerlendirildiğinde, 38°, 45°, 65°, 78° ve 83° civarında yine genel alüminyum pikleri gözlenmiştir. Düşük şiddetli piklerin ise silisyum elementini temsil etmektedir. Ayrıca yine MATCH 3 yazılımı ile element kontrolü yapıldığında, silisyum ve alüminyum varlığı doğrulanmıştır. Bu kapsamda, aşınmamış döküm numunesi ile aşınmış numunelerdeki şiddet seviyesi karşılaştırıldığında, aşınmamış numunenin maksimum şiddeti 450 civarında oluşurken, aşınmış numunelerdeki şiddet seviyeleri 2500’e kadar ulaşmaktadır. Aşınma sonrasında yapının pürüzlülük seviyesinin ciddi oranda arttığı anlaşılabılır. Yüzeyde ki pürüzlülüğün artması, yüzeye gönderilen X ışınlarının yansımalarını değiştirmektedir. Aşınmamış numunenin, yüzeyi temiz olduğu için pik seviyesi düşük oluşurken, aşınmış numunelerde şiddet ciddi oranda artmaktadır. Aşınma sonucu yüzey ciddi miktarda kırılma türü hasar mekanizmalarına uğrayarak, pürüzlülüğü ciddi oranda artmaktadır. Kırılma türü hasar mekanizması ise SEM görüntüleriyle doğrulanmıştır. Yapıların kristal yapısının değişmesi de şiddeti artırmaktadır. Ancak kristal yapının kesin olarak değiştiği ile ilgili kesin bir sonuç çıkarılamamaktadır. Aşınmış numunelerde ki şiddet seviyesi farklılığı değerlendirildiğinde, SLE grubundan farklı olarak, ayrışmalar deha belirgin oluşmuştur. Oda sıcaklığında aşınmış numunede ki pik şiddeti, kriyojenik ortamda aşınmış numuneden daha düşük oluşmuştur. Bu sebeple, oda sıcaklığında aşınmış numunenin yüzeyinde hasarın yoğun olduğu, belirgin biçimde grafikten anlaşılmaktadır. Kristal yapıların değişip değişmediği hakkında net yorum yapılamamaktadır. Ancak kristal yapının, aşınma sonrası veya sıcaklık etkisiyle değişmesi ile şiddetler artıp azalabilir. Kristal yapı konusundaki durum kanıtlanamamakla birlikte, pürüzlülük etkisi gözle tespit

edilebildiği için daha kuvvetli bir temele sahiptir. Yüzeylerdeki hasar mekanizması durumu hakkında ise, oda sıcaklığında aşınmış numune şiddetlerinin yüksekliği, baskın bir hasar mekanizmasının geliştiğini göstermektedir. Bu kapsam da yüzey hem parçalanmaya uğramış hem de sünek davranış etkisiyle gömülmeler meydana getirmiştir fakat en detaylı durum SEM görüntülemeleri ile elde edilmiştir.



Şekil 5.27. D_İİ grubu numunelerin XRD sonuçları

Döküm ve SLE grubu numunelerin karşılaştırılması yapıldığında, döküm grubunda aşınma sonrasında pikler bariz biçimde büyürken, SLE grubunda aşınmış ve aşınmamış numuneler arasında belirgin bir fark oluşmamıştır. Bu kapsamda aşınma öncesi ve sonrasında, SLE grubunda daha stabil bir yüzey yapısının oluştuğu anlaşılmaktadır. Şiddetler açısından ise aşınmamış döküm grubu 450 seviyesinden, aşınma sonrasında 2500 şiddetlere kadar çıkmaktadır. Bu doğrultuda, döküm numunelerin aşınma öncesi ve sonrasında yüzey yapısının ciddi oranda değiştiği, pürüzlülük seviyesinin ciddi oranlarda arttığı anlaşılmaktadır. Pürüzlülük durumu döküm numunelerde gözle muayene ile de anlaşılabilir. Ancak SLE grubunda pik seviyesi aşınma öncesi 1750 seviyesinde iken aşınma sonrası maksimum 2250 seviyesine ulaşmıştır. Bu kapsamda, SLE grubu numunelerin, yüzey pürüzlülüğü aşınma öncesinde bile yüksektir ve aşınma sonrası pürüzlülük fazla artmamıştır. Aşınma öncesi pürüzlülükler Çizelge 5.2’de verilmiştir. Bu kapsamda döküm numuneler daha fazla yüzey dönüşümü yaşamıştır. Ortaya çıkan pik şiddetleri kristal yapı etkisiyle de oluşabilir

fakat direkt bir kanıt oluşmamıştır. Bu kapsamda SLE numuneler aşınma öncesi ve sonrasında; dökümlerden ayrılarak, daha kararlı bir yapı sergilemiştir. Sızdırmazlığın ön planda olmadığı ve aşınmaların ortaya çıkabileceği bir uygulamada SLE grubu daha kararlı bir davranış sergilemesi sebebiyle, döküme kıyasla ön plana çıkmaktadır.

SLE ve döküm numune yüzeylerinin, XRD sonuçları ile aşınmadan ve sıcaklık etkisinden nasıl etkilendiği anlaşılmaktadır. Yüzeylerde oluşan hasar mekanizması hakkında bile çeşitli görüşler oluşmuştur. Ancak yüzey hasarının gözlemlenebilmesi için, SEM görüntülerine ihtiyaç vardır. Bu kapsamda numunelerden elektron mikroskobu ile detaylı SEM görüntüleri alınmıştır.

5.6.2. SEM görüntüleri

Katı partikül erozyon aşınması deneyleri sürecinde, numunelerin uğradığı erozyon hasarı hakkında bilgi almak ve yüzeylerin aşınma sonrasında ki durumunu değerlendirmek adına, numunelerden detaylı SEM mikroskop görüntüleri elde edilmiştir. Ayrıca, XRD analizleri ile de yüzeyde ki hasarlar hakkında çeşitli görüşler de oluşmuştur. Ancak SEM görüntüleri ile yüzeyin durumu net olarak gözlenerek, yüzeye partikül saplanıp saplanmadığı, yüzeyde gömülmelerin meydana gelmesi gibi yüzeyi ve yüzeydeki hasarı anlamlandıracak bilgiler elde edilmiştir.

Numunelerden elde edilen SEM görüntüleri 120 kat (120x) ve 500 kat (500x) büyültme ölçeğinden çekilmiştir. Bir grup numune için ayrıca 5000x büyültme ölçeği ile de görüntü alınmıştır.

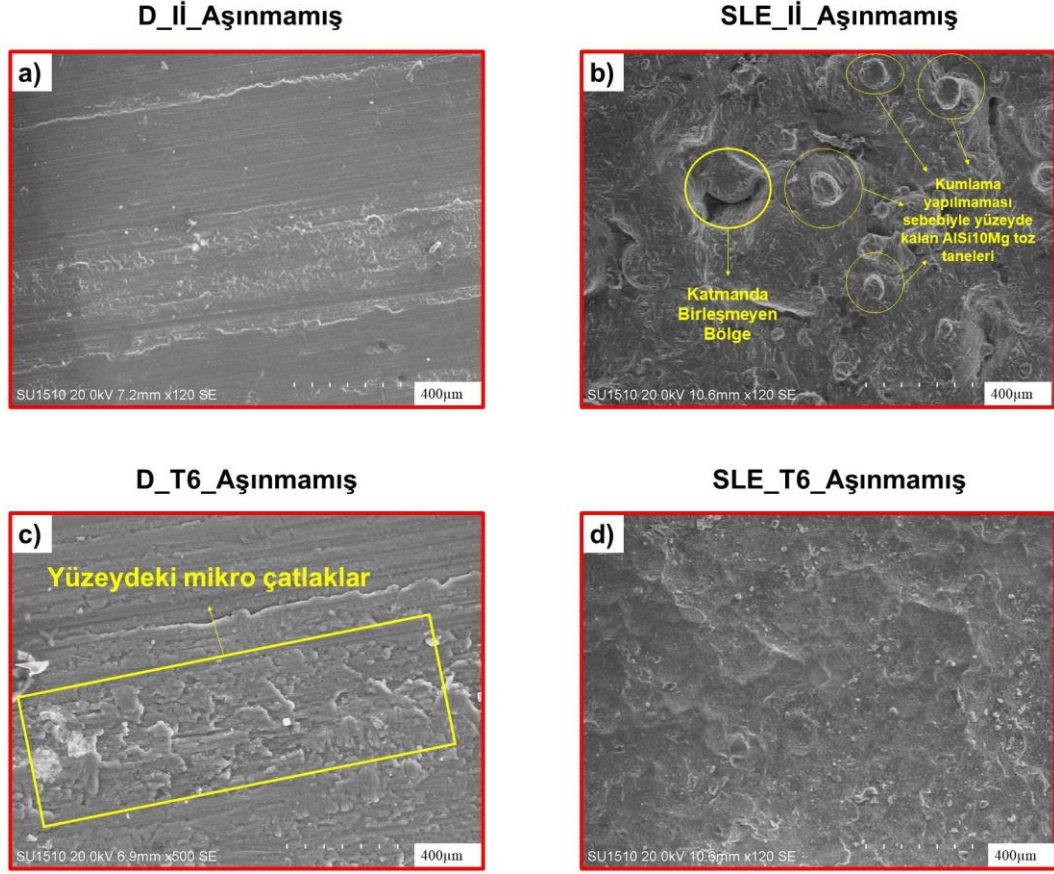
SEM görüntülerinin çekildiği numunelerin, kısa adlandırılması ve hangi çarpma açısında aşındığı hakkında ki tanıtım bilgileri Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5. SEM görüntüleri elde edilen numunelerin bilgisi

Numune Grubu	Çarpma Açısı (°)						
	Aşınmamış	15	30	45	60	75	90
D_İİ	X		X		X		X
D_T6	X		X		X		X
SLE_İİ	X		X		X		X
SLE_T6	X	X	X	X	X	X	X
K_D_İİ			X		X		X
K_D_T6			X		X		X
K_SLE_İİ			X		X		X
K_SLE_T6		X	X	X	X	X	X

Numunelerin erozyon oranları ve katı partikül erozyon aşınması davranışında 30° çarpma açısının kritik öneme sahip olması sebebiyle, tüm numunelerden 30° çarpma açısından görüntü çekilmiştir. 60° ve 90° çarpma açısında ise erozyon oranları düşmeye başlamış ve davranış hakkında kesin sonuca varılmıştır. Bu sebeple 3 açı hem davranışa bağlı yorumların oluşmasını sağlayacak hem de çarpma açısına bağlı gelişen yüzey hasarını ortaya koyacaktır. 45° ve 75° çarpma açıları genel anlamda davranış belirlemeye yönelik çarpma açıları olmayıp, 30°, 60° ve 90° çarpma açıları sonucu belirlenen davranışı desteklemeye yönelik partikül etkileşim açılarıdır. Bu doğrultuda 45° ve 75° çarpma açısında aşınmış numunelerden SEM görüntüleri alınmamıştır. 30° çarpma açısı, 15° çarpmadan yüksek veya düşük erozyon oluşturmaları ise davranışın sünek veya tam sünek oluşması yönünde gerekli bilgiyi sunmaktadır. Bu sebeple de 15° çarpma açısında aşınmış numunelerin hepsinden SEM görüntüsü elde edilmemiştir. Ayrıca ısıtma işlemi uygulanmış SLE numunelerin erozyon oranı değerlendirildiğinde, ısıtma işleminin numunelerin erozyon davranışını ciddi oranda iyileştirdiği anlaşılmıştır. Bu kapsamda ısıtma işlemi uygulanmış eklemeli imalat numunelerin tüm çarpma açılarındaki SEM görüntüleri alınmıştır. Bunlara ek olarak, aşınmamış numunelerden görüntü elde edilerek, yüzeylerin erozyona bağlı olarak nasıl değişim gösterdiği hakkında karşılaştırma imkânı oluşturulmuştur. Çarpma açısına bağlı yüzey hasar mekanizmalarının değişeceği bilinmektedir. Bu sebeple, farklı çarpma açılarındaki hasar davranışı gözlemlenmiştir.

Şekil 5.28’de aşınmamış numunelerden 120 kat büyültme ile elde edilen SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler değerlendirildiğinde, Şekil 5.28.(a)’da ısıtma işlemi uygulanmamış döküm numunelerde camsı bir yüzey olduğu tespit edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğünün düşük çıkması, oluşan görüntüyü desteklemektedir. Yüzeydeki pürüzsüz durumun ve camsı görüntünün oluşmasında sadece döküm yöntemi etkili değildir. Numune bir blok halinde dökümden çıktıktan sonra, istenilen boyutlara getirilmek için kesildiğinde pürüzlülüğü ciddi oranda azalmıştır ve camsı görüntü oluşmuştur. Kesim, talaş kaldırma, tel erozyon gibi imalat süreçleri; malzemenin işlenebilirliği dahilinde yüzey kalitesine ciddi oranda etki eden imalat aşamalarıdır. Döküm numunelerde görüldüğü üzere, sadece hassas kesim ile bile numunelerin yüzey pürüzlülük seviyeleri 0,8 Ra mertebelerine gelmektedir. İşlenebilirlik durumu, eklemeli imalat içinde uygulanabilir. Seçici lazer ergitme ile üretilmiş bir numunenin yüzeyinden talaş kaldırılmasıyla yüzey pürüzlülüğü azaltılabilir.

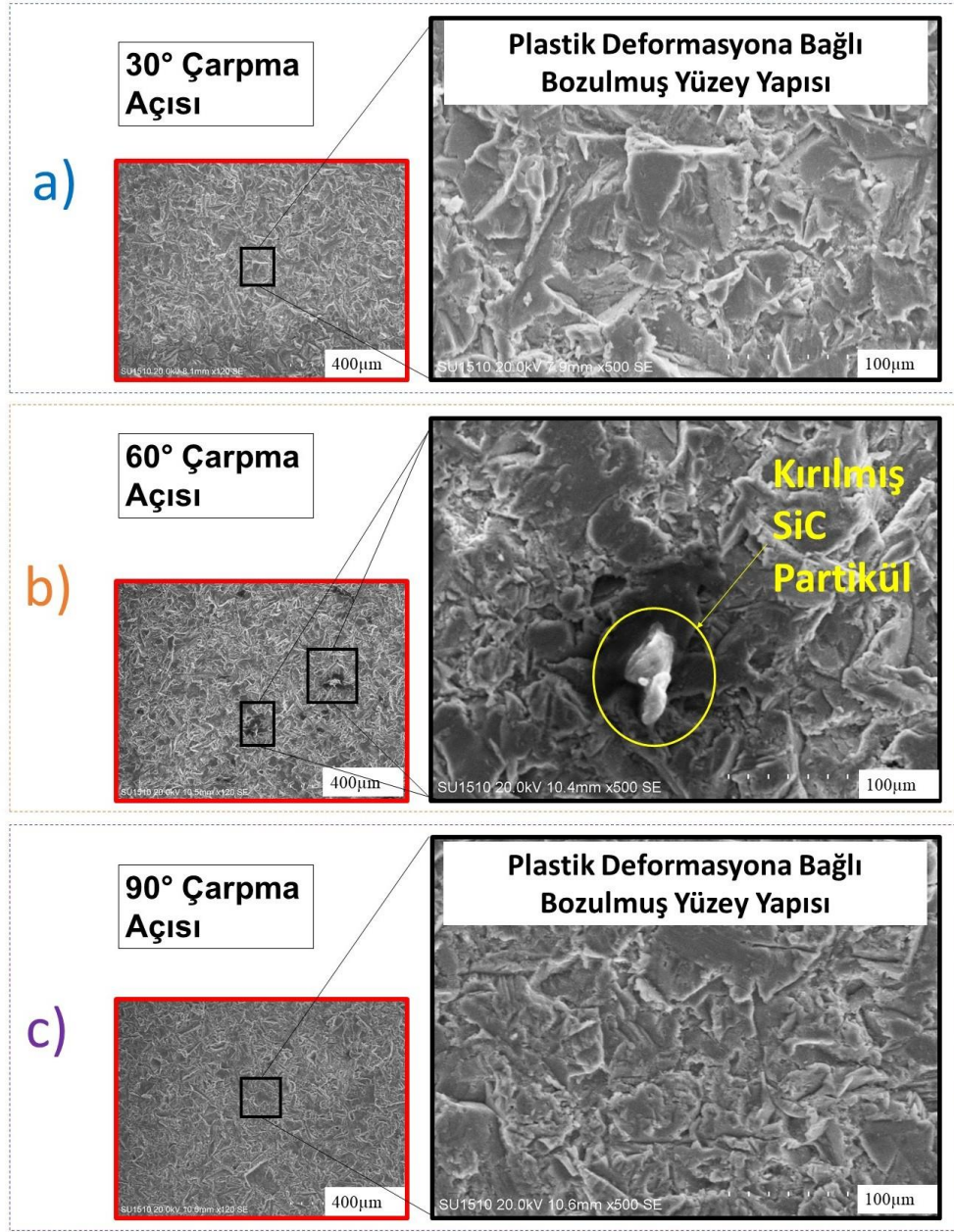


Şekil 5.28. Aşınmamış numunelerden 120 kat büyültme ile elde edilen SEM görüntüleri; a) D_II, b) SLE_II, c) D_T6, d) SLE_T6

Döküm numunelere ısıtıl işlem uygulanmasıyla, numunelerdeki pürüzlülük miktarı ciddi miktarda değişmemiş fakat yüzeyde çatlakların olduğu Şekil 5.28.(c) ile görülmüştür. T6 ısıtıl işlemi sürecinde, numunelerin 500°C civarında sıcaklığa maruz kalmaları ve sıcaklık sonrasında soğutulması gibi süreçlerin etkisiyle çarpılma veya çatlak oluşumu durumu mümkündür. Ancak oluşan çatlakların yüzeyde oluşması ve mikro düzeyde olması, yapının mekanik özelliklerini çok etkilememektedir. Döküm numunelere de ısıtıl işlem uygulanmasıyla, yüzeyde mikro çatlakların olduğu görülmüştür. Eklemeli imalat numunelerin görüntüleri incelendiğinde, Şekil 5.28.(b)'de ısıtıl işlem uygulanmamış SLE numunelerin yüzeyinde pürüzlülüğün yüksek olduğu ve yüzeyde toz taneciklerinin kaldığı görülmektedir. Ayrıca yüzeydeki katmanda tam birleşmeyen bölgelerin varlığı da tespit edilmiştir. Toz temelli metal eklemeli imalat sürecinin ardından, ekstra bir kumlama işlemi uygulanmaktadır. Ancak tez çalışmasında kumlama etkisi sorgulanmadığı için numunelere kumlama yaptırılmamıştır. Bu sebeple yüzeyde kalan AlSi10Mg toz tanecikleri görüntüde gözükmemektedir. Eklemeli imalatla

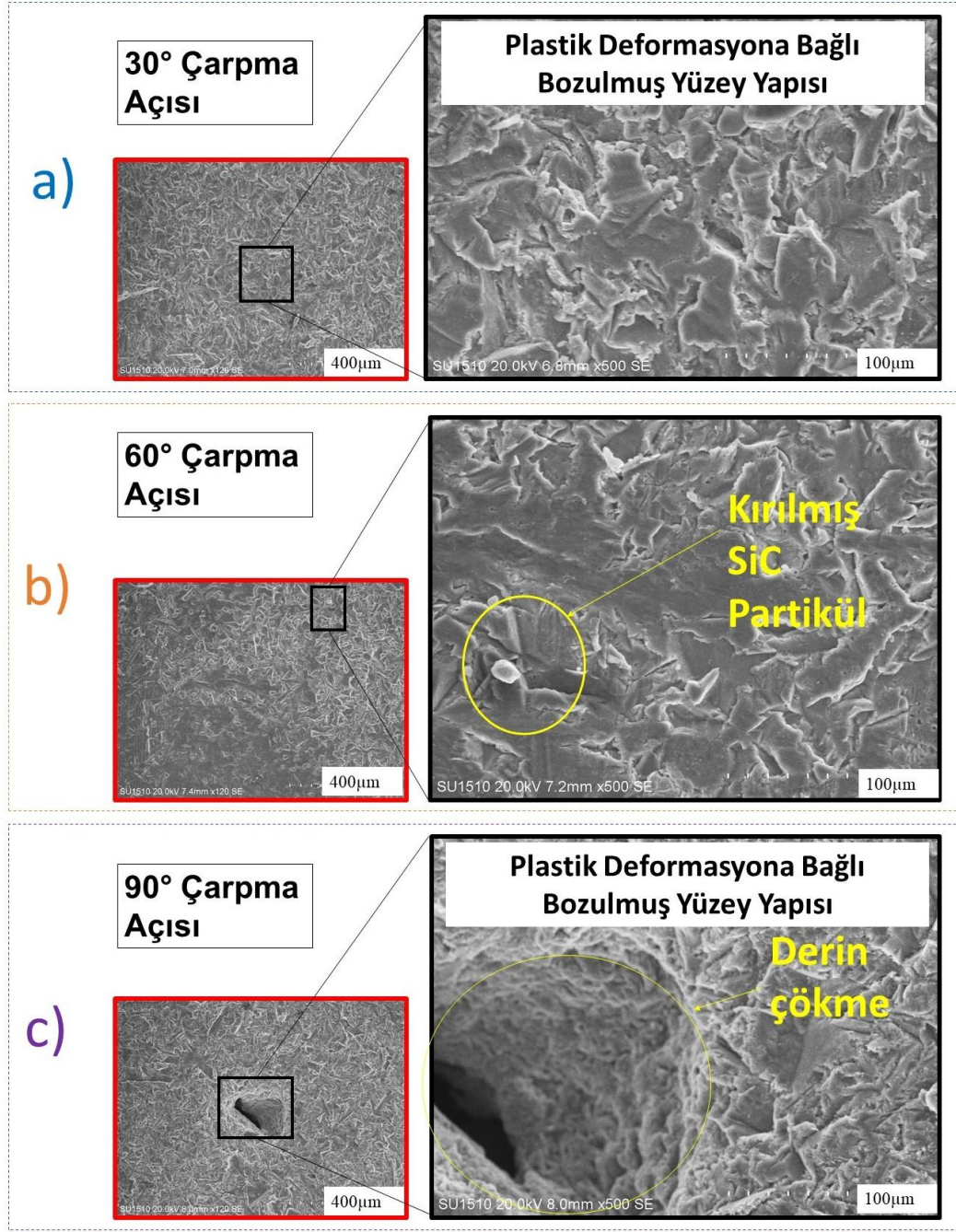
kumlama etkisi bundan sonraki çalışmalarda sorgulanacaktır. SLE numunelere ısıtılma işlemi uygulanmasıyla oluşan görüntü Şekil 5.28.(d) ile değerlendirildiğinde, yüzeyde kalan toz taneleri yüzeyden arındırılmıştır. Isıtılma işlemi sürecinde, yüzeyde kalan toz taneleri eriyerek yüzeyle birleşmesinden kaynaklı olarak, SEM görüntüsünde gözükmemektedir. Ayrıca ısıtılma işlemi etkisiyle, yüzeyde ki katman boşlukları da azaltılmıştır. Katı partikül erozyon aşınması deneylerinden sonra yüzeylerin nasıl davranış sergilediği, aşınmamış numune görüntüleri ile karşılaştırılacaktır.

Erozyon aşınmasına uğratılmış ısıtılma işlemi uygulanmamış döküm numunelerin 3 farklı çarpma açısında aşınmasıyla oluşan SEM görüntüsü 120 kat ve 500 kat büyültme ile Şekil 5.29'da verilmiştir. Isıtılma işlemi uygulanmamış döküm numunelerin, erozyon deneyleri sonucunda tam sünek davranış sergilediği sonucunda varılmıştır. 15° çarpma açısında en yüksek aşınmaya uğrarken, çarpma açısının yükselmesiyle aşınma oranlarının azaldığı görülmüştür. Partiküllerle etkileşim sonucu yüzeylerde oluşan hasar durumu Şekil 5.29.(a) ile değerlendirildiğinde, en yüksek aşınmanın olduğu 15° çarpma açısında yüzeyde plastik deformasyona bağlı yüzeyde akmaların olduğu tespit edilmiştir. Yüzey sünek karakterin etkisini göstererek, birçok noktadan plastik deformasyon etkisiyle parçalanmıştır. Parçalanma etkisiyle, yüzeyden malzeme kaybı maksimum oluşmuştur. Ayrıca yüzeyde, partikül saplanması veya gömülmenin olmadığı görülmektedir. Bu kapsamda ortaya çıkan hasar plastik deformasyona bağlı gelişen yüzey hasarı olarak adlandırılmaktadır. Çarpma açısının 60° getirilmesiyle oluşan hasar Şekil 5.29.(b) ile değerlendirildiğinde, yüzeyde plastik deformasyonların ve sürüklenmelerin devam ettiği fakat yüzeye kırılmış silisyum karbür parçacıkların saplandığı da görülmektedir. Partikül boyutlarının yaklaşık 350 µm olduğunun bilinmesiyle ve görüntünün çekildiği alanın 100 µm olduğunun bilgisi beraber değerlendirildiğinde, yüzeye partikül saplandığı ortaya çıkartılmış fakat saplanan partiküller, bir bütün halinde olmayıp kırılarak saplanmıştır. Partikül saplanmasıyla, yüzeydeki hasarın numunenin tam sünek karakterine bağlı olarak geliştiği ortaya çıkarılmıştır. Çarpma açısının 90°'ye getirilmesiyle oluşan durum değerlendirildiğinde ise, yine plastik deformasyona bağlı gelişen bir yüzey yapısı elde edilmiştir. Partikül gömülme belirtisine rastlanılmamıştır. Bu kapsamda ısıtılma işlemi uygulanmamış döküm numunelerin yüzeyleri; numunenin sahip olduğu tam sünek karakterin etkisini yansıtarak, genellikle plastik deformasyona bağlı gelişen yüzey hasarını oluşturmuştur. Aşınmamış, ısıtılma işlemi uygulanmayan döküm numunelerin SEM görüntüsü ile karşılaştırma yapıldığında ise yüzeydeki camsı durumun kaybolduğu ve dolayısıyla pürüzlülüğün arttığı anlaşılmaktadır.



Şekil 5.29. D_II grubu aşınmış numunelerin SEM görüntüsü; a) 30° çarpma açısı, b) 60° çarpma açısı, c) 90° çarpma açısı

Isıl işlem uygulanmış döküm numunelerin 3 farklı çarpma açısında erozyona uğratılmasıyla, yüzeylerin durumunu sorgulamak için elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.30'da verilmektedir. Çekilen görüntüler 120 kat ve 500 kat büyültme ölçeğinde çekilmiştir.

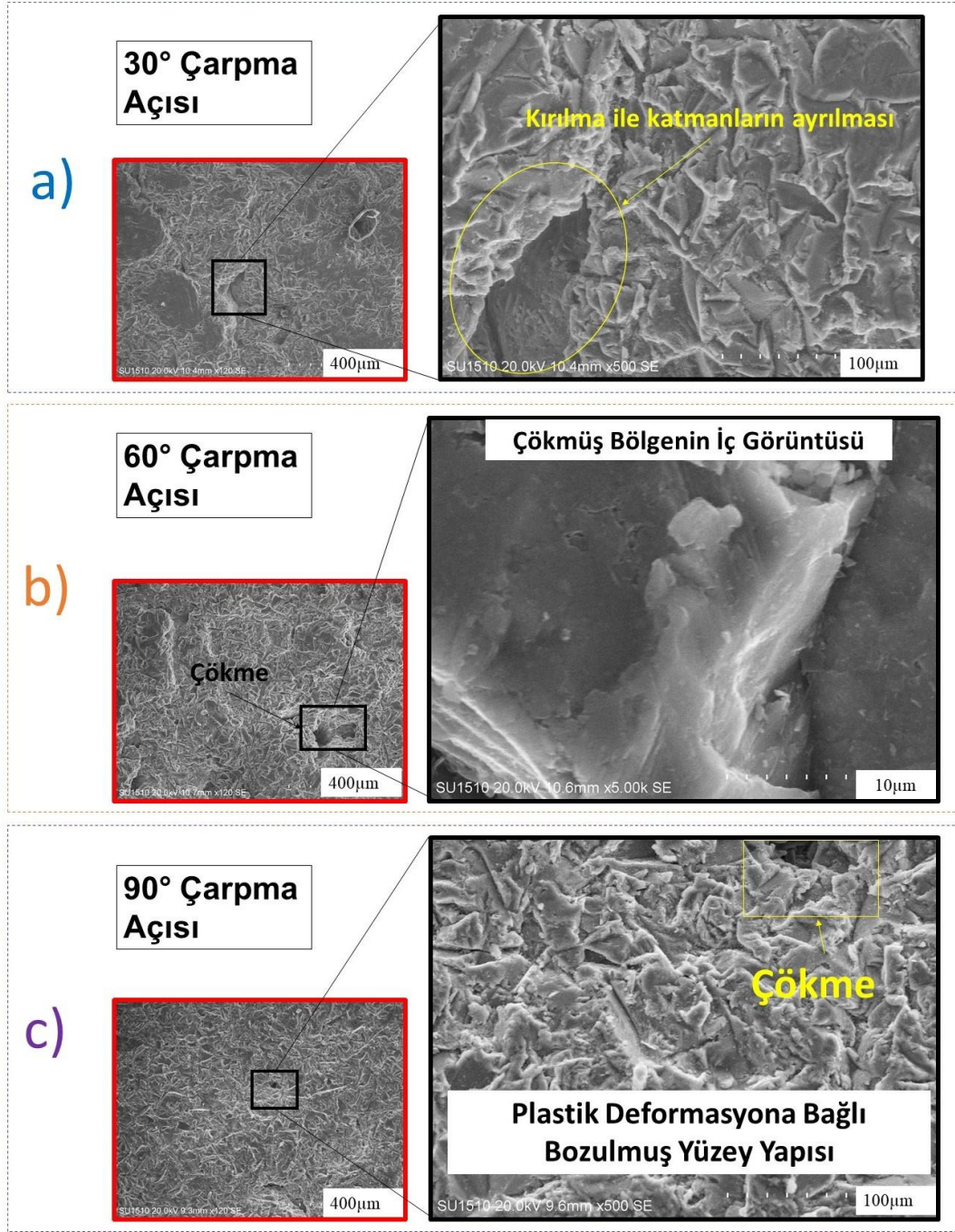


Şekil 5.30. D_T6 grubu aşınmış numunelerin SEM görüntüsü; a) 30° çarpma açısı, b) 60° çarpma açısı, c) 90° çarpma açısı

Isıl işlemlili döküm numunelerin, erozyon deneyleri sonrasında sünek davranış gösterdiği sonucunda varılmıştır. 30° de en yüksek erozyon oranı ortaya çıkarken, çarpma açısının yükselişi ile beraber erozyon oranları düşmeye başlamıştır. Bu kapsamda sergilenen davranış açısından ve aşınma değerlerinin çarpma açısına bağlı olarak değişimi ısıt işlemsiz döküm numunelere benzemektedir. 30° çarpma açısında yüzeyde bir partikül varlığına rastlanılmamakla birlikte yüzeyin yine plastik deformasyon etkisine maruz

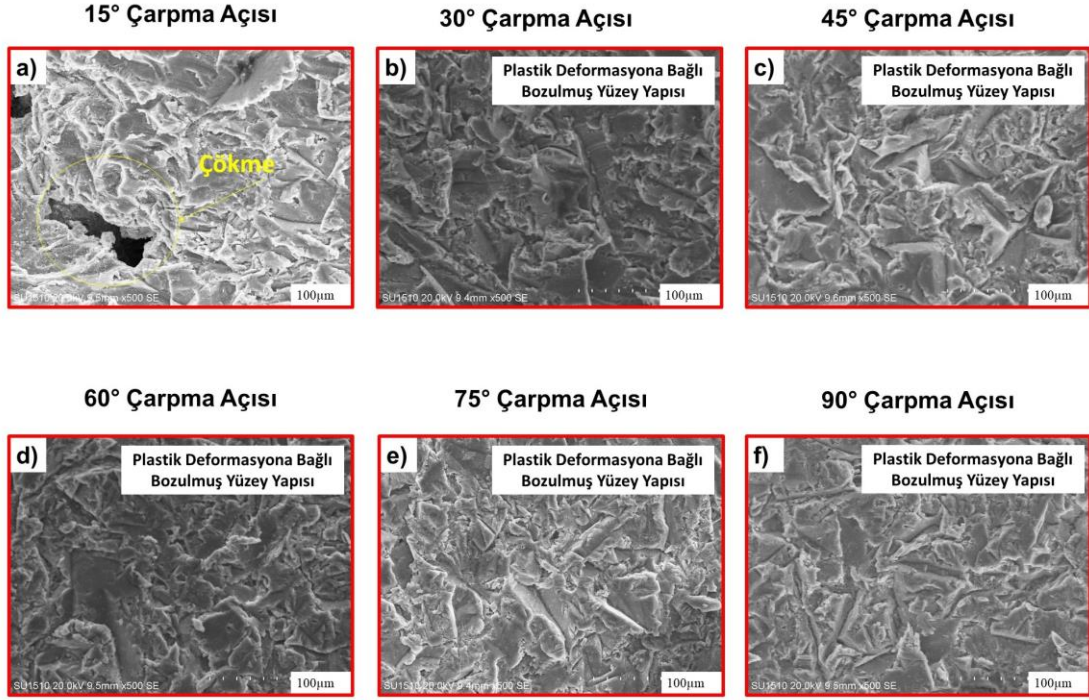
kaldığı anlaşılmaktadır. Aşınmamış numunelerde Şekil 5.28’de görüleceği üzere, mikro çatlaklar oluşmaya başlamışken, partiküllerle etkileşim sonucu mikro çatlaklar ilerleyerek ve deformasyon etkisi neticesindeki akma ile birleşerek yüzey parçalanmış bir görüntüye uğramıştır. Şekil 5.30.(b)’de 60° çarpma açısında gerçekleştirilen deney sonucunda ise yüzeyde sürüklenme izleri gözlenmiştir. Ancak bu sefer kırılmış silisyum karbür parçacıklarına da rastlanılmıştır. Partiküllerin saplanması doğrulanmış fakat bir gömülme durumu 60° çarpma açısında oluşmamıştır. Şekil 5.30.(c)’de ki 90° çarpma açısında ki aşınmış ve ısıtılmış işlem uygulanmış döküm numunenin yüzeyi sorgulandığında ise, tam dikey doğrultuda partikül çarpmasının sonucunda derin bir gömülme olduğu görülmüştür. Ancak gömülme sonucunda partiküller, yüzeyde asılı kalmayıp düşmüştür. Görüntü değerlendirildiğinde bir partikül varlığı yakalanmamıştır.

Seçici lazer ergitme esaslı katmanlı olarak üretilmiş ve ısıtılmış işlem uygulanmamış numunelerin 30°, 60° ve 90° çarpma açısında gerçekleştirilen katı partikül erozyon aşınması deneyleri sonucunda yüzeylerin durumu Şekil 5.31’de 120 kat ve 500 kat büyültme ölçeğinde verilmiştir. Şekil 5.31.(a)’da 30° çarpma ile oluşan yüzey durumu değerlendirildiğinde, yüzeyde ki katmanın, deprem sonucu levha hareketine benzer şekilde, ayrıldığı görülmüştür. Görüntü yakından incelendiğinde ayrım yeri gözlenebilmektedir. Ayrıca yüzeyde yine plastik deformasyon izleri oluşmuştur. Isıtılmış işlem uygulanmamış SLE numuneler en fazla aşınmaya 30° çarpma açısında uğramıştır ve ortaya çıkan durumla kıyaslandığında, yüzeyde makro ölçekli katman ayrılması ve sünek karakter etkisini gösteren bir hasar oluşmuştur. Şekil 5.31.(b)’de ki 60° çarpma açısıyla oluşan durum incelendiğinde ise, yüzeyde gömülmelerin olduğu yakalanmıştır. Çökmüş bölgenin içine doğru SEM büyültme ölçeği 5000x’e getirilerek alınan görüntüde ise üst katmanların gömülmeden etkilediği fakat gömülme sonucu boşalan bölgenin altında kalan katmanın çok etkilenmediği görülmektedir. 90° çarpma açısında ki durumda ise yine keskin kenarlar içermeyen, radyuslu yüzey hasarına ve gömülmelere rastlanılmıştır. Bu kapsamda, eklemeli imalat ile üretilmiş numuneler plastik deformasyon baskın bir hasara uğramaktadır. SLE numunelerin erozyon deneyleriyle sünek karakter sergilemesi de söz konusu hasarı desteklemektedir. Ayrıca katmanlı bir yapıda sadece plastik deformasyon olmayıp; makro ölçekli, bir fay hattına benzer şekilde de ayrılma durumu da gözlenebilir. Çarpma açısının yükselmesiyle, yüzeyde derin gömülmelerin meydana geldiği görülmüştür. Ancak yüzeylerde kırılmış partikül varlığına rastlanılmamıştır. Çöken bölge içerisinde partiküller asılı kalmamıştır.



Şekil 5.31. SLE_II grubu aşınmış numunelerin SEM görüntüsü; a) 30° çarpma açısı, b) 60° çarpma açısı, c) 90° çarpma açısı

Isıl işlem uygulanarak SLE numunelerin yüzey formunun değiştiği, Şekil 5.28’de görülmektedir. Ayrıca ısıtılmanın en iyi sonuç verdiği numune grubu da SLE_T6 grubudur. Bu kapsamda ısıtılmalı SLE numunelerin tüm çarpma açılarında, aşınma sonucu ortaya çıkan yüzey durumu, Şekil 5.32’de 500 kat büyültme ölçeğindeki SEM görüntüleri ile sunulmuştur. Tüm numuneler oda sıcaklığında aşınmış olup, kriyojenik şartlarda aşınan numunelerden de görüntü elde edilerek karşılaştırma yapılmıştır.

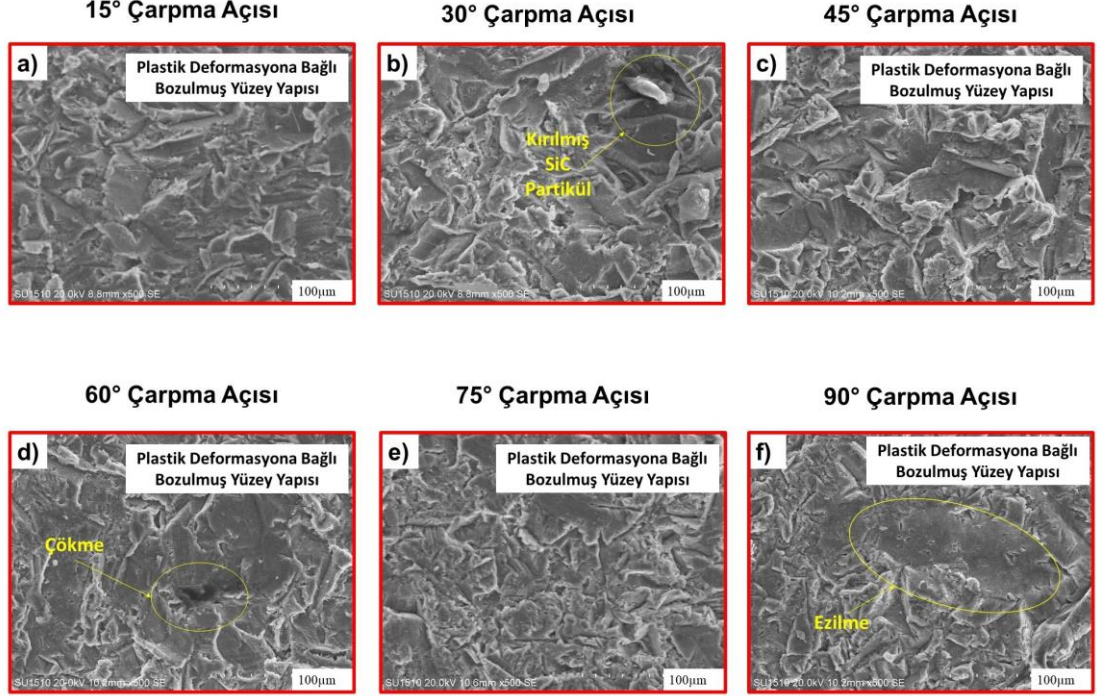


Şekil 5.32. SLE_T6 grubu aşınmış numunelerin SEM görüntüsü; a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°

Isıl işlem uygulanmış SLE numunelerin tüm çarpma açılarında gösterdiği yüzey hasarı Şekil 5.32’den sorgulandığında, yüzeyler tüm çarpma açılarında baskın biçimde sünek karakterin meydana getirdiği, plastik deformasyon kaynaklı yüzey hasarına uğramıştır. 15° çarpma açısında gömülmelerin olduğu gözlemlenirken, diğer çarpma açılarında herhangi bir gömülme meydana gelmemiştir. Ayrıca partikül varlığına da rastlanılmamıştır. Erozyon oranı açısından; ısıtılmış SLE numunelerin hem davranışını değiştirmiş hem de aşınma miktarını düşürmüştür. Bu kapsamda, diğer tip numunelere kıyasla ısıtılmış işlemin en iyi etki ettiği numune grubu SLE_T6 grubudur. T6 ısıtılmış işlemi, yüzey sertliğine etki eden bir süreçtir. Ancak Çizelge 5.1’de görüleceği üzere eklemeli imalat numunelerin sertliğine yönelik çok fazla bir etki oluşturmamıştır. Bu kapsamda, ısıtılmış işlem uygulanmamış SLE numunelerdeki yüzey hasarı ile benzer cevaplar oluşmuştur. Ancak katman ayrılması gibi bir hasar ortaya çıkmamıştır.

Şekil 5.29’den Şekil 5.32’ye kadar verilen SEM görüntüleri, oda sıcaklığında erozyon aşınmasına uğratılan numunelerden elde edilmiştir. Ancak kriyojenik şartlarda gerçekleştirilen deneyler sonucunda, erozyon oranlarının değiştiği ve dolayısıyla da yüzey hasar mekanizmalarının sorgulanması gerekmektedir. Ayrıca kriyojenik şartlarda aşınmış yüzeylerin, oda sıcaklığında aşınmış görsellerle karşılaştırılması sayesinde yüzey

hasar davranışının değişiklik oluşturup oluşturmadığı anlaşılabılır. Bu kapsamda Şekil 5.33’de kriyojenik şartlarda aşındırılmış, ısıtılmış SLE numunelerin tüm çarpma açılarındaki SEM görüntüleri 500 kat büyültme ölçeğinde verilmiştir.

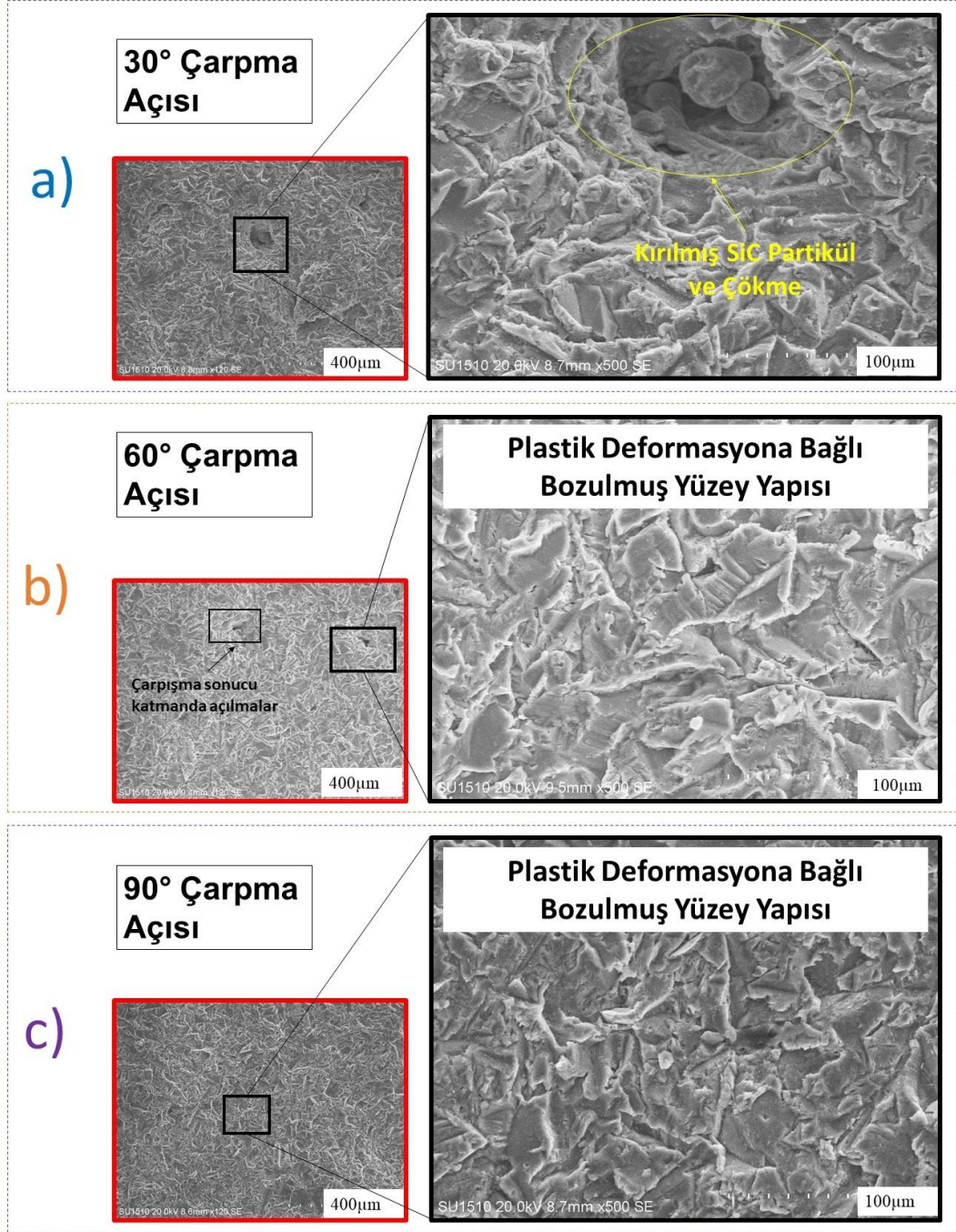


Şekil 5.33. K_SLE_T6 grubu aşınmış numunelerin SEM görüntüsü; a) 15°, b) 30°, c) 45°, d) 60°, e) 75°, f) 90°

SLE_T6 grubu numune yüzeylerinin SEM görüntüleri değerlendirildiğinde, yine plastik deformasyon baskın bir hasar mekanizması oluşmuştur. Ancak, oda sıcaklığında aşınan numunelerde kalıcı şekil değişimleri her çarpma açısında oluşurken, kriyojenik şartlarda plastik deformasyon izleri haricinde yüzeylerde gömülme, ezilme ve kırılmış partikül parçacığına rastlanılmıştır. Oda sıcaklığında aşındırılmış SLE_T6 numunelerin sadece 15° çarpma açısında gömülme oluşurken, kriyojenik şartlarda gömülme durumu 30° ve 60° çarpma açısında gerçekleşmiştir. Ayrıca 30° çarpma açısında, yüzeyde kırılmış SiC parçacığına denk gelinmiştir. 90° çarpma açısında ise yüzeyde bu sefer ilk kez ortaya çıkan ezilme durumu ortaya çıkmıştır. Katı partikül erozyon aşınması deneyleri sonucunda, oda sıcaklığında test edilmiş numunelerde tam sünek davranış baskınken, kriyojenik şartlarda erozyona uğratılmış numunelerde sünek davranış oluşmuştur. Bu kapsamda davranış değişikliği, yüzey hasarına yansımış ve Şekil 5.33 ile ifade edilmiştir.

Kriyojenik şartların numunelerin erozyon oranlarına etki ettiği, deneysel süreçten anlaşılmaktadır. Ancak yüzeydeki hasar konusunda nasıl bir etkiye sahip olduğu SEM

görüntüleri ile ortaya çıkarılmaktadır. Bu kapsamda ısıt işlemsiz SLE numunelerin, kriyojenik şartlarda aşındırılması ile beraber elde edilen SEM görüntüleri Şekil 5.34’de verilmektedir.



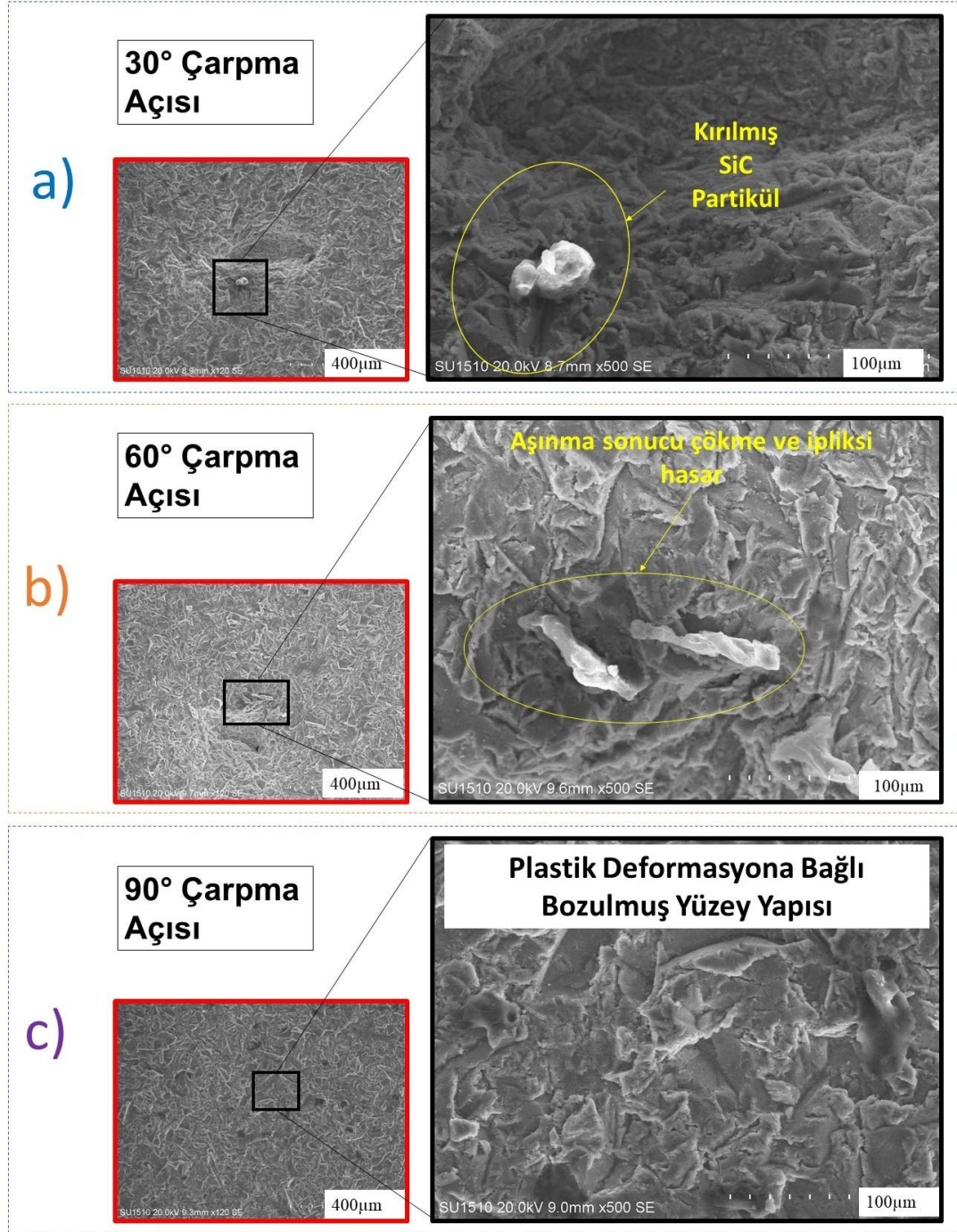
Şekil 5.34. K_SLE_II grubu aşınmış numunelerin SEM görüntüsü; a) 30° çarpma açısı, b) 60° çarpma açısı, c) 90° çarpma açısı

Şekil 5.34.(a)’da 30° çarpma açısıyla kriyojenik şartlarda aşındırılmış numunenin yüzey görüntüsünde partikül ile etkileşim sonucu hem gömülmelerin meydana geldiği

hem de kırılmış silisyum karbür parçacıklarına rastlanılmıştır. Ayrıca oda sıcaklığında aşındırılan numuneye benzer şekilde katmanın büyük ölçekli şekilde ayrıldığı bölgelere denk gelinmiştir. Oda sıcaklığında, 60° ve 90° çarpma açısında bir gömülme oluşurken, kriyojenik şartlarda gömülme oluşumu gözlenmemiştir. Ayrıca 60° çarpma sonucunda katmanlardaki plastik deformasyon izlerinin devam ettiği ve dolayısıyla katmanın bir noktadan ayrıldığı görülmüştür. Kriyojenik sıcaklık etkisi, SLE numunelerin genel anlamda aşınma miktarını artırdığı erozyon deneyleri ile doğrulanmıştır. Yüzeydeki hasar yönünden ise yine ayrışmalar ortaya koymuştur. SLE numunelerin ısıtma işlem varlığı ve sıcaklık etkisi dahilinde davranışı, aşınma miktarı ve yüzey hasar mekanizmasının değiştiği deneysel süreç ve SEM görüntüleri sayesinde doğrulanmıştır. Döküm numunelerde de yine ısıtma işlem varlığı ile davranışın değiştiği erozyon deneyleri sonucunda anlaşılmıştır. Döküm numunelerin yüzeyindeki durumda da ısıtma işlem varlığına göre, aynı çarpma açılarındaki partikül saplanması ve gömülme mekanizmasının olduğu ayrışmalar bulunmuştur. Kriyojenik sıcaklık şartları, yüzey hasar mekanizmasına etki ettiği bilindiği için kriyojenik şartlarda aşındırılmış numunelerden döküm numunelerden SEM görüntüleri alınmıştır. Ayrıca kriyojenik sıcaklıklar etkisinde yüzeydeki sürüklenme izleri etkisi şiddetlenmiştir.

Şekil 5.35’de ısıtma işlem uygulanmamış döküm numunelerin, kriyojenik şartlarda 30°, 60° ve 90° çarpma açısıyla aşındırılarak yüzeylerindeki durum SEM görüntüleri ile verilmiştir. Görüntüler 120 kat ve 500 kat büyültme ile elde edilmiştir. Görüntüler değerlendirildiğinde, silisyum karbür partikül varlığına ve gömülme etkisine 30° çarpma açısında rastlanılmıştır. 60° çarpma açısında ise gömülme ile beraber, ipliksi bir hasar mekanizmasına denk gelinmiştir. 60° çarpışma esnasında, yüzeyle etkileşime giren partiküllerin yüzeyde talaş kaldırma operasyonuna benzer şekilde, plastik deformasyon hasarını başlattığı ve yüzeyden parça sıyırma ile ipliksi hasarı oluşturduğu düşünülmektedir. Ortaya çıkan ipliksi yapı partiküle benzemediği için, partikül saplanmadığı doğrulanmaktadır. 90° çarpma açısında ise genel anlamda plastik deformasyon baskın bir hasar oluşmaktadır. Oda sıcaklığında aşındırılmış ısıtma işlemsiz döküm numunelerin yüzeyinde ipliksi hasara denk gelinmemiştir fakat partikül gömülmesi yine gerçekleşmiştir. Ayrıca partiküller oda sıcaklığında 60° gömülme gerçekleştirirken, kriyojenik şartlarda 30° çarpma açısında asılı kalmıştır. 60° çarpma açısında partiküller gömülme gerçekleştirse bile, yüzeyi sıyırması ile yüzeyde yine plastik deformasyona bağlı hasar geliştirmiştir. Oda sıcaklığı ve kriyojenik şartlarda aşınmış ısıtma işlemsiz döküm numunelerin her ikisinde de tam sünek davranış oluşması ile partikül

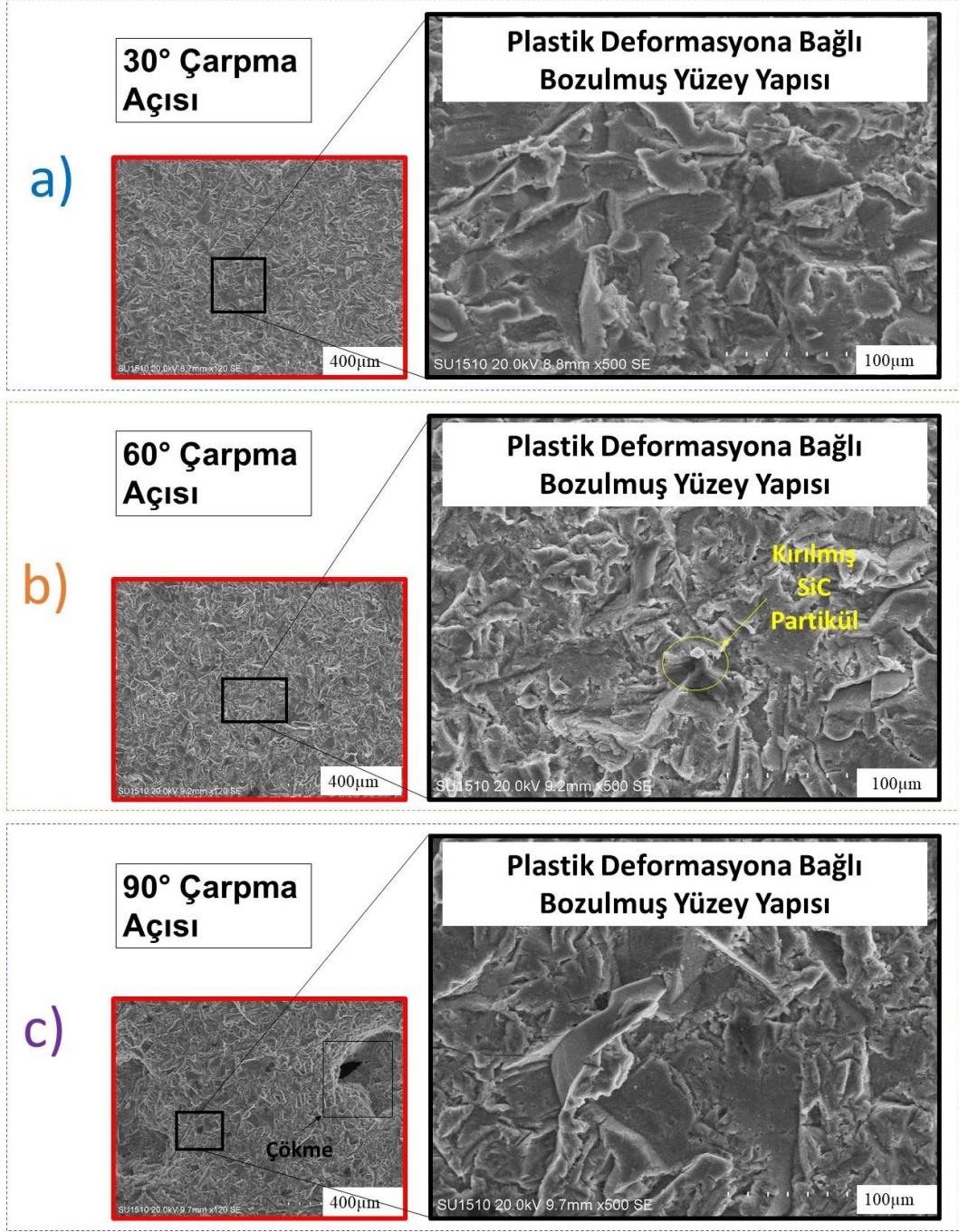
saplanmasının ve yüzeyden sıyırma ile ipliksi hasar oluşması durumu sünek bir hasar mekanizmasına eğilim oluşturmaktadır. Bunlara ek olarak, her iki tip numunenin de gerek yüzey hasar mekanizmaları ve gerekse davranış biçimi benzerlik göstermektedir.



Şekil 5.35. K_D_İİ grubu aşınmış numunelerin SEM görüntüsü; a) 30° çarpma açısı, b) 60° çarpma açısı, c) 90° çarpma açısı

Döküm numunelere ısıtma işlemi uygulanmasıyla, kriyojenik şartlarda katı partikül erozyon deneylerine alınmış numunelerin yüzeylerinde gelişen hasarı ortaya çıkartan

SEM görüntüleri Şekil 5.36’da verilmektedir. Görüntüler 120 kat ve 500 kat büyültme ile elde edilmiştir.



Şekil 5.36. K_D_T6 grubu aşınmış numunelerin SEM görüntüsü; a) 30° çarpma açısı, b) 60° çarpma açısı, c) 90° çarpma açısı

Oda sıcaklığında aşınan numuneler ısıtılmalı döküm numuneler sünek davranış sergilerken, kriyojenik şartlarda aşınmış ısıtılmalı döküm numunelerin tam sünek davranış sergilediği erozyon aşınması deneyleri ile bulunmuştur. Ortaya çıkan yüzey

hasarları incelendiğinde, Şekil 5.36.(a)'da 30° çarpma açısıyla, yüzeyde plastik deformasyon kaynaklı bir hasar oluşmuştur. Benzer durum oda sıcaklığında 30° çarpma açısında uygulanan deney neticesinde de elde edilmiştir. Çarpma açısı 60° seviyesine getirildiğinde plastik deformasyon hasarı yine baskın biçimde ortaya çıkmıştır. Ancak bu sefer kırılmış partikül (SiC) varlığına da rastlanılmıştır. Oda sıcaklığında da neredeyse aynı boyutlarda partikül izleri yakalanmıştır. Şekil 5.36.(c)'de 90° çarpma açısında ise gömülme oluşumu ortaya çıkmıştır. Oda sıcaklığında da yine 90° çarpma açısında gömülmelere denk gelinmiştir. Bu kapsamda sıcaklık etkisiyle erozyon oranları değişse de ısıtılmış döküm numunelerin yüzey hasar mekanizması aynı kalmaktadır. 3 çarpma açısında da sıcaklık fark etmeksizin benzer görüntüler oluşmuştur. Bu kapsamda yüzeydeki hasarın tipi aynı oluşmuş fakat hasar şiddeti farklıdır ve SEM görüntüleri ile hasarın şiddeti ortaya çıkartılamamaktadır.

8 tip numunenin SEM görüntüleri ve erozyon oranları birlikte değerlendirilerek, üretim yöntemi, ısıtılmış işlem varlığı ve sıcaklık etkisi sınırlarında yüzey hasar mekanizmalarının nasıl değişim gösterdiği örneklerle sunulmuştur. Bulgular değerlendirildiğinde, yüzeye saplanan partikül varlığı doğrulanmaktadır. Ancak saplanan partiküller bir bütün halde ve 350 µm boyutlarda saplanmayıp, yüzeyle etkileşim sonucu kırıldığı ve kırılan aşındırıcı partiküllere rastlandığı SEM görüntüleri ile elde edilmiştir. Görüntünün çekildiği alanın yatay doğrultuda 100 µm alanı işaret etmesi ve partiküllerin SEM görüntüsü içinde kapladığı alanın birlikte değerlendirilmesiyle partiküllerin kırılarak saplandığı durumunu teyit ettirmektedir.

Yüzeylerde gelişen hasar mekanizmaları incelendiğinde ise yüzeyler çoğunlukta plastik deformasyon hasarı ile değişen yüzey morfolojisine ve oluşan erozyon oranları sonuçlarında bulunan davranış tipinin sünek veya tam sünek olmasına göre şekillenmemektedir. Tüm partikül çarpma açıları plastik deformasyon hasarının baskın olduğu gözlenmiştir. Plastik deformasyon etkisi dahilinde; yüzeylerde gömülme, ezilme ve iplikli hasar tiplerine de denk gelinmiştir. Oluşan plastik deformasyon durumu ise numunelerin erozyon deneyleri sonucu ortaya koyduğu sünek ve tam sünek karakteri doğrulamaktadır. Aynı grup numunelerde farklı çarpma açıları da ortaya çıkmakla birlikte, farklı grup ve farklı sıcaklık etkisinde de baş göstermektedir. Bu sebeple, bir genelleme yapılamamaktadır. Ancak ısıtılmış döküm numunelerde sıcaklık etkisiyle hasar mekanizmasının değişmediği doğrulanmıştır.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu yüksek lisans tez çalışması kapsamında, toz esaslı bir eklemeli imalat yöntemi olan seçici lazer ergitme (SLE) yöntemi ve geleneksel bir üretim yöntemi olan döküm yöntemiyle üretilmiş AlSi10Mg alaşımlarının katı partikül erozyon aşınması davranışları, oda sıcaklığında ve kriyojenik sıcaklıklar etkisiyle deneysel olarak sorgulanmıştır. Ayrıca döküm ve eklemeli imalat numunelerin bir kısmına (T6) ısıtılma işlemi uygulanarak, numunelerin hem mekanik özelliklerindeki değişimler değerlendirilmiş hem de erozyon aşınma davranışlarında farklılık olup oluşmadığı tartışılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar, ayrı elemanlar metoduna bağlı Ansys Rocky DEM yazılımında gerçekleştirilen simülasyonlarla karşılaştırılmıştır.

Katı partikül erozyon aşınması deney süreci 15° , 30° , 45° , 60° , 75° ve 90° olmak üzere toplam 6 farklı çarpma açısında gerçekleştirilmiştir. Erozyon aşınmasının partikül çarpma hızlarına bağlı olarak değişebileceği bilindiği için partikül çarpma hızı teorik ve deneysel olarak ölçülerek yaklaşık 20 m/s seviyesinde olduğu ortaya çıkartılmış ve erozyon deneylerinin hepsi bu hızda gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kriyojenik ortam şartlarında deneysel sürecin uygulanması için gerekli metod hazırlanmış ve doğrulaması iki farklı sensörle yapılmıştır. Deneysel süreçte aşındırıcı partikül miktarı 1 kilogram olarak kullanılmıştır. Deneysel süreçte oluşan erozyon davranışları korelasyon analizine ait istatistiklere bağlı olarak da değerlendirilmiştir. Ayrıca yapıların erozyon hasarına bağlı yüzeylerindeki durum, XRD ve SEM analizleri ile de sorgulanmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Kriyojenik ortam şartlarında deneylerin uygulanabilmesi için sıvı azot içine daldırılıp çıkartılan $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ boyutlarındaki numuneler, sıvı azot içerisinden oda sıcaklığına alındığında yaklaşık 130 saniye içinde -100°C sıcaklığa ulaşarak kriyojenik ortam şartlarından çıktığı belirlenmiştir.
- Partikül çarpma hızlarının tespitinde Euler'in Langerian Parçacık İzleme (LPT) akış modeli ile deneysel olarak kullanılan Çift Disk Metodu ~%85 mertebelerinde yakın sonuçlar oluşturmaktadır.
- Farklı çarpma açıları (15° – 90°) uygulanan katı partikül erozyon aşınması deneyleri, erozyon oranını değiştirmektedir.

- Erozyon deneyleri sonucunda numunelerde en fazla aşınma 15° veya 30° çarpma açısında gerçekleşmiştir ve çarpma açısı yükseldikçe erozyon oranları literatürde sünek malzeme erozyon aşınma oranı yönelimine benzer şekilde düşmeye başlamıştır. En fazla aşınmanın 15° ortaya çıkmasıyla tam sünek malzemelerdeki erozyon eğilimi yakalanırken, 30° çarpma açısında en fazla aşınmanın olduğu durumlarda ise sünek malzeme eğilimi yakalanmıştır.
- Eklemeli imalat ile üretilmiş AlSi10Mg alaşımına sahip numunelerin döküm numunelere kıyasla ~%20- %35 aralığında değişkenliğe sahip ve daha az aşındığı durumların olduğu gözlenmiştir.
- Üretim yönteminin değiştirilmesi ile yapıların erozyona bağlı sergilediği davranış değişmektedir.
- Numunelere uygulanan T6 ısıtıl işlemi de erozyon oranını ve malzeme davranışını ~%10- %30 aralığında değiştirmektedir.
- T6 ısıtıl işlemi, erozyon aşınması yönünden dökümlere kıyasla eklemeli imalat numunelere daha pozitif katkı sunarak SLE numunelerin aşınma miktarını ~%15 seviyelerinde azaltmıştır.
- Kriyojenik ortam şartları, ısıtıl işlem uygulanmış döküm numunelerin haricinde tüm numune gruplarında erozyon oranını ~%20 oranı seviyelerinde artırmaktadır.
- Kriyojenik şartlar etkisiyle, numunenin erozyon deneyleri sürecinde sergilediği davranış değişmemekle birlikte kriyojenik şartlara uğramış numunelerin sertliğinde belirgin değişiklikler oluşmamaktadır.
- Eklemeli imalat ile üretilen numunelerin yüzey pürüzlülüğü, döküm AlSi10Mg numunelere kıyasla daha yüksektir.
- Korelasyona bağlı istatistiksel analizler, çoklu değişkene sahip sonuçların yorumlanmasında kullanışlıdır. Isıtıl işlem, kriyojenik ortam varlığı, üretim yöntemi gibi birçok faktörün bulunduğu erozyon davranışında, tek bir tablo ile numunelerin birbirleri ile yakın davranış sergileyip sergilemediği anlaşılabilmektedir.
- Ansys Rocky DEM yazılımı ile ayrık elemanlar temelli ve deneysel süreç ile birebir aynı şartlarda analiz çalışmaları yürütülebilir fakat analiz süreleri oldukça uzundur.
- Rocky programındaki CGM faktörü gibi parametrelerin ayarlamasıyla deneysel süreç modellenenilmekte olup CGM faktörü revizyonu sayesinde, analiz süreleri aylar mertebesinde günlere düşebilmektedir.

- CGM faktörü ile kurgulanan analizler neticesinde, orta ve yüksek çarpma açılarında, deneylerden elde edilen erozyon oranlarında %5-%10 sapma gösteren analizler gerçekleştirilebilmektedir.
- Yüzey pürüzlülüğünün X ışını şiddetini etkilediği XRD analizleri ile belirlenmiştir.
- Katı partikül erozyon aşınması deneyleri ile birlikte yüzeylerde yoğun olarak plastik deformasyona bağlı yüzey yapısının bozulduğu görülmüştür.
- Yüzeyde plastik deformasyona bağlı gelişen kırılmış partikül gömülmesi ve çökme hasarı da gelişebilmektedir. Ancak söz konusu hasar mekanizmaları; kriyojenik sıcaklıklar, üretim yöntemi ve ısıtma işlem varlığı ile örtüşürülememektedir. Yani herhangi bir çarpma açısında ve numune grubunda meydana gelebileceği şeklinde yorumlanmıştır.

6.2. Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında üretim yöntemi, ısıtma işlem varlığı ve kriyojenik ortam şartlarının; AlSi10Mg numunelerin katı partikül erozyon aşınması davranışına olan etkisi incelenmiştir.

Seçici lazer ergitme sürecindeki lazer gücü, yönelim, katman kalınlığı gibi üretim parametrelerinin değiştirilmesiyle yapıların katı partikül erozyon aşınması davranışı araştırılabilir. Ayrıca seçici lazer ergitme sürecinden sonra numunelere kumlama uygulanmasıyla da erozyon davranışında değişiklikler oluşabilir.

AlSi10Mg alaşımlarına T6 ısıtma işlemi ile beraber en fazla uygulanan ısıtma işlem gerilim giderme ısıtma işlemidir. Bu kapsam da AlSi10Mg numunelerine gerilim giderme ısıtma işlemi de uygulanarak erozyon davranışı sorgulanabilir.

Bu tez çalışmasından farklı olarak, AlSi10Mg alaşımlarına yüksek sıcaklıklar dahilinde katı partikül erozyon aşınması deneyleri uygulanabilir.

Gerekli bilgisayar ekipman desteği sağlanarak, Ansys Rocky DEM yazılımı ile deneysel süreçlerle parametre değişkenlikleri özelinde analiz süreci ile partikül şekli ve sıcaklık etkisi vb. dahil modellenerek deneysel etkilerle birebir aynı olan analiz çalışmaları yürütülebileceği yorumuna ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Aboulkhair, N. T., Maskery, I., Tuck, C., Ashcroft, I. ve Everitt, N. M. (2016). The microstructure and mechanical properties of selectively laser melted AlSi10Mg: The effect of a conventional T6-like heat treatment. *Materials Science and Engineering: A*, 667, 139-146.
- Akbal, Ö., Sanayi, U., Ayan, E. ve Kaya, M. O. (2022). Atmosferik Koşullar Altında Uçak Kanat Profilinde Buz Birikim Ve Performans Kestirimi 9. Ulusal Havacılık Ve Uzay Konferansı, İzmir.
- Alqallaf, J. ve Teixeira, J. A. (2022). Numerical study of effects of solid particle erosion on compressor and engine performance. *Results in Engineering*, 15, 100462.
- Arabnejad, H., Mansouri, A., Shirazi, S. ve McLaury, B. (2015). Development of mechanistic erosion equation for solid particles. *wear*, 332, 1044-1050.
- Bagci, M. ve Imrek, H. (2011). Solid particle erosion behaviour of glass fibre reinforced boric acid filled epoxy resin composites. *Tribology International*, 44(12), 1704-1710.
- Bağcı, M. (2010). *Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Malzemelerin Erozyon Aşınma Davranışının İnilenmesi* Konya Teknik Üniversitesi]. Konya.
- Balakin, B. V., Hoffmann, A. C., Kosinski, P. ve Rhyne, L. D. (2010). Eulerian-Eulerian CFD model for the sedimentation of spherical particles in suspension with high particle concentrations. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 4(1), 116-126.
- Barkoula, N.-M. ve Karger-Kocsis, J. (2002). Review processes and influencing parameters of the solid particle erosion of polymers and their composites. *Journal of materials science*, 37, 3807-3820.
- Bonu, V. ve Barshilia, H. C. (2022). High-temperature solid particle erosion of aerospace components: its mitigation using advanced nanostructured coating technologies. *Coatings*, 12(12), 1979.
- Brandl, E., Heckenberger, U., Holzinger, V. ve Buchbinder, D. (2012). Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. *Materials & Design*, 34, 159-169.
- Chen, B., Moon, S. K., Yao, X., Bi, G., Shen, J., Umeda, J., ve Kondoh, K. (2018). Comparison study on additive manufacturing (AM) and powder metallurgy (PM) AlSi10Mg alloys. *Jom*, 70, 644-649.
- Chmelko, V., Šulko, M., Škriniarová, J., Margetin, M., Gašparík, M., Koščo, T. ve Semeš, M. (2023). Strength and Cyclic Properties of Additive vs. Conventionally Produced Material AlSi10Mg. *Materials*, 16(7), 2598.
- Choy, F., Polyshchuk, V., Zakrajsek, J., Handschuh, R. ve Townsend, D. (1996). Analysis of the effects of surface pitting and wear on the vibration of a gear transmission system. *Tribology international*, 29(1), 77-83.
- Crowe, C., Sommerfeld, M., Tsuji, Y. ve Crowe, C. (1998). Multiphase Flows with Droplets and Particles CRC. *Boca Raton, FL*.
- Cudahy, T., Caccetta, M., Thomas, M., Hewson, R., Abrams, M., Kato, M., Kashimura, O., Ninomiya, Y., Yamaguchi, Y. ve Collings, S. (2016). Satellite-derived mineral mapping and monitoring of weathering, deposition and erosion. *Scientific Reports*, 6(1), 23702.
- Das, S., Saraswathi, Y. ve Mondal, D. (2006). Erosive–corrosive wear of aluminum alloy composites: influence of slurry composition and speed. *wear*, 261(2), 180-190.

- Demirci, M. ve Bagci, M. (2021). Alternative system design for high temperature solid particle erosion wear problem. *Tribology Letters*, 69, 1-11.
- Demirsöz, R., Korkmaz, M. E., Gupta, M. K., Collado, A. G. ve Krolczyk, G. M. (2022). Erosion characteristics on surface texture of additively manufactured AlSi10Mg alloy in SiO₂ quartz added slurry environment. *Rapid Prototyping Journal*, 28(5), 916-932.
- Di Egidio, G., Ceschini, L., Morri, A., Martini, C. ve Merlin, M. (2022). A novel T6 rapid heat treatment for AlSi10Mg alloy produced by laser-based powder bed fusion: comparison with T5 and conventional T6 heat treatments. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1-20.
- Finnie, I. (1958). The mechanism of erosion of ductile metals. *Proc. 3rd Natl. Cong. Applied Mech.*, 527-532.
- Frazier, W. E. (2014). Metal additive manufacturing: a review. *Journal of Materials Engineering and performance*, 23, 1917-1928.
- G76-95, A. (2000). ASTM G76-95. In *Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets*. West Conshohocken, PA: Annual Book of Standards.
- G211-14, A. (2014). ASTM G211-14. In *Standard Test Method for Conducting Elevated Temperature Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets*. West Conshohocken, PA: Annual Book of Standards.
- Gahr, K.-H., (1987). Microstructure and wear of materials. *Elsevier Science Publishers, P. O. Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands, 1987*.
- Garcia, I., Drees, D. ve Celis, J.-P. (2001). Corrosion-wear of passivating materials in sliding contacts based on a concept of active wear track area. *Wear*, 249(5-6), 452-460.
- Ge, T., Li, Y., Gao, D., Yang, C. ve Li, F. (2024). Hybridizing additive manufacturing and sheet forming process to manufacture complex components with multi-features: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 124, 345-364.
- Gieré, R. ve Querol, X. (2010). Solid particulate matter in the atmosphere. *Elements*, 6(4), 215-222.
- Gietzen, E., Karimi, S., Goel, N., Shirazi, S. A., Keller, M. ve Otanicar, T. (2022). Experimental investigation of low velocity and high temperature solid particle impact erosion wear. *Wear*, 506, 204441.
- Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F. ve Mehrpouya, M. (2019). Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 124-149.
- Glodež, S., Winter, H. ve Stüwe, H. (1997). A fracture mechanics model for the wear of gear flanks by pitting. *Wear*, 208(1-2), 177-183.
- Gousia, V., Tsioukis, A., Lekatou, A. ve Karantzalis, A. (2016). Al-MoSi 2 composite materials: Analysis of microstructure, sliding wear, solid particle erosion, and aqueous corrosion. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25, 3107-3120.
- Greenwood, J., Johnson, K. ve Matsubara, E. (1984). A surface roughness parameter in Hertz contact. *Wear*, 100(1-3), 47-57.
- Hadavi, V., Arani, N. ve Papini, M. (2019). Numerical and experimental investigations of particle embedment during the incubation period in the solid particle erosion of ductile materials. *Tribology International*, 129, 38-45.
- Hadavi, V. ve Papini, M. (2015). Numerical modeling of particle embedment during solid particle erosion of ductile materials. *Wear*, 342, 310-321.

- Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E. ve Emmelmann, C. (2016). Additive manufacturing of metals. *Acta Materialia*, 117, 371-392.
- Hohe, J., Neubrand, A., Fliegner, S., Beckmann, C., Schober, M., Weiss, K.-P. ve Appel, S. (2021). Performance of fiber reinforced materials under cryogenic conditions—A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 141, 106226.
- Howard, R. ve Ball, A. (1995). The solid particle and cavitation erosion of titanium aluminide intermetallic alloys. *Wear*, 186, 123-128.
- Huang, B.-C. ve Hung, F.-Y. (2021). Al₂O₃ particle erosion induced phase transformation: Structure, mechanical property, and impact toughness of an Al-10Si-Mg alloy. *Nanomaterials*, 11(8), 2131.
- Hutchings, I. (1979). *Mechanisms of the erosion of metals by solid particles*. ASTM International.
- Hübner, W., Gradt, T., Schneider, T. ve Börner, H. (1998). Tribological behaviour of materials at cryogenic temperatures. *Wear*, 216(2), 150-159.
- Iturriz, A., Gil, E., Petite, M., Garciandia, F., Mancisidor, A. ve San Sebastian, M. (2018). Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: influence of heat treatment condition on mechanical properties and microstructure. *Welding in the World*, 62, 885-892.
- Jha, A., Batham, R., Ahmed, M., Majumder, A., Modi, O., Chaturvedi, S. ve Gupta, A. (2011). Effect of impinging angle and rotating speed on erosion behavior of aluminum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21(1), 32-38.
- Jiang, Z., He, B., Zhu, X., Ren, Q. ve Zhang, Y. (2020). State-of-the-art review on properties evolution and deterioration mechanism of concrete at cryogenic temperature. *Construction and Building Materials*, 257, 119456.
- Karabay, S., Bayraklılar, M. ve Balcı, E. (2015). Influence of different heat treatments on the solid particle erosion behavior of aluminum alloy AA 7075 in industrial applications. *Acta Physica Polonica A*, 127(4), 1052-1054.
- Karolus, M., Maszybrocka, J., Stwora, A. ve Skrabalak, G. (2019). Residual stresses of AlSi10Mg fabricated by selective laser melting (SLM). *Archives of Metallurgy and Materials*, 64(3).
- Kaya, H. (2018). Solid particle erosion wear behavior of severe plastically deformed AA7075 alloys. *Materials Testing*, 60(9), 885-891.
- Kempen, K., Thijs, L., Van Humbeeck, J. ve Kruth, J.-P. (2012). Mechanical properties of AlSi10Mg produced by selective laser melting. *Physics Procedia*, 39, 439-446.
- Khare, P., Wang, S. ve Yang, V. (2015). Modeling of finite-size droplets and particles in multiphase flows. *Chinese Journal of Aeronautics*, 28(4), 974-982.
- Khodabakhshi, F., Farshidianfar, M., Bakhshivash, S., Gerlich, A. ve Khajepour, A. (2019). Dissimilar metals deposition by directed energy based on powder-fed laser additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 83-97.
- Khrushov, M. (1974). Principles of abrasive wear. *Wear*, 28(1), 69-88.
- Kleis, I. ve Kulu, P. (2007). *Solid particle erosion: occurrence, prediction and control*. Springer Science & Business Media.
- Kragelsky, I., Zolotar, A. ve Sheiwekhman, A. (1985). Theory of material wear by solid particle impact—a review. *Tribology International*, 18(1), 3-11.
- Laguna-Camacho, J., Lewis, R., Vite-Torres, M. ve Méndez-Méndez, J. (2013). A study of cavitation erosion on engineering materials. *Wear*, 301(1-2), 467-476.
- Lam, L., Zhang, D., Liu, Z. ve Chua, C. (2015). Phase analysis and microstructure characterisation of AlSi10Mg parts produced by Selective Laser Melting. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(4), 207-215.

- Lee, S.-J. ve Lee, J. H. (2023). Application of Discrete Element Method Coupled with Computational Fluid Dynamics to Predict the Erosive Wear Behavior of Arctic Vessel Hulls Subjected to Ice Impacts. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1774.
- Li, M., Du, W., Elwany, A., Pei, Z. ve Ma, C. (2020). Metal binder jetting additive manufacturing: a literature review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 142(9), 090801.
- Liang, Y., Ma, Z., Li, S., Li, S. ve Bi, J. (1995). Effect of particle size on wear behaviour of SiC particulate-reinforced aluminum alloy composites. *Journal of Materials Science Letters*, 14, 114-116.
- Liu, M., Wei, K., Zhou, R., Yue, X. ve Zeng, X. (2022). Microstructure and mechanical property of high power laser powder bed fusion AlSi10Mg alloy before and after T6 heat treatment. *Virtual and Physical Prototyping*, 17(4), 749-767.
- Ma, H.-l., Jia, Z., Lau, K.-t., Leng, J. ve Hui, D. (2016). Impact properties of glass fiber/epoxy composites at cryogenic environment. *Composites Part B: Engineering*, 92, 210-217.
- Magerramova, L., Isakov, V., Shcherbinina, L., Gukasyan, S., Petrov, M., Povalyukhin, D., Volosevich, D. ve Klimova-Korsmik, O. (2021). Design, simulation and optimization of an additive laser-based manufacturing process for gearbox housing with reduced weight made from AlSi10Mg alloy. *Metals*, 12(1), 67.
- Majumder, H., Gajghate, S. S., Sahu, A. R., Behera, A. K., Limbadri, C. ve Ukey, K. (2023). Finite element analysis of wheel rim by additive manufacturing materials. *Materials Today: Proceedings*.
- Martín-Montal, J., Pernas-Sánchez, J. ve Varas, D. (2021). Experimental characterization framework for SLA additive manufacturing materials. *Polymers*, 13(7), 1147.
- Mishina, H. ve Hase, A. (2013). Wear equation for adhesive wear established through elementary process of wear. *Wear*, 308(1-2), 186-192.
- Molinari, J. ve Ortiz, M. (2002). A study of solid-particle erosion of metallic targets. *International Journal of Impact Engineering*, 27(4), 347-358.
- Mota, C., Puppi, D., Chiellini, F. ve Chiellini, E. (2015). Additive manufacturing techniques for the production of tissue engineering constructs. *Journal of tissue engineering and regenerative medicine*, 9(3), 174-190.
- Nahmany, M., Rosenthal, I., Benishti, I., Frage, N. ve Stern, A. (2015). Electron beam welding of AlSi10Mg workpieces produced by selected laser melting additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing*, 8, 63-70.
- Neuser, M., Grydin, O., Frolov, Y. ve Schaper, M. (2022). Influence of solidification rates and heat treatment on the mechanical performance and joinability of the cast aluminium alloy AlSi10Mg. *Production Engineering*, 16(2), 193-202.
- Nguyen, V., Nguyen, Q., Zhang, Y., Lim, C. ve Khoo, B. (2016). Effect of particle size on erosion characteristics. *Wear*, 348, 126-137.
- 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. ve Yoshida, T. (2005). Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact: Part 2: Mechanical properties of materials directly associated with erosion damage. *Wear*, 259(1-6), 102-109.
- 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.
- Pan, W., Ye, Z., Zhang, Y., Liu, Y., Liang, B. ve Zhai, Z. (2022). Research on microstructure and properties of AlSi10Mg fabricated by selective laser melting. *Materials*, 15(7), 2528.
- Podgornik, B. (2022). Adhesive wear failures. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 22(1), 113-138.
- Qiu, N., Wang, L., Wu, S. ve Likhachev, D. S. (2015). Research on cavitation erosion and wear resistance performance of coatings. *Engineering Failure Analysis*, 55, 208-223.
- Rosenthal, I., Stern, A. ve Frage, N. (2014). Microstructure and mechanical properties of AlSi10Mg parts produced by the laser beam additive manufacturing (AM) technology. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 3, 448-453.
- Roth, C. C., Tancogne-Dejean, T. ve Mohr, D. (2021). Plasticity and fracture of cast and SLM AlSi10Mg: High-throughput testing and modeling. *Additive Manufacturing*, 43, 101998.
- Rubin, A. E. ve Grossman, J. N. (2010). Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(1), 114-122.
- Ruff, A. ve Ives, L. (1975). Measurement of solid particle velocity in erosive wear. *wear*, 35(1), 195-199.
- Saravana Kumar, M., Mohan, E., Robinson, S. ve Thivya Prasad, D. (2022). Comparative study on morphological, physical and mechanical characteristics of L-PBF based AlSi10Mg parts with conventional stir casted Al-10% SiC composites. *Silicon*, 1-12.
- Scherge, M., Shakhvorostov, D. ve Pöhlmann, K. (2003). Fundamental wear mechanism of metals. *Wear*, 255(1-6), 395-400.
- Serrati, D. S., Machado, M. A., Oliveira, J. ve Santos, T. G. (2023). Non-destructive testing inspection for metal components produced using wire and arc additive manufacturing. *Metals*, 13(4), 648.
- Shabani, B. ve Dukovski, V. (2020). Advantages and disadvantages of metal additive manufacturing.
- Shen, Z., Qiao, B., Yang, L., Luo, W., Yang, Z. ve Chen, X. (2021). Fault mechanism and dynamic modeling of planetary gear with gear wear. *Mechanism and Machine Theory*, 155, 104098.
- Sotoodeh, K. (2022). Cryogenic Valves for Liquefied Natural Gas Plants. *Gulf Professional Publishing*.
- Söylemez., E. (2025). Türkiye Eklemeli İmalat Ekosistemi, TAMA
- Sundararajan, G. (1995). The solid particle erosion of metallic materials: the rationalization of the influence of material variables. *Wear*, 186, 129-144.
- Tang, X., Chung, R., Li, D., Hinckley, B. ve Dolman, K. (2009). Variations in microstructure of high chromium cast irons and resultant changes in resistance to wear, corrosion and corrosive wear. *Wear*, 267(1-4), 116-121.
- Tarodiya, R. ve Levy, A. (2021). Surface erosion due to particle-surface interactions-A review. *Powder technology*, 387, 527-559.
- Telling, R. H., Jilbert, G. ve Field, J. E. (1997). Erosion of aerospace materials by solid-particle impact. Window and Dome Technologies and Materials V,
- Timmins, B. H., Wilson, B. W., Smith, B. L. ve Vlachos, P. P. (2012). A method for automatic estimation of instantaneous local uncertainty in particle image velocimetry measurements. *Experiments in fluids*, 53, 1133-1147.

- Tonolini, P., Montesano, L., Tocci, M., Pola, A. ve Gelfi, M. (2021). Wear behavior of AlSi10Mg alloy produced by laser-based powder bed fusion and gravity casting. *Advanced Engineering Materials*, 23(10), 2100147.
- Topcu, D. (2023). İnsansız Hava Araçları İçin Eklemeli İmalat Yöntemiyle Yakıt Eşanjörü Geliştirilmesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi*. İstanbul.
- Torrance, A. (2005). Modelling abrasive wear. *Wear*, 258(1-4), 281-293.
- Tradowsky, U., White, J., Ward, R., Read, N., Reimers, W. ve Attallah, M. (2016). Selective laser melting of AlSi10Mg: Influence of post-processing on the microstructural and tensile properties development. *Materials & Design*, 105, 212-222.
- Tu, J., Pan, J., Matsumura, M. ve Fukunaga, H. (1998). The solid particle erosion behavior of Al18B4O33 whisker-reinforced AC4C al alloy matrix composites. *Wear*, 223(1-2), 22-30.
- Uzan, N. E., Ratzker, B., Landau, P., Kalabukhov, S. ve Frage, N. (2019). Compressive creep of AlSi10Mg parts produced by selective laser melting additive manufacturing technology. *Additive Manufacturing*, 29, 100788.
- Venettacci, S., Ponticelli, G. S., Guarino, D. ve Guarino, S. (2022). Tribological properties of laser powder bed fused AlSi10Mg: experimental study and statistical analysis. *Journal of Manufacturing Processes*, 84, 1103-1121.
- Wang, G., Wang, J., Wu, W.-p., Jiang, P., Yang, H. ve Yan, K. (2025). Numerical Simulation of the Design and Selective Laser Melting Process Parameters for Lightweight Automobile Wheels. *Engineering Research Express*.
- Wang, W., Haché, M. J., Cheng, C., Lyu, T., Liu, Z., Papini, M. ve Zou, Y. (2023). Solid-particle erosion of a dual-phase AlCoFeNi₂ high-entropy alloy. *Wear*, 528, 204971.
- Wensink, H. ve Elwenspoek, M. C. (2002). A closer look at the ductile–brittle transition in solid particle erosion. *Wear*, 253(9-10), 1035-1043.
- Yan, Q., Song, B. ve Shi, Y. (2020). Comparative study of performance comparison of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting and casting. *Journal of Materials Science & Technology*, 41, 199-208.
- Zimmermann, M., Müller, D., Kirsch, B., Greco, S. ve Aurich, J. C. (2021). Analysis of the machinability when milling AlSi10Mg additively manufactured via laser-based powder bed fusion. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 989-1005.
- Zygula, K., Nosek, B., Pasiowiec, K. ve Szysiak, N. (2018). Mechanical properties and microstructure of AlSi10Mg alloy obtained by casting and SLM technique. *World Scientific News*, 104.

EKLER**EK-1** Isıl İşlemsiz Döküm AlSi10Mg Numunelerin Spektro Analize Bağlı Kimyasal Kompozisyonu**SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI
(CHEMICAL RESULTS)**

Numune No/Sample Id : ENAC46100

Müşteri/Customer :

Malzeme/Şarz No :

B-1389

Yumak No/Yumak Id : 01.875.1-01.1374.1

Isıl İşlem/Heat Treatment :

-

Mühendis/Engineer : BATUHAN YILMAZ

İş Emri/Work Order :

-

Num. Geliş Tarihi/Saatı : 29.05.25 09.30

Yumak Şartn./Yumak Spec. ŞR.053

Kalite/Grade :

EN AC-43200 EN AC-

	Al [%]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Zn [%]
1	87.72	10.7	0.231	0.0347	0.530	0.431	0.0510
↑		11.0	0.650	0.350	0.550	0.450	0.350
Ø	87.72	10.7	0.231	0.0347	0.530	0.431	0.0510
↓		9.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.200	0.0000
	Cr [%]	Ni [%]	Ti [%]	Be [%]	Ca [%]	Li [%]	Sn [%]
1	0.0128	0.0058	0.0896	<0.0001	0.0060	0.0007	<0.0050
↑		0.150	0.200				
Ø	0.0128	0.0058	0.0896	<0.0001	0.0060	0.0007	<0.0050
↓		0.0000	0.0000				

Sonuç/Result Kabul/Accepted

Açıklama/Explanation :

Tarih/Date : 30.04.2025

Tezgah Kodu :

Analiz Eden/Tester :

Saat : 13:27:22.401

AE03-04

YAŞAR ERIKCI

EK-2 Isıl İşlemsiz Eklemeli İmalat (SLE) AlSi10Mg Numunelerin Spektro Analize Bağlı Kimyasal Kompozisyonu

**SPEKTROMETRE ANALİZ SONUÇLARI
(CHEMICAL RESULTS)**

Numune No/Sample Id : ENAC46100

Müşteri/Customer :

Malzeme/Şarz No : B-1389

Yumak No/Yumak Id : 01.875.1-01.1374.1

Isıl İşlem/Heat Treatment : -

Mühendis/Engineer : BATUHAN YILMAZ

İş Emri/Work Order : -

Num. Geliş Tarihi/Saati : 29.05.25 09.30

Yumak Şartn./Yumak Spec. ŞR.053

Kalite/Grade : EN AC-44200 EN AC-

	Al [%]	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Zn [%]
1	87.86	11.1	0.411	<0.0030	0.0082	0.293	0.0015
↑		13.5	0.550	0.0500	0.350		0.100
Ø	87.86	11.1	0.411	<0.0030	0.0082	0.293	0.0015
↓		10.5	0.0000	0.0000	0.0000		0.0000
	Cr [%]	Ni [%]	Ti [%]	Be [%]	Ca [%]	Li [%]	Sn [%]
1	0.0730	0.0477	0.0074	<0.0001	0.0086	<0.0002	<0.0050
↑			0.150				
Ø	0.0730	0.0477	0.0074	<0.0001	0.0086	<0.0002	<0.0050
↓			0.0000				

Sonuç/Result Kabul/Accepted

Açıklama/Explanation :

Tarih/Date : 30.04.2025

Tezgah Kodu :

Analiz Eden/Tester :

Saat : 13:28:58.856

AE03-04

YAŞAR ERIKCI

EK-3 Aşındırıcı Silisyum Karbür Partiküllerin Adlandırılması ve Özellikleri

DATA SHEET



PRODUCT:	BLACK SILICON CARBIDE			REFERENCES
TRADE NAME:	FT-SiC-01			10/2010
CHEMICAL/PHYSICAL ANALYSIS-TYPICAL				
	F16-F90	F100-F150	F180-F220	
SIC:	98%min	98%min	97.5%min	
Fe2O3:	0.2%max	0.25%max	0.3%max	
F.C.:	0.2%max	0.25%max	0.3%max	
REAL DENSITY	3.2g/cm3			
HARDNESS	9.5 Mohs			
GRAIN SHAPE/COLOR	Cubic/Black			
APPLICATION	Bonded Abrasives			
SIZE	F12-F220			
BULK DENSITY				
	F12	1.45-1.60	F54	1.49-1.65
	F14	1.45-1.60	F60	1.46-1.62
	F16	1.45-1.60	F70	1.46-1.62
	F20	1.45-1.60	F80	1.46-1.62
	F22	1.47-1.65	F90	1.46-1.62
	F24	1.47-1.65	F100	1.40-1.55
	F30	1.49-1.65	F120	1.40-1.55
	F36	1.49-1.65	F150	1.40-1.55
	F40	1.49-1.65	F180	1.34-1.50
	F46	1.49-1.65	F220	1.34-1.50
Other Density can be customized according to customer's request.				
Packing: 25kgs/bag +pallet or 1mt/bag , as per customer's request				
All figures are given for information only. These have to be reconfirmed with our offer				
Futong Industry Co.Limited			Tel: +86/371/5563 2998	
ROOM 2301,BUILDING 20,CBD INNER			Fax: +86/371/6369 1212	
RING,ZHENG DONG,NEW DISTRICT,			E-mail: michael@ftong.com.cn	
ZHENGZHOU,HENAN, CHINA.			www.ftong.com.cn	

EK-4 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Aleti



EK-5 Numunelerden Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçüldüğü Bölge ve Tarama Mesafesi

