



**ST-52 ÇELİĞİ VE SULZER MALZEMELERİN  
SULU ÇAMUR EROZİF AŞINMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**2023  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Mustafa Berkay HAŞİM**

**Tez Danışmanı  
Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR**

**ST-52 ÇELİĞİ VE SULZER MALZEMELERİN SULU ÇAMUR EROZİF  
AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Mustafa Berkay HAŞİM**

**Tez Danışmanı**

**Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR**

**T.C.**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Nisan 2023**

Mustafa Berkay HAŞİM tarafından hazırlanan “ST-52 ÇELİĞİ VE SULZER MALZEMELERİN SULU ÇAMUR EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 27/04/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Muhammet Hüseyin ÇETİN (KTÜN)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan tüm atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Mustafa Berkay HAŞİM

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### ST-52 ÇELİĞİ VE SULZER MALZEMELERİN SULU ÇAMUR EROZİF AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCENLENMESİ

**Mustafa Berkay HAŞİM**

**Karabük Üniversitesi**

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR**

**Haziran 2023, 56 Sayfa**

Çalışan bir makine sisteminde en büyük sorunlardan bir tanesi ekipman ömrünü direkt olarak etkileyen aşınmalardır. Bu tez çalışmasında bir erozif aşınma türü olan sulu çamur erozyon aşınması incelenecektir. Bu amaçla, özel tasarım bir deney düzeneği kullanılmış ve deneylerde sulu çamur kullanılarak St-52 ve Sulzer malzemenin üzerindeki aşındırıcılığı değerlendirilmiştir. Aşınma deney düzeneğinde aşındırıcı oranının %10 olduğu bir aşındırıcı su karışımı kullanılmıştır. Deneyler 2,5 m/s, 4 m/s ve 5,5 m/s çevresel hızlarda ve 30<sup>0</sup>, 60<sup>0</sup> ve 90<sup>0</sup> açılarda gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmada sulu çamurun aşındırıcılığı çarpma hızı, zaman ve açıyla doğrudan bir ilişki içerisinde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca aşınma mekanizmalarının anlaşılabilmesi için aşınma yüzeylerinin SEM kullanılarak incelenmiştir. Çarpma hızının arttıkça aşınmanın arttığı tespit edilmiştir. Çarpma hızının bu aşınma da en büyük etken olduğu görülmüştür.

**Anahtar Sözcükler:** Eroziyon aşınma, sulu çamur aşınması, partikül çarpma hızı, St 52, Sulzer malzeme, Metco 8295

**Bilim Kodu:** 91421



## **ABSTRACT**

**Master's Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE EROSIVE ABRASION BEHAVIOR of ST-52 STEEL AND SULZER MATERIALS**

**Mustafa Berkay HASIM**

**Karabuk University  
Institute of Graduate Programs  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Dr. Lecturer. Abdullah UGUR**

**Jun 2023, 56 Pages**

One of the biggest problems in a working machine system is the wear that directly affects the equipment life. One of the many types of wear we encounter is erosive wear. In the transport of materials with a certain particle size, for example, erosive wear, which is a type of wear, is often encountered in the slag transport system in blast furnaces. While the slag is transferred in a liquid and fluid medium, machinery equipment is exposed to sludge erosion. Slurry erosion is one of the most effective types of erosion wear. High erosion rate significantly shortens the life of the equipment of the transfer system and increases the maintenance costs. In this study, slurry erosion wear test setup was used and the abrasiveness on St-52 and Sulzer materials was evaluated by using slurry in the experiments. A 10% density slurry was prepared for the abrasive. The experiments were carried out at 2.5 m/s, 4 m/s and 5.5 m/s circumferential velocities and at 30<sup>0</sup> , 60<sup>0</sup> and 90<sup>0</sup> angles. In this

experimental study, it was determined that the abrasiveness of the sludge prepared with a certain particle size is in a direct relationship with the impact rate, time and angle. It was found that the wear rate increased as the impact speed increased. Impact velocity was found to be the biggest factor in this wear. In addition, the wear surfaces were examined using SEM to understand the wear mechanisms.

**Key Words:** Erosive wear, slurry wear, particle impact velocity, St 52, Sulzer material, Metco 8295

**Science Code:** 91421



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalıőmasının hazırlanması esnasında, bana her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen, ihtiyaç duyduğum her anda çıkar yol gösteren; başta danışman hocam Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR' a teşekkür ederim.

Deney alıőmaları ile ilgili süreçte bilgilerini ve birikimini bana aktaran yine Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü Dr. Öğr. Üyesi Recep DEMİRSÖZ ve Arş. Gör. Mehmet Tayyip ÖZDEMİR' e çok değerli yardımlar ve desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Çalışma süresince desteğini ve yardımlarını hiç esirgemeyen değerli aileme ve kuzenim Bilal HAŞİM' e teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ .....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xv
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
LİTERATÜR TARAMASI.....	3
2.1. AŞINMA .....	4
2.1.1. Adhezif Aşınma .....	5
2.1.2. Abrazif Aşınma.....	6
2.1.3. Korozyif Aşınma.....	7
2.1.4. Kazımalı Aşınma .....	7
2.1.5. Yorulma Aşınması .....	8
2.1.6. Erozyon Aşınması.....	8
2.1.6.1. Erozyon Aşınmasına Etki Eden Faktörler.....	9
2.1.6.2. Erozyon Aşınma Mekanizmaları.....	10
2.1.6.3. Aşındırıcı Partikülün Kuvvet Analizi Ve Yüze Etkisi .....	11
2.1.6.4. Katı Partikül Erozyonu.....	13
2.1.6.5. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu .....	15
2.1.6.6. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu.....	16
2.1.6.7. Kavitasyon Erozyonu .....	17

	<b>Sayfa</b>
2.1.6.8. Elektro Erozyon .....	18
2.2. SULU ÇAMUR EEOZYONU LİTERATÜR İNCELEMESİ .....	19
<b>BÖLÜM 3 .....</b>	<b>25</b>
<b>MATERYAL Ve METOD.....</b>	<b>25</b>
3.1. KULLANILAN MALZEMELER.....	25
3.1.1. St 52 Çeliği .....	25
3.1.1.1. St 52-3 Numune Hazırlanması .....	26
3.1.2. Kaplama Malzeme Sulzer Metco 8295 .....	26
3.1.2.1. Sulzer Metco 8295 Numune Hazırlanması .....	26
3.2. SLURRY (Bulamaç) AŞINMASI TEST CİHAZI.....	27
3.3. SEM CİHAZI VE GÖRÜNTÜLERİ .....	30
3.4. AĞIRLIK ÖLÇÜMÜ .....	31
3.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜM CİHAZI.....	31
3.6. DENEY DÜZENİĞİ .....	32
3.6.1. Numune Ve Aşındırıcı Partikül Hazırlanması .....	34
3.6.2. TAGUCHI, RSM Ve ANOVA.....	35
<b>BÖLÜM 4 .....</b>	<b>37</b>
<b>BULGULAR.....</b>	<b>37</b>
4.1. KÜTLE KAYBI .....	37
4.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK.....	39
4.3. SEM GÖRÜNTÜLERİ .....	41
4.3.1. St-52 Malzeme Numunesi SEM Görüntüleri.....	41
4.3.2. Sulzer Metco 8295 Kaplama Malzeme SEM Görüntüleri.....	44
4.4. ANOVA ANALİZİ SONUÇLARI .....	47
4.4.1. Kütle Kaybı ANOVA Analizi.....	47
4.4.2. Yüzey Pürüzlülüğü ANOVA Analizi .....	49
<b>BÖLÜM 5 .....</b>	<b>51</b>
<b>SONUÇLAR .....</b>	<b>51</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>53</b>

ÖZGEÇMİŞ ..... 56



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1. Erozyon aşınması türleri[1,2].....	8
Şekil 2. 2. Erozyon aşınma performansına etki eden faktörler [2].....	9
Şekil 2. 3. Erozyon aşınma türlerinin şematik gösterimi[1,2].....	10
Şekil 2. 4. Katı parçacık erozyonunda karşılaşılan muhtemel mekanizmalar a) küçük çarpma açılarındaki abrazyon, b) düşük hız ve büyük çarpma açısındaki yüzey yorulması, c) orta hız ve büyük çarpma açısındaki gevrek kırılma veya çoklu plastik deformasyon, d) yüksek çarpma hızlarındaki yüzey erimesi, e) ikincil etkiler sonucu oluşan makroskobik erozyon[1]. .....	11
Şekil 2. 5. Yüzeyle temastaki bir partiküle etki eden kuvvetler[2].....	12
Şekil 2. 6. Aşındırıcı partikülün yüzeylerde oluşturduğu değişim; a) eğik çarpma durumunda tekli çarpma etkisi ve partikül kırılması, b) dik çarpma durumunda çoklu çarpmaya bağlı olarak partikül arası etkileşim[3].....	13
Şekil 2. 7. Katı partikül erozyon türleri[4]. .....	14
Şekil 2. 8. Katı partikül erozyonu deney düzenekleri görüntüsü[5]. .....	15
Şekil 2. 9. Su damlası erozyon test düzeneği[5]. .....	16
Şekil 2. 10. Farklı erozif aşınma test düzenekleri görüntüsü[5]. .....	17
Şekil 2. 11. Kavitasyon erozyonu deney düzenekleri görüntüsü[5].....	18
Şekil 3. 1. Deney Düzenek teknik resmi a) düzenek kesit resmi b) tutucu kollar c) numune tutucu. ....	28
Şekil 3. 2. Deney düzeneğinde kullanılan elektrik motorlarının sürücü ve elektrik panosu görüntüsü. ....	29
Şekil 3. 3. Üç boyutlu tasarıma göre imal edilmiş deney düzeneği görüntüsü. ....	29
Şekil 3. 4. Test Cihazı çalışma prensibi. ....	30
Şekil 3. 5. SEM cihazı (Margem tarafından paylaşılmış görüntüsüdür) görüntüsü... ..	30
Şekil 3. 6. DENSI HZY 320A model hassa terazi görüntüsüdür. ....	31
Şekil 3. 7. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı görüntüsüdür. ....	32
Şekil 3. 8. Tasarlanan deney düzeneğine ait görüntü. ....	33
Şekil 3. 9. Tasarlanmış olan sulu-çamur deney düzeneği şematik gösterimidir. ....	34
Şekil 4. 1. St-52 numunesine ait 1 saat sürede sabit açıda yapılmış a) 2,5 m/s, b) 4 m/s, c) 5,5 m/s hızlarda yapılmış deneylerin SEM görüntüleridir. ....	42
Şekil 4. 2. St-52 numunesine ait 4 m/s hızda yapılmış a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat yapılmış deneylere ait SEM görüntüleri. ....	42
Şekil 4. 3. St-52 Çelik Malzeme numunesinin 4 m/s hızda, üç saat deney yapılmış SEM görüntüsü.....	43

Şekil 4. 4. Şekil 4.3.'te 1 noktasına ait EDX grafiği ve mikro analiz değerleri.....	43
Şekil 4. 5. Sulzer Metco 8295 malzeme numunesine ait 1 saat sürede sabit bir açıyla yapılan a) 2,5 m/s, b) 4 m/s, c) 5,5 m/s hızlarında yapılan deneylerin SEM görüntüleridir.....	45
Şekil 4. 6. Sulzer Metco 8295 malzeme numunesinin 5,5 m/s hızda yapılmış a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat sürelerinde gerçekleştirilmiş olan deneylerin SEM görüntüleridir.....	45
Şekil 4. 7. Sulzer malzeme numunesinin 2,5 m/s hızda, 1 saatte yapılmış deneyin SEM görüntüsüdür. ....	46
Şekil 4. 8. Şekil 4.7.'de 1 noktasına ait EDX grafiği ve mikro analiz değerleri.....	46



## TABLULAR DİZİNİ

Tablo 2. 1. Erozif aşınma deneyine ait parametreler[6].....	21
Tablo 3. 1. St 52 malzemenin kimyasal kompozisyonu.....	26
Tablo 3. 2. Sulzer Metco 8295 malzenin kimyasal kompozisyonu[7].....	26
Tablo 3. 3. Örnek TAGUCHI L9 deney tasarımı.....	36
Tablo 4. 1. St-52 çeliği ağırlık ölçüm sonuçları.....	37
Tablo 4. 2. Sulzer Metco 8295 Kaplama malzemenin ağırlık ölçüm sonuçları.....	38
Tablo 4. 3. St-52 Çelik Malzeme numunesi deney sonu yüzey pürüzlülük değerleri. .....	39
Tablo 4. 4. Sulzer Metco 8295 kaplama malzeme numunesi deney sonu yüzey pürüzlülük değerleri.....	40
Tablo 4. 5. Şekil 4.3'teki seçilmiş noktalara ait makro analiz tablosu.....	44
Tablo 4. 6. Şekil 4.7'deki seçilmiş noktalara ait makro analiz değerleridir.....	47
Tablo 4. 7. St-52 malzeme için kütle kaybı ANOVA analizi.....	48
Tablo 4. 8. Sulzer malzeme için kütle kaybı ANOVA analizi.....	48
Tablo 4. 9. St52 yüzey pürüzlülüğü için ANOVA analizi.....	49

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

C	: Karbon
Mn	: Mangan
Si	: Silisyum
P	: Fosfat
S	: Kükürt
Al	: Alüminyum
Nb	: Niyobyum
V	: Vanadyum
Ti	: Titanyum
N	: Azot
Cr	: Krom
Fe	: Demir
B	: Bor
$\mu\text{m}$	: Mikro metre
m/s	: Metre/Saniye
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
h	: saat
d/d	: devir/dakika
g	: gram
$\text{Al}_2\text{O}_3$	: Alüminyum oksit
kW	: Kilo Watt
mm	: Milimetre

## **KISALTMALAR**

MARGEM	: Malzeme Araştırma Geliştirme Enstitüsü
RSM	: Response Surface Metodu
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-Işını Analizi
HV	: Vickers Sertlik Testi
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
AC	: Alternatif Akım
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme
HVOF	: Yüksek Hızda Oksi-Yakıt Püskürtme

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Malzemeler, mühendislik sistem ve ürünlerin imalinde yararlandığımız istenilen fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip katı maddelerdir. Malzemeler insan hayatı boyunca hep aktif ve önemli rol oynamışlardır. Malzemeler farklı şekillerde sınıflandırılabilir, yalnız mühendisler açısından en uygun sınıflandırma aşağıdaki gibidir[8]:

- Metaller
- Seramikler
- Polimerler
- Kompozitler
- Yarı İletkenler

Çelik malzemeler, başlıca demir-karbon alaşımının birleşiminden oluşur. Bu birleşimde sadece karbon atomunun bulunması özellikleri bakımında sınırlı kalmasını sağlar. Bu sebeple çeliklerde karbon elementi haricinde alüminyum, krom, nikel vb. gibi elementlerle de alaşımlama yapılır[9].

Çelikler güçlü, çok yönlü ve esnek malzemelerdir. Özelliklerini kaybetmeden dönüşüm sağlanarak defalarca kullanımı mümkündür. Bu sebeple, çelik malzemeler genel bir imalat malzemesi olarak birçok alanda kullanılmaktadır. Çelik içerdiği karbon oranları ve gerçekleştirilen işlemlerle farklı özellikler kazandırılarak sınıflandırılabilir. Günümüzde ticari çelikler sade karbonlu, düşük alaşımlı ve yüksek alaşımlı çelikleri olarak sınıflandırmak mümkündür[10].

Günümüz şartlarında son teknoloji kullanılarak üretimi gerçekleştirilse, tasarımı kusursuz olsa bile ya malzemedен ya da işletme koşulları sebebiyle malzeme iş yapabilme özelliğini kaybetmektedir. Bu sonuca varmamızın en önemli etkenlerinde birisi aşınmadır. Aşınma, DIN 50320 ve ASTM G40-05 standartlarında

tanımlanmıştır ve aşınma başka malzemelerle temas neticesinde yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması ve bozulması olarak tanımlanabilir [11]. Başlıca aşınma mekanizmaları; adhezif, abrazif, korozif, kazımalı, yorulma ve erozif (kavitasyon, sıvı çarpmalı ve slurry) aşınmalarıdır.

Erozif bir aşınma türü olan slurry (çamur) erozyonu, sıvı bir malzeme içerisinde bulunan parçacıkların malzeme yüzeyini ağır deformasyona uğratması işlemidir. Bu aşınma olayında partiküllerin yüzeye tekrar tekrar çarpmasıyla malzemede aşınma meydana getirmektedir. Sıvı ve katının birbirine göre izafi hareket ettiği hemen hemen her sistemde gözlemlenebilmektedir. Örneğin; pervaneler, pompalar, boru hatlarında sulu çamur aşınması sıklıkla gözlemlenebilir [12].

Slurry erozyonda karşımıza çıkan birçok etkin parametre olduğu için karmaşık bir prosestir ve bu sebeple hala araştırılması gereken bir konudur. Slurry erozyonda hakkında üzerine etki eden sertlik, izafi hız, parçacık büyüklüğü, çarpma açısı ve malzemenin mikro yapısı ve sıcaklık gibi birçok parametre bulunmaktadır. Birçok malzemeler üzerine yapılan literatür çalışmaları çamur erozyonu davranışları ve erozyonu etkileyen parametreler üzerine olan incelemeler devam etmektedir.

Bu çalışmada sıvı ve katının birbirine göre izafi hareket yaptıklarında çok sık karşılaşılan bir aşınma türü olan sulu çamur aşınması incelenecektir. Bu çalışma Karabük Üniversitesi'nde var olan su içen uğraşma test cihazı yardımıyla farklı hızlarda, sürelerde ve farklı çarpma açılarında gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

## BÖLÜM 2

### LİTERATÜR TARAMASI

Sulu çamur erozyonu ile alakalı birçok araştırmacı araştırma yapmaktadır, aşağıda konuyla alakalı bazı çalışmaların özetleri verilmiş ardından da belirli konular önere özetler değerlendirilmeye çalışılmıştır.

Joshi ve arkadaşları, gerçekleştirmiş oldukları deneysel çalışmada cam epoksi kompozitlerin Suluçem ulaşım davranışlarının incelemiştir. 170-250 µm boyutlarında kum partiküller kullanarak farklı hız ve açılarda testler gerçekleştirmişlerdir. Ayrıca ANOVA yardımıyla etken parametrelerin katkısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hız ve açının artmasıyla aşınma oranı artış göstermiştir. 60° kadar olan artışta erozyon oranı sabit olarak artmıştır. Bundan sonraki açı artışında aynı artış kompozitin yarı süneklik ilkesi gereği gözlemlenmemiştir. Regresyon modelleri deneysel çalışma sonuçları ile doğruluğu saptanmış ve uygun olduğu gözlemlenmiştir [13].

Kishor ve arkadaşları, yüksek sıcaklıklarda deformasyona (termo-mekanik) uğratarak tane türleri değiştirilen krom-nikel paslanmaz çeliğin sulu çamur erozyon direncini incelemiştir. Termo-mekanik işlem görmüş numuneler paslanmaz çelik numunelere kıyasla daha yüksek slurry erozyon direnci göstermiştir. Kullandıkları numuneler 950°C ve 1050°C'ta ve farklı hızlarda sıcak deformasyona uğratmışlardır. Sonuç olarak mikro yapının etkisi ile 950 ° C'de işlenmiş numunelerin direnci ise daha yüksektir olduğunu ifade etmişlerdir [14].

Ojala ve arkadaşları, ısıl işlem görmüş aşınma dayanımlı çeliklerin sulu çamur aşınma davranışlarını pota tipi bir test cihazı ile incelemiştir. Bu amaçla %9 ve %33 oranlarında granit partiküllü içeren bulamaç 45° ve 90° açılarda numuneleri çarpıtılmıştır. Yapılan deneylerde numune malzemelerin göstermiş oldukları performans değerlendirilirken sertlik ve mikro yapılarına bakılmıştır. Numunelerin

kesitlerine ve aşınan yüzeylerine bakarak slurry erozyon süresince mekanik özelliklerdeki değişme incelenmiştir. Sonuç olarak baskın aşınma mekanizmasının abrazif aşınma olduğunu, ayrıca aşınma direncinin aşındırıcı boyutu arttıkça arttığını ifade etmişlerdir [15].

Sinha ve arkadaşları, yapmış olduğu çalışmada, katı partiküllerin boru hattı üzerinde yaptığı aşınmayı araştıran derleme çalışması yapmışlardır. Sulu-amur erozyonunun ekonomik etkisi üzerine vurgu yapan Sinha ve arkadaşları, bu aşınmanın anlaşılması ve aşınmaya dirençli bileşenlerin üretilmesi için gerekli olan bilimsel altyapının nasıl düzenleneceği üzerine yorumlarda bulunmuştur. sağlanmas planlamışlardır. Bu alanda özellikle haddeleme ile üretilen borulardaki korozyon aştırmalarında eksiklikler olduğunu ifade etmişlerdir[16].

Stack ve Badia, yapmış oldukları çalışmada sulu çamur ortamında meydana gelen aşınma mekanizmasının sadece sulu çamurdan kaynaklanmadığını özellikle deniz suyu gibi ortamlarda bir korozyon aşamasının da meydana geldiğini ifade etmişlerdir. Bunun üzerine yapay bir korozyon ortamı oluşturup sulu çamur aşınması ve korozyon ilişkisini incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, çeşitli potansiyellerde partikül hızı ve konsantrasyon arttırıldığında, kaplamanın ve yumuşak çeliğin erozyon-korozyon mekanizmasının belirgin farklılıklar gösterdiği sonucuna varmışlardır [17].

Genel literatür taraması sonucunda, bir aşınma çeşidi olan sulu çamur aşınmasının hakkında çalışmalar yapılmakta beraber gerçekleşen olayın karmaşıklığı ve birçok farklı parametre dayanmasından dolayı araştırılmaya müsait olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle farklı malzeme ve kaplamaların incelenmesi ayrıca, aşınma ortamının parçacık boyutunu, çarpışma hızlarının, sertlik oranlarının, çarpma acılarının, ortam asitliğinin önemli olduğu ve incelenmesi gerektiği kanaati oluşmuştur.

## **2.1. AŞINMA**

Maddelerin ve parçacıkların birbirine göre etkileşimde bulunması, izafi hareket yapması, kimyasal reaksiyona girmesi, bir parçaya devamlı benzer yüklerle

uygulanması, gibi durumlar parçalarda yıpranmayı, parçalanmaya meydan verir. Bu durumda işleyen sistemlerin durmasına, parçaların kaybolmasına, boruların dinmesini delinmesine sebep olabilir. Bu nedenle aşınma ekonomik, sağlık ve güvenlik problemlerini de beraberinde getiren oluşum, gelişim açısından birçok faktörden etkilenen önemli ve engellenemez bir olaydır. Aşınmanın engellenememesi azaltılamayacağı anlamına gelmemektedir.

Aşınma; katı maddelerin yüzeylerinden ince parçacıkların ya da bütün şekilde küçük parçacıkların kopmasıyla gerçekleşen malzeme eksilmesi olarak tanımlanabilir. İzafi hareket veya kimyasal reaksiyon sonucunda yüzeyde meydana gelen değişiklikler, gerçek ve yeter şartlar olarak kabul edilmektedir [18].

Aşınma birçok alanda gözlemlenebilir, aşınmayı genel olarak adhezif aşınma, abrazif aşınma, korozyon aşınma, yorulma aşınması ve erozyon aşınması en çok karşılaşılan aşınma türleri olarak sınıflandırılmaktadır beraber, aşınma gerçek hayatta bir den fazla çeşit aşınmanın bir bileşkesi olarak ortaya çıkmaktadır.

### **2.1.1. Adhezif aşınma**

Bu aşınma türü ile çok yaygın şekilde karşılaşılmaktadır. Birbirine temas eden iki parçanın temas sonrası birbirine yapışması ve daha sonra bu yapışan parçanın oradan uzaklaşmasıyla yapıştığı parçadan paracacık/lar kopması olarak nitelendirilebilir [19].

Çok iyi parlatılmış yüzeyler bile çok küçük bir yüzey dahi olsa birbirine temas etmesi kaçınılmazdır. Çok küçük bir yükleme gerçekleşse bile bu noktalardaki gerilme akma sınır değerini geçebilir. Yüzeyde bulunana oksit tabakasının altında iki farklı parçacık kuvvet ve kimyasal yapıların etkisiyle difüzyon olur. Kayma hareketi esnasında bu noktaların kesilmesi sonucu yenme ve aşınma olayı gerçekleşir.

Bu durumun engellenmesi için bazı önlemler alınması gerekmektedir.

- Birbiriyle etkileşim içinde çalışacak olan çiftlerin birbiriyle difüzyon olmayacak şekilde seçilmesi.

- Malzemelerin sertliklerinin farklı olması ve yakın sertlikteki malzemelerle çalışılmaması.
- Bir etkileşim içinde olan malzemelerin kaplanması.
- Yağlayıcı utanmak ve uzaklaştırmak bu şekilde mikro kaynakların önüne geçilmesi.
- Birbirine temas gerçekleştiren yüzeylerde pürüzlülük tepelikleri yoksa aşınma gerçekleşmemektedir. Bu sebeple parçaların yüzey pürüzlülük değerlerini aşağıya çekmek için uğraşılmalıdır ancak bu sistem maliyetini olumsuz etkilemektedir.

### **2.1.2. Abrazif aşınma**

Abrazif aşınma, yırtılma ya da çizilme aşınması isimleriyle de bilinmektedir. Aşınma malzeme yüzeylerinden daha sert partiküllerin basınç etkisi altında yüzeyden parça kopmasıyla deforme etmesi işlemidir[20]. Bu sert partiküller yüzeyler üzerinde kazıyıcı erki göstererek tıpkı eğeleme ve taşlama görmüş yüzeylerde oluşan malzeme kaybının etkisini göstermektedir. Sertlik farklı bir tanım olarak bir malzemenin çizilmeye karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilebilir. Yani sertlik başka bir ifadeyle abrasif aşınmaya karşı olan bir direnci ifade eder.

Abrazif aşınmayı önlemek için;

- Abrazif aşınmayı önlemenin en önemli işlemleri arasında yüzeye ısı işlem uygulamak ya da kaplama yöntemi ile sertleştirilmesi sağlanmalıdır. Fakat bu oluşan durumda da malzeme gevrek olarak kırılma olayıyla karşı karşıya kalma ihtimali artmaktadır.
- Sert malzemelerin dışarıdan yüzeyler arasına girmesini önlemek.
- Talaş ve diğer pisliklere karşı makine ve sistemler sürekli korunmalıdır. Fakat bu korunma oldukça zor bir işlem olabileceği için bazen aşınmadan kaçınma imkansızlaşabilmektedir.
- Tasarım gerçekleştirilirken aşınmaya maruz kalacak parçaların kolayca değiştirilebilir olarak gerçekleştirilmesi aşınmanın azalmasına sebebiyet vermektedir.

### **2.1.3. Koroziif aşınma**

Parçaların kimyasal reaksiyona girip aşınmasına denilmektedir. Aşınmanın büyük oranda etkili olmasını önleyen oksit ve diğer tabakaları oluşturmaktadır. Bu aşınma türü birlikte asit ve tuzlu ortamlar bulunan malzemelerde gözlemlenmektedir. Malzemelerin yüzeyleri bu kimyasal maddeyle reaksiyon gerçekleştirilmesi sonucu ince ve sert tabaka oluşturur. Değişim gösteren yükler altında bu ince ve sert tabakalarda kırılmalar gerçekleşir ve aslında bu kırılmalarda aşınma parçacıklarının oluşumunu gerçekleştirir. Temiz kalan yüzeylerde tekrar bir tabaka oluşumu gerçekleşir ve değişim gösteren yük altında tekrar bir kırılma olayı gerçekleşir ve bu işlem döngü halinde devam eder oksidasyon aşınmasının tanımı kısaca böyle yapılmaktadır.

Bu aşınmanın gerçekleşmesinin en büyük etkisi olarak pas denilebilir. Bu pas ise okside sebep vermektedir. Oksitten korunma şu şekilde gerçekleştirilebilir ya yüzey fosfat veya sülfid ile kaplama yapılmalı ya da özel yağlayıcı maddeler kullanılmalıdır. Bunlardan bağımsız olarak da birbiriyle reaksiyon gerçekleştirilmeyen malzemelerin kullanımı yapılmalıdır.

### **2.1.4. Kazımalı aşınma**

Bu aşınma adhezif aşınmayla benzerlik gösterir, burada farklı olan adhezif aşınmada yüzeyler birbirine göre kayma işlemi yaparak görülür kazımalı aşınma ise izafi gerçekleştirilmeyen yüzeylerde ortaya çıkmaktadır. Titreşimli ortamda çalışan noktalarında çok karşılaşılan bir hasar çeşididir.

Titreşimi azaltmak veya gidermek, bağlantı noktalarında elastomer malzeme kullanmak, bağlantı noktalarını yağlamak ve ara yüzeylerdeki kaymaları azaltmak bu aşınmayı önlemek için çözüm yolu olarak kabul edilmektedir.

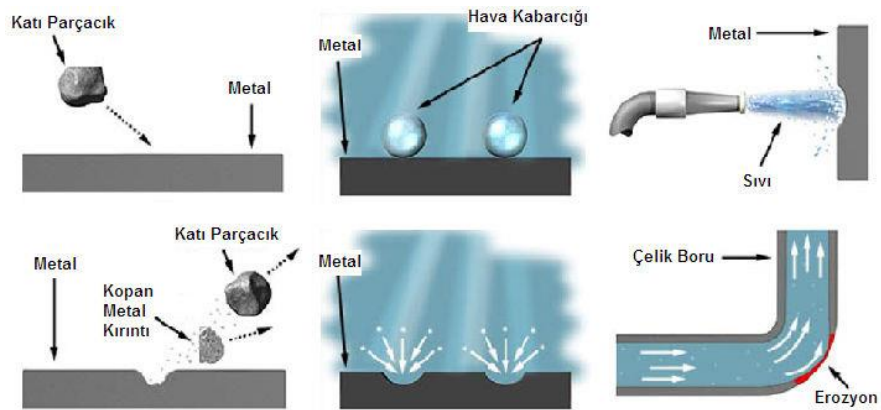
### 2.1.5. Yorulma aşınması

Birçok defa tekrarlanan yükler sonucu malzemenin yorulması sonucu yüzeylerde küçük çukur boşluklarının oluşması şeklinde gözlemlenen bir aşınma türüdür. Sürekli yüklere maruz kalan Rulman dişli çark gibi makine elemanlarında sıklıkla karşılaşılır. Temas yüzey alanları küçük olduğu için yüzeyde Hertz basınçları karşımıza çıkar.

Hertz basıncının etkisiyle yüzeyin hemen altında kayma gerilmeleri oluşumu görülüp ve değişken zorlanma şartları malzemenin yüzeyinde bir yorulma olayının başlamasında sebep olmaktadır. Bu aşınma türünde malzemenin sertliği önem arz etmektedir, yumuşak malzemelerde gözlemlenen bir aşınma türü değildir.

### 2.1.6. Erozyon aşınması

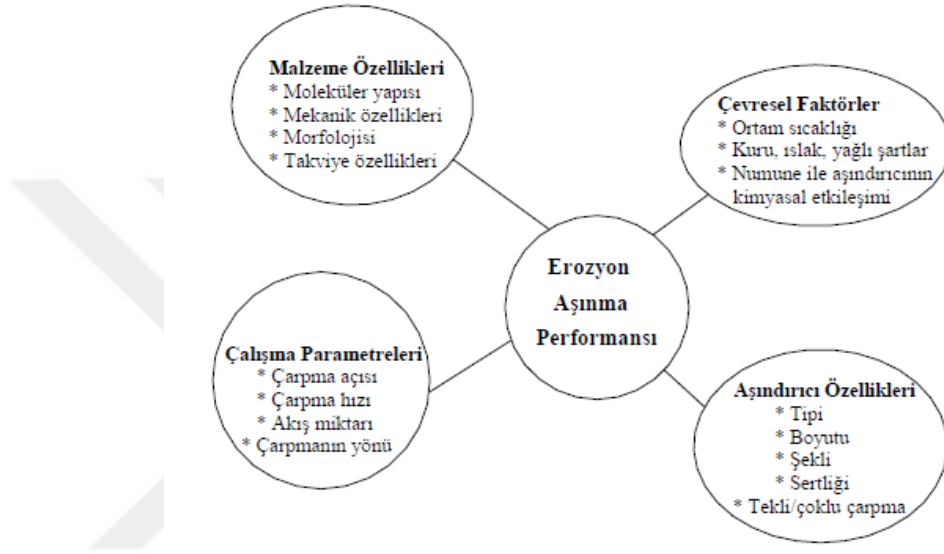
Belirli bir hıza sahip olan parçaların bir yüzeye çarpması ve yüzeyden parça kaldırması işlemi olayı şeklinde tanımlanabilir. Bu konuda ASTM G76–95 standardı geliştirilmiştir. Ayrıca farklı ortamlarda da bu aşınma gerçekleşebilir yani sıvı içerisindeki veya sıvı ile beraber gerçekleşen harekette bu erozyona dahildir.



Şekil 2. 1. Erozyon aşınması türleri[1,2].

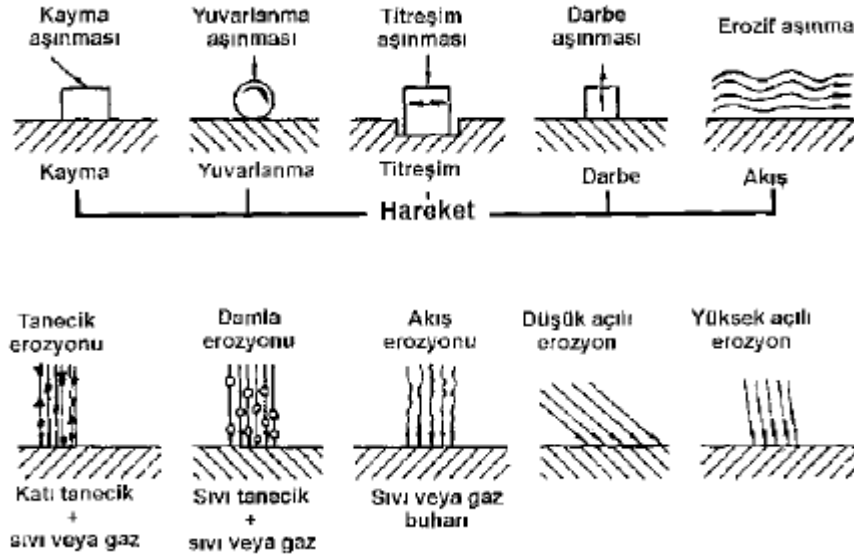
### 2.1.6.1. Erozyon aşınmasına etki eden faktörler

O erozyon aşınmasını etki eden birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler temel olarak dört başlık altında sınıflandırılabilir bunlar malzeme özellikleri, çevresel faktörler, çalışma parametreleri ve aşındırıcı özelliklerdir. Erozyon aşınmasına etki eden faktörler Şekil 2.2.' de detaylı açıklanmıştır[2].



Şekil 2. 2. Erozyon aşınma performansına etki eden faktörler [2].

Erozyon aşınması gerçekleşme sebepleri ve oluşu çok çeşitlilik gösterebilir örneğin parçacıkların yaptıkları hareketin doğrusal kayma, yuvarlanma veya titreşim olması veya içinde bulunduğu ortamın hava sıvı olması ya da çarpışma açıları erozyon şekillenmesinde farklılıklara sebep olmaktadır. Şekil 2.3.' te genel olarak karşılaşılan aşınma türleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 3. Erozyon aşınma türlerinin şematik gösterimi[1,2].

Katı parçacıkların malzeme yüzeyine çarpmasıyla oluşan malzeme kaybı, erozyon proseslerinin en yaygın olanıdır ve katı parçacık erozyonu olarak isimlendirilir ve günümüzde artış gösteren bir ilgiye sahiptir.

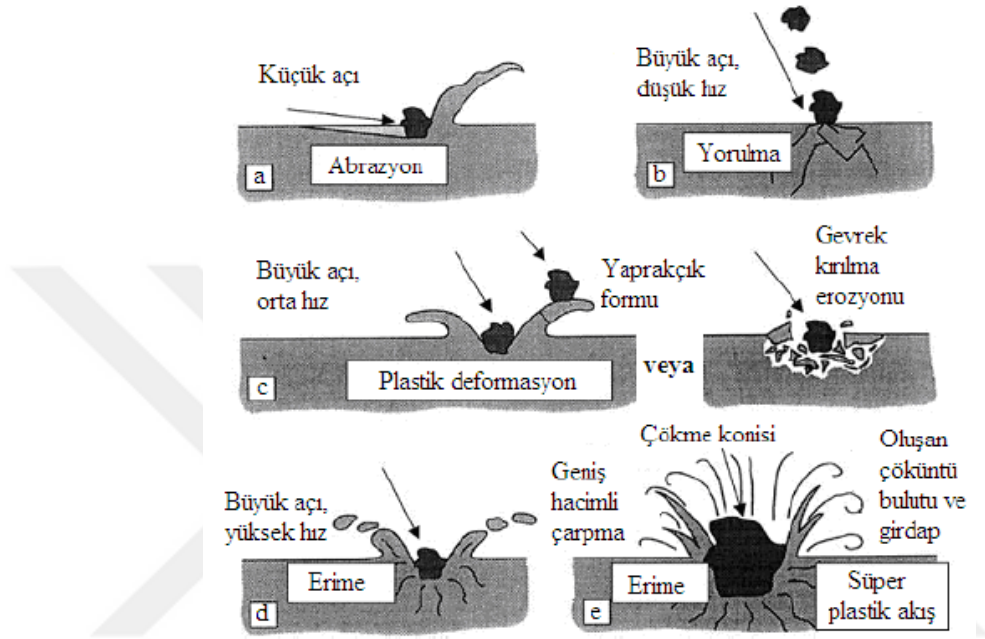
Makine ve ekipmanlarındaki Eurovision davranışları iyi bir şekilde bilinmesi bu aşınmaya karşı uygun tedbirlerin ekonomi şekilde alınabilmesine olanak tanıyacağından önemlidir. Şekilde gerekli mekanizmalar anlaşılır ve parça ömürleri uzatılıp ekonomi kazanımlar sağlanabilir.

Bununla birlikte eroziv aşınmadan faydalandığımız imalat metotları da bulunmaktadır örneğin; kum püskürtme metodu, su jeti kesme bu duruma örnektir.

### 2.1.6.2. Erozyon aşınma mekanizmaları

Birden fazla darbe nedeniyle parçacık etkileşimi ve bu etkileşimin bir sonucu olarak yüzeyde meydana gelen değişim, aşınmanın yorumlanmasında karmaşık süreçler oluşturur. Yüksek hızlı parçacıklar kinetik enerji üreterek yüzeyleri çarparlar. Bu değişiklikler ana malzemeye yapışır ve aşındırır, yüzeyde plastik parçalanır ve

sıcaklık yükselir. Bu nedenle, erozyon aşınması artar. Malzeme yüzeyi tek veya daha fazla darbeye maruz kaldığında mikro çatlama, kazıma ve kesme meydana gelir. Ayrıca, sürekli darbeler yüzeyi yorulur ve bu yorulma çatlakları yüzeyin altında çukur ve çatlaklar oluşturur. Bu durumlara ait şematik bir görsel Şekil 2.4. 'te verilmiştir.

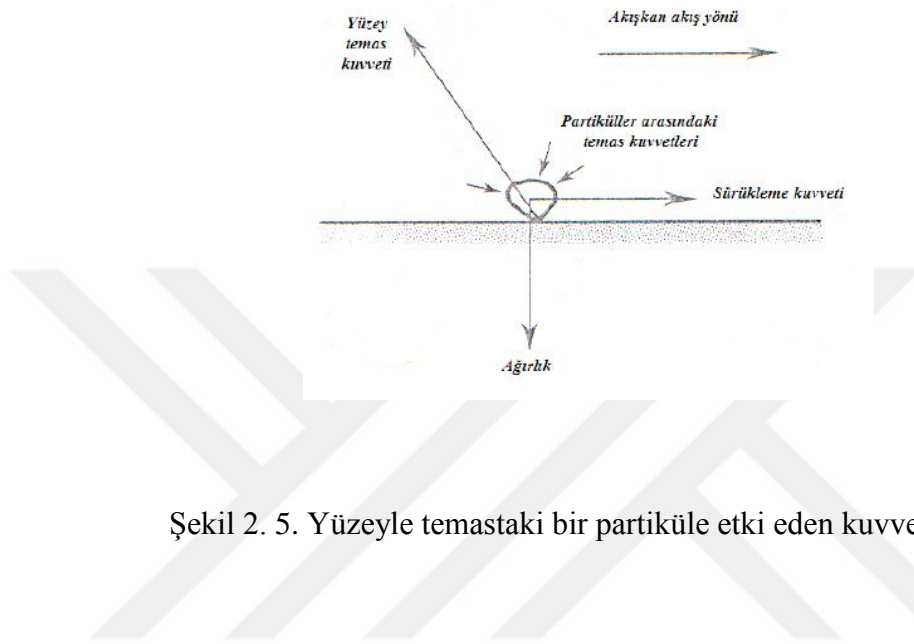


Şekil 2. 4. Katı parçacık erozyonunda karşılaşılan muhtemel mekanizmalar a) küçük çarpma açılarındaki abrazyon, b) düşük hız ve büyük çarpma açısındaki yüzey yorulması, c) orta hız ve büyük çarpma açısındaki gevrek kırılma veya çoklu plastik deformasyon, d) yüksek çarpma hızlarındaki yüzey erimesi, e) ikincil etkiler sonucu oluşan makroskobik erozyon[1].

### 2.1.6.3. Aşındırıcı partikülün kuvvet analizi ve yüzeye etkisi

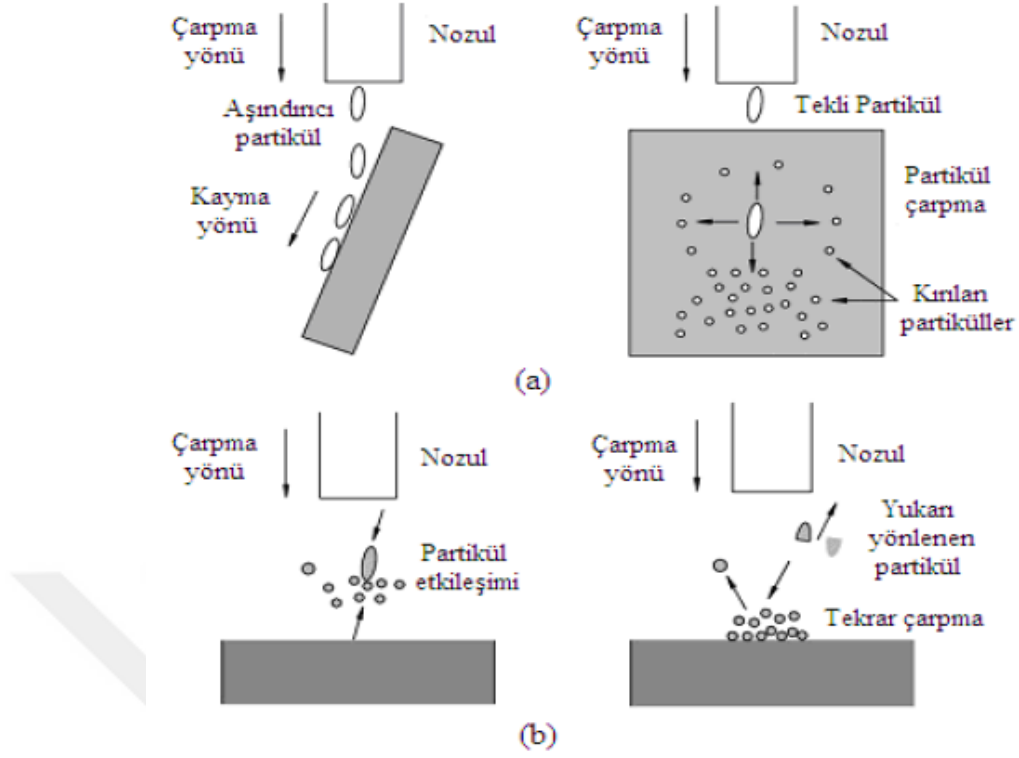
Erozyonda farklı şekilde ortaya çıkan birçok kuvvet katı partikül üzerinde etkiler oluşturmaktadır (Şekil 2.5.). Birbiri ile temas eden parçacıklar temas kuvvetlerini oluştururlar ve akan bir sıvının varlığı halinde sürüklenme durumu görülebilir.

Bazı zamanlarda yerçekimi önemi artmaktadır. Bununla birlikte, aşındırıcı koruma üzerindeki baskın kuvvet, çarpışma üzerine yüzeyin reaksiyon kuvveti artar. Kesme sınırları ve normal kuvvet sınırlamaları, sınırların aşınma sırasında ne kadar aşındığını gösterir. Bununla birlikte, erozyonda vücuda etki eden kuvvetlerin miktarı ve ağırlığı, ne kadar büyüme olacağından etkilenir.



Şekil 2. 5. Yüzeyle temastaki bir partiküle etki eden kuvvetler[2].

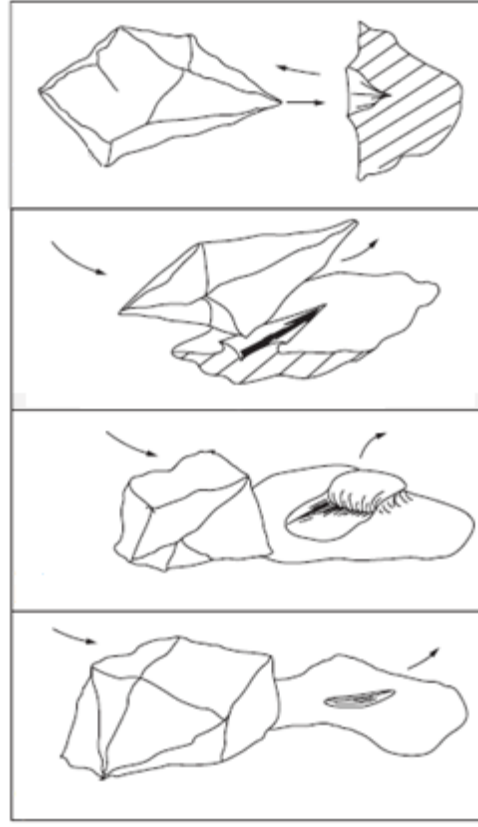
Partikül üzerinde bu kuvvetler oluşurken bu partiküllerin numunelerde oluşturduğu değişim ise Şekil 2.6.' da şematik verilmiştir.



Şekil 2. 6. Aşındırıcı partikülün yüzeylerde oluşturduğu değişim; a) eğik çarpma durumunda tekli çarpma etkisi ve partikül kırılması, b) dik çarpma durumunda çoklu çarpmaya bağlı olarak partikül arası etkileşim[3].

#### 2.1.6.4. Katı partikül erozyonu

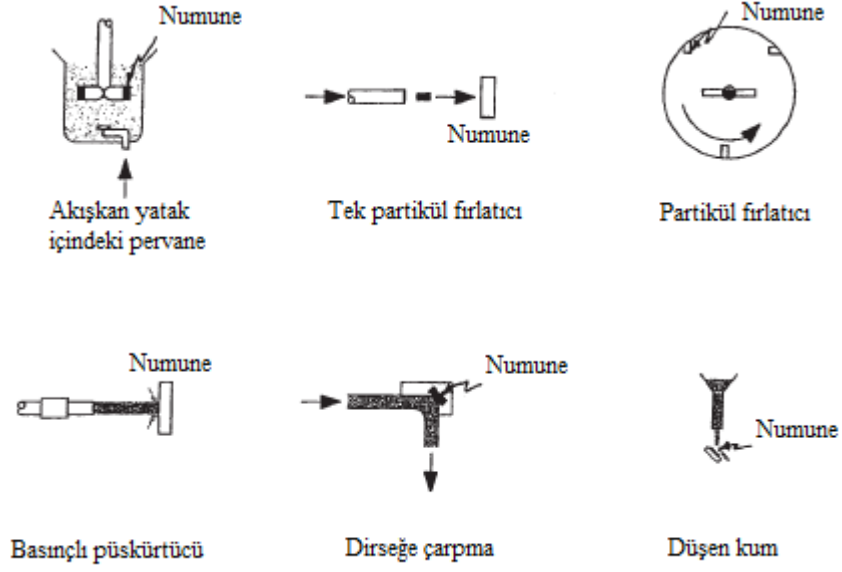
Sıvı veya gaz akışkanı içerisinde belirli hıza sahip aşındırıcının malzeme yüzeyine çarparak yüzeyde hacim kaybı meydana getiren prosese katı partikül erozyonu denir. Bu prosesi etkileyen faktörler partikülün hızı, özellikleri ve aşınma gösterdiği malzemenin özellikleridir. Hız, çarpma açısı ve akışkanın yoğunluk katı partikülün akışını etkileyen en önemli özelliklerdir. Katı partikül erozyonu her ne kadar bir kayıp olarak gözlemlense de imalatta bu aşınmadan yararlandığımız örneğin kumlama ve su jeti ile kesme gibi alanlarda karşımıza çıkmaktadır. Kumlama işlemi malzeme yüzeyinde istenmeyen katmanın temizlenmesi işlemidir. Su jeti işlemi ise yüksek basınç ve hızdaki suyun içine aşındırıcı katılarak yüzey üzerinde kesim işlemi yapılmasıdır[21].



Şekil 2. 7. Katı partikül erozyon türleri[4].

Katı partikül erozyonu için deneysel yöntemler;

Bir malzeme yüzeyinden tekrarlı hareketler neticesinde yüzeyden parçacıklar kalması işlemine katı partikül erozyonu denir. Bu aşınma üzerine farklı parametreler etki etmedirler. Bunlar aşınmanın gerçekleştiği malzeme, aşındırıcı ve akış ile ilgili olan parametrelerdir. Şekil 2.8.'de katı partikül erozyonu şematik resimleri verilmiştir. Erozyonda aşındırıcı malzemenin özellikleri aşınma karakterini belirtmektedir. Aşındırıcı partikülün sertliği, sahip olduğu geometri, miktarı, yüzeye çarpma açısı ve hızı önemli parametrelerdir. Aşınmanın sadece mekanik olarak özellikleri incelenmesi için hava ya da reaktif bir gaz kullanılmalıdır. Bu iki gazın kullanılması kimyasal etkiyi ortadan kaldıracaktır. Yapılmış deneylerde genelde hız üzerinde durulmuştur[5].



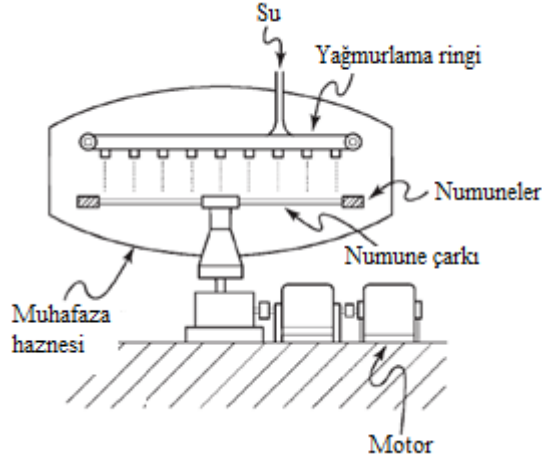
Şekil 2. 8. Katı partikül erozyonu deney düzenekleri görüntüsü[5].

#### 2.1.6.5. Sıvı (su) damlası erozyonu

Yüksek hızda hareket gerçekleştiren bir katının düşük hızdaki bir sıvıya çarpması sonucu sıvı damlası erozyonu gerçekleşir. Yağmur erozyonu aynı zamanda su damlası erozyonu veya nem erozyonu şeklinde de isimlendirilmektedir. Yağış boyunca katı hareketin gerçekleştirilmemesi, yüzeye çarpmasının engellenmesi ya da dayanıklı bir malzeme seçimi bu aşınmadan korunmayı sağlayacaktır[22].

Sıvı damlası erozyonu için deneysel yöntemler;

Sıvı damlası aşınması, sıvının yüksek hızlara çıkıp katı cisme çarpmasıyla değil katının yüksek hızlara çıkıp düşük hızdaki sıvının katıya çarpmasıyla gerçekleşir. Meydana gelen kayıpların önlenmesi için malzeme seçiminin iyi yapılması, sıvı partiküllerin yüzeye çarpmadan parçalanması veya yağmur süresince katı malzemenin hareketinin önlenmesi gerekmektedir. Şekil 2.9.'da örnek test mekanizması verilmiştir. Şematik resimden de görüldüğü gibi hareketi gerçekleştiren katı numunedir [5].



Şekil 2. 9. Su damlası erozyon test düzeneği[5].

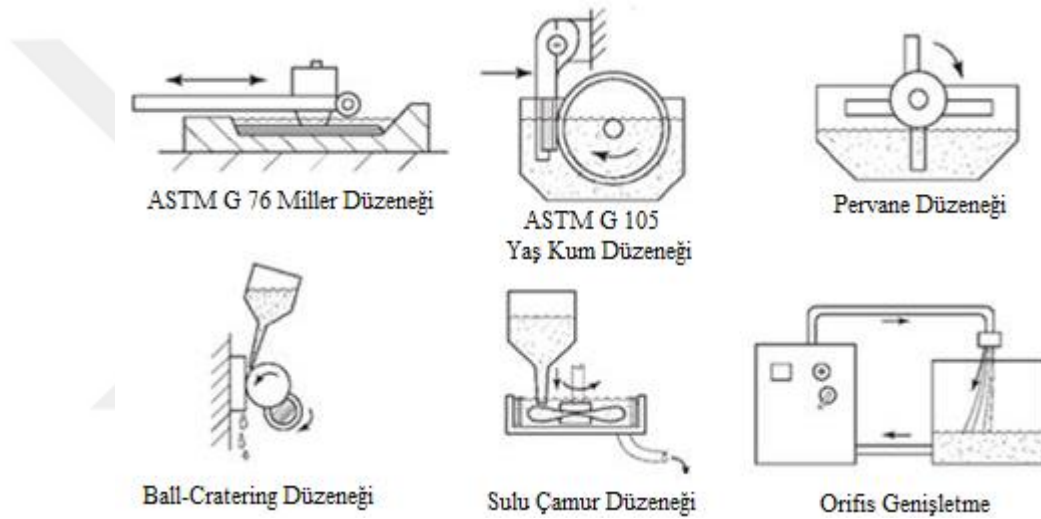
#### 2.1.6.6. Katı partikül taşıyan akışkan ortam (sulu çamur) erozyonu

Sıvı veya gaz akışkan ortamda taşınan katı partiküllü akışkanın taşınma sırasında malzeme yüzeyine çarparak meydana getirdiği aşınma sulu çamur aşınmasıdır. Boru hatlarında ve pompa düzeneklerinde çok karşılaşılan bir aşınmadır. Aşınma sırasında aşınmayı etkileyen parametreler partikülün sertliği, ortamdaki katı yoğunluğu, partikül boyutu, partikülün hareket hızı ve çarpma açısı faktörleriyle karşılaşılmaktadır. Bunların dışında partikülün geometrik yapısı ve sıvı ortam içerisindeki oksijen miktarı diğer etken parametreler arasında gösterilebilir. Partikül sertliğinin artması aşınma miktarını arttırmaktadır. Boru hattında aşınmanın yüksek olduğu bölgeler dirsekler ve redüktör bölgesidir. Akışkan içerisindeki katı yoğunluğunun artması aşınmayı arttırmaktadır. Bu aşınmanın önlenmesi için malzeme tayini sırasında taşınacak olan malzemedен daha sert yüzeye sahip malzemenin seçilmesi, akışkan hızının belirlenirken gereksiz hızların seçilmemesi, taşınan katı yoğunluğunun büyük seçilmemesi ve sistemdeki boru hattının dönmesinin sağlanması gibi çözümler ekipman ömrünü artırmayı sağlamaktadır[22].

Sulu çamur erozyonu için deneysel yöntemler;

Sıvı ya da gaz akışkan içerisinde katı partiküllerin malzeme yüzeyinden parçacıklar koparması olayına sulu çamur erozyonu denilmektedir. Pompalar bu aşınmaya verilebilecek en somut örneklerdir. Pompalanabilen çimento harcı da yine aynı

örnekler arasında verilebilir. Çimentonun boru hattı içerisinde taşınması sırasında aşındırıcı partiküller boru yüzeyinden parçacıklar kopararak deformasyon meydana getirmektedir. Şekil 2.10.'da sulu çamur erozyonuna deney düzeneğine ait şematik gösterim verilmiştir. Miller testi en yaygın kullanılan tipidir. Bu test düzeneği sayesinde farklı aşındırıcı ortamlarda kullanılan pompaların aşınması ve aşındırıcılığın etkisini karşılaştırmak mümkündür. Bu deney sonucundan Miller numarasına erişilmektedir. Bu Miller numarasının büyüklüğü ortamın aşındırıcılığını büyüklüğünü bize vurgulamaktadır[5].



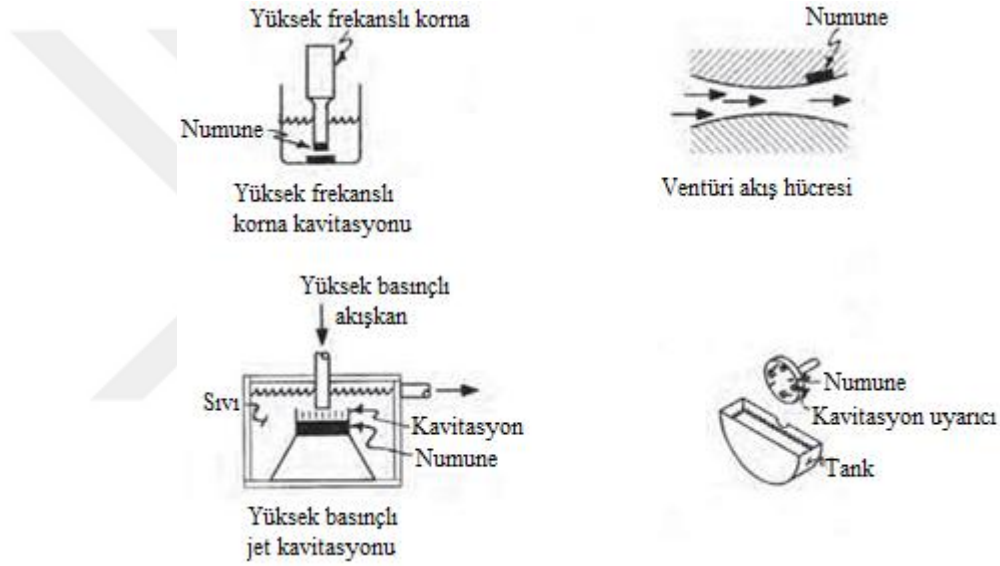
Şekil 2. 10. Farklı erozif aşınma test düzenekleri görüntüsü[5].

### 2.1.6.7. Kaviteasyon erozyonu

Kaviteasyon erozyonu sıvı ortamda çalışan ekipmanlarda ani basınç değişiminden kaynaklı ortaya çıkan ses dalgaları frekansının yüzeyde oluşturduğu kabarcıkların patlamasıyla deformasyona uğratması işlemi olarak adlandırılır. Kaviteasyon erozyonuna karşı dayanım gösterecek malzeme bulunamamıştır. Birleşiminde kobalt bulduran malzemeler diğer malzemelere oranlar dayanımı daha fazladır. Bu aşınmaya çözüm olarak malzeme yüzeyindeki zayıf yerlerin kaplama yapılması ya da yüzeyin değiştirilebilir olması önerilmektedir[22].

Kavitasyon erozyonu için deneysel yöntemler;

Akışkan sıvı ortam içerisinde çalışan ekipmanlar üzerindeki basınç değişimi ile ortaya yüksek frekanslı ses dalgalarını çıkarmaktadır. Yüzeyde ortaya çıkan basınçlı kısımlar anlık çok sayıda kabarcıklar oluşturur, oluşan kabarcıklar alçak basınçlı bölgeden yüksek basınçlı bölgeye yönelir, bu işlem sonunda patlama meydana gelir ve yüzeyden küçük parçacıkların koptuğu gözlemlenir. Bu aşınmanın ortaya çıkardığı malzeme kaybı tespiti için Şekil 2.11.'de verilen deney düzenekleri kullanılabilir[5].



Şekil 2. 11. Kavitasyon erozyonu deney düzenekleri görüntüsü[5].

#### 2.1.6.8. Elektro erozyon

Vakum altında ya da iletken olmayan sıvı ortamda katot ve anot arasında ortaya çıkan akım sebebiyle katot malzeme yüzeyinden küçük parçaların kopması olayına elektro erozyon denir. Bu aşınma türünden imalat alanında pek çok faydalanılmaktadır. Bahsi geçen faydalanmaları örneklendirecek olursak tel erozyon ve dalma tipi erozyondur. Bu üretim metodu sayesinde elektrik iletkenliği olan bütün malzemeleri işlemek mümkündür[22].

## 2.2. SULU ÇAMUR EROZYONU LİTERATÜR İNCELEMESİ

Başlık altında, sulu çamur erozyonu olarak da bilinen katı partikül taşınan akışkan ortamda meydana gelen aşınmayla alakalı makaleler derlenmiştir. Sulu çamur erozyonu deney mekanizması olarak kullanılarak yapılan deneysel çalışmalara göz gezdirilmiştir. Aşınım aşamaları incelenmiş aşınma başarımı ve aşınmayı etkileyen parametreler ile bu parametrelerin sonuçları incelenmiştir.

Sulu çamur erozyonu (akışkan ortamda katı partikül taşınma erozyonu) birden fazla parametreden etki görmektedir. Bu parametreler şartlarla ilgili taşınım gerçekleştirilen katı partikülün geometrik yapısı, sıvı akışkanın türü, taşınım gerçekleştirilen katı partikülün hacmi ve içerisinde bulunduğu sıvının yoğunluğu, çarpma hızı, çarpma açısı ve akışkan ortam sıcaklığı sayılırken[23–26], aşınma gerçekleşen malzeme ile ilgili tokluk, sertlik gibi parametreler önem göstermektedir[27,28]. Bu parametrelerin etkilerinin incelenmesi amacıyla ilgili birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların gerçekleştirilmesi maksadıyla birçok deneysel yöntem ve bu yöntemlerin yapılabilmesi amacıyla deney mekanizmaları oluşturulmuştur[6,29,30]. Desale vd. (2005) deneyin hazne içinde yapıldığı bir mekanizma tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Karıştırıcı pervanenin, hazne tasarımının tabanına eklenmesiyle katı partiküllerin gelişigüzel hareketi en aza indirgenmiştir. Partikül yoğunluğu, çarpma açısı, çarpma hızı ve tane büyüklük parametreleri aşınma üzerinde etkilerinin ölçümü için farklı koşullar ortaya çıkarmışlardır. Bu deneylerde farklı aşınım mekanizmaları görülmüş, farklı açılarda da aşınmış yüzeylerden SEM görüntüleri elde edilmiş, elde edilen görüntüler neticesinde katı partikülün çarpma açılarının belirlenmesin de etki bir görev gerçekleştirmiştir. Bu deney düzeneği sayesinde dirsek, pompa ve borular gibi materyallerde eş verişli yoğunluk oranı altında ve gerçek bir akış hızında aşınmanın bir simülasyonu gibi sonuçlar elde ederek nihai sonuçların çıkarılması hedeflenmiştir[31].

Hutchings ve Shipway (1996), yaptıkları çalışmalarda, erozif aşınımı katı partikülün bir yüzeye çarpma işlemi yaparak yüzeyden malzeme kaldırma sonucunda aşınma gerçekleştirdiklerini ortaya atmışlardır. Gerçekleştirilen bu çalışmada; silika,

silisyum ve alüminyum olarak değişik aşındırıcılardan faydalanılmış, gevrek yapılı soda-kireç camı, borosilikat camı, silikadan imalatı yapılmış cam, kısmi dengelileştirilmiş zirkonya, alümina, silisyum karbür ve bor karbür olmak üzere farklı malzeme numuneleri seçimi yapılmıştır. Bütün aşındırıcıların tüm hedeflenen malzemelere uygulaması yapılmış ve çalışma hava üfürümü gerçekleştiren tesisat aracılığıyla yapılmıştır. Katı partiküllerin numune yüzeyine çarpma açısı ( $90^0$ ) ve hareket hızları 60 m/s olarak belirlenmiştir. Deneyler sonrasında aşınım oranının hem aşındırıcı özelliklerine hem de hedef malzeme ve aşındırıcının çarpma şartlarına bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Aşındırıcı malzemenin sertliği aşınan malzemedan fazla olması aşınmanın fazla olduğunu ve girinti sebepli kırık şeklinde olduğu, fakat aşındırıcı malzeme aşınan malzemedan daha az sertliğe sahipse aşınma az ve küçük çaplı çentiklerin olduğu görülmüştür[32].

Wheeler ve Wood (1999) yapmış oldukları deneylerde, tungsten ve silisyum karbür altlık üzerine kimyasal buharla biriktirme (CVD) metoduyla uygulanmış 10-47  $\mu\text{m}$ 'lik elmas kaplamalarda yüksek hızlarda hava üflenen ve hazneli tipe sahip sulu çamur olmak koşuluyla iki farklı erozif aşınma deney mekanizması kullanarak katı partikül erozyon deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çarpma açısı olarak normal çarpma açısı ( $90^0$ ) ve aşındırıcı olarak silis kumu kullanarak deneyleri yapmışlardır. Bu deney düzeneğinde ortalama partikül çapı 135  $\mu\text{m}$  çarpma hızının 16 m/s olduğu ve ortalama partikül çapının 235  $\mu\text{m}$  çarpma hızının 28 m/s olduğu değerlerin seçimi gerçekleştirilmiştir. Hava üfleme gerçekleştiren deney düzeneğindeyse partiküllerin ortalama çapı 194  $\mu\text{m}$  olan silis kumu sırası ile 63, 148 ve 268 m/s çarpma hızı değerlerinde seçilmiştir. Yapılan erozif aşınma testlerinde sonra elde edilen sonuçlar neticesinde sinterlenmiş tungsten karbür ve paslanmaz çelik aşınma değerleri karşılaştırılmıştır. Deneyler gerçekleştirilirken kaplama malzemenin maruz kaldığı aşınım mekanizmalarının tespitini sağlamak için deney öncesi ve deney sonrasında numunelerin yüzeyler taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. 268 m/s hızda gerçekleştirilmiş olan deneylerde kaplama malzemelerin aşınma süresinin 5 dakika ile 185 dakika arasında değiştiği gözlemlenmiştir. Ek olarak kimyasal buharla biriktirme (CVD) yöntemi ile elde edilmiş 15  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki elmas filminin kaplamasız SiC Hexoloy SA'ya göre aşınım direncinde ciddi oranda artış göstermiş olduğu ve CVD elmas kaplamalı SiC' nin çok taneli elmasa (PCD) göre neredeyse 200 kat erozif aşınma direnci olduğu gözlemlenmiştir[33].

Patil vd. (2011) yaptıkları çalışmalarda, aşındıran malzeme seçimini silika kumu olarak kullanmış olup alüminyum malzeme numunesine ait erozif aşınma direncini gözlemlemişlerdir. 6,6 litre hacme sahip hazneli yapıya sahip sulu çamur deney mekanizmasından yararlanarak çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Düzenek içinde iki farklı numune aynı zamanda bağlanabilme imkânına sahiptir. Aşındırmanın çarpma açılarının 15'er derece farklarla ( $0^{\circ}$  ile  $90^{\circ}$ ) değiştirilmesi için ayarlanabilme özelliği bulunan bir bağlantı tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Malzeme numuneleri 40x4x2 mm boyutlarında olacak biçimde hazırlığı yapılmıştır. Silika kumu sırası ile 225  $\mu\text{m}$  (-150  $\mu\text{m}$ , +300  $\mu\text{m}$ ), 505  $\mu\text{m}$  (-300  $\mu\text{m}$ , +710  $\mu\text{m}$ ) ve 855  $\mu\text{m}$  (-710  $\mu\text{m}$ , +1000  $\mu\text{m}$ ) olacak şekilde üç değişik ortalama partikül boyutunda hazırlığı yapılmıştır. Deney parametreleri Tablo 2.1'de tablo halinde gösterilmiştir[6].

Tablo 2. 1. Erozif aşınma deneyine ait parametreler[6].

No	Çarpma Açısı ( $^{\circ}$ )	Ortalama Partikül Boyutu ( $\mu\text{m}$ )	Katı yoğunluğu (%ağ.)	Hız (m/s)
1	15 ile 90 (6 farklı)	225	20	3,68
2	15 ile 90 (6 farklı)	505	20	3,68
3	15 ile 90 (6 farklı)	855	20	3,68
4	15 ile 90 (6 farklı)	505	30,40	3,68
5	30 ile 45	505	20	5,46 6,91 9,67

Yapılmış olan çalışmalar neticesinde aşağıda verilen çıkarımlara sahip olunmuştur[6];

- En yüksek aşınma değerinin gözlemlendiği  $45^{\circ}$  çarpma açısı değerine kadar çarpma açısı artışı alüminyum aşınım miktarı da arttırmaktadır. Aşınmada  $45^{\circ}$  'den sonraki  $90^{\circ}$  'ye kadar olan açılarda azalma gözlemlenmiştir.
- Tane boyutu yükseldikçe alüminyum aşınma da doğrusal biçimde artış göstermektedir. Düşük açılarda görülen artış miktarı, yüksek açılarda görülen artış oranına göre daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.
- Yoğunluktaki artış (ağırlık olarak) aşınmanın artışını gerçekleştirmektedir. Yüksek yoğunluklardaki aşınım artışı çok fazla kayda değer değildir. Bu durumda katı konsantrasyonundaki artışın aşınım artışının azalım gösterdiğini ortaya koymaktadır.
- Hız, erozif aşınım üzerindeki en büyük etkidir. Yüksek hızda, azaltılmış zamandaki kütle kayıpları kayda değer sonuçlardır[6].

Desale vd. (2006) yapmış oldukları çalışma neticesinde, AA6063 ve AISI 304L sünek malzemelerinin aşınma oranlarını incelemek için hazneli tipe sahip sulu çamur deney mekanizmasından yararlanmışlardır. Kuvars, alümina ve silisyum karbür olmak üzere üç çeşit aşındırıcı yapıya sahip malzeme seçimi yapılmıştır. Bu aşındırıcı malzemelerin ortalama olarak partikül boyutu  $550 \mu\text{m}$  olarak seçilmiştir. Partikül çarpma hızıysa  $3 \text{ m/s}$  belirlenmiştir. Deneyler mekanizması  $15^{\circ}$  ile  $90^{\circ}$  aralığındaki çarpma açılara sahip ve %10 katı yoğunluklu karışım ile yapılmıştır. Gerçekleştirdikleri çalışma sonucundan elde etmiş oldukları sonuçlar aşağıda özetlenerek verilmiştir[34];

- İki malzemedeki de düşük açıda yüksek aşınma gerçekleşmiştir.
- Farklı aşındırıcıların bir malzeme için değerleri farklı olurken maksimum aşınmanın olduğu açı tüm aşındırıcılar için aynı olduğu görülmüştür. Bu çıkarım sonucunda aşınmanın aşındırıcı özelliklerine bağlı olmadığı ve yalnızca aşınan malzeme numunesinin özellikleriyle doğrudan ilişki içinde olduğunu saptanmıştır. Maksimum aşınmanın alüminyumda  $15^{\circ}$  'de gerçekleşirken paslanmaz çelik için bu değer  $22,5^{\circ}$  'de olduğu gözlemlenmiştir.

- Sünek malzemelerdeki erozif aşınım değeri, aşındıran geometri ve sertlik değerinden farklı özellikler ile de değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Geometri ve sertliğin yüksek açılara oranla düşük açılarda daha etkili olduğu görülmüştür.

Desale vd. (2009) yapmış oldukları çalışma neticesinde, erozif aşınımın hesaplanması için ampirik bir model meydana getirmişlerdir. Model bozulmanın ve kesme aşınımının payının sahip olduğu bir açıda aşınım yaklaşımını ifade etmektedir. Normal bir çarpma açısındaki ( $90^0$ ) aşınımı yalnızca deformasyon yardımcı olmaktadır. Bu sebeple normal çarpma aşınımında sağlanmış çıkarımlar aşağıda verilmiştir[35];

$$E_{D90} = 6,62 \times 10^{-14} \times K_{(HP/HT)} \times V^{2,02} \times d^{1,62} \times C_w^{-0,28} \quad (2.1)$$

K: sabit,

$$\begin{aligned} H_P/H_T \leq 6 \text{ için} \quad K_{(HP/HT)} &= 0,42 \\ 6 < H_P/H_T \leq 12,3 \text{ için} \quad K_{(HP/HT)} &= 1,0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$12,3 < H_P/H_T \leq 27,5 \text{ için} \quad K_{(HP/HT)} = 1,83$$

Rastgele seçilen bir  $\alpha$  açısındaki deformasyon aşınımına katkısı aşağıda verilen bağıntıdan hesaplanabilmektedir.

$$E_D(\alpha) = E_{D90}(\sin \alpha)^3 \quad (2.3)$$

Benzer şekilde herhangi bir  $\alpha$  çarpma açısı anındaki kesme aşınımının hesaplanması için aşağıda belirtilen bağıntı kullanılmaktadır.

$$E_C = 6,204 \times 10^{-12} \times f(\alpha) \times (MSF)^{-0,7974} \times (H_T)^{-0,7155} \times V^{2,35} \times d^{1,55} \times C_V \quad (2.4)$$

$$f(\alpha) = 0,9889 \left[ \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{\alpha}{\alpha_{max}}\right) \right]^{0,5898} \quad 0^0 \leq \alpha \leq \alpha_{max} \quad (2.5)$$

$$f(\alpha) = 0,9186 \left[ \sin\left(\left(\frac{\pi}{2}\right) - \left(\frac{\pi}{2}\right) \times \left(\frac{\alpha - \alpha_{max}}{90 - \alpha_{max}}\right)\right) \right]^{4,3044} \quad \alpha_{max} \leq \alpha \leq 90^0 \quad (2.6)$$

Bunlara bakarak, sünek malzeme özelinde herhangi bir katı-sıvı karışımı durumunda, herhangi bir çarpma açısı anındaki toplam aşınım miktarı  $E_w$ , bu açıdaki deforme ve kesme aşınımları basit bir toplamayla sonuca varılabilir. Toplam aşınma miktarı formülü aşağıdaki bağıntıdır.

$$E_w = E_D(\alpha) + E_C \quad (2.7)$$



## BÖLÜM 3

### MATERYAL ve METOD

Aşındırıcı partikül hazırlanmasında konsantrasyonu %10 olarak sabit kalacak şekilde deneyler üç farklı parametre olan hız, açı ve zaman parametrelerine bağlı olarak deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler de hız 2.5, 4, 5.5 m/s olarak belirlenmiştir. Yapılan deneylerde açı ise  $30^0$ ,  $60^0$  ve  $90^0$ , zaman ise 1, 2 ve 3 saat olacak şekilde belirlenmiştir. Deneyler yapılmadan önce numuneler hazırlanmış ve tartımı yapılmıştır. Daha sonrasında deneyler gerçekleştirildikten sonra tekrar hassas terazi yardımıyla numunelerin tartım işlemi gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1. KULLANILAN MALZEMELER

Deney tasarlanırken iki adet malzeme seçimi yapılmıştır. Bunlardan birisi St 52 çeliği diğeri ise kaplama malzeme olan Sulzer Metco 8295 malzemesidir.

##### 3.1.1. St 52 Çeliği

Sade karbonlu çelikler sınıfında bulunan St 52-3 çeliğini oluşturan temel elementler C (karbon)'un yanı sıra Mn, P ve S elementleri başlıca gibi element topluluğuna sahiptir. Bu çelikler inşaat ve sanayi alanında, boru, profil, çubuk yapımı ve sıcak haddelenmiş sanayi profili yapımında rol oynamaktadır. Otomotiv sektöründe özellikle çok kullanılmaktadır. Şekillendirme konusundaki üst düzey performansından dolayı sanayi sektöründe kullanımı sıklıktadır. Sanayi sektöründe granüle cüruf taşıma sisteminde kullanılan boru malzemesi olarak seçilen bu çeliğin aşınma direnci performansı incelenmiştir.

Tablo 3. 1. St 52 malzemenin kimyasal kompozisyonu.

<b>St 52-3 Numune Kimyasal Kompozisyonu</b>										
	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti	N
<b>Miktar</b>	0,20	1,49	0,41	0,017	0,016	0,030	0,004	0,005	0,0003	0,006
<b>(%)</b>										

### 3.1.1.1. St 52-3 Numune Hazırlanması

Deney numuneleri 5mm x 6mm x 30mm olacak şekilde üretimi yapılarak ön hazırlıkları olan kesim sonrası yüzeyin yıkanıp, zımpara işlemi gördükten sonra tekrar yıkanarak deneye hazır hale getirilmiştir.

### 3.1.2. Kaplama Malzeme Sulzer Metco 8295

Tablo 3. 2. Sulzer Metco 8295 malzenin kimyasal kompozisyonu[7].

<b>Sulzer Metco 8295 Kimyasal Kompozisyonu</b>										
	Fe	Al	B	Cu	Cr	C	Mn	Mo	Si	Diğer(maks.)
<b>Miktar(%)</b>	63,75	-	4,0	-	29,0	-	-	-	1,75	1,5

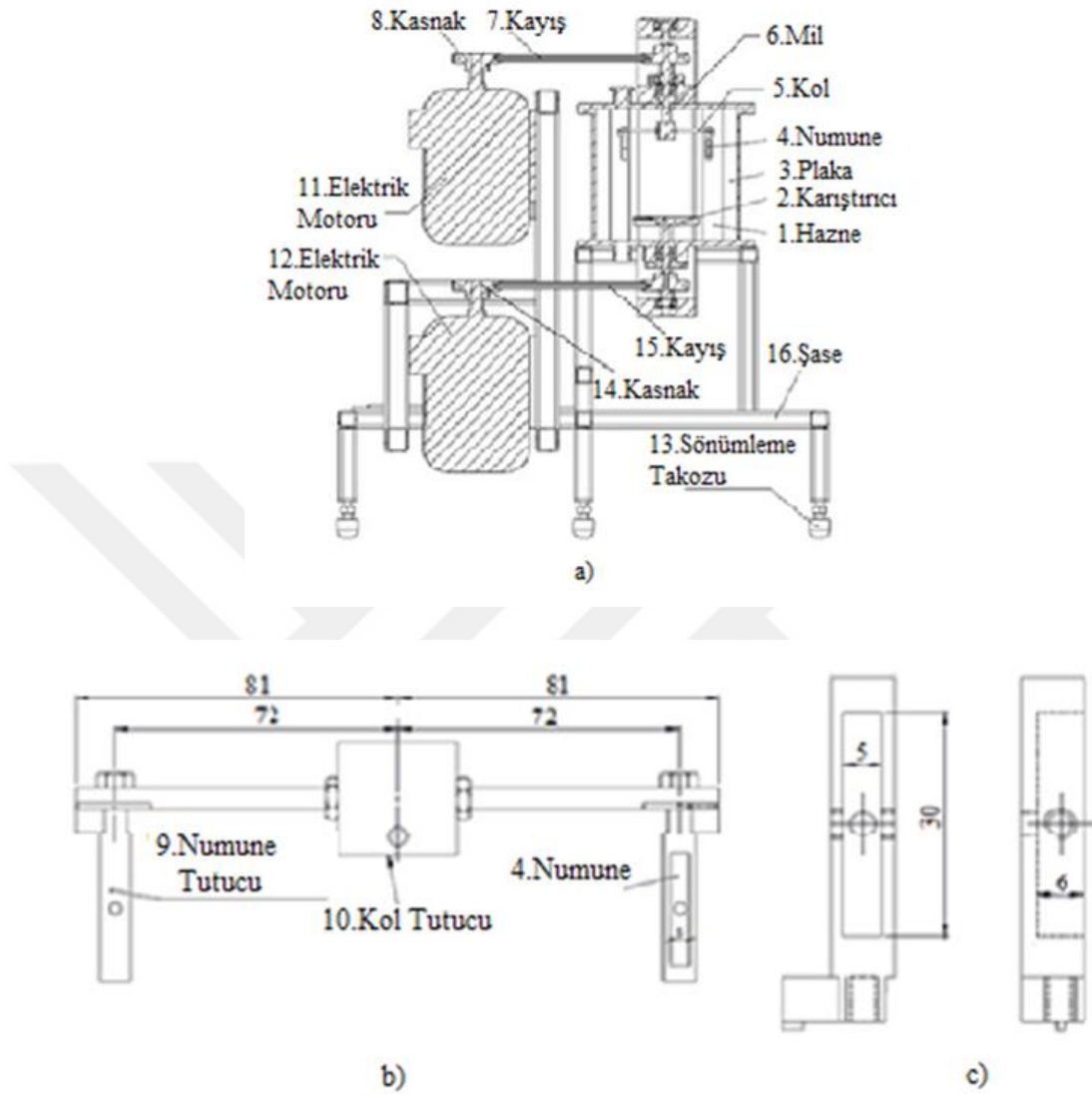
### 3.1.2.1. Sulzer Metco 8295 Numune Hazırlanması

Deney numuneleri 5mm x 6mm x 30mm ölçülerinde olacak şekilde üretimi gerçekleştirilip, üretimi gerçekleştikten sonra yıkanıp zımpara işlemi uygulandıktan sonra tekrar deneye hazır hale getirilmiştir.

### 3.2. SLURRY (Bulamaç) AŞINMASI TEST CİHAZI

Sulu çamur erozyonu, sıvı bir ortamda katı partiküllerin yüzeylerden malzeme parçacıklarını çıkarmasıdır. Bu sıvı ortam akışkan gaz da olabilir. Sulu çamur erozyonuna etki eden parametrelerin optimizasyonunu sağlamak amacıyla tasarlanan ve inşa edilen deney düzeneği (Şekil 3.1), More ve ark. [40] tarafından geliştirilen deney düzeneği ile aynı yöntemle çalışır. 240 mm iç çap ve 10 lt hacme sahip olan hazne içerisinde altı adet plaka çevresel olarak eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Haznenin alt kısmında dört kanatlı bir karıştırıcı pervane bulunur. 1.1 kW güce sahip devir ayarlı bir AC motor, karıştırıcıyı çalıştırıyor. Numuneler, numune tutucular aracılığıyla sisteme bağlanır. Şekil 3.1.b'de görüldüğü gibi, numune tutucuları kollar kullanılarak deneyler gerçekleştirilir.

Deney düzeneğinde çakma açısının değişimi numune tutucuların açısıyla ayarlanmaktadır. Deneyde numune tutucuları birden fazla birçok defa kullanılmış ve dönmeye çapı 72 milimetredir



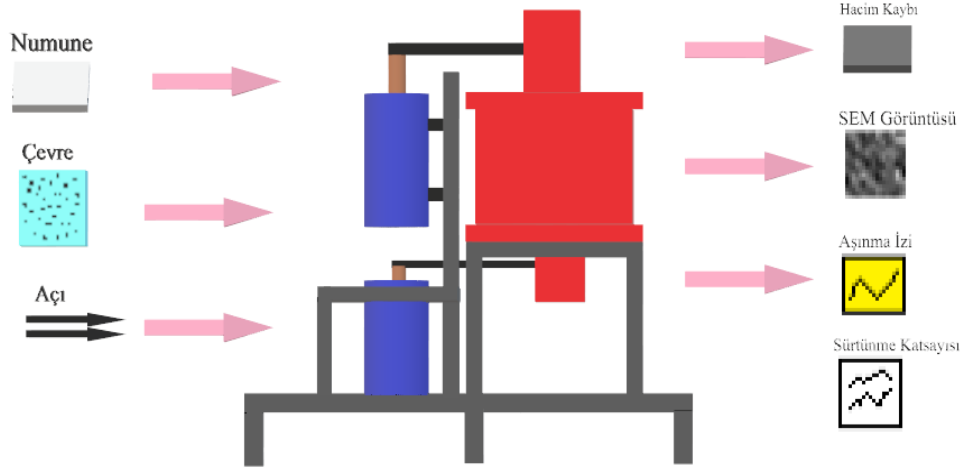
Şekil 3. 1. Deney Düzenek teknik resmi a) düzenek kesit resmi b) tutucu kollar c) numune tutucu.



Şekil 3. 2. Deney düzeneğinde kullanılan elektrik motorlarının sürücü ve elektrik panosu görüntüsü.



Şekil 3. 3. Üç boyutlu tasarıma göre imal edilmiş deney düzeneği görüntüsü.



Şekil 3. 4. Test Cihazı çalışma prensibi.

### 3.3. SEM CİHAZI VE GÖRÜNTÜLERİ

Deney süresince SEM görüntüleri, Karabük Üniversitesi MARGEM birimine bulunan Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka SEM cihazı kullanılarak çekilmiştir. Şekil 3.4.'te cihazın bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 5. SEM cihazı (Margem tarafından paylaşılmış görüntüsüdür) görüntüsü.

### 3.4. AĞIRLIK ÖLÇÜMÜ

Numuneler hazırlanma sürecinden sonra, DENSI marka HZY 320A model  $10^{-4}$  gram hassasiyete sahip hassas terazide tartılmışlardır (Şekil 3.5). Hassas terazi rüzgâr, titreşim vb. gibi dış etkenlerden etkilenmeyecek bir yere konumlandırılmıştır ve tartımlardan önce üzerinde bulunan su terazisi ile cihazın kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Cihaz tartım işlemi yapılmadan bir süre önce açılmış ve bu süreden önce tartım yapılmamıştır. Tartım esnasında değerin doğruluğu için numune 2 dakika tartıda üzerinde bekletilmiş ve okunan değer kayıt altına alınmıştır.



Şekil 3. 6. DENSI HZY 320A model hassa terazi görüntüsüdür.

### 3.5. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK ÖLÇÜM CİHAZI

Yüzey pürüzlülük ölçümü yine Karabük Üniversitesi Margem biriminde bulunan, Portable Surface Roughness Tester cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Cihazın teknik özelliklerine burada ulaşılabilir. Bu cihazda ortalama yüzey pürüzlülük ölçümü ve

2D yüzey alanı ölçümü ve ince film kalınlık ölçümü gerçekleştirilebilmektedir. Şekil 3.6'da cihaza ait bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3. 7. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı görüntüsüdür.

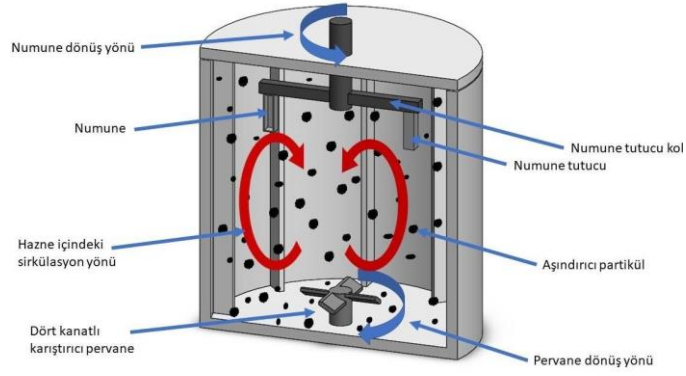
### 3.6. DENEY DÜZENEĞİ

Deney düzeneği bir adet silindirik biçiminde tank, tankın tabanında bulunan dört adet kanata sahip bir karıştırıcı ve numunelerin bulunacağı kapaktan oluşmaktadır. Bu silindirik biçimindeki tankın iç hacmi 10 litredir ve 240 mm iç çaptan oluşmaktadır. Tankın tabanında bulunan dört kanatlı karıştırıcı için AC elektrik motoru bulunmaktadır, bu motor 1,1 kW güce sahip devir ayarlıdır. Numune tutucular üzerine yerleştirildikleri plakada yer alan kademeli boşluklar vasıtasıyla  $0^{\circ}$  - $90^{\circ}$  aralıklarda  $15^{\circ}$  'lik aralıklarla hareket gerçekleştirebilmektedir. Şekil 3.7'de tasarlanan deney düzeneği ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 3. 8. Tasarlanan deney düzeneğine ait görüntü.

Sistemde altı yüzeydeki karıştırıcılar vasıtasıyla su tankı karıştırmaktadır karıştırılmaktadır. Deney düzeneğine göre sisteme bağlanması gereken numuneler 5mm x 6mm x 30mm ölçülerinde ve aşınmayla karşı karşıya kalacak olan alan 150mm<sup>2</sup>'dir. Numunelerin dönme yarıçapları 72mm'dir. Şekil 3.8.'de tasarlanan slurry erozif aşınma deney düzeneğinin bir şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3. 9. Tasarlanmış olan sulu-çamur deney düzeneği şematik gösterimidir.

Tasarlanan deney düzeneği sayesinde istenile malzemelerden istenilen özelliklerde numuneler hazırlanarak slurry erozif aşınma davranışını incelemek mümkün olacaktır. Deneyler öncesinde belirli hesaplamalar yapılarak bu hesaplamalar doğrultusunda planlı bir yolla ilerlemek doğru sonuçlar açısından büyük önem arz etmektedir. TAGUCHI metodu ile deney tasarımı oluşturmak ve sonrasında numuneler hazırlanmalı ve düzeneğe bağlanmalıdır. Deney sonrasında numunelerin kütle kaybı, yüzey görüntü ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmelidir. Bu işlemler sayesinde aşınmadan kaynaklı kütle kaybı, yüzeyde meydana gelmiş olan aşınmadan kaynaklı izler ve aşınma kaynaklı artan yüzey pürüzlülük değerlerine ulaşılabilir. Elde edilmiş olan kütle kaybı, yüzey pürüzlülük ve deney tankı sıcaklık değişim değerleri ANOVA ve RSM ile analiz edilerek deneysel verilerin doğruluk oranı hesaplanmış olur.

### 3.6.1. Numune ve Aşındırıcı Partikül Hazırlanması

Seçilen numunelerin ilk olarak istenilen adette ve 5x6x30 mm ölçülerine sahip olarak hazırlanması gerekmektedir. Daha sonrasında hazırlanan numuneler uygun ölçüdeki zımpara vasıtasıyla aşınacak yüzeylerinin zımparalanması gerekmektedir. Tüm numunelerin yüzey kalitelerini olabildiğince eşit duruma getirmek deney sonuçları açısından büyük bir öneme sahiptir. Numuneler, numune tutucuya bağlanmadan hemen önce saf su yardımıyla temizlenerek kurutucu ile kurutulurak bağlanması

gerekmektedir. Bu işlemlerden sonra numuneler hassas terazi yardımı ile ilk ölçümü yapıp istenilen değerlerde deneye maruz bırakılır. Deney sonrasında düzenekten alınan numune yine saf su yardımıyla temizlenip kurtulduktan sonra ikinci tartım yapılarak maruz kalınan kütle kaybına ulaşılmış olur.

Numunelerin aşınmaya maruz kalabilmeleri için belirli bir yoğunluk değerine sahip sulu-çamur karışımı hazırlanması gerekmektedir. Bu karışım su ve aşındırıcı bir çeşit kumun bir araya gelmesiyle oluşur. Yüzde olarak istenilen oranlara göre su-kum oranı ayarlanmaktadır. Aşınmayı etkileyen parametreler arasında aşındırıcı kum mekanik özellikleri, geometrisi, boyutu ve kütlece yoğunluğu da bulunmaktadır. Aşındırıcı kum boyutu endüstriyel elekler vasıtasıyla elenerek mikron boyutunda elemesiyle elde edilir. Deney sonrasında aşınma beklenen deney numunelerinden hariç kumun boyutlarında da oluşan değişim göz önünde bulundurularak her deney yapılmadan önce kum değiştirilerek yeni su-kum karışımı kullanılmıştır.

### **3.6.2. TAGUCHI, RSM ve ANOVA**

Deneylemlerden önce TAGUCHI metodu yardımıyla tüm parametreler ve bu parametrelerin değişik kombinasyonları ile deney tasarımı yapımı gerçekleştirilmelidir. Bütün parametrelerin birbiriyle oluşacak olan bütün deneylemlerden farklı olarak TAGUCHI deney tasarımı sayesinde ihtiyaç duyulan en az deney sayısı belirlenerek bu deneylemler gerçekleştirilmelidir.

Response Surface Metodu (RSM) kullanılarak kütle kaybı, yüzey pürüzlülük değerleri ve tankta meydana gelen sıcaklık değişimleri matematiksel olarak modellenip diğer deney sonuçlarına ilişkin optimal sonuçlar oluşturulmaktadır. Her bir parametre için regresyon denklemi (yaklaşım denklemi) çıkartılıp, tahmini ve deneysel veriler karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucunda verilerin doğruluğunu bize veren  $R^2$  değeri elde edilmektedir. Tablo 3.3.'te örnek olarak TAGUCHI L9 deney tasarımı verilmiştir. Son olarak ANOVA metodu kullanılarak her parametrenin slurry erozif aşınma deney sürecinde nasıl etkili olduğu analiz edilmektedir.

Tablo 3. 3. Örnek TAGUCHI L9 deney tasarımı.

Deney	Hız [m/s]	Açı [ <sup>0</sup> ]	Yoğunluk [%]
1	2,5	30	10
2	2,5	60	10
3	2,5	90	10
4	4	30	10
5	4	60	10
6	4	90	10
7	5,5	30	10
8	5,5	60	10
9	5,5	90	10

## BÖLÜM 4

### BULGULAR

#### 4.1. KÜTLE KAYBI

Deney numuneleri belirlenen yöntemler vasıtasıyla hazırlanarak deneyden önce DENSI marka HZY 320A model  $10^{-4}$  gram hassasiyete sahip hassas terazi ile ilk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Numune aşınmaya maruz bırakılıp deney bitiminde tekrardan hassas terazi yardımıyla ağırlık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Burada ölçüm yapılırken ortam koşulları deney sonucunu etkilememesi amacıyla eşit tutulmuş ve bütün numuneler aynı işlemlerden geçirilmiştir. Tablo 4.1 ve 4.2’de ağırlık ölçüm sonuçları verilmiştir.

Tablo 4. 1. St-52 çeliği ağırlık ölçüm sonuçları

Deney No	Hız(m/s)	Zaman(saat)	Açı( $^{\circ}$ )	İlk Ölçüm(g)	Son Ölçüm(g)
1	2,5	1	30	6,9134	6,9112
2	2,5	2	60	6,9052	6,9018
3	2,5	3	90	6,9146	6,9063
4	4	1	60	6,9190	6,9150
5	4	2	90	6,9061	6,8885
6	4	3	30	6,8978	6,8805
7	5,5	1	90	6,9089	6,8686
8	5,5	2	30	6,8914	6,8623
9	5,5	3	60	6,8920	6,8810

Tablolar incelendiğinde, Tablo 4.1.'den yola çıkarak 30<sup>0</sup> açıda St-52 çelik malzeme numunesin de meydana gelen aşınma miktarından kaynaklı kütle kaybı hız arttıkça artmıştır. 30<sup>0</sup> açıyla 5,5 m/s hızla yapılan deneyde kütle kaybı diğer hızlara oranla daha fazla olduğu gözlenmiştir. 60<sup>0</sup> yapılan St-52 çeliği malzeme numunesi içinde aynı çıkarım söz konusudur. İncelemeler sonucundan hızın artmasıyla aşınma miktarından dolayı kütle kaybı artmıştır. En fazla aşınmadan kaynaklı kütle kaybı 60<sup>0</sup> açı ve 5,5 m/s hızla yapılan deney numunesinde görülmüştür.

90<sup>0</sup> yapılan deneyde St-52 çelik malzemesi numunesin de hız arttıkça aşınmadan kaynaklı kütle kaybı artmıştır. 90<sup>0</sup> açı ve 5,5 m/s hızla yapılan deney de aşınmalardan kaynaklı malzeme de kütle kaybı en fazla görülmüştür.

Tüm açılar ve hızlar dikkate alındığında en fazla aşınmadan kaynaklı kütle kaybı oranı 90<sup>0</sup> açı ve 5,5 m/s hızla yapılan deney numunesinde görülmüştür.

Tablo 4. 2. Sulzer Metco 8295 Kaplama malzemenin ağırlık ölçüm sonuçları.

Deney No	Hız(m/s)	Zaman(saat)	Açı( <sup>0</sup> )	İlk Ölçüm(g)	Son Ölçüm(g)
1	2,5	1	30	6,4967	6,4944
2	2,5	2	60	6,4937	6,4920
3	2,5	3	90	6,4507	6,4468
4	4	1	60	6,4998	6,4941
5	4	2	90	6,5281	6,5164
6	4	3	30	6,5285	6,5178
7	5,5	1	90	6,5149	6,4961
8	5,5	2	30	6,4823	6,4625
9	5,5	3	60	6,5156	6,4982

Tablolar incelendiğinde, Tablo 4.2.'den yola çıkarak 30<sup>0</sup> açıda Sulzer Metco 8295 malzemesi numunesin de meydana gelen aşınma miktarından kaynaklı kütle kaybı

hız arttıkça artmıştır. 30<sup>0</sup> açıyla 5,5 m/s hızla yapılan deneyde kütle kaybı diğer hızlara oranla daha fazla olduğu gözlenmiştir.

90<sup>0</sup> açıyla yapılan deneyler incelendiğinde Sulzer Metco 8295 malzemesi deney numunesinde görülen aşınmadan kaynaklı kütle kaybı hız arttıkça artış göstermiştir.

Sulzer Metco 8295 malzeme deney numunesi incelendiğinde de yine St-52 çeliği malzemesi deney numunesinin gösterdiği davranışı göstermiştir. Aşınmaya bağlı olarak gerçekleşen kütle kaybı en fazla 90<sup>0</sup> açı ve 5,5 m/s hızla gerçekleştirilen deney numunesinde görülmüştür.

#### 4.2. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜK

Yüzey pürüzlülük ölçümü Karabük Üniversitesi Margem biriminde gerçekleştirilmiştir. Portable Surface Roughness Tester cihazı kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar St-52 çelik malzeme numunesi için Tablo 4.3., Sulzer Metco 8295 Kaplama malzeme numunesi için Tablo 4.4.'te verilmiştir.

Tablo 4. 3. St-52 Çelik Malzeme numunesi deney sonu yüzey pürüzlülük değerleri.

Hız (m/s)	Zaman (h)	Açı(° )			Ra(µm)
2.5	1	30	60	90	0,584
2,5	2	60	90	30	0,554
2,5	3	90	30	60	0,546
4	1	60	90	30	0,571
4	2	90	30	60	0,499
4	3	30	60	90	0,465
5,5	1	90	30	60	0,562
5,5	2	30	60	90	0,418
5,5	3	60	90	30	0,447

Yüzey pürüzlülük değerleri sonuçlarına baktığımızda açı değıştikçe yüzey pürüzlülüğüne etkisi görülmemiştir. Hız ve zaman parametreleri sabit tutulduğunda açının yüzey pürüzlülüğüne etkisi görülmemiştir.

2,5 m/s hız değerini incelediğimizde zaman arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Numune daha uzun süre deneye maruz kaldığı için yüzey pürüzlülüğünde kademeli olarak düşüş gözlemlenmiştir.

4 m/s hız değerinin içinde aynı sonuca ulaşmak mümkündür. Deney numunesinin uzun süre deneye maruz kalmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü görülmüştür.

Burada 2,5 m/s hızda bir saat süreyle deneye maruz kalan ve 4 m/s hızda bir saat deneye maruz kalan numuneleri incelediğimizde hız arttıkça yine yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü görülmüştür.

2,5 m/s, 4 m/s ve 5,5 m/s hızlarda üç saat yapılan deneyler incelendiğinde hız arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü sonucuna varılmıştır.

Tablo 4. 4. Sulzer Metco 8295 kaplama malzeme numunesi deney sonu yüzey pürüzlülük değerleri.

Hız (m/s)	Zaman (h)	Açı(°)			Ra(μm)
2,5	1	30	60	90	20,854
2,5	2	60	90	30	18,608
2,5	3	90	30	60	16,363
4	1	60	90	30	19,069
4	2	90	30	60	14,823
4	3	30	60	90	13,911
5,5	1	90	30	60	18,334
5,5	2	30	60	90	12,371
5,5	3	60	90	30	13,140

Hız ve zaman parametreleri sabit tutulduğunda açıdan kaynaklı yüzey pürüzlülük değerinde bir değişim gözlemlenmemiştir. Açı parametresinin yüzey pürüzlülük değerine etkisi görülmemiştir.

Hız parametresi sabit tutulduğunda, örneğin 2,5 m/s hızı deney sonu yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını incelediğimizde zaman parametresi arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin azaldığı görülmüştür.

4 m/s hız değeri yüzey pürüzlülük değerlerini incelediğimizde yine zamanın artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü gözlenmiştir.

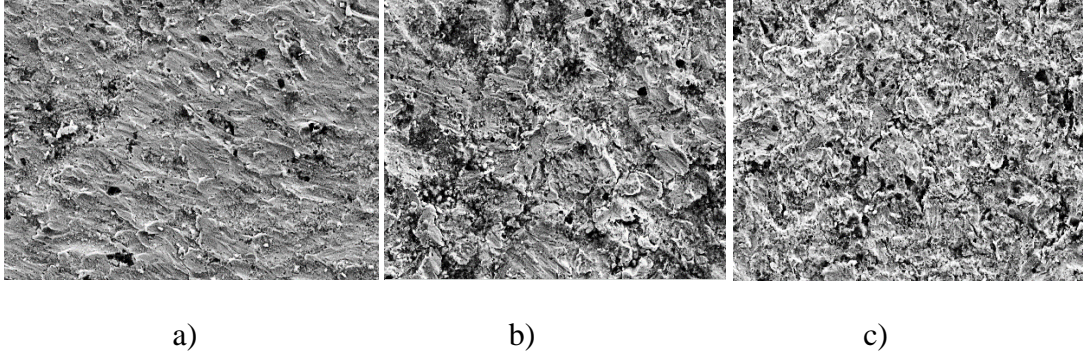
5,5 m/s hız değeri deney sonuçlarına baktığımızda sürenin artmasıyla yüzey pürüzlülük değerinin düştüğü gözlenmiştir. Ancak bu kademeli olarak bir düşüş olmamıştır.

Sabit zamanda, farklı hız değerlerinde yapılan deneyler incelendiğinde hız değerinin arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin düşüş gösterdiği görülmüştür. Örneğin bir saatte yapılan 2,5 m/s ve 4 m/s hızda yapılan deneyler incelendiğinde düşük hız 20,854  $\mu\text{m}$  çıkan değer 4 m/s hız da 19,069  $\mu\text{m}$  olarak çıkmış ve hızın arttıkça yüzey pürüzlülük değerinin düştüğünü gözler önüne koymuştur.

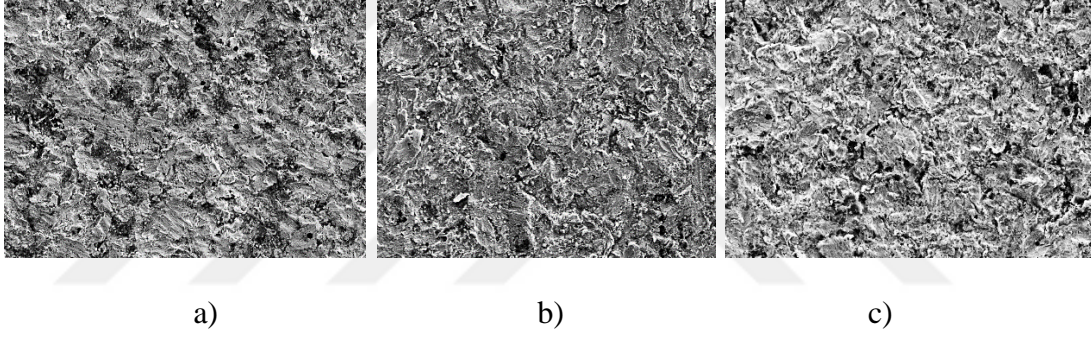
### **4.3. SEM GÖRÜNTÜLERİ**

#### **4.3.1. St-52 Malzeme Numunesi SEM Görüntüleri**

St-52 çelik malzeme numunesinin 2,5 m/s, 4 m/s ve 5,5 m/s hızlarda deneylere tabi tutulduktan sonra yüzeyde oluşan deformasyonları incelemek amacıyla SEM görüntüleri alınmıştır. Bu görüntülerde değişken sadece hızdır. Deney numuneleri aynı açı ve sürede deneye maruz kalmışlardır. Hızın deney numunelerinin üzerindeki yol açtığı deformasyonlar Şekil 4.1.' de verilmiştir.



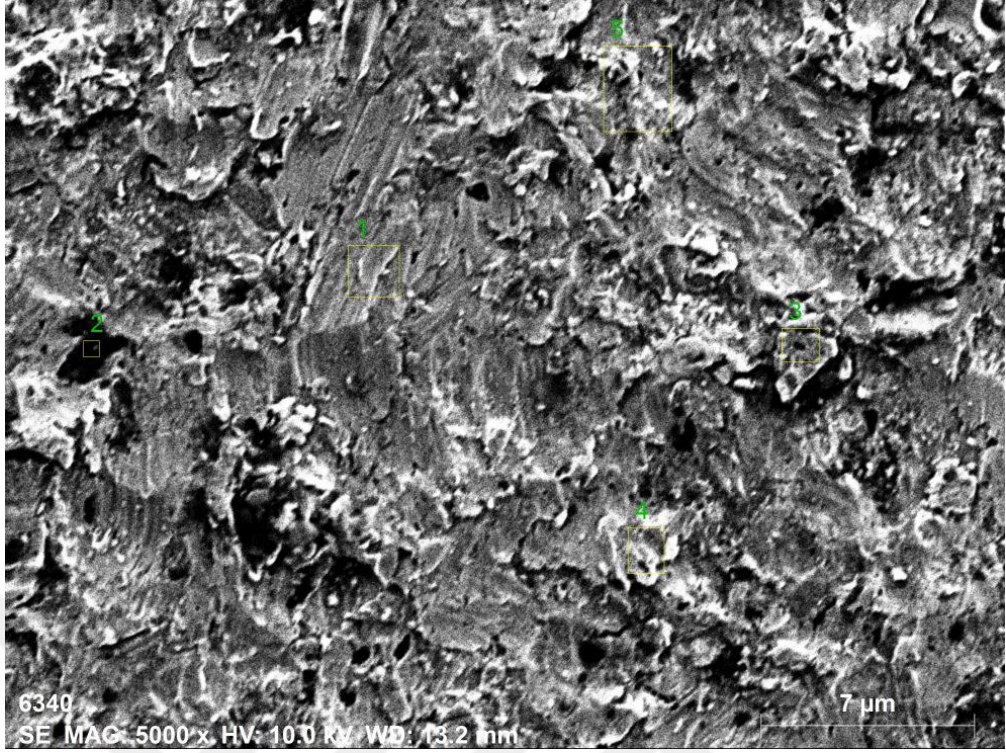
Şekil 4. 1. St-52 numunesine ait 1 saat sürede sabit açıda yapılmış a) 2,5 m/s, b) 4 m/s, c) 5,5 m/s hızlarda yapılmış deneylerin SEM görüntüleridir.



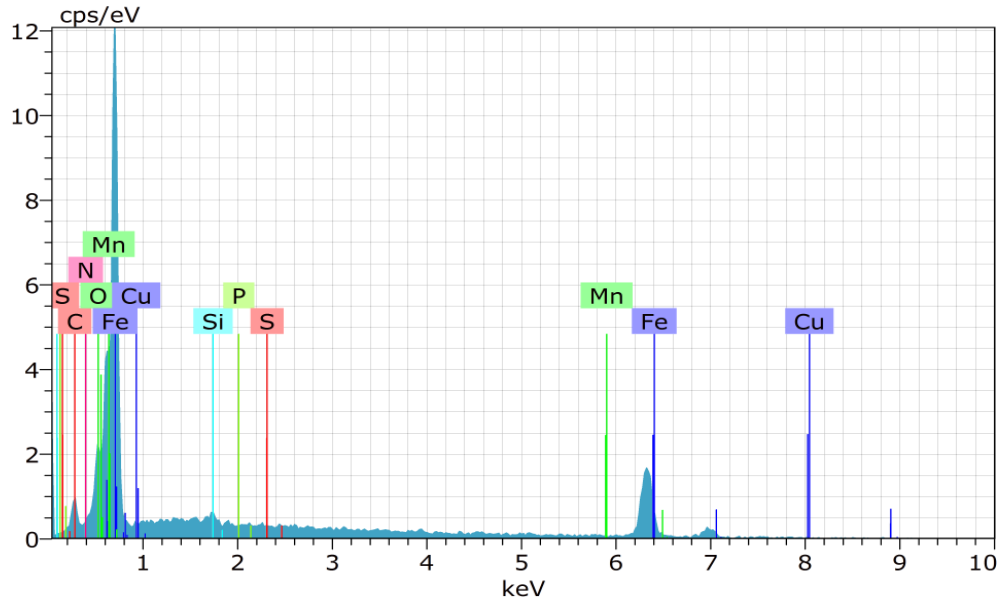
Şekil 4. 2. St-52 numunesine ait 4 m/s hızda yapılmış a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat yapılmış deneylere ait SEM görüntüleri.

Deney süresi uzatıldığında yüzeyde oluşan deformasyonlar daha belirgin hale gelmektedir. Buna bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerinin düştüğünü Tablo 4.3.'te açık olarak görülmektedir.

Hızın ya da zamanın artmasına bir yorum katılacak olursa SEM görüntüleri incelendiğinde iki parametrenin artmasıyla yüzeylerde oluşan deformasyonların arttığı görülmektedir.



Şekil 4. 3. St-52 Çelik Malzeme numunesinin 4 m/s hızda, üç saat deney yapılmış SEM görüntüsü.



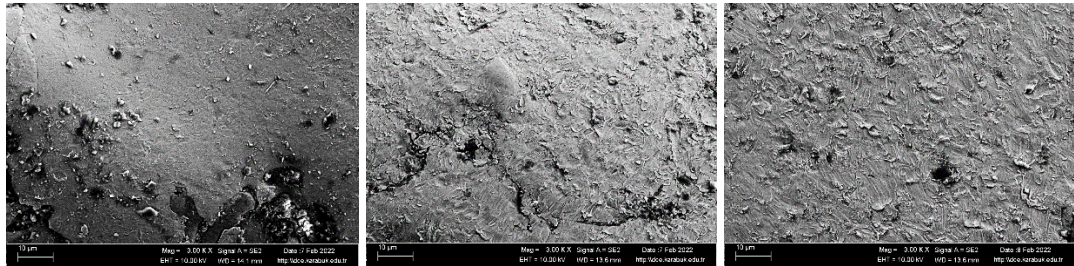
Şekil 4. 4. Şekil 4.3.'te 1 noktasına ait EDX grafiği ve mikro analiz değerleri.

Tablo 4. 5. Şekil 4.3'teki seçilmiş noktalara ait makro analiz tablosu.

Şekil 4.3 konum	%ağ								
	C	N	O	Si	P	S	Mn	Fe	Cu
1	5.24	1.77	5.62	0.77	-	0.03	-	85.06	1.51
2	9.73	1.16	49.00	22.87	0.01	0.05	0.24	16.55	0.40
3	8.64	1.61	7.95	1.85	-	0.01	1.40	77.84	0.70
4	8.19	1.76	12.95	2.30	-	0.09	0.30	73.71	0.68
5	11.95	1.99	14.15	2.31	-	-	-	68.40	1.21

#### 4.3.2. Sulzer Metco 8295 Kaplama Malzeme SEM Görüntüleri

Sulzer Metco 8295 malzeme numunesinin 2,5 m/s, 4 m/s ve 5,5 m/s hızlarda deneylere tabi tutulduktan sonra yüzeyde oluşan deformasyonları incelemek amacıyla SEM görüntüleri alınmıştır. Bu görüntülerde değişken sadece hızdır. Deney numuneleri aynı açı ve sürede deneye maruz kalmışlardır. Hızın deney numunelerinin üzerindeki yol açtığı deformasyonlar Şekil 4.5.' te verilmiştir.

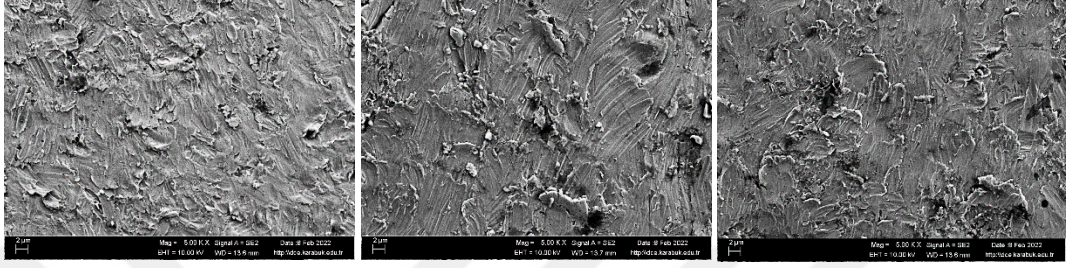


a)

b)

c)

Şekil 4. 5. Sulzer Metco 8295 malzeme numunesine ait 1 saat sürede sabit bir açıyla yapılan a) 2,5 m/s, b) 4 m/s, c) 5,5 m/s hızlarında yapılan deneylerin SEM görüntüleridir.



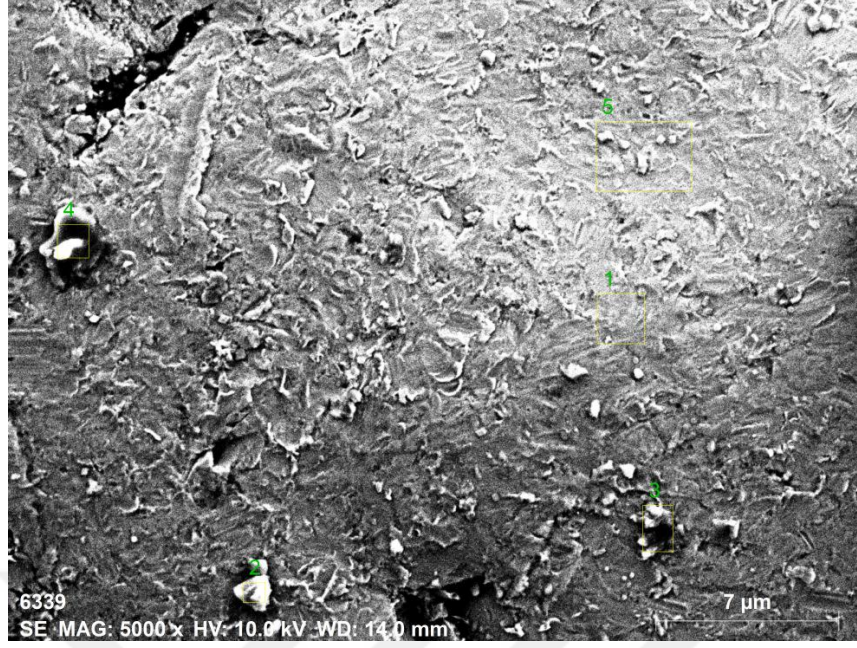
a)

b)

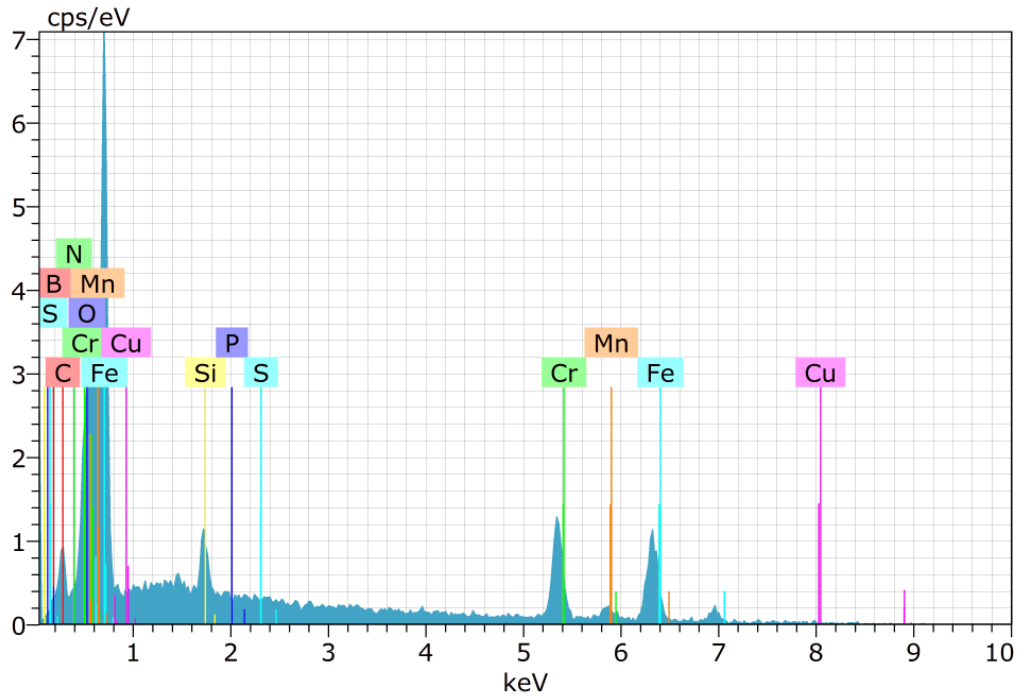
c)

Şekil 4. 6. Sulzer Metco 8295 malzeme numunesinin 5,5 m/s hızda yapılmış a) 1 saat, b) 2 saat, c) 3 saat sürelerinde gerçekleştirilmiş olan deneylerin SEM görüntüleridir.

Deney süresi arttırıldıkça yüzeyde gerçekleşen deformeler daha belirginleşmişlerdir. Hız ya da zaman parametrelerinin artışı yüzeyde oluşan deformasyonları arttırmıştır. Bu sonuç SEM görüntülerinde gözlemlenmiştir.



Şekil 4. 7. Sulzer malzeme numunesinin 2,5 m/s hızda, 1 saatte yapılmış deneyin SEM görüntüsüdür.



Şekil 4. 8. Şekil 4.7.'de 1 noktasına ait EDX grafiği ve mikro analiz değerleri.

Tablo 4. 6. Şekil 4.7'deki seçilmiş noktalara ait makro analiz değerleridir

Şekil 4.7 konum	%ağ										
	B	C	N	O	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Cu
1	11.30	5.98	1.99	3.71	1.96	-	-	23.73	1.87	48.69	0.78
2	7.2	7.13	2.02	52.36	29.40	-	0.04	0.42	0.09	0.75	0.58
3	6.6	10.74	2.01	38.71	20.48	-	0.02	5.48	1.01	14.35	0.59
4	3.24	3.35	1.74	55.37	34.65	-	-	0.50	0.11	0.41	0.62
5	8.35	7.26	2.42	6.32	1.52	-	-	20.41	1.33	50.44	1.94

#### 4.4. ANOVA ANALİZİ SONUÇLARI

Gerçekleştirilen deneyler sonrasında elde edilen veriler ve deney parametreleri kullanılarak varyant analizleri gerçekleştirilmiştir. Aşağıda kütle kaybı ve yüzey pürüzlüğüne ait varyant analizleri iki başlık altında verilmiştir.

##### 4.4.1. Kütle Kaybı ANOVA Analizi

Yapılan çalışma sonrasında deneylere bağlı olarak elde edilen kütle kaybı değerleri için yapılan varyant analizleri sonuçları aşağıdaki tabloda verilmiştir. Tablo 4.7 St-52 malzeme için, Tablo 4.8 Sulzer malzeme için kütle kayıplarının ANOVA analizleri tablolarıdır.

Tablo 4. 7. St-52 malzeme için kütle kaybı ANOVA analizi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Etki Oranı [%]
Hız	1	33,6330	33,6330	33,11	0,002	75,25
Zaman	1	4,6720	4,6720	4,6	0,085	10,45
Açı	1	1,3110	1,3110	1,29	0,308	2,93
Error	5	5	1			11,37
Total	8	45				100,00
<b>S</b>	<b>R-sq</b>	<b>R-sq(adj)</b>	<b>R-sq(pred)</b>			
100.793	88,63%	81,82%	61,52%			

Tablo 4.7 incelendiğinde analizdeki hata değerlerinin (P-Value) hepsinin 0.05' ten daha düşük olduğu ve R<sup>2</sup> değerinin %80 den daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuç hız ve zamanın kütle kaybı üzerine bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. St52 malzemesinin kütle kaybı üzerinde hız değerinin %75 oranında etkili olduğu, zaman değerinin %10 etkili olduğunu ve açı değerinin %2.9 etkili olduğu görülmektedir.

Tablo 4. 8. Sulzer malzeme için kütle kaybı ANOVA analizi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Etki Oranı [%]
Hız	1	5,8577	5,8577	51,94	0,001	79,84
Zaman	1	0,6377	0,6377	5,65	0,063	8,69
Açı	1	0,2771	0,2771	2,46	0,178	3,78
Error	5	0,5639	0,1128			7,69
Total	8	7,3364				100
<b>Source</b>	<b>R-sq</b>	<b>R-sq(adj)</b>	<b>R-sq(pred)</b>			
0,335816	92,31%	87,70%	74,82%			

Tablo 4.8 incelendiğinde analizdeki hata değerlerinin (P-Value) değerlerinin hepsi 0.05' ten daha düşük olduğu ve R<sup>2</sup> değerinin %90' dan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Oda hız, zaman ve açı değeri için kütle kaybı üzerinde bir etkisi olduğunu göstermiştir. Sulzer malzemesinin kütle kaybı üzerinde hız değerinin %79

oranında etkili olduğu, zaman değerinin %8.6 etkili olduğu ve aı değerinin %3.7 etkili olduğu görülmektedir.

ANOVA analizine göre kütle kaybındaki en etkili faktörün çok yüksek oranda hız olduğu ikinci etkili faktöründe zaman olduğu gözlemlenmiştir. En az etki eden faktörün aı olduğu görülmüştür.

#### 4.4.2. Yüzey Pürüzlülüğü ANOVA Analizi

Yapılan çalışmalardan sonra elde edilen yüzey pürüzlülükleri değerleri için St52 ve Sulzer malzemelerin değişkenlere göre ANOVA analizleri yapılmıştır. Yapılan analizler aşağıdaki Tablo 4.9 ve Tablo 4.10' da verilmiştir.

Tablo 4. 9. St52 yüzey pürüzlülüğü için ANOVA analizi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Etki Oranı[%]
Hız	1	0,0110	0,0110	14,08	0,0133	37,49
Zaman	1	0,0112	0	14,3	0,0129	38,07
Aı	1	0,0033	0,003267	4,18	0,0964	11,13
Hata	5	0,003909	0,000782			13,31
Total	8	0,029364				100,00
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)			
0,0279591	86,69%	78,70%	58,56%			

Tablolar incelendiğinde St 52 için aı değerinin de biraz anlamsız olduğu hız ve zaman içinde anlamlı oldukları gözlemlenmektedir.  $R^2$  değerlerine göre de %86 anlamıdır.

Analize göre St52 malzemesi için yüzey przllğzerinde hızın %37, zamanın %38 ve aının %38 etkisi olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4. 10. Sulzer malzeme yüzey pürüzlülüğü için ANOVA analizi

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Etki Oranı[%]
Hız	1	23,9226	23,9226	12,55	0,017	33,64
Zaman	1	36,7158	36,72	19,26	0,007	51,63
Açı	1	0,9487	0,95	0,5	0,512	1,33
Error	5	9,53	19,06			13,40
Total	8	71,12				100,00
<b>S</b>	<b>R-sq</b>	<b>R-sq(adj)</b>	<b>R-sq(pred)</b>			
138.072	86,60%	78,56%	57,68%			

Sulzer malzeme varyant analizi tabloları incelendiğinde elde edilen verilerin anlamlı olduğu P-Value ve  $R^2$  değerlerinden anlaşılmaktadır.

Yine varyant analizine göre yüzey pürüzlülüğü için hızın %33, zamanın %51 ve açının %16 etkili olduğu görülmektedir.

St52 ve Metco 8295 malzemelerin yüzey pürüzlülük davranışları incelendiğinde etkili parametrelerin zaman olduğu en düşük etkili parametrenin de çarpma açısı olduğu gözlemlenmektedir. Ayrıca çarpma açısı hata değerindeki (P-Value) karşılaşılan 0.05 den büyük değerler bazen çarpma açısının etkisinin anlamsız olduğunu ortaya koymuştur.

## BÖLÜM 5

### SONUÇLAR

Bu çalışmada St 52 ve Sulzer Metco 8295 malzemelerini slurry erozif aşınma davranışının kıyaslaması yapılmıştır. Deneylede çarpma hızları (2,5 m/s, 4 m/s ve 5,5 m/s), çarpma açıları (30°, 60° ve 90°) ve farklı süreler (1sa, 2sa, 3sa) sabit konsantrasyon da kullanılmıştır. Deneyleer sonrasında SEM görüntüleri ve EDX verileri elde edilen numunelerin yüzeylerinde meydana gelen aşınma mekanizmaları tespit edilip elementel analizi yapılmıştır.

Gerçekleştirilen çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmeye çalışılmıştır.

- Yapılan çalışmada deneyleer başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- St-52 numunesinde tüm açılar ve hızlar dikkate alındığında en fazla aşınmadan kaynaklı kütle kaybı oranı 90° açı ve 5,5 m/s hızla yapılan deney numunesinde görülmüştür.
- Sulzer Metco 8295 malzeme deney numunesi incelendiğinde de yine St-52 çeliği malzemesi deney numunesinin gösterdiği davranışı göstermiştir. Aşınmaya bağlı olarak gerçekleşen kütle kaybı en fazla 90° açı ve 5,5 m/s hızla gerçekleştirilen deney numunesinde görülmüştür.
- Kütle kaybı verileri kullanılarak gerçekleştirilen varyant analizleri incelendiğinde hız, zaman ve açı olmak üzere hız değişkeninin kütle kaybı üzerine etkili olduğu ve St52 malzeme için %75 Mattco 82 95 malzeme içinde %79.8 oranında etkili olduğu görülmüştür.

- Kütleye kaybı üzerine en az etkili parametrenin açı olduğu ve etki değeri %3 civarlarında olduğu gözlemlenmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğü üzerine yapılan varyant analizlerinde en etkili parametrenin zaman olduğu ve St52 malzeme için %39 Metco 8295 malzeme için %51.6 oranında etkiye sahip olduğu görülmüştür.
- Yüzey pürüzlülüğü üzerine en az etkili parametrenin açı olduğu ve St52 malzeme de hata değeri 0.05'ten yüksek olması nedeniyle yer yer anlamsız olabileceği gözlemlenmiştir.
- SEM görüntüleri incelendiğinde St52 malzeme için hızın artmasıyla yüzeyde aşınma mekanizmasının gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca zamandaki artışla beraber aşınma ve yüzey çatlaklarının arttığı gözlemlenmiştir. Metco 8295 malzeme için de benzer durumdan söz edilebilir.

## KAYNAKÇA

1. Gahr, K.-H., "Microstructure and wear of materials", *Elsevier Science Publishers, P. O. Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands, 1987.*, (1987).
2. Hutchings, I. M. and Tribology, F., .
3. Camacho, J., Lewis, R., and Dwyer-Joyce, R. S., "Solid particle erosion caused by rice grains", *Wear*, 267 (1–4): 223–232 (2009).
4. Budinski, K. G., "Friction, Wear, and Erosion Atlas", *CRC Press*, (2013).
5. Budinski, K. G., "Guide to Friction, Wear and Erosion Testing", *ASTM International West Conshohocken, USA*, (2007).
6. Patil, M. S., Deore, E. R., Jahagirdar, R. S., and Patil, S. v, "Study of the parameters affecting erosion wear of ductile material in solid-liquid mixture", (2011).
7. Panziera, R. C., Flores, W. H., Tier, M. A. D., and de Oliveira, A. C. C., "Comparison of abrasive wear by rice husk of an HVOF WC–Co–Cr-based coating and an electric arc sprayed coating based on Fe–Cr–B–Si", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 41: 1–11 (2019).
8. Notlar, B. D., Aran, P. A., Ba, A., Yap, K., Yap, K., and Özellikler, M., "Mal 201- Malzeme B Lg S", (2008).
9. Achamyeleh, T., Çamur, H., Savaş, M. A., and Evcil, A., "Mechanical strength variability of deformed reinforcing steel bars for concrete structures in Ethiopia", *Scientific Reports*, 12 (1): 1–10 (2022).
10. Capudean, B., "Carbon content , steel classifications , and alloy steels Carbon content , steel classifications , and alloy steels Page 2 of 3", 1–3 (2003).
11. Bağci, M., "Cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin erozyon aşınma davranışının incelenmesi", (2010).
12. Gür, E. S., .

13. Joshi, A. G., Kumar, M. P., and Basavarajappa, S., "Influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> filler on slurry erosion behavior of glass/epoxy composites", *Procedia Materials Science*, 5: 863–872 (2014).
14. Kishor, B., Chaudhari, G. P., and Nath, S. K., "Slurry erosion of thermo-mechanically processed 13Cr4Ni stainless steel", *Tribology International*, 93: 50–57 (2016).
15. Ojala, N., Valtonen, K., Antikainen, A., Kemppainen, A., Minkkinen, J., Oja, O., and Kuokkala, V.-T., "Wear performance of quenched wear resistant steels in abrasive slurry erosion", *Wear*, 354: 21–31 (2016).
16. Sinha, S. L., Dewangan, S. K., and Sharma, A., "A review on particulate slurry erosive wear of industrial materials: In context with pipeline transportation of mineral– slurry", *Particulate Science And Technology*, 35 (1): 103–118 (2017).
17. Stack, M. M. and Abd El-Badia, T. M., "Some comments on mapping the combined effects of slurry concentration, impact velocity and electrochemical potential on the erosion–corrosion of WC/Co–Cr coatings", *Wear*, 264 (9–10): 826–837 (2008).
18. KC, L., "Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology", *Ann Arbor: CRC Press, Inc, Boca Raton*, (1996).
19. Gürleyik, M. Y., "Makine mühendisliğinde aşınma olayları", *Mühendis Ve Makine*, 27 (323): 3–14 (1986).
20. Mustafa, A., "Makina Elemanları Cilt 1-2", *Birsen Yayınevi*, (2000).
21. KAPLAN, M., KARAOĞLANLI, A. C., and UYANER, M., "Katı Partikül Erozyonu ve Mühendislik Malzemeleri Üzerindeki Önemi", *Mühendislik Ve Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 4 (1): 31–34 (2016).
22. Sarıkaya, Ö., "Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri, Sakarya, 280s", (2007).
23. Adamiak, M., "Abrasion Resistance of Materials", *BoD–Books On Demand*, (2012).
24. Katsich, C., Badisch, E., Roy, M., Heath, G. R., and Franek, F., "Erosive wear of hardfaced Fe–Cr–C alloys at elevated temperature", *Wear*, 267 (11): 1856–1864 (2009).
25. Jha, A. K., Batham, R., Ahmed, M., Majumder, A. K., Modi, O. P., Chaturvedi, S., and Gupta, A. K., "Effect of impinging angle and rotating speed on erosion behavior of aluminum", *Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China*, 21 (1): 32–38 (2011).
26. Lopez, D., Congote, J. P., Cano, J. R., Toro, A., and Tschiptschin, A. P., "Effect of particle velocity and impact angle on the corrosion–erosion of AISI 304 and AISI 420 stainless steels", *Wear*, 259 (1–6): 118–124 (2005).

27. Doubek, P. and Filípek, J., "Abrasive and erosive wear of technical materials", *Acta Universitatis Agriculturae Et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 59 (3): 13–21 (2011).
28. Kulu, P., Tarbe, R., and Vallikivi, A., "Abrasive wear of powder materials and coatings", *Materials Science*, 11 (3): 230–234 (2005).
29. Foşt, I., "On hydraulic efficiency of pitched blade impellers", *Chemical Engineering Research And Design*, 89 (6): 611–615 (2011).
30. Franek, F., Badisch, E., and Kirchgäßner, M., "Advanced methods for characterisation of abrasion: Erosion resistance of wear protection materials", *Fme Transactions*, 37 (2): 61–70 (2009).
31. Desale, G. R., Gandhi, B. K., and Jain, S. C., "Improvement in the design of a pot tester to simulate erosion wear due to solid–liquid mixture", *Wear*, 259 (1–6): 196–202 (2005).
32. Shipway, P. H. and Hutchings, I. M., "The role of particle properties in the erosion of brittle materials", *Wear*, 193 (1): 105–113 (1996).
33. Wheeler, D. W. and Wood, R. J. K., "Solid particle erosion of CVD diamond coatings", *Wear*, 233: 306–318 (1999).
34. Desale, G. R., Gandhi, B. K., and Jain, S. C., "Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials", *Wear*, 261 (7–8): 914–921 (2006).
35. Desale, G. R., Paul, C. P., Gandhi, B. K., and Jain, S. C., "Erosion wear behavior of laser clad surfaces of low carbon austenitic steel", *Wear*, 266 (9–10): 975–987 (2009).

## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Berkay HAŞİM; Karabük Üniversitesinde 2013-2019 yılları arasında Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümünde lisans eğitimi almıştır. 2020 yılından itibaren Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümüne yüksek lisans yapmaktadır.

