

**GRANÜL CÜRUF TAŞIMADA KULLANILAN  
BORULARIN İÇ YÜZEYİNİN AŞINMA  
ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**2018  
DOKTORA TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Recep DEMİRSÖZ**

**GRANÜL CÜRUF TAŞIMADA KULLANILAN BORULARIN İÇ  
YÜZEYİNİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Recep DEMİRSÖZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalında**

**Doktora Tezi**

**Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Şubat 2018**

Recep DEMİRSÖZ tarafından hazırlanan "GRANÜL CÜRUF TAŞIMADA KULLANILAN BORULARIN İÇ YÜZEYİNİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ" başlıklı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Refik POLAT

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. **14.02.2018**

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Prof. Dr. Muammer KOÇ

Üye : Prof. Dr. Refik POLAT

Üye : Prof. Dr. Ahmet TÜRK

Üye : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Üye : Doç. Dr. İsmail ESEN

Tarih ...../...../.....

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu bu tez ile Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri 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 bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*

Recep DEMİRSÖZ

## ÖZET

### Doktora Tezi

## GRANÜL CÜRUF TAŞIMADA KULLANILAN BORULARIN İÇ YÜZEYİNİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

**Recep DEMİRSÖZ**

**Karabük Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:**

**Prof. Dr. Refik POLAT**

**Şubat 2018, 145 sayfa**

Sanayi tesislerindeki en büyük problemlerden biri ekipman ömürlerini doğrudan etkileyen aşınmalardır. Yüksek fırınlar gibi entegre tesislerde aşınmanın birçok türüne rastlanmakta olup bunlardan bir tanesi de erozif aşınmadır. Belirli partikül büyüklüklerine sahip malzemelerin taşınması esnasında genellikle aşınmanın bu türüne rastlanmaktadır. Yüksek fırın granüle cürufu, esasen atık olmakla birlikte ikincil bir üründür ve endüstrinin farklı dallarında kullanılmaktadır. Cürufun sıvı akışkan ortam içerisinde nakli sırasında, nakil ekipmanları sulu çamur erozyonuna maruz kalmaktadır. Sulu çamur erozyonu ise erozif aşınmanın en etkili türlerinden biridir. Yüksek erozyon oranı naklin gerçekleştirildiği malzemelerin ömrünü ciddi oranda kısaltmakta ve bakım-onarım maliyetlerini artırmaktadır.

Bu çalışmada, sulu çamur erozyonu aşınma deney düzeneği geliştirilmiş ve deneylerde yüksek fırın granüle cürufu kullanılarak St 37-2 referans standart boru malzemesi, Hardox 400, W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama ve AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik

malzemelerinin üzerindeki aşındırıcılığı incelenmiştir. Yüksek fırın granüle cürufu ortalama 505 µm partikül büyüklüğünde elenmiş ve ağırlıkça % 10, % 20 ve % 30 değerlerinde cüruf içeren sulu çamur ortamı hazırlanmıştır. Deneyler 2 m/s ve 4 m/s çevresel hız değerlerinde ve partikül normal çarpma açısında (90°) gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmalarla belirli partikül büyüklüğünde hazırlanmış olan cürufun aşındırıcılığının partikül konsantrasyonu ve çarpma hızı (malzeme iletim hızı) ile doğrudan ilgili olduğu ve konsantrasyonun ve partikül çarpma hızının artmasıyla aşınmanın da arttığı tespit edilmiştir. Numune olarak kullanılan malzemelerin aşınma değerleri yüksekten düşüğe doğru sırasıyla St 37-2, Hardox 400, W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama malzemesi ve AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik olarak belirlenmiştir. Malzemelerin maliyet analizi yapıp mukayese edilmiştir. Ayrıca aşınma mekanizmalarının anlaşılabilmesi için aşınmış yüzeylerin morfolojik yapıları SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) kullanılarak incelenmiştir.

**Anahtar Sözcükler :** Yüksek fırın, granüle cüruf, erozif aşınma, konsantrasyon, partikül çarpma hızı, St 37-2, Hardox 400, W<sub>2</sub>C-NiCrBSi, AISI 440 C

**Bilim Kodu** : 914.1.090

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **IMPROVING THE INNER SURFACE WEAR PROPERTIES OF THE PIPES USING FOR HANDLING OF GRANULATED BLAST FURNACE SLAG**

**Recep DEMİRSÖZ**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Refik POLAT**

**February 2018, 145 pages**

One of the biggest problems in industrial plants is wear that directly affects equipment life. In integrated plants such as blast furnaces, many types of wear are encountered, one of which is erosive wear. This type of wear is often encountered during the transport of materials with certain particle sizes. Granulated blast furnace slag, is essentially a waste but as a secondary product, be used in different branches of the industry. During the transfer of the slag into the liquid medium, the transport equipment is exposed to slurry erosion. Slurry erosion is one of the most effective types of erosive wear. The high amount of erosion seriously shortens the lifetime of the equipment where the transportation is carried out and increases the maintenance-repair costs.

In this study, slurry erosion wear test system was developed and the abrasivity of St 37-2 reference standard pipe material, Hardox 400, W<sub>2</sub>C-NiCrBSi coating material and AISI 440 C martensitic stainless steel materials were investigated in the

experiments using blast furnace slag. The granulated blast furnace slag was sieved to an average particle size of 505  $\mu\text{m}$  and slurry containing 10 %, 20 % and 30 % by weight of slag was prepared. The experiments were carried out at 2 m/s and 4 m/s peripheral speed values at the partial normal impact angle ( $90^\circ$ ). It has been determined by these experimental studies that the abrasivity of the slag prepared at a certain grain size is directly related to the concentration and the rotation speed (material conveyance speed) and that the wear is also increased by increasing the concentration and rotation speed. The wear values of the materials used as specimens are determined from high to low respectively as St 37-2, Hardox 400,  $\text{W}_2\text{C-NiCrBSi}$  coating material and AISI 440 C martensitic stainless material. Cost analysis of the materials has been made and compared. In addition, the morphological structures of the worn surfaces were examined using SEM (Scanning Electron Microscope) in order to understand the wear mechanisms.

**Key Words :** Blast furnace, granulated slug, erosive wear, concentration, particle impact angle, St 37-2, Hardox 400,  $\text{W}_2\text{C-NiCrBSi}$ , AISI 440 C

**Science Code :** 914.1.090



## TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim süresince yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen iş yoğunluğu arasında bile ihtiyacım olan yeterli zamanı ayıran tez danışman hocam Karabük Üniversitesi Rektörü Sn. Prof. Dr. Refik POLAT Bey'e,

Yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Sn. Prof. Dr. Ahmet TÜRK ve Sn. Doç. Dr. İsmail ESEN Bey'e, çalışmalarım esnasında her zaman yardımcı olan çok değerli araştırmacı Sn. Yrd. Doç. Dr. Garip ERDOĞAN Bey'e, her daim değerli yardımlarından dolayı Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Sn. Ahmet Emrah ERDOĞDU Bey'e, Demir Çelik Enstitüsü Araştırma Görevlisi Sn. Yüksel AKINAY Bey'e, Mühendislik Fakültesi Araştırma Görevlisi Sn. Sefa POLAT Bey'e,

KARDEMİR A.Ş. Demir ve Çelik Üretim Başmüdürü Sn. Ahmet AYCAN Bey'e, Yüksek Fırınlarda Mekanik Bakım kıymetli personeli Sn. Erdoğan GÜRLEYİK, Sn. Erdal URAL, Sn. Erol AKKAŞ Bey'e, Çubuk ve Kangal Haddehanesi mesai arkadaşlarım Sn. Bahri ESEN ve Sn. Ersin SOYLU Bey'e, sürekli olarak telkinlerde bulunup beni motive eden Refrakter Eski Başmühendisi Sn. Nurullah RAMAZANOĞLU Bey'e,

Eğitim hayatımın başladığı ilk günden itibaren bana maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili babam Kıyasettin DEMİRSÖZ ve sevgili annem Gülşen DEMİRSÖZ'e, özverili bir şekilde yanımda olan eşim Sibel DEMİRSÖZ ve güzel kızlarım Ela ve Ebrar Ece'ye, teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmam Karabük Üniversitesi BAP koordinatörlüğü tarafından KBÜ-BAP-13/2-DR-014 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Verilen destekten ötürü teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	vi
TEŞEKKÜR .....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xx
BÖLÜM 1 .....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 .....	3
YÜKSEK FIRIN CÜRUFU .....	3
2.1. YÜKSEK FIRIN .....	3
2.1.1. Tarihçe .....	3
2.1.2. Yüksek Fırınlr .....	4
2.1.2.1. Yüksek Fırın Şarj Malzemeleri .....	4
2.1.2.1.1. Demir Cevherleri .....	4
2.1.2.1.2. Kok Kömürü .....	6
2.1.2.1.3. Katkı Maddeleri .....	7
2.1.2.2. Yüksek Fırın Bölümleri .....	7
2.2. YÜKSEK FIRIN GRANÜLE CÜRUFU .....	12
2.2.1. Yüksek Fırın Cürufu .....	12
2.2.2. Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları .....	12
2.2.3. Granüle Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu .....	14

	<b>Sayfa</b>
BÖLÜM 3 .....	16
AŞINMA.....	16
3.1. AŞINMA SİSTEMİNDE TEMEL PARAMETRELER .....	16
3.2. AŞINMA MEKANİZMALARI.....	17
3.2.1. Adhezif Aşınma .....	17
3.2.2. Abrazif Aşınma.....	18
3.2.3. Eroziv Aşınma.....	20
3.2.3.1. Katı Partikül Erozyonu .....	20
3.2.3.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu .....	21
3.2.3.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu .....	21
3.2.3.4. Kavite Erozyonu.....	22
3.2.3.5. Elektro Erozyon .....	22
3.2.4. Korozif Aşınma .....	23
3.2.5. Yorulma Aşınması.....	23
3.3. AŞINMA DENEYLERİ ve ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	24
3.3.1. Aşınma Deneyleri .....	24
3.3.1.1. Ağırlık Farkı Yöntemi.....	24
3.3.1.2. Kalınlık Farkı Yöntemi .....	25
3.3.1.3. İz Değişimi Yöntemi.....	25
3.3.1.4. Radyo İzotop Yöntemi.....	25
3.3.2. Eroziv Aşınma İçin Deney Yöntemleri.....	25
3.3.2.1. Katı Partikül Erozyonu İçin Deney Yöntemleri.....	25
3.3.2.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu İçin Deney Yöntemleri .....	26
3.3.2.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu İçin Deney Yöntemleri .....	27
3.3.2.4. Kavite Erozyonu İçin Deney Yöntemleri.....	28
BÖLÜM 4 .....	30
YÜZEY İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ.....	30
4.1. YÜZEY YAPISI DEĞİŞTİRİLEREK YAPILAN İYİLEŞTİRMELER.....	31
4.1.1. Kimyasal Kompozisyon Değiştirilmeden Yapılan Yüze İyileştirmeleri.....	31
4.1.2. Kimyasal Kompozisyon Değiştirilerek Yapılan Yüze İyileştirmeleri..	32

4.2. YÜZEY KAPLANARAK YAPILAN YÜZEY İYİLEŞTİRMELERİ.....	36
4.2.1. Buhar Fazı Biriktirme .....	36
4.2.2. Sol-Jel Yöntemi .....	38
4.2.3. Elektrolitik Kaplama.....	38
4.2.4. Ergitme Esaslı Kaplama Yöntemleri .....	39
4.2.4.1. Isıl Püskürtme Yöntemleri (Termal Sprey Kaplama) .....	39
4.2.4.1.1. Alevle Püskürtme Yöntemi .....	41
4.2.4.1.2. Elektrik Arkı ile Püskürtme Yöntemi.....	42
4.2.4.1.3. Patlamalı Püskürtme Yöntemi.....	43
4.2.4.1.4. Plazma Püskürtme Yöntemi .....	44
4.2.4.1.5. HVOF Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Yöntemi (High Velocity Oxygen Fuel) .....	45
4.2.4.2. Kaynakla Kaplama Yöntemleri.....	45
4.2.4.2.1. Lazer Kaynağı ile Kaplama Yöntemi.....	46
4.2.4.2.2. Elektron Demeti ile Kaplama Yöntemi.....	47
4.2.4.2.3. Tozaltı Kaynağı ile Kaplama Yöntemi.....	48
4.2.4.2.4. Gazaltı Kaynağı ile Kaplama Yöntemi .....	50
4.2.4.2.5. Plazma Arkı ile Kaplama (PTA) Yöntemi .....	54
BÖLÜM 5 .....	55
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	55
5.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRMESİ.....	55
BÖLÜM 6 .....	67
DENEYSSEL ÇALIŞMA .....	67
6.1. AŞINDIRICININ HAZIRLANMASI .....	71
6.1.1. Aşındırıcının Elenmesi .....	73
6.2. MALZEME SEÇİMİ.....	74
6.2.1. St 37-2 Numune Hazırlanma Süreci .....	78
6.2.2. Hardox 400 Numune Hazırlanma Süreci.....	78
6.2.3. W <sub>2</sub> C-NiCrBSi Kaplama Numune Hazırlanma Süreci .....	78
6.2.4. AISI 440 C Numune Hazırlanma Süreci .....	79
6.3. DENEY SİSTEMİNİN TASARIMI .....	81

	<u>Sayfa</u>
6.4. DENEY PARAMETRELERİ .....	84
6.5. DENEY PROSEDÜRÜ.....	86
BÖLÜM 7 .....	89
DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA .....	89
7.1. PARTİKÜL ÇARPMA HIZI ve KONSANTRASYON PARAMETRESİNİN AŞINMA YÜZEYLERİ ve MİKTARLARINA ETKİSİ .....	90
7.1.1. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin St 37-2 Çeliğinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisi .....	90
7.1.2. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin Hardox 400 Çeliğinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisi .....	96
7.1.3. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin AISI 440 C Martenzitik Paslanmaz Çeliğinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisi.....	102
7.1.4. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin W <sub>2</sub> C- NiCrBSi Sert Dolgu Kaplama Malzemesinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisi.....	107
7.1.5. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin Tüm Numuneler Üzerinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisinin Genel Değerlendirmesi.....	114
7.2. DENEYDEN SONRA AŞINDIRICININ DURUMU .....	115
7.3. AŞINDIRICI PARTİKÜL HIZININ TÜM NUMUNELER ÜZERİNDEKİ AŞINMAYA ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI ....	117
7.4. AŞINDIRICI PARTİKÜL KONSANTRASYONUN TÜM NUMUNELER ÜZERİNDEKİ AŞINMAYA ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI .....	120
7.5. MALİYET ANALİZİ.....	121
7.6. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	123
7.6.1. Sonuçlar .....	123
7.6.2. Öneriler .....	124
KAYNAKLAR .....	126
EK AÇIKLAMALAR A. DENEY SONUÇ ÇİZELGELERİ .....	132
ÖZGEÇMİŞ .....	145

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Yüksek fırınlarda kullanılan demir cevherleri .....	4
Şekil 2.2. Yüksek fırın prosesi indirgenme ve karbürizasyon reaksiyonları.....	5
Şekil 2.3. Kok kömürüne ait bir görüntü .....	6
Şekil 2.4. Yüksek fırın tesisi kısımları ve ekipmanları .....	8
Şekil 2.5. Çanlı tepe sisteminin şematik gösterimi .....	9
Şekil 2.6. Çansız tepe sisteminin şematik gösterimi .....	10
Şekil 2.7. Boğaz aşınma plakalarının montajı anı görüntüsü.....	11
Şekil 2.8. Cüruf çeşitleri görüntüsü.....	13
Şekil 2.9. Yüksek fırın cürufunun granüle edilme anı görüntüsü .....	14
Şekil 3.1. Bir tribolojik sistemin DIN 50320 standardına göre şematik gösterimi .	17
Şekil 3.2. Adhezif aşınma şematik gösterimi.....	18
Şekil 3.3. Abrazif aşınma mekanizmaları genel görüntüleri.....	18
Şekil 3.4. Abrazif aşınma türleri görüntüsü .....	19
Şekil 3.5. Katı partikül erozyonu türleri.....	21
Şekil 3.6. Katı partikül erozyonu deney düzenekleri görüntüsü .....	26
Şekil 3.7. Su damlası erozyon test düzeneği .....	27
Şekil 3.8. Farklı erozif aşınma test düzenekleri görüntüsü .....	28
Şekil 3.9. Kavitasyon erozyonu deney düzenekleri görüntüsü .....	29
Şekil 4.1. Yüzey iyileştirme yöntemleri.....	30
Şekil 4.2. Termokimyasal yöntemlerin ana yapısı .....	35
Şekil 4.3. Saçtırma yöntemi şematik gösterimi.....	37
Şekil 4.4. Isı kaynaklarına göre termal sprej kaplama yöntemleri .....	39
Şekil 4.5. Isıl püskürtme kaplama yönteminde kullanılan kaplama malzemeleri...	40
Şekil 4.6. Termal sprej kaplama şematik gösterimi .....	41
Şekil 4.7. Alevle püskürtme yöntemleri şematik gösterimleri a) tel, b) toz alev ....	42
Şekil 4.8. Elektrik ark püskürtme yönteminin şematik gösterimi.....	43
Şekil 4.9. Patlamalı püskürtme yönteminin şematik gösterimi.....	43

## Sayfa

Şekil 4.10. Plazma sprey kaplama yönteminin şematik gösterimi.....	44
Şekil 4.11. HVOF kaplama yöntemi şematik gösterimi .....	45
Şekil 4.12. Lazer kaynağı ile kaplama yöntemi şematik gösterimi .....	47
Şekil 4.13. Darbeli elektron demeti ile alaşımlandırma yöntemi.....	48
Şekil 4.14. Toz altı kaynak yöntemi şematik gösterimi .....	49
Şekil 4.15. Gaz altı kaynak yönteminin şematik gösterimi.....	51
Şekil 4.16. TIG kaynağında akım tipine göre nüfuziyet ve elektrot kapasiteleri.....	51
Şekil 4.17. Su soğutmalı TIG kaynak ekipmanları şematik gösterimi.....	52
Şekil 4.18. MIG kaynak yöntemi ark oluşumu şematik gösterimi.....	52
Şekil 4.19. MIG/MAG kaynak donanımı şematik gösterimi .....	53
Şekil 4.20. Plazma arkı ile kaplama yöntemi şematik gösterimi .....	54
Şekil 6.1. KARDEMİR A.Ş 1 no'lu yüksek fırın granüle cüruf elde edilme anı görüntüsü .....	69
Şekil 6.2. Yüksek fırın sıcak cürufunun granüle edilme anı görüntüsü.....	70
Şekil 6.3. Granüle edilmiş yüksek fırın cürufunun cüruf havuzuna basılmasında kullanılan pompalara ait bir görüntü .....	70
Şekil 6.4. Granüle edilmiş yüksek fırın cürufunun cüruf havuzuna basılmasında kullanılan borulara ait bir görüntü.....	71
Şekil 6.5. Aşınmaya maruz kalmış granüle cüruf taşıma hattı borusu görüntüsü....	71
Şekil 6.6. Yüksek fırın granüle cürufuna ait eleme öncesi SEM görüntüsü .....	73
Şekil 6.7. Ortalama 505 µm büyüklüğe sahip elenmiş yüksek fırın granüle cürufuna ait deney öncesi SEM görüntüsü.....	74
Şekil 6.8. 100 x 40 x10 mm ebadında hazırlanmış deney numunelerine ait görüntü .....	75
Şekil 6.9. 10 x 6 x 5mm ebadında hazırlanmış numuneler .....	76
Şekil 6.10. Deney numunelerinin sertlik ölçümlerinin yapıldığı serlik ölçüm cihazına ait görüntü .....	77
Şekil 6.11. Deney numunelerinin kimyasal kompozisyonlarının belirlenmesinde kullanılan spektrometre cihazına ait görüntü .....	77
Şekil 6.12. % 2 nital ile dağlanarak NIKON ECLIPSEMA 200 metal mikroskopunda W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numune görüntüsü .....	79
Şekil 6.13. Deney düzeneği a) düzenek kesit resmi b) tutucu kollar c) numune tutucu.....	82
Şekil 6.14. Deney düzeneğinde kullanılan elektrik motorlarının sürücü ve elektrik panosu görüntüsü .....	83
Şekil 6.15. Deney düzeneğine ait üç boyutlu model görüntüsü.....	85

Şekil 6.16. Üç boyutlu tasarıma göre imalatı yapılmış deney düzeneği görüntüsü ..	86
Şekil 6.17. DENSI HZY 320A model hassas teraziye ait görüntü .....	87
Şekil 6.18. Katı partiküllerin tank içindeki akış formuna ait şematik görüntü .....	88
Şekil 7.1. St 37-2 deney numunesinin deney öncesi SEM görüntüsü.....	90
Şekil 7.2. St 37-2 numunesine ait 2 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri .....	91
Şekil 7.3. St 37-2 numunesine ait 4 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri .....	93
Şekil 7.4. St 37-2 numunesine ait aşınma miktarları grafiği.....	94
Şekil 7.5. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyonda gerçekleştirilen deney sonrasında St 37-2 numunesi yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü.....	96
Şekil 7.6. Hardox 400 deney numunesinin deney öncesi SEM görüntüsü.....	97
Şekil 7.7. Hardox 400 numunesine ait 2 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri .....	98
Şekil 7.8. Hardox 400 numunesine ait 4 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri .....	99
Şekil 7.9. Hardox 400 numunesine ait aşınma miktarları grafiği .....	100
Şekil 7.10. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyonda gerçekleştirilen deney sonrasında Hardox 400 numunesi yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü .....	101
Şekil 7.11. AISI 440 C deney numunesinin deney öncesi SEM görüntüsü.....	102
Şekil 7.12. AISI 440 C numunesine ait 2 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri .....	103
Şekil 7.13. AISI 440 C numunesine ait 4 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri .....	104
Şekil 7.14. AISI 440 C numunesine ait aşınma miktarları grafiği.....	106
Şekil 7.15. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyonda gerçekleştirilen deney sonrasında AISI 440 C numunesi yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü .....	107
Şekil 7.16. W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama deney numunesinin deney öncesi SEM görüntüsü.....	108



Şekil 7.17. W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunesine ait 2 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri .....	109
Şekil 7.18. W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunesine ait 4 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri .....	110
Şekil 7.19. W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunesine ait aşınma miktarları grafiği.....	112
Şekil 7.20. W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplamalı numunenin 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyon değerlerinde alınmış SEM görüntüsü .....	113
Şekil 7.21. Yüksek fırın granüle cürufuna ait deney sonrası SEM görüntüsü .....	116
Şekil 7.22. % 10 konsantrasyon değerinde numunelerin farklı hız değerlerine göre mukayese grafiği .....	117
Şekil 7.23. % 20 konsantrasyon değerinde numunelerin farklı hız değerlerine göre mukayese grafiği .....	118
Şekil 7.24. % 30 konsantrasyon değerinde numunelerin farklı hız değerlerine göre mukayese grafiği .....	119
Şekil 7.25. 2 m/s partikül çarpma hızı değerinde numunelerin farklı konsantrasyon değerlerine göre mukayese grafiği .....	120
Şekil 7.26. 4 m/s partikül çarpma hızı değerinde numunelerin farklı konsantrasyon değerlerine göre mukayese grafiği .....	121

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Yüksek fırın cürufu fiziksel özellikleri.....	15
Çizelge 2.2. Yüksek fırın cürufu kimyasal bileşimi.....	15
Çizelge 5.1. Eroziyon aşınma deneyine ait parametreler.....	58
Çizelge 6.1. ASTM E 11:82 standardına uygun yapılan eleme işlemine göre boyutsal dağılım sonuçları.....	72
Çizelge 6.2. Yüksek fırın granüle cürufu numunesi kimyasal kompozisyonu .....	72
Çizelge 6.3. Deney numunelerinin sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri.....	76
Çizelge 6.4. St 37-2 malzemenin kimyasal kompozisyonu .....	78
Çizelge 6.5. Hardox 400 malzemenin kimyasal kompozisyonu .....	78
Çizelge 6.6. W <sub>2</sub> C-NiCrBSi TIG kaplama malzemesinin kimyasal kompozisyonu.....	79
Çizelge 6.7. AISI 440 C malzemenin kimyasal kompozisyonu.....	81
Çizelge 7.1. Deney öncesi ve sonrası St 37-2 numunesine ait yüzey pürüzlülük değerleri.....	93
Çizelge 7.2. St 37-2 numunesine ait aşınma ve standart sapma değerleri .....	94
Çizelge 7.3. St 37-2 numunesine ait EDX analiz tablosu .....	96
Çizelge 7.4. Deney öncesi ve sonrası Hardox 400 numunesine ait yüzey pürüzlülük değerleri.....	97
Çizelge 7.5. Hardox 400 numunesine ait aşınma ve standart sapma değerleri.....	100
Çizelge 7.6. Hardox 400 numunesine ait EDX analiz tablosu .....	102
Çizelge 7.7. Deney öncesi ve sonrası AISI 440 C numunesine ait yüzey pürüzlülük değerleri.....	105
Çizelge 7.8. AISI 440 C numunesine ait aşınma ve standart sapma değerleri.....	105
Çizelge 7.9. AISI 440 C numunesine ait EDX analiz tablosu .....	107
Çizelge 7.10. Deney öncesi ve sonrası W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunesine ait yüzey pürüzlülük değerleri .....	111
Çizelge 7.11. W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunesine ait aşınma ve standart sapma değerleri.....	111
Çizelge 7.12. Şekil 7.20'deki seçilmiş noktalara ait EDX analiz tablosu .....	114

Çizelge 7.13.	Malzeme Maliyet Tablosu .....	123
Çizelge EK A.1.	2 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları .....	133
Çizelge EK A.2.	2 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları .....	133
Çizelge EK A.3.	2 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları .....	134
Çizelge EK A.4.	4 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları .....	134
Çizelge EK A.5.	4 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları .....	135
Çizelge EK A.6.	4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları .....	135
Çizelge EK A.7.	2 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları .....	136
Çizelge EK A.8.	2 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları .....	136
Çizelge EK A.9.	2 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları .....	137
Çizelge EK A.10.	4 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları .....	137
Çizelge EK A.11.	4 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları .....	138
Çizelge EK A.12.	4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları .....	138
Çizelge EK A.13.	2 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları .....	139
Çizelge EK A.14.	2 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları .....	139
Çizelge EK A.15.	2 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları .....	140
Çizelge EK A.16.	4 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları .....	140
Çizelge EK A.17.	4 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları .....	141

Çizelge EK A.18. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları .....	141
Çizelge EK A.19. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.....	142
Çizelge EK A.20. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.....	142
Çizelge EK A.21. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.....	143
Çizelge EK A.22. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.....	143
Çizelge EK A.23. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.....	144
Çizelge EK A.24. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.....	144

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

$d_c$	:	Cüruf özgül ağırlığı (ton/m <sup>3</sup> )
$v_c$	:	Karışımdaki cüruf hacmi (m <sup>3</sup> )
$v_s$	:	Karışımdaki su hacmi (m <sup>3</sup> )
$m_c$	:	Karışımdaki cüruf kütlesi (kg)
$m_s$	:	Karışımdaki su kütlesi (kg)
$\phi_b$	:	Boru çapı (m)
$A_b$	:	Boru kesit alanı (m <sup>2</sup> )
$v_k$	:	Karışımın akış hızı (m/s)
$Q_k$	:	Karışımın akış debisi (m <sup>3</sup> /saat)
$\alpha$	:	Aşındırıcı çarpma açısı (°)
$\alpha_{maks}$	:	Maksimum kesme aşınması açısı (°)
$\eta, \gamma, \varphi, K_I$	:	Sabitler
$B_0, C_0, D_0, E_0$	:	Diğer etki eden değişkenlere ait katsayılar
$C_w$	:	Aşındırıcı ortamdaki katı konsantrasyonu (% ağırlık)
$d$	:	Ortalama tane büyüklüğü (µm)
$E_C$	:	Herhangi bir açı değerindeki kesme aşınması (g/g katı)
$E_{Cmax}$	:	Maksimum kesme aşınması oranı (g/g katı)
$E_{D90}$	:	Normal çarpma açısı değerinde deformasyon aşınması oranı (g/g katı)
$E_D$	:	Deformasyon aşınması oranı (g/g katı)
$E_w$	:	Toplam erozif aşınma oranı (g/g katı)
$H_p$	:	Aşındırıcı sertlik değeri (HV)
$H_T$	:	Numune sertlik değeri (HV)
$HP/HT$	:	Sertlik Oranı
$K_{(H_p/H_T)}$	:	Sabit (sertlik oranının fonksiyonu)
$V$	:	Aşındırıcı çarpma hızı (m/s)

## KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
ASTM	: Amerikan Test ve Malzemeler Derneği (American Society for Testing and Materials)
CNC	: Bilgisayarlı Sayısal Denetim (Computer Numerical Control)
CVD	: Kimyasal Buhar Biriktirme (Chemical Vapor Deposition)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
DCEN	: Elektrot Pozitif Doğru Akım (Electrode Positive Direct Current)
DCEP	: Elektrot Negatif Doğru Akım (Electrode Negative Direct Current)
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü (Deutsches Institut für Normung)
EDX	: Enerji Dağıtıcı X-Işını Analizi (Energy Dispersive X-Ray Analysis )
HRc	: Rockwell C Sertlik Testi (Rockwell C Hardness Test)
HV	: Vickers Sertlik Testi (Vickers Hardness Test)
HVOF	: Yüksek Hızda Oksi-Yakıt Püskürtme (High Velocity Oxygen Fuel)
ITAB	: Isı Tesiri Altındaki Bölge
MAG	: Aktif Gaz Atmosferi Altında Kaynak (Metal Active Gas)
MIG	: Soygaz Atmosferi Altında Kaynak (Metal Inert Gas)
MÖ	: Milattan Önce
OES	: Optik Emisyon Spektrometresi (Optical Emission Spectroscopy)
PCD	: Çok Taneli Elmas (Polycrystalline Diamond)
PCI	: Pulverize Kömür Enjeksiyonu (Pulverised Coal Injection)
PTA	: Plazma Arkı Kaynağı (Plasma Transferred Arc)
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TIG	: Tungsten Asal Gaz Kaynağı (Tungsten Inert Gas)
TSM	: Ton Sıvı Maden

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Bütün sanayi tesislerinde aşınma, karşılaşılan büyük problemlerin başında gelmektedir. Aşınmanın birçok türü mevcut olmakla birlikte kullanılan malzemelerin bu aşınma türlerinden herhangi biri veya birkaçına karşı dayanımlı olması istenir. Bu dayanım, direkt malzeme içyapısı üzerinde yapılacak geliştirmeler, malzeme yüzeyine uygulanacak ısı işlemler veya ek malzeme kullanılarak yapılacak yüzey dolgu işlemleriyle artırılabilir. Genellikle malzeme yüzeyinin aşınmaya dayanıklı, malzeme gövdesinin yeterli dayanımda ve sünek olması gerektiği için yüzey sertleştirme ve dolgu işlemleri tercih edilmektedir. Çeliklerde malzeme yüzeyinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi kolay ve ekonomiktir. Bu işlemlerle, çalışan yüzeyin sert, dayanımlı ve aşınmaya karşı iyi bir performans sergilemesi ve iç kısmının da enerjiyi sönmüleyerek tok kalması sağlanır. Yeteri kadar yüzey sertliğine sahip olmayan çeliklerde, yüzeyin kimyasal kompozisyonu termokimyasal yöntemler kullanılarak değiştirilir. Karbürleme işlemi ile malzeme yüzeyine karbon emdirilir veya sertlik artırıcı element atomların karbonitrürleme, nitrürleme ve borlama gibi işlemlerle yüzeye geçişleri sağlanır. Bu yöntemler ile yüzeyde direkt olarak sertleşme sağlanır. Yine aynı şekilde yüzey kimyasını değiştirmeden alevle yüzey sertleştirme, lazer ışınıyla sertleştirme ve elektron demeti ile sertleştirme yöntemleri kullanılarak yüzeyde yüzey ısısının ani uzaklaştırılması yolu ile sertleştirme sağlanabilmektedir. Bu yöntemlerin dışında yüzey kaplanarak aşınmaya dirençli yüzeyler elde etmek mümkündür. Farklı yöntemlerle elde edilmiş kaplama malzemesi buharları sert bir tabaka elde etmek için malzeme yüzeyinde Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD, Physical Vapor Deposition) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD, Chemical Vapor Deposition) yöntemleri kullanılarak biriktirilir. Her iki yöntem de malzemelerin yüzeydeki atomlarının buharlaştırılarak veya sıçratılarak yüzeyden kopartılması ve kaplanacak malzemenin yüzeyine biriktirilmesi esasına dayanmaktadır. Sol-jel yöntemi, hidroliz ve akabinde yoğunlaştırma aşamalarını içeren diğer bir kaplama yöntemidir. Özellikle metallerde kullanılan diğer bir yöntem elektrolitik kaplama yöntemidir. Ergitme esaslı

kaplama yöntemleri ise ısı püskürtme yöntemleridir ve farklı uygulama türleri mevcuttur. Bu uygulamalara örnek olarak, alevle püskürtme, patlamalı püskürtme, Yüksek Hızda Oksi-Yakıt Püskürtme (HVOF), elektrik arkı ile püskürtme ve plazma püskürtme yöntemleri sayılabilir. Bu yöntemlerde toz veya tel halindeki kaplama malzemesi malzeme yüzeyine uygulanır. Bunların yanında lazer kaynağıyla, elektron demetiyle, tozaltı, gazaltı ve plazma arkıyla kaplama gibi klasik sayılabilecek kaynak kaplama yöntemleri de mevcuttur. Yine adı geçen bu yöntemler kullanılarak yüzeylerde istenilen aşınma dirençleri elde edilebilmektedir.

Bu çalışmada, sanayide özellikle ekonomik olması, düşük bakım maliyeti açısından tercih edilen akışkan ortamda katı partikül taşınması (sulu çamur) yönteminde karşılaşılan erozif aşınma problemi ele alınmıştır. En çok kullanılan boru malzemesi olan St 37-2'ye alternatif olarak 3 farklı malzeme kullanılmıştır. Bunlardan ilki aşınma direnci istenilen uygulamalarda kullanılan Hardox 400, agresif akışkan ortamlarda tercih edilen AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik ve yaklaşık % 60 oranında tungsten karbür ihtiva eden  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama malzemesidir. Söz konusu malzemeler aşınma deney düzeneğinde aşınmaya maruz bırakılmıştır. Deneyler neticesinde aşınma performansları ortaya çıkartılmış ve sonuçlar mukayese edilmiştir. Ayrıca, malzemelerin maliyet analizi yapıp elde edilen maliyet değerleri mukayese edilmiştir. Bunlara ek olarak malzemelerin aşınma öncesi ve aşınma sonrası yüzey yapıları SEM ile görüntülenmiş ve sonuçlar irdelenmiştir.

Sekiz bölümden teşkil olan tez çalışmasının ilk bölümü genel giriş bölümüdür. İkinci bölümde, yüksek fırın cürufu ve özelliklerinden bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde, endüstride karşılaşılan aşınma problemleri üzerinde durulmuştur. Dördüncü bölümde, yüzey iyileştirme yöntemleri işlenmiştir. Beşinci bölümde, konu ile ilgili yapılan literatür araştırmasından bahsedilmiştir. Altıncı bölümde, deney düzeneği tanıtılarak deneysel çalışma hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. Yedinci bölümde ortaya çıkan sonuçlar irdelenmiş ve ileriki çalışmalara ışık tutması amacı ile önerilere yer verilmiştir. Son bölümde ise yararlanılan kaynaklar verilmiştir.



## BÖLÜM 2

### YÜKSEK FIRIN CÜRUFU

#### 2.1. YÜKSEK FIRIN

##### 2.1.1. Tarihçe

Yüksek fırınların MÖ 5. asırdan itibaren uzak doğuda (Çin) kullanılmaya başlandığı ve Avrupa'da kullanımının ise Orta Çağ'ın en parlak dönemine rastladığı bilinmektedir. İngiltere'de 1491 yılında kullanılmaya başlanan bu yöntem ilk defa 15. yy'de Belçika'nın güneyinde yer alan ve üç federal bölgeden biri olan Valonya'nın Namur bölgesinde görülmüştür. Bu dönem bütün yüksek fırınlarda yakıt olarak odun kömürünün kullanıldığı dönemdir. Verimi odun kömürüne göre daha yüksek bir yakıt olan metalürjik kokun İngiliz asıllı Abraham Darby'nin çalışma ve araştırmaları sonucunda odun kömürüne alternatif kullanılmaya başlanması 1709 yılını bulmuştur. 1828 yılında James Beaumont Neilson tarafından geliştirilen ön ısıtmalı basınçlı üfleme havası kullanımı yöntemi yüksek fırınların verimini yükselten çalışmalardandır. 1855 yılında Henry Bessemer tarafından geliştirilen çelik üretimi ve yüksek fırınların kullanımı, yüksek kapasitede güçlü ve ucuz çeliğin üretilmesine imkan vermiştir [1]. Yüksek fırınlar entegre demir ve çelik üretim tesislerinin bir parçası olup günümüzde hemen hemen 1,7 milyar ton olan çelik üretiminin yaklaşık %70'lik kısmı entegre demir ve çelik tesislerinde yapılmaktadır.

## 2.1.2. Yüksek Fırınlr

### 2.1.2.1. Yüksek Fırın Şarj Malzemeleri

#### 2.1.2.1.1. Demir Cevherleri

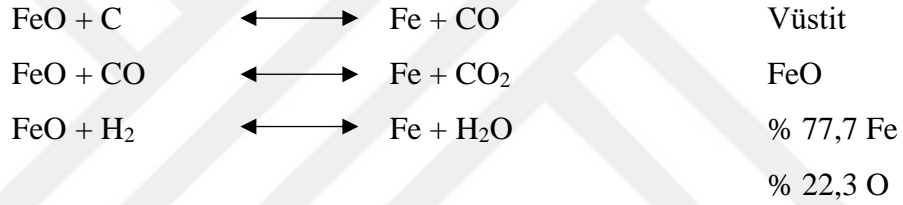
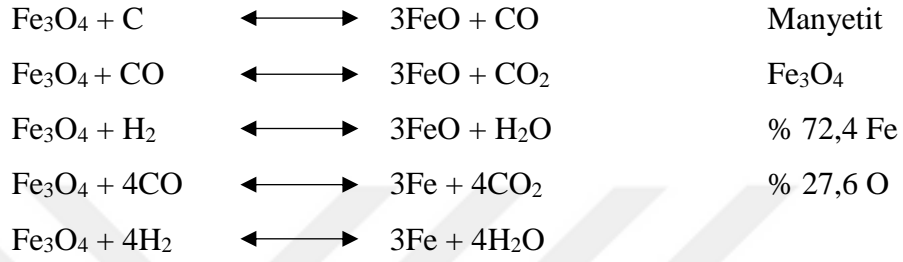
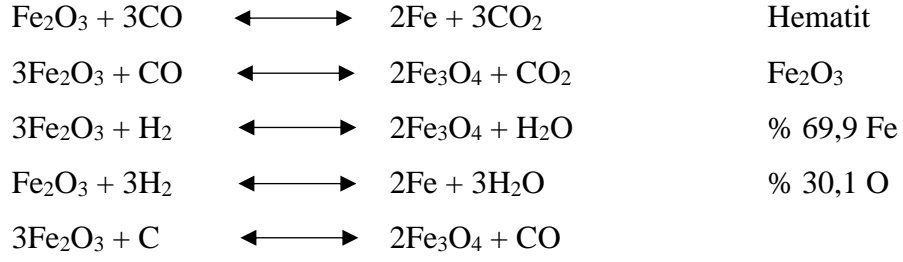
Yüksek fırınlar, fiziksel ya da kimyasal olarak ön hazırlanmış demir cevherleri olan sinter ve pelet ile kalibre cevherin, kok fabrikalarında üretilmiş olan metalürjik kokun yakılması ile sıvı ham demir üretilen tesislerdir. Şekil 2.1’de yüksek fırınlarda kullanılan demir cevherleri gösterilmiştir [2].



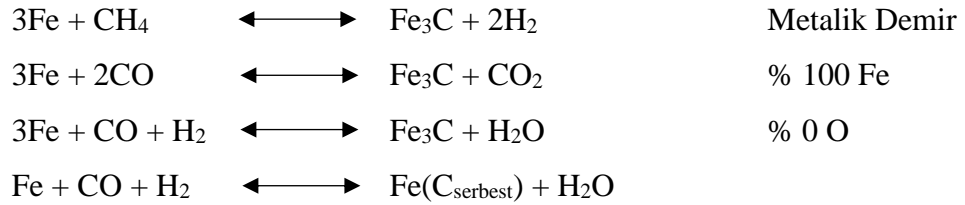
Şekil 2.1. Yüksek fırınlarda kullanılan demir cevherleri.

Turbo körük vasıtasıyla atmosferden emiş yapılan hava sobalarda 1000 - 1100 °C’ye kadar ısıtılır. Tüyer adı verilen deliklerden fırına üflenir. Sıcak hava metalürjik kok ile reaksiyona girerek kok kömürünü yakar. Meydana gelen reaksiyonlar sonucu ortaya çıkan enerji demir cevherinin ergimesini sağlar. Ortaya çıkan karbon monoksit (CO) ise cevherin indirgenmesinde önemli bir rol üstlenir. Fırın içerisinde gerçekleşen indirgenme reaksiyonları Şekil 2.2. deki gibidir [3].

### İNDİRGENME REAKSİYONLARI



### KARBÜRİZASYON REAKSİYONLARI



Şekil 2.2. Yüksek fırın prosesi indirgenme ve karbürizasyon reaksiyonları [3].

Genel olarak cevherlerin veya ön işlem görmüş olarak fırına yüklenen malzemelerin yüksek fırındaki indirgenme kabiliyetleri en kolaydan en zora sıralanırsa;

1. Limonit, 2. Hematit, 3. Götite, 4. Pirit, 5. Siderit, 6. Magnetit şeklindedir.

Fiziki yapı olarak masif halde bulunan parça cevhere göre çok daha fazla yer kaplayan gözenekli yapıdaki malzemeler üretim miktarının azalmasına sebep olurlarken

indirgenmeleri daha kolay olmalarından dolayı tercih edilirler. Şarj edilen cevherin manipülasyonu esnasında ve fırına şarj edildikten sonra fırın içerisinde parçalanıp toz haline gelmemesi gerekir. Fırına yüklenen malzemenin parçalanıp toz haline gelmesi fırın içindeki gaz geçirgenliğini düşüreceğinden fırının çalışma performansı ve ham demir kalitesi olumsuz yönde etkilenmektedir [3].

#### 2.1.2.1.2. Kok Kömürü

Yüksek fırınlarda ana yakıt kok kömürü olmakla beraber son zamanlarda kok oranını azaltmak, prosesin kontrol kolaylığını sağlamak, fırın verimliliğini yükseltmek ve en nihayetinde maliyeti düşürmek amacıyla pulverize kömür enjeksiyonu (PCI) yapılmaktadır. Kok, bazı yağlı taş kömürlerinin hava olmayan ortamda içerdiği bütün uçucu bileşenleri uzaklaştırılana kadar ısıtılmasının sonrasında arta kalan katı artıktır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Kok kömürüne ait bir görüntü.

Kok üretiminde kokun yanında kok gazı, katran, naftalin, hafif yağlar ve amonyum sülfat gibi yan ürünler ortaya çıkmaktadır. Kömür gazlarında, karbon monoksit (CO), karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), su (H<sub>2</sub>O), hidrojen (H<sub>2</sub>), azot (N<sub>2</sub>), hidrojen sülfür (H<sub>2</sub>S), kükürt (S) ve amonyak (NH<sub>3</sub>) bulunur. Bu gazlar kimya sanayisinin hammadde kaynağının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Yüksek fırınlarda kullanılan metalürjik kokun esas fonksiyonu tüyerler seviyesinde yanmak ve ihtiyaç olan ısıyı sağlamaktır. Bu sebeple, azami miktarda ısı ve gaz elde etmek için, kokun külü, nemi ve uçucu maddesi düşük, karbonu yüksek olmalıdır. Kok aynı zamanda gövdenin gaz geçirgenliğini ve yapısal dengesini sağlama fonksiyonuna da sahiptir. Kokun görevini yerine getirebilmesi için

gövde içindeki sıkıştırıcı ve aşındırıcı kuvvetlere ve şarjdan doğan çarpma kuvvetlerine dayanacak mukavemette olması gerekir. Kok, çok fazla parçalanmaması için genellikle aynı entegre tesis içerisinde üretilir. Fakat üretim anlamında kurulu tesislerin yetersizliği kokun dışarıdan satın alınması zorunluluğunu doğurabilir. Yüksek fırında kullanılan kokun tane büyüklüğü yaklaşık 70 - 120 mm civarındadır.

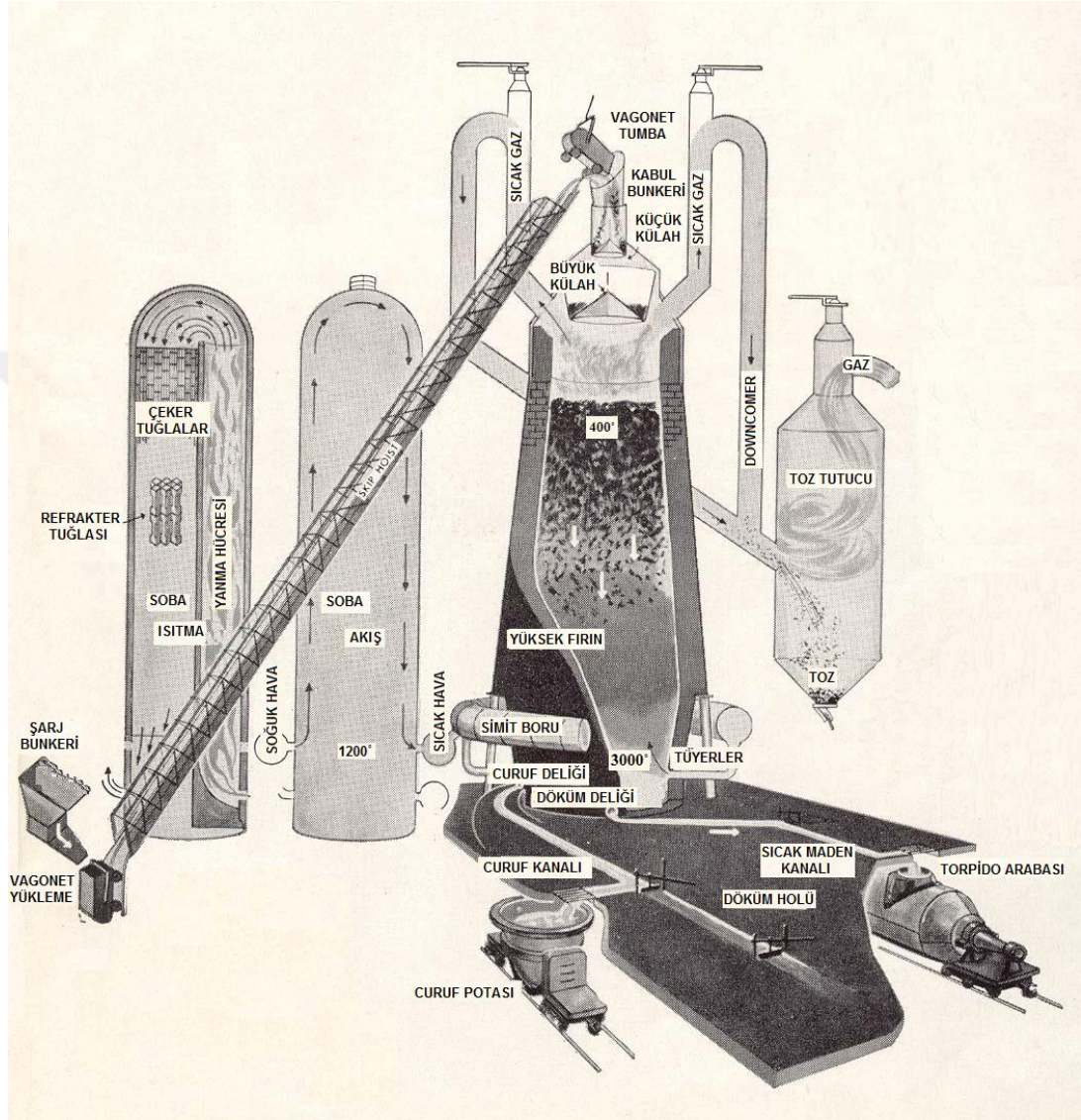
### **2.1.2.1.3. Katkı Maddeleri**

Cevherdeki en yaygın gang maddeleri silika ve alüminadır. Alümina ve silika miktarı azaldıkça cüruf hacmi ve buna bağlı olarak kok sarfiyatı azalmaktadır, üretim hızı ise artmaktadır. Sıvı metalde istenmeyen en önemli atık kükürttür ve genellikle koktan gelir. Kokta % 0,6 - 1,5 ve cevherlerde % 0,1 - 1,5 oranında bulunmaktadır. Kükürt, silis, alümina vb. şarj malzemesi gangını ayırmak için flaks maddesi olarak kireçtaşı ve/veya dolomit şarj edilir. Cevher ve fırına göre seçilen flaks ilavesinin amacı iyi bir cüruf yapmaktır. İyi bir cürufun, akışkanlığı yüksek, ergime sıcaklığı düşük, iyi bir örtü teşkil edecek, metalin içinde karışmayacak, fırını aşındırmayacak, ham metal içindeki istenmeyen maddeleri bünyesine alacak şekilde olması istenir.

### **2.1.2.2. Yüksek Fırın Bölümleri**

Yüksek fırınlar temel olarak fırın gövdesi, döküm holü, toz tutucu, sobalar, şarj tesisleri ve filtrelerden oluşur. Yüksek fırın tesisine ait kısımlar Şekil 2.4'de gösterilmektedir. Proses reaksiyonları yüksek fırın gövdesinde meydana gelmektedir. Bu reaksiyonların meydana gelebilmesi için ihtiyaç olunan sıcak hava sobalardan sağlanır. Ayrıca sobaların ısıtılması yüksek fırın gazı ve atmosferden yakma havası fanlarının yardımı ile emilen havanın börnerlerde belirli bir oranda yakılması ile sağlanır. Fırına hammadde şarjı, şarj tesislerinden vagonet veya bant sistemi ile yapılır. Döküm holü elde edilmiş olan ham demirin ve cürufun tahliye edildiği ve işçiliğin en yoğun olduğu yerdir. Ham demir içi refrakter tuğlası ile izole edilmiş potalara ya da torpidolara alınırken, cüruf ise cüruf potalarına alınır veya su kullanılarak granüle edilir. Reaksiyonlar sonrası oluşan baca gazları uptake diye tabir edilen baca boruları vasıtası ile downcomer kolektör borusuna, oradan da toz tutucuya ulaşır. Toz tutucu büyük partiküllerin tutulmasını sağlar. Toz tutucudan geçen yarı kirli gaz, sulu sistem

veya son zamanlarda yaygın olarak kullanılmakta olan torbalı tip kuru filtrelerden geçerek temizlenir. Temiz gaz ise fırın sobalarının ısıtılmasında ve/veya entegre demir çelik tesisinin herhangi bir noktasında ısı kaynağı olarak kullanılır.

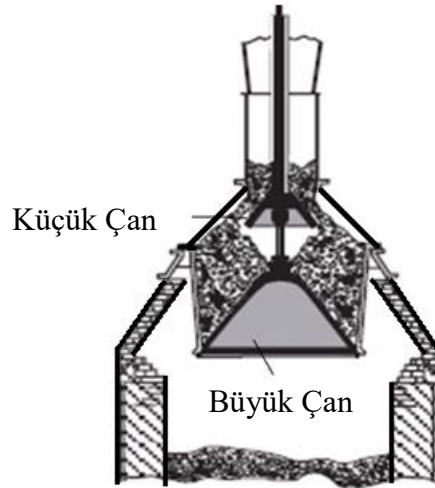


Şekil 2.4. Yüksek fırın tesisi kısımları ve ekipmanları [4].

Yüksek fırın gövdesi şu kısımlardan oluşmaktadır;

Fırın tepe sistemi, boğaz (throat), gövde (stack), bel (belly), karın (bosh), hazne (heart).

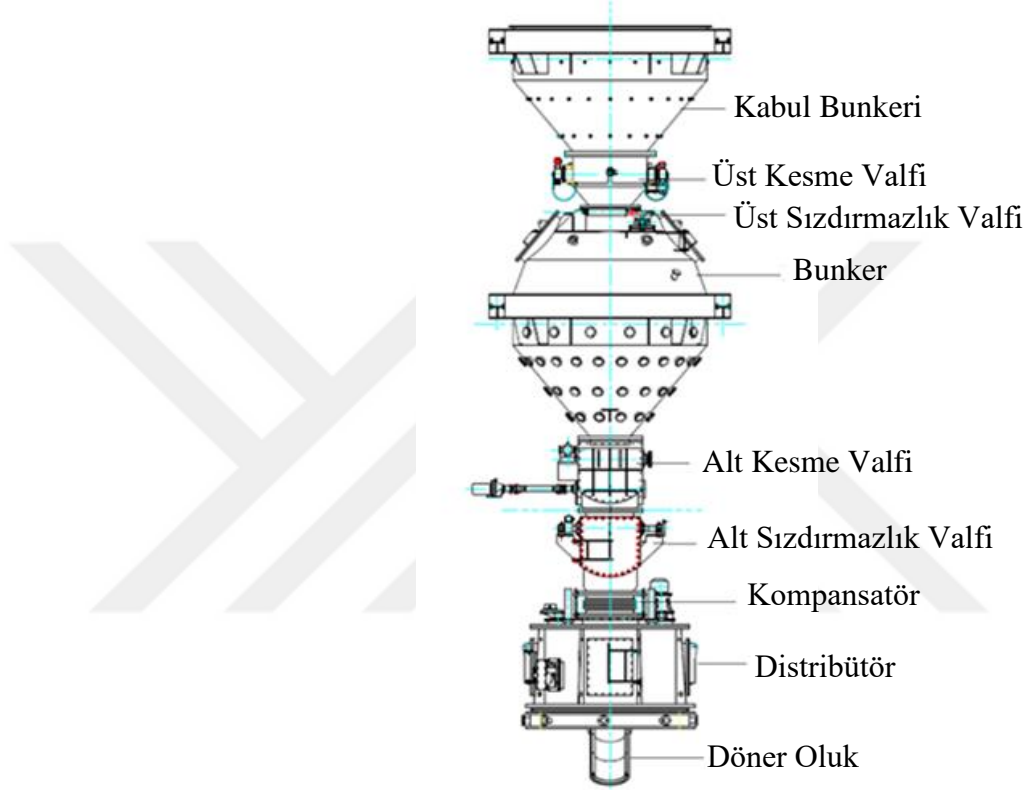
Fırının tepe bölgesinde, hammaddelerin fırın içerisine aktarılmasını sağlayan ve fırın içerisinde oluşan yüksek fırın gazının atmosfere atılmasını engelleyen küçük ve büyük çanın yer aldığı çan sistemi (Şekil 2.5) ya da son zamanlarda sıklıkla tercih edilen, daha modern ve verimli bir sistem olan çansız tepe sistemi (Şekil 2.6) bulunmaktadır. Büyük çan, küçük çan ve döner oluk çan sisteminin önemli bölümlerini oluşturmaktadır. Fırına şarj edilen malzeme skip vagonetler veya konveyör bantlar vasıtasıyla fırın tepesine getirilip küçük çan üzerindeki yönlendiriciye dökülür. Malzeme söz konusu yönlendiricinin altında bulunan döner oluk vasıtasıyla küçük çan üzerine homojen bir şekilde boşaltılır. Küçük çan açılır, malzemeler büyük çanın üzerine dökülür ve akabinde küçük çan kapanır. İki çan arasındaki bölge basıncı fırın içindeki basınca eşitlendikten sonra büyük çan açılarak malzeme fırın içerisine boşaltılır. Dökülme işleminin bitiminde büyük çan kapanır. Küçük çanın yeniden açılabilmesi için çanlar arası basıncın atmosfere tahliye edilmesi gerekir.



Şekil 2.5. Çanlı tepe sisteminin şematik gösterimi.

Çansız tepe sisteminde fırın tepesine gelen malzemeler, uygulanacak şarj programı kapsamında sırayla siloya boşaltılır. Malzeme fırın içerisine boşaltılmadan önce üst sızdırmazlık valfi kapatılır ve silo iç basıncı fırın basıncına eşitlenir. Eşitleme işlemi

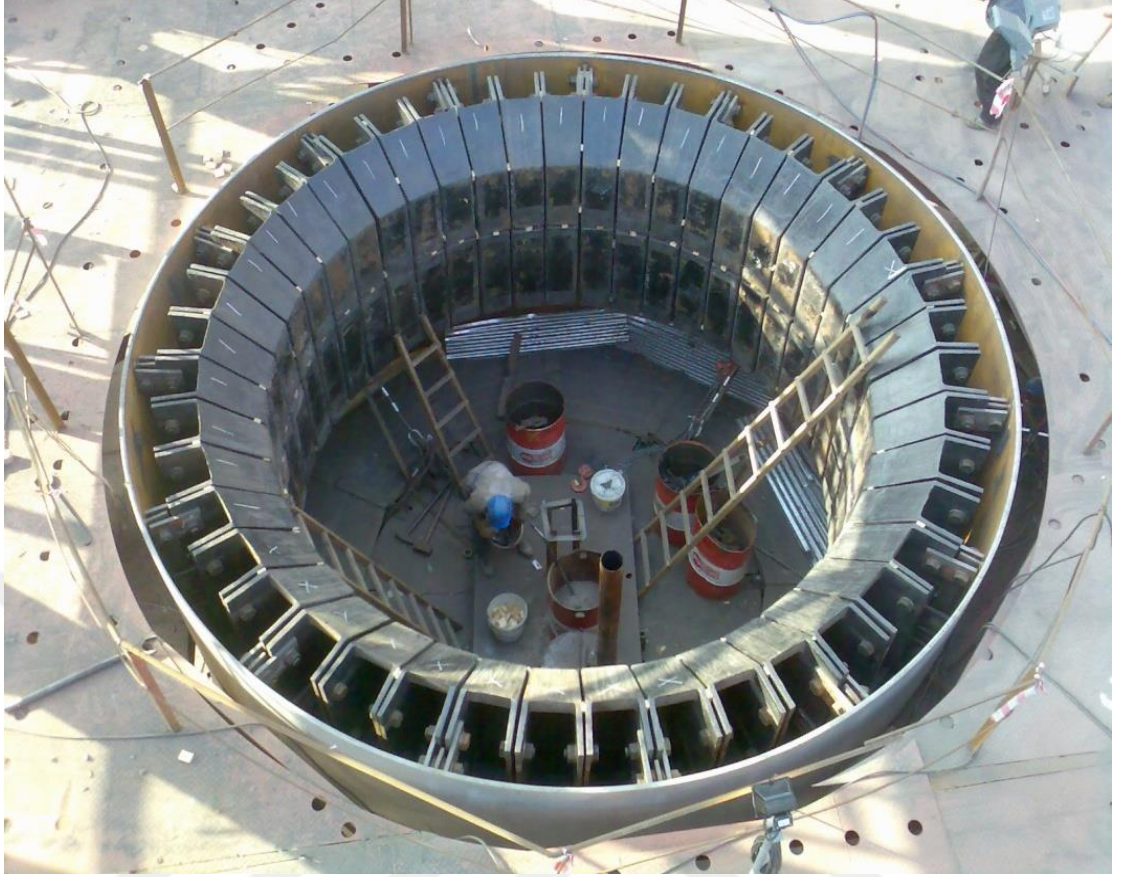
tamamlandıktan sonra alt sızdırmazlık valfi açılır ve malzeme döner oluk vasıtası ile fırın içerisine homojen bir biçimde dökülür. Silo içerisindeki malzeme tamamen boşaldıktan sonra alt kesme valfi ve alt sızdırmazlık valfi sıra ile yeniden kapatılır. Silonun tekrardan malzeme alabilmesi için, silo iç basıncının atmosfer basıncına eşit olması gerekir. Bu sebeple, tahliye valfi açılarak silo içerisindeki basınç tahliye edilir.



Şekil 2.6. Çansız tepe sisteminin şematik gösterimi.

Tepe sisteminin altında bulunan koni şeklindeki bölüm, şarj edilen malzemenin fırın içine dağıldığı ve reaksiyonlar sonucu oluşan gazın tahliye edildiği kısımdır. Buradan başlayarak düşey ekseninde aşağı doğru birkaç metre uzunluğa sahip boğaz kısmı yer alır. Bu bölümde, fırın içine aktarılan malzemelerin duvardaki tuğlalara zarar vermemesi için aşınma plakaları bulunur (Şekil 2.7).





Şekil 2.7. Boğaz aşınma plakalarının montajı anı görüntüsü.

Boğazdan aşağıya doğru fırının toplam uzunluğunun ortalama  $3/5$ 'lik kısmında gövde bulunmaktadır. Bu kısım 30 mm kalınlığındaki St 52 çelik saçtan yapıлып tamamen refrakter tuğla ve soğutma plakaları ile örülmüştür. Isınma sonucu malzemelerin hacimlerinin artması sebebiyle rahat bir şekilde hareket sağlanabilmesi için gövde çap değeri aşağıya doğru artmaktadır. Gövdenin sonlandığı noktada başlayan ve düşey ekseninde çapı sabit olan bel (belly) bölgesi fırının çapı en büyük bölgesidir. Metal ve cürufun ergimesi ve bunun sonucu olarak hacimlerinin azalması bu bölgede başlar. Karın (bosh) bölgesi, fırının alt kısmında çapın yeniden daralmaya başladığı kısımdır. Kısmi ergime sebebiyle bu bölümde fırın hacmi küçülür. Fırının karın kısmının altında tüyerler ve hava üfleme boruları vardır. Sobalar tarafından ısıtılmış sıcak hava, simit şeklindeki bir boru kolektörüne bağlı olan bu borular vasıtasıyla fırına verilir. Fırına verilen hava yanma sağladığı gibi fırın içerisindeki şarj malzemelerini de askıda tutar. Hava üfleme boruları fırının etrafını çevirecek şekilde eşit aralıklarla yerleştirilmiştir. Eriyen metal ve cüruf, karın bölgesinin altında bulunan ve düşey ekseninde çapı sabit

olan hazne bölgesinde birikir. Isı olarak en hassas kısım haznedir ve hazne tabanı yüksek alüminyum silikalı veya karbon tuğlalar ile örülür. Tuğlanın ömrü tepeden hazneye kadar döşenmiş soğutma plakaları, hazne soğutma suları ve tercihen taban soğutma havası ile artırılır.

## **2.2. YÜKSEK FIRIN GRANÜLE CÜRUFU**

### **2.2.1. Yüksek Fırın Cürufu**

Yüksek fırın prosesinde; sıvı ham demir elde edilirken, demir cevherinin indirgenmesi esansında cüruf yapıcı elementlerin oksitlenerek özgül ağırlık farkı sebebiyle sıcak maden üzerinde toplanmasıyla yüksek fırın cürufu oluşur. Yüksek fırından çıkartıldığı zaman yaklaşık 1500 – 1600 °C sıcaklıkta ve eriyik durumda olan ve su ile hızlı soğutulduğunda granül bir yapı kazanan yüksek fırın cürufları bu özelliklerinden dolayı çimento sektöründe hammadde olarak kullanılmaya elverişlidir. Çok çabuk soğutulma işlemi nedeniyle cüruf amorf bir yapıdadır. Cüruf kendi başına bağlayıcılık değeri olmayan veya bağlayıcılık değeri çok az olan fakat ince taneli durumdayken sulu ortamda kalsiyum hidroksitle birleştiğinde hidrolik bağlayıcılık gösterebilme özelliği kazanan silikalı ve alüminalı malzemeler sınıfındadır, yani puzolanik özellik göstermektedir [5]. Türkiye’de faaliyet gösteren üç entegre tesisten çıkan yüksek fırın cürufunun tamamına yakın bir bölümü çimento fabrikalarında değerlendirilmektedir [6].

### **2.2.2. Cüruf Çeşitleri ve Kullanım Alanları**

Granüle cüruf (Şekil 2.8.a) elde etmek için sıcak yüksek fırın cürufu çok miktarda su ile hızlı bir şekilde soğutulur. Çimento yapımında kullanılabilmesi için öğütülür. Yüksek fırın cürufu (Şekil 2.8.b) ortam havası ile yavaş yavaş soğur, bir kırma tesisinde öncelikle inşaat agregası olarak kullanılmak üzere çeşitli boyutlarda işlenir. Cürufların ortak kullanım alanları hazır beton içinde agrega, prekast beton, sıcak karışım asfalt agregası, septik drenaj alanları ve boru dolgu işleridir. Yangına dayanıklı beton duvar ve toprak üzerine hafif dolgu uygulamalarında kullanılabilen agrega üretilebilmesi için sıcak cürufun su veya buhar kullanılarak hızlı bir şekilde

soğutulmasıyla peletlenmiş veya genişletilmiş cüruf (Şekil 2.8.c) elde edilir. Azaltılmış ağırlığı nedeniyle hafif beton duvar, hafif hazır beton ve hafif prekast beton için uygundur.

Parça cüruf (Şekil 2.8.d), kırsal alanda sürüş güvenliğinin artırılması amacı ile yol üzerinde patinaj direnci sağlamak için kullanılır. Ayrıca sıcak asfalt karışımı olarak da tercih edilebilir. Dolgu cürufu (Şekil 2.8.e), erozyonu önlemek amacı ile yamaçlarda dolgu olarak kullanılmasının yanında taş yünü üretiminde de kullanılmaktadır. Çimento cürufu (Şekil 2.8.f), hazır beton, prefabrik beton, duvar kaplaması, zemin tesviye bileşikleri ve yüksek ısı dayanımı olan yapı ürünlerinde kullanılır.



a) Granüle cüruf



b) Katı cüruf (hava soğutmalı)



c) Peletlenmiş veya genişletilmiş cüruf



d) Parça cüruf



e) Dolgu cürufu



f) Çimento cürufu

Şekil 2.8. Cüruf çeşitleri görüntüsü.

### 2.2.3. Granüle Edilmiş Yüksek Fırın Cürufu

Granüle cüruflar, yüksek soğuma oranıyla üretilen cüruflardır. Genellikle bir havuzun içine doğru cürufu kırarak şekilde basınçlı su spreyi yardımıyla parçalanarak soğutulması veya döner tambur üzerine su ile birlikte sıvı cüruf boşaltımı ile üretilirler (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Yüksek fırın cürufunun granüle edilme anı görüntüsü.

Hızlı soğuyan cüruflar hava soğutmalı cürufların kullanım alanlarına benzer alanlarda kullanılmasının yanı sıra çimento ve cam hammaddesi olarak da kullanılmaktadır [2]. Bağlayıcı malzeme olarak yüksek fırın cürufunun kullanımı hakkındaki ilk bilgiler 1774 yıllarına uzanmaktadır [7]. Cüruf ile kireç kullanılarak elde edilen bağlayıcıların üretimi ticari olarak 1865 yılında Almanya’da başlamış ve 1889 yılında Paris metrosu inşaatında kullanılmıştır. Günümüzde öğütülmüş yüksek fırın cüruflarının bağlayıcılık özelliklerinden genellikle iki şekilde yararlanılmaktadır [4]. Birincisi portland çimentosu üretiminde klinker miktarı azaltılarak yerine % 20 ile % 80 oranı arasında yüksek fırın cürufu konulmasıdır. Diğer yararlanma şekli ise beton içerisinde bağlayıcı madde olarak kullanılan portland çimentosunun bir miktar azaltılarak çimento yerine çok ince öğütülmüş yüksek fırın granüle cürufu katılması ve cürufu katkılı beton elde edilmesidir. Yüksek fırın cürufu içeren çimentoların üretimine 1892 yılında Almanya’da ve 1896 yılında ABD’ de başlanmıştır. Yüksek fırın cürufu, aynı zamanda cam yapımında alüminyum oksit kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu konuda yapılan araştırmalarda, cürufun rafinasyona olumlu etkileri olduğu ve erimeyi hızlandırdığı

görülmüştür. Çizelge 2.1’de Kardemir A.Ş laboratuvarlarında ölçülmüş olan yüksek fırın granüle cürufuna ait yoğunluk değerleri verilmektedir.

Çizelge 2.1. Yüksek fırın cürufu fiziksel özellikleri (Kardemir, 2013).

Tarih	Numune Adı	Serbest Düşme Testi [g/cm <sup>3</sup> ]	Sıkıştırılmış Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ]	Ortalama Yoğunluk [g/cm <sup>3</sup> ]
26/12/2013	Yüksek Fırın Granüle Cürufu	1,07	1,3	1,18

Yüksek fırın cürufuna ait kimyasal bileşim değerleri Çizelge 2.2’de Euroslag 2003 değerleri ve 2013 yılı Kardemir 1 no’lu yüksek fırınına ait değerler olmak üzere mukayeseli olarak verilmektedir.

Çizelge 2.2. Yüksek fırın cürufu kimyasal bileşimi [8].

Cüruf Kimyasal Bileşimi		
	EUROSLAG, 2003	Kardemir, 24.11.2013
Silisyum dioksit (silika) - SiO <sub>2</sub>	30,50 – 40,80	38,84
Alüminyum oksit (alümina) - Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,90 – 17,60	8,91
Demir oksit - FeO	0,12 – 4,72	0,49
Titanyum dioksit - TiO <sub>2</sub>	0,07 – 3,70	1,04
Manganez oksit - MnO	0,07 – 3,12	2,25
Kalsiyum oksit - CaO	30,90 – 46,10	39,13
Magnezyum oksit - MgO	1,66 – 17,31	6,90
Sodyum oksit - Na <sub>2</sub> O	0,09 – 1,73	0,39
Potasyum oksit - K <sub>2</sub> O	0,08 – 1,51	1,00
Kükürt trioksit - SO <sub>3</sub>	0,00 – 0,86	-
Kükürt - S	0,42 – 2,29	0,71
Diğer	0,03 – 4,06	0,34

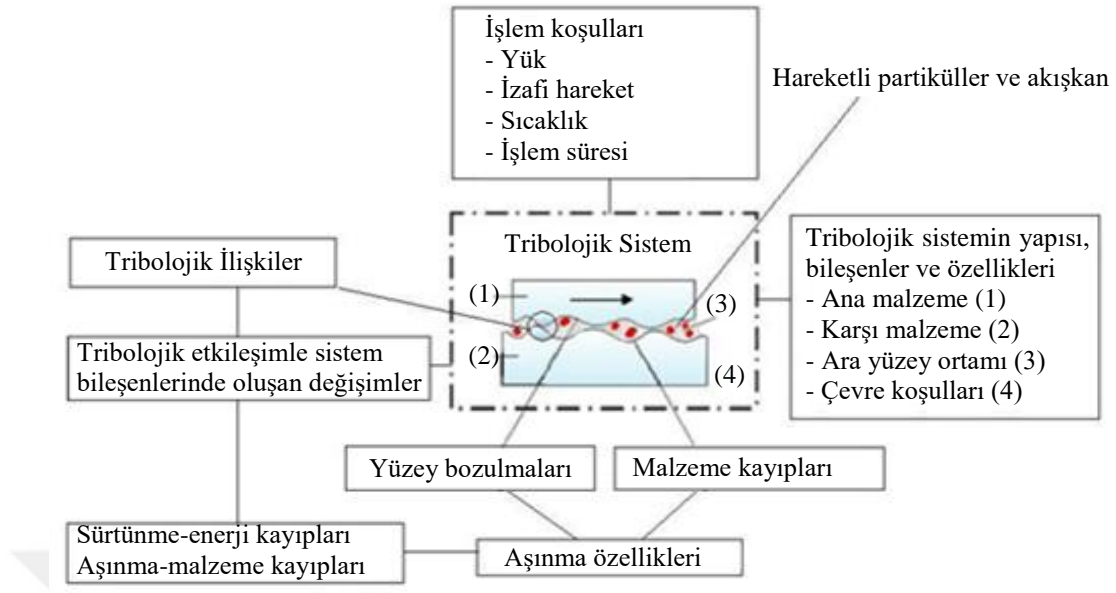
## BÖLÜM 3

### AŞINMA

Aşınma, birbiri ile temas eden yüzeylerin mekanik etkiler sebebiyle ya da herhangi bir yüzeye katı, sıvı veya gaz maruziyeti neticesinde malzeme kaybının meydana gelmesi olarak tarif edilebilir [9]. İstenmeyen bir durum olmakla beraber önlem alınmadığı takdirde çok ciddi problemlerin tetikleyicisi olabilmektedir. Aşınma, sonuçları ile ekipman ömürlerini olumsuz yönde etkilemekte ve maddi kayıplara sebep olmaktadır. DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarında aşınmanın tanımı: “kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması” şeklindedir [9, 10]. Üstelik aşınma tanımlanırken katı cisim yüzey bölgesinden tribolojik bir zorlanmanın sonucu olarak sürekli ilerleyen malzeme kaybı ifadesi kullanılmıştır [10]. İfadeden de anlaşılacağı gibi aşınma ile ilgili en önemli husus sürekliliktir.

#### 3.1. AŞINMA SİSTEMİNDE TEMEL PARAMETRELER

Aşınma parametreleri toplam altı adettir. Bu parametreler, aşınan malzeme (ana malzeme), aşındıran malzeme, ara malzeme, hareket, yük ve ortamdır. Ortam; katı, sıvı veya gaz olabilir. Aşınan ve aşındıran malzemelerin bir araya gelmesiyle “aşınma çifti” oluşur. Aşınma çifti ile beraber sert parçacıklı sıvı, gaz ve buhar ara malzemelerinin oluşturduğu sisteme de “aşınma kombinasyonu” adı verilmektedir. Ayrıca aşınma sonucu ortaya çıkan parçacıklar da ara malzemelerle birlikte aşınmaya ilave bir etki yaparlar. Şekil 3.1’de tribolojik bir sistemin DIN 50320 standardına göre gösterimi verilmiştir. Aşınan ve aşındıran malzemelerin kimyasal bileşimleri ve yapıları, yüzey sertlikleri, yüzey pürüzlülükleri ve boyutları aşınmayı etkileyen faktörlerdir. Bunların dışında ortamın (sıvı veya gaz) sıcaklığı, nemi, asidik veya bazik oluşu da diğer etkileyici faktörlerdir. Sayılanlara ek olarak basınç, hız vb. gibi çalışma parametreleri de aşınmayı etkileyen faktörler olarak sayılabilir [11].



Şekil 3.1. Bir tribolojik sistemin DIN 50320 standardına göre şematik gösterimi [12].

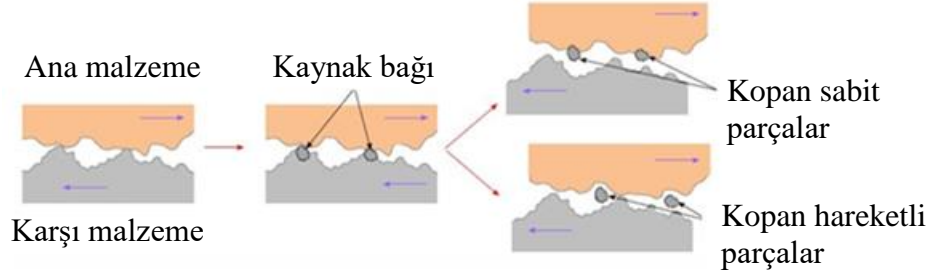
### 3.2. AŞINMA MEKANİZMALARI

Aşınma mekanizmaları; abrazif aşınma, adhezif (yapışmalı) aşınma, erozif aşınma, korozyon aşınma ve yorulma aşınmasıdır [13].

#### 3.2.1. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, özellikle birbirleriyle kayma sürtünmesi yapan, metal-metal aşınma çiftinde meydana gelen aşınma olayıdır. Şekil 3.2’de adhezif aşınma şematik gösterimi verilmiştir. Birbirleriyle temas durumunda olan ve aralarında herhangi bir yağlayıcı olmayan benzer iki metalik yüzey arasında adhezyon kuvveti denilen bir çekim kuvveti vardır. Bu kuvvetin meydana gelebilmesi için malzemelerin birbirleri ile yakın temasta olmaları gerekmektedir. Böylelikle temas halindeki iki metal yüzeylerindeki pürüzlülükler yüzünden etkileşirler. Malzeme ağırlığı veya bir dış kuvvetin etkisiyle çok küçük olan pürüzlülüklere gelecek olan basınç veya gerilme çok büyük olur. Söz konusu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğrarlar. Eğer malzemenin deforme olma kabiliyeti yüksek ise mikro adhezyon alanları çabucak temas yüzeyine yayılır. Bunlara ilave olarak temas noktalarında aşırı sıcaklık artışı kaynak bağlarının oluşumunu kolaylaştırır. Bazen bu aşınma türünde yüzeyde bulunan sıvı veya gaz

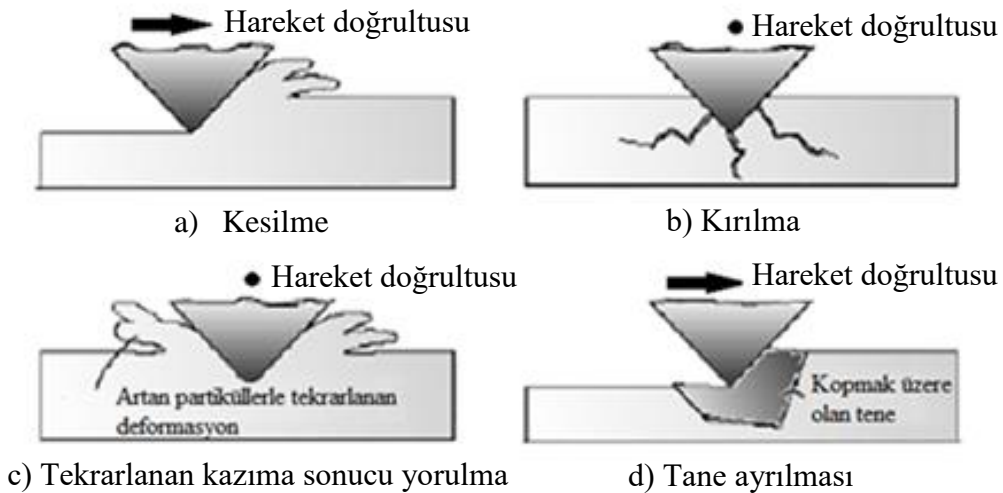
molekülleri ve oksit tabakaları parçalanır ve bu parçacıklar abrazif aşınmaya da neden olurlar. Adhezif aşınmaya maruz kalan parçalar genellikle çelik hadde merdaneleri, yağlanmamış rulmanlar, makas bıçakları, silindir iç yüzeyleri ve benzeri parçalardır.



Şekil 3.2. Adhezif aşınma şematik gösterimi [13].

### 3.2.2. Abrazif Aşınma

Birbirine göre zıt yönde belirli bir hızda hareket eden iki malzemeden daha sert olanının üzerinde yer alan çıkıntılar sebebi ile diğer malzeme üzerinden parça kopardığı aşınma türüdür. Bazen yüzeyler arasında yer alan sert parçacıklar da bu tür aşınmaya sebebiyet verir. Şekil 3.3'de abrazif aşınma mekanizmaları şematik olarak belirtilmiştir [14].



Şekil 3.3. Abrazif aşınma mekanizmaları genel görüntüleri [14].

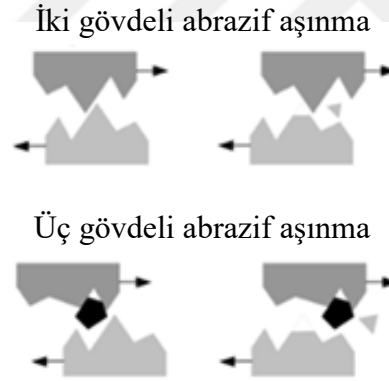
Bu yüzeyler arasında bulunan sert parçacıklar sisteme dışarıdan dahil olabileceği gibi adhezif aşınma sonucu olarak da sistem içinde ortaya çıkabilirler. Kopan bu parçalar



aşınma sistemine aktif olarak katılırlar. Abrazif aşınmaya etki eden temel faktörler sertlik değeri, aşındırıcı türü, tane geometrisi ve boyutu, yüzey pürüzlülüğünün şekli ve boyutu, uygulanan yük ve hareket hızı şeklinde sıralanabilir [15].

Sürtünen yüzeylerden daha sert olanının yüzeyinde yer alan çıkıntılarının veya yüzeylerden birisine gömülmüş sert parçacıkların diğer yüzeyi kazınması gövdeli abrazif aşınma olarak adlandırılır [15]. Gövdeli abrazif aşınma iki tip olup, iki gövdeli ve üç gövdeli olarak sınıflandırılabilir [16].

Üç gövdeli abrazif aşınma türünde sert parçacıklar yüzeyler arasında yuvarlanarak veya kayarak serbestçe hareket edebilirken iki gövdeli abrazif aşınmada iki yüzey arasında kalmış sert çıkıntılar ya da gömülmüş sert parçacıklar bu şekilde hareket edemez. Şekil 3.4’de iki ve üç gövdeli abrazif aşınma şematik hali görülmektedir.



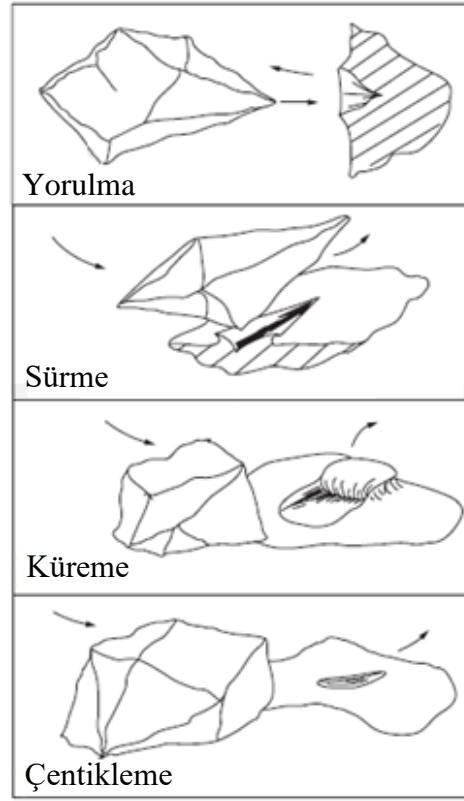
Şekil 3.4. Abrazif aşınma türleri görüntüsü [17].

Ağırlık kaybı üç gövdeli aşınmada iki gövdeli aşınmadan daha azdır [16]. Suchánek ve diğerlerine göre, serbest abrazif parçacıklar, katı yüzeyleri arasında buldukları zamanın %10’unda aşınmaya sebep olurken % 90’ında yuvarlanarak hareket ederler bu sebeple üç gövdeli abrazif aşınmada iki gövdeli abrazif aşınmaya göre malzeme ayrılması ebat olarak daha düşüktür [18]. Üstelik üç gövdeli aşınma türünde, aşındırma açılarındaki farklılık sebebiyle aşındırıcıların küçük bir kısmı aşınmaya sebep olur [16]. İki gövdeli abrazif aşınmaya örnek olarak kesme, öğütme ve talaşlı imalat işlemleri verilebilirken üç gövdeli abrazif aşınmaya da abrazif alıştırma ve parlatma işlemleri örnek olarak verilebilir [11].

### **3.2.3. Eroziyon Aşınma**

#### **3.2.3.1. Katı Partikül Erozyonu**

Katı partikül erozyonu sıvı veya gaz akışkan içerisinde belirli bir hızda akan aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine sürekli çarpması sonucu yüzeyde oluşturduğu çarpma etkisiyle meydana gelen malzeme kaybıdır. Bu tür bir aşınmayı etkileyen faktörler katı partikül akışı, partikül özellikleri ve aşınan malzeme özellikleridir. Katı partikül akışında hız, çarpma açısı ve akışkan konsantrasyonu en önemli etkenlerdir. Katı partikül erozyonu istenmeyen bir durum olmasına rağmen imalat sanayisinde kullanım alanı mevcuttur. Bunlar kumlama işlemi ve su jeti ile kesme işlemleridir. Kumlama işlemi herhangi bir yüzey üzerindeki istenmeyen katmanların (boya, pas vs.) temizlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Su jeti işlemi ise yüksek basınç ve hızdaki suyun içine aşındırıcı katılarak herhangi bir yüzey üzerine kontrollü olarak uygulanmasından ibarettir [19].



Şekil 3.5. Katı partikül erozyonu türleri [20].

### 3.2.3.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu

Sıvı damlası erozyonu yüksek hızla hareket etmekte olan bir katının kendisinden daha düşük hıza sahip sıvı damlalarının çarpmasına maruz kalması ile oluşur. Bu erozyon türü yağmur erozyonu, su damlası erozyonu ve nem erozyonu olarak da adlandırılabilir. Yağış süresince katı hareketinin önlenmesi, damlaların parçalanarak yüzeye çarpması ve dayanıklı malzeme kullanılması bu aşınmanın önlenmesi veya en aza indirilmesi için önemlidir [21].

### 3.2.3.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu

Bir akışkan ortam içerisinde (ki bu akışkan sıvı ya da gazdır) taşınan katı partiküllerin (santral tozları, yüksek fırın cürufu vb.) taşınma esnasında hedef malzemenin iç yüzeyine çarpması sonucu meydana gelen aşınmadır. Sanayide boru hatlarında ve pompalarda sıklıkla karşılaşılan aşınma türüdür. Katı partikül aşınmasında en önemli parametreler taşınan malzemenin partikül sertliği, ortamdaki katı konsantrasyonu,

partikül ebatı, akışkanın içindeki partikülün hızı ve çarpma açısıdır. Bunların dışında partikülün yoğunluğu, geometrisi ve sıvı ortamdaki oksijen içeriği de etkili diğer parametrelerdir. Partikül sertliği aşınma kaynaklı malzeme kaybını artırır, ayrıca daha yoğun olan malzemelerin sebep olduğu deformasyon ve kesme aşınması miktarı da fazla olmaktadır. Boru hatlarında özellikle dirsekler ve redüksiyonlar gibi bölgeler aşınmanın daha fazla olduğu bölgelerdir. Akışkan ortamın katı konsantrasyonunun artması aşınmanın artmasına sebep olur. Bu tarz bir aşınmanın önüne geçebilmek için malzeme seçiminde taşınan malzemeden daha sert bir yüzeye sahip malzeme seçilmesi, akışkan hızının gereğinden fazla seçilmemesi, taşınan katı konsantrasyonunun yüksek seçilmemesi ve sistemde kullanılan boruların belirli periyotlarla döndürülmesi gibi çözümlerle ekipman ömrünü artırmak mümkün olur [21].

#### **3.2.3.4. Kavitasyon Erozyonu**

Sıvı ortam içerisinde çalışan ekipmanlarda ani basınç değişimi sebebi ile oluşan titreşimlerin ortaya çıkardığı yüksek frekanslı ses dalgalarının ekipman yüzeyinde meydana getireceği basınçlı bölgelerde anlık olarak çok sayıda kabarcığın oluşması ve bu kabarcıkların düşük basınçlı bölgeden yüksek basınçlı bölgelere doğru hareket etmesi sonucu patlamanın gerçekleşmesi neticesinde yüzeyden çok küçük parçacıkların kopması olayı kavitasyon olarak ifade edilebilir. Kavitasyona karşı dayanımlı olacak herhangi bir malzeme yoktur. Fakat kobalt esaslı malzemelerin dayanımı bu tip aşınmalara karşı epey fazladır. Böyle bir aşınma durumunda ekipman üzerinde en zayıf bölgelerin kaplanması, bu bölgelerin kolay değişime uygun dizayn edilmesi uygun olacaktır [21].

#### **3.2.3.5. Elektro Erozyon**

Bu aşınma türü vakum altında veya iletken olmayan bir sıvı içerisinde katot ve anot arasında meydana gelen akım neticesinde katot malzemenin yüzeyinden çok küçük taneli parçacıkların kopması sonucu meydana gelir. Bu tip aşınmadan imalat sektöründe çok fazla seviyede yararlanılmaktadır. Örnek olarak dalma tipi erozyon ve

tel erozyon yöntemleri verilebilir. Bu üretim yöntemleri sayesinde elektriği ileten her tür malzemenin işlenmesi mümkün olabilmektedir [21].

#### **3.2.4. Koroziyon Aşınma**

Metalik malzemelerin kimyasal bileşimlerinde yer alan alaşım elementlerinin türlerine ve miktarlarına göre yüzeylerinde doğal bir oksit tabakası bulunur. Söz konusu bu tabaka koroziyon etkiye karşı dayanım kazandırır. Mekanik sürtünmeler veya darbeler neticesinde bu tabaka ortadan kalkabilir ve tekrar oluşmaz. Malzeme yüzeyinin dayanıksız hale gelmesi neticesinde yüzeyde meydana gelen kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu yaşanan malzeme kaybı koroziyon aşınma olarak adlandırılır. Malzeme yüzeyinde meydana gelen reaksiyonlar adheziyon aşınmanın önlenmesi için fayda sağlayabilmekle beraber şayet kontrolsüz bir hal alırsa ciddi malzeme kayıplarına yol açar. Ortama göre düşük ve yüksek sıcaklık korozyonları olabilir. Yüksek sıcaklık korozyonları kimya, maden, enerji arıtma vs. gibi birçok sektörde karşılaşılan bir problemdir [21].

#### **3.2.5. Yorulma Aşınması**

Çok sayıda tekrarlanan yüklerin meydana getirdiği titreşimler neticesinde yorulma aşınması meydana gelir. Bu yük tekrarları malzemenin yüzey altında meydana gelen çatlakların yüzeye doğru hareket etmelerine sebep olur. Bunun neticesinde de yüzeyden malzeme ayrılması meydana gelir. Yağlama yetersizliğinin sebep olduğu aşınmalardan farklı olarak iyi yapılan yağlamalarda bile görülebilir. Karıncalanma, oyuklanma, yüzey ayrılması, darbe aşınması ve brinelling gibi türleri vardır [21].

### 3.3. AŞINMA DENEYLERİ ve ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

#### 3.3.1. Aşınma Deneyleri

Sanayi tesislerinde kullanılan veya kullanılacak olan ekipmanlardan istenilen en önemli özellik genelde fonksiyon kabiliyetlerinin yanında uzun ömürlü olmalarıdır. Tesis bütünlüğünü sağlayan bu ekipmanlarda meydana gelecek herhangi bir problem hem üretim kaybı hem de maliyet olarak karşımıza çıkacaktır. Genelde ekipman ve malzeme ömürlerini belirleyen etkenler aşınma tabanlı olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sebepten dolayıdır ki uzun ömür sağlanabilmesi için aşınma direnci yüksek malzemelerin seçilmesi uygun olacaktır. Mevcut parça yerine yeni geliştirilmiş bir malzemeden imal edilmiş bir parça kullanılmadan önce belirli aşınma testlerinden geçirilmesi yerinde olacaktır. Seçilmiş olan bir malzeme için mutlaka bir ömür ön görüşü muhtemel olmakla beraber çalışan sistemin sağlığı ve sürekliliği için sistem üzerinde denenmeden önce deneysel ortamda çeşitli testlerin yapılması da bir zarurettir. Maliyet ve zaman gibi kısıtlar dikkate alındığında yapılacak olan deneysel çalışmaların basite indirgenmiş ve gerçek sistemi temsil edecek şekilde olması gerekmektedir. İncelenmesi düşünülen aşınma elemanları gerçek malzemeden seçilmeli ve aşınma mekanizması tam olarak canlandırılmalıdır. Aşınmada bir malzeme kaybından söz ediyorsak, bu kayıp kütleli veya hacimsel olarak tespit edilebilir. Aşınmayı karakterize etmek için öncelikle türünün belirlenmesi, akabinde deney düzeneğinin tasarlanması gerekir. Aşınma deneylerinde aşınma miktarının ölçümü ile ilgili yöntemler ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişimi ve radyo izotop yöntemleridir [22].

##### 3.3.1.1. Ağırlık Farkı Yöntemi

En basit ve ekonomik yöntem olması sebebiyle en çok tercih edilen yöntemdir. Ağırlık kaybının 1 veya 0,1 mg hassasiyette ölçümü için teraziler mevcut olup ağırlık tespiti ve aşınma miktarı ölçülmesi için kullanılır. Eğer ağırlık kaybı alınan yol ile ifade edilecekse mg/m olarak veya bu birimlerin farklı büyüklükleri şeklinde ifade edilebilir. Aşınmaya maruz kalan numune yüzeyi üzerinden de mg/cm<sup>2</sup> olarak da aşınma ifade

edilebilir. Ayrıca ölçülen ağırlık farkından özgül ağırlık değeri kullanılarak hacimsel kayıp hesabına da gidilebilir [12].

### **3.3.1.2. Kalınlık Farkı Yöntemi**

Bu yöntemle aşınmadan dolayı meydana gelen boyut değişikliği tespiti yapılmaktadır. Elde edilen bu değer yardımıyla hacimsel değişim hesaplanmaktadır. Yöntemin hassasiyetinin artırılması kullanılacak olan ölçü aletinin hassasiyetine bağlıdır. Ölçüm ne kadar hassas yapılırsa elde edilecek sonuç da o kadar hassas olmaktadır [12].

### **3.3.1.3. İz Değişimi Yöntemi**

Bu yöntemde numune yüzeyi plastik deformasyona uğratarak bir iz oluşturulur. Deney süresince meydana getirilen bu izin geometrik değişimi takip edilir ve mikroskop kullanılarak alınan değerler analiz edilir. Uygulamada en çok kullanılan iz oluşturucu aparatlar Brinell ve Vickers sertlik ölçüm uçlarıdır [12].

### **3.3.1.4. Radyo İzotop Yöntemi**

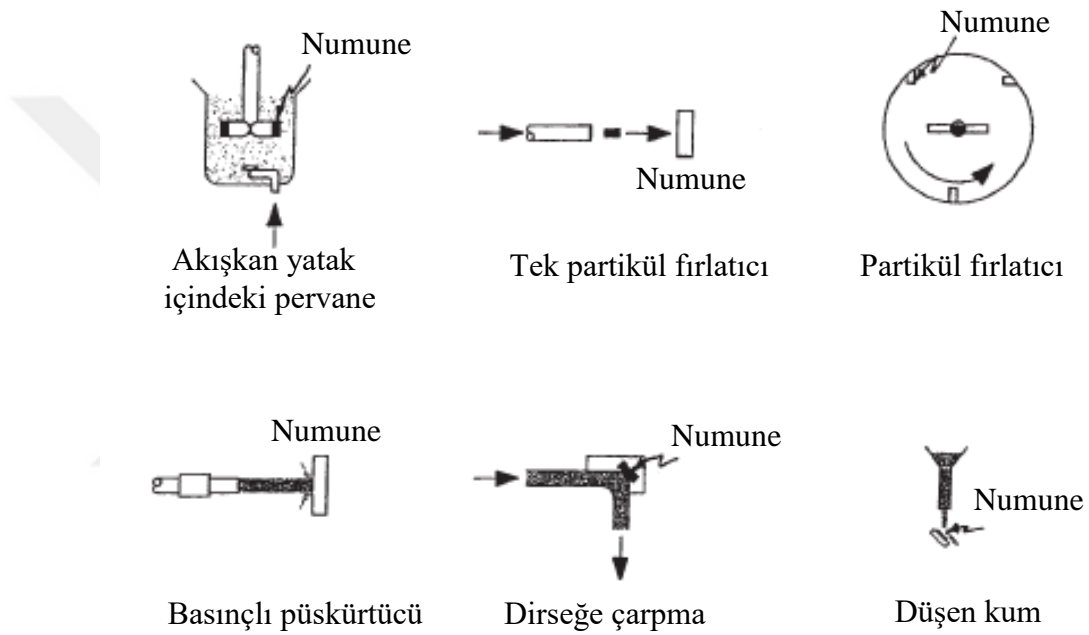
Bu yöntemde aşınma yüzeyine proton, nötron veya  $\alpha$  parçacık bombardımanı yapılır. Yüzey bu işlem sonrası radyoaktif hale getirilmiş olur. Aşınma hassasiyeti oldukça fazla olmakla beraber çalışma şartları değiştirilmeden kolaylıkla ölçü alınabilir. Ekonomik olmaması sebebiyle fazla tercih edilmez sadece özel amaçlarla kullanılır [12].

## **3.3.2. Erozif Aşınma İçin Deney Yöntemleri**

### **3.3.2.1. Katı Partikül Erozyonu İçin Deney Yöntemleri**

Katı partikül erozyonu bir malzemenin yüzeyinden tekrarlı çarpmalar neticesinde parça kalkması olarak tarif edilebilir. Bu tip aşınma üzerine etki eden farklı parametreler vardır. Bu parametreler aşınmaya maruz kalan malzeme ile ilgili olanlar, aşındırıcı ile ilgili olanlar ve hız, çarpma açısı ve konsantrasyon gibi parametreleri

barındıran akış ile ilgili olanlar olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilir. Katı partikül erozyonu deneyleri için kullanılan bazı sistemlere ait şematik resimler Şekil 3.6'da görülmektedir. Katı partikül erozyonunda aşındırıcı malzemenin özellikleri aşınma karakteri için önem arz etmektedir. Aşındırıcı partikülün sertliği, sahip olduğu geometri, miktarı, yüzeye çarpma açısı ve hızı önemli parametrelerdir. Eğer deneylerde hava veya reaktif olmayan gaz kullanılırsa kimyasal etki de gözlemlenmez yani aşınmaya sadece mekanik etkiler sebep olur. Mevcutta yapılmış deneylerde farklılıklar genelde hız üzerinde yoğunlaşmış durumdadır [23].



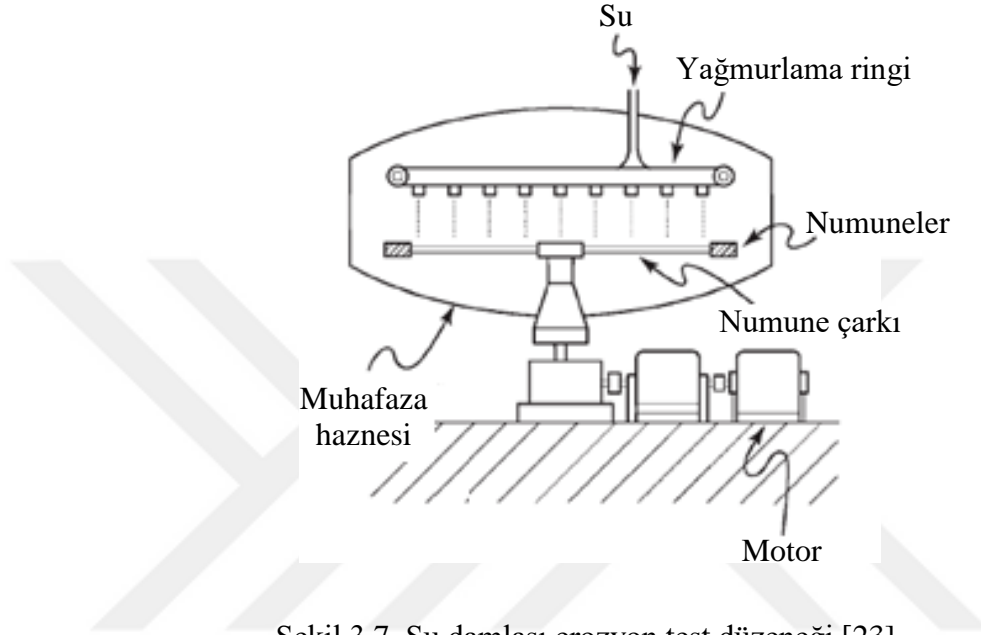
Şekil 3.6. Katı partikül erozyonu deney düzenekleri görüntüsü [23].

### 3.3.2.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu İçin Deney Yöntemleri

Sıvı damlalarının doğal ortam şartlarında yüksek hızlara ulaşip herhangi bir katı yüzeye çarparak yüzeyden malzeme kaldırması oldukça zordur. Sıvı damlası erozyonunda yüksek hızla hareket eden katı olup sıvı damlalarına çarpması ve bu işlemin tekrarlı olması neticesinde yüzeyde oluşan şok dalgalarının meydana getirdiği bir tahribat söz konusudur. Bu bazen yağmur erozyonu veya nem erozyonu olarak da adlandırılabilir. Bu sebeple meydana gelen kayıpların önlenmesi veya minimize edilmesi, darbelere dayanıklı malzeme seçimi, partiküllerin yüzeye çarpmadan parçalanması ve yağmur süresince malzemenin hareket ettirilmemesi ile önlenabilir.



Şekil 3.7’de örnek bir test düzeneği görülmektedir. Şematik resimden de görüleceği gibi hareket ettirilen aşınmaya maruz bırakılacak olan malzeme numuneleridir. Söz konusu düzenek farklı hız ve farklı su damlası boyutlarında ve üstelik metal, kompozit ve plastik gibi farklı özelliklerdeki malzeme numuneleri için de kullanılabilir [23].

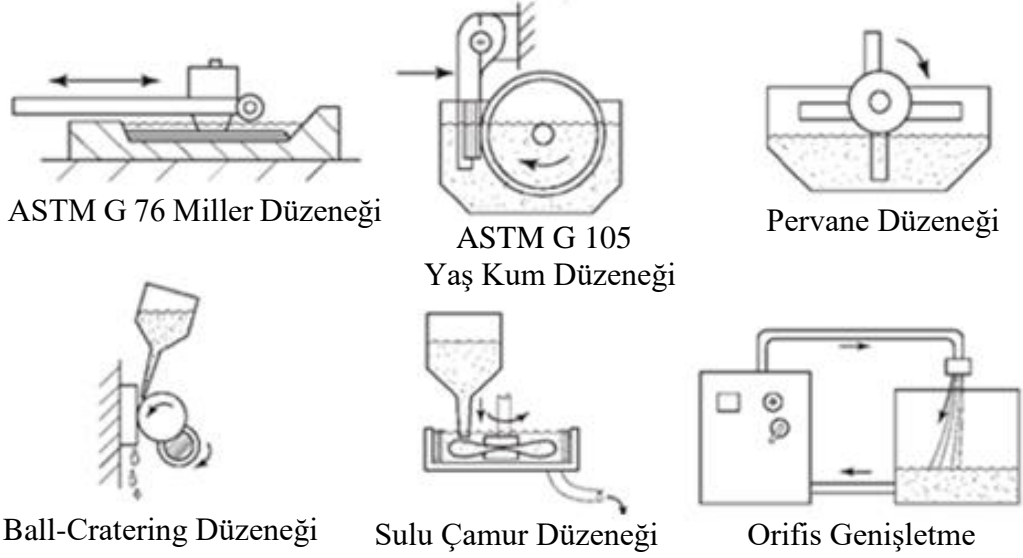


Şekil 3.7. Su damlası erozyon test düzeneği [23].

### 3.3.2.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu İçin Deney Yöntemleri

Katı partikül taşıyan akışkan ortam erozyonunda akışkan ortam gaz yada sıvı bir maddeden ve aşındırıcıdan teşkil edilir. Genelde pompalar vasıtasıyla taşınım söz konusudur. Örneğin durgunken jel gibi, karıştırıldığında ise sıvı gibi davranan (tikotropik) bir akışkanın içinde yer alan kalsiyum karbonat partiküllerinden meydana gelmiş bir diş macunu da buna en uç örnek olarak verilebilir. Üstelik pompalanabilen çimento harcı da aynı şekildedir. Taşınım işlemi esnasında karışım içerisinde yer alan aşındırıcı partiküller sebebiyle pompa ve boru hatlarında yüzeysel malzeme kayıpları meydana gelir. Şekil 3.8’de bu tip aşınma için birkaç farklı deney düzeneği şematik olarak verilmiştir. En yaygın kullanılan tipi Miller testidir. Bu test düzeneği ile ortamın aşındırıcılığının değerlendirilmesi ve farklı aşındırıcı ortamlarda kullanılan pompaların aşınma dayanımlarının mukayesesinin yapılması da mümkün olmaktadır.

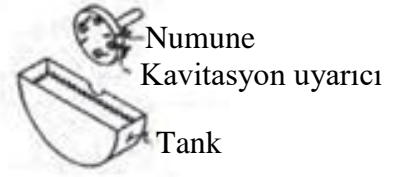
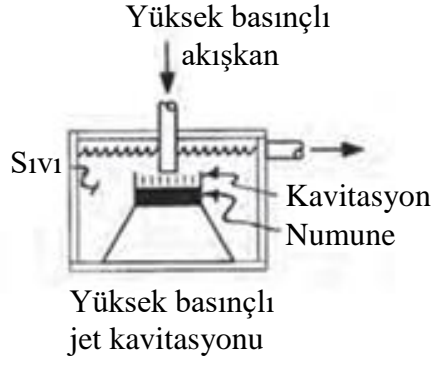
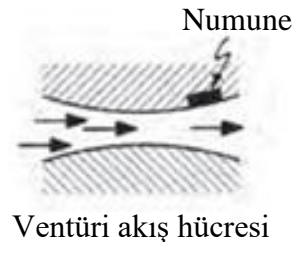
Bu deneyler neticesinde Miller numaraları ortaya çıkartılmakta ve bu numara ne kadar büyük olursa ortamın o derece aşındırıcı olduğu anlaşılabilir [23].



Şekil 3.8. Farklı erozif aşınma test düzenekleri görüntüsü [23].

#### 3.3.2.4. Kaviteasyon Erozyonu İçin Deney Yöntemleri

Sıvı ortam içerisinde çalışan ekipmanlardaki basınç değişimi ile meydana gelen titreşimler yüksek frekanslı ses dalgalarının oluşmasına sebep olur. Malzeme yüzeyinde meydana gelen basınçlı bölgelerde anlık olarak çok sayıda kabarcık oluşur ve bu kabarcıklar düşük basınçlı bölgeden yüksek basınçlı bölgelere doğru hareket eder, bunun sonucu meydana gelen patlama sonucunda yüzeyden çok küçük parçacıkların kopar. Bu tip bir aşınmanın meydana getireceği malzeme kayıplarının tespiti için Şekil 3.9’da şematik olarak verilen deney düzenekleri kullanılabilir [23].



Şekil 3.9. Kaviteasyon erozyonu deney düzenekleri görüntüsü [23].

## BÖLÜM 4

### YÜZEY İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ

Bazı sanayi uygulamalarında kullanılan ekipmanları teşkil eden parçaların, malzemelerinin aşınma ve darbe dayanımı gibi özelliklerinin yüksek olması istenir. Bu sebeple parça yüzeylerinin olabildiğince sert ve merkezlerinin ise daha yumuşak olması gerekir. Bunun sağlanabilmesi için malzemelere yüzey iyileştirme uygulamaları yapılır. Yüzey üzerinde yapılabilecek iyileştirmeler iki farklı kategoride ele alınır. Bunlardan ilki yüzey yapısının kimyasal bileşiminin değiştirilerek veya değiştirilmeden yapılan yüzey sertleştirme işlemi, ikincisi ise yüzeye uygulanacak kaplama işlemidir. Bu iki ana başlık altında oluşturulmuş iyileştirme işlemleri tablo halinde Şekil 4.1’de verilmiştir.

YÜZEY İYİLEŞTİRME YÖNTEMLERİ	
YÜZEY YAPISI DEĞİŞTİRİLEREK YAPILAN	YÜZEY KAPLANARAK YAPILAN
<b>KİMYASAL KOMP. DEĞİŞMEYEN</b>	<b>SOL-JEL YÖNTEMİ</b>
ALEVLE YÜZEY SERTLEŞTİRME	<b>ELEKTROLİTİK KAPLAMA</b>
İNDÜKSİYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME	<b>BUHAR FAZI BİRİKTİRME</b>
LAZER IŞINIYLA YÜZEY SERTLEŞTİRME	FİZİKSEL BUHAR FAZI BİR.(PVD)
DALDIRMA YÖNTEMİ İLE YÜZEY SERT.	KİMYASAL BUHAR FAZI BİR. (CVD)
<b>KİMYASAL KOMPOZİSYON DEĞİŞEN</b>	<b>ERGİTME ESASLI YÖNTEMLER</b>
<b>İYON İMPLANTASYONU</b>	<b>KAYNAKLA KAPLAMA</b>
<b>TERMO-KİMYASAL YÖNTEMLER</b>	LAZER KAYNAĞI İLE KAPLAMA
KARBÜRLEME	ELEKTRON DEMETİ İLE KAPLAMA
NİTRÜRLEME	TOZALTI KAYNAĞI İLE KAPLAMA
KARBO-NİTRÜRLEME	GAZALTI KAYNAĞI İLE KAPLAMA
BORLAMA	PLAZMA ARKI İLE KAPLAMA
	<b>ISIL PÜSKÜRTME</b>
	ALEVLE PÜSKÜRTME
	PLAZMA PÜSKÜRTME
	PATLATMALI PÜSKÜRTME
	ELEKTRİK ARKI İLE PÜSKÜRTME
	HVOF

Şekil 4.1. Yüzey iyileştirme yöntemleri [12].

## 4.1. YÜZEY YAPISI DEĞİŞTİRİLEREK YAPILAN İYİLEŞTİRMELER

### 4.1.1. Kimyasal Kompozisyon Değiştirilmeden Yapılan Yüzey İyileştirmeleri

Kimyasal kompozisyon değiştirilmeden yapılan yüzey iyileştirmeleri, alevle yüzey sertleştirme, indüksiyonla yüzey sertleştirme, lazer ışını ile yüzey sertleştirme ve daldırma yöntemi ile yüzey sertleştirme işlemleridir.

Alevle yüzey sertleştirme, ilk yatırım maliyeti düşük olmasına rağmen uygulama olarak maliyetli kabul edilir. Uygulama oksii-asetilen ile yüzeyin ısıtılması ve ani olarak su veya yağ ile ısının uzaklaştırılması şeklindedir. İslah çelikleri (Ck 45 gibi) bu uygulama için uygun malzemelerdir. Bu yöntem sabit, ilerleyen, dönen ve ilerleyen ve dönen düzeneklerle uygulanabilir. Çevre ve ortam koşullarına uyarlanabilir. Tav fırınlarına sığmayacak büyüklükteki parçaların yüzeyleri bu uygulama ile sertleştirilebilir. İşlem esnasında yüzeyde tufal oluşmaz, karbon kaybı ve malzeme çarpılması gibi sorunlarla karşılaşmaz. Sertleşme derinliği genellikle yaklaşık 1,5 mm'nin altına inemez [12].

İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi, parçanın yüzeyini hızlı bir şekilde östenitik şartlara ısıtma ve sert martenzitik katmana dönüşmesi için hızla su verme işlemidir. Kompozisyonda değişiklik olmadığı için çelik, sert yüzey katmanı ve iç kısım özellikleri için seçilmelidir. Bu nedenle indüksiyonla yüzey sertleştirme çelikleri genellikle % 0,4 - 0,75 karbon içermelidir ve iç kısım özellikleri yüzey sertleştirmeden önce ısıl işlemlerle oluşturulmalıdır. İndüksiyonla yapılan sertleştirmede parçaların indüksiyonla ısıtılması, sertleştirilecek parçaların yüksek frekanslı alternatif akımın geçtiği su soğutmalı bakır indüksiyon bobini içerisine yerleştirilmesi ile yapılır. İndüksiyon işleminde parçanın yüzeyinde bir elektrik akımı meydana gelir ve yüzey çok çabuk sertleştirme sıcaklığına ulaşır. İndüksiyonla yüzey sertleştirme sonucunda aşınma direnci yükselir ve yorulma dayanımı artar. Alevle sertleştirme yönteminin uygulandığı orta karbonlu çeliklere uygulanır. Genelde biyel, pompa milleri, krank milleri, kam milleri, dişliler vb. simetrik parçalara uygulanır. Uygulama olarak kişisel beceriye ihtiyaç duyulmaz, seri ve sürekli üretime uygundur ve üretim hattı üzerinde uygulanabilir. İşlem esnasında gaz yayılmaz, her türlü tesiste kullanılabilir. Seri üretim

yapılmayan ve karmaşık şekilli parçalarda uygun değildir. Cihaz pahalı, elektrik sarfiyatı ve bakım masrafı fazladır [12].

Diğer kimyasal kompozisyon değiştirilmeden yapılan yüzey iyileştirme işlemi olan lazer ışınıyla sertleştirme işleminde, parça yüzeyinin kompozisyonunda bir değişiklik olmaksızın östenitik bölgeye ısıtılır. Isı kaynağı yoğun ısı üreten bir lazerdir. İş parçasının kendisi soğutucu olarak davranır ve dışarıdan soğutma malzemesi ihtiyacı yoktur. Lazerle sertleştirme genellikle çelik iş parçası üzerinde ince martenzit katmanı üretmek için kullanılır. Kontrollü bir şekilde hareket eden lazer ışını ile yüzey sertleştirilir. Sertleşmiş yüzey derinliği indüksiyon ve alevle sertleştirilenden daha incedir. Lazerle sertleştirmede karmaşık şekillerde sertleştirme başarı ile uygulanır. Lazer maliyetinin yüksekliği dezavantaj olarak karşımıza çıkar.

Bir diğer kimyasal kompozisyon değiştirilmeden yapılan yüzey iyileştirme işlemi olan daldırma ile yüzey sertleştirme işleminde, ısı kaynağı olarak tuz veya metal banyolarından faydalanılır. İnce parçalar için bekletme süresi çok kısadır. Isıtmadan sonra su verme işlemi ara vermeden bir an evvel yapılmalıdır çünkü gecikme sıcaklığın merkeze doğru ilerlemesine sebep olur. Yani sert tabaka kalınlığı artar. Basit tesislerde uygulanır, özel üfleç veya bobinlere gerek duyulmaz. Enerji masrafları düşüktür ve karmaşık şekilli parçaların tek bir işlemle ısıtılması mümkündür. Sertleşen kısmın derinliği diğer usullere oranla daha fazladır. Parçaların üzerindeki küçük ve detay bölgelerin sertleştirilmesi bu yöntemle mümkün değildir. Basit olmasına rağmen az tercih edilmektedir.

#### **4.1.2. Kimyasal Kompozisyon Değiştirilerek Yapılan Yüzey İyileştirmeleri**

Kimyasal kompozisyon değişimi ihtiyacı bazı nedenlerden doğmaktadır. Bunlar; alevle ve indüksiyonla sertleştirme yöntemleri kullanılarak yapılan yüzey sertleştirme işlemlerinde kompleks geometrilere sahip parçalarda her bir noktanın eşit bir şekilde yüzey sertliğinin sağlanamaması, sertleştirme sonrasında eğer parça yüksek sıcaklıkta çalışıyorsa kazandırılan özellikleri muhafaza edilememesi, değişik ortamlardaki korozyon dayanımlarının artırılmak istenmesi ve yüzey sertliğinin beraberinde farklı mekanik özelliklerin de (süneklik, darbe dayanımı, tokluk vb.) iyileştirilmesinin

beklenmesi olarak sıralanabilir. Bu tip yüzey iyileştirme işlemleriyle malzeme yüzeyine karbon, azot ve bor gibi ara yer atomlarının geçişi, metal iyonlarının yüzeye bağlanması veya farklı alaşım tozları kullanılarak istenilen özelliklerde yüzey elde edilmesi amaçlanmaktadır. İşlem sonrasında malzeme kesiti incelenecek olursa ana malzeme ile yüzey tabakası arasında bir sınır tabakası gözlemlenebilir. Genellikle difüzyona dayalı olan bu yöntemlerde yüzeye geçen madde miktarının kontrolü, işlemin başarılı ve isteğe uygun olması; seçilecek işlem süresi, ortam sıcaklığı, soğutma hızı ve soğutma sekline bağlıdır [24].

Çelikler üzerine uygulanan klasik termokimyasal işlemler karbürleme (sementasyon), nitrürleme (nitrasyon) ve karbonitrürleme yöntemleridir. Karbürleme, düşük karbonlu çeliklerin yüzeyine karbon difüze edilmesi işlemidir. Yüzeyden aşınma dayanımına sahip sert bir yüzey elde edilirken malzeme iç yüzeyinde darbelere dayanımlı tok bir yapı kalır. İhtiyaç duyulan karbon ortamdan sağlanır. Bu işlemle % 0,1 – 0,2 C içeren düşük karbonlu çeliklerin yüzeyinde karbon miktarı % 0,7 – 0,8 C seviyelerine çıkartılabilir. Yüzeydeki tabakanın karbon muhtevisi artırılırken, sürekli sementit ağının meydana gelmemesi için karbonun % 0,8'den düşük olması istenir. Karbürleme işleminde uygulama katı, sıvı veya plazma ortamında yapılabilir. Ortam farklılıklarından bağımsız olarak atomsal karbon gaz fazı üzerinden oluşur. Katı ortamda ana karbon kaynağı kömürdür. Bununla beraber gaz oluşumunu kolaylaştırmak amacıyla baryum karbonat ( $BaCO_3$ ) ve kalsiyum karbonat ( $CaCO_3$ ) gibi aktivasyon maddeleri kullanılır [24].

Sıvı ortamda tuz banyoları (siyanür tuzları) kullanılır. 850 - 930 °C gibi yüksek sıcaklıklarda siyanürün farklı reaksiyonları neticesinde karbon parçanın yüzeyine yayılır. İşlem süresi katı ortamından kısadır. Bunun sebebi ise sıvı ortamın malzemenin tüm yüzeyini kolayca sarabilmesi ve ısı iletiminin daha iyi olmasıdır. Yöntemin dezavantajları ise ortamın zehirli olması ve yatırım maliyetinin fazlalığıdır.

Gaz ortamda karbürleme işleminde doğal gaz, propanla zenginleştirilmiş doğal gaz (hava gazı) kullanılır. Gazın bileşimine göre karbürleme etkisi farklılık göstererek yüzeyde istenen karbon konsantrasyonu elde edilebilir. Gaz karbürlemede işlem parametreleri çok iyi bir şekilde ayarlanabilir. İşlem sonrasında parçaların yüzey

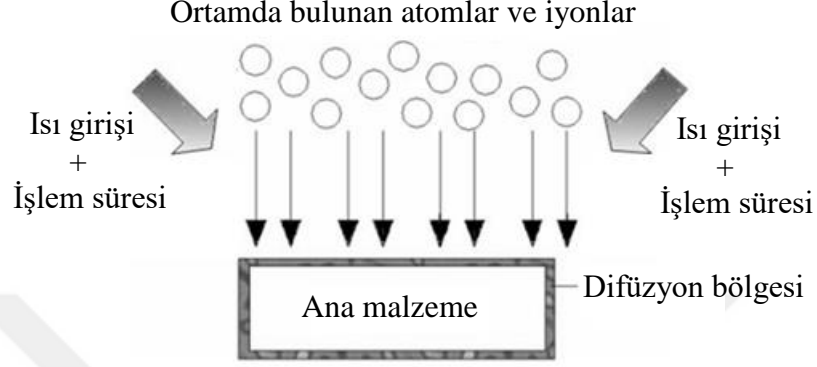
kalitesi neredeyse işlem öncesindeki gibi kalır. Gaz karbürleme sisteminin ilk yatırım maliyetleri çok yüksektir. Karbürleme işlemi, dişli, piston, zincir, zincir dişlileri, diskler, miller, kılavuz yataklar, rulman yatakları ve merdanelerde kullanılır.

Nitrasyon, azotun çelik malzemenin yüzeyine difüzyonu sonucu yüzeyde aşınma direnci yüksek sert bir tabaka oluşturma işlemidir ve bazı çeliklerde korozyon direnci ve yorulma dayanımını artırır, bazı çeliklerde ise korozyon direncini düşürür. İşlem, düşük sıcaklıklı yüzey sertleştirme işlemlerinden olan, çelik malzeme yüzeyine azot atomlarının ara yer atomu olarak gönderilmesi yoluyla yüzeyde sert bir tabakanın oluşturulması esasına dayanır. Azot kaynağı ortam olarak gaz atmosferi veya tuz banyosu kullanılabilir. Nitrasyon işlemi 480 - 540 °C gibi düşük sıcaklıklarda yapılmaktadır. Bu sıcaklıklarda düşük karbonlu çelikler ferritiktir ve nitrürleme işlemi Al, Cr, Mo, Ti ve V vb. gibi nitrür oluşturan elementleri içeren çeliklere uygulanmaktadır. Nitrürleme işleminde, malzeme yüzeyindeki atomik azot iç kısımlara doğru yayılır ve genellikle 5 - 15 µm boyutunda çok ince nitrür çökeltileri oluşturmak için reaksiyona girer. Gaz ortamında yapılan nitrasyon işleminde derinlik, yüzey sertliği kontrolü gerçekleştirilebilirken benzer prosesler kolaylıkla türetilir. Nitrasyon işlemi ile düşük alaşımlı çelikler, sıcak iş takım çelikleri ve takım çeliklerinde yüksek yüzey sertliği elde edilebilir. Malzemenin çekirdek yapısında herhangi bir değişiklik olmaz [25].

Karbonitrasyon, çeliğin yüzey sertliğini arttırmak ve aşınmayı azaltmak için kullanılan işlemlerden bir tanesidir. İşlem esnasında karbon ve azot atomları malzeme yüzeyine difüze olarak yüzeyde sertlik artışına neden olurlar. Karbonitrasyon işlemi daha çok kolay işlenen ve maliyeti az olan düşük karbonlu çeliklere uygulanır. Böylece yüzey özellikleri geliştirilmiş olur ve daha pahalı ve işlemesi daha zor olan çeliklerle rekabet edebilme olasılığı ortaya çıkar. Karbonitrasyon işleminden sonra elde edilen yüzey sertlikleri 55 - 62 HRc arasındadır. Bu işleminin sementasyona göre avantajları vardır. Meneviş esnasında yumuşamaya karşı yüksek direnç gösterir ve yorulma ve darbe dayanımı daha yüksektir. İstenilen özelliklerin elde edilebilmesi için sementasyon ve karbonitrasyon prosesleri birlikte uygulandığı bir işlemdir. Karbonitrasyon, dişliler, eksantrik milleri, akslar, rulmanlar, piston kolları, bağlama elemanları, takım ve kalıpların yüzeylerinin sertleştirilmesinde kullanılır. Klasik yöntemlerin dışında son



zamanlarda uygulanmaya başlanan borlama, bor atomlarının metal malzeme yüzeyine difüzyonu ile malzeme yüzeyini güçlendiren bir termokimyasal yüzey sertleştirme işlemidir. Termokimyasal yöntemlerin bileşenleri ile ilgili şematik gösterim Şekil 4.2’de verilmiştir [12].



Şekil 4.2. Termokimyasal yöntemlerin ana yapısı [12].

Borlama, metal ve alaşımların yüzeylerinde sertlik, aşınma direnci ve korozyon direncini arttırırken, bununla beraber yüksek sıcaklıklarda bu özellikleri korumak ve erozif aşınma direncini de arttırmak maksadıyla kullanılmaktadır. Borlama, endüstride takım çelikleri ve paslanmaz çelikler, döküm çelikleri, gri ve küresel grafitli dökme demirler, sinterlenmiş demir ve çelikler gibi demir esaslı alaşımlara uygulanmaktadır. Borlama işleminde, borun yüzeye yayılması sonucu malzemenin üst yüzeyinde bileşik tabaka adı verilen borlu bölge, bu bölgenin altında difüzyon bölgesi ve iç kısımda ise çekirdek bölgesi yer alır. Bor tabakasının sahip olduğu yüksek sertlik ve düşük sürtünme katsayısı yüzeyin yapışma, aşınma ve yüzey yorulması gibi mekanizmalara karşı dayanıklı olmasını sağlar. Tabakanın yüksek sıcaklıklarda kararlı olması, diğer yüzey sertleştirme işlemlerine göre birçok çelik için uygun olması, ergimiş metal eriyiklerine dayanımlı olması, ayrıca borlanmış yüzeylerin sürtünme katsayısının düşmesi neticesinde yağlayıcı kullanımının minimuma düşürülmesi sebebiyle borlama işlemi oldukça avantajlıdır. Hassas işçilik ve deneyim gereksinimi, diğer termokimyasal işlemlere göre pahalı olması, geleneksel işleme teknikleri ile işlenen yüzeylerde kırılmaların oluşabilmesi işlemin dezavantajlarıdır [21].

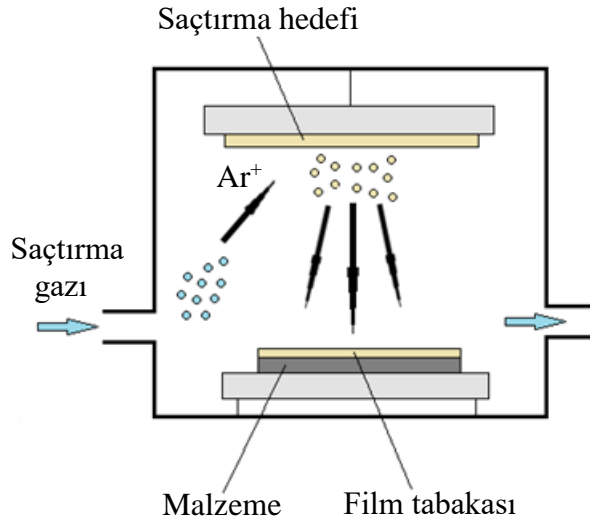
## 4.2. YÜZEY KAPLANARAK YAPILAN YÜZEY İYİLEŞTİRMELERİ

### 4.2.1. Buhar Fazı Biriktirme

Farklı yöntemlerle elde edilmiş buhar halindeki kaplama malzemeleri sert bir tabaka elde etmek için malzemelerin yüzeyinde biriktirilir. Bu yöntemlerden ilki Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD, Physical Vapor Deposition) işlemidir. PVD malzemelerin vakum altında bir ısıtıcı (rezistans, lazer, elektron bombardımanı ve katodik ark vb.) ile yüzeydeki atomların buharlaştırılarak veya sıçratılarak yüzeyden kopartılması ve kaplanacak malzemenin yüzeyine iyonik veya atomsal biriktirilmesi esasına dayanan ve son yıllarda endüstride fazlasıyla yer bulmuş bir ince film kaplama yöntemidir. Bu yöntem 1800'lü yıllardan beri bilinmektedir. Bu yöntem kısaca katı halde bulunan malzemenin yüksek enerji ile plazma haline getirilerek yüzeyi kaplanacak malzemenin üzerine kontrollü olarak yapıştırılması işlemi olarak tarif edilebilir. Kaplamanın homojen bir yapıya sahip olabilmesi için kaplanacak malzemeye maksimum hareket kazandırılmalıdır. Bu yöntem nispeten daha düşük sıcaklıklarda uygulanabildiği için daha fazla tercih edilebilmektedir. Ayrıca bu yöntem mikro elektronik, tıp ekipmanları, dekoratif malzemeler ve korozyon direnci istenen malzemelere uygulanmaktadır [26].

İki farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bunlar buharlaştırma biriktirme ve saçtırma biriktirme yöntemleridir. Termal buharlaştırma biriktirme yöntemi en basit yöntemdir. Bu yöntem farklı tekniklerle uygulanabilir. Bunlar sırası ile kaplanacak malzemenin direk olarak direnç olarak bağlanması, indüksiyon ocağı ile ısıtılması, elektron tabancası ile elektron demeti bombardımanı, elektrik arkı oluşturulması, lazer ışını uygulanarak ısıtma işlemleridir. Buharlaştırma potaları molibden (Mo), tungsten (W) ve tantal (Ta) gibi refrakter metallere, alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ), silisyum oksit ( $SiO_2$ ) ve toryum dioksit ( $ThO_2$ ) gibi oksitlerden ve grafitten yapılır. Isıya dayanıklı, yüksek ergime noktasına sahip olan metaller basit rezistanslı ısıtıcılarda buharlaştırılmadıkları için elektron demeti bombardımanı ile buharlaştırılır. Lazer ışını ile buharlaştırma yöntemi kontrol edilebilen kimyasal karışım ve bileşiklerin ve alaşımların buharlaştırılmasında kullanılmaktadır.

Saçtırma biriktirme yönteminde katı malzemeye pozitif iyonlarla bombardıman yapılarak atomların yüzeyden kopartılması sağlanır. Şekil 4.3’de yöntemin şematik gösterimi verilmiştir. Kaplama malzemesine hızlandırılmış iyonlar gibi enerji seviyesi yüksek parçacıklarla bombardıman yapılırsa saçılan atomlar malzeme yüzeyinde ince bir film tabakası meydana getirir. Saçtırma ile yapılan işlemlerde en çok kullanılan yöntem DC saçtırma yöntemidir. İki elektrot vardır, birincisi soğuk katot ikincisi ise anottur. Katot ön yüzeyi kaplanacak malzeme ile örtülüdür. Kaplanacak malzeme de anot üzerine yerleştirilir. Ar<sup>+</sup> iyonları hedef malzemeyi saçtırır. Kaplanacak malzeme üzerinde ince bir film tabakası oluşturulur. Manyetik alanda saçtırma yönteminde kaplama malzemesi üzerine 500 V’luk negatif gerilme uygulanarak Ar<sup>+</sup> iyonları hedef malzeme üzerine yönlendirilir. Yeterli enerjiye sahip olan iyonlar yüzeyden atomları sıçratır, bu kopan atomlar numune üzerinde birikerek kaplamayı oluşturur. Bu yöntemin diğer yöntemlerden farkı vakum odasında oluşturulan manyetik alanların yardımıyla sıçrayan atomları yönlendirebilmesidir. Büyük yüzey alanına sahip parçalar bu yöntemle uniform bir kaplama kalınlığı ile kaplanabilir. Bunlara ek olarak çeşitli tekniklerin avantajlı yönlerini bir proseste kullanmak amacıyla hibrit kaplama yöntemleri de kullanılabilir [26].



Şekil 4.3. Saçtırma yöntemi şematik gösterimi [21].

Diğer bir buhar fazı biriktirme yöntemi ise Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD, Chemical Vapor Deposition) yöntemidir. CVD yönteminde kolay buharlaşabilen bir kaplama malzemesi ile bir gaz, termal veya farklı yöntemlerle kaplanacak malzemenin

yakınında tepkimeye sokulur. Ortaya çıkan buhar katı bir halde malzeme üzerinde biriktirilir. PVD yönteminin CVD yöntemine göre en büyük avantajı çeliklerin özelliklerini etkilemeden düşük sıcaklıklarda uygulanabilmesidir. CVD’de 850 – 1000 °C sıcaklık gerekirken PVD yönteminde bu 200 – 500 °C aralığında uygulanır.

#### **4.2.2. Sol-Jel Yöntemi**

Seramik ve camların yüksek kalitede üretilebilmesi için kullanılan bir yöntemdir. Farklı ve karmaşık geometriye sahip parçaların kaplanmasıdaki düşük işlem maliyeti, işlem kolaylığı ve düşük çalışma sıcaklığından dolayı avantajlı bir yöntemdir. Sol-jel yöntemi iki ana kimyasal reaksiyon içerir. Bunlardan birincisi, daha önceden hazırlanmış bir tabakanın hidrolizinin oluşumu, ikincisi ise kısmen hidrolize olmuş ürünlerin bir oksit ağıyla birlikte yoğunlaşmasıdır. Çözelti bir jel haline dönüştükten sonra kurutulur ve ısıl işlemden geçirilerek son yapı elde edilir. Sol-jel kaplamaların teşkilinde öncelikle ön çözelti ince bir tabaka şeklinde kaplama yüzeyine dağıtılır ve sol-jel dönüşümü başlar. Akabinde jel tabakası ısıl işlemlerle kuruma ve kristalleşme aşamalarından geçirilir [27].

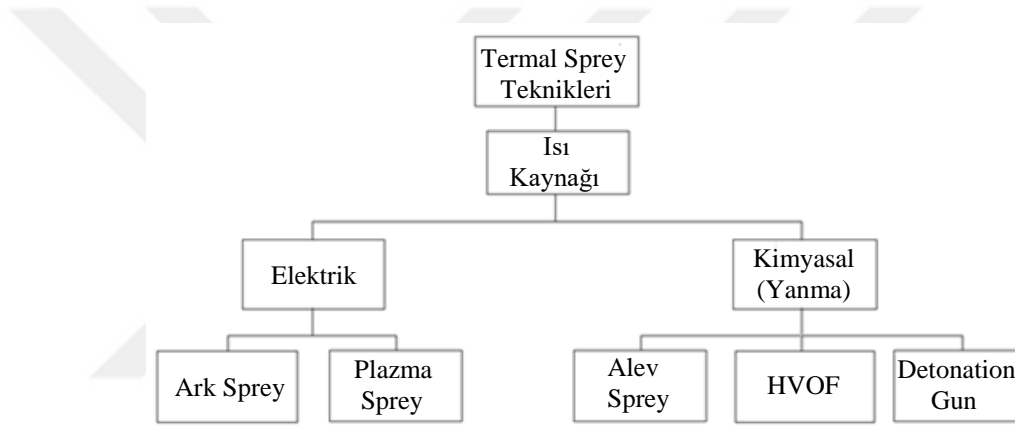
#### **4.2.3. Elektrolitik Kaplama**

Metal bir malzemenin elektrolitik olarak kaplanması malzemenin korozyona karşı dayanımının artırılması, dekoratif işlerde kullanılacak malzemenin daha iyi görünmesinin sağlanması, aşınma ve yıpranmaya karşı dayanım kazandırılması ve darbelere karşı dayanım kazandırılması maksadı ile yapılır. Elektrolitik kaplama metale tutunma ve dayanıklılık konusunda en çok tercih edilen yöntemlerin başında gelir. İşlemden önce yüzeyi kaplanacak malzeme uygun bir elektrolite batırılıp katot olarak kullanılır [21].

#### 4.2.4. Ergitme Esaslı Kaplama Yöntemleri

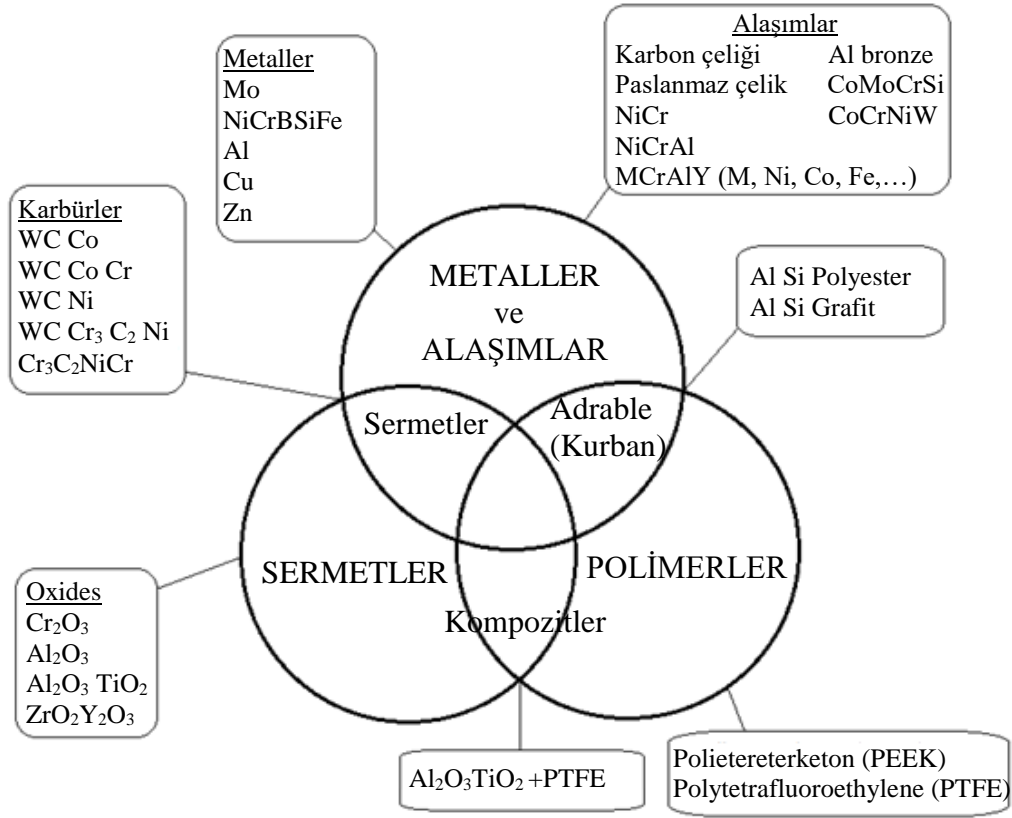
##### 4.2.4.1. Isıl Püskürtme Yöntemleri (Termal Sprey Kaplama)

Yüzey kaplama işlemlerinde ısıl püskürtme yöntemleri bir püskürtme tabancası yardımıyla yanıcı, yakıcı ve taşıyıcı gazlar kullanılarak uygulanır. Kaplama malzemeleri tel, çubuk veya toz şeklindedir. Bu kaplama işlemleri uygulama türüne ve kullanılan malzeme çeşidine göre farklılıklar gösterir. Alevle, elektrik arkı ile, patlamalı, plazma ve yüksek hızlı oksî-yakıt (HVOF) yöntemleri mevcuttur. Termal sprej kaplama teknikleri Şekil 4.4’de şema halinde verilmiştir.



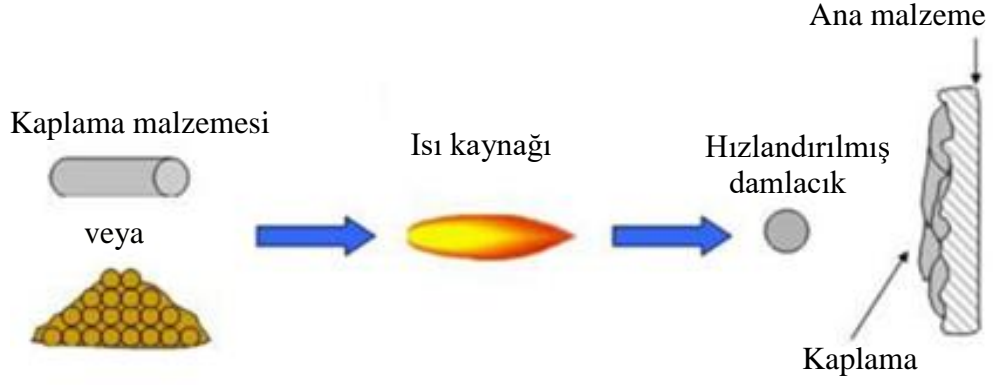
Şekil 4.4. Isı kaynaklarına göre termal sprej kaplama yöntemleri [28].

Bu yöntemler kullanılarak krom karbür, tungsten karbür, demir esaslı tozlar vb. gibi malzemeler kaplanabilmektedir. Bu yöntemler kullanılarak orijinal parça üretimi, tamir veya dekoratif amaçlı istenilen yüzey kalitesinin elde edilmesi, malzemeye aşınmaya (korozyon, abrazyon, erozyon ve kazıma vb.) karşı dayanım kazandırılması, ısı yalıtımı sağlanması, malzemeye elektrik iletimi veya yalıtımı özellikleri kazandırılması gibi işlemler yapılabilir. Bu yöntemler havacılıkta, otomotivde, demir-çelik uygulamalarında ve medikal uygulamalarda fazlasıyla tercih edilmektedir. Isıl püskürtme yöntemleri ile metaller, polimerler ve seramikler olmak üzere çok sayıda malzeme farklı malzemeler üzerine kaplanabilmektedir. Isıl püskürtme kaplama yöntemlerinde kullanılan malzemeler Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Isıl püskürtme kaplama yönteminde kullanılan kaplama malzemeleri [28].

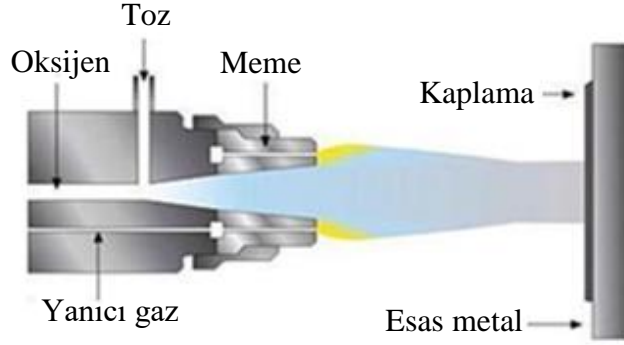
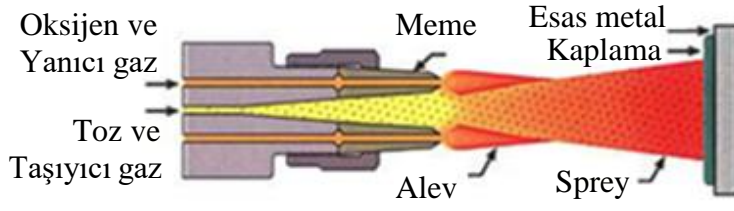
Kaplanacak yüzey üzerine kaplama malzemesi ergimiş veya yarı ergimiş olarak gönderilmektedir. Yüzeydeki ana malzeme ile bağlanma ve katılma neticesinde koruyucu katman elde edilmektedir. Kaplamanın sertliği kullanılan kaplama malzemesinin türüne, işlem parametrelerine ve ana malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Isıl püskürtme yöntemlerinin avantajları olarak kaplama için kullanılacak malzemenin kimyasal kompozisyonunun neredeyse değişmeden ergitilebilmesi, kaplanacak malzemenin ısıtılmadan işlemin uygulanabilmesi, ölçüler değişmeden aşınmış veya hasarlı malzemenin yeniden kaplanabilmesi sayılabilir. Dezavantaj olarak da uygulamada görüş açısının kısıtlı olması ve tabanca ile uygulama yapıldığından dolayı istenilen noktalara ulaşma zorluğu sayılabilir. Yönteme ait şematik gösterim Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Termal sprej kaplama şematik gösterimi [28].

#### 4.2.4.1.1. Alevle Püskürtme Yöntemi

Bilinen en eski ısıl püskürtme yöntemidir ve mucidi M. Ulrich Schoop'tur. Bu yöntem çubuk, tel ve toz malzemelerin püskürtülmesi için kullanılır. İlk uygulamalarında kalay ve kurşun teller oksitlenerek yakılarak yapılmakta iken daha sonraları toz da kullanılmaya başlamıştır. Alev püskürtme yönteminde yanıcı gaz olarak propan, asetilen veya hidrojen, yakıcı gaz olarak da oksijen kullanılarak alev elde edilir. Düşük basınç ile uygulanan bir oksit-yakıt yöntemidir. Şekil 4.7'den de görüleceği gibi yakıcı ve yanıcı gaz karışımı yakılarak bir memeden püskürtülür. Toz malzeme de yine aynı yoldan oluşan taşıyıcı gaz akışı ile yüzeye gönderilir. Toz eriyik veya yarı eriyik formda esas metal üzerine gönderilerek malzemenin yüzeyinde bir katman oluşturulur. Gazların alev sıcaklıkları önem arz etmektedir. Kaplama malzemesi türüne göre yakıt seçimi yapılmalıdır. Oksit-hidrojenin yanması ile elde edilen sıcaklık değeri 2700 °C iken oksit-asetilenin yanması ile elde edilen sıcaklık değeri 3100 °C'dir. Alev sıcaklığı yöntemin temelini oluşturduğundan alev sıcaklığının ergime ya da yarı ergime için yetersiz olduğu durumlarda bu yöntemin kullanılması uygun değildir.



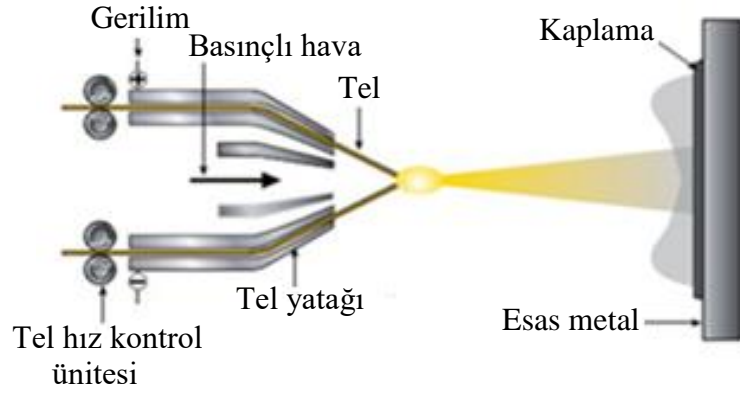
Şekil 4.7. Alevle püskürtme yöntemleri şematik gösterimleri a) tel, b) toz alev [29].

Yöntemin avantajı ilk yatırım maliyetinin düşüklüğünün yanı sıra düşük bakım maliyeti buna karşılık yüksek dolgu oranıdır. Düşük çalışma sıcaklığı, kaplama tabakasında meydana gelen boşluk oranının fazlalığı ve bağ mukavemetinin düşüklüğü yöntemin dezavantajları olarak karşımıza çıkmaktadır [29].

#### 4.2.4.1.2. Elektrik Arkı ile Püskürtme Yöntemi

Elektrik arkı ile püskürtme yönteminde iki tel arasında sürekli ark meydana getirilmesi amaçlanır. Gerekli ısıyı meydana gelen elektrik arkı tarafından sağlanır. Ark yaklaşık 6000 °C'nin üzerine kadar çıkmaktadır. Oluşan ark tel uçlarını ısıtır. Erimeyen teller soğuk bir hava jeti sayesinde atomize olur. Yine bu havanın süpürücü etkisi ile atomize olan parçacıklar kaplanacak olan malzemenin yüzeyine süpürülür. Bu yöntemde kullanılan teller tel ile alev püskürtme yönteminde de kullanılabilir. Elektrik arkı ile püskürtme yönteminin bazı üstün özellikleri vardır. Bu üstün özellikler, çökme hızı yüksektir, bağ mukavemeti yüksektir, uygulama maliyeti düşüktür ve kaplama içerisindeki oksit miktarı azaltılabilir. Bu yöntem ile yapılan çinko kaplamalar korozyon direncini, karbür kaplamalar ise aşınma direncini artırmaktadır. Yönteme ait şematik gösterim Şekil 4.8'de verilmiştir [30].

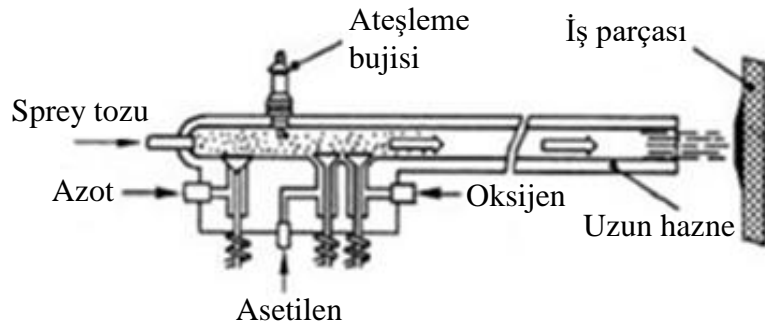




Şekil 4.8. Elektrik ark püskürtme yönteminin şematik gösterimi [30].

#### 4.2.4.1.3. Patlamalı Püskürtme Yöntemi

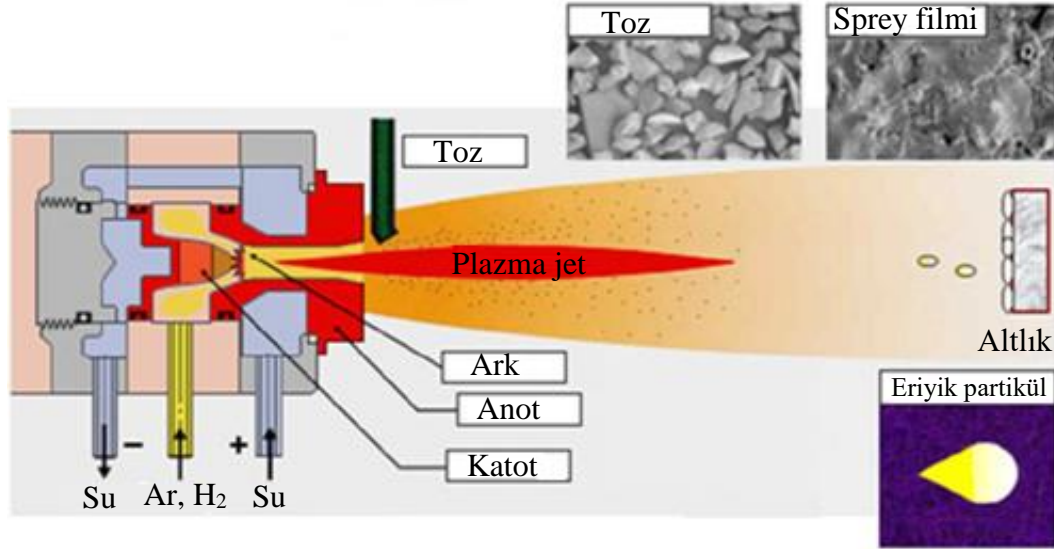
Yaklaşık 1,5 metre uzunluğunda ve 30 mm iç çapında su soğutmalı bir yanma odasında oksijen-asetilen gaz karışımı ile taşıyıcı gazın kontrollü bir şekilde infilak ettirilmesi ile kaplama tozlarının eritilerek yüzeye püskürtülmesi işlemidir. Karışım saniyede yaklaşık 4 ila 8 kez patlatılır. Sistem kesikli bir sistem olup sürekli değildir. Bu yöntem ile elde edilen kaplamalar yoğun ve yüksek yapışma özelliğine sahip sert kaplamalardır. İş parçası işlem esnasında az ısınır. Bu yöntemde ergime sıcaklığı yüksek malzemeler kaplama malzemesi olarak uygulanabilir. Sistem esnek olmayıp biriktirme hızı düşüktür, bunun yanında pahalı bir prosestir. Patlamalı püskürtme yönteminin şematik gösterimi Şekil 4.9'da verilmiştir [31].



Şekil 4.9. Patlamalı püskürtme yönteminin şematik gösterimi [31].

#### 4.2.4.1.4. Plazma Püskürtme Yöntemi

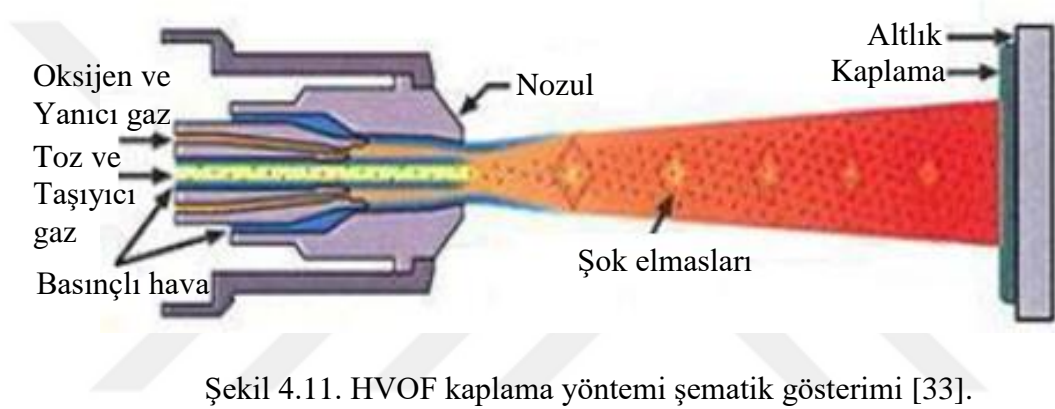
Plazma püskürtme yönteminde elde edilen yüksek sıcaklıklar sıvı bölgesi aralıklarında çalışma olanağı sağlar. Bu yöntemde enerji kaynağı yüksek frekanslı bir kıvılcımla elde edilen elektrik arkıdır. Doğru akımlı bir plazma tabancasında ark silindirik tungsten bir katotla buna dik bir anot arasında oluşur. Plazma lülelerinde Argon, Helyum ve Azot gazları veya karışımları kullanılır. Bu gazlar ark üzerinden geçtiği zaman katottan gelen elektronlarla gaz molekülleri/atomları arasında başlayan reaksiyon gazın iyonize olup plazma oluşturmasını sağlar. Bu yöntemde partikül hızları 600 m/s ve sıcaklıklar 16000 °C'nin üzerine çıkabilir. Kaplama malzemesi genellikle toz olmakla beraber kaplamalarda yüksek bağlanma mukavemeti sağlanır. Kaplanılacak malzeme herhangi bir ısıya maruz kalmamakla beraber mikro yapısında da bir değişim söz konusu olmaz. Bu yöntem ile elde edilen yüksek sıcaklık değeri sebebiyle seramik, metal ve polimerler vb. gibi bilinen tüm malzemeler kaplanabilir. Toz beslemesi taşıyıcı gazın debisiyle doğrudan alakalıdır. Toz beslemenin yetersiz olmasının sebebi gaz debisinin az olmasıdır. Toz beslemesi fazla olursa da partiküller ergimeyebilir. Plazma sprej kaplama yöntemine ait şematik gösterim Şekil 4.10'da verilmiştir [32].



Şekil 4.10. Plazma sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi [32].

#### 4.2.4.1.5. HVOF Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Yöntemi (High Velocity Oxygen Fuel)

Alevle püskürtme yöntemlerinin bir çeşidi olup çoğunlukla kaplama malzemesi olarak toz kullanılmakla beraber nadiren tel ya da çubuk kullanılabilir. Bir yakıt ve oksijen gazının yanmasıyla oluşturulan ısı ile ergitilen toz basınçlı hava kullanılarak yüksek hızda malzemenin yüzeyine gönderilir. Toz halindeki malzeme oluşan alevin içine girerek malzemenin sıcaklığına ve hızına göre ergimeye başlar. Bu ergime tamamen veya yarı ergime şeklinde olabilir. Alev sıcaklığı yaklaşık 2300 ile 3000 °C arasında olur. Yönteme ait şematik gösterim Şekil 4.11’de verilmiştir [33].



Şekil 4.11. HVOF kaplama yöntemi şematik gösterimi [33].

Kaplama da kullanılacak ve ergimiş veya yarı ergimiş halde bulunan partiküller tabanca yardımıyla şekillendirme kalıbına doğru süpersonik hızlarda gönderilir. Gaz hız değeri 2100 m/s civarında olup partikül hızlarını 800 m/s hıza kadar ulaştırır. Yüksek hız değeri genellikle +133 dBA değerinde yüksek gürültüye sebep olur. Bu yöntemde daha az gözeneklilik, daha iyi bağlanma ve yüksek tokluk ve sertlik değerleri elde edilebilir. Yüksek işlem hızından dolayı partiküllerin soğuma süresi daha kısadır. Kaplama malzemesi kısa sürede yüzeye ulaştırıldığı için oksidasyon oluşumu daha az olur [33].

#### 4.2.4.2. Kaynakla Kaplama Yöntemleri

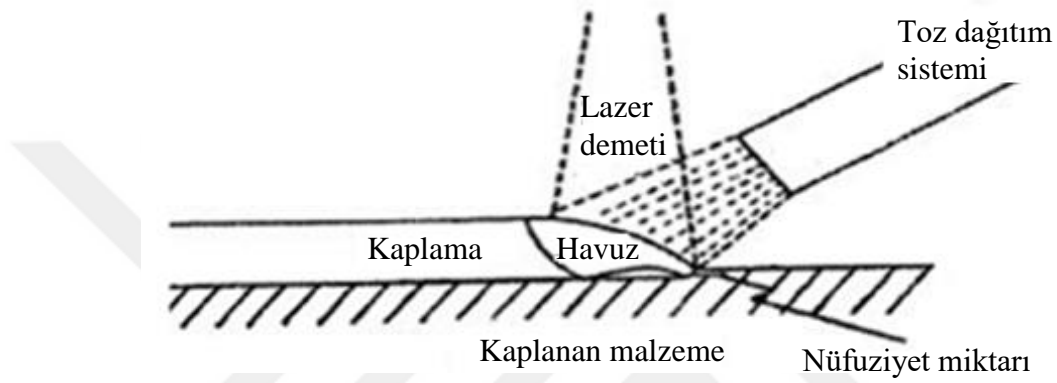
Isı, basınç veya her ikisinin de kullanılmasıyla aynı veya benzer iki malzemeyi bir malzeme ilavesi yaparak veya yapmadan birleştirilmesi işlemi kaynak olarak tarif edebiliriz. Bir iş parçasının genelde dış yüzeyinin sert iç bölgesinin ise darbeleri

sönümleyebilmesi için sünek olması istenir. Bunun elde edilebilmesi için birçok yöntem vardır. Ergitme esaslı yüzey kaplama yöntemleri istenilen özelliklerde bir yüzeyin elde edilmesine imkân vermez. Kaplama kalınlıklarının yetersiz olduğu durumlarla karşılaşılır. Aşırı sert olmaları ve darbeli çalışma karşısında dayanımlarının yetersizliği söz konusudur. Üstelik ilk yatırım ve uygulama maliyetleri de oldukça yüksektir. Kaplama yöntemlerinde malzeme yüzeyinde ilave sert tabakalar elde edilebilmekte ve aşınmış bölgeler tamir edilirken bu bölgelerin güçlendirilmesi söz konusu olmaktadır. Bunun için klasik elektrik ark, tozaltı ve gaz altı kaynak yöntemleri kullanılmaktadır.

#### **4.2.4.2.1. Lazer Kaynağı ile Kaplama Yöntemi**

Lazer kelimesi İngilizce “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” ifadesinin kısaltmasıdır. Yönteme ait şematik gösterim Şekil 4.12’de verilmiştir. Bu yöntemde lazer ışını birleştirilecek noktaya hassas bir şekilde odaklandırılır. Diğer geleneksel kaynak yöntemlerine göre birçok avantajı vardır. Ark oluşturularak yapılan kaynaklarda iki malzemenin birleştirilmesi için gerekli ısı malzemeler ile elektrot arasında oluşturulan yüksek elektrik akımı ile sağlanmaktadır. Söz konusu elektrik akımı çeşitli sebeplerden dolayı malzemelerin birleştirilme noktasına odaklanamamaktadır. Bu sebeple de gerekli minimum enerjiden daha fazlası sarf edilmek zorunda kalınmaktadır. Bu ekstra enerji malzemelerin de fazladan ısınmasına ve malzemelerin özelliklerinin bozulmasına sebep olmaktadır. Günümüzde kullanılan malzemeler kullanılacakları uygulamalara göre mekanik özellikleri çok iyi ayarlanmış malzemeler olduğundan dolayı bu ısınmalar malzemelerin sahip oldukları özelliklerin değişmesine sebep olmaktadır. Lazer kaynağında ise durum bundan farklıdır. Lazer ışınının istenilen bölgeye/noktaya çok iyi odaklanabilmesi olanağı vardır. Bu sebeple kaynak hattı boyunca istenilen hassasiyet ve hız elde edilebilir. Lazer kaplama yönteminde ana metalde çok az bir kısım ısıdan etkilenir. ITAB bölgesinin izlenebilmesi yapılan işin kalitesini olumlu yönde etkiler. Hassasiyetlerinden ötürü lazer kaynağı genelde CNC tezgahlar, robotlar vs. kullanılarak uygulanır. Lazer, bu yöntemin uygulanmasında bir ısı kaynağıdır. İstenilen kaplama malzemesi bir tabaka halinde malzemenin üzerine geçirilir. Toz enjeksiyonu, püskürtülmesi veya tel besleme şeklinde ilave malzeme yüzeye uygulanır. Lazer kaynağı ile yapılan

kaplamalarda yüksek dayanıma sahip kaplamalar elde edilebilir. Zor kaynak edilebilen özel ve hassas malzemeler lazer ile kolaylıkla birleştirilebilir. Üstelik karmaşık şekilli parçalarda da oldukça hızlı ve iyi sonuçlar alınabilmektedir. Delici takımların kaplanmasında, motor parçalarının yüzey iyileştirmelerinde, kesici takım yüzey sertleştirmelerinde, hidrolik pompa parçalarının imalatında ve kalıp yüzeylerinin dayanımlarının artırılmasında lazer kaynağı kullanılır [34].

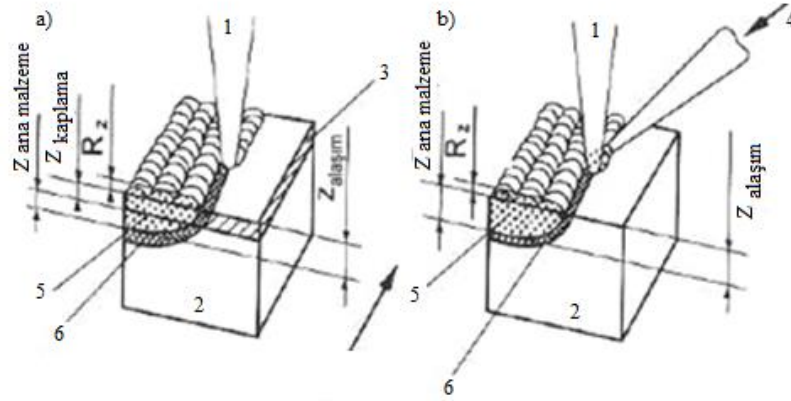


Şekil 4.12. Lazer kaynağı ile kaplama yöntemi şematik gösterimi [34].

#### 4.2.4.2.2. Elektron Demeti ile Kaplama Yöntemi

Bu kaynak yönteminde elektron demetinin sahip olduğu enerji kullanılarak tel veya toz malzemeler ile kaplama işlemi gerçekleştirilir. Katottan gerekli elektronlar sağlanırken ikinci bir elektrik kaynağı vasıtası ile elektron demetinin hızlandırılması sağlanır. Uygulama elektron tabancası ile yapılır. Elektron tabancaları hem katodu hem de enerji kaynağını ihtiva eder. Uygulamada kaplanan malzeme soğuk kaldığından dolayı kaplama malzemesinin saflığı yüksek olmaktadır. Elektron demetinin enerji seviyesi yüksektir ve elektron demeti oldukça yoğundur. Bu özelliklerinden dolayı çok yüksek sıcaklıklarda ve yüksek miktarlarda buharlaşma meydana gelir. Elde edilecek buhar miktarı enerji seviyesinin ayarlanması yolu ile hızlı ve kolay bir biçimde ayarlanabilir. Elektron demeti ile yüzey kaplama işlemleri sert yüzey oluşturma ve alaşımlandırma şeklinde olmaktadır. Alaşımlandırma işleminde alaşım elemanları tamamen ya da kısmen ergimiş olan ana malzeme içerisine çözüldürülür. Alaşımlandırma füzyon ve yeniden ergitme olmak üzere iki şekilde yapılır. Füzyon işleminde ergimiş bulunan

ana malzeme üzerine katı (karbürler veya bileşikler) ya da gaz partiküller yönlendirilerek alaşımlandırma gerçekleştirilir. Alaşımlandırmada gaz olarak karbon monoksit, azot veya asetilen kullanılır. Yeniden ergitme işleminde kaplama yapılacak yüzey istenilen derinlikte ertilir. Alaşım malzemesi ana malzeme içerisinde kısmen ya da tamamen çözünerek karışım meydana getirir. İşlem sonrası elde edilen katman farklı kimyasal bileşime sahip bir katmandır. Elektron demeti ile sert yüzey oluşturulmasında ertilmiş bir kaplama malzemesi malzeme yüzeyinde biriktirilir. İşlem esnasında kaplama malzemesi elektron demeti ile beraber hareket eder. Ana malzemede çok az bir ertime olur. Ayrıca bu yöntem korozyon ve aşınma direnci istenen yüzeylere uygulanır. Yönteme ait gösterim Şekil 4.13’de verilmiştir [35].



a) Yeniden ertitme, b) Füzyon

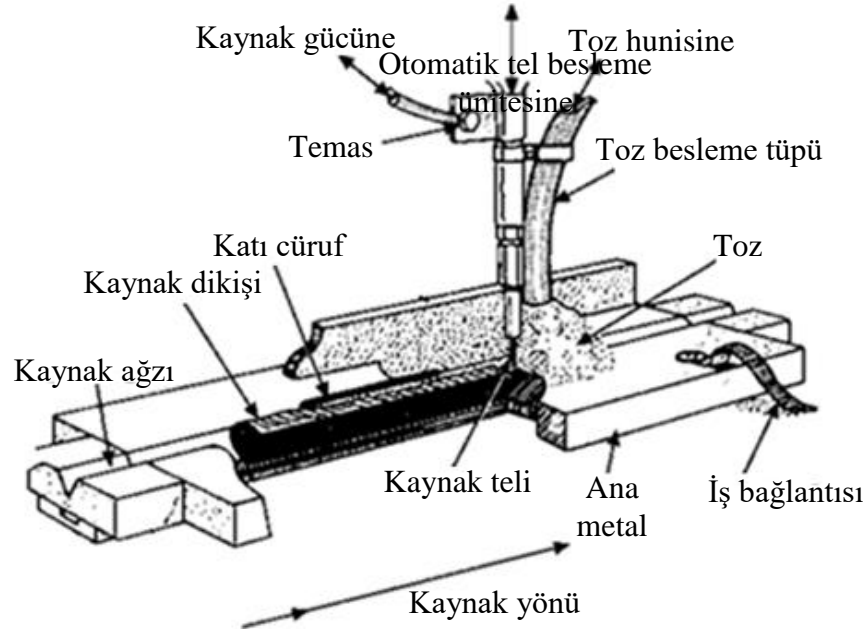
- |                                   |                                    |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1. Elektron demeti                | 2. Ana malzeme                     |
| 3. Alaşım malzemesinin kaplanması | 4. Katı partiküller ve alaşım gazı |
| 5. Alaşımlandırılmış bölge        | 6. Isıdan etkilenen bölge          |

Şekil 4.13. Darbeli elektron demeti ile alaşımlandırma yöntemi [35].

#### 4.2.4.2.3. Tozaltı Kaynağı ile Kaplama Yöntemi

Kaynak akımı, ark voltajı, tel besleme hızı, kaynak ilerleme hızı gibi parametreler iyi seçildiği zaman hatasız uygulamalar elde edilebilmektedir. Normal örtülü elektrotla yapılan kaynağa göre aynı çaplı elektrot için daha derin kaynak nüfuziyeti elde edilebilir. Kalın kesitli malzemelerin birleştirilmesinde kaynak ağzı açmaya gerek kalmadan rahatlıkla birleştirme yapılabilmektedir. Kaynak ağzı açmadan 18 mm,

kaynak ağzı açarak ise 150 mm kalınlığındaki parçalar (iki pasoda) kolaylıkla kaynatılabilir. Kaynak esnasında ark tozun altında kaldığından dolayı güvenli bir yöntemdir. Sistemde genellikle 400 A civarında çalışılmasına rağmen bazı uygulamalarda 1000 A'e kadar çıkılabilir. Besleme malzemesi tel ya da bant şeklinde olabilir. Kaynak esnasında kaynak tozları elektriksel, metalürjik ve fiziksel bazı görevleri yerine getirmelidir. Alternatif akım çalışmalarında arkın devamlılığı ve kararlı bir ark oluşumunu desteklemelidir. Kaynak banyosuna kattığı ilave elemanlarla yanma kayıplarını önlemeli veya dengelemelidir. Fiziksel olarak akışkan olmalı, arkı kapatıp atmosferle banyonun temasını kesmeli, dikişe uygun bir form verebilmeli ve kaynak banyosunun yavaş soğumasını sağlayarak istenmeyen sıcak veya soğuk çatlakları önlemelidir. DIN 32522 normu kaynak tozlarını 7 sınıfta toplamıştır. Kaynağın uygulama türü ve hızına göre farklı sınıflarda tozlar seçilir. Kaplama kalınlığı 3 mm'nin üzerine çıkabilir ve bazı uygulamalar ön ısıtma gerektirir. Kaplama sonrası kullanım için yüzey düzgünleştirme için talaşlı imalat ve gerilim giderme için ısıtma işlemi gibi ilave işlemler uygulanması gerekebilir. Toz altı kaynak yöntemi ile yüzey kaplaması uygulaması zor ve kalifiye eleman isteyen bir işdir. Toz altı kaynak yöntemine ait şematik gösterim Şekil 4.14'de verilmiştir [36].

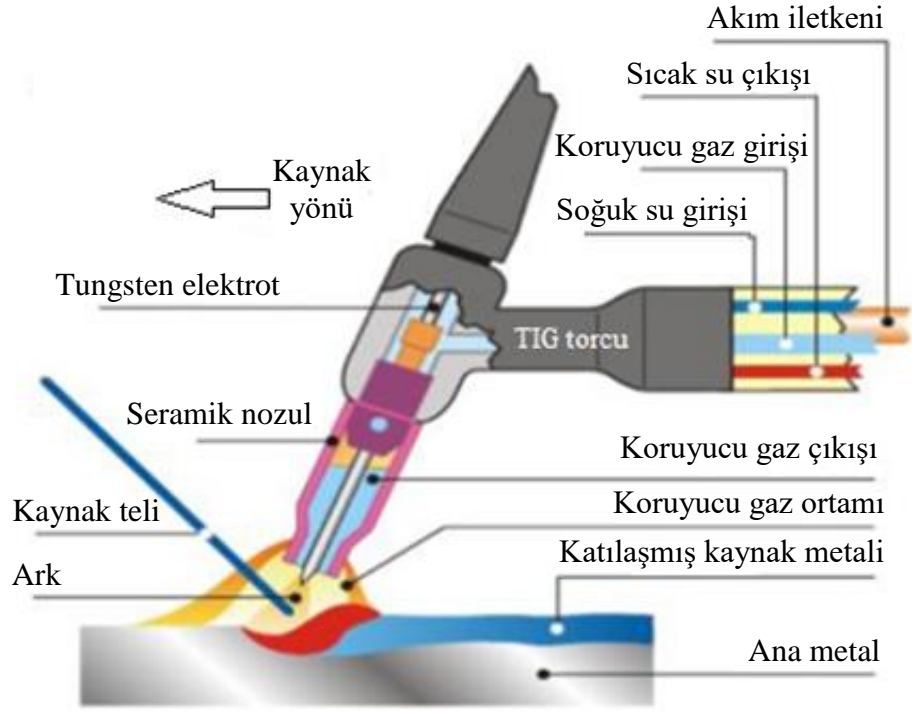


Şekil 4.14. Toz altı kaynak yöntemi şematik gösterimi [36].

#### 4.2.4.2.4. Gazaltı Kaynağı ile Kaplama Yöntemi

Ergimeyen tungsten bir elektrotun kullanıldığı TIG (Tungsten Inert Gas) kaynağında ana metal ile elektrot arasında bir ark oluşturulur. Ark bölgesi bir soy gaz (Helyum veya Argon) veya karışım gaz ile atmosferden korunur. Tungsten elektrot elektronların harekete geçirilmesi için yeterli sıcaklığa ısıtılır. Elektronlar elektrottan yayılarak ark boyunca hareket ederler. Elektronlar malzemeye ulaştığında dolgu yapılacak ana malzemeyi ve dolgu metalini eritirler (Şekil 4.15). Ayrıca ark oluşumu esnasında ortaya çıkan elektromanyetik alan sayesinde dolgu malzemesi ve koruyucu gazın bir kısmı iyonlaşır. Bu sebeple ark bölgesindeki gaz plazma haline gelir ve iletkenlik. Ark iletken hale gelen soy gazdan akımın geçmesi ile üretilir. Gaz altı kaynakları otomatik sistemlerle de uygulanabilir. Bu tip sistemlerle uygulanan kaynaklarda daha yüksek kalitede kaplamalar elde edilir. TIG yöntemi ile yüksek alaşımlı çelikler, paslanmaz çelikler, nikel, kobalt ve bakır alaşımları gibi birçok malzeme kaplama malzemesi olarak uygulanabilir. İlave malzeme olarak çubuk veya tel kullanılır. Uygulamaya geçilmeden önce yüzey hazırlığı ve kaplanacak malzemeye bir ön ısıtma yapılması gerekebilir. Kaplama işleminin akabinde malzeme kullanılacağı yere göre ısıtma işlemi, gerilim giderme ve talaşlı imalat gerektirebilir. Kolay bir şekilde uygulanabilir fakat işlem yavaş ve zaman alır. Geniş yüzey alanlarının kaplanması için tercih edilmez. Şekil 4.16'da akım tipine göre nüfuziyet ve elektrot kapasitesi tablosu verilmiştir [37].



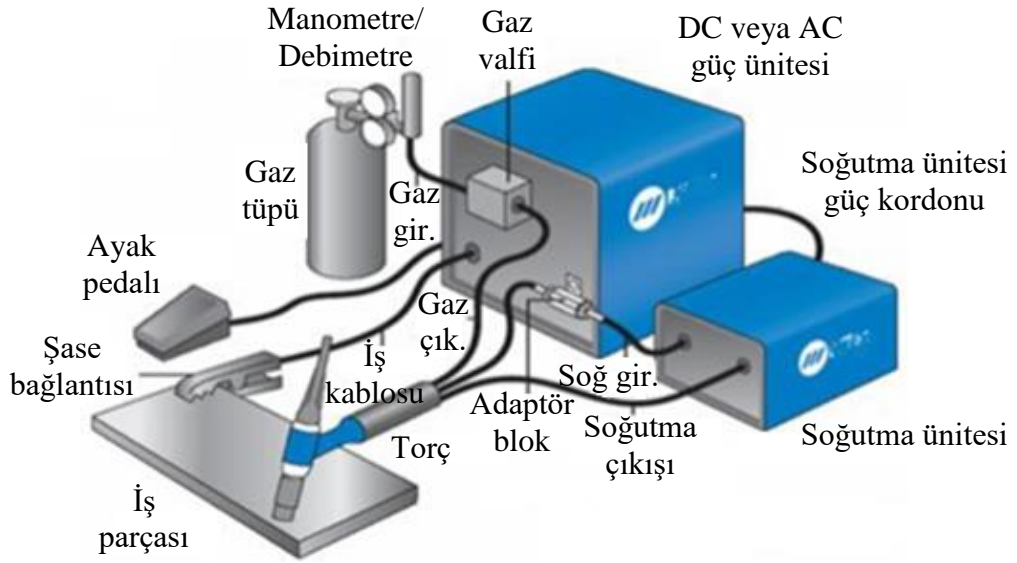


Şekil 4.15. Gaz altı kaynak yönteminin şematik gösterimi [37].

Akım tipi	DCEN	DCEP	AC
Elektrot Kutup	Negatif	Pozitif	Dengeli
Elektrot ve İyon Akışı			
Nüfuziyet Karakteristiği			
Oksit Temizleme	Hayır	Evet	Her yarım çevrimde bir
Arkta Isı Dengesi	% 70 iş parçasında % 30 elektrotun ucunda	% 30 iş parçasında % 70 elektrotun ucunda	% 50 iş parçasında % 50 elektrotun ucunda
Nüfuziyet	Derin-dar	Sığ-geniş	Orta
Elektrot Dayanımı	Mükemmel 3,2 mm 400 A	Zayıf 6,4 mm 120 A	İyi 3,2 mm 225 A

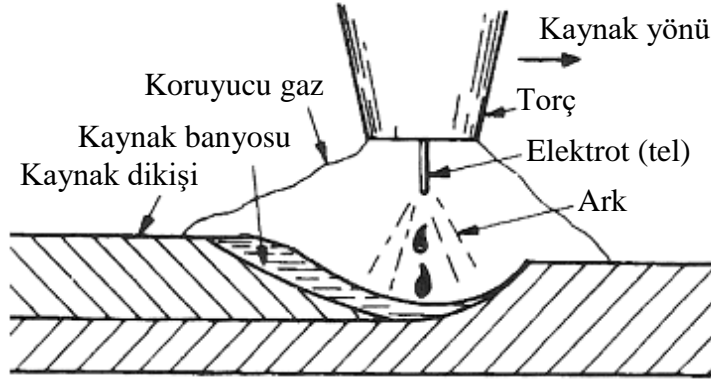
Şekil 4.16. TIG kaynağında akım tipine göre nüfuziyet ve elektrot kapasiteleri [38].

Şekil 4.17’de su soğutmalı TIG kaynak makinasının temel ekipmanları görülmektedir.



Şekil 4.17. Su soğutmalı TIG kaynak ekipmanları şematik gösterimi [37].

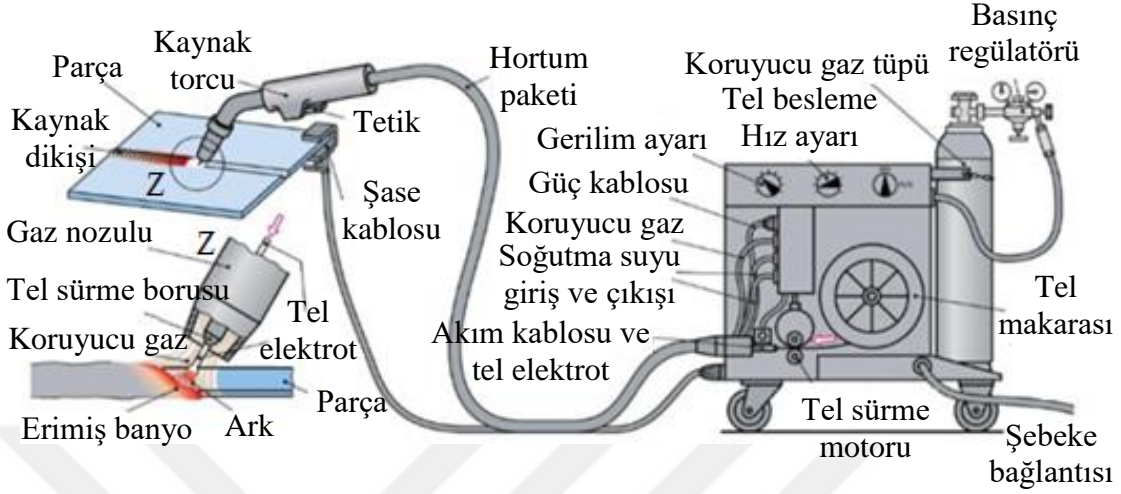
MIG (Metal Inert Gas) kaynak yönteminde ark malzeme ile elektrot arasında oluşur ve elektrot ergir. Koruyucu gaz olarak Helyum, Argon gazı veya bu gazların karışımları kullanılır (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. MIG kaynak yöntemi ark oluşumu şematik gösterimi [21].

Ergiyen elektrotla gaz altı kaynağı yöntemi çok geniş bir uygulama alanına sahiptir. Her türlü kalınlığa sahip demir esaslı malzeme, demir dışı metal ve alaşımlarında rahatlıkla uygulanabilir. Sabit gerilimli (yatay karakteristikli) kaynak makinalarının geliştirilmesinin akabinde ince çaplı kaynak telleri, yüksek akım şiddeti kullanabilme imkanı doğmuş ve daha dar ITAB'ın ve daha fazla nüfuziyetin olduğu kaynakların elde edilmesini sağlamıştır. Uygulaması basittir ve elektrot debisi ayarlanan gazın koruması altında seçilen besleme hızı ile kaynak bölgesine sevk edilir. Şase

kablosunun malzemeye bağlanıp elektrotun kaynak yapılacak bölgeye değiştirilmesi yeterlidir. MIG donanımına ait temel ekipmanlar Şekil 4.19’da gösterilmiştir [39].

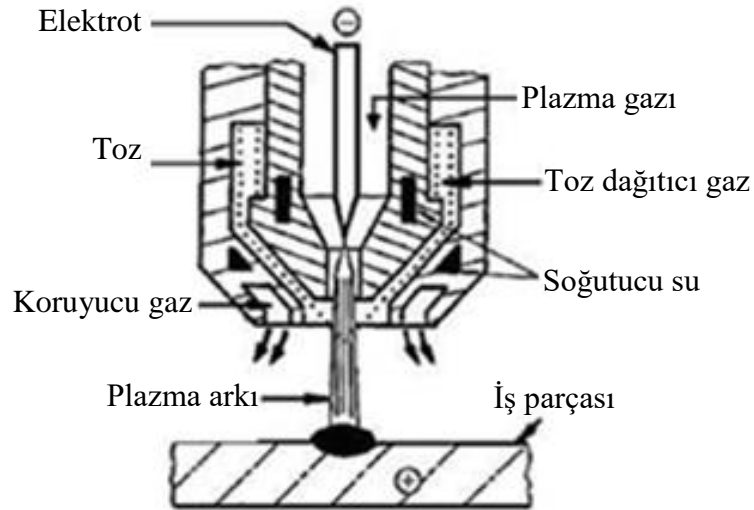


Şekil 4.19. MIG/MAG kaynak donanımı şematik gösterimi [39].

CO<sub>2</sub>'in aktif koruyucu gaz olarak kullanıldığı gaz altı kaynak yöntemi MAG (Metal Active Gas) kaynağı olarak adlandırılır. Ayrıca özlü teller de bu yöntemlerle uygulanabilmektedir. Kaynak bölgesinin korunması özün yanması sonucu ortaya çıkan gazlarla sağlanmaktadır. Özlü teller yüksek ergime hızına dolayısı ile yüksek kaynak hızına sahiptirler. Uygulamada hızı etkileyen değişkenler akım şiddeti, özlü tel çapı ve serbest tel uzunluğu olarak tabir edilen malzeme ile torç arası mesafedir. Bu mesafenin artması birim zamanda yığılan miktarı artırır, dolgu kaynaklarında ana malzemeye nüfuziyet azalır ve malzemeye düşük ısı geçişi sağlanır. İnce çaplı elektrotlar her pozisyonda uygulanabilir. Özlü teller örtülü elektrotların sahip olduğu özelliklere sahiptir ve koçan kaybı ve elektrot değişim zamanı ile ilgili kayıplar söz konusu değildir. Özlü elektrotların avantajları olarak; kaynak metalinin istenen mekanik, kimyasal ve korozyon direnci özelliklerinin sağlanması, tel haline getirilmesi zor olan ve ekonomik olmayan bileşimler için tel üretimine olanak sağlaması, açık havada da kaynak yapılabilirlik, kaynak dikişi üzerinde oluşturduğu cüruf yardımı ile kaynak dikiş formunun düzgün olması ve soğuma esnasında kaynak dikişinin korunması, ark dengesinin sağlanarak sıçramanın en aza indirilmesi sayılabilir [39].

#### 4.2.4.2.5. Plazma Arkı ile Kaplama (PTA) Yöntemi

Plazma arkı ile kaplama kaynağında prensip toz şeklinde olan malzemenin soy gaz akımı ile ana malzeme üzerine taşınmasıdır. Kaynak torcu, lüle ve tungsten elektrottan oluşur. Bu torç içerisinde plazma elde edilir. Kaplama malzemeleri üç grupta toplanabilir. Bunlar Ni, Co ve östenitik esaslı malzemelerdir. Seçilen kaplama malzemesine göre işlem sonrası elde edilen yüzey sertlik değerleri farklıdır. Diğer yöntemlere göre yüzeyin itina ile hazırlanmış olması gerekmektedir. Uygulama şekli yüzeyi kaplanacak malzemenin hareket ettirilmesi şeklindedir. Yüksek enerji seviyesi ile derin kaplamalar elde edilebilir. Sıcaklıklar 30000 °C'lere çıkabilir. Kalınlık yönünden ince kaplamaların elde edilmesi, metalürjik olarak yüksek ergime sıcaklıklarına sahip metallere ve sert yüzey elde edilmesi için karbürlerin kaplanması mümkündür. Ana malzemeye çok az enerji girdisi olduğu için ITAB çok dar bir bölgedir. Ark stabilitesi oldukça iyidir bu sebeple malzemede çok az termal bozulmaya sebep olur. Çevresel etkilerden az etkilenir ve donanımları ucuz ve kullanımı kolay bir yöntemdir. Bu yöntemle elde edilen kaplamaların metalürjik bağları kuvvetli ve bu sebeple darbe dayanımları da oldukça iyidir. Şekil 4.20'de yöntem şematik olarak gösterilmiştir [40].



Şekil 4.20. Plazma arkı ile kaplama yöntemi şematik gösterimi [40].

## BÖLÜM 5

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, sulu çamur erozyonu da denilen katı partikül taşıyan akışkan ortam erozyonu ile ilgili makaleler incelenmiştir. Özellikle çamur erozyonu aşınmasının test düzeneği kullanılarak yapılmış olan deneysel çalışmalar üzerinde durulmuştur. Aşınma performansı ve aşınmaya etki eden parametreler ile bu parametrelerin sonuçlara etkileri incelenmiştir.

Katı partikül taşıyan akışkan ortam erozyonu (sulu çamur erozyonu) farklı parametrelerden etkilenmektedir. Bu parametreler koşullarla ilgili olarak sıvı ortamın türü, taşınan katı partiküllerin şekli, ebadı ve sıvı içerisindeki konsantrasyonu, çarpma açısı, çarpma hızı ve akışkan ortam sıcaklığı sayılırken [41-44], aşınan malzeme ile ilgili olarak da sertlik, tokluk gibi parametreler önem arz etmektedir [45, 46]. Bu parametelerin etkilerinin incelenmesi maksadı ile birçok çalışma yapılmıştır. Bu çalışmaların yapılması amacı ile birçok deney metodu ve bu metodların uygulanabilmesi için deney düzenekleri geliştirilmiştir [47-49]. Desale vd. (2005) deneylerin bir hazne içerisinde gerçekleştirildiği hazneli bir düzenek tasarlamışlardır. Tasarımda hazne tabanına eklenmiş olan karıştırıcı bir pervane ile katı partiküllerin rastgele hareketi minimuma indirilmiştir. Katı partikül çarpma açısı, konsantrasyonu, hızı ve tane büyüklüğü değişkenlerinin aşınma üzerindeki etkilerini ölçmek için farklı koşullar oluşturmuşlardır. Bu çalışmalarda farklı aşınma mekanizmalarının görüldüğü farklı numune açılarında aşınmış yüzeyler üzerinden SEM görüntüleri alınmış bu görüntüler katı partikül çarpma açılarının tespitinde yardımcı olmuştur. Bu hazneli aşınma düzeneği ile borular, dirsekler ve pompalar gibi ekipmanlarda makul konsantrasyon oranlarında ve fiili akış hızlarında aşınmaların öngörüsünün yapılması ve daha gerçekçi sonuçların elde edilmesi amaçlanmıştır [50].

Shipway ve Hutchings (1996), yapmış oldukları çalışmada, erozif aşınmayı katı partiküllerin bir yüzeye çarparak o yüzey üzerinden malzeme kaldırması olarak tanımlamışlardır. Yapılan çalışmada; silisyum, silika, alüminyum ve silisyum karbür olmak üzere dört farklı aşındırıcı malzeme kullanılmış, gevrek yapıya sahip soda-kireç camı, borosilikat camı, silikadan elde edilmiş cam, kısmi dengelileştirilmiş zirkonya, alümina, silisyum karbür ve bor karbür olmak üzere yedi farklı malzeme numune olarak seçilmiştir. Her bir aşındırıcı tüm hedef malzemelere uygulanmış ve deneyler hava üfleli bir tesisat ile gerçekleştirilmiştir. Katı partiküllerin hareket hızı 60 m/s ve numune yüzeyine çarpma açıları normal çarpma açısı (90°) olarak seçilmiştir. Deneyler sonunda aşınma oranının hem hedef malzeme ve hem de aşındırıcı özelliklerine ve aşındırıcının çarpma koşullarına bağlı olduğu belirtilmiştir. Aşındırıcının sertlik değeri hedef malzemenin sertlik değerinden fazla ise genelde aşınma fazla ve girinti kaynaklı kırık mekanizması şeklinde fakat aşındırıcı hedef malzemedan daha az sert ise aşınmanın daha az ve küçük ölçekli çentikli aşınma mekanizması şeklinde olduğu gözlemlenmiştir [51].

Wheeler ve Wood (1999) çalışmalarında, tungsten ve silisyum karbür altlık üzerine kimyasal buharla biriktirme (CVD) yöntemi ile uygulanmış 10-47 µm'lik elmas kaplamalar için hazneli tip sulu çamur ve yüksek hızlı hava üfleli olmak üzere iki farklı erozif aşınma deney düzeneği kullanarak katı partikül erozyonu deneyleri yapmışlardır. Aşındırıcı olarak silis kumu kullanılmış ve çarpma açısı olarak normal çarpma açısı (90°) seçilmiştir. Sulu çamur düzeneğinde, ortalama partikül çapı 135 µm ile çarpma hızı 16 m/s ve ortalama partikül çapı 235 µm ile çarpma hızı 28 m/s değerleri seçilmiştir. Hava üfleli düzenekte ise ortalama partikül çapı 194 µm olan silis kumu sırası ile 63, 148 ve 268 m/s partikül çarpma hızı değerlerinde seçilmiştir. Elde edilen erozif aşınma oranları sinterlenmiş tungsten karbür ve paslanmaz çelik ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasında kaplamanın maruz kaldığı aşınma mekanizmalarını belirlemek için deney öncesi ve sonrasında numunelerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskopunda görüntülenmiştir. 268 m/s'de gerçekleştirilen deneylerde kaplamaların aşınma sürelerinin 5 dakikadan 185 dakikaya kadar arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 268 m/s partikül çarpma hızı değerinde, 46 µm CVD elmas kaplamalı tungstendeki erozif aşınma direncinin sinterlenmiş tungsten karbürün aşınma direncinden yaklaşık altı kat kadar fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca CVD

yöntemi ile elde edilmiş 15 µm kalınlığındaki elmas filminin kaplamasız SiC Hexoloy SA'ya göre aşınma direncinde önemli bir artış gösterdiği ve CVD elmas kaplamalı SiC'nin çok taneli elmasa (PCD) göre neredeyse 200 kat erozif aşınma direnci olduğu ortaya çıkmıştır [52].

Patil vd. (2011) yapmış oldukları çalışmada, aşındırıcı olarak silika kumu kullanarak alüminyum numunesinin erozif aşınma performansını incelemiştir. Çalışmalarında 6,6 litre hacme sahip olan hazneli tip sulu çamur deney düzeneği kullanmışlardır. Düzenek içerisinde iki ayrı numune aynı anda bağlanabilmektedir. Aşındırıcı çarpma açılarının 15'er derece aralıklarda (0° ile 90°) değiştirilebilmesi için ayarlanabilir bir bağlantı tasarlamışlardır. Numuneler 40 x 4 x 2 mm ölçülerinde olacak şekilde hazırlanmıştır. Silika kumu sırası ile 225 µm (-150 µm, +300 µm), 505 µm (-300 µm, +710 µm) ve 855 µm (-710, +1000) olacak şekilde üç farklı ortalama partikül boyutunda hazırlanmıştır. Deney parametreleri Çizelge 5.1'de tablo halinde verilmiştir [48].

Çizelge 5.1. Erozif aşınma deneyine ait parametreler [48].

No	Çarpma Açısı (°)	Ortalama Partikül Boyutu (µm)	Katı konsantrasyonu (% ağı.)	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

Yapılan bu çalışma ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [48];

1. Maksimum aşınma değerinin elde edildiği 45° çarpma açısına kadar çarpma açısı arttıkça alüminyumun aşınma da artmaktadır. 45°'den sonra 90°'ye kadar azalmaktadır.

2. Tane boyutu arttıkça alüminyumun aşınma değeri de lineer bir şekilde artmaktadır. Düşük açılardaki artış oranı daha yüksek açılardakine göre daha düşüktür.
3. Konsantrasyondaki artış (ağırlık olarak) aşınmayı artırmaktadır. Daha yüksek konsantrasyonlardaki aşınma artışı çok kayda değer olmamaktadır. Bu durum katı konsantrasyonun artmasıyla beraber aşınma artış oranının azaldığını göstermektedir.
4. Hız, erozif aşınma üzerinde en etkili faktördür. Yüksek hızlarda, azaltılmış sürelerdeki kütle kayıpları kayda değerdir [48].

Desale vd. (2006) yaptıkları deneysel çalışmada, AA6063 ve AISI 304L sünek malzemelerinin aşınma performanslarını hazneli tip sulu çamur deney düzeneği kullanarak test etmişlerdir. Kuvars, alümina ve silisyum karbür olmak üzere üç farklı aşındırıcı seçilmiştir. Aşındırıcıların ortalama partikül boyutu 550  $\mu\text{m}$ 'dir. Partikül çarpma hızı ise 3 m/s olarak seçilmiştir. Deneyler 15° ila 90° aralığındaki çarpma açılarında ve % 10 katı konsantrasyonlu karışım ile gerçekleştirilmiştir. Yapmış oldukları çalışmada elde etmiş oldukları bulgular aşağıda özetlenmiştir [53];

1. Her iki malzemede de düşük açılarda maksimum aşınma meydana gelmiştir.
2. Bir malzemede farklı aşındırıcılar için her bir açı değerinde aşınmalar farklı olurken maksimum aşınmanın olduğu açı değeri bütün aşındırıcılar için aynı olmuştur. Bu sonuç maksimum aşınmanın aşındırıcı özelliklerinden bağımsız ve sadece aşınan malzemenin özellikleri ile doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Maksimum aşınma alüminyumda 15°'de olurken paslanmaz çelikte 22,5°'de olmuştur.
3. Sünek malzemelerin erozif aşınma oranı, aşındırıcı şekil ve sertliğinden başka özellikler ile de değişkenlik göstermektedir. Düşük çarpma açılarında şekil ve yoğunluk değerleri yüksek çarpma açılara göre daha etkilidir.



4. Malzeme aşınma mekanizması aşındırıcı şekil ve sertliğinin bir fonksiyonu olarak ortaya çıkar. Yüksek yoğunluk ve düşük şekil faktörüne sahip partiküller derin kraterler oluşturur ve düşük yoğunluk ve yüksek şekil faktörüne sahip olan aşındırıcılara göre daha yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü meydana getirirler. Böylece, daha yoğun ve açısallı şekilli aşındırıcılarda aşınma oranı kayda değer bir şekilde yüksek olur.

Desale vd. (2008), normal çarpma açısında ( $90^\circ$ ), AA6063 alüminyum alaşımı, bakır, bronz, yumuşak çelik, AISI 316L paslanmaz çelik ve türbin kanat çeliği olmak üzere yedi farklı malzeme üzerinde hazneli tip deney düzeneği kullanarak aşınma deneyleri yapmışlardır. Aşındırıcı olarak ortalama  $550 \mu\text{m}$  büyüklüğe sahip kuvars kumu, alümina ve silisyum karbürü kullanılmıştır. Deneyler % 10 katı konsantrasyonunda ve 3 m/s partikül çarpma hızı değerinde gerçekleştirilmiş ve aşınma değeri, aşındırıcı ve numune sertlik oranının bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, deneyler % 10, % 20 ve % 30 katı konsantrasyonu ve 3 m/s, 6 m/s ve 8,37 m/s partikül çarpma hızı değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [54];

1. Normal çarpma açısında ( $90^\circ$ ), sünek malzemeler numune olarak kullanıldığında, erozif aşınma, aşındırıcı sertliğinin numune sertliğine oranının bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmaktadır. Aşınma oranı neredeyse sertlik oranı aralığı için sabit kalır. Bu çalışmada; sertlik oranı bölgeleri 4,2 – 5,2, 6,9 – 12,1 ve 12,5 – 27,5 olarak belirlenmiştir. Sertlik oranından farklı değişkenlerin etkisine bağlı olarak üç bölge için aşınma oranı çok dar bir aralıkta değişmektedir.
2. SEM görüntüleri ve aşındırıcıların yüzeye etkimesi neticesinde aşınmış yüzey üzerindeki ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri, sertlik oranının bir fonksiyonudur.
3. Normal çarpma açısında ( $90^\circ$ ) erozif aşınma değeri, hız ve tane boyutuna çok güçlü bir şekilde bağlı olmasına rağmen konsantrasyona daha düşük bir seviyede bağlıdır. Sünek malzemelerin aşınmalarının hesaplanabilmesi için bir bağıntı

geliştirilmiştir. Bu bağıntı bu çalışmadaki deneysel verilerle % ±12 hata vermektedir.

Desale vd. (2009) yaptıkları çalışmada, erozif aşınmanın belirlenebilmesi için bir ampirik model geliştirmişlerdir. Bu model deformasyon ve kesme aşınması payının olduğu herhangi bir açıdaki aşınma yaklaşımına dayanmaktadır. Normal çarpma açısında (90°) aşınmaya sadece deformasyon katkıda bulunur. Bu yüzden normal çarpma aşınmasında elde edilen sonuç ilişkisi aşağıdaki gibidir [55];

$$E_{D90} = 6,62 \cdot 10^{-14} \cdot K_{(H_P/H_T)} \cdot V^{2,02} \cdot d^{1,62} \cdot C_w^{-0,28} \quad (5.1)$$

K: sabit,

$$\begin{aligned} H_P/H_T \leq 6 \text{ için} & \quad K_{(H_P/H_T)}=0,42 \\ 6 < H_P/H_T \leq 12,3 \text{ için} & \quad K_{(H_P/H_T)}=1,0 \\ 12,3 < H_P/H_T \leq 27,5 \text{ için} & \quad K_{(H_P/H_T)}=1,83 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Herhangi bir  $\alpha$  çarpma açısındaki deformasyon aşınmasının aşınmaya katkısı aşağıdaki eşitlikten hesaplanır.

$$E_{D(\alpha)} = E_{D90} (\sin \alpha)^3 \quad (5.3)$$

Benzer bir şekilde herhangi bir  $\alpha$  çarpma açısındaki kesme aşınmasının hesaplanmasında ise aşağıdaki deneysel bağıntı kullanılır.

$$E_C = 6,204 \cdot 10^{-12} \cdot f(\alpha) \cdot (MSF)^{-0,7974} \cdot (H_T)^{-0,7155} \cdot V^{235} \cdot d^{155} \cdot C_V \quad (5.4)$$

$$f(\alpha) = 0,9889 \left[ \sin \left( \frac{\pi}{2} \right) \left( \frac{\alpha}{\alpha_{\max}} \right) \right]^{0,5898} \quad 0^\circ \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \quad (5.5)$$

$$f(\alpha) = 0,9186 \left[ \sin \left( \left( \frac{\pi}{2} \right) - \left( \frac{\pi}{2} \right) \cdot \left( \frac{\alpha - \alpha_{\max}}{90 - \alpha_{\max}} \right) \right) \right]^{4,3044} \quad \alpha_{\max} \leq \alpha \leq 90^\circ \quad (5.6)$$

Sonuç olarak, sünek malzemeler için herhangi bir katı-sıvı karışımında, herhangi bir çarpma açısında toplam aşınma  $E_W$ , bu açıdaki deformasyon ve kesme aşınmalarını basitçe ekleyerek hesaplanabilir. Toplam aşınma formülü aşağıda verilmiştir.

$$E_W = E_{D(\alpha)} + E_C \quad (5.7)$$

Desale vd. (2011) yapmış oldukları çalışma kapsamında, kuvars, alümina ve silisyum karbür olmak üzere üç farklı aşındırıcı kullanarak, AA6063 alüminyum alaşımı, bakır, bronz, yumuşak çelik, AISI 304L paslanmaz çelik, AISI 316L paslanmaz çelik ve türbin kanat çeliği olmak üzere yedi farklı malzeme üzerinde hazneli tip deney düzeneği kullanarak aşınma deneyleri yapmışlardır. Deneyler, 3 m/s, 6 m/s ve 8,33 m/s olmak üzere üç farklı partikül çarpma hızı ve % 10, % 20 ve % 30 olmak üzere üç farklı konsantrasyon değerinde yapılmıştır. Aşındırıcı ortalama partikül boyutları 363  $\mu\text{m}$ , 550  $\mu\text{m}$  ve 655  $\mu\text{m}$  olmak üzere üç farklı değerde seçilmiştir. Yapılan bu çalışmaya bağlı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir [56];

1. Farklı sünek malzemelerin toplam aşınma oranına kesme aşınması oranının katkısı farklı çarpma açılarında hesaplanmıştır. Çarpma açısı ile birlikte kesme aşınması belirli bir açıda maksimum değere ulaşana kadar artış göstermiş, daha sonra 90° açı değerine kadar açı artarken kesme aşınması azalış göstermiştir. Maksimum kesme aşınması değeri için açı değerinin numune malzemesinin sertlik değerine bağlı olduğu ve maksimum kesme açısı değeri için açı ve numune sertliği arasında bir fonksiyonel ilişki olduğu tespit edilmiştir.
2. Kesme aşınması tahmini için iki ayrı ifade elde edilmiştir. Bunlardan ilki maksimum kesme aşınması açısından daha düşük değerdeki açılardaki kesme aşınmasının bulunması ve diğeri de maksimum kesme aşınması açısından daha yüksek değerdeki açılardaki kesme aşınmasının bulunması için kullanılan iki ifade ile de kesme aşınması malzeme özellikleri ve çalışma parametrelerinin açık fonksiyonu olduğu tespit edilmiştir.
3. Herhangi bir çarpma açısındaki deformasyon aşınma oranı ile birlikte kesme aşınma oranının katkısının bulunması için bir bağıntı geliştirilmiştir. Her ikisi de

açıkça malzeme özellikleri ve işletme parametreleri bilgisine dayalıdır. Bu metodoloji, bu çalışmadaki deneysel veri aralığı için aşınma oranını %  $\pm 18$  hata ile kesme ve deformasyon aşınma oranlarının katkısı olarak ortaya koymaktadır.

Kumar'ın (2011) yapmış olduğu Investigation of Erosive Wear Ductile Materials With and Without Coating isimli yüksek lisans tez çalışmasında santral külü taşınan sistemde kullanılan pompa ve boru malzemesi 13Cr-4Ni çeliği ele alınmıştır. Aşınma dayanımının artırılması amacı ile malzeme yüzeyine HVOF yöntemi ile alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ) ve krom oksit ( $Cr_2O_3$ ) toz kaplama uygulamaları yapılmıştır. % 20 oranında 50 – 350  $\mu m$  partikül boyutuna sahip santral uçucu külü ihtiva eden çamur hazırlanmıştır. Deney düzeneği olarak hazne, pompa ve boru hattından oluşan bir su jeti kullanılmıştır. Deneyler  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  olmak üzere üç farklı açıda gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada her iki kaplamanın da kaplamasız malzemeden daha iyi performans sergiledikleri sonucuna varılmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız malzemelerde maksimum aşınma miktarının  $30^\circ$  ve  $90^\circ$  derece çarpma açılarında meydana geldiği raporlanmıştır. Yine bu çalışmada,  $Cr_2O_3$  kaplamalı çeliğinin kaplamasız 13Cr-4Ni çeliğine göre 3 kat daha iyi performans sergilediği, ayrıca her iki malzemede de aşınma değerleri akış ve uygulama süresi arttıkça artış göstermiştir [57].

Khan (2011), Evaluation of Erosion Wear of Ash Handling Pipes isimli yüksek lisans tez çalışmasında herhangi bir ısıl işleme tabi tutulmamış % 0,16 ile % 0,29 karbon oranına sahip düşük karbonlu çelik ile AISI 202 östenitik paslanmaz çelik malzemesi kullanmıştır. Malzemelerin aşınma dayanımlarının artırılması amacı ile yüzeylerine HVOF termal spreyci kaplama yöntemi kullanılarak WC-12Co toz kaplama yapılmıştır. Aşındırıcı olarak uçucu kül ve santral altı külü kullanmıştır. Hazırlanan çamurun konsantrasyonu % 20, % 40 ve % 60 olmak üzere üç farklı değerde seçilmiştir. Hazneli tip deney düzeneğinde yapılan deneylerde, numune hızları 700 d/d, 1000 d/d ve 1400 d/d olarak seçilmiştir. Deneyler sonucunda santral altı külünün uçucu külden daha aşındırıcı olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca WC-12Co kaplanmış AISI 202 (% 18 Cr, % 4 Ni, % 8 Mn) gibi paslanmaz çeliklerde aşınma miktarlarının 3 kata kadar azaldığı ve yine yumuşak çeliklere uygulanan aynı yöntem ile aşınma miktarlarının 4 kata kadar azaldığı görülmüştür [58].

Daha önce de belirtildiği gibi erozif aşınmada iki farklı mekanizma söz konusudur. Bunlardan ilki deformasyon aşınması (darbe) ve ikincisi de kesme (kayma) aşınmasıdır. Akışkan ortam içindeki partiküllerin yüksek kinetik enerjileri deformasyon aşınmasına sebep olurken bu yüksek kinetik enerji yüksek lokal gerilmelerle ilişkilendirilebilir. Dirsek ve pompa gibi bölgelerde deformasyon aşınması etkili iken yatay borularda boru yüzeyinde meydana gelen bütün aşınmayı kesme aşınması oluşturur sonucuna varılmıştır.

Kumar ve Ratol (2013), derleme makalelerinde aşağıdaki sonuçları ortaya koymuşlardır [59];

1. Çamur erozyonu enerji üretim tesisleri için genel ve ciddi bir problem ve tamamen önlenmeli veya erken safhada tespit edilmelidir. Tartışılan tüm tribolojik parametrelerin aşınma üzerine az ya da çok etkisi vardır ve çamur erozyonundan kaynaklı kaplanmış ya da kaplanmamış malzemelerin bozulması tesis bakım maliyetini artırmaktadır.
2. Düşük dayanıma sahip (örneğin alüminyum, pirinç, yumuşak çelik vs.) hedef malzemenin erozif aşınma direnci çalışan yüzeyi üzerine kaplama yapılarak artırılabilir.
3. Yüksek termal verimliliğe sahip modern termik santrallerin gelişmesiyle beraber daha yüksek dayanım ve agresif çalışma şartlarına göre geliştirilmiş konstrüksiyon malzemelerinin kullanımı gerekliliği doğmuştur. Bu gereksinimler de koruyucu kaplamalar ile sağlanabilir.
4. Spesifik uygulamalar için kaplanmış veya kaplanmamış uygun malzeme kullanımı çamur erozyonu aşınma dayanımı için geliştirilebilir. Malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin üzerine çalışma yapmak malzeme seçiminde yardımcı olabilir.

5. Çamur erozyonunun minimize edilmesi için birçok teknik belirlenmiştir, ancak önemli araştırma çalışmaları ile bu teknikleri uygulamak ve değerlendirmek gerekmektedir.

More vd. (2014), partikül çarpma açısının, konsantrasyonun, hızın ve tane boyutunun erozif aşınma üzerindeki etkisini ölçmek için bir çalışma yapmışlar ve bu çalışmada aşındırıcı olarak 550 µm ortalama partikül büyüklüğüne sahip kuvars kumu kullanmışlardır. Aşınmaya maruz bırakılacak malzeme olarak da AISI SS304L çelik seçilmiştir. Deneyler hazneli tip deney düzeneğinde % 20 katı konsantrasyonuna sahip çamur kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 3,71 m/s partikül çarpma hızı değeri kullanılmıştır. Aşınan yüzeylerin farklı açılarda ortaya çıkan SEM fotoğrafları aşınma mekanizmalarının ortaya çıkarılmasında ve çarpma açısının etkilerinin belirlenmesinde yardımcı olmuştur. Bu çalışmada aşınma test düzeneği tasarımı yapılırken makul katı-sıvı konsantrasyonunda, gerçek akış hızlarında boru hatları, dirsekler, pompalar vs. için aşınma durumlarının simülasyonunun yapılması ve daha gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek amaçlanmıştır. Sonuç olarak; herhangi bir numune açısında kesme ve deformasyon aşınmalarının payları sünek malzemeler için geliştirilen bağıntılarla hesaplanabilir. Hesaplanan erozif aşınma verileri deneylerden elde edilen sonuçlarla çok iyi örtüşmektedir. AISI SS304L malzemesinin erozif aşınma değerleri için bu yöntem % ±15 hata vermiştir [60].

Gökşenli ve Kosa (2015), Sünek ve Gevrek Malzemelerde Partikül Çarpma Açısının Erozif Aşınma'ya Etkisi isimli çalışmalarında aynı anda iki numunenin test edilebildiği hazneli tip deney düzeneği kullanmışlar ve partikül çarpma açısının ve St 37 çeliğinin yüzey sertliğinin aşınma oranı ve aşınma mekanizmasına etkilerini incelemişlerdir. Deneylerde numune olarak 245 HV yüzey sertlik değerine sahip ısıl işlem uygulanmamış sünek St 37 çeliği ile ısıl işlem uygulanarak yüzeyi sertleştirilmiş (510 HV) gevrek St 37 çeliği kullanılmıştır. Aşındırıcı olarak 350 µm ortalama partikül büyüklüğüne sahip silika kumu kullanılmış ve numuneler 4,76 m/s çevresel hız ile hazne içerisinde döndürmüşlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda sünek malzemedeki aşınma oranının gevrek malzemedekinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Elde edilen sonuçlar sünek malzemedeki maksimum aşınmanın 30° çarpma açısında olduğu, açının artmasıyla aşınmanın azaldığı, buna karşılık gevrek malzemedeki çarpma

açısının artmasıyla aşınmanın arttığı ve maksimum aşınma değerinin de 45°'de elde edilmiştir [61].

Kumar vd. (2015), yaptıkları çalışmada HVOF yöntemi ile kaplanmış AISI 304 ve AISI 316 paslanmaz çeliklerinin erozif aşınma davranışlarını incelemiştir. Çalışmalarında Desale vd. [54]'nin kullanmış olduğu deney düzeneğini kullanmışlardır. Aşındırıcı olarak ortalama 205 µm partikül büyüklüğüne sahip kuvars kumu kullanılmış ve numuneler hazne içerisinde 10,7 m/s çevresel hız ile döndürülmüşlerdir. Daha önceki çalışmalarında olduğu gibi aşınmanın doğrudan malzemelerin yüzeylerinde meydana geldiği ve erozif aşınma yolu ile yüzeyde meydana gelen malzeme kayıplarının iki ayrı mekanizmanın toplamı şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Bunlardan bir tanesi deformasyon aşınması ve bir diğeri de kesme aşınmasıdır. Deformasyon aşınması yüksek çarpma açılarında meydana gelirken kesme aşınması ise daha düşük çarpma açılarında meydana gelmektedir. Deneysel çalışmalar neticesinde AISI 304 malzemesi üzerine yapılan WC-Co-Cr kaplamasında optimum erozif aşınma dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışma ile ayrıca en etkili değişkenlerin çarpma açısı ve katı konsantrasyonu olduğu ve aşındırıcı partikül büyüklüğünün nispeten daha az etkili olduğu ortaya çıkmıştır. 30° çarpma açısında elde edilen aşınma değerlerinin 90°'de elde edilen aşınma değerlerinden daha fazla olduğu ve bunun da sünek malzemelerin özelliklerinden biri olduğunu belirtilmiştir [62].

## **5.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRMESİ**

Yapılan literatür araştırmasının sonucunda; aşındırıcı ile ilgili olarak, taşınan katı partiküllerin ebadı, sıvı içerisindeki konsantrasyonu, çarpma açısı, çarpma hızı parametreleri ve aşınan malzeme ile ilgili olarak yüzey sertlik değeri parametresi öne çıkmıştır. Çeşitli yöntemlerle yüzeylerinde iyileştirmeler yapılmış ve yapılmamış metal malzemeler numune olarak seçilmiştir. Genel olarak daha az etkili bir parametre olan partikül ebadı çalışmaların genelinde belirli bir değerde sabit tutulmuştur. Deneysel çalışmalarla bir hazne içinde bulunan karışımın içerisinde belirli bir çevresel dönme hızında hareket ettirilerek numunelerin aşındırılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, yüzey sertliği yüksek veya iyileştirme yapılarak

daha sert bir yüzey elde edilmiş malzemelerin aşınma dayanımlarında bariz artışlar elde edildiği görülmüştür. Daha yüksek konsantrasyon ve hız değerlerinde aşınmanın arttığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca partikül çarpma hızının aşınma değeri üzerinde konsantrasyondan daha etkili bir parametre olduğu anlaşılmıştır. Bu bilgiler ışığında yapılan mevcut çalışmanın amacı granüle edilmiş yüksek fırın cürufunun taşınmasında kullanılan boru malzemesi olan St 37-2'ye alternatif olarak Hardox 400 ve AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik gibi malzemeler ve bunların yanında ticari olarak satın alınabilen  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama malzemesi ile kaplanmış malzemelerin erozif aşınma dayanımlarının % 10, % 20 ve % 30 olmak üzere üç farklı katı konsantrasyon ve iki farklı taşıma hızı değeri için aşınma performanslarının mukayeseli olarak incelenmesidir. Araştırma sonuçları söz konusu malzemelerin farklı konsantrasyonlarda farklı akış hızlarında maliyet ve ömür açısından karşılaştırmalarını içermektedir.



## BÖLÜM 6

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Bir çok sanayi tesisinde; akışkan ortamda katı partikül taşınması uygulaması, güvenli, ekonomik ve alternatif sistemlere göre daha az bakım ihtiyacı olmasından dolayı tercih edilmektedir. Akışkan ortam bazı uygulamalarda gaz iken bazı uygulamalarda da sıvı olabilmektedir. Bu sistemler sanayide madenlerde cevherin, termik santrallerde atık küllerin ve yüksek fırınlardan elde edilen granüle edilmiş cürufun uzak mesafelere yüksek miktarlarda taşınması için tercih edilmektedir. Bahsi geçen sistemlerin verimliliğini artırmak ve tesis duruş sürelerini azaltmak amacı ile ekipmanların erozif aşınma dayanımı üzerine çalışmalar yapmaya gerek duyulmuştur. Bu çalışmaların deneysel ölçeklerde gerçekleştirilmesi, ortaya çıkacak olası yüksek maliyetlerin önüne geçerken ömür anlamında bir yaklaşım yapılmasını da kolaylaştırmaktadır. Bu çalışmanın amacı, granüle edilmiş yüksek fırın cürufunun taşınması esansında borularda meydana gelen erozif aşınma kaynaklı sistem arızalarının azaltılması için St 37-2 malzemeye alternatif olarak üç farklı malzemenin aşınma performanslarının deneysel olarak test edilmesidir. Bu bölümde, Kardemir A.Ş yüksek fırınlarında granüle cüruf elde edilmesi, taşınması ve nakliyesi, deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneği, aşındırıcının hazırlanması ve malzeme seçimleri detaylı olarak anlatılmıştır.

KARDEMİR A.Ş 1 numaralı yüksek fırınına (YF-1) ait granüle cüruf taşıma sistemi temel üç ekipmandan oluşmaktadır. Bunlardan ilki granülasyon tankı Şekil 6.1’de gösterilmiştir. Granülasyon tankı silindirik hacimlidir ve yaklaşık olarak 68,1 m<sup>3</sup> karışım biriktirme kapasitesi bulunmaktadır. Yaklaşık 1400 °C’de sıvı haldeki cüruf su kullanılarak bu tankın içine granüle edilir. Cürufun granüle edilme anına ait bir görüntü Şekil 6.2’de verilmiştir. İkincisi cüruf-su karışımının basıldığı pompadır ve Şekil 6.3’de verilmiştir. Pompa çalışma basıncı 55 mss ve debisi 600 m<sup>3</sup>/saat’dir. Sonuncusu ise karışımın taşındığı hattı oluşturan borular olup Şekil 6.4’de gösterilmiştir.

YF-1 üretim değeri 1.500 TSM/gün, şarj edilen demirli malzemenin tenörü yaklaşık ortalama % 53, cüruf miktarı yaklaşık 1.330 ton/gün (83,13 ton/döküm), günlük döküm sayısı ortalama 16, döküm akma süresi 50 dakika (cüruf akma süresi yaklaşık 40 dk)'dır. 60 dakika için 124,70 ton cüruf ve cürufün özgül ağırlık değeri  $d_c = 1,18$  ton/m<sup>3</sup> teorik olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.1. KARDEMİR A.Ş 1 no'lu yüksek fırını granüle cüruf elde edilme anı görüntüsü.

Granülasyon sisteminin bir saatlik çalışması için;

Cüruf hacmi ( $v_c$ ) = 105,68 m<sup>3</sup>, cüruf kütlesi ( $m_c$ ) = 124.700 kg, su ve cüruf hacimleri toplamı ( $v_s$ ) + ( $v_c$ ) = 600 m<sup>3</sup>'dür.

Su hacmi ( $v_s$ ) = 494,32 m<sup>3</sup>, su kütlesi ( $m_s$ ) = 494.320 kg, su ve cüruf hacimleri oranı ( $v_s$ )/ ( $v_c$ ) = 3,96'dır.

Bu çıkan sonuçlara göre karışım içindeki cüruf konsantrasyonu % 20 olarak alınmıştır.

Karışımın taşınması için seçilmiş olan boru çapı değeri  $\phi_b = 325$  mm'dir. Boru kesit alanı ( $A_b$ ) =  $(\pi \cdot \phi_b^2)/4 = (\pi \cdot 0,325^2)/4 = 0,083$  m<sup>2</sup>'dir. ( $v_k$ ) = ( $Q_k$ ) / ( $A_b$ ) = 600 / 0,083 = 7228,9 m/saat = 2,01 m/s'dir.



Şekil 6.2. Yüksek fırın sıcak cürufunun granüle edilme anı görüntüsü.



Şekil 6.3. Granüle edilmiş yüksek fırın cürufunun cüruf havuzuna basılmasında kullanılan pompalara ait bir görüntü.



Şekil 6.4. Granüle edilmiş yüksek fırın cürufunun cüruf havuzuna basılmasında kullanılan borulara ait bir görüntü.

Şekil 6.5’de cüruf basma hattında kullanılan aşınmış bir boruya ait görüntü fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.5. Aşınmaya maruz kalmış granüle cüruf taşıma hattı borusu görüntüsü.

## 6.1. AŞINDIRICININ HAZIRLANMASI

Partiküllerin belirli büyüklükteki delik veya açıklıktan geçme veya geçememe özelliğine dayanarak yapılan boyutsal sınıflandırma, eleme işlemi olarak adlandırılır. Eleme işlemi, bir malzemenin partikül boyutları ile miktarları arasındaki ilişkiyi saptamak için yapılır. Eleme işleminin malzeme kırılmalık ve ufalanabilirliğini saptamak, kırılmış veya öğütölmüş bir malzemenin ortalama partikül boyutunu bulmak gibi birçok yararı vardır. Eleme işlemi en büyük açıklıklı elekten başlar ve daha düşük açıklıklı eleklerle ardışık olarak devam eder. Eleme işleminde elekler büyüklüklerine göre sınıflandırılırken mesh kavramı kullanılır. Mesh numarası birim alana düşen delik sayısını göstermektedir. Mesh numarasının birçok standardı vardır. Eleme işlemi elle veya makine ile yapılabilir. Elle yapılan elemelerde elekler tek tek kullanılırken makine ile yapılan elemelerde aynı anda birkaç tane kullanılabilir. Eleme işlemi bittikten sonra her bir eleğin üzerinde kalan miktar tartılarak toplam miktara oranı tespit edilir. Eleme süresi tespitinin doğru yapılabilmesi için çok önemlidir. Aşındırıcı olarak kullanılan yüksek fırın cürufu kuru elek yöntemi ile tamamen nemi alındıktan sonra elenmiş ve boyutların yüzdelik dağılımları elde edilmiştir. Çizelge 6.1'de verilen ve ASTM E 11:82 standardına göre laboratuvar ortamında yapılan eleme işlemi ile yüksek fırın granüle cürufunun yaklaşık % 65'lik kısmının boyutunun 300 µm ile 710 µm değerleri aralığında olduğu tespit edilmiştir. Diğer % 35'lik kısım ise 300 µm'den daha küçük ve 710 µm'den daha büyük tane boyutuna sahiptir. Yüksek fırın granüle cürufunun spektral analiz yöntemi ile tespit edilen kimyasal kompozisyonu, Çizelge 6.2'de verilmiştir. Deney sonuçlarında farklılıklar olmaması ve tüm deneylerin aynı şartlarda gerçekleştirilebilmesi için aynı dökümden alınıp muhafaza edilen cüruflar kullanılmıştır.

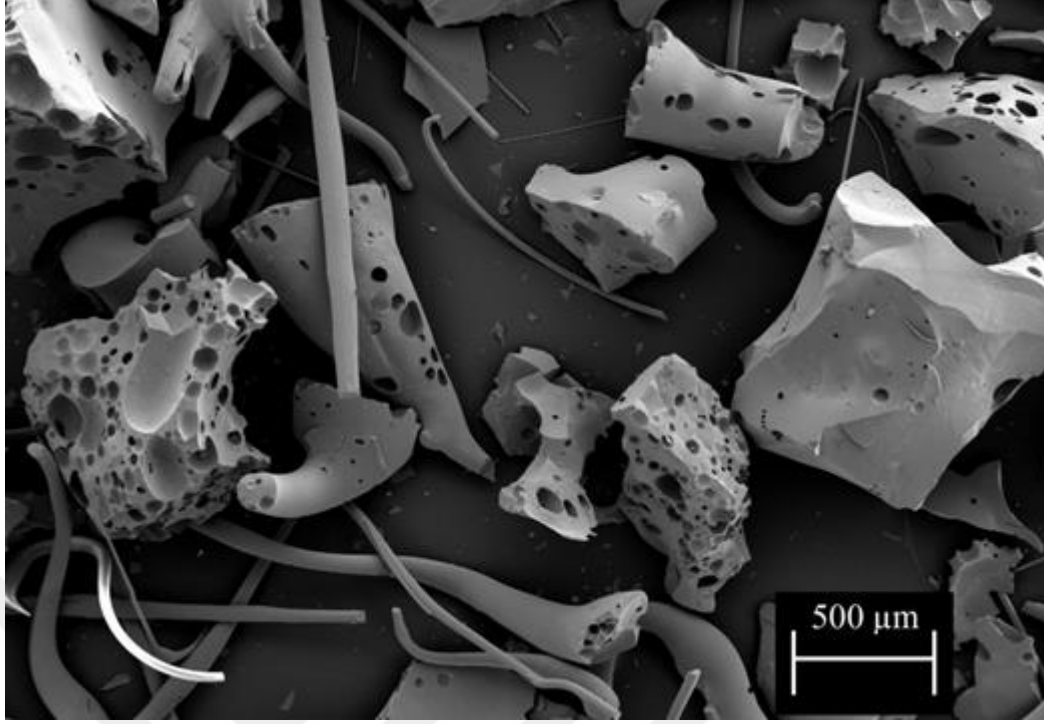
Çizelge 6.1. ASTM E 11:82 standardına uygun yapılan eleme işlemine göre boyutsal dağılım sonuçları.

Elek Mesh No	Elek Açıklığı (µm)	Miktar (%)
No.18	+1000	7,3
No.20	-1000 +850	3,6
No.25	-850 +710	4,2
No.30	-710 +600	9,4
No.35	-600 +500	12,1
No.40	-500 +425	14,1
No.45	-425 +355	18,7
No.50	-355 +300	10,9
No.60	-300 +250	6,4
No.70	-250 +212	1,8
No.80	-212 +180	2,6
No.100	-180 +150	1,7
No.120	-150 +125	2,4
No.140	-125 +106	1,2
No.170	-106 +90	1,4
No.200	-90 +75	1,2
No.230	-75 +63	1

Çizelge 6.2. Yüksek fırın granüle cürufu numunesinin kimyasal kompozisyonu.

Yüksek fırın granüle cürufu numunesi kimyasal kompozisyonu											
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	MnO	S	FeO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Diğer
<b>Miktar (% ağı.)</b>	38,84	39,13	8,91	6,9	2,25	0,71	0,49	1	0,39	1,04	0,34

Şekil 6.6'da eleme işleminden önce alınmış yüksek fırın granüle cürufuna ait SEM görüntüsü verilmiştir.

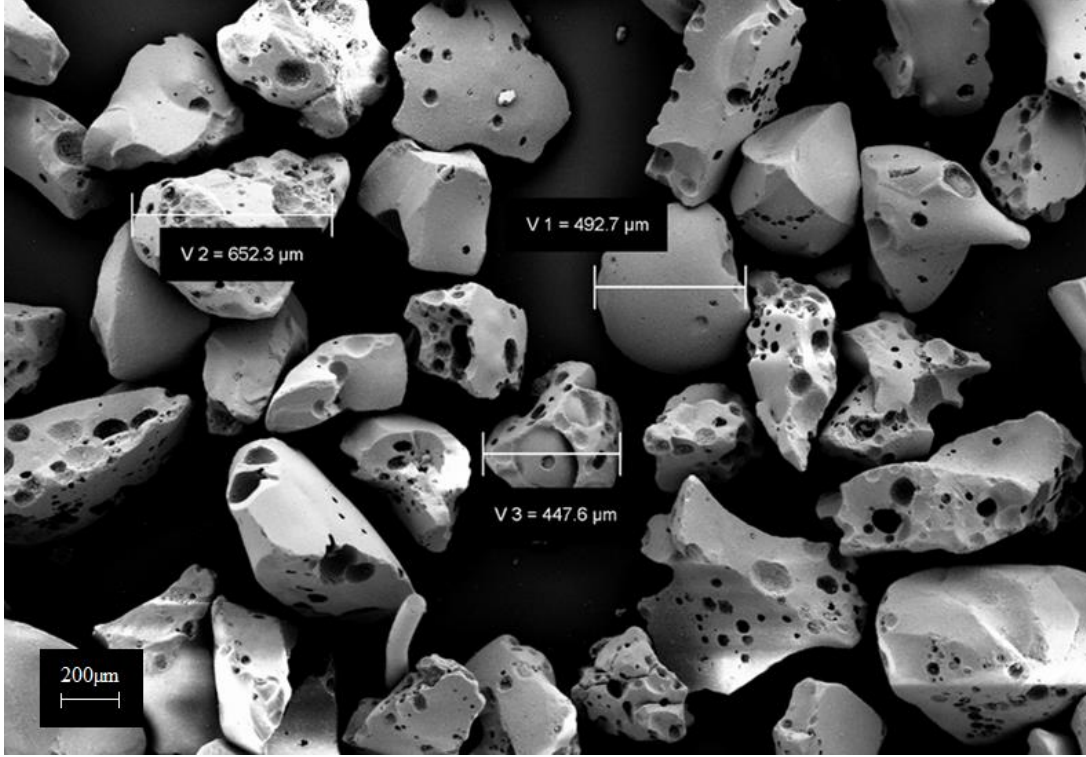


Şekil 6.6. Yüksek fırın granüle cürufuna ait eleme öncesi SEM görüntüsü.

### 6.1.1. Aşındırıcının Elenmesi

Kardemir A.Ş 1 numaralı yüksek fırınından alınan granüle cüruflar öncelikle eleme işlemine tabi tutulmuşlardır. Eleme işlemi, öncelikle 400 mm kasnak çapına ve 710 µm elek aralığına sahip bir elek ile yapılmış ve bu eleğin altında kalan cüruflar alınmıştır. Alınan cüruflar, yine 400 mm kasnak çapına ve 300 µm elek aralığına sahip bir diğer elek kullanılarak elenmiş, bu sefer eleğin üzerinde kalan cüruflar alınmıştır. Bu iki eleme işleminden sonra 505 µm büyüklüğünde yüksek fırın granüle cürufu elde edilmiştir. Elemenin doğru yapılabilmesi amacı ile cüruf numunesi kurutulmuştur ve minimum eleme süresi tespiti yapılmıştır. Kaba elekten elek altı malzeme elde edildikten sonra ikinci eleğin elek üstü malzemesinin elde edilebilmesi için yaklaşık olarak 200 gr malzeme için eleme işlemi 60 saniyenin üzerinde sürmüştür. Cürufun istenilen miktarda ayarlanması için maksimum 5 kg tartma ve 1 gram tartım hassasiyetine sahip olan mutfak terazisi kullanılmıştır. Terazinin hassasiyeti hassas terazide elde edilmiş kalibrasyon ağırlığı ile kontrol edilmiştir.

Eleme işleminden sonraki yüksek fırın granüle cürufunun SEM görüntüsü Şekil 6.7’de verilmiştir. SEM görüntüsünden anlaşılacağı üzere kullanılan aşındırıcı partiküllerin düzensiz şekilli ve mikro boşluklar içeren oksit yapılı partiküller olduğu görülmüştür.



Şekil 6.7. Ortalama 505 µm büyüklüğe sahip elenmiş yüksek fırın granüle cürufuna ait deney öncesi SEM görüntüsü.

## 6.2. MALZEME SEÇİMİ

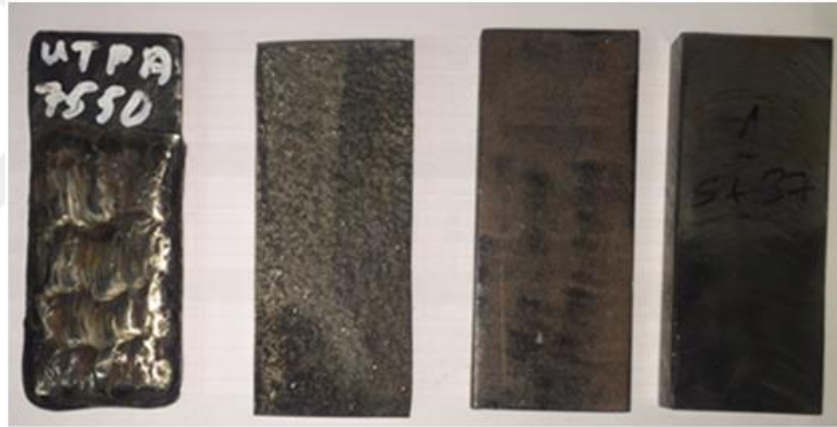
Sade karbonlu çelikler sınıfına giren St 37-2 çeliğinin temel elementleri C yanı sıra Mn elementidir ve empürite olarak P ve S elementlerini de ihtiva eder. Bu çelikler inşaat ve sanayi sektöründe, boru, profil, çubuk yapımı ve sıcak haddelenmiş sanayi profili yapımında kullanılır. Kardemir A.Ş’de granüle cüruf taşıma sisteminde kullanılmakta olan borular St 37-2 karbonlu çelik malzemeden imal edilmiştir, bu sebeple St 37-2 malzeme referans malzeme olarak seçilmiştir ve diğer malzemelerin aşınma performansları hem birbirleri ile hem de St 37-2 malzeme ile kıyaslanmıştır.

Boruların ömürlerinin artırılması maksadı ile malzeme olarak sanayide aşınma direnci istenen uygulamalarda sıklıkla kullanılan Hardox 400, genelde pompa ve vana



parçalarında tercih edilen AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik ve bunların yanında aşağıda kimyasal kompozisyonu verilen ve yaklaşık % 60 oranında  $W_2C$  içeren  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama malzemesi St 37-2'ye alternatif olarak seçilmiştir. Hazırlanan numuneler üzerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik malzeme hariç herhangi bir ısıl işlem uygulanmamıştır.

Kaplama uygulaması, istenilen numune ölçüleri üzerine uygulanamadığı için ilk etapta 100 mm x 40 mm x 10 mm ebatlarında hazırlanmış St 37-2 ana malzeme üzerine 70 mm x 40 mm x 10 mm ölçülerinde kaplanmıştır. Hazırlanmış deney numuneleri Şekil 6.8'de gösterilmiştir. İşlemler tamamlandıktan sonra nihai ölçülere getirme işlemi talaşlı imalat yolu ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.9'da nihai ölçülerine getirilmiş olan numuneler görülmektedir.



$W_2C$ -NiCrBSi      AISI 440 C      HARDOX 400      St 37-2

Şekil 6.8. 100 x 40 x10 mm ebadında hazırlanmış deney numunelerine ait görüntü.



W<sub>2</sub>C-  
NiCrBSi      AISI      HARDOX      St 37-2  
440 C      400

Şekil 6.9. 10 x 6 x 5mm ebadında hazırlanmış numuneler.

Hazırlanan numunelerin yüzeyleri el ile zımparalanarak hazırlanmıştır. Zımparalama işlemi sırasında numunenin zımparanın yüzeyine dengeli bir şekilde basmasına, numunenin zımparaya tek yönlü olarak sürtülmesine ve dolayısı ile çiziklerin tek bir doğrultuda olmasına dikkat edilmiştir.

Seçilen numunelerin yüzey sertlikleri Şekil 6.10'da gösterilen ZHU3000top (10 – 3000 kgf / 98 – 29430 N) cihazı ile numune yüzeylerinden beş farklı noktadan ölçülen değerlerin ortalaması alınarak elde edilmiştir (Çizelge 6.3).

Çizelge 6.3. Deney numunelerinin sertlik ve yüzey pürüzlülük değerleri.

Numune	St 37-2	Hardox 400	W <sub>2</sub> C-NiCrBSi Kaplama	AISI 440 C
Sertlik Değeri [HV-100 kgf]	100	368	349,6	651,2
Ra [ $\mu$ m]	0,087	0,096	0,082	0,053



Şekil 6.10. Deney numunelerinin sertlik ölçümlerinin yapıldığı sertlik ölçüm cihazına ait görüntü.

Tüm numunelerin kimyasal kompozisyonları Şekil 6.11’de gösterilen OES Spektrometer M11 cihazı ile belirlenmiştir.



Şekil 6.11. Deney numunelerinin kimyasal kompozisyonlarının belirlenmesinde kullanılan spektrometre cihazına ait görüntü.

### 6.2.1. St 37-2 Numune Hazırlanma Süreci

St 37-2 numuneler için 10 mm kalınlığında plaka tedarik edilmiştir. Tedarik edilen malzemeden talaşlı imalat yöntemi ile numuneler hazırlanmıştır. Malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 6.4’de verilmiştir.

Çizelge 6.4. St 37-2 malzemenin kimyasal kompozisyonu.

St 37-2 Numune Kimyasal Kompozisyonu													
	C	Mn	Si	S	P	N	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Sn	Al
Miktar (% ağı.)	0,087	0,750	0,185	0,007	0,015	0,007	0,024	0,050	0,031	0,002	0,003	0,004	0,033

### 6.2.2. Hardox 400 Numune Hazırlanma Süreci

Hardox 400 numuneler için 10 mm kalınlığında plaka tedarik edilmiştir. Tedarik edilen malzemeden talaşlı imalat yöntemi ile numuneler hazırlanmıştır. Malzemenin kimyasal kompozisyonu Çizelge 6.5’de verilmiştir.

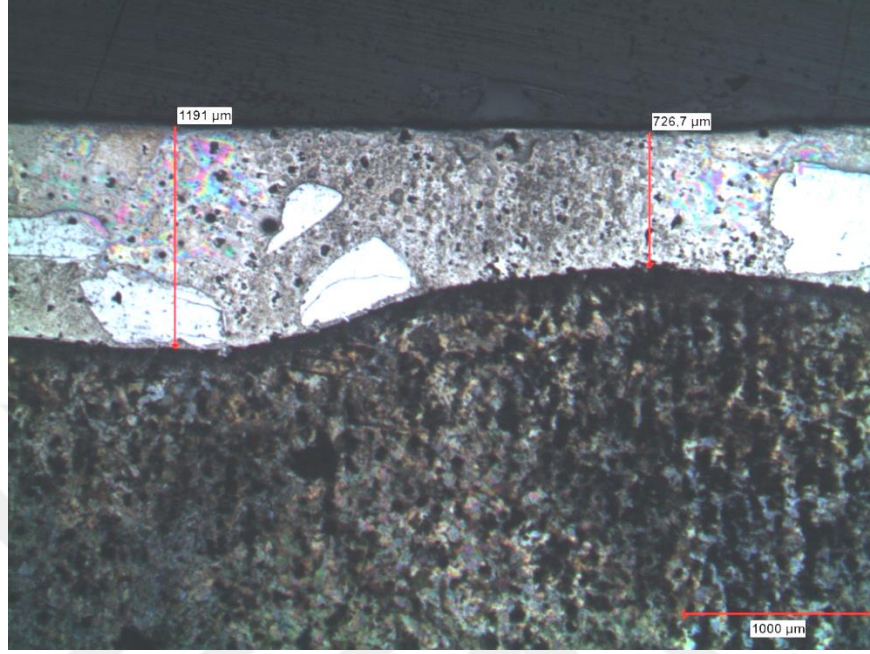
Çizelge 6.5. Hardox 400 malzemenin kimyasal kompozisyonu.

Hardox 400 Numune Kimyasal Kompozisyonu								
	C	Mn	Si	S	Cr	Ni	Cu	Mo
Miktar (% ağı.)	0,244	0,690	0,239	0,003	0,587	0,070	0,034	0,034

### 6.2.3. W<sub>2</sub>C-NiCrBSi Kaplama Numune Hazırlanma Süreci

W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama malzemesi 6 mm çapında tel şeklinde tedarik edilmiş olup ana malzeme 300 °C’de ön tavlansarak TIG yöntemi ile uygulanmıştır. Uygulama sonrası numune kesitinin resmi ve kaplama kalınlığı Şekil 6.12’de görülmektedir. Kaplama malzemesinin kimyasal kompozisyonu Çizelge 6.6’da verilmiştir. Kaplama işlemi sonrası numune hazırlığı talaşlı imalat yöntemi ile yapılmıştır. Normalde kaplama kalınlığı 3 mm civarı iken numune hazırlanması sonrası yer yer 700 µm civarına kadar

düşmüştür.  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama malzemenin katalog sertlik değerleri karbür için 2500 HV ve matris için 55 HRC'dir.



Şekil 6.12. % 2 nital ile dağlanarak NIKON ECLIPSEMA 200 metal mikroskobunda  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama numune görüntüsü.

Çizelge 6.6.  $W_2C$ -NiCrBSi TIG kaplama malzemesinin kimyasal kompozisyonu.

<b><math>W_2C</math>-NiCrBSi Kaplamalı Numune Kimyasal Kompozisyonu</b>		
	$W_2C$	NiCrBSi matris
<b>Miktar (% ağı.)</b>	60	40

#### 6.2.4. AISI 440 C Numune Hazırlanma Süreci

Numunelerin ebatları küçük olduğundan döküm yolu ile imal edilmesi zordur. Bu sebeple ana parça döküldükten sonra numuneler talaşlı imalat yöntemleri ile elde edilmiştir. AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerin üretim süreci aşağıdaki gibidir;

Parçanın model yapımı bittikten sonra kalıptan gelecek rutubet döküm parçanın içine geçip hidrojen kırılma hızına sebep olmaması için kalıp 300 °C kurutulmuştur. Döküm analize yakın hurda ile hazırlanmıştır. Bu işlemi yaparken dökümhane döngü hurdası

kullanılmamış, çelikhane hurdası ile bu işlem yapılmıştır. Hurdalar 400 °C'ye çıkarıldıktan sonra ergitme ocağına şarj edilmiştir. İndüksiyon ocağında hurdalar ergitilmiş ve 1550 °C 'deki sıvı maden dinlendirilmeye alınmıştır. Tam sıvılaşma sıcaklığı 1478 °C olarak tespit edilmiştir. Numune alındıktan sonra gerekli alyaj ilaveleri yapılmıştır. Ocağın sıcaklığı tam sıvılaşma sıcaklığı + 150 °C 'ye yükseltildikten sonra döküm yapılması için önceden ısıtılmış potaya maden alınmıştır. Potada asılı kalan cürufların yüzeye taşınmasının sağlanması amacıyla potanın altından 5 dakika boyunca argon gazı üflenmiştir. Potadaki maden kalıba dökülürken katılaşmanın homojen olabilmesi için içine ince ferro-silis aşısı yapılmış, sıvı maden içinde katılaşma bölgeleri oluşturulmuş ve boşluksuz bir dokum sağlanmıştır. Sıcaklık 400 °C 'ye düştüğünde kalıp bozulmuştur. Kalıbın bozulması için bu sıcaklığın seçilmesinin sebebi yolluk ve besleyicilerin kesilmesi esnasında herhangi bir soğuk çatlak oluşumunun önüne geçilmesidir. Kesimin akabinde parçalar sıcak bir şekilde fırına yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemi sırasında malzemenin ısıl işlem esnasında çarpılmasının engellenmesi amacıyla su terazisiyle altları beslenmiştir.

Yapılan ısıl işlem uygulaması ise şu şekildedir;

400 °C 'ye önceden çıkartılan fırına atılan parçalar 25 °C/saat rampa hızında 960 °C'ye çıkartılmıştır. Bu sıcaklık demir karbon denge diyagramında östenit bölgesindedir ve Ac<sub>3</sub> hattının üstündeki bir sıcaklığa denk gelmektedir. Bu sıcaklık parçanın dökümden gelen yapı bozuklukları ortadan kaldırmaktadır. 10 saat bu sıcaklıkta bekletildikten sonra mekanik mukavemeti yükseltmek için fırın arabası hızlı bir şekilde dışarı çıkartılmış ve fanlarla hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Hızlı soğutma esnasında oluşan iç gerilmelerin ortadan kaldırılması amacıyla ile gerilim giderme işlemi yapılmıştır. Bu işlem infrared sıcaklık ölçüm cihazı kullanılarak parçaların 450 °C'ye düşmesinin takip edilmesi ve bu sıcaklıkta malzemenin fırına tekrar konularak 15 saat bu sıcaklıkta bekletildikten sonra fırında 150 °C'ye kadar soğutulması ile gerçekleştirilmiştir. Parça yüksek alaşım içerdiği için ısıtılmadan fazlalıkları temizlenmiştir. Yukardaki işlemlerden sonra parça herhangi bir çatlak veya iç kusur olup olmadığının kontrolü için manyetik ve ultrasonik kontrollerden geçirilmiştir. Kontrollerde standart dışı bir hataya rastlanmamış ve numuneler talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanmıştır. Malzemeye ait kimyasal kompozisyon Çizelge 6.7'de verilmiştir.

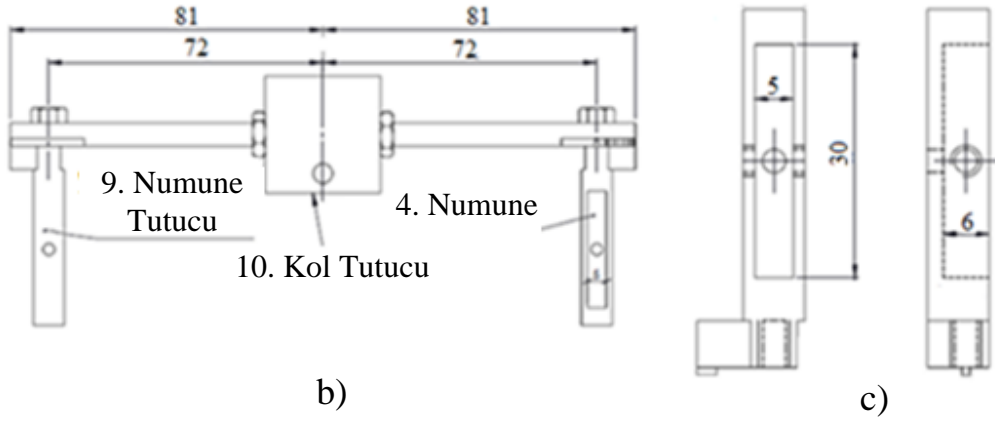
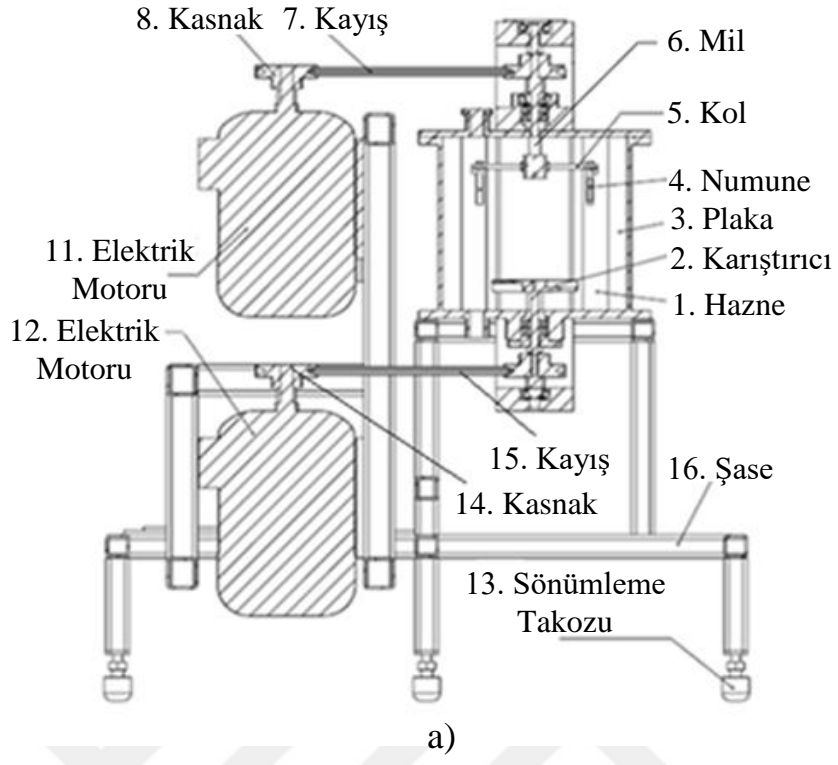
Çizelge 6.7. AISI 440 C malzemenin kimyasal kompozisyonu.

AISI 440 C Numune Kimyasal Kompozisyonu									
	C	Mn	Si	S	Cr	Ni	Cu	Mo	P
Miktar (% ağı.)	0,982	0,700	0,790	0,033	17,091	0,258	0,079	0,0649	0,025

### 6.3. DENEY SİSTEMİNİN TASARIMI

Sulu çamur erozyonu genellikle sıvı ortam içerisinde yer alan katı partiküllerin temas ettikleri yüzeylerden malzeme kaldırması olarak tanımlanmaktadır. Bu ortam sadece sıvı değil herhangi bir gaz akışkan da olabilmektedir. Sulu çamur erozyonuna etki eden parametrelerin optimizasyonunu sağlamak için tasarımı ve imalatı gerçekleştirilen deney düzeneği (Şekil 6.13), More ve arkadaşlarının tasarlamış oldukları deney düzeneği ile aynı prensiptedir [60]. 240 mm iç çap değerine ve 10 lt hacme sahip olan hazne (poz 1) ve bu hazne içerisinde çevresel olarak eşit aralıklarla yerleştirilmiş toplam altı adet plaka (poz 3) mevcuttur. Haznenin alt kısmında dört kanatlı karıştırıcı bir pervane (poz 2) yer almaktadır. Bu karıştırıcı 1.1 kW güce sahip devir ayarlı bir AC motor (poz 12) tarafından kayış kasnak (poz 14-15) mekanizması kullanılarak tahrik edilmektedir. Numuneler (poz 4) numune tutucular (poz 9) yardımı ile sisteme bağlanmaktadır. Numune tutucular ise Şekil 6.13.b'de görüldüğü gibi kollar (poz 5) vasıtası ile kol tutucuya (poz 10), kol tutucu ise bir mile (poz 6) bağlıdır. Bu mil 1.1 kW güce sahip devir ayarlı ikinci bir AC motor (poz 11) ile kayış kasnak mekanizması (poz 7-8) kullanılarak ekseni etrafında döndürülmektedir. Elektrik motorlarına ait sürücü ve elektrik panosu Şekil 6.14'de gösterilmiştir.

Numune tutucuların pozisyonundan dolayı cüruf ile numune teması 90° normal çarpma açısında olmaktadır. Numune tutucular, kollar ve kolların bağlanmış olduğu silindirik kol tutucu uzun ömürlü olmaları amacı ile AISI 316 malzemeden imal edilmişlerdir. Aşınma ölçümlerinde bu numune tutucularda meydana gelen aşınmalar dikkate alınmamış olup ayrıca numune tutucular birden fazla deneyde kullanılmıştır. Numune kollarına bağlı tutucuların dönme yarıçapları 72 mm'dir. Numuneler 30 x 5 x 6 mm ölçülerindedir. Aşınmaya maruz bırakılan yüzey ölçüsü Şekil 6.13.c'de görüldüğü gibi 30 x 5 mm'dir.



Şekil 6.2. Deney düzeneği a) düzenek kesit resmi b) tutucu kollar c) numune tutucu.





Şekil 6.3. Deney düzeneğinde kullanılan elektrik motorlarının sürücü ve elektrik panosu görüntüsü.

Numuneler deneyden önce musluk suyu ile temizlenip saç kurutma makinesi ile kurutulmuş ve 0,1 mg hassasiyete sahip terazi ile tartılmıştır. Aynı temizleme işlemi deneylerden sonra da tekrar edilmiştir. Numunelerin numune tutucu üzerine yerleştirildikten sonra sabitlenmesi daha önce yapılmış olan deneylerin aksine yapıştırma yolu ile değil sabitleme cıvataları yardımı ile yapılmıştır. Yapıştırıcı kullanılmamasından dolayı deneyin akabinde tartım için numunelerin temizlenmesinde herhangi bir kimyasal kullanımına da gerek duyulmamıştır. Deney sisteminin çalışması esnasında oluşacak titreşimlerin düzenek üzerinde meydana getireceği etkileri önlemek için şase altında zeminle temas eden altı adet ayağa plastik takoz monte edilmiştir. Deneylerin süresi, partikül büyüklüklerindeki değişimden ve aşındırıcı yüzeylerinde meydana gelecek kenar yuvarlanmalarından kaynaklı aşındırıcılık etkisinin azalmasını önlemek amacı ile bir saat süre ile kısıtlı tutulmuştur [54]. En doğru sonuçların alınabilmesi için aynı deney beş kez tekrarlanmış ve aşınma değerlerinin ortalaması alınmıştır.

Temas alanı her numune için  $1,5 \text{ cm}^2$  'dir. Her deneyden sonra eski cüruf sistemden tahliye edilmiş ve daha önce hazırlanmış olan yeni cüruf sisteme dahil edilmiştir.

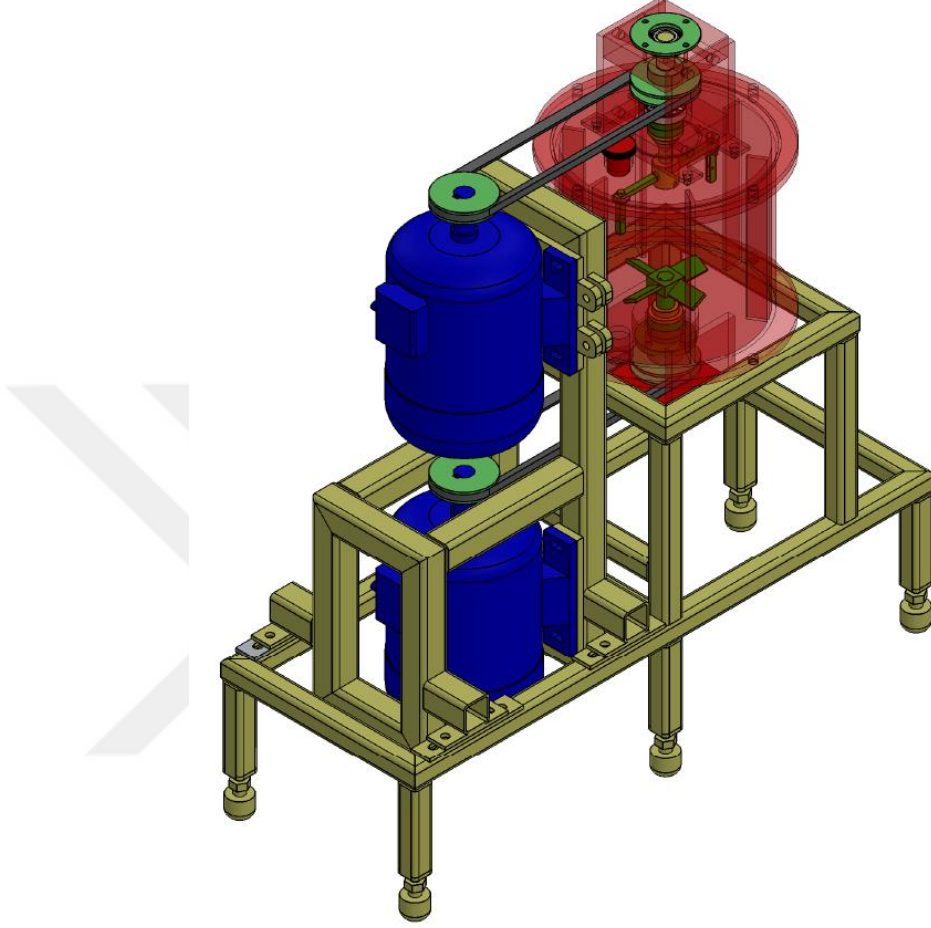
Deneilerin akabinde çıkan cürufun yaklaşık % 60'ının partikül ebadı olarak yine aynı değer aralığında kaldığı geri kalan kısmını ise 300 µm'nin altına düştüğü tespit edilmiştir. Yine her bir deneyden sonra numune tutucuların içinde herhangi bir kalıntı kalmaması için basınçlı su ile iç yüzeyleri temizlenmiştir.

Lindsley ve Marder yapmış oldukları çalışmada partikül çarpma hızını kritik bir deney parametresi olarak ele almış ve farklı hızların hedef malzeme üzerindeki etkilerinin çok kolay ayırt edilebilir olduğunu ve hızın artırılması ile erozif aşınmada artış elde edildiğini belirtmişlerdir [63]. Ayrıca Desale vd. erozif aşınma değeri üzerinde hız ve partikül boyutunun yanında ortam katı konsantrasyonunun da etkili parametre olduğunu fakat hız ve partikül boyutu parametrelerine göre özellikle normal çarpma açısında daha az etkiye sahip olduğu sonucuna varmışlardır [54].

#### **6.4. DENEY PARAMETRELERİ**

Halihazırda yapılmış olan bu çalışmada söz konusu parametrelerin incelenmesi amacı ile 2 değişik hız değeri ve 3 farklı konsantrasyon değerinde sulu çamur hazırlanmıştır. 2 m/s ve 4 m/s partikül çarpma hızı değerlerine karşılık gelen sırası ile 314 d/d ve 628 d/d devir sayısı seçilmiştir. Daha önce Gadhikar vd. yapmış oldukları çalışmada, 20 litrelik bir tank kullanmış ve 300 µm tane boyutu ve % 10 konsantrasyon değeri için 850 d/d karıştırma devrini kullanmışlardır [64]. Fakat yapılan ön deneylerde bu çalışma için cüruf karıştırıcı devir sayısının 600 d/d olması denenmiş ve uygun olduğu kararlaştırılmıştır. Numune dönme yönü ile karıştırıcı dönme yönü farklı istikametlerde olacak şekilde ayarlanmıştır. Cürufun haznenin dibine çökmesini önlemek amacı ile kullanılan karıştırıcı pervane ayrıca karışımın uniform bir yapıya sahip olmasını sağlanmıştır. Ayrıca pervane kanat pozisyonları cüruf hareketlerinin merkezden hazne duvarına doğru oradan da yukarı yönlü hareket edecek şekilde olması için tasarlanmıştır. Deney esnasında hazne duvarlarında yer alan altı adet plaka cüruf partiküllerinin numune dönüş yönünde dairesel hareket yapmalarını önlemiştir. Deneylerde hızın yanında katı konsantrasyonu üç farklı değerde, % 10, % 20 ve % 30 olarak seçilmiştir. Numune bağlama açılarında bir değişikliğe gidilmemiş deneyler sadece normal çarpma açısında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğine ait üç boyutlu

tasarım programında elde edilmiş modele ait görüntü Şekil 6.15’de ve bu tasarıma göre imal edilmiş düzeneğe ait fotoğraf ise Şekil 6.16’da verilmiştir.



Şekil 6.4. Deneý düzeneğine ait üç boyutlu model görüntüsü.



Şekil 6.5. Üç boyutlu tasarıma göre imalatı yapılmış deney düzeneği görüntüsü.

## 6.5. DENEY PROSEDÜRÜ

Numuneler hazırlanırken ilk olarak numuneler üzerindeki koruyucu yağ tabakası yağ sökücü kullanılarak temizlenmiş, ardından numuneler musluk suyu ile yıkanmış, durulanmış ve 2200 W güce sahip saç kurutma makinesi kullanılarak yaklaşık olarak 2 dakika boyunca kurutulmuştur. Tüm numunelerin aşınma yüzeyleri 1000 gritlik silisyum karbür zımpara kâğıdı ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminden sonra tekrar musluk suyu ile yıkanmış, durulanmış ve kurutulmuştur. Kurutmadan sonra numuneler DENSİ marka HZY 320A model  $10^{-4}$  gram hassasiyete sahip hassas terazide tartılmıştır (Şekil 6.17). Hassas terazi titreşim, rüzgar vb. gibi dış etkenlerden etkilenmeyecek bir noktaya yerleştirilmiş ve tartımlardan önce üzerinde yer alan su terazisi ile cihazın terazisi ayarlanmıştır. Cihaz tartımdan yaklaşık 1 saat önce açılmıştır ve bu süreden önce tartım yapılmamıştır. Tartım esnasında değerin doğru okunabilmesi için yine 2 dakika sürenin üzerinde beklenmiş ve okunan değer kayda geçirilmiştir.



Şekil 6.6. DENSI HZY 320A model hassas teraziye ait görüntü.

İlk tartım alındıktan sonra numuneler kollara bağlı olan numune tutucular üzerine setuskur civatası kullanılarak sabitlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda numune ve numune tutucu arasına yapıştırıcı kullanılırken bu çalışmada tercih edilmemiştir. Aşınmaya maruz bırakılacak yüzey numune tutucuların üst yüzeyi ile aynı düzlemde olmasına itina gösterilmiştir. Yapılan her bir deney için numuneler her seferinde yenileri ile değiştirilmiştir ve her defasında yüzey zımparalama işlemi tekrardan uygulanmıştır. İstenilen parametrelere göre tank içerisine elenmiş cüruf orana göre eklenmiş, belirli seviyeye kadar su doldurulmuştur. Numunelerin üzerinde yer aldığı üst kapak hazne üzerine monte edilmiş, kayış bağlantısı yapılmış, kayış gerginliği ayarlanmıştır. Kapak üzerinde yer alan bağlantıdan hazne içerisinde hava kalmayacak şekilde su ilave edilmiş ve kapağı kapatılmıştır. Sürücülü motorların devirleri ki bunlardan alt motorun devri 600 d/d ve üst motorun devri seçilen hız değerine göre değişmektedir, ayarlanmış ve ilk olarak karıştırıcı motoru çalıştırılıp akabinde numune çarkının motoru çalıştırılarak deney başlatılmıştır. Karıştırıcı fanın dönüş yönü numune dönüş yönünün tersi yönde seçilmiştir. Karıştırıcı fanın çalıştırılması ile homojen bir karışım ve tank içi akış formu elde edilmiştir (Şekil 6.18).



Şekil 6.7. Katı partiküllerin tank içindeki akış formuna ait şematik görüntü [65].

Sistemin enerjisini sağlayan priz olarak REV marka dijital süre ayarlı bir priz kullanılmış ve her deney başladıktan sonra bitiş zamanı bir saate göre ayarlanmıştır, süre sonunda enerji otomatik olarak kesilmiştir. Deney bittikten sonra numuneler sistemden çıkartılmış ve yıkama, durulama ve kurutma işlemleri tekrarlanıp tartım gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM 7

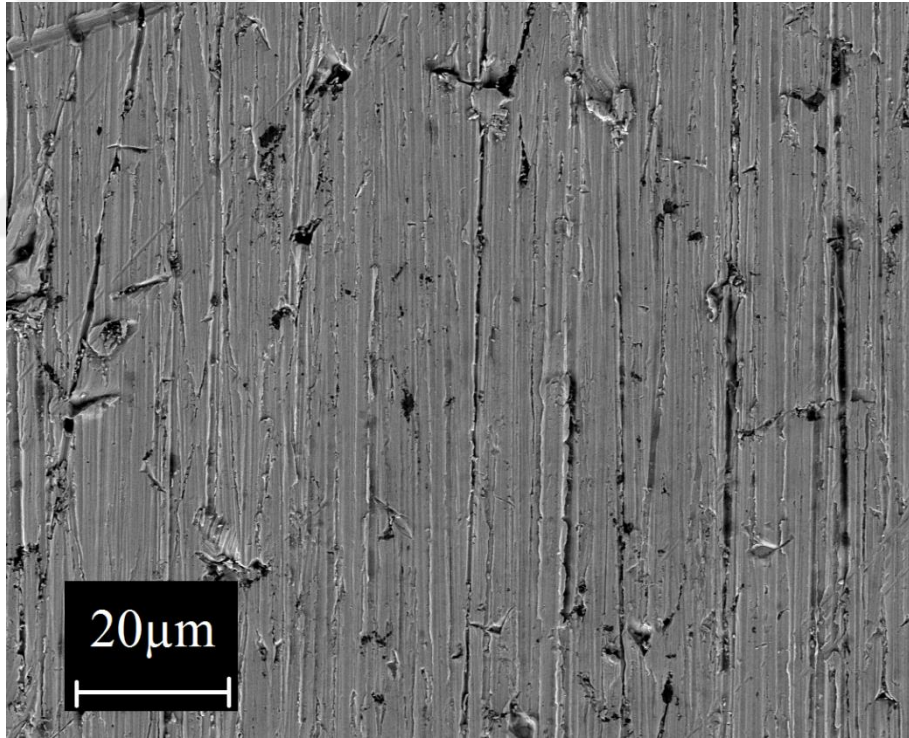
### DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Farklı partikül çarpma hızı ve aşındırıcı konsantrasyon değerlerinde yapılan deneyler sonucunda deney numune malzemelerinin ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Numunelerin farklı yoğunluk değerlerine sahip olmaları sebebiyle sağlıklı bir mukayese yapılabilmesi amacı ile hacimsel kayıplar hesaplanmıştır. Ağırlık kayıplarından hacimsel kayıp hesabına geçilirken her bir numunenin yoğunlukları kullanılmıştır. Yoğunluk belirleme işi su taşıma yöntemi ile yapılmıştır. Kaplama malzemesinde yoğunluk değeri tespiti için örnek numune yaptırılmıştır. Söz konusu numune öncelikli olarak terazide tartılarak ağırlığı bulunmuş, ardından içinde belirli bir miktar su bulunan dereceli silindirin içine yavaşça bırakılmış ve yeni hacmi bulunmuştur. Ağırlık değerinin son hacim ile ilk hacmin farkına bölünmesi ile yoğunluk değerine ulaşılmıştır. Ana malzeme numunelerinde numune yoğunlukları yine aynı yöntemle bulunmuştur. Bu ölçümler sonucunda, yoğunluk değerleri; St 37-2, Hardox 400, AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik ve  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama malzemeleri için sırası ile 7.60, 7.66, 7.8 ve 14.4 mg/mm<sup>3</sup> bulunmuştur. Her bir deney şartı için gerçekleştirilen beş farklı deney kapsamında toplam on adet numunenin aşınma değerlerinin ortalaması alınmış ve bu değerlerle birlikte bunlara ait standart sapma değerleri Çizelge 7.1’de verilmiştir. Malzemelerin erozif aşınma dayanımlarının en yüksekten en düşüğe sırası ile AISI 440 C,  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama malzemesi, Hardox 400 ve referans numunesi şeklinde olduğu sonucuna varılmıştır.

## 7.1. PARTİKÜL ÇARPMA HIZI ve KONSANTRASYON PARAMETRESİNİN AŞINMA YÜZEYLERİ ve MİKTARLARINA ETKİSİ

### 7.1.1. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin St 37-2 Çeliğinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisi

St 37-2 çeliği numune yüzeyleri ortalama tane boyutu 10  $\mu\text{m}$  olan 1000 gritlik silisyum karbür zımpara ile ön hazırlığa tabi tutulmuştur [46, 61, 62, 68, 69]. Tüm deney numunelerinin yüzey pürüzlülüklerinin azaltılması için bu ince zımparalama işlemi uygulanmıştır. Şekil 7.1'de St 37-2 numunesine ait deney öncesi SEM görüntüsü verilmiştir. Zımparalama işlemi sonrasında numune yüzeyi üzerinde işlem uygulama yönünde izler meydana gelmiştir.

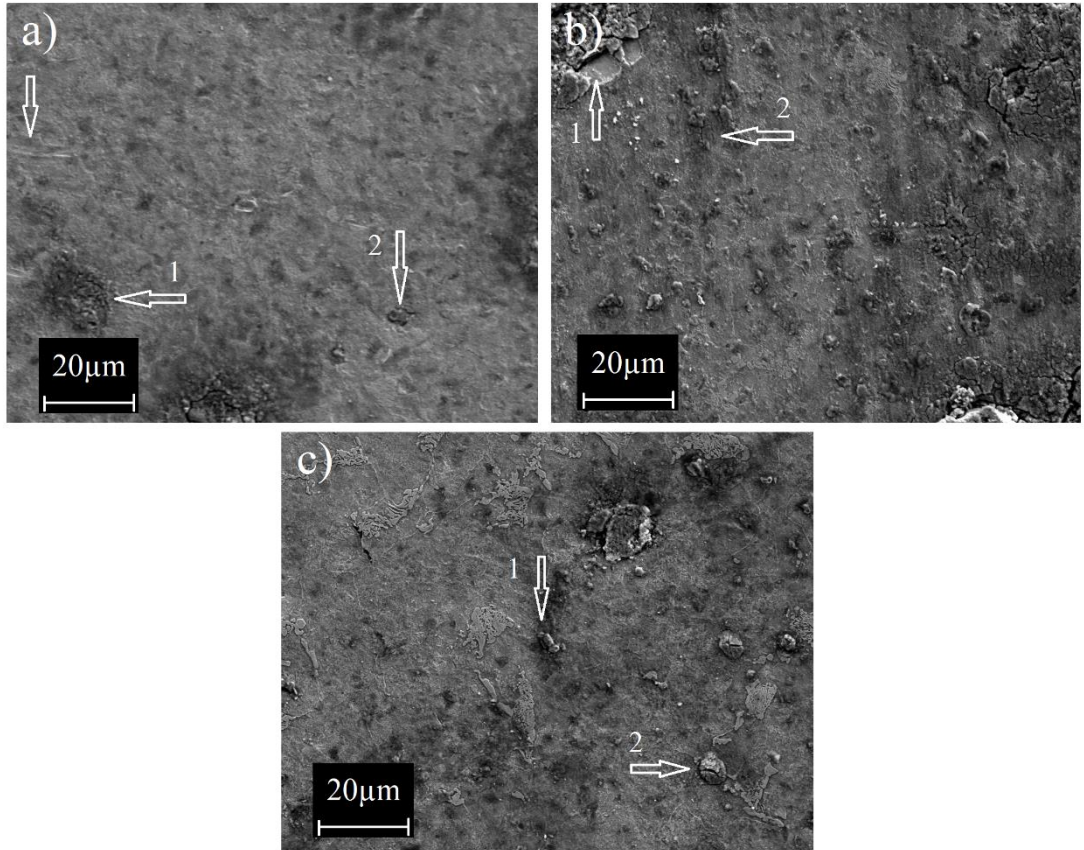


Şekil 7.1. St 37-2 deney numunesinin deney öncesi SEM görüntüsü.

2 m/s partikül çarpma hızı değeri ve sırası ile % 10, % 20 ve % 30 konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri Şekil 7.2'de verilmiştir. 2 m/s partikül çarpma hızı değerindeki numune yüzeylerinde genel görünüm itibari ile aşırı derecede bir deformasyon gözlenmemiştir. Deney numuneleri üzerinde partiküllere rastlanmıştır.



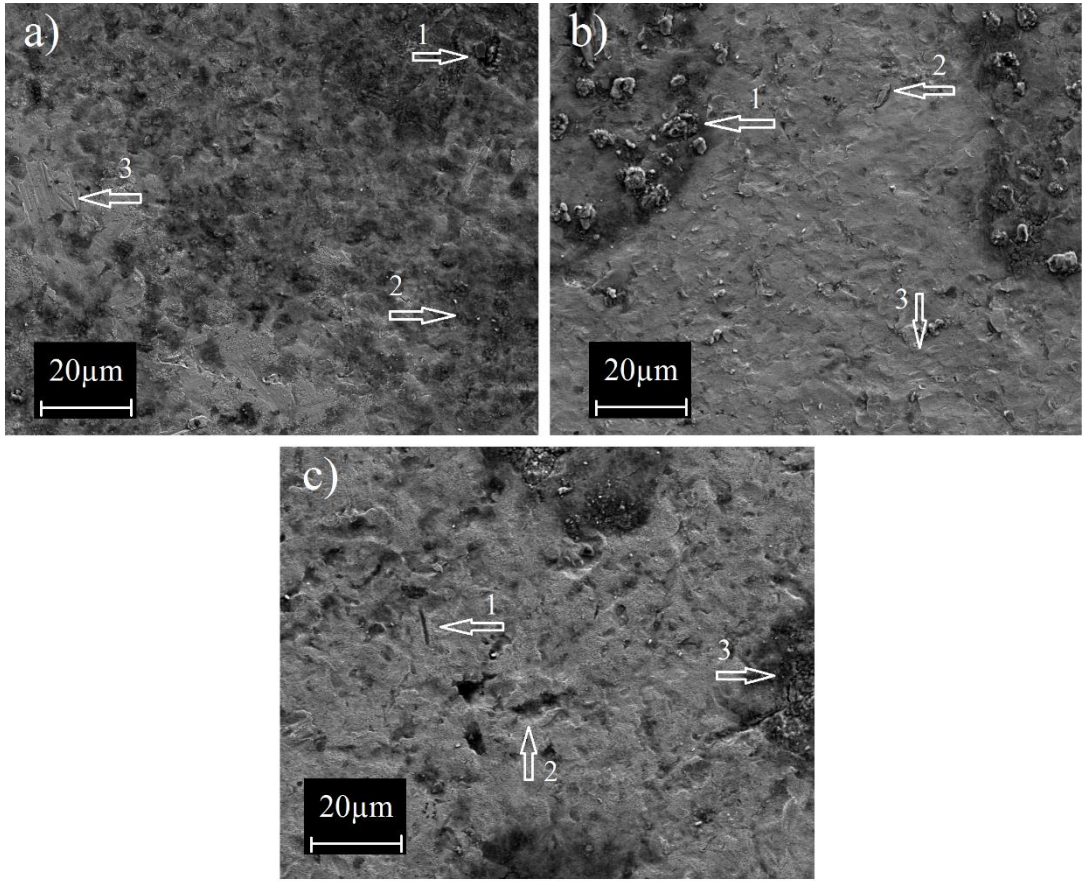
Aşındırıcı partiküller ortalama 505  $\mu\text{m}$  büyüklük değerine sahip olmalarına rağmen yüzeyde gözlemlenen partiküllerin boyutları oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Partiküllerin büyük boyutta olması yüzeye çarpan partiküllerin çarpmanın etkisiyle parçalanarak yüzeyde parçacıklar bıraktığını göstermiştir. Şekil 7.2.a'da 1 ile işaret edilen noktada ise tamamen nüfuz etmiş yüzey çatlaklarına sahip partikül görülmüştür. 2 ile işaret edilen noktada ise yüzeye çarpıp deformasyona sebep olan ve derin bir şekilde nüfuz etmiş aşındırıcı partikül parçasının gömülü bir şekilde kaldığı görülmüştür. Şekil 7.2.b'de 1 ile işaret edilen noktada partikülün yüzeye çarpıp saplandığı ve bir kısmının kırılarak yüzeyden ayrıldığı görülmüştür. 2 ile işaret edilen nokta ve çevresinde yüzeye nüfuz edememiş aşındırıcı partikül parçaları gözlemlenmiştir. Şekil 7.2.c'de yüzeyde meydana gelen deformasyonların yanı sıra 1 ve 2 ile işaret edilen bölgelerde yine gömülü partikül parçaları gözlemlenmiştir.



Şekil 7.2. St 37-2 numunesine ait 2 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 7.3'de St 37-2 numunesi için 4 m/s partikül çarpma hızı değeri ve sırası ile % 10, % 20 ve % 30 konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde

edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.3.a'da 1 ile işaret edilen noktada yüzeyde parçalanmış ve gömülü kalmış aşındırıcı parçacıkları, 2 ile işaret edilen bölgede yüzeye tamamen nüfuz etmemiş ve yüzeyde kalmış aşındırıcı parçacıkları ve 3 ile işaret edilen noktada mikro-pulluklama izleri gözlemlenmiştir. Şekil 7.3.b'de % 10 konsantrasyon değerine oranla yüzeyde daha fazla deformasyon izleri gözlemlenmiştir. 1 ile işaret edilen nokta ve çevresinde yüzeye tam olarak nüfuz etmemiş aşındırıcı parçacıkları, 2 ile işaret edilen noktada yüzeyden katman oluşturmuş fakat yüzeyden kopmamış malzeme, 3 ile işaret edilen nokta ve çevresinde ise mikro-pulluklama izleri gözlemlenmiştir. Şekil 7.3.c'deki görüntüde % 30 konsantrasyonda diğer konsantrasyon değerlerine oranla deformasyonun arttığı 1 ile işaret edilen bölgede mikro-pulluklama, 2 ile işaret edilen bölgede yüzeyden ayrılmış malzeme sebebiyle meydana gelmiş çukur bölge ve 3 ile işaret edilen noktada ise yüzeye gömülmüş partikül gözlemlenmiştir. Yüksek partikül çarpma hızı ve konsantrasyon değerinde yüzeyde meydana gelen deformasyon ve oluşumlar düşük partikül çarpma hızı ve konsantrasyon değerindeki deformasyon ve oluşumlara göre daha fazla olmuştur ve daha kolay gözlemlenebilmiştir.



Şekil 7.3. St 37-2 numunesine ait 4 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerlerindeki yüzey SEM görüntüleri.

Partikül çarpma hızı ve konsantrasyon değerlerine bağlı olarak elde edilen ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 7.1’de verilmiştir. Pürüzlülük değerlerinin özellikle % 20 konsantrasyon değerinde hız değişimine göre değiştiği buna karşın % 10 ve % 30 konsantrasyon değerlerinde birbirine çok yakın olduğu görülmüştür.

Çizelge 7.1. Deney öncesi ve sonrası St 37-2 numunesine ait yüzey pürüzlülük değerleri.

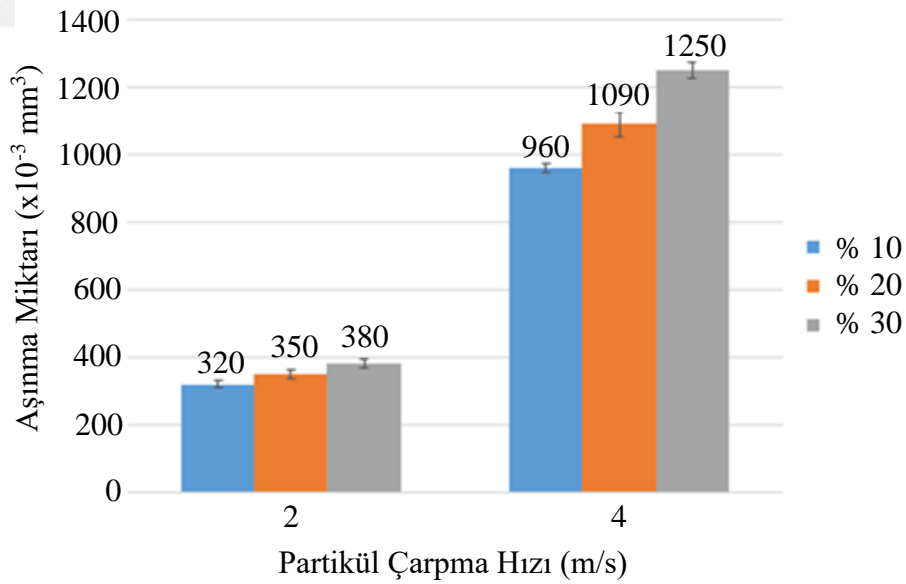
St 37-2		2 m/s			4 m/s		
	Ham Numune	% 10	% 20	% 30	% 10	% 20	% 30
Ra [μm]	0,087	0,159	0,188	0,286	0,160	0,247	0,260

Deneyler neticesinde elde edilen ortalama aşınma miktarları standart sapma değerleri ile birlikte Çizelge 7.2’de verilmiştir. Parametre değişimlerinin aşınma miktarlarını lineer bir şekilde arttırdığı görülmektedir (Şekil 7.4). Partikül çarpma hızının

artmasıyla aşınma miktarında artış olduğu görülmüştür. Konsantrasyon değerinin artması aşınma miktarında artışa sebep olmuş fakat çarpma hızı artışı kadar etkili olmamıştır. Partikül çarpma hızındaki aşınma artış eğimi konsantrasyonun artışı ile oluşan eğimden oldukça fazla olmuştur. Şekil 7.4'deki grafikten de anlaşılacağı gibi konsantrasyon artışı ile elde edilen aşınma miktarı artışları 2 m/s partikül çarpma hızı değeri için sırası ile % 9,4 ile % 8,6 ve 4 m/s partikül çarpma hızı değeri için sırası ile % 13,5 ile % 14,7 olmuştur. Ayrıca partikül çarpma hızı artışından kaynaklı aşınma miktarındaki artışlar ise sırası ile % 200, % 211 ve % 229 olmuştur.

Çizelge 7.2. St 37-2 numunesine ait aşınma ve standart sapma değerleri.

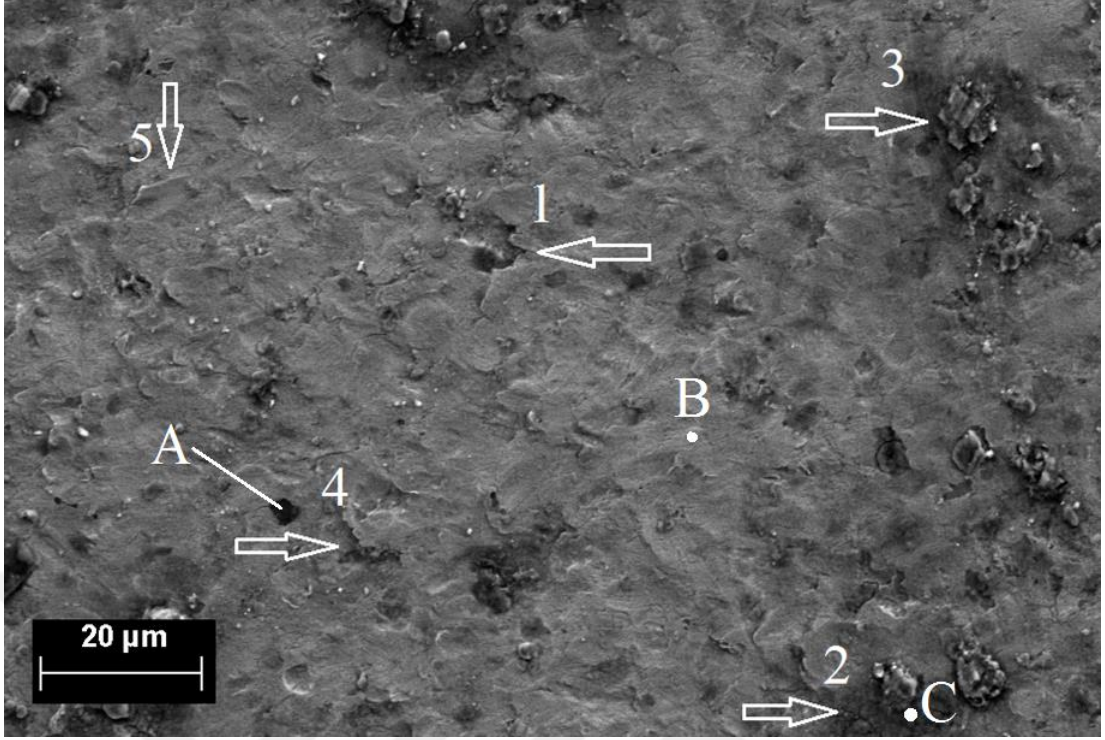
Partikül Çarpma Hızı (m/s)		2			4		
Konsantrasyon (% ağı.)		10	20	30	10	20	30
St 37-2 ( $\times 10^{-3}$ mm <sup>3</sup> )	Aşınma	320	350	380	960	1090	1250
	Standart Sapma	$\pm 11,5$	$\pm 12,7$	$\pm 12,5$	$\pm 13,6$	$\pm 38,3$	$\pm 21,7$



Şekil 7.4. St 37-2 numunesine ait aşınma miktarları grafiği.

Yüksek partikül çarpma hızı değerinde numune yüzeyinde meydana gelen aşınma formları daha belirgin bir şekilde gözlemlenmiştir. Şekil 7.5'de aşınma formları ve oluşumlar gösterilmiştir. Normal çarpma açısında yüzeye temas eden partiküller Bitter

vd.[66] tarafından 1963 yılında yapılmış olan çalışmada belirtildiği gibi deformasyon kaynaklı yüzey aşınmalarına sebep olmuştur. 1 no'lu bölgede aşındırıcı partiküllerin oluşturduğu çukurun etrafında krater oluşumu ve krater çevresindeki çıkıntıların tekrarlı çarpmalardan dolayı deforme olup düzleştiği ve bu sebeple yüzeyden kopmamış farklı bir katman meydana geldiği açıkça gözlemlenmiştir. 2 no'lu bölgede yüzeyde parçalanmış ve gömülü kalmış aşındırıcı partikülleri gözlemlenmiştir. Daha önce de bahsedildiği gibi granüle cüruf amorf ve kırılğan bir yapıya sahiptir ve bu durum partiküllerin çok sayıda keskin köşeye sahip olmasına neden olmaktadır. Bu da özellikle düşük yüzey sertliğine sahip sünek malzemelerde yüzeye partikül saplanmalarını kolaylaştırmaktadır. Ayrıca yine 2 no'lu bölgede yüzeysel çatlaklar gözlemlenmiştir. 3 no'lu bölgede malzemeye tamamen nüfuz etmemiş ve yüzeyde kalmış aşındırıcı parçacıkları gözlemlenmiştir. Aynı duruma numunenin tüm yüzeyinde yer yer rastlanmıştır. 4 no'lu bölgede tekrarlı çarpmalardan dolayı katmanlaşmış fakat yüzeyden ayrılmamış malzeme formu gözlemlenmiştir. 5 no'lu bölgede esasen normal çarpma açısında nadir rastlanan mikro pulluklama şeklinde aşınma gözlemlenmiştir. Bu durum, partikülün yüzeye açısız bir şekilde çarptığını işaret etmektedir. Deney esnasında partiküllerin birbirine çarpması neticesinde açısız hareket etmelerinden dolayı böyle bir durumun ortaya çıktığı söylenebilir. Bu duruma yüzeylerde sık olmamakla birlikte belirli noktalarda rastlanmıştır. A, B ve C noktalarına ait EDX analizi değerleri Çizelge 7.3'de verilmektedir.



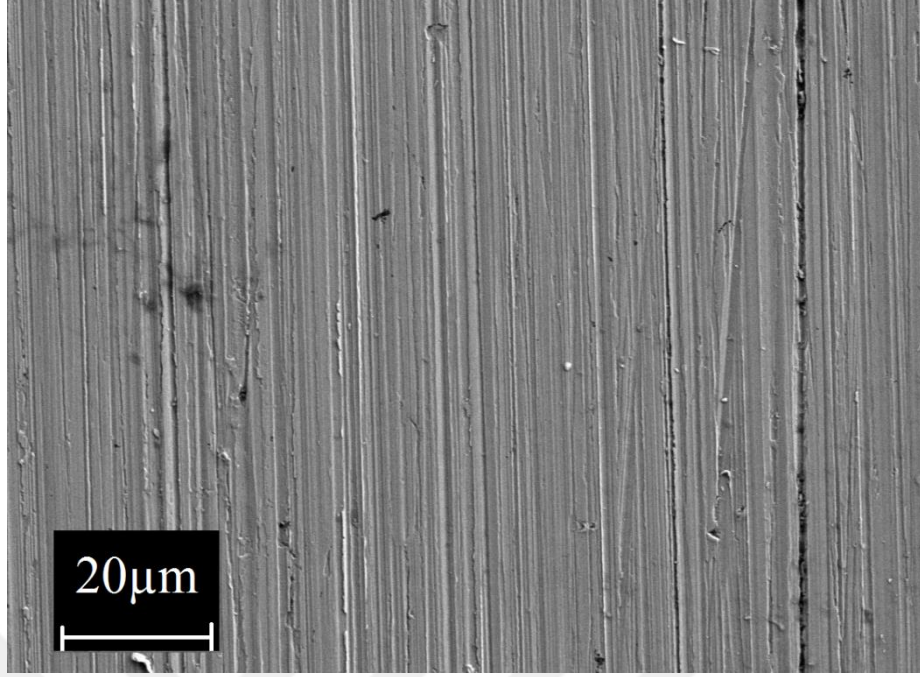
Şekil 7.5. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyonda gerçekleştirilen deney sonrasında St 37-2 numunesi yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü.

Çizelge 7.3. St 37-2 numunesine ait EDX analiz tablosu.

Şekil 7.5'deki konum	% ağı.										
	C	O	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Zn
A	48,19	21,76	0,07	0,049	0,80	1,72	1,31	2,09	0,91	19,98	2,67
B	7,15	8,39	0,22	0,10	0,16	-	-	-	1,42	82,56	-
C	10,90	37,29	0,01	0,44	0,52	-	-	-	-	50,83	-

### 7.1.2. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin Hardox 400 Çeliğinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisi

Şekil 7.6'da Hardox 400 numunesine ait deney öncesi SEM görüntüsü verilmiştir. Numunelerde yüzey hazırlama işlemi yapılmıştır. Ortaya çıkan yüzey formunun St 37-2 numunesinin yüzey formu ile aynı olduğu gözlemlenmiştir. Deney öncesinde elde edilen yüzey pürüzlülük değeri, St 37-2 numunesinin yüzey pürüzlülük değerine çok yakındır (Çizelge 7.4).



Şekil 7.6. Hardox 400 deney numunesinin deney öncesi SEM görüntüsü.

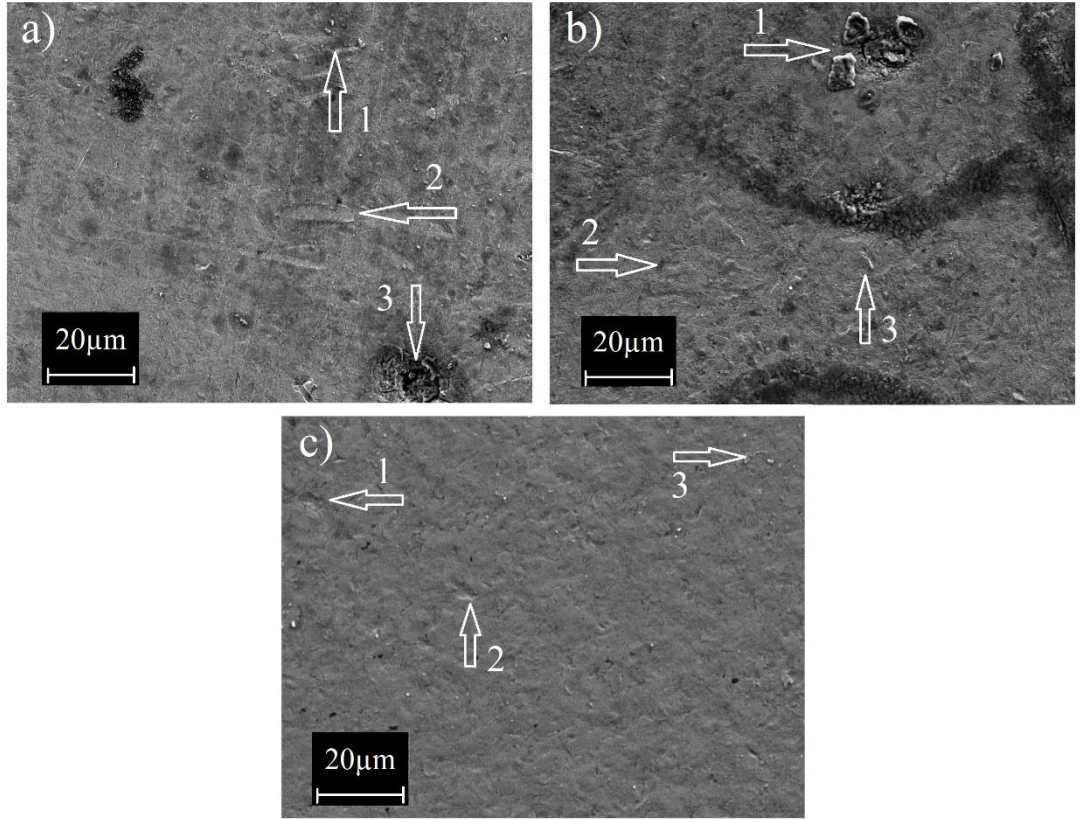
Şekil 7.7’de Hardox 400 numunesi için 2 m/s partikül çarpma hızı ve sırası ile % 10, % 20 ve % 30 konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. 2 m/s partikül çarpma hızı değeri ve % 10 ve % 20 konsantrasyon değerleri için yüzeylerde yer yer zımpara izlerine rastlanmıştır. Ortalama pürüzlülük değerleri hazırlık işlemlerinden sonra ölçülen değerden daha düşüktür (Çizelge 7.4).

Çizelge 7.4. Deney öncesi ve sonrası Hardox 400 numunesine ait yüzey pürüzlülük değerleri.

Hardox 400		2 m/s			4 m/s		
	Ham Numune	% 10	% 20	% 30	% 10	% 20	% 30
Ra [μm]	0,096	0,054	0,068	0,107	0,091	0,137	0,217

Şekil 7.7.a’da 1 ile işaret edilen noktada yüzeye saplanmış fakat tam olarak nüfuz edememiş aşındırıcı partikülleri görülmektedir. 2 ile işaret edilen noktada kesme aşınmasının bir türü olan küreme izi gözlemlenmiştir. 3 ile işaret edilen noktada yüzeye saplanıp derin bir şekilde nüfuz etmiş aşındırıcı partikül gözlemlenmiştir. Şekil 7.7.b’de 1 ile işaret edilen noktada yüzeye nüfuz etmiş partikül çevresinde yer alan ve

yüzeye nüfuz edememiş aşındırıcı partiküller gözlemlenmiştir. 2 ile işaret edilen bölgede meydana gelen deformasyon miktarı yüzeyin diğer bölgelerine göre fazla olmuştur. 3 ile işaret edilen noktada mikro pulluklama izine rastlanmıştır. Şekil 7.7.c’de 1 ve 2 ile işaret edilen bölgelerde diğer bölgelere göre daha fazla deformasyon gözlemlenmiştir. 3 ile işaret edilen bölgede ise yüzeye derinlemesine nüfuz etmemiş aşındırıcı partiküllere rastlanmıştır.

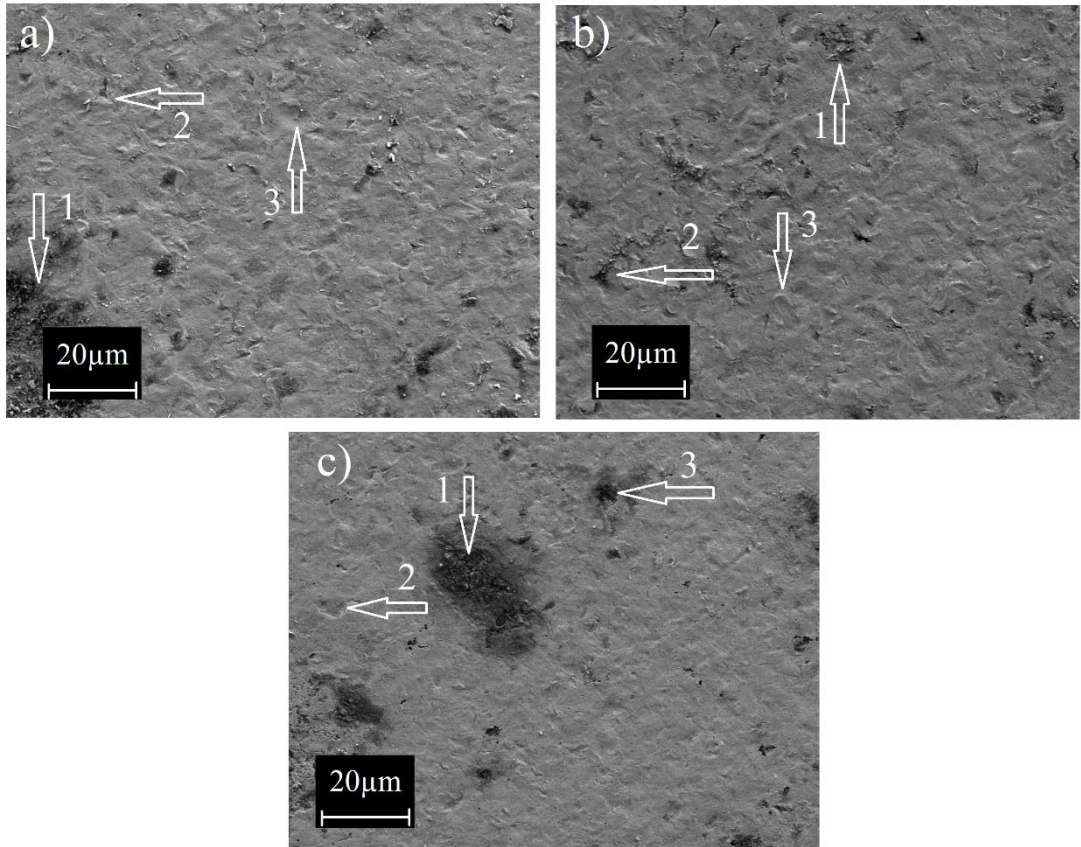


Şekil 7.7. Hardox 400 numunesine ait 2 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerindeki yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 7.8’de Hardox 400 numunesi için 4 m/s partikül çarpma hızı değeri ve sırası ile % 10, % 20 ve % 30 konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. % 30 konsantrasyon değeri ve 4 m/s partikül çarpma hızı değerindeki tüm konsantrasyon değerlerinde bu izlerin tamamen kaybolduğu görülmüştür. Bununla beraber pürüzlülük değerleri artış göstermiştir. Şekil 7.8.a’da 1 ile işaret edilen bölgede yüzeye nüfuz etmiş aşındırıcı partikül, 2 ile işaret edilen noktada tekrarlı çarpmalardan dolayı yüzeyde meydana gelen kraterin etrafındaki çıkıntının deforme olarak katman oluşturduğu görülmüştür.



3 ile işaret edilen noktada derin deformasyon izi oluşumu görülmüştür. Şekil 7.8.b'de 1 ile işaret edilen nokta çevresinde yüzeye tam olarak nüfuz etmemiş aşındırıcı partikül, 2 ile işaret edilen bölgede deformasyon kaynaklı çukur oluşumuna ve 3 ile işaret edilen bölgede mikro-pulluklama izine rastlanmıştır. Şekil 7.8.c'de 1 ile işaret edilen bölgede yüzeye nüfuz etmiş aşındırıcı partikül, 2 ile işaret edilen noktada çukur oluşumu ve 3 ile işaret edilen noktada gömülü partikül varlığı gözlemlenmiştir.

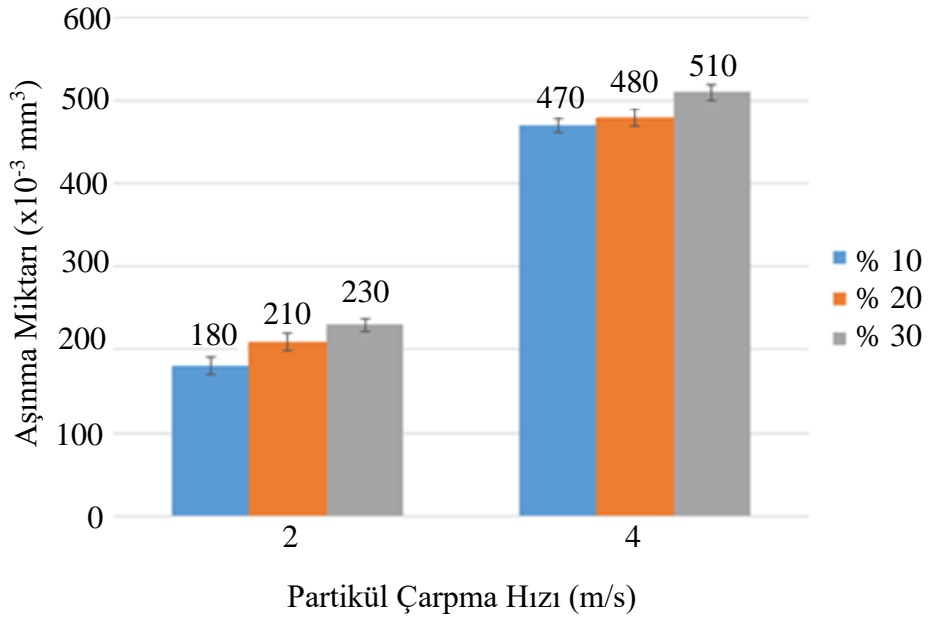


Şekil 7.8. Hardox 400 numunesine ait 4 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerindeki yüzey SEM görüntüleri.

Ortalama aşınma miktarları standart sapma değerleri ile birlikte Çizelge 7.5’de verilmiştir. Partikül çarpma hızı ve konsantrasyon değişimlerinin etkisindeki aşınma miktarlarının St 37-2 numunesinde olduğu gibi yine lineer bir şekilde artırdığı Şekil 7.9’daki grafiğe bakılarak söylenebilir. Esasen deney süresinin bir saatle kısıtlı tutulması ve aşındırıcının düzenli olarak değiştirilmesinin artış değerinin bu şekilde olmasında etkili olduğu düşünülmektedir. Hızın etkisindeki aşınma artışı konsantrasyonun artışı ile oluşan değerden oldukça fazladır. Grafikten görüleceği üzere konsantrasyon artışı ile elde edilen aşınma miktarı artışı 2 m/s partikül çarpma hızı değeri için sırası ile % 16,7 ile % 9,5 ve 4 m/s partikül çarpma hızı değeri için sırası ile % 2,1 ile % 6,25 olmuştur. Ayrıca hız artışından kaynaklı aşınma miktarındaki artışlar sırası ile % 161, % 129 ile % 122 olmuştur.

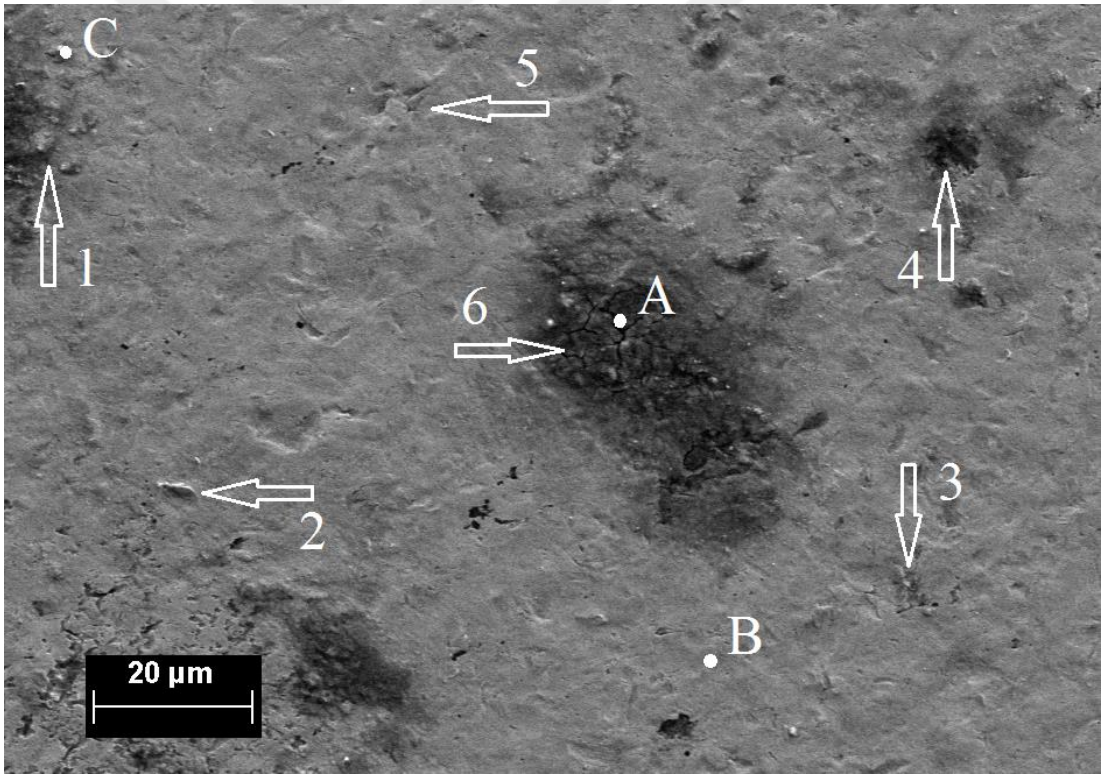
Çizelge 7.5. Hardox 400 numunesine ait aşınma ve standart sapma değerleri.

Partikül Çarpma Hızı (m/s)		2			4		
Konsantrasyon (% ağı.)		10	20	30	10	20	30
Hardox 400 ( $\times 10^{-3} \text{ mm}^3$ )	Aşınma	180	210	230	470	480	510
	Standart Sapma	$\pm 10,7$	$\pm 10,3$	$\pm 7,4$	$\pm 8,8$	$\pm 10,7$	$\pm 9,6$



Şekil 7.9. Hardox 400 numunesine ait aşınma miktarları grafiği.

Şekil 7.10'da 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyonda gerçekleştirilen deney sonrasında Hardox 400 numunesi yüzeyinde meydana gelen aşınma formları ve oluşumlar gösterilmektedir. 1 no'lu bölgede yine St 37-2 numunesinde de gözlenen malzemeye tamamen nüfuz etmemiş ve yüzeyde kalmış aşındırıcı parçacıkları görülmektedir. 2 no'lu bölgede küreme izi görülmektedir. 3 no'lu bölgede yorulma kaynaklı izler oluşmuştur. 4 no'lu bölgede bariz bir çukurlaşma oluşumu ve gömülü partikül durumu söz konusudur. 5 no'lu bölgede küreme kaynaklı yüzeyden malzeme kalkmış fakat ayrılmamış ve akabinde tekrarlı çarpmalar neticesinde katmanlaşma meydana gelmiştir. 6 no'lu bölgede yüzeye nüfuz etmiş gömülü kalmış yüzeysel çatlaklara sahip aşındırıcı parçacıkları görülmektedir. Numune yüzeyi genelinde deformasyonlar net bir şekilde gözlemlenebilmektedir. A, B ve C noktalarına ait EDX analizi değerleri Çizelge 7.6'da verilmektedir.



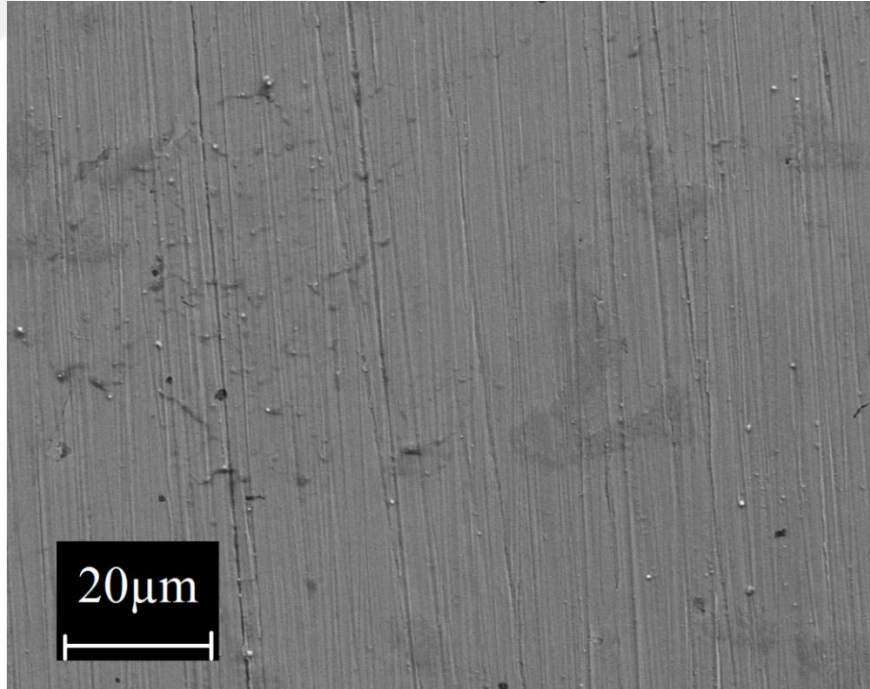
Şekil 7.10. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyonda gerçekleştirilen deney sonrasında Hardox 400 numunesi yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü.

Çizelge 7.6. Hardox 400 numunesine ait EDX analiz tablosu.

Şekil 7.10'daki konum	% ağı.										
	C	O	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Mn	Fe	Zn
A	1,99	4,82	0,04	0,07	0,09	-	-	-	2,45	90,55	-
B	7,22	6,33	0,17	0,48	0,08	-	-	-	1,00	84,72	-
C	51,82	22,08	0,12	0,90	0,58	-	-	-	0,26	24,24	-

### 7.1.3. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin AISI 440 C Martenzitik Paslanmaz Çeliğinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisi

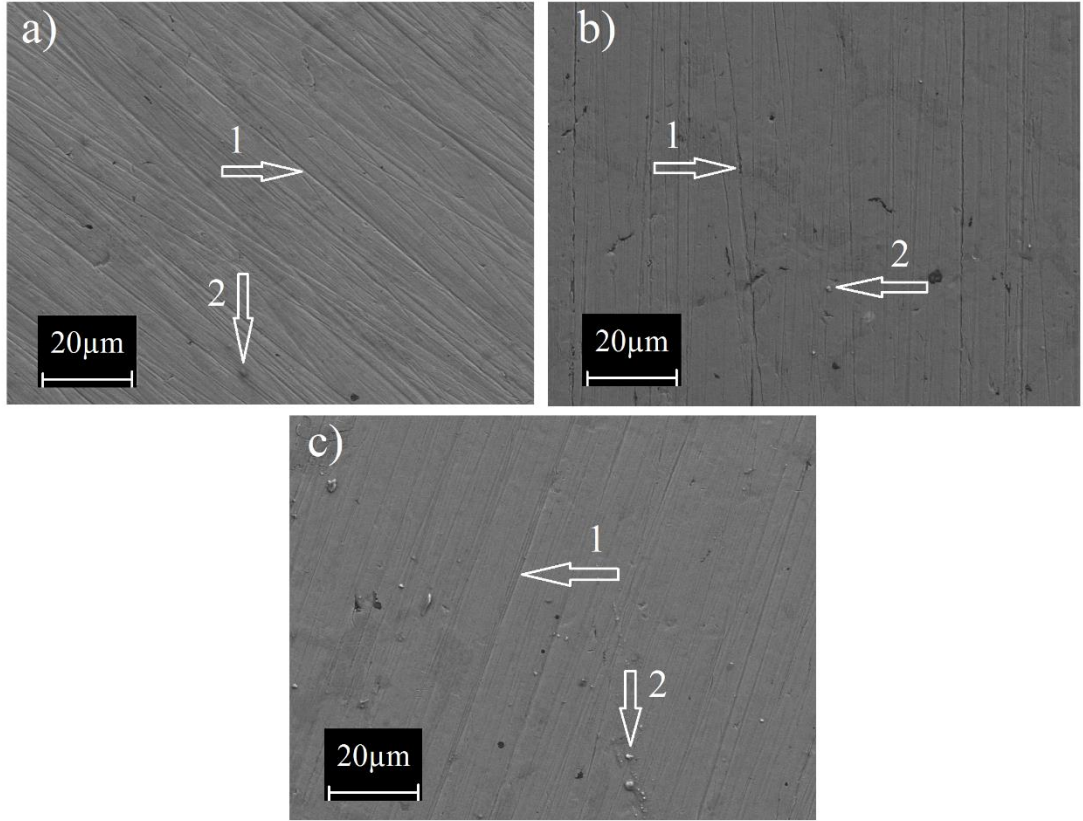
Şekil 7.11'de AISI 440 C numunesine ait deney öncesi SEM görüntüsü verilmiştir. Yüzey zımparalama işleminden sonra elde edilen yüzey görüntüsünden St 37-2 ve Hardox 400 malzemelerine göre AISI 440 C numunesinin yüzeyindeki izlerin daha sık olduğu gözlemlenmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülük değeri; St 37-2 numunesi için 0,087  $\mu\text{m}$  ve Hardox 400 numunesi için 0,096  $\mu\text{m}$  iken AISI 440 C numunesi için 0,052 ölçülmüştür.



Şekil 7.11. AISI 440 C deney numunesinin deney öncesi SEM görüntüsü.

Şekil 7.12'de AISI 440 C numunesi için 2 m/s partikül çarpma hızı değeri ve sırası ile % 10, % 20 ve % 30 konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda

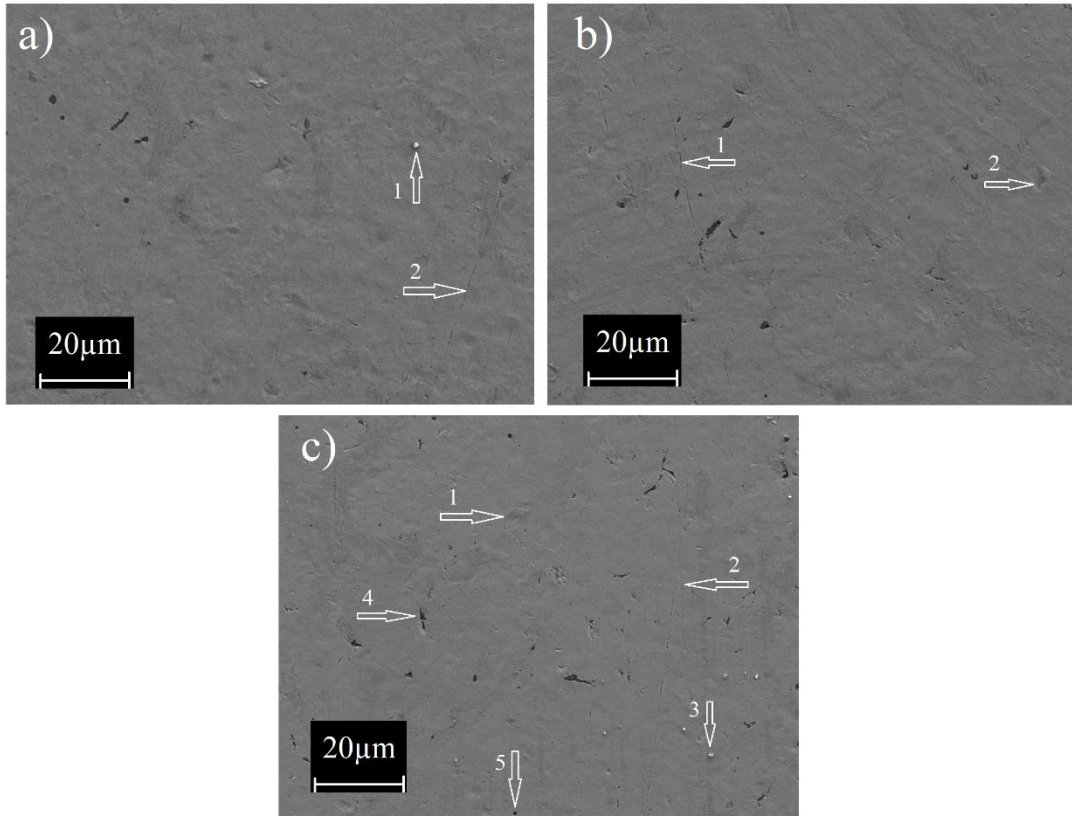
elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.12.a'da 1 ile işaret edilen noktada zımparalama izlerinin kaybolmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 2 ile işaret edilen noktada yüzeye tam olarak nüfuz etmemiş aşındırıcı partikülleri tespit edilmiştir. Şekil 7.12.b'de 1 ile işaret edilen zımparalama izleri mevcut olup yine 2 ile işaret edilen noktada aşındırıcı partikülleri mevcuttur. Şekil 7.12.c'de zımparalama izleri 1 ile işaret edilmiş ve yüzeye tam olarak nüfuz etmemiş aşındırıcı partikül varlığına rastlanmıştır ve görüntü üzerinde 2 ile işaret edilmiştir. Özellikle St 37-2 numunesine göre yüzeyde rastlanan partikül varlığının daha az olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 7.12. AISI 440 C numunesine ait 2 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerindeki yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 7.13'de AISI 440 C numunesi için 4 m/s partikül çarpma hızı değeri ve sırası ile % 10, % 20 ve % 30 konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Yüksek partikül çarpma hızı değerinde gerçekleştirilen deneyler neticesinde elde edilmiş olan yüzey görüntülerinden yüzeydeki zımparalama izlerinin kaybolduğu fakat daha derin olan

izlerin kaybolmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 7.13.a'da 1 ile işaret edilen noktada yüzeyde aşındırıcı partikül varlığına rastlanmıştır. 2 ile işaret edilen bölgede zımparalama işleminden kalan ve aşınma neticesinde hala yüzeyde var olmaya devam eden izler gözlemlenmiştir. Şekil 7.13.b'de 1 ile işaret edilen noktada zımparalama izi, 2 ile işaret edilen noktada ise nadir olarak gözlemlenen küreme aşınması gözlemlenmiştir. Şekil 7.13.c'de 1 ile işaret edilen bölgede lokal olarak deformasyon, 2 ile işaret edilen noktada kaybolmamış zımparalama izleri ve 3 ile işaret edilen noktada aşındırıcı partikül varlığı gözlemlenmiştir. Yüzeyde diğer numunelere oranla deformasyonun, yüksek partikül çarpma hızında ve konsantrasyonda bile daha az olduğu gözlemlenmiştir. Yüzey genelinde 4 ve 5 ile işaret edilen noktalarda zımparalama izlerindeki derin noktalardan kaynaklı boşluklara rastlanmıştır.



Şekil 7.13. AISI 440 C numunesine ait 4 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerindeki yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 7.12 ve 7.13'deki yüzey görüntülerinden zımparalama izlerinin 2 m/s partikül çarpma hızı değerindeki tüm konsantrasyon değerlerinde belirgin bir şekilde durduğu gözlemlenmiştir. Aşınmalardan dolayı yüzey pürüzlülük değerlerinde azalma

gözlemlenmiştir (Çizelge 7.7). 4 m/s partikül çarpma hızı değerindeki yüzey görüntülerinde izlerin büyük oranda kaybolduğu gözlemlenmiştir. Yine de belirli bölgelerde kaybolmadan kalan izlere rastlanmıştır.

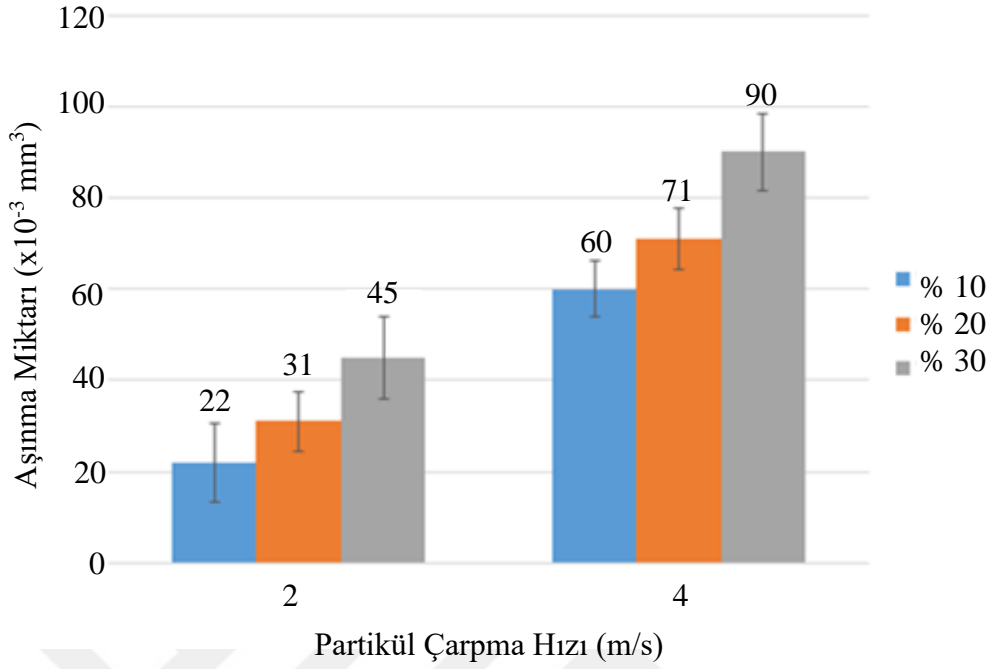
Çizelge 7.7. Deney öncesi ve sonrası AISI 440 C numunesinin yüzey pürüzlülük değerleri.

AISI 440 C		2 m/s			4 m/s		
	Ham Numune	% 10	% 20	% 30	% 10	% 20	% 30
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	0,052	0,026	0,035	0,062	0,047	0,065	0,066

Deneylemlerden elde edilen sonuçlar standart sapma değerleri ile beraber Çizelge 7.8’de verilmiştir. Parametre değişimlerinin aşınma miktarlarındaki değişimi neredeyse lineer bir değişim göstermiştir. Diğer numunelerde olduğu gibi hız yine daha etkili bir parametre olduğu ortaya çıkmıştır. Şekil 7.14’de verilen grafikte görüldüğü üzere aşınma miktarlarındaki artış değerleri 2 m/s partikül çarpma hızı değeri için sırası ile % 40 ile % 45,2 ve 4 m/s partikül çarpma hızı değeri için sırasıyla % 173, % 129 ve % 100 olmuştur.

Çizelge 7.8. AISI 440 C numunesine ait aşınma ve standart sapma değerleri.

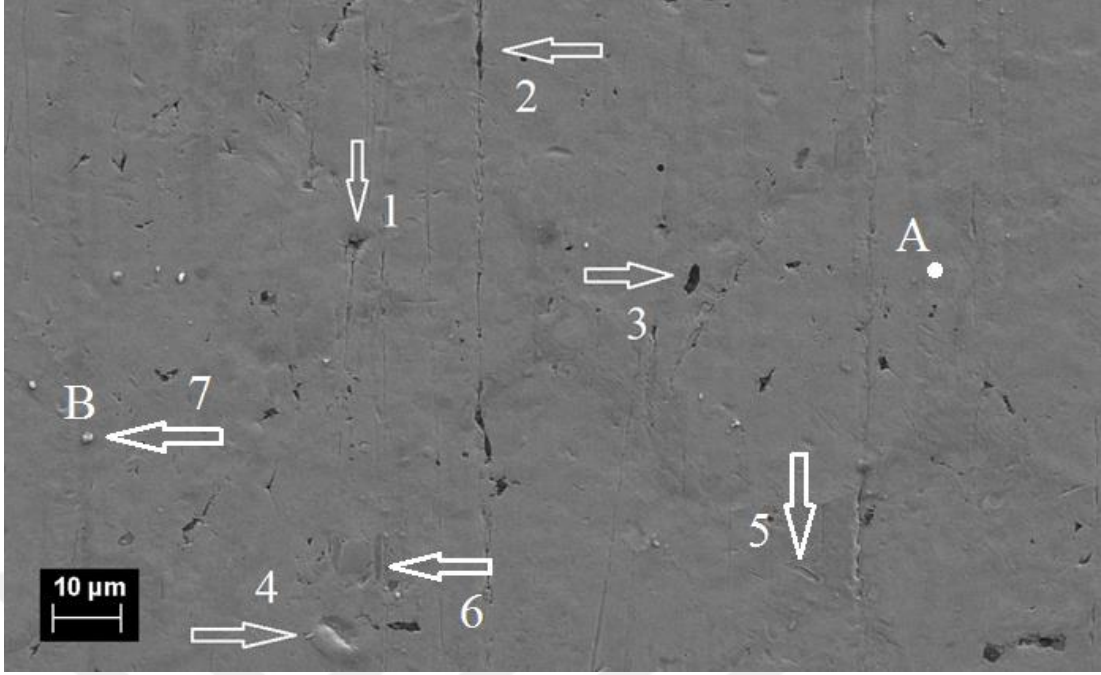
Partikül Çarpma Hızı (m/s)		2			4		
Konsantrasyon (% ağ.)		10	20	30	10	20	30
AISI 440 C ( $\times 10^{-3} \text{ mm}^3$ )	Aşınma	22	31	45	60	71	90
	Standart Sapma	$\pm 8,7$	$\pm 6,6$	$\pm 9,1$	$\pm 6,2$	$\pm 6,8$	$\pm 8,5$



Şekil 7.14. AISI 440 C numunesine ait aşınma miktarları grafiği.

Şekil 7.15’de 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyonda gerçekleştirilen deney sonrasında AISI 440 C numunesi yüzeyinde meydana gelen aşınma formları ve oluşumlar gösterilmiştir. Numune yüzeylerinde ortaya çıkan aşınma formları yüksek partikül çarpma hızı değerlerinde daha belirgin olmuştur. AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik malzemesinin yüzeyinde yüksek partikül çarpma hızı ve konsantrasyon değerinde elde edilmiş SEM görüntüsünden yüzey hazırlama işlemlerinden kalan izlerin derin bölgelerinin kaybolmadığı ve meydana gelen aşınma kaynaklı malzeme kaybının bu bölgesel derin noktaları kaybedecek seviyede olmadığı gözlemlenmiştir. Numune genel görüntüsüne bakıldığında deformasyon kaynaklı şekil değişimlerinin söz konusu olduğu fakat çok belirgin olmadığı görülmüştür. 4 no’lu noktada küreme aşınması formu gözlemlenmiştir. 5 ve 6 no’lu noktalarda normal çarpma açısında nadir karşılaşılan mikro pulluklama aşınma formu gözlemlenmiştir. 7 no’lu bölgede ise numune yüzeyine nüfuz edememiş aşındırıcı partikül parçacıkları gözlemlenmiştir. A ve B noktalarına ait EDX analizi değerleri Çizelge 7.9’da verilmiştir. A noktasına ait değerlerden, söz konusu noktanın ana malzeme olduğu anlaşılmaktadır.





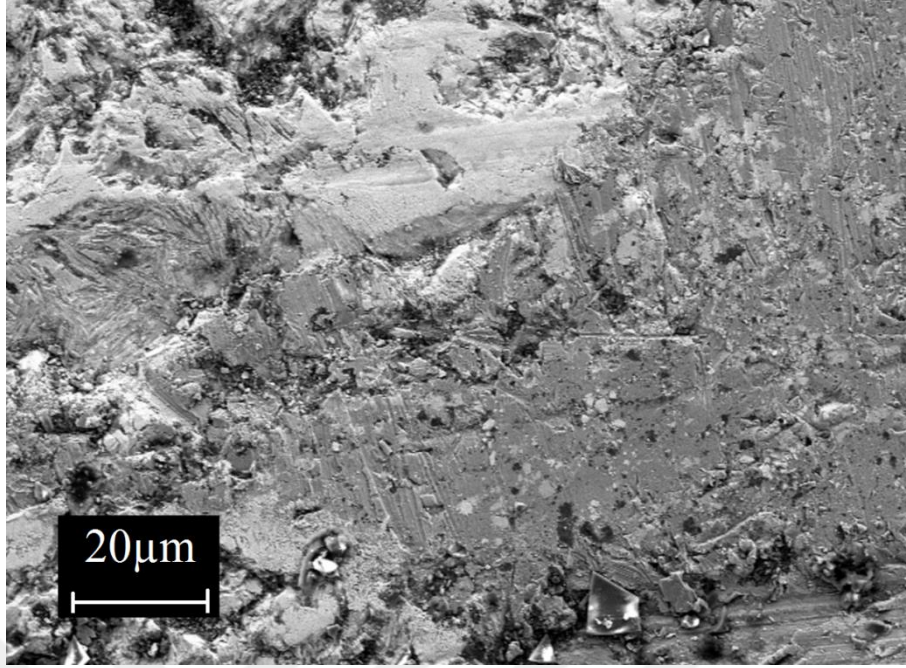
Şekil 7.15. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyonda gerçekleştirilen deney sonrasında AISI 440 C numunesi yüzeyinden alınmış SEM görüntüsü.

Çizelge 7.9. AISI 440 C numunesine ait EDX analiz tablosu.

Şekil 7.15'deki konum	% ağı.										
	C	O	Al	Si	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Fe	P
A	8,71	6,36	0,16	0,57	0,12	16,78	0,35	0,07	0,09	66,77	0,02
B	38,61	12,84	0,24	0,34	0,08	17,54	0,27	0,12	0,05	29,90	0,01

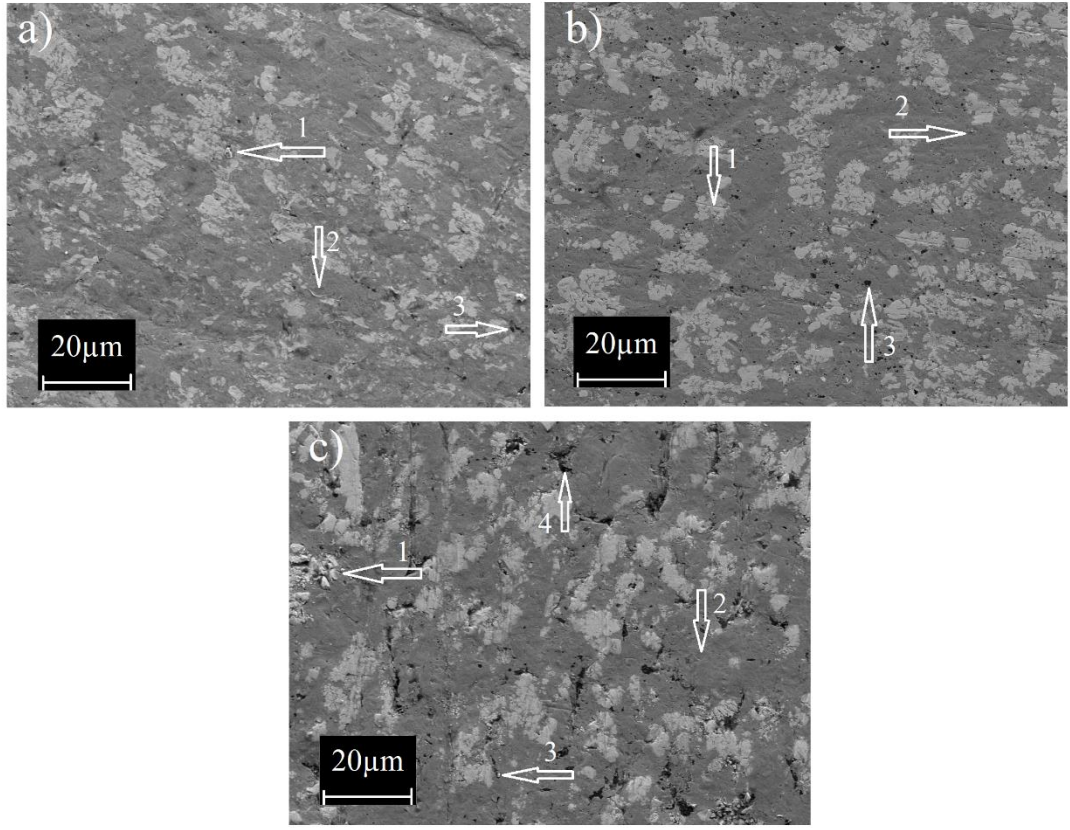
#### 7.1.4. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin W<sub>2</sub>C-NiCrBSi Sert Dolgu Kaplama Malzemesinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisi

Şekil 7.16'da W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunesine ait deney öncesi SEM görüntüsü verilmiştir. Kaplama numunesinde yüzey kaplama işleminden sonra talaşlı imalat yöntemi ile yüzeyden malzeme kaldırılmıştır. Malzemenin aşırı sert olmasından dolayı ( katalog teknik verilerinde matris bölgesinin sertlik değeri 620 HV ve karbür bölgenin sertliği ise 2500 HV olarak verilmiştir) numune yüzeyinde derin çizikler ortaya çıkmıştır. Talaşlı imalat işlemi sonrası yüzeye zımparalama işlemi yapılmıştır. SEM görüntüsünde zımparalama işleminden sonra yüzeyde oluşmuş çizikler gözlemlenmiştir (Şekil 7.16).



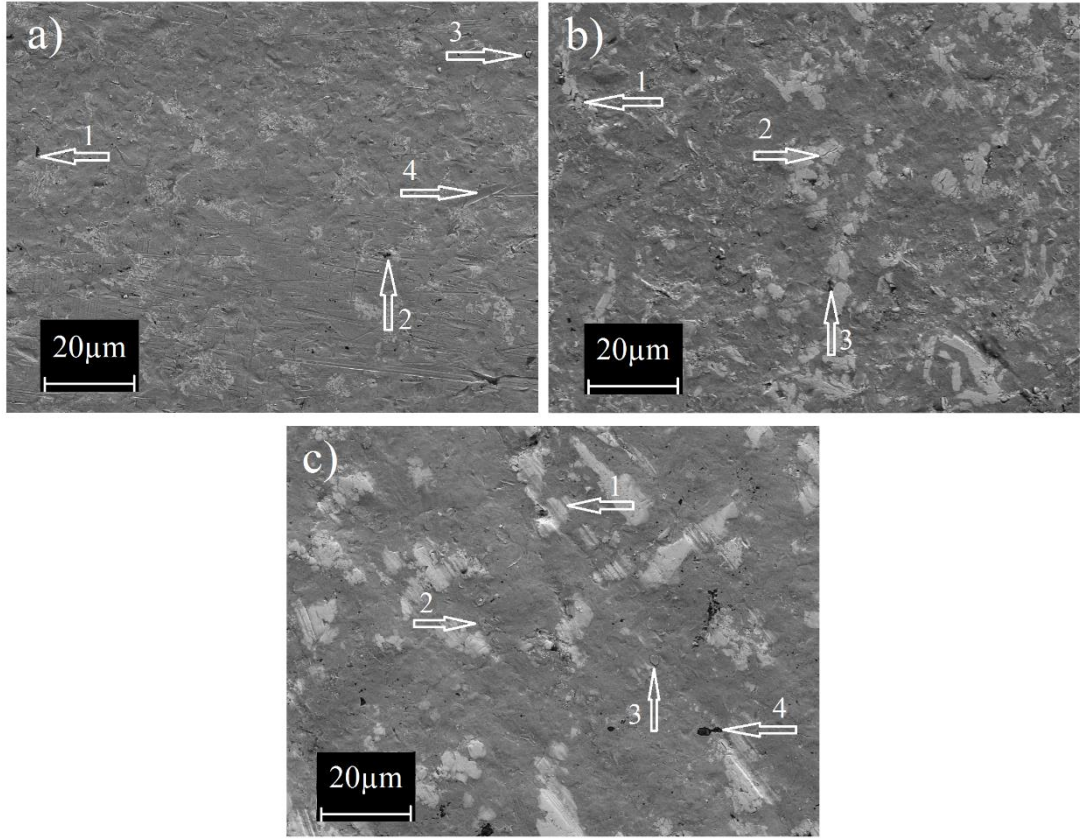
Şekil 7.16.  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama deney numunesinin deney öncesi SEM görüntüsü.

Şekil 7.17’de  $W_2C$ -NiCrBSi kaplama numunesi için 2 m/s partikül çarpma hızı değeri ve sırası ile % 10, % 20 ve % 30 konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.17.a’da 1 ile işaretlenen noktada matris bölgesi üzerinde yüzeye tam olarak nüfuz edememiş gömülü partikül varlığına rastlanmıştır. 2 ile işaret edilen noktada mikro pulluklama ve 3 ile işaret edilen bölgede yine matris bölgesi üzerinde yüzeye nüfuz etmiş gömülü partikül gözlemlenmiştir. Şekil 7.17.b’de 1 ile işaret edilen bölgede zımparalama işleminden kalan izin varlığı görülmektedir. 2 ile işaret edilen noktada yüzeye nüfuz edememiş aşındırıcı partikül ve 3 ile işaret edilen nokta ve çevresinde yüzeye tam olarak nüfuz etmiş partiküller gözlemlenmiştir. Şekil 7.17.c’de 1 ile işaret edilen noktada parçalı karbürler, 2 ile işaret edilen bölgede yüzey deformasyonu, 3 ile işaret edilen bölgede yüzeye tam olarak nüfuz edememiş aşındırıcı partikülleri varlığı ve 4 ile işaret edilen noktada ve yüzeyde çeşitli noktalarda gömülü partiküller gözlemlenmiştir. Ayrıca konsantrasyon artışı ile beraber özellikle matris fazının olduğu bölgelerde deformasyonun arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 7.17.  $W_2C-NiCrBSi$  kaplama numunesine ait 2 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerindeki yüzey SEM görüntüleri.

Şekil 7.18'de  $W_2C-NiCrBSi$  kaplama numunesi için 4 m/s partikül çarpma hızı değeri ve sırası ile % 10, % 20 ve % 30 konsantrasyon değerlerinde gerçekleştirilen deneylerin sonucunda elde edilen numune üst yüzeylerinin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.18.a'da 1 ve 2 ile işaret edilen noktalarda yüzeye nüfuz etmiş aşındırıcı partiküller gözlemlenmiştir. 3 ile işaret edilen noktada yüzeye tam olarak nüfuz edememiş aşındırıcı partikül gözlemlenmiştir. 4 ile işaret edilen noktada sürme izi gözlemlenmiştir. Şekil 7.18.b'de 1 ve 2 ile işaret edilen noktada karbür fazı üzerinde çatlaklar gözlemlenmiştir. Söz konusu çatlakların matris fazı ile karbür fazı sınırında olduğu gözlemlenmiştir. 3 ile işaret edilen noktada iki faz arası sınırdaki yüzeye nüfuz etmiş aşındırıcı partikül gözlemlenmiştir. Şekil 7.18.c'de 1 ile işaret edilen noktada zımparalama işleminden kalan iz gözlemlenmiştir. İzin karbür fazı üzerinde kaybolmazken matris fazı üzerinde tamamen ortadan kalktığı gözlemlenmiştir. 2 ve 3 ile işaret edilen noktalarda matris fazı üzerinde malzeme katmanı oluştuğu fakat yüzeyden kopmamış olduğu gözlemlenmiştir. 4 ile işaret edilen noktada ise yüzeye tamamen nüfuz etmiş aşındırıcı partikül gözlemlenmiştir.



Şekil 7.18. W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunesine ait 4 m/s partikül çarpma hızı ve a) % 10, b) % 20 ve c) % 30 konsantrasyon değerindeki yüzey SEM görüntüleri.

Deneylerden sonra elde edilmiş olan görüntülerde talaşlı imalattan kalan izler gözlemlenmiştir. Kaplama numunesine ait deney öncesi ve deney sonrası ölçülmüş olan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 7.10'da verilmiştir. Çizelgeden görüleceği üzere artan aşındırıcı konsantrasyonu ile birlikte ortalama yüzey pürüzlülük değerleri artış yönünde değişmiştir. W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplamalı numunenin yüzeyinin diğer numune yüzeylerine göre pürüzlülük değerindeki yükseklik W<sub>2</sub>C içeren bölgeler ile matris bölgelerinin aşınma değerlerinin farklı olmasından kaynaklanmıştır. Daha fazla malzeme kaybı olan yüzeyler daha düşük sertlik değerine sahip matris bölgeleridir.

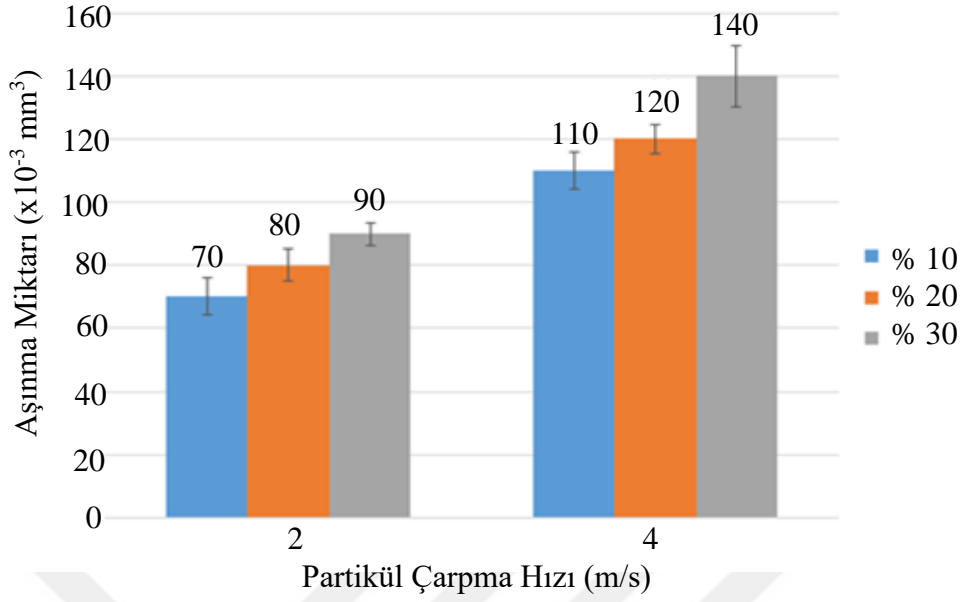
Çizelge 7.10. Deney öncesi ve sonrası W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunesine ait yüzey pürüzlülük değerleri.

W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama		2 m/s			4 m/s		
	Ham Numune	% 10	% 20	% 30	% 10	% 20	% 30
Ra [µm]	0,082	0,116	0,255	0,330	0,233	0,249	0,385

Yapılan deneyler neticesinde ortaya çıkan aşınma değerleri standart sapma değerleri ile beraber Çizelge 7.11’de verilmiştir. Tüm numunelerde olduğu gibi kaplama numunesinde de aşınma artışlarında bir lineerlik söz konusu olmuştur. Şekil 7.19’daki grafikten görüleceği üzere aşınma miktarlarındaki artış 2 m/s partikül çarpma hızı değeri için sırası ile % 14,3 ile % 12,5 ve 4 m/s partikül çarpma hızı değeri için sırası ile % 9,1 ile % 16,7 olmuştur. Hız artışından kaynaklı aşınma miktarı artışları ise sırası ile % 57,1, % 50 ve % 55,6 olmuştur. Hız parametresinin değişimi ile ortaya çıkan etkinin diğer numunelerinkine göre az olduğu sonucuna varılmıştır.

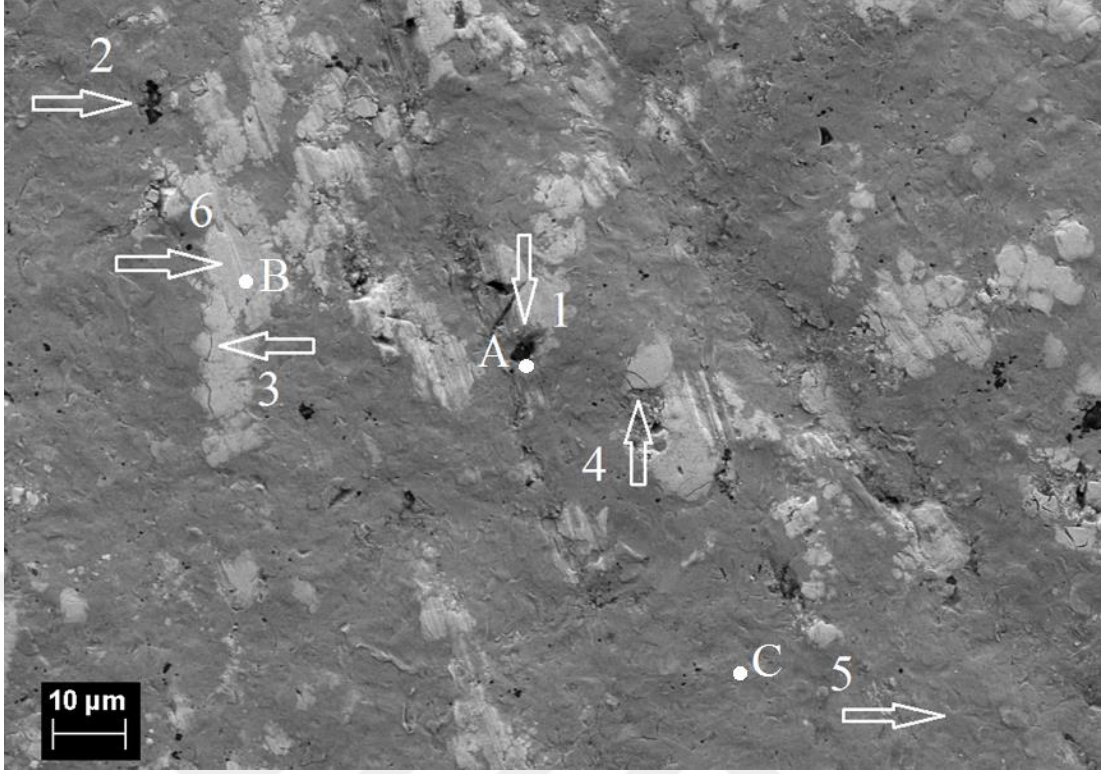
Çizelge 7.11. W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunesine ait aşınma ve standart sapma değerleri.

Partikül Çarpma Hızı (m/s)		2			4		
Konsantrasyon (% ağı.)		10	20	30	10	20	30
W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplanmış St 37-2 (x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> )	Aşınma	70	80	90	110	120	140
	Standart Sapma	±5,8	±5,1	±3,6	±5,7	±4,6	±3,6



Şekil 7.19. W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunesine ait aşınma miktarları grafiği.

Kaplamalı numunede yüzey Şekil 7.19'daki SEM görüntüsünden görüldüğü üzere diğer malzemelerde olduğu gibi uniform bir yapıya sahip olmadığı anlaşılmıştır. Şekil 7.20'de 5 ile belirtilen koyu renkli bölgeler matris bölgeleridir. 6 no'lu açık renkli bölgeler ise Tungsten Karbür olan sert bölgelerdir. Kaplama numunesinde gömülü partiküllere hemen hemen her hız ve konsantrasyon değerinde rastlanmıştır. Gömülü partiküllerin varlığı kaplama yapılmış numunede özellikle karbür fazının bulunmadığı ve diğer yüzey bölgelerine göre daha az sert bölgelerde gözlemlenmiştir. Şekil 7.20'de 1 ve 2 no'lu bölgeler buna örnek olarak gösterilmiştir. 3 ve 4 no'lu bölgelerde partikül çarpmalarından dolayı sert-yumuşak bölge geçiş noktalarında, özellikle sert bölgeler üzerinde mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. Ayrıca yüzeyde yüksek partikül çarpma hızı ve konsantrasyon nedeniyle tüm yüzeye dağılmış plastik deformasyon izleri gözlemlenmiştir. Bunların yanında yüzeyde normal çarpma açılarında sıklıkla rastlanan malzeme ekstrüzyonları [67] da gözlemlenmiştir (5 no'lu bölge).



Şekil 7.20.  $W_2C$ -NiCrBSi kaplamalı numunenin 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyon değerinde alınmış SEM görüntüsü.

Şekil 7.20’de A ile belirtilmiş gömülü partiküle, açık renkli bölge üzerinde bulunan B ile belirtilmiş noktaya ait ve C ile belirtilmiş koyu renkli bölge üzerinde yer alan noktaya ait EDX analizinden elde edilen elementlerin yüzdelik dağılımlarını gösteren tablo Çizelge 7.12’de verilmiştir. EDX tablosundan anlaşılacağı üzere B noktasındaki tungsten elementi yüzdesinin yüksek olması o bölgede  $W_2C$ ’nin varlığına işaret etmektedir. C noktasına ait değerlerin içinde özellikle nikel elementi miktarı bölgenin matris fazı olduğunu göstermiştir. A noktasındaki alüminyum elementinin varlığı ve miktarı gömülü partikülün cüruf içeriğinde olan alümina olabileceğini işaret etmektedir.

Çizelge 7.12. Şekil 7.20'deki seçilmiş noktalara ait EDX analiz tablosu.

Şekil 7.20'deki konum	% ağı.										
	C	N	O	Al	Si	S	Cr	Mn	Fe	Ni	W
A	15,78	1,42	43,78	34,44	0,59	0,06	0,00	0,20	2,94	0,46	0,32
B	14,94	0,40	0,70	0,12	2,18	0,00	8,83	1,55	13,56	18,03	36,69
C	11,47	0,81	0,27	0,09	0,00	0,03	4,49	0,84	39,04	39,71	3,26

### 7.1.5. Partikül Çarpma Hızı ve Konsantrasyon Parametresinin Tüm Numuneler Üzerinde Aşınma Yüzeyi ve Miktarlarına Etkisinin Genel Değerlendirmesi

Artan aşındırıcı konsantrasyonu ile malzeme kayıpları lineer şekilde artış göstermiştir. Ayrıca her iki hızda da en az malzeme kaybını AISI 440 C martenzitik paslanmaz çeliği malzemesinde elde edilmiştir.  $W_2C$  partikülleri içeren kaplamada ölçülen sertlik değerinin Hardox 400 malzemedен daha düşük olduğu Bölüm 6'da verilmiş olan Çizelge 6.3'de açıkça görülmektedir. Kaynakla kaplama yöntemlerinde kaplamalar poroziteler barındırabilmektedir [68]. Bu tip mikro yapıya sahip bir kaplamadan alınan sertlik değerleri  $W_2C$  partiküllerinin sertliğini değil kaplamanın genel olarak sertliğini vermektedir. Her ne kadar düşük sertlik değerleri ölçülmüş olsa bile, aşınma deneyleri sırasında kaplama bünyesinde bulunan nispeten daha az sert bölgelerin (matris) ilk olarak aşınmaya maruz kalması sert partiküllerin açığa çıkmasına neden olmaktadır. Böylelikle yüzeyde bulunan sert fazlar aşınma direncini artırmıştır.

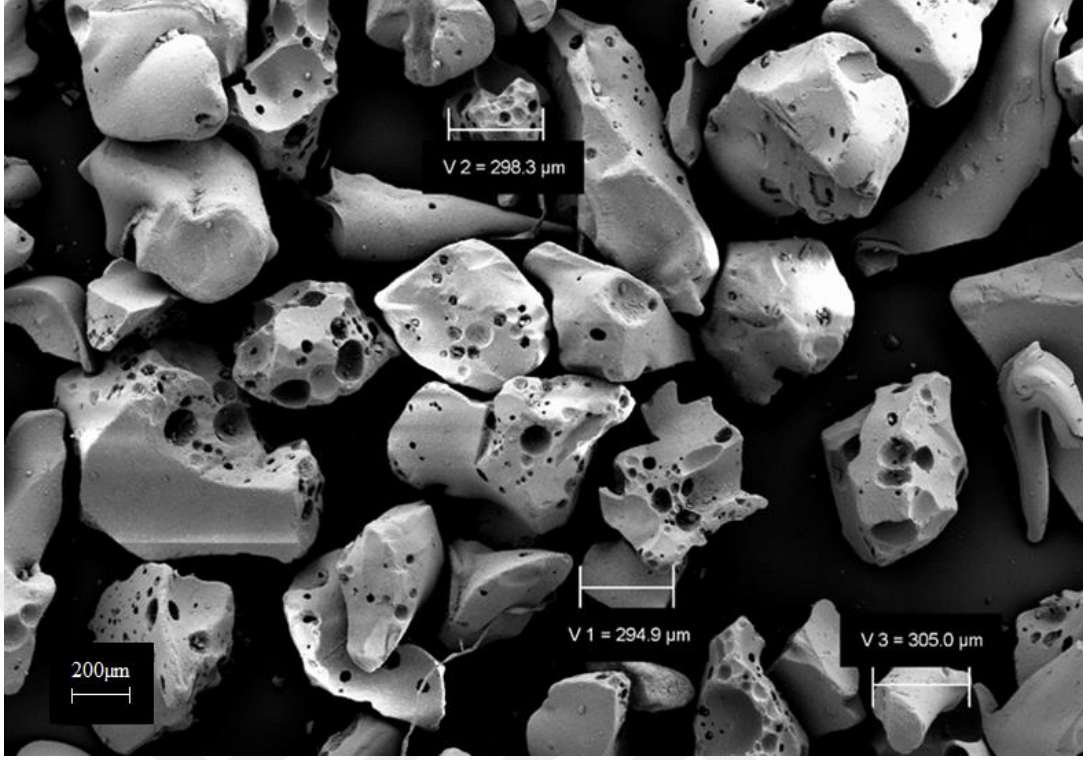
4 m/s partikül çarpma hızında gerçekleştirilen deney sonuçlarında St 37-2 esaslı numunenin malzeme kaybı diğer malzemelere göre daha yüksek olmuştur. Partikül çarpma hızının aşınma kaybına etkisi partikül konsantrasyonunun etkisinden daha fazla olduğu sonucu ortaya çıkmıştır. Benzer sonuçlar Patil vd. [69] tarafından 2011 yılında yapılan çalışmalarda da gözlenmekle beraber yaptıkları çalışmada silika kumunu aşındırıcı olarak kullanmış ve Alüminyum altlık malzemesini incelemişlerdir. Aşındırıcı hızının, kendi sistemlerinde de etkin bir rol aldığı sonucunu rapor etmişlerdir. Benzer sonuçlar Desale vd.[54] tarafından 2008 yılında yedi farklı sünek numune ve üç farklı aşındırıcı kullanılarak yapılmış olan çalışma sonucunda da rapor edilmiştir.



Yüzeye dik (90°) olan çarpma açısında numune yüzeylerinde baskın aşınma mekanizması plastik deformasyon olmaktadır ve bundan dolayı derin hasar bölgelerine rastlanılmaktadır. Genellikle açılal partikül çarpmalarında rastlanan sınırlı kesme aşınması izleri ise çok nadir oluşmuştur. Avcu vd. [70] tarafından 2012 yılında yapılmış olan çalışmada iki farklı alüminyum alaşımı numune olarak ve silika kumu aşındırıcı olarak kullanılmış ve benzer aşınma formlarına rastlanmıştır.

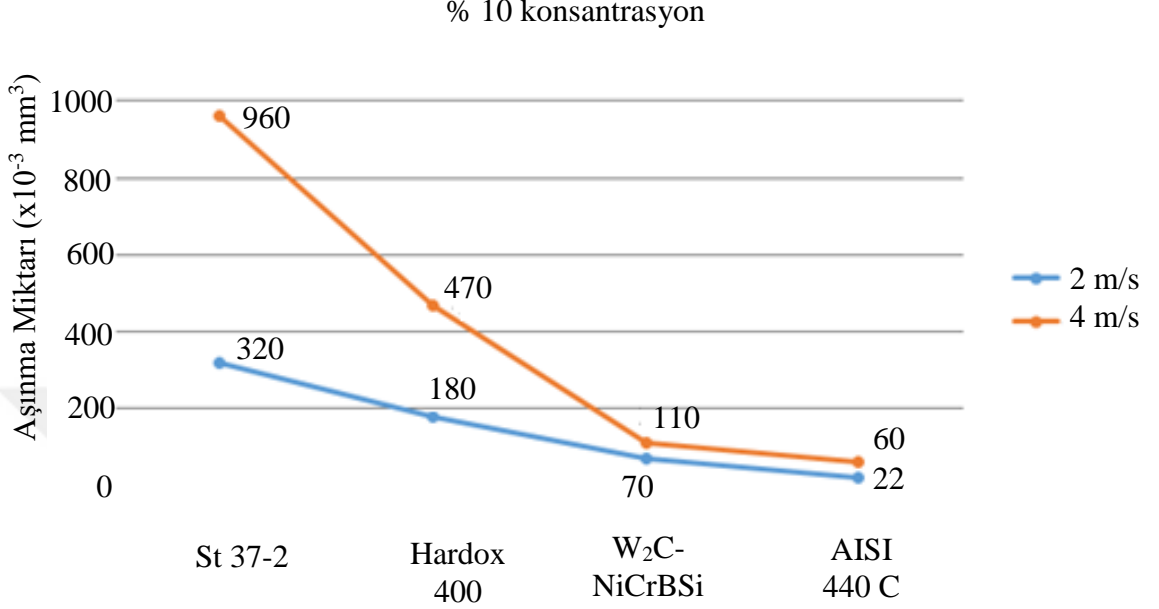
## **7.2. DENEYDEN SONRA AŞINDIRICININ DURUMU**

Her deneyin sonunda eski cüruf sistemden tahliye edilmiş ve daha önce hazırlanmış olan yeni cüruf sisteme dahil edilmiştir. Deneyden çıkan cüruf ise tamamen kurutulup nemi alındıktan sonra tekrar eleme işlemine tabi tutulmuştur. Cürufun yaklaşık % 60'ının partikül ebadı olarak yine aynı değer aralığında kaldığı, geri kalan kısmını ise 300 µm'nin altına düştüğü tespit edilmiştir. Deney sonrasında cürufa ait SEM görüntüsü Şekil 7.21'de verilmiştir. Desale vd.[60] tarafından 2005 yılında yapılmış olan çalışmada belirtildiği gibi deney çalışmasından sonra hemen hemen tüm partiküllerin keskin köşelerinin formlarını kaybederek yuvarlak bir hale döndüğü SEM görüntüsünden gözlemlenmiştir. Bu durum aşındırıcının aşındırma etkisini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu sebeple, ilgili bölümde bahsedildiği gibi deneysel çalışma süresi bir saatle kısıtlı tutulmuştur ve her bir saatlik çalışmanın ardından karışım yenisi ile değiştirilmiştir. SEM görüntüsünde, yuvarlak köşe formuna sahip partiküllerle beraber hala keskin köşeye sahip partiküller olduğu gözlemlenmiştir. Cürufun amorf yapısından dolayı kırılmaların kolay olduğu ve bu durumun cüruf partiküllerinin fiziksel değişiminde etkili olduğu söylenebilir.



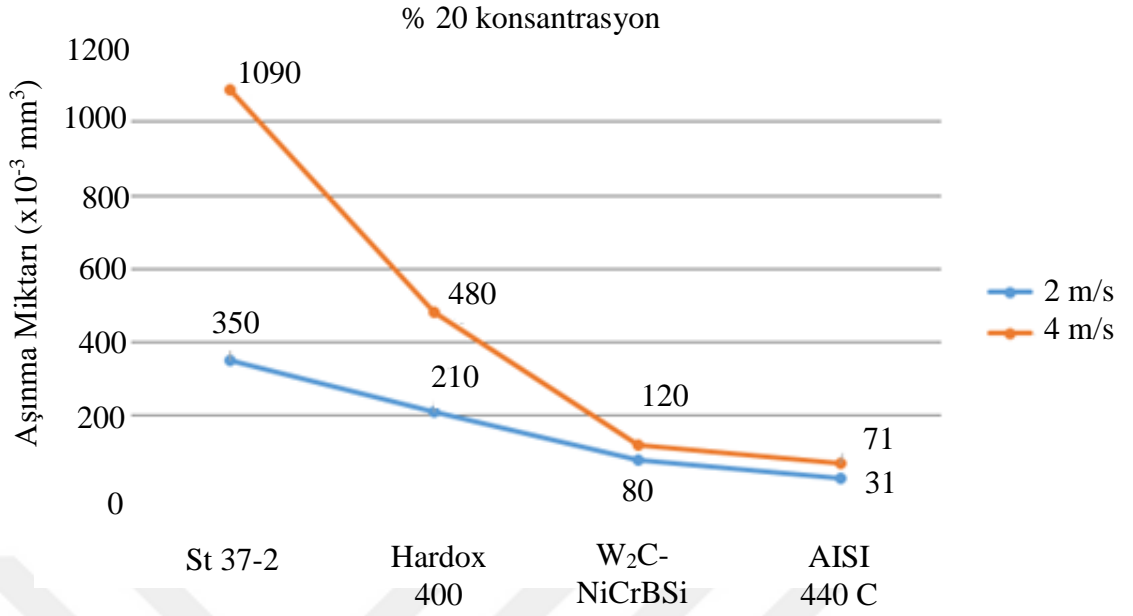
Şekil 7.21. Yüksek fırın granüle cürufuna ait deney sonrası SEM görüntüsü.

### 7.3. AŞINDIRICI PARTİKÜL HIZININ TÜM NUMUNELER ÜZERİNDEKİ AŞINMAYA ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI



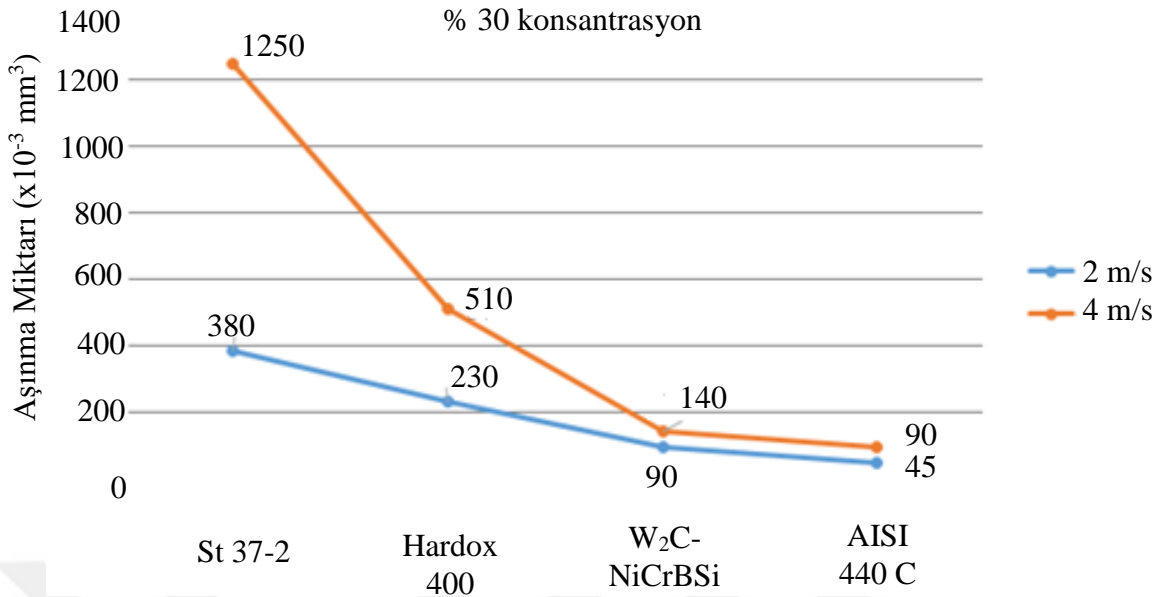
Şekil 7.22. % 10 konsantrasyon değerinde numunelerin farklı hız değerlerine göre mukayese grafiği.

Şekil 7.22’de verilen grafikten görüldüğü üzere % 10 konsantrasyon değeri için hızın artırılmasıyla özellikle St 37-2 malzemesinde bariz bir aşınma artışı olduğu görülmektedir. Ortaya çıkan yeni aşınma değeri St 37-2, Hardox 400 ve AISI 440 C malzemelerinde neredeyse 3 katı olurken kaplama malzemesinde 1,5 katı seviyelerinde kalmıştır. Kaplama malzemesi her ne kadar en yüksek aşınma direncine sahip olmasa da hız değişiminden en az etkilenen malzeme olmuştur. Bu durumun, yumuşak matris içerisinde bulunan sertlik değeri yüksek W<sub>2</sub>C’lerden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 7.23. % 20 konsantrasyon değerinde numunelerin farklı hız değerlerine göre mukayese grafiği.

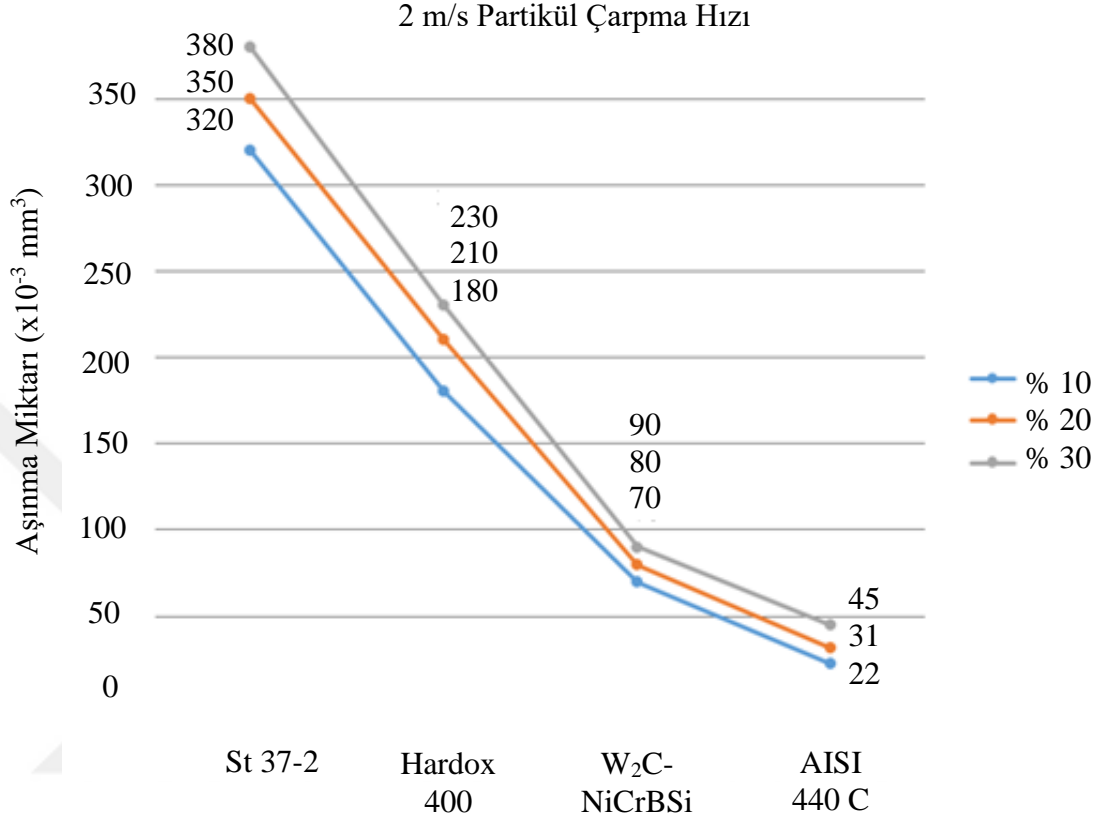
Şekil 7.23’de verilen grafikten görüldüğü üzere % 20 konsantrasyon değeri için hızın artmasıyla yine St 37-2 malzemesinde dikkat çekici bir aşınma artışı olduğu görülmektedir. Hızın 4 m/s’ye çıkartılmasıyla St 37-2 malzemesindeki aşınma değeri neredeyse 3 katına çıkmıştır. Hardox 400 ve AISI 440 C malzemelerinde bu değer 2,3 katı seviyelerine kadar gerilemiş kaplama malzemesinde ise 1,5 katı olarak gerçekleşmiştir. % 20 konsantrasyon değerinde de kaplama malzemesi en yüksek aşınma direncine sahip olmasa da hız değişiminden en az etkilenen malzeme olmuştur.



Şekil 7.24. % 30 konsantrasyon değerinde numunelerin farklı hız değerlerine göre mukayese grafiği.

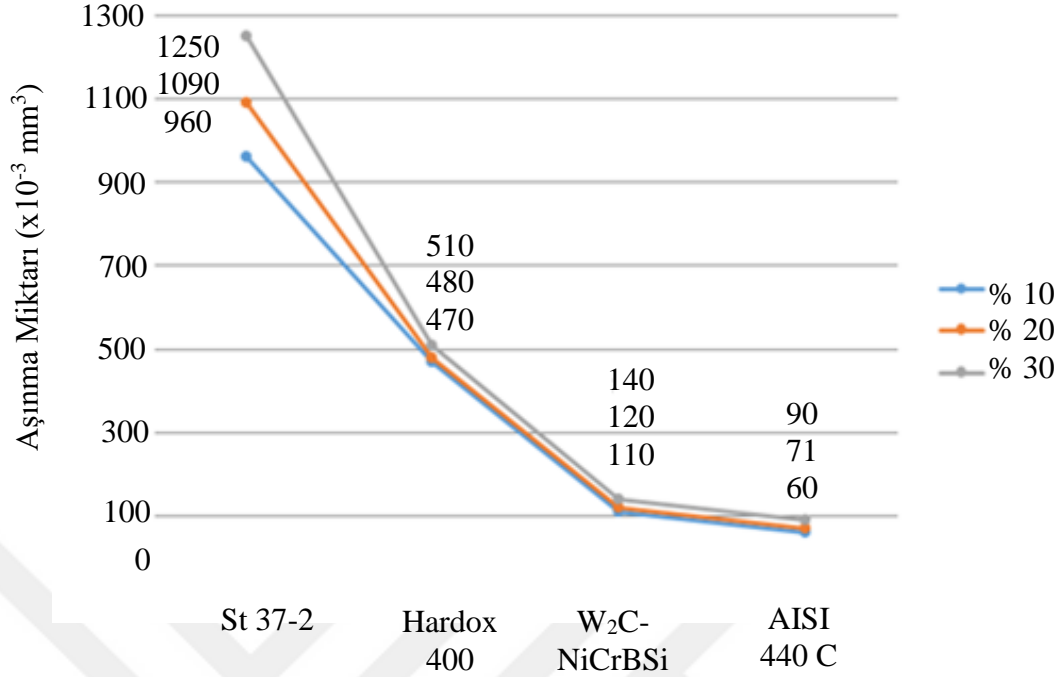
Şekil 7.24’de verilen grafikte % 30 konsantrasyon değeri için St 37-2 malzemesinde diğer malzemelere göre tekrardan daha fazla aşınma artışı olduğu görülmektedir. Hızın 4 m/s’ye çıkartılmasıyla St 37-2 malzemesindeki yeni aşınma değeri 3,3 katı seviyesinde gerçekleşmiştir. Hardox 400 malzemesinde bu değer 2,2 katı seviyesinde, AISI 440 C malzemesinde ise 2 katı seviyesinde gerçekleşmiştir. Kaplama malzemesinin yeni aşınma değeri ilk değerinin 1,6 katı olarak gerçekleşmiştir. % 30 konsantrasyon değerinde de kaplama malzemesi en yüksek aşınma direncine sahip değildir fakat yine hız değişiminden en az etkilenen malzeme olmuştur. Esasen aşınma direnci daha öncede bahsedildiği gibi birçok parametre ile doğrudan ilgilidir. Sonuçların, Çizelge 6.3’de verilen ölçülen numune yüzey sertliklerine paralel çıkması, Kumar vd. [59] tarafından 2013 yılında yapılmış olan çalışmada da belirtildiği gibi yüzey sertlik değerinin aşınma olayında önemli rol oynadığını göstermektedir.

#### 7.4. AŞINDIRICI PARTİKÜL KONSANTRASYONUNUN TÜM NUMUNELER ÜZERİNDEKİ AŞINMAYA ETKİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI



Şekil 7.25. 2 m/s partikül çarpma hızı değerinde numunelerin farklı konsantrasyon değerlerine göre mukayese grafiği.

Şekil 7.25’de verilen grafikte 2 m/s partikül çarpma hızı değeri için St 37-2 malzemesinde her bir konsantrasyon değerinde diğer malzemelere göre daha fazla aşınma olduğu görülmektedir. AISI 440 C malzemesi ise en düşük aşınma değerine sahiptir. Konsantrasyon artışından en az etkilenen malzeme St 37-2, en çok etkilenen malzeme ise AISI 440 C malzemesi olmuştur. 2 m/s partikül çarpma hızı değerinde St 37-2 malzemesi en düşük aşınma direncine sahip malzemedir fakat elde edilen veriler ışığında konsantrasyon değişiminden en az etkilenen malzeme olmuştur.



Şekil 7.26. 4 m/s partikül çarpma hızı değerinde numunelerin farklı konsantrasyon değerlerine göre mukayese grafiği.

Şekil 7.26'da verilen grafikte 4 m/s partikül çarpma hızı değeri için St 37-2 malzemesinde yine her bir konsantrasyon değerinde diğer malzemelere göre daha fazla aşınma olduğu görülmektedir. AISI 440 C malzemesi ise tekrardan en düşük aşınma değerine sahiptir. Konsantrasyon artışından en az etkilenen malzeme Hardox 400 ve en çok etkilenen malzeme ise AISI 440 C malzemesi olmuştur. 4 m/s partikül çarpma hızı değerinde St 37-2 malzemesi en düşük aşınma direncine sahip malzemedir ve ardından ikinci sırada Hardox 400 malzemesi gelmektedir. Fakat elde edilen veriler ışığında konsantrasyon değişiminden en az etkilenen Hardox 400 malzemesi olmuştur.

## 7.5. MALİYET ANALİZİ

Bir metre birim boydaki standart St 37-2 (Ø 323,9 x 8,8) çelik çekme borunun açılımı yaklaşık 1m<sup>2</sup> olmaktadır. Şartların en ağır ve aşınmanın en yüksek olduğu değerler % 30 konsantrasyon ve 4 m/s partikül çarpma hızı değerleridir. Bu değerlerde sırası ile aşınma miktarları, St 37-2 için 1250 x 10<sup>-3</sup> mm<sup>3</sup>, Hardox 400 malzeme için 510 x 10<sup>-3</sup> mm<sup>3</sup>, W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama malzemesi için 140 x 10<sup>-3</sup> mm<sup>3</sup> ve AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik malzemesi için 45 x 10<sup>-3</sup> mm<sup>3</sup>'dür. Çizelge 7.13'de

aşınma miktarları ve standart boru malzemesine göre diğer malzemelerin mukayese oranları verilmiştir. Birim boydaki malzemeler için maliyet hesabı yapılmış ve mukayese edilebilmeleri için aşınma miktarlarına göre yeni fiyat değerlerine indirgenmiştir. Çizelgeden de anlaşılacağı gibi en düşük maliyetli malzeme AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik malzemesi olmuştur. AISI 440 C malzemesini sırası ile Hardox 400 ve St 37-2 malzemeleri izlemiştir. W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama malzemesi ise fiyat açısından en yüksek değere sahip malzemedir. Konuya sadece direkt maliyet olarak bakmak çok doğru bir yaklaşım olmayacaktır. Malzeme maliyetinin yanında işçilik maliyetleri ve proses düzeninin bakım duruşları nedeniyle kısa sayılabilecek aralıklarla bozulması da indirekt maliyetler olarak karşımıza çıkacaktır. Bu sebeple en düşük birim fiyat ve en yüksek mukayese oranının olduğu malzemenin seçilmesi uygun olacaktır. St 37-2 malzemesi iç piyasadan rahatlıkla temin edilebilecek bir malzemedir. Hardox 400 malzemesi yurt dışından tedarik edilebilmektedir. Bu sebeple birim fiyat olarak St 37-2 malzemesine göre daha yüksek fiyata sahiptir. Ayrıca söz konusu malzeme plaka olarak tedarik edilip boru formunun elde edilmesi gerekmektedir (birim fiyatı: 1,53 Euro/kg). En yüksek fiyata sahip dolgu malzemesi yurt dışı tedarik gerektirmekte ve işçiliği oldukça zahmetlidir. Maliyet ve dayanım olarak en uygun malzeme olan AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik malzemesine ait numuneler Kardemir A.Ş'nin bir alt kuruluşu olan Kardökmak A.Ş tarafından imal edilmiştir. Boru formu elde edilmesi üzerine çalışmalar yapılması uygun olacaktır. Böylelikle söz konusu malzemeyi yerli olarak elde etmek mümkün olacaktır.

Kaplama malzemesi kalınlığı yaklaşık 2 mm olarak olacak şekilde hesap yapılmıştır. İhtiyaç duyulan tel miktarı % 10 kayıpla beraber yaklaşık 31,7 kg olmuştur (birim fiyat: 77 Euro/kg). Esasen tedarik miktarları 10 kg ve katları olmasına rağmen bu ihmal edilmiştir fakat kaplanacak St 37-2 borunun fiyatı söz konusu değere eklenmiştir.



Çizelge 7.13. Malzeme Maliyet Tablosu.

Malzeme	Birim Fiyat [TL]	Aşınma Miktarı [ $\times 10^{-3}$ mm <sup>3</sup> ]	Mukayese Oranı	İndirgenmiş Birim Fiyat [TL]
St 37-2	275,00	1250	1	275,00
Hardox 400	550,00	510	2,45	224,49
W <sub>2</sub> C-NiCrBSi	11730,00	140	8,93	1313,55
AISI 440 C	3000,00	90	13,9	215,83

Not: İthal ürünlere ait fiyatlar Türk Lirası'na çevrilmiştir. Hesaplamalar yapılırken Euro 06.02.2018 tarihli kur değeri olan 4,69 TL olarak alınmıştır.

## 7.6. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

### 7.6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada St 37-2 malzemesi üzerine uygulanan NiCrBSi ve W<sub>2</sub>C esaslı kaplama, döküm yolu ile üretilen AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik, piyasadan plaka olarak satın alınan Hardox 400 ve St 37-2 çeliklerinin erozif aşınma davranışları tez kapsamında tasarlanan ve imal edilen deney düzeneği kullanılarak karşılaştırılmıştır. % 10, % 20 ve % 30 aşındırıcı konsantrasyonu ve 2 m/s ile 4 m/s partikül çarpma hızı parametrelerine göre incelenen çalışmanın sonuçları maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- Hız parametresinin konsantrasyon parametresine göre daha etkili bir parametre olduğu gözlenmiştir. Şekil 7.23 - 7.25'den açıkça görüldüğü gibi en düşük yüzey sertliği değerine sahip St 37-2 malzemesinde hızın artışı ile aşınma miktarlarının değişimi diğer malzemelere göre daha fazla olmuştur. Yapılmış olan deneyler neticesinde numunelerin içinde en az malzeme kaybına uğrayan AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik malzemesi olmuştur. Her bir hız ve konsantrasyon değerinde en az malzeme kaybı ile en yüksek aşınma dayanımını göstermiştir. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyon değerinde St 37-2 numunesine göre aşınma miktarı sekizde bir değerinden fazla iken en zor deney şartlarını

kapsayan 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 konsantrasyon değerinde on dörtte bir mertebelerinde gerçekleşmiştir.

- Aşındırıcı konsantrasyonu dört malzemenin de aşınma davranışı üzerinde etkili olmuştur.
- Etkin aşınma mekanizmasının genellikle plastik deformasyon türünden olduğu SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bu mekanizmaya ek olarak çarpıp malzeme üzerinde kalan cüruf granüllerinin de varlığı gözlenmiştir.
- En düşük aşınma kaybı AISI 440 C malzemesinde gözlemlenirken en yüksek kayıp St-37-2 kalite çelikte olmuştur. Çizelge 6.3'den görüldüğü üzere ölçülen en yüksek yüzey sertliği değeri AISI 440 C malzemesine en düşük değer ise St 37-2 malzemesine aittir. Sertlik değerleri ile erozif aşınma değerleri uyumlu olduğu tespit edilmiştir.
- $W_2C$  partikülleri içeren kaplamada nispeten daha az sert bölgelerden oluşan NiCrBSi metalik yapısının aşınmaya maruz kalması ile ortaya çıkan  $W_2C$  fazlarının kaplamanın aşınma direncini artırdığı fakat genel performans olarak AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik malzemesinin gerisinde kaldığı görülmüştür.

### 7.6.2. Öneriler

- Bu çalışmada kullanılan tüm aşındırıcı partiküller elenerek ortalama 505  $\mu m$  boyutunda kullanılmıştır. İleriki çalışmalarda farklı partikül boyutlarında yüksek fırın granüle cürufu aşındırıcı olarak kullanılabilir, böylelikle aşındırıcı partikül büyüklüğü parametresinin yüzey kalitesi, yüzeyde meydana gelen aşınma formları ve aşınma miktarı üzerine etkileri incelenebilir.
- Bu tez çalışması kapsamında partikül çarpma açısı olarak normal çarpma açısı ( $90^\circ$ ) seçilmiştir. Farklı çarpma açılarında deneyler gerçekleştirilip partikül

çarpma açısı parametresinin özellikle yüzeyde meydana gelen aşınma formları, yüzey kalitesi ve aşınma miktarı üzerine etkileri incelenebilir.

- Ayrıca bu çalışmada seçilmiş olan malzemelere alternatif olacak metal veya metal dışı malzemelerin, partikül boyutu, partikül çarpma açısı, partikül çarpma hızı ve konsantrasyon parametreleri kullanılarak aşınma performansları incelenebilir.
- Bu tez çalışmasındaki parametreler kullanılarak seçilen yeni malzemelerin yüzey kalitesi, yüzeylerinde meydana gelen aşınma formları ve ortaya çıkan aşınma miktarlarının bu çalışma sonucunda ortaya çıkan sonuçlarla mukayeseleri yapılabilir.
- Yüksek fırın cüruf taşıyıcı hat tasarımlarında konsantrasyon parametresi üzerinde durulmalı ve pompa ve taşıma sıvısı debisi hesaplanırken göz önüne alınmalıdır. Yüksek fırın hatlarında granülasyon için kullanılacak olan su miktarı üretilen cüruf miktarı göz önünde tutularak hesaplanmalı. Mümkünse oran % 10 seviyelerinde seçilmelidir.

## KAYNAKLAR

1. Simcoe, C. R., "The Age of Steel: Part II", *Advanced Materials & Processes*, 172 (4): 32-33 (2014).
2. Baycık, C., "Granüle Yüksek Fırın Cüruflarının Karo Sektöründe Kullanılabilirliğinin Araştırılması", Yüksek Lisans, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 26-27 (2003).
3. İnternet: Demir Çelik Store "Direkt İndirgeme Prosesleri" <http://www.demircelikstore.com/-1-3206-direkt--indirgeme--proseslerii.html> (2006).
4. Güner, A., "Günümüzde Yüksek Fırın Cürufu İnşaat Sektöründe Kullanımı", *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Ankara, (1993).
5. Erdoğan, S.T. ve Erdoğan T.Y., "Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri", *II. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi*, 263-275 (2007).
6. Türkiye Çelik Üreticileri Derneği, Demir Çelik Cüruf Raporu, *Çevre ve Şehircilik Bakanlığı*, (2015).
7. Youssef, N., F. and Abadir, M., F., "Utilization of Blast Furnace Slag in the Manufacture of Wall and Floor Tiles", *Ceramic Transactions*, 101-112 (2001).
8. İnternet: EUROSLAG-The European Association Representing Metallurgical Slag Producers and Processors "Granulated Blast Furnace Slag - Technical Leaflet No. 1" [http://www.euroslag.org/fileadmin/\\_media/images/Research/FACT\\_SHEETS/LeafletGBS.pdf](http://www.euroslag.org/fileadmin/_media/images/Research/FACT_SHEETS/LeafletGBS.pdf) (2003).
9. Kiseçik, İ., "Sertleştirilmiş ve Sert Dolgu Kaynağı Yapılmış AISI 1050 Çeliğinin Aşınma Direncinin Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, (2010).
10. Büyükkelleci, Ü., "Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2008).
11. Karabaşoğlu, M., "Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2008).

12. Ulutan, M., “AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi*, Eskişehir, (2007).
13. Puccio F. D. and Mattei L., “Biotribology of artificial hip joints”, *World Journal of Orthopedics*, 6 (1): 77-94 (2015).
14. Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., “Engineering Tribology”, *Publisher Butterworth Heinemann*, 769: 430-440 (2000).
15. Karaoğlu, Y., “Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2006).
16. Atamert, S., “Stability, Wear Resistance and Microstructure of Iron, Cobalt and Nickel-Based Hardfacing Alloys”, Ph.D Thesis, *University of Cambridge*, (1988).
17. İnternet: Subs Tech - Substances and Technologies “Mechanisms of Wear” [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms\\_of\\_wear](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear) (2017).
18. Chotěborský, R., Hrabě, P., Müller, M., Savková, J., Jirka, M. and Navrátilová, M., “Effect of Abrasive Particle Size on Abrasive Wear of Hardfacing Alloys”, *Research in Agricultural Engineering*, 55(3): 101–113, (2009).
19. Kaplan, M., Karaoğlanlı, A.C. ve Uyaner, M., “Katı Partikül Erozyonu ve Mühendislik Malzemeleri Üzerindeki Önemi”, *Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, Bartın Üniversitesi*, 4 (1): 31-34 (2016).
20. Budinski, K. G., “Friction, Wear and Erosion Atlas”, *CRC Press*, USA, (2014).
21. Sarıkaya, Ö., “Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri”, *Sakarya Üniversitesi*, Sakarya (2007).
22. Korkut, M. H., “Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapısı ve Aşınması Üzerine Karbür Yapıcı Elementlerin Etkilerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (1997).
23. Budinski, K. G., “Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing”, Bud Labs, *ASTM International*, USA, (2007).
24. Yıldırım, M. M., Doğantan, Z.S., Pakdil, M. ve Cakan, A., “Mühendislik Malzemeleri 1”, *MKU Mustafa Kemal Üniversitesi Yayınları*, No:9, İskenderun, 110-116 (2001).
25. Öz Saraç, U., Yılmaz, R., Ekerer, F.A. ve Uzun, H., “Sementasyon işlemi yapılan çeliklerde mikro sertlik ve mikroyapı değişimlerinin incelenmesi”, *TMMOB Metalurji mühendisleri odası yayın organı*, Aralık, Yıl 15, Sayı 127, 34-38 (2001).

26. İnternet: Makinatek İmalat Sanayi Dergisi “Fiziksel Buhar Biriktirme” <http://www.makinatek.com.tr/arsiv/yazi/117-fiziksel-buhar-biriktirme> (2017).
27. Toygun, Ş., Köneçoğlu, G. ve Kalpaklı, Y., “General Principles of Sol-Gel”, *Sigma*, 31: 456-476 (2013).
28. İnternet: Sakarya Üniversitesi “Termal Sprey Kaplamalar”, <http://www.teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10729/42142/termal-sprey-nedir> (2017).
29. İnternet: Sakarya Üniversitesi “Alev Sprey Yöntemi” <http://www.teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10715/42048/alev-sprey> (2017).
30. Clare M. J. H., Crawmer D.E., “Thermal Spray Coatings Metals Handbook”, *American Society for Metal*, 5: 361-375. USA, (1982).
31. Bunshah, R. F., “Handbook of hard coatings deposition Technologies, properties and applications”, *Noyes Publications*, Park Ridge, New Jersey, USA. *William Andrew Publishing*, New York, USA, 77-100, 535 (2001).
32. Robotti, P. and Zappini, G. “Chapter 9 - Thermal Plasma Spray Deposition of Titanium and Hydroxyapatite on Polyaryletheretherketone Implants”, in PEEK Biomaterials Handbook, *Oxford: William Andrew Publishing*, 119–143 (2012).
33. İnternet: CONFIND, Constanti si Fideli in Interesul Dumneavoastra “High Velocity Oxy-Fual Process” <http://www.confind.ro/en/hvof.html> (2017).
34. Sexton, L., Lavin, S., Byrne, G., Kennedy, A., “Laser cladding of aerospace materials”, *Journal of Materials Processing Technology*, 122: 63-68 (2002).
35. Burakowski, T. And Wierzchon, T., “Electron Beam Technology”, Surface Engineering of Metals, *CRC Press LLC*, London, Ch. 2: 1-54 (1999).
36. İnternet: OERLIKON, “Toz Altı Kaynak Yöntemi” [http://www.oerlikon.com.tr/files/toz\\_alti\\_kaynak\\_yontemi\\_1-2.pdf](http://www.oerlikon.com.tr/files/toz_alti_kaynak_yontemi_1-2.pdf) (2017).
37. İnternet: Metal ve Kaynak Teknolojileri “TIG Kaynak Yöntemi” <http://www.metaluzmani.com/tig-kaynagi-sematik-gosterim-ve-ozet-bilgi> (2017).
38. İnternet: Metal ve Kaynak Teknolojileri “TIG Kaynağında Akım Tipine Göre Nüfuziyet ve Elektrot Kapasitesi” <http://www.metaluzmani.com/tig-kaynaginda-akim-tipine-gore-nufuziyet-ve-elektrot-kapasitesi> (2017).
39. İnternet: Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi “İmal Usulleri-Bölüm 3. Kaynak Yöntemleri” <http://slideplayer.biz.tr/slide/10274468> (2017).

40. Hung, F., Yan, Z., Chen, L. and Lui, T., “Microstructural characteristics of PTA overlaid NbC on pure Ti”, *Surface & Coatings Technology*, 200, 6881–6887 (2006).
41. Adamiak, M., “Effect of Abrasive Size on Wear, Abrasion Resistance of Materials”, *InTech*, 167-184 (2012).
42. Katsich, C., Badisch, E., Manish, R., Heath, G., R. and Franek, F., “Erosive wear of hard faced Fe–Cr–C alloys at elevated temperature”, *Wear*, 267: 1856–1864 (2009).
43. Jha, A. K., Batham, R., Ahmed, M., Majumder, A. K., Modi, O. P., Chaturved, S. and Gupta, A. K., “Effect of impinging angle and rotating speed on erosion behavior of aluminum”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21:32-38 (2011).
44. Lopez, D., Congote, J. P., Can, 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: 118-124 (2005).
45. Doubek, P. and Filipek, J., “Abrasive and erosive wear of technical materials”, *Acta University Agric. etSilvic. Mendel. Brun.*, 3: 13–22 (2011).
46. Kulu, P., Tarbe, R. and Vallikivi, A., “Abrasive Wear of Powder Material S and Coatings”, *Materials Science*, 11: 230-234 (2005).
47. Fort, I., “On Hydraulic Efficiency of Pitched Blade Impellers”, *Chemical Engineering Research and Design*, 8-9: 611–615 (2011).
48. 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”, *Proc. of the World Congress on Engineering*, London (2011).
49. Franek, F., Badisch, E. and Kirchgassner, M., “Advanced Methods for Characterisation of Abrasion/Erosion Resistance of Wear Protection Materials”, *FME Transactions*, 37: 61-70 (2009).
50. 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: 196-202 (2005).
51. Shipway, P., H. and Hutchings, L. M., “The role of particle properties in the erosion of brittle materials”, *Wear*, 193: 105-113 (1996).
52. Wheeler, D. W. and Wood, R. J. K., “Solid particle erosion of CVD diamond coatings”, *Wear*, 233–235: 306–318 (1999).
53. Desale, G. R., Gandhi, B. K. and Jain, S. C., “Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials”, *Wear*, 261: 914-921 (2006).

54. Desale, G. R., Gandhi, B. K. and Jain, S. C., “Slurry erosion of ductile materials under normal impact condition”, *Wear*, 264: 322-330 (2008).
55. 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: 975-987 (2009).
56. Desale, G. R., Gandhi, B. K. and Jain, S. C., “Development of Correlations for Predicting the Slurry Erosion of Ductile Materials”, *Journal of Tribology*, 133 (2011).
57. Kumar, R., “Investigation of Erosive Wear Ductile Materials With and Without Coating”, Master of Engineering, *Thapar University*, Patiala (2011).
58. Khan, A. A., “Evaluation of Erosion Wear of Ash Handling Pipes”, Master of Engineering, *Thapar University*, Patiala (2011).
59. Kumar, S. and Ratol, J. S., “Effects of Tribological Parameters on Slurry Erosion Behaviour of Uncoated and Coated Materials: A Review”, *Materials Engineering*, 20: 119-131 (2013).
60. More, S. R., Nandre, B. D. and Desale, G. R., “Development of Pot Tester to Simulate the Erosion Wear due to Solid-Liquid Mixture”, *International Journal of Researchers, Scientists and Developers*, 2:6-12 (2014).
61. Gökşenli, A. and Kosa, E., “Effect of Impact Angle on Erosive Abrasive Wear of Ductile and Brittle Materials”, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 9: 1566-1570 (2015).
62. Kumar, S., Mishra, N. K. and Mishra, S. B., “Role of HVOF Sprayed Coating of WC-Co-Cr, NiCrSiB on Slurry Erosion Wear of AISI 304 & 316 Substrates”, *International Journal of Scientific Processes Research and Application*, 1: 13-18 (2015).
63. Lindsley, B. A. and Marder, A. R., “The effect of velocity on the solid particle erosion rate of alloys”, *Wear*, 225–229, 510–516 (1999).
64. Gadhikar, A. A., Sharma, A., Goel, D. B. and Sharma, C. P., “Fabrication and Testing of Slurry Pot Erosion Tester”, *Trans Indian Inst Met*, 64(4-5): 493-500 (2011).
65. Aubin, J., Le Sauze, N., Bertrand, J., Fletcher, D. F. And Xuereb, C., “PIV measurements of flow in an aerated tank stirred by a down- and an up-pumping axial flow impeller”, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, 28, 447–456 (2003).
66. Bitter, J. G. A., “A study of erosion phenomena—Parts I”, *Wear*, 6, 5-21 (1963).



67. Abd-Elrhman, Y. M., Abouel-Kasem, A., Emara, K. M. and Ahmed, S. M., “Effect of Impact Angle on Slurry Erosion Behaviour and Mechanisms of Carburized AISI 5117 Steel”, *Journal of Engineering Sciences, Assiut University*, 41, 137-157 (2013).
68. Ramanujam, N. and Nakamura, T., “Erosion mechanisms of thermally sprayed coatings with multiple phases”, *Surface and Coatings Technology*, 204, 42-53 (2009).
69. Patil, M. S., Deore, P. E., Jahagirdar, R. S. and Patil, S. V., “Study of the Parameters Affecting Erosion Wear of Ductile Material in Solid-Liquid Mixture”, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, vol.III (2011).
70. Avcu, E., Fidan, S., Karabay, S. ve Sınmazçelik, T., “Türkiye’de Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan AA-1070 ile AA-6101 Alaşımlarının Katı Partikül Erozyon Davranışlarının Karşılaştırılması”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (4), 865-874 (2012).
71. Yüksel, N., “Farklı Kompozisyonlarda Üretilen Aşınma Plakalarının Karakterizasyonu ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa (2012).



**EK AÇIKLAMALAR A.**  
**DENEY SONUÇ ÇİZELGELERİ**

Çizelge EK A.1. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE St 37-2		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 2,41 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,6 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 320 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±11,5 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 10				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 1	NUMUNE 1	6,8230	6,8207	2,3	16/02/2016
	NUMUNE 2	6,8398	6,8373	2,5	
DENEY NO: 2	NUMUNE 1	6,8514	6,8490	2,4	16.02.2016
	NUMUNE 2	6,8619	6,8594	2,5	
DENEY NO: 3	NUMUNE 1	6,8413	6,8388	2,5	16.02.2016
	NUMUNE 2	6,8516	6,8493	2,3	
DENEY NO: 4	NUMUNE 1	6,9796	6,9771	2,5	16/02/2016
	NUMUNE 2	6,9154	6,9130	2,4	
DENEY NO: 5	NUMUNE 1	6,9737	6,9714	2,3	17/02/2016
	NUMUNE 2	6,9293	6,9269	2,4	

Çizelge EK A.2. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE St 37-2		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 2,66 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,6 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 350 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±12,7 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 20				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 6	NUMUNE 1	6,8187	6,8160	2,7	17/02/2016
	NUMUNE 2	6,8060	6,8032	2,8	
DENEY NO: 7	NUMUNE 1	6,8137	6,8112	2,5	17/02/2016
	NUMUNE 2	6,7329	6,7302	2,7	
DENEY NO: 8	NUMUNE 1	6,8142	6,8116	2,6	17/02/2016
	NUMUNE 2	6,8215	6,8189	2,6	
DENEY NO: 9	NUMUNE 1	6,9010	6,8984	2,6	17/02/2016
	NUMUNE 2	6,9623	6,9596	2,7	
DENEY NO: 10	NUMUNE 1	6,9590	6,9564	2,6	18/02/2016
	NUMUNE 2	6,9175	6,9147	2,8	

Çizelge EK A.3. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE St 37-2		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 2,87 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,6 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 380 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±12,5 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 30				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 11	NUMUNE 1	6,7462	6,7434	2,8	18/02/2016
	NUMUNE 2	6,7355	6,7326	2,9	
DENEY NO: 12	NUMUNE 1	6,7735	6,7706	2,9	18/02/2016
	NUMUNE 2	6,7000	6,6972	2,8	
DENEY NO: 13	NUMUNE 1	6,8883	6,8856	2,7	18/02/2016
	NUMUNE 2	6,9448	6,9420	2,8	
DENEY NO: 14	NUMUNE 1	6,9468	6,9439	2,9	19/02/2016
	NUMUNE 2	6,9079	6,9049	3,0	
DENEY NO: 15	NUMUNE 1	6,8107	6,8078	2,9	19/02/2016
	NUMUNE 2	6,8179	6,8149	3,0	

Çizelge EK A.4. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE St 37-2		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 7,32 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,6 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 960 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±13,6 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 10				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 16	NUMUNE 1	6,8315	6,8241	7,4	19/02/2016
	NUMUNE 2	6,8160	6,8087	7,3	
DENEY NO: 17	NUMUNE 1	6,8484	6,8411	7,3	19/02/2016
	NUMUNE 2	6,8588	6,8516	7,2	
DENEY NO: 18	NUMUNE 1	6,8645	6,8571	7,4	19/02/2016
	NUMUNE 2	6,8792	6,8720	7,2	
DENEY NO: 19	NUMUNE 1	6,9113	6,9041	7,2	20/02/2016
	NUMUNE 2	6,9762	6,9688	7,4	
DENEY NO: 20	NUMUNE 1	6,9693	6,9618	7,5	22/02/2016
	NUMUNE 2	6,9245	6,9172	7,3	

Çizelge EK A.5. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE St 37-2		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 8,36 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,6 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 1090 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±38,3 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 20				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 21	NUMUNE 1	6,8130	6,8046	8,4	23/02/2016
	NUMUNE 2	6,8018	6,7937	8,1	
DENEY NO: 22	NUMUNE 1	6,8388	6,8308	8,0	24/02/2016
	NUMUNE 2	6,8498	6,8410	8,8	
DENEY NO: 23	NUMUNE 1	6,8104	6,8024	8,0	25/02/2016
	NUMUNE 2	6,7298	6,7217	8,1	
DENEY NO: 24	NUMUNE 1	6,8946	6,8862	8,4	25/02/2016
	NUMUNE 2	6,9552	6,9466	8,6	
DENEY NO: 25	NUMUNE 1	6,9546	6,9460	8,6	26/02/2016
	NUMUNE 2	6,9050	6,8964	8,6	

Çizelge EK A.6. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde St 37-2 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE St 37-2		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 9,54 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,6 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 1250 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±21,7 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 30				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 26	NUMUNE 1	6,7870	6,7774	9,6	27/02/2016
	NUMUNE 2	6,8005	6,7907	9,8	
DENEY NO: 27	NUMUNE 1	6,8237	6,8142	9,5	27/02/2016
	NUMUNE 2	6,8301	6,8205	9,6	
DENEY NO: 28	NUMUNE 1	6,8927	6,8835	9,2	02/03/2016
	NUMUNE 2	6,8817	6,8722	9,5	
DENEY NO: 29	NUMUNE 1	6,8839	6,8742	9,7	03/03/2016
	NUMUNE 2	6,9404	6,9308	9,6	
DENEY NO: 30	NUMUNE 1	6,9339	6,9244	9,5	03/03/2016
	NUMUNE 2	6,8969	6,8875	9,4	

Çizelge EK A.7. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE Hardox 400		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 1,40 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,66 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 180 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±10,7 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 10				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 31	NUMUNE 1	6,8585	6,8572	1,3	04/03/2016
	NUMUNE 2	6,8505	6,8491	1,4	
DENEY NO: 32	NUMUNE 1	6,8660	6,8646	1,4	04/03/2016
	NUMUNE 2	6,8630	6,8616	1,4	
DENEY NO: 33	NUMUNE 1	6,8581	6,8566	1,5	05/03/2016
	NUMUNE 2	6,8426	6,8413	1,3	
DENEY NO: 34	NUMUNE 1	6,8998	6,8984	1,4	05/03/2016
	NUMUNE 2	6,9417	6,9402	1,5	
DENEY NO: 35	NUMUNE 1	6,8847	6,8834	1,3	07/03/2016
	NUMUNE 2	6,8433	6,8418	1,5	

Çizelge EK A.8. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE Hardox 400		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 1,58 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,66 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 210 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±10,3 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 20				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 36	NUMUNE 1	6,8448	6,8432	1,6	08/03/2016
	NUMUNE 2	6,8399	6,8382	1,7	
DENEY NO: 37	NUMUNE 1	6,8476	6,8460	1,6	08/03/2016
	NUMUNE 2	6,8360	6,8345	1,5	
DENEY NO: 38	NUMUNE 1	6,8729	6,8712	1,7	08/03/2016
	NUMUNE 2	6,8297	6,8282	1,5	
DENEY NO: 39	NUMUNE 1	6,8323	6,8307	1,6	08/03/2016
	NUMUNE 2	6,8495	6,8480	1,5	
DENEY NO: 40	NUMUNE 1	6,8498	6,8482	1,6	09/03/2016
	NUMUNE 2	6,8195	6,8180	1,5	

Çizelge EK A.9. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE Hardox 400		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 1,79 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,66 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 230 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±7,4 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 30				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 41	NUMUNE 1	6,7853	6,7835	1,8	09/03/2016
	NUMUNE 2	6,7868	6,7850	1,8	
DENEY NO: 42	NUMUNE 1	6,8788	6,8771	1,7	09/03/2016
	NUMUNE 2	6,8918	6,8900	1,8	
DENEY NO: 43	NUMUNE 1	6,8410	6,8392	1,8	10/03/2016
	NUMUNE 2	6,8098	6,8080	1,8	
DENEY NO: 44	NUMUNE 1	6,8074	6,8055	1,9	10/03/2016
	NUMUNE 2	6,8388	6,8370	1,8	
DENEY NO: 45	NUMUNE 1	6,7064	6,7047	1,7	10/03/2016
	NUMUNE 2	6,7378	6,7360	1,8	

Çizelge EK A.10. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE Hardox 400		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 3,57 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,66 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 470 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±8,8 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 10				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 46	NUMUNE 1	6,8593	6,8556	3,7	11/03/2016
	NUMUNE 2	6,8570	6,8534	3,6	
DENEY NO: 47	NUMUNE 1	6,8538	6,8502	3,6	11/03/2016
	NUMUNE 2	6,8455	6,8420	3,5	
DENEY NO: 48	NUMUNE 1	6,8544	6,8508	3,6	11/03/2016
	NUMUNE 2	6,8379	6,8344	3,5	
DENEY NO: 49	NUMUNE 1	6,8374	6,8338	3,6	11/03/2016
	NUMUNE 2	6,8780	6,8745	3,5	
DENEY NO: 50	NUMUNE 1	6,8248	6,8213	3,5	12/03/2016
	NUMUNE 2	6,8570	6,8534	3,6	

Çizelge EK A.11. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE Hardox 400		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 3,70 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,66 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 480 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±10,7 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 20				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 51	NUMUNE 1	6,8316	6,8278	3,8	12/03/2016
	NUMUNE 2	6,8437	6,8400	3,7	
DENEY NO: 52	NUMUNE 1	6,8420	6,8383	3,7	12/03/2016
	NUMUNE 2	6,8356	6,8320	3,6	
DENEY NO: 53	NUMUNE 1	6,8279	6,8242	3,7	12/03/2016
	NUMUNE 2	6,8454	6,8418	3,6	
DENEY NO: 54	NUMUNE 1	6,8239	6,8203	3,6	14/03/2016
	NUMUNE 2	6,8666	6,8628	3,8	
DENEY NO: 55	NUMUNE 1	6,8155	6,8118	3,7	14/03/2016
	NUMUNE 2	6,8470	6,8432	3,8	

Çizelge EK A.12. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde Hardox 400 numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE Hardox 400		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 3,91 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,66 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 510 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±9,6 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 30				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 56	NUMUNE 1	6,8957	6,8918	3,9	14/03/2016
	NUMUNE 2	6,8829	6,8790	3,9	
DENEY NO: 57	NUMUNE 1	6,8288	6,8248	4,0	14/03/2016
	NUMUNE 2	6,8338	6,8299	3,9	
DENEY NO: 58	NUMUNE 1	6,8060	6,8021	3,9	15/03/2016
	NUMUNE 2	6,8358	6,8318	4,0	
DENEY NO: 59	NUMUNE 1	6,8312	6,8274	3,8	15/03/2016
	NUMUNE 2	6,8016	6,7977	3,9	
DENEY NO: 60	NUMUNE 1	6,7302	6,7264	3,8	15/03/2016
	NUMUNE 2	6,7006	6,6966	4,0	



Çizelge EK A.13. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 0,94 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 14,4 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 70 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±5,8 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 10				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 61	NUMUNE 1	7,5073	7,5064	0,9	26/03/2016
	NUMUNE 2	7,4850	7,4841	0,9	
DENEY NO: 62	NUMUNE 1	7,4654	7,4644	1,0	26/03/2016
	NUMUNE 2	7,4512	7,4503	0,9	
DENEY NO: 63	NUMUNE 1	7,5185	7,5175	1,0	26/03/2016
	NUMUNE 2	7,4553	7,4542	1,1	
DENEY NO: 64	NUMUNE 1	7,5132	7,5123	0,9	27/03/2016
	NUMUNE 2	7,4515	7,4505	1,0	
DENEY NO: 65	NUMUNE 1	7,5098	7,5090	0,8	27/03/2016
	NUMUNE 2	7,4489	7,4480	0,9	

Çizelge EK A.14. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 1,11 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 14,4 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 80 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±5,1 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 20				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 66	NUMUNE 1	7,5037	7,5025	1,2	27/03/2016
	NUMUNE 2	7,4800	7,4789	1,1	
DENEY NO: 67	NUMUNE 1	7,4609	7,4597	1,2	27/03/2016
	NUMUNE 2	7,4458	7,4447	1,1	
DENEY NO: 68	NUMUNE 1	7,5063	7,5051	1,2	28/03/2016
	NUMUNE 2	7,4467	7,4456	1,1	
DENEY NO: 69	NUMUNE 1	7,4982	7,4972	1,0	28/03/2016
	NUMUNE 2	7,4421	7,4410	1,1	
DENEY NO: 70	NUMUNE 1	7,4443	7,4433	1,0	28/03/2016
	NUMUNE 2	7,5019	7,5008	1,1	

Çizelge EK A.15. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 1,24 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 14,4 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 90 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±3,6 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 30				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 71	NUMUNE 1	7,5004	7,4992	1,2	29/03/2016
	NUMUNE 2	7,4764	7,4751	1,3	
DENEY NO: 72	NUMUNE 1	7,4829	7,4816	1,3	29/03/2016
	NUMUNE 2	7,4047	7,4035	1,2	
DENEY NO: 73	NUMUNE 1	7,4850	7,4838	1,2	29/03/2016
	NUMUNE 2	7,4070	7,4057	1,3	
DENEY NO: 74	NUMUNE 1	7,4740	7,4728	1,2	30/03/2016
	NUMUNE 2	7,3960	7,3948	1,2	
DENEY NO: 75	NUMUNE 1	7,4872	7,4859	1,3	30/03/2016
	NUMUNE 2	7,4192	7,4180	1,2	

Çizelge EK A.16. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 1,67 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 14,4 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 110 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±5,7 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 10				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 76	NUMUNE 1	7,5049	7,5032	1,7	01/04/2016
	NUMUNE 2	7,4824	7,4808	1,6	
DENEY NO: 77	NUMUNE 1	7,4633	7,4616	1,7	01/04/2016
	NUMUNE 2	7,4490	7,4474	1,6	
DENEY NO: 78	NUMUNE 1	7,4539	7,4523	1,6	01/04/2016
	NUMUNE 2	7,5167	7,5149	1,8	
DENEY NO: 79	NUMUNE 1	7,5117	7,5099	1,8	02/04/2016
	NUMUNE 2	7,4505	7,4489	1,6	
DENEY NO: 80	NUMUNE 1	7,4480	7,4464	1,6	02/04/2016
	NUMUNE 2	7,5088	7,5071	1,7	

Çizelge EK A.17. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 1,80 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 14,4 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 120 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±4,6 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 20				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 81	NUMUNE 1	7,4785	7,4767	1,8	02/04/2016
	NUMUNE 2	7,5025	7,5008	1,7	
DENEY NO: 82	NUMUNE 1	7,4438	7,4419	1,9	02/04/2016
	NUMUNE 2	7,4583	7,4565	1,8	
DENEY NO: 83	NUMUNE 1	7,4460	7,4443	1,7	03/04/2016
	NUMUNE 2	7,5048	7,5030	1,8	
DENEY NO: 84	NUMUNE 1	7,4433	7,4415	1,8	03/04/2016
	NUMUNE 2	7,5012	7,4993	1,9	
DENEY NO: 85	NUMUNE 1	7,4416	7,4398	1,8	03/04/2016
	NUMUNE 2	7,4975	7,4957	1,8	

Çizelge EK A.18. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE W <sub>2</sub> C-NiCrBSi kaplama		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 1,95 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 14,4 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 140 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±3,6 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 30				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 86	NUMUNE 1	7,4934	7,4915	1,9	04/04/2016
	NUMUNE 2	7,4729	7,4709	2,0	
DENEY NO: 87	NUMUNE 1	7,4791	7,4772	1,9	04/04/2016
	NUMUNE 2	7,4008	7,3988	2,0	
DENEY NO: 88	NUMUNE 1	7,4809	7,4790	1,9	04/04/2016
	NUMUNE 2	7,4029	7,4009	2,0	
DENEY NO: 89	NUMUNE 1	7,4486	7,4466	2,0	05/04/2016
	NUMUNE 2	7,3706	7,3687	1,9	
DENEY NO: 90	NUMUNE 1	7,4895	7,4876	1,9	05/04/2016
	NUMUNE 2	7,4235	7,4215	2,0	

Çizelge EK A.19. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE AISI 440 C		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 0,17 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,8 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 22 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±8,7 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 10				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 91	NUMUNE 1	7,1685	7,1682	0,3	06/04/2016
	NUMUNE 2	6,9985	6,9983	0,2	
DENEY NO: 92	NUMUNE 1	7,0056	7,0054	0,2	06/04/2016
	NUMUNE 2	7,0203	7,0202	0,1	
DENEY NO: 93	NUMUNE 1	7,1642	7,1641	0,1	06/04/2016
	NUMUNE 2	7,0485	7,0483	0,2	
DENEY NO: 94	NUMUNE 1	6,8506	6,8505	0,1	07/04/2016
	NUMUNE 2	6,9543	6,9541	0,2	
DENEY NO: 95	NUMUNE 1	6,9527	6,9525	0,2	07/04/2016
	NUMUNE 2	6,8486	6,8485	0,1	

Çizelge EK A.20. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE AISI 440 C		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 0,24 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,8 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 31 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±6,6 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 20				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 96	NUMUNE 1	7,0460	7,0458	0,2	08/04/2016
	NUMUNE 2	7,1616	7,1614	0,2	
DENEY NO: 97	NUMUNE 1	7,0190	7,0188	0,2	08/04/2016
	NUMUNE 2	7,0043	7,0040	0,3	
DENEY NO: 98	NUMUNE 1	7,1635	7,1632	0,3	08/04/2016
	NUMUNE 2	6,9930	6,9928	0,2	
DENEY NO: 99	NUMUNE 1	6,8420	6,8418	0,2	09/04/2016
	NUMUNE 2	6,9468	6,9465	0,3	
DENEY NO: 100	NUMUNE 1	6,8468	6,8465	0,3	09/04/2016
	NUMUNE 2	6,9506	6,9504	0,2	

Çizelge EK A.21. 2 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE AISI 440 C		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 0,35 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,8 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 45 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±9,1 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	2 m/s				
KONSANTRASYON	% 30				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 101	NUMUNE 1	7,2191	7,2187	0,4	09/04/2016
	NUMUNE 2	7,0478	7,0476	0,2	
DENEY NO: 102	NUMUNE 1	7,0418	7,0414	0,4	09/04/2016
	NUMUNE 2	7,1590	7,1587	0,3	
DENEY NO: 103	NUMUNE 1	6,8404	6,8400	0,4	10/04/2016
	NUMUNE 2	6,9440	6,9436	0,4	
DENEY NO: 104	NUMUNE 1	6,8414	6,8411	0,3	10/04/2016
	NUMUNE 2	6,9463	6,9459	0,4	
DENEY NO: 105	NUMUNE 1	6,8634	6,8631	0,3	10/04/2016
	NUMUNE 2	6,9583	6,9579	0,4	

Çizelge EK A.22. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 10 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE AISI 440 C		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 0,47 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,8 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 60 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±6,2 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 10				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 106	NUMUNE 1	7,1655	7,1651	0,4	10/04/2016
	NUMUNE 2	6,9952	6,9947	0,5	
DENEY NO: 107	NUMUNE 1	7,0047	7,0042	0,5	10/04/2016
	NUMUNE 2	7,0196	7,0191	0,5	
DENEY NO: 108	NUMUNE 1	7,0480	7,0475	0,5	10/04/2016
	NUMUNE 2	7,1636	7,1631	0,5	
DENEY NO: 109	NUMUNE 1	6,9538	6,9534	0,4	11/04/2016
	NUMUNE 2	6,8498	6,8493	0,5	
DENEY NO: 110	NUMUNE 1	6,8472	6,8468	0,4	11/04/2016
	NUMUNE 2	6,9509	6,9504	0,5	

Çizelge EK A.23. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 20 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE AISI 440 C		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 0,55 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,8 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 71 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±6,8 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 20				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 111	NUMUNE 1	6,9915	6,9910	0,5	12/04/2016
	NUMUNE 2	7,1614	7,1608	0,6	
DENEY NO: 112	NUMUNE 1	7,0039	7,0033	0,6	12/04/2016
	NUMUNE 2	7,0186	7,0181	0,5	
DENEY NO: 113	NUMUNE 1	7,0427	7,0421	0,6	12/04/2016
	NUMUNE 2	7,1602	7,1597	0,5	
DENEY NO: 114	NUMUNE 1	6,9486	6,9480	0,6	14/04/2016
	NUMUNE 2	6,8443	6,8438	0,5	
DENEY NO: 115	NUMUNE 1	6,9470	6,9464	0,6	14/04/2016
	NUMUNE 2	6,8420	6,8415	0,5	

Çizelge EK A.24. 4 m/s partikül çarpma hızı ve % 30 katı konsantrasyon değerinde AISI 440 C martenzitik paslanmaz çelik numunelerine ait deney sonuçları.

NUMUNE AISI 440 C		KÜTLE KAYBI ARİTMETİK ORT.: 0,70 mg, ÖLÇÜLEN ÖZGÜL AĞIRLIK: 7,8 mg/mm <sup>3</sup> , HESAPLANAN HACİMSEL KAYIP: 90 x10 <sup>-3</sup> mm <sup>3</sup> , STANDART SAPMA: ±8,5 x10 <sup>-3</sup> .			
HIZ	4 m/s				
KONSANTRASYON	% 30				
AŞINDIRICI BOYUTU	505 µm(ort.)				
		İLK TARTIM [g]	SON TARTIM [g]	FARK DEĞER [mg]	TARİH
DENEY NO: 116	NUMUNE 1	7,0485	7,0478	0,7	14/04/2016
	NUMUNE 2	7,2198	7,2192	0,6	
DENEY NO: 117	NUMUNE 1	7,1587	7,1580	0,7	14/04/2016
	NUMUNE 2	7,0411	7,0405	0,6	
DENEY NO: 118	NUMUNE 1	6,9431	6,9423	0,8	15/04/2016
	NUMUNE 2	6,8397	6,8390	0,7	
DENEY NO: 119	NUMUNE 1	6,9475	6,9467	0,8	15/04/2016
	NUMUNE 2	6,8408	6,8401	0,7	
DENEY NO: 120	NUMUNE 1	6,8380	6,8373	0,7	15/04/2016
	NUMUNE 2	6,9413	6,9406	0,7	

## ÖZGEÇMİŞ

Recep DEMİRSÖZ 1979 yılında Karabük'te doğdu; ilkokul öğrenimini Karabük D.Ç.50. Yıl ilkokulunda, orta ve lise öğrenimini Karabük Fevzi Çakmak Lisesi'nde tamamladı. 2000 yılında "PEKİYİ" derecesi ile Yıldız Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nden mezun olduktan sonra İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD'nda Yüksek Lisans Eğitimine başladı. 2001 yılında bir yıl süre ile İTÜ Yabancı Diller Yüksek Okulu'nda İngilizce hazırlık okudu. 2002 yılında aynı üniversitenin Makina Mühendisliği Bölümü Konstrüksiyon ABD'na bağlı Teknik Resim ve Transport Tekniği Kürsüsü'nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2004 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamladıktan sonra 2006 yılında görevinden ayrılarak aynı yıl Kardemir A.Ş.'de mühendis olarak çalışmaya başladı. Halen aynı şirkette çalışmakta olup evli ve iki çocuk sahibidir.

### ADRES BİLGİLERİ

Adres : Yenişehir Mahallesi,  
Göktürkler Cad. No. 2/4  
Merkez / KARABÜK

Tel : 0 (370) 418 26 01

Faks : 0 (370) 419 10 48

GSM : 0 (505) 232 81 22

E-posta : [recepdemirsoz@hotmail.com](mailto:recepdemirsoz@hotmail.com), [rdemirsoz@kardemir.com](mailto:rdemirsoz@kardemir.com)