DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK (1.4462) MALZEMENİN FARKLI İLETİM HIZLARINDA EROZİF AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Mehmet Ali KAHRAMAN

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ

DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK (1.4462) MALZEMENİN FARKLI İLETİM HIZLARINDA EROZİF AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Mehmet Ali KAHRAMAN

Tez Danışmanı
Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ

T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK
Haziran 2023

Mehmet Ali KAHRAMAN tarafından hazırlanan "DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK (1.4462) MALZEMENİN FARKLI İLETİM HIZLARINDA EROZİF AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA " başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ .....
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 23/06/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Doç. Dr. Nafiz YAŞAR (DÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ (KBÜ) .....

Üye : Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ (KBÜ) .....

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

Prof. Dr. Müslüm KUZU .....
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Mehmet Ali KAHRAMAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİK (1.4462) MALZEMENİN FARKLI İLETİM HIZLARINDA EROZİF AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Mehmet Ali KAHRAMAN

Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:
Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ
Haziran 2023, 59 sayfa

İhtiyaçlarımıza göre şekillenen teknolojilerin oldukça hızlı bir şekilde ilerlediği açıktır. Bu ilerlemeyi düşündüğümüzde, malzemelerin önemi ve özellikle çelik türevi malzemelerin önemi oldukça büyüktür. Günlük hayatımızın birçok alanında kullanılan çelik, inşaat, konstrüksiyon ve imalat, sağlık, gıda, enerji sektörleri gibi sektörlerde büyük bir rol oynamaktadır. Seçilecek her çeliğin mekanik özellikleri gibi kriterler büyük önem taşımaktadır. Paslanmaz çelik, dünya genelinde yaygın olarak kullanılan bir çelik türüdür ve korozyona dayanımı, geniş sıcaklık aralıklarında çalışabilme, üretilebilirliği, mekanik olarak yüksek dayanımı, kaliteli yüzeye sahip, hijyenik ve kullanım ömrünün uzun olması gibi üstün özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Her ne kadar bu gruba ait malzemelerden yapılmış ekipmanlar veya parçalar aşınmaya maruz kaldığında, ömürleri doğrudan ve olumsuz olarak etkilenmektedir.

Dubleks paslanmaz çelik, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi özellikleri bir arada sunan bir paslanmaz çelik alaşımıdır. Östenitik ve ferritik fazların bir arada olduğu paslanmaz çeliklerdir. Östenitik paslanmaz çelikler, korozyon direnci ve kaynaklanabilirlikleri nedeniyle yaygın olarak kullanılan bir paslanmaz çelik sınıfıdır. Ancak, yüksek sıcaklıklarda ve aşındırıcı ortamlarda dayanıklılıkları düşük olabilir. Ferritik paslanmaz çelikler ise yüksek mukavemetli ve maliyeti düşük bir paslanmaz çelik sınıfıdır. Ancak, korozyon dirençleri östenitik çeliklere kıyasla daha düşüktür. Dubleks paslanmaz çelikler, bu iki farklı paslanmaz çelik sınıfının avantajlarını bir arada sunarak, yüksek mukavemet, korozyon direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı özelliklerini birleştirir. Bu nedenle, özellikle denizaltı, petrol ve gaz endüstrilerinde kullanılan ekipmanlar için ideal bir malzemedir. Ayrıca, rafineri ve kimya endüstrisi gibi zorlu ortamlarda da tercih edilir.

Çamur erozyon çalışması, özellikle petrokimya tesislerinde, hidrolik makinelerde, pompalarda, maden endüstrisinde ve hidroelektrik santrallerinde, vb. aşındırıcı partiküllerin taşınmasıyla ilgili birçok mühendislik uygulamasında hayati öneme sahiptir. Erozyona bağlı arızalar, güvenlik endişelerinin yanı sıra zararlı ekonomik sonuçlara da yol açmakta olup, bunun sonucunda arıza ve bakım maliyetlerini azaltan daha uzun kullanım süresi talebi, pek çok şirket ve araştırmacıyı, güncel uygulamalarda çamur erozyonunu incelemeye motive etmiştir. Bu kapsamda çeşitli çevresel koşullar altında farklı malzemelerin gerçek erozyon durumlarını anlamak için değişik alanlarda çalışma yapılmış ve daha da geliştirilmek üzere çalışmalara devam edilmektedir.

Yapılan bu çalışmada, paslanmaz çeliklerin önemine ve endüstride kullanım alanlarına değinilerek, özellikle 1.4462 dubleks paslanmaz çeliğinin erozif aşınma ortamında deneysel çalışmaları yapılacaktır. Numuneler, Tam Faktoriyel yöntemi oluşturulan deney tasarımına göre çeşitli çarpma açıları (30°,60° ve 90), çarpma hızları (2,5 m/s, 3,5 m/s ve 4,5 m/s) ve sabit partikül konsantrasyonu ile sulu çamur erozif aşınma ortamında 1 saat boyunca uygulanacaktır. Deney sonuçları, 10-4 gram hassasiyetinde olan bir hassas terazi yardımı kütle kaybı ve de yüzey pürüzlülüğü üzerindeki incelenecektir. Ayrıca, aşınma durumları görsel ve elemental olarak SEM, EDX gibi yöntemlerle analiz edilecektir. Bu çalışma, dubleks paslanmaz çeliklerin erozif aşınma

ortamında performanslarının belirlenmesine katkı sağlayabilir ve endüstriyel uygulamalarda malzeme seçiminde yardımcı olabilir.

Anahtar Sözcükler: Dubleks Paslanmaz, AISI 2205, 1.4462, Slurry erozif aşınma

Bilim Kodu **:** 91421

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

A STUDY ON THE EROSIVE WEAR BEHAVIOR OF DUPLEX STAINLESS STEEL (1.4462) AT DIFFERENT TRANSMISSION RATES

Mehmet Ali KAHRAMAN

Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:
Assoc. Prof. Dr. Recep DEMİRSÖZ
June 2023, 59 pages

It is evident that technologies are rapidly advancing to meet our needs. When considering this progress, the importance of materials, especially steel-based materials, is significant. Steel, widely used in many areas of our daily lives, plays a crucial role in sectors such as construction, manufacturing, healthcare, food, and energy. The selection of steel involves crucial criteria, particularly mechanical properties. Stainless steel is a widely used type of steel worldwide, preferred for its superior properties such as corrosion resistance, ability to operate in a wide temperature range, producibility, high mechanical strength, high-quality surface, hygiene, and long service life. However, equipment or components made from these materials are directly and adversely affected when exposed to abrasion.

Duplex stainless steel is a stainless-steel alloy that combines high strength, corrosion resistance, and high-temperature resistance. It consists of austenitic and ferritic phases. Austenitic stainless steels are widely used due to their corrosion resistance and weldability. However, they may have low durability in high temperatures and corrosive environments. Ferritic stainless steels, on the other hand, are a cost-effective class of stainless steel with high strength. However, their corrosion resistance is lower compared to austenitic steels. Duplex stainless steels combine the advantages of these two different stainless-steel classes, offering high strength, corrosion resistance, and high-temperature resistance. Therefore, they are an ideal material, especially for equipment used in industries such as submarines, oil and gas, as well as in challenging environments like refineries and the chemical industry.

Slurry erosion study is of vital importance in many engineering applications related to the transportation of abrasive particles, such as petrochemical plants, hydraulic machinery, pumps, the mining industry, hydroelectric power plants, and more. Erosion-related failures not only raise safety concerns but also result in harmful economic consequences. As a result, the demand for longer service life that reduces failure and maintenance costs has motivated many companies and researchers to investigate slurry erosion in current applications. Various studies have been conducted in different fields to understand the real erosion conditions of different materials under various environmental conditions and continue to be further developed.

In this study, the importance of stainless steels and their industrial applications are discussed, focusing specifically on the experimental investigation of 1.4462 duplex stainless steel in erosive wear conditions. Samples will be subjected to a one-hour exposure in a slurry erosion environment with various impact angles (30°, 60°, and 90°), impact velocities (2.5 m/s, 3.5 m/s, and 4.5 m/s), and constant particle concentration, according to the experimental design created by the Full Factorial method. The experimental results will be analyzed in terms of mass loss and surface roughness with the help of a precision balance with a sensitivity of 10^{-4} grams. Additionally, the wear conditions will be visually and elementally analyzed using

methods such as SEM and EDX. This study can contribute to determining the performance of duplex stainless steels in erosive wear environments and assist in material selection for industrial applications.

Keywords: Duplex Stainless steels, AISI 2205, 1,4462, Slurry erosive wear

Science Code **:** 91421

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince, her an yanımda olan ve bu tez çalışmasının oluşumunda, planlanmasında ve ilerlemesinde özveriyle ilgilenen başta saygıdeğer hocam Sn. Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ'e, ve çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Sn. Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ ve Sn. Ar. Gör. Mehmet Tayyip ÖZDEMİR hocalarıma teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Malzeme tedariğinde destekte bulunan Karçel AŞ Genel Müdürü Sn. Uygar SEZİŞER'e, numunelerin hazırlanmasında destekte bulunan Kardemir Ar-Ge Müdürlüğü personelleri Sn. Dr. Aysun IŞIKGÜL ve Sn. Ali Yağız ŞAHİN'e ve çalışmalarım için gerekli kolaylığı sağlayan Kardemir Endüstri. Etüd Proje Müdürü Sn. Zeren KARAARSLAN'a da ayrıca teşekkürlerimi borç bilirim.

Tüm yaşamım boyunca beni yetiştiren ve bugünlere gelmemi sağlayan sevgili aileme, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyerek gösterdikleri sabır ve destek için tüm kalbimle minnettar olduğumu belirtmek isterim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

KABUL ii
ÖZET iv
ASTRACT vi
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xvi

BÖLÜM 1 1
GİRİŞ 1

BÖLÜM 2 2
PASLANMAZ ÇELİKLER 2
2.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN TARİHÇESİ 3
2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ 3
2.2.1. Çelikhane (Ergitme/Arıtma) 4
2.2.2. Sürekli Döküm 5
2.2.3. Taşlama 5
2.2.4. Sıcak Haddeleme 5
2.2.5. Tavlama ve Asit Banyosu 6
2.2.6. Soğuk Haddeleme 6
2.3. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI 7
2.3.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler 10
2.3.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler 10
2.3.3. Ferritik Paslanmaz Çelikler 11
2.3.4. Çökelmeyle Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler 13

Sayfa

2.3.5. Dubleks Paslanmaz Çelikler 14

BÖLÜM 3 17
AŞINMA 17

3.1. AŞINMA MEKANİZMA ÇEŞİTLERİ 18
3.1.1. Adhezif Aşınma 19
3.1.2. Abrazif Aşınma 20
3.1.3. Erozif Aşınma 21
3.1.3.1. Katı Partikül Erozyonu 22
3.1.3.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu 23
3.1.3.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu 23
3.1.3.4. Kavitasyon Erozyonu 23
3.1.3.5. Elektro Erozyon 24
3.1.4. Korozif Aşınma 24
3.1.5. Yorulma Aşınması 24
3.2. AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ 25
3.2.1. Aşınma Deney Yöntemleri 25
3.2.1.1. Ağırlık Farkı Yöntemi 26
3.2.1.2. Kalınlık Farkı Yöntemi 26
3.2.1.3. İz Değişim Yöntemi 26
3.2.1.4. Radyo İzotop Yöntemi 26
3.2.2. Erozif Aşınma Deney Yöntemleri 27
3.2.2.1. Katı Partikül Erozyonu Deney Yöntemleri 27
3.2.2.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu Deney Yöntemleri 28
3.2.2.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu Deney Yöntemleri 29
3.2.2.4. Kavitasyon Erozyonu Deney Yöntemleri 30

BÖLÜM 4 31
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 31

Sayfa

BÖLÜM 5 35
MATERYAL ve METOT 35
5.1. AŞINDIRICI PARTİKÜL HAZIRLANMASI 36
5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI 37
5.3. TAM FAKTORİYEL DENEY UYGULAMASI 38
5.4. SULU-ÇAMUR (SLURRY) EROZİF AŞINMA DENEYLERİ 38
5.5. EDX ANALİZİ 42

BÖLÜM 6 43
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA 43
6.1. AŞINDIRICI PARTİKÜL ÇARPMA HIZI ve NUMUNE BAĞLAMA AÇI PARAMETRELERİNİN AŞINMA YÜZEYLERİ ve MİKTARLARINA ETKİSİ 44
6.2. KÜTLE KAYBI 47
6.3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ 51

BÖLÜM 7 53
SONUÇLAR ve ÖNERİLER 53

KAYNAKLAR 55

ÖZGEÇMİŞ 58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Paslanmaz çelik üretiminin aşamaları 4
Şekil 2.2. Schaeffler ve Delong Diyagramı 8
Şekil 2.3. Paslanmaz çelikler için Ni-Cr miktarları 9
Şekil 2.4. Paslanmaz çelikler mikro yapıları 9
Şekil 2.5. Ferritik paslanmaz çelik mikro yapısı 12
Şekil 2.6. Ferritik paslanmaz çelik çeşitleri 12
Şekil 2.7. Çökelmeyle sertleştirilebilen paslanmaz çelikler 13
Şekil 2.8. Dubleks paslanmaz çelik mikro yapısı 15
Şekil 3.1. Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi (DIN 50320) 18
Şekil 3.2. Adhezif aşınma oluşumu şematik gösterimi 19
Şekil 3.3. Abrazif aşınma mekanizmaları şematik gösterimi 18
Şekil 3.4. Abrazif aşınma oluşumu ve çeşitlerinin şematik gösterimi 21
Şekil 3.5. Olası Erozif aşınma mekanizmaları 22
Şekil 3.6. Katı partikül erozyon deney düzeneklerinin şematik gösterimi 27
Şekil 3.7. Sıvı (Su) damlası erozyonu deney düzeneğine ait şematik gösterim 28
Şekil 3.8. Sulu çamur erozyonunda kullanılan deney düzeneklerine ait şematik gösterim 29
Şekil 3.9. Kavitasyon erozyonu deney düzeneklerine ait şematik gösterim 30
Şekil 5.1. Aşındırıcı SiO2 kuma ait elde edilen SEM görüntüleri 37
Şekil 5.2. Kardemir Arge Laboratuvarı zımpara makinesi ve zımparalanmış numuneler 38
Şekil 5.3. Erozif aşınma deney düzeneğine ait şematik görsel ve fotoğrafı 40
Şekil 5.4. Erozif aşınma deney düzeneği hazne kesitinin şematik görseli. 40
Şekil 5.5. a) 512,5 µm elenmiş aşındırıcı kum b) 0,600 mm endüstriyel elek c) 0,425 mm endüstriyel elek d) 10-4 gram hassas terazi 41
Şekil 5.6. Slurry erozif aşınma uygulaması ait şematik gösterim 42
Şekil 5.7. 9 numaralı deney numunelerine ait EDX analizi ve görüntüsü 43
Şekil 6.1. Hız ve açı değerlerine göre kütle kaybı değerleri 45
Şekil 6.2. 90º açısındaki aşınma durumu a)2,5 m/s- numune 1 b) 3,5 m/s - numune 3 c) 4,5 m/s - numune 5 45

Sayfa

Şekil 6.3. 60º açısındaki aşınma durumu a) 2,5 m/s- numune 13 b) 3,5 m/s -numune 15 c) 4,5 m/s - numune 17 47

Şekil 6.4. 30o numune açısındaki aşınma durumu g) 2,5 m/s- numune 7 h) 3,5 m/s- numune 9 i) 4,5 m/s- numune 11i 48

Şekil 6.5. 90o açı değerlerine göre kütle kaybı değerleri 49

Şekil 6.6. 60o açı değerlerine göre kütle kaybı değerleri 50

Şekil 6.7. 30o açı değerlerine göre kütle kaybı değerleri 51

Şekil 6.8. Hız ve açıya bağlı yüzey pürüzlülüğü değişimi 52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 5.1. Aşındırıcı SiO2 kumun kimyasal kompozisyonu. 37
Çizelge 5.2. AISI 2205 numuneye ait kimyasal kompozisyonlar ve sertlik dereceleri 38
Çizelge 5.3. Tam Faktoriyel deney tasarımı. 42
Çizelge 5.4. AISI 2205 numuneye ait EDX sonuçları 43
Çizelge 6.1. Tam Faktoriyel Deneysel sonuçları 44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

AC : Alternative Current
Al : Alüminyum
Al_2O_3 : Alüminyum Oksit
Ar : Argon
C : Karbon
Cm^3 : Santimetre Küp
Cr : Krom
Cu : Bakır
G/mol : Birim Moldeki Gram
HV : Vickers
H_2 : Hidrojen
H_2O : Su
Kg : Kilogram
KW : Kilowatt
Mg : Miligram
Mm : Milimetre
Mn : Mangan
Mo : Molibden
MPa : Megapaskal
M/s : Metre/Saniye
N : Azot
Nb : Niyobyum
NH_4Cl : Amonyum Klorür
Ni : Nikel

P : Fosfor

S : Potasyum

Si : Silisyum

SiC : Silisyum Karbür

SiO_2: : Silisyum Oksit

Ta : Tantal

Ti : Titanyum

V : Vanadyum

µm : Mikrometre

% : Yüzde

°C : Santigrat Derece

α : Alfa

KISALTMALAR

A	: Çarpma Açısı
ABD	: Anabilim Dalı
AISI	: American Iron and Steel Institue (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DIN	: Deutsche Institute für Normungen (Alman Standartları Enstitüsü)
EDX	: Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-Işını)
H	: Çarpma Hızı
K	: Konsantrasyon
KK	: Kütle Kaybı
PRE	: Oyuklanma Direnci
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopu)
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
YP	: Yüzey Pürüzlülüğü

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Paslanmaz çelikler, yapısında en az %11 krom bulunan ve elastik, sıkı, şeffaf ve ince yapılı oksit tabakasıyla yüzeylerinde koruma sağlayan bir tür çeliktir. Bu tabaka, asıl malzeme ile çevre ortamı arasındaki reaksiyonları engeller. Paslanmaz çelikler, diğer çelik türlerine kıyasla daha yüksek maliyetlidir, ancak uzun kullanım süreleri ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle uzun vadede daha ekonomik bir seçenektir [6] Paslanmaz çelikler yüksek korozyon direncine sahip olsa da aşınma direncinde aynı seviyede başarı gösteremez. Aşınma, iki yüzeyin temasıyla kaynaklanan çarpma, kayma veya yuvarlanma hareketleri sonucu parça kopması ve kütle kaybıyla karakterize olur [17]. Aşınma genellikle istenmeyen olumsuz bir durum olup triboloji bilimi tarafından incelenir. Aşınma, abrazif, adhezif, erozif, korozif ve yorulma aşınması gibi beş farklı kategoriye ayrılır. Bu çalışma, erozif aşınmanın bir türüne odaklanmakta olup, sıvı veya gaz akışkan içinde farklı boyutlarda aşındırıcı parçaların devamlı olarak katı yüzeylere darbe uygulamasıyla malzeme yüzeyinden parça kopmasını ve kütle kaybını içerir [35] Sulu-çamur erozif aşınma ise akışkan (sıvı veya gaz) içinde hız düşük olsa bile, içeriğindeki aşındırıcı katı partiküllerin yüzeye tekrarlı darbelerle parça koparmasına ve dolayısıyla kütle kaybına neden olur.

Sulu-çamur erozif aşınma, bir dizi parametreye bağlıdır. Bu parametreler arasında partikül çarpma hızı ve çarpma açısı ile akışkan içinde bulunan aşındırıcı partikül konsantrasyonu, boyutu ve geometrisi bulunur. Yapılan çalışmalar, partikül boyutuyla aşınmanın miktarı arasında doğrudan bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur.

BÖLÜM 2

PASLANMAZ ÇELİKLER

Paslanmaz çelikler, Korozif ortamlarda kullanım için, alaşımsız ve az alaşımlı çeliklere göre daha yüksek korozyon direncine sahip olması sebebiyle tercih edilir. Paslanmaz çelikler ayrıca, geniş bir mekanik özellik yelpazesine sahip, geniş sıcaklık aralıklarında kullanılabilen, şekil verilebilmesi yüksek ve estetik açıdan da uygun olan özellikleri barındıran malzemelerdir [1]

Oksitlenme sebebiyle oluşan kimyasal reaksiyon sonucu çeliklerin ve demir alaşımlarının yüzeyinde paslanma meydana gelmektedir. Paslanmaz çeliklerdeki krom miktarı ile korozyon direnci ile doğru orantılıdır. Kromun asallığı, demire göre elektrokimyasal gerilim serisine göre daha azdır. Krom içeren metal yüzeyleri, kromla kaplanmadığında oksidasyon ve korozyona aşırı duyarlıdır ve bu durum "aktif" olarak adlandırılmakta olup, “Pasif” olan diğer bir durumdaysa malzemenin yüzeylerinin bütünüyle krom ile kaplanması sonucunda korozyona dirençli hale gelmektedir. Ancak, pasiflik durumu, çevre koşullarına ve paslanmaz çeliğin hangi türde bir bileşime sahip olduğuna bağlı olarak değişkenlik gösterir. Korozyonun herhangi bir şekilde engellenmesine yönelik kurgulama yapılsa bile, korozyon yavaşça ilerlemektedir. Pasiflik durumu, uygun şartlar sağlanamaz ve krom tabakanın yitirilmesi sonucu paslanmaz çelik normal karbonlu ve az alaşımlı hale dönebilir ve aktif hale gelen yüzeyler tekrar korozyona maruz kalabilir [1].

Paslanmaz çelikler, korozyon direnci sağlayan krom tabakası sayesinde yapısal olarak %10,5 veya daha fazla krom miktarı ve %1,2 veya daha az karbon miktarı içeren, kendiliğinden pasifleşen, estetik, ısıl dirençli, düşük maliyetli, geri dönüştürülebilir, biyolojik olarak nötr, temizlenmesi kolay, mukavemet/ağırlık oranı gibi çok sayıda özelliği nedeniyle tercih edilmektedir [1].

Korozif ortamlarda kullanılmak için paslanmaz çelikler tercih edilmesinin bir diğer nedenleri ise korozif dayanımlarının, alaşımsız ve de az alaşımlı olan çeliklere göre daha iyi olmasıdır.[1].

2.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN TARİHÇESİ

20. yüzyılın başlarında, demir-karbon etkileşimine dair yapılan araştırmalar ve keşifler sayesinde metalürji sektörü kurallarına uygun olarak uygulanmaya başladı. General Electric Company, 1911 yılında filament üretiminde kullanmak için %14-16 aralığında krom alaşımı kullandı. Harry Brearley ise yakın tarihlerde %12,8 krom içeren Fe-Cr alaşımları kullanarak korozyona karşı daha dirençli malzemeler üretti. Brearley, yaptığı deneyler sonucunda %12'den fazla krom ihtiva eden malzemelerin daha fazla korozif dirence sahip olduğunu tespit etmesi ile beraber, bu çalışmalarıyla paslanmaz çeliğin geliştirilmesine öncülük etmiştir [2].

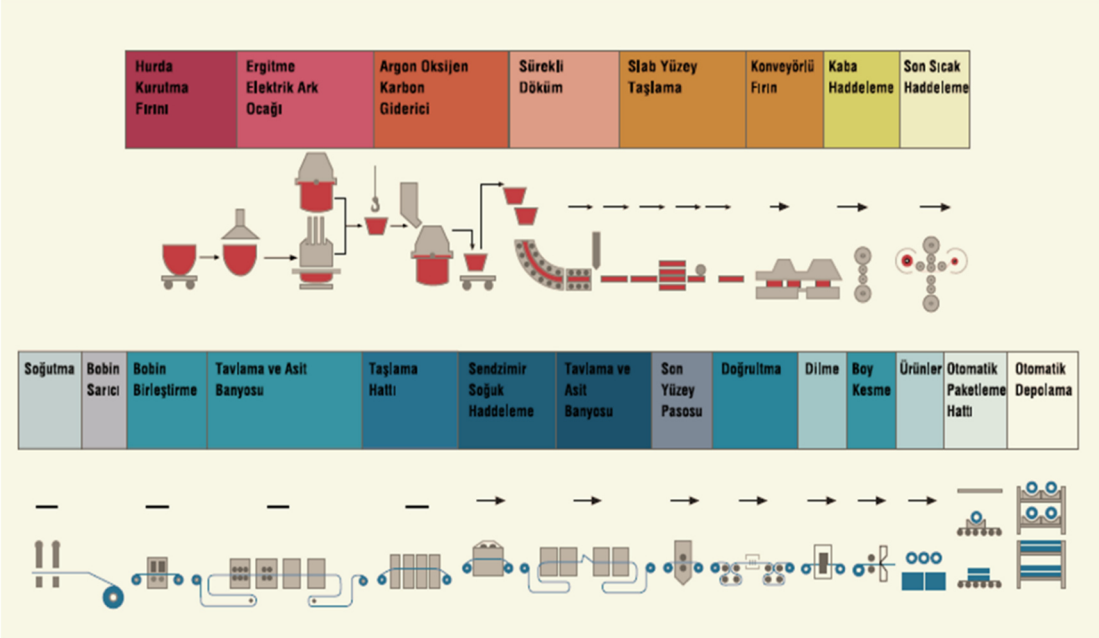
Eduard, Maurer ve Benno Strauss, 1912 yılında asitlere karşı dirençli olabilen alaşımların östenit yapıda olduğunu keşfettiler. Paslanmaz çelik, üretim teknolojilerinin ilerlemesi ve kullanım alanının artması sayesinde kimya endüstrisinde geniş bir alanda kullanılmaya başlandı [2)].

II. Dünya Savaşı sonrasında, alaşımlarda kullanılan nikel elementinin temin edilememesi sonucunda, mangan ve azot alaşımları kullanılarak AISI 200 adı verilen bir paslanmaz çelik serisi üretildi. Daha sonra ise farklı ihtiyaçlara yönelik olarak karbon ve azot oranı azaltılmış dubleks ferritik ile süper östenitik paslanmaz çelikler geliştirilmiştir. [2].

2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN ÜRETİMİ

Paslanmaz çelik üretimi, önemli ölçüde yatırım ve ileri teknoloji bilgi birikimi gerektiren bir teknolojidir. Bu çeliklerin ergitilmesi ve rafine edilmesi esas olarak "Elektrik Ark Ocağı (EAF)/Argon-Oksijen Dekarbürizasyon (AOD)" prosesleriyle gerçekleştirilir. Bu yöntem, 1970'lerde geliştirilmiş olup dünya genelinde üretiminin %80'ini gerçekleştirme imkanı sağlamıştır. Bu yöntem sayesinde üretim maliyetleri

düşürülebilmiş ve kalite seviyesi artırılmıştır. Üretim adımları şekil 2.1'de şematize edilmiştir.



Şekil 2.1 Paslanmaz çelik üretiminin aşamaları [3].

2.2.1. Çelikhane (Ergitme/Arıtma)

Ergitme işlemi için paslanmaz çelik ve karbon çelik hurdası, ferrokrom alaşımları ve ihtiyaç halinde nikel ve molibden gibi alaşım elementleri, uygun bazik astarlı elektrik ark ocağına dikkatlice yüklenir. Tartımı yapılan malzemeler özel kasalar ile çelikhaneye taşınır ve konvertere konulmadan önce belirli bir süre kurutulmak amacıyla fırınında tutulurlar. Sonrasında, alaşımlanma işleminin de gerçekleştirildiği elektrik ark ocağında ergitilir. Bu üretim sürecinde, büyük önem arz eden adım "Argon Oksijen Karbür Gidericisi" (AOD) adı verilen aşamadır. Bu aşamada paslanmaz çelik, istenen kimyasal bileşime adım adım getirilir. İlk olarak proseste kullanılacak olan gazlar olan oksijen ve argon, hazırlanan eriyiğe yanlardan ve üst taraftan enjekte edilir. Söz konusu aşamada alaşımın içerdiği karbon miktarı gerektiğinde %0,02'ye kadar düşürülerek karbür giderme işlemi gerçekleştirilir. Krom, oksidasyon konusunda hassas olması nedeniyle, bu süreçte içeriğindeki kromun bir kısmının cüruf bünyesine geçmesi gerçekleşebilir. Bu nedenle, kromun alaşıma katılması genellikle karbür giderme işlemi tamamlandıktan sonra yapılır. Sonraki aşamada, alaşım içerisindeki

kükürt oranının azaltılması sağlanır. İstenen bileşim ve sıcaklık seviyelerine ulaşıldığında, eriyik döküm potasına aktarılarak son düzenlemeler yapılır. Bu aşamada, bazı elementler alaşıma eklenir ve eriyiğin homojenleştirilmesi, argon gazı üflenmek suretiyle sağlanır [3].

2.2.2. Sürekli Döküm

İstenilen özelliklerde hazırlanan alaşım, sonrasında bir pota vasıtası ile katılaşmanın sağlandığı, soğutması su ile yapılan bir bakır kalıp içinden geçirilir. Kalıpta katı forma ulaşan yassı kütük (slab), kademeli (bükme ve düzeltme) merdanelerinin bulunduğu bölüme sevk edilir. Bu aşamada malzemenin alev ile kesilerek istenen boyuta ayarlanması sağlanır. Bu sayede çeliklerin kesintisiz olarak slab (yassı kütük) formunda dökülmesi mümkün hale gelir [3]

2.2.3. Taşlama

Döküm esnasında slabların yüzeylerinde çeşitli kusurların oluşumu ortaya çıkabilmektedir. Soğuması beklenen yassı formdaki kütüklerin kusurlu yüzeyleri değişik boyutlardaki taşlama tezgahlarında, lokal ya da yüzeyin tamamını taşlayacak şekilde giderilir [3].

2.2.4. Sıcak Haddeleme

Sıcak haddeleme işlemi öncesinde ilk olarak, slabların tav fırınında ve koruyucu ortamda 1250°C sıcaklığa ısıtılması sağlanır. Akabinde kaba haddeleme işlemi ile slabların kalınlığı yaklaşık 25mm'ye kadar indirilir. Yapılan işlem sonrasında malzeme 1100°C civarında sıcaklığa sahiptir [3].

Kaba haddeleme işlemi sonucunda uzayan yassı ürün, dairesel bobin şeklinde sarılır. İleri-geri haddeleme işlemleri kullanılarak malzemenin kademeli şekilde inceltilmesi sağlanır. Rulo sarıcılar, 950°C sıcaklıkta özel tav fırınlarının içerisine yerleştirilmiştir. Farklı merdane gruplarıyla gerçekleştirilen bu işlem, kalınlığın hassas bir şekilde kontrol edildiği bir süreçtir. Malzeme, istenen kalınlığın sağlandığı son paso sonrasında sıcak durumda olan sac, bir soğutucu içinden geçirilmek suretiyle rulo

sarıcıya beslenir. Paslanmaz çeliklerin genellikle sıcak haddeleme akabinde pazarlandığı nadir durumlar vardır, bu nedenle sıcak haddeleme ile elde edilen yarı mamul genellikle soğuk haddeleme ünitesine aktarılır. Sıcak haddeleme sonrasında yapılması gereken işlemler arasında malzemelerin kontrolü edilmesi, kısa ruloların uçlarının birleştirilmesi suretiyle daha büyük boyutlarda rulo oluşturulmasının sağlanması ve gerektiğinde şerit kenar düzeltme işlemi bulunur. Sıcak haddelemede son olarak iç yapısının homojenleştirilmesi ve malzemenin yumuşatılması için tavlama ısıl işlemi uygulanır ve de yüzeylerin temizlenmesi için asit banyosu işlemi gerçekleştirilir [3].

2.2.5. Tavlama ve Asit Banyosu

Bu işlemler ardışık üretim hatlarında gerçekleştirilir. Bu hatlar sırasıyla fırınlar, kumlama üniteleri ve asit banyosu ünitelerinden oluşur. Malzeme yüzeyinin artık malzemelerden arındırılması ve arzulanan yüzey özelliğinin elde edilmesi için, soğuk haddeleme öncesi süreçte olduğu gibi sıcak haddeleme için satışa sunulacak malzeme için de asit banyosunda gerçekleştirilir. Malzemenin Soğuk haddeleme prosesi öncesinde yapılması gereken son işlem, sıcak haddeleme ve diğer işlemlerden kaynaklanan yüzeyde oluşabilen kusurlarının taşlama hattında giderilmesidir. Ayrıca, satılacak sıcak haddeleme ürünü, kullanıcı taleplerine göre yüzey özelliklerini elde etmek için parlatılabilir [3].

2.2.6. Soğuk Haddeleme

Bir sonraki aşama olan Soğuk haddeleme sürecinde, paslanmaz çelik sacın ileri-geri hareket edebilen bir hadde tezgahında ardışık olarak uygulanması ile pasolarla inceltilerek kalınlığının %80'e kadar azaltılmasını sağlayabilmektedir. Daha fazla incelme gerektiğinde, ara bir tavlamadan sonra yüzeyin yeniden asit banyosunda temizlenme işleminin yinelenmesi ve ardından haddeleme işlemine devamı gerekmektedir. Soğuk haddeleme işlemi bittiğinde, sıcak haddelemede olduğu gibi tekrardan tavlamaya ve asit banyosuna ihtiyaç duyulur. Asit banyosundan sonra, ikili merdane tertibatına sahip bir tezgâhta çok küçük bir paso ile son haddeleme işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada, şeridin düzgünlüğü ve yüzey özellikleri istenilen

seviyeye getirilmeye çalışılır. Bazı durumlarda, bilhassa 0,5-2,0 mm aralığındaki saclar için gerdirmeli kalınlık ayarı (tension leveling) özel tezgahlar kullanılır ve kalitenin daha da iyileştirilmesi sağlanır. Paslanmaz çelikler, rulo halinde veya istenilen boy ve genişlikte kesilerek ya da dilinerek, dar boyut toleranslarıyla satışa sunulur. Aynı zamanda, servis merkezleri, özel tezgahlarla donatılarak talep edilen yüzey kalitesini sağlama imkanına sahiptir. [3].

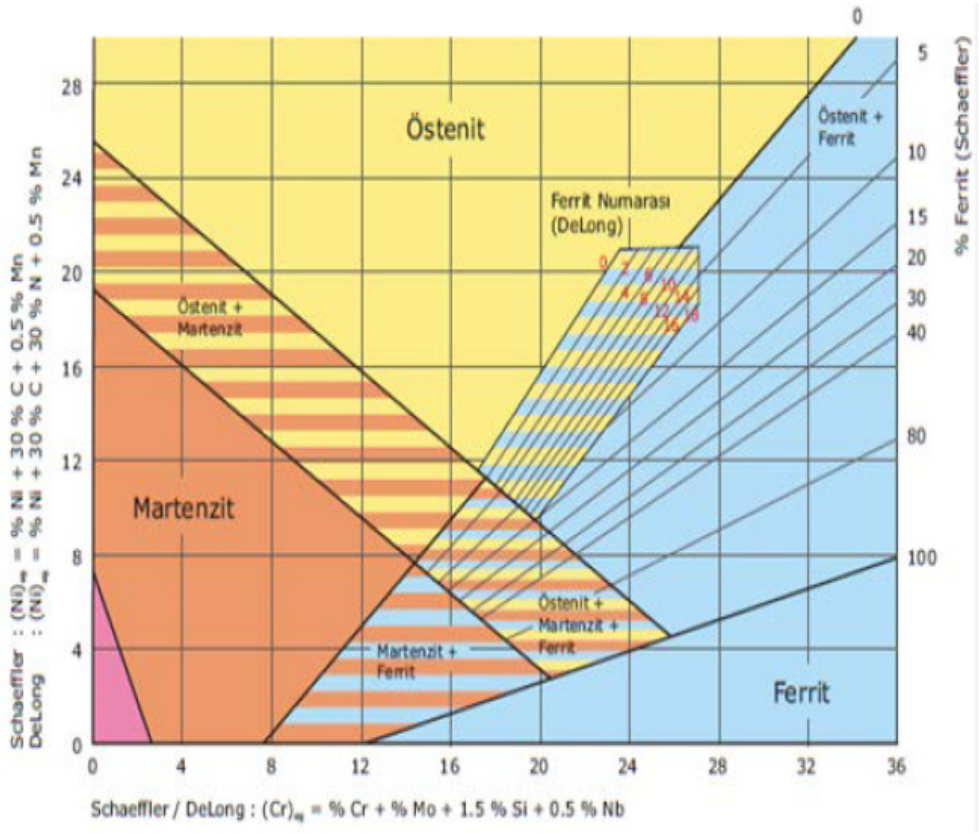
2.3. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Paslanmaz çeliklerin sınıflandırılmasında, mikro yapılarındaki metalürjik çeşitlilik nedeniyle östenitik, martenzitik, ferritik, dubleks ve çökelmeyle sertleşebilen paslanmaz çelikler olmak sureti ile beş kategori bulunmaktadır. Bu çeliklerin birbirleri ile arasındaki ilişki, krom ve nikel gibi ana elementlerin kütlece yüzdesel oranlarının farklılıklarına dayanmaktadır.

Gruplandırmada Schaeffler ve Delong Diyagramı, Şekil 2.2'de gösterildiği şekliyle kullanılmaktadır. Bu diyagramda, bilinen malzemenin kimyasal bileşimiyle Creş ve Nieş değerleri hesaplanır (2.1 ve 2.2 denklemleri kullanılarak), ve bu değerler kullanılarak diyagram çizilir. Creş değerinin artmasıyla yapı ferritik özellik kazanırken, Nieş değerinin artması ile östenitik özellik kazanır. Bu diyagram temelinde, Cr, Mo, Si ve Nb alaşım elementleri ferritlik sağlayıcı olarak tanımlanırken, Ni, C, N ve Mn elementleri ise östenitlik sağlayıcı olarak tanımlanır. Uygun alaşım elementlerinin kullanımıyla istenen özelliklere sahip paslanmaz çelik türleri elde edilebilir. [4].

$$Creş = \%Cr + \%Mo + 1{,}5.\%Si + 0{,}5.Nb \quad (2.1)$$

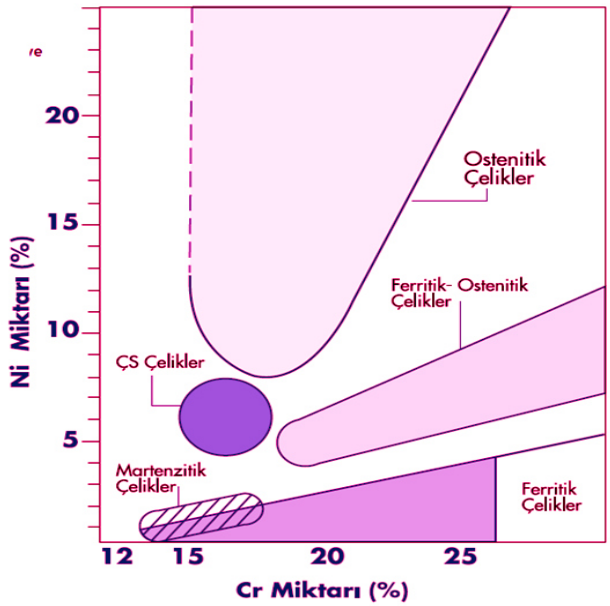
$$Nieş = \%Ni + 30.\%C + 30.\%N + 0{,}5.\%Mn \quad (2.2)$$



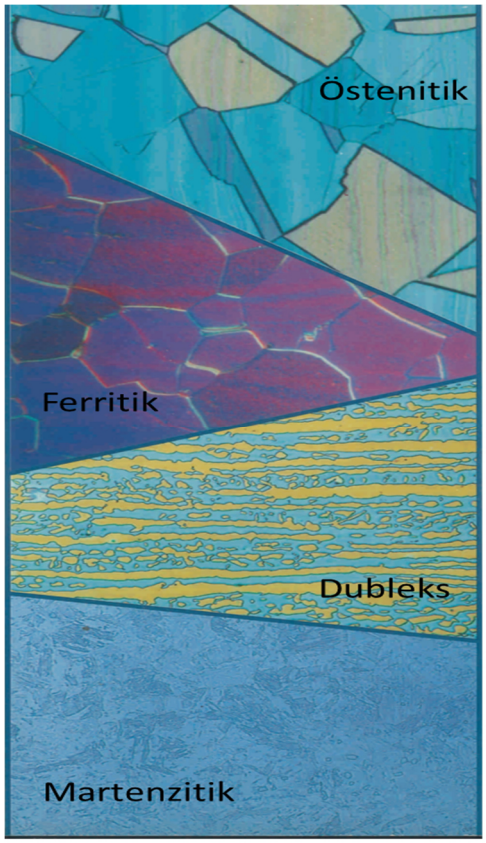
Şekil 2.2 Schaeffler ve Delong Diyagramı [4]

Paslanmaz çelikler, mikro yapılarındaki metalürjik farklar nedeniyle östenitik, martenzitik, ferritik, dubleks ve çökelmeyle sertleşebilen paslanmaz çelikler olmak üzere beş farklı kategoriye ayrılmıştır. Bu kategorizasyon, çeliklerin oda sıcaklığında sahip oldukları mikro yapıdaki farklılıklara dayanmaktadır. Paslanmaz çelikler arasındaki söz konusu farklılıklar, bu çeliklerin ihtiva ettiği ana element olan krom ve nikel elementlerinin kütlece yüzdesel oranlarındaki farklılıklara bağlıdır [5]. Şekil 2.3, çeşitli paslanmaz çeliklerin içerdikleri Ni-Cr miktarlarını göstermekte olup, Şekil 2.4 ise paslanmaz çeliklerin mikro yapılarının şematik gösterimini sunmaktadır.

1. Östenitik Paslanmaz Çelikler
2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler
3. Ferritik Paslanmaz Çelikler
4. Dubleks Paslanmaz Çelikler
5. Çökelmeyle Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler



Şekil 2.3. Paslanmaz çelikler için Ni-Cr miktarları [6].



Şekil 2.4. Paslanmaz çelikler mikro yapıları [3].

2.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, diğer paslanmaz çeliklere göre en yaygın kullanılan ve tanınan türleridir. Manyetik olmama özelliği en kolay tanınan özelliğidir. Çok iyi şekillendirilebilir, kaynaklanabilirler ve kriyojenik sıcaklıklardan fırın ve jet motorlarının kızıl sıcaklıklarına kadar başarılı bir şekilde kullanılabilirler. Yaklaşık %16 ila 25 krom içerirler ve ayrıca çözeltide nitrojen içerebilirler. Her ikisi de yüksek korozyon direncine katkıda bulunur [7].

Östenitik paslanmaz çelikler, korozyon direnci açısından ön planda olan ve yapısı korunacak şekilde üretilen çeliklerdir. Bu çelikler, her türlü korozyona maruz kalabilecek ortamlarda kullanılmak üzere tasarlanmıştır. Ayrıca, düşük sıcaklık koşullarından 600 °C'ye kadar yüksek tokluk seviyesini koruyabilmektedirler [8].

Östenitik paslanmaz çeliklerin başlıca özellikleri şunlardır:

- Yüksek korozif dayanıma sahiptirler.
- Yüksek Kaynaklanabilirlik kabiliyeti bulunur.
- Yüksek süneklik ve tokluk özellik ihtiva ederler.
- Manyetik değildirler.
- Yalnızca soğuk deformasyonla dayanımları artırılabilir.

Bu çeliklerin başlıca kullanım alanları şunlardır:

- Makine ve imalat sanayi.
- Asansör sistemleri.
- Mimari uygulamalar.
- Gıda Endüstrisi ekipmanları vb [4].

2.2.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik türdeki paslanmaz çelikler, %0,1'den fazla karbon (C) içeriği ve %11-17 arasında krom (Cr) içeriği olan paslanmaz çelik çeşididir. Bu çelik türleri, 950-1050°C arasındaki östenitleme sıcaklığında bekletildiğinde iç yapıları östenitik olur. Bu östenitik yapının su verme prosesine tabi tutulması halinde, oda sıcaklığında

martenzitik yapıya dönüşür. Bu dönüşüm sayesinde yüksek sertlik ve mekanik dayanım elde edilir. Martenzitik paslanmaz çeliklerin bazı özellikleri şunlardır:

- Orta düzeyde korozyona dayanıklıdırlar.
- Isıl işlem uygulanabilirse yüksek mukavemet ve sertlik sağlanabilir.
- Kaynak edilebilme yetenekleri sınırlıdır.
- Manyetik özellik gösterirler.

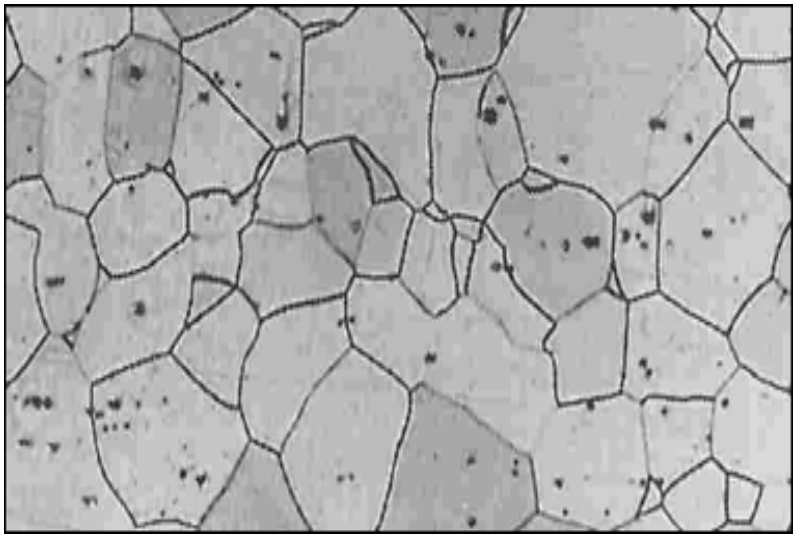
Martenzitik paslanmaz çelikler, yüksek sertlik ve mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilen çelik türleri arasında yer almaktadır [6].

2.2.3. Ferritik Paslanmaz Çelikler

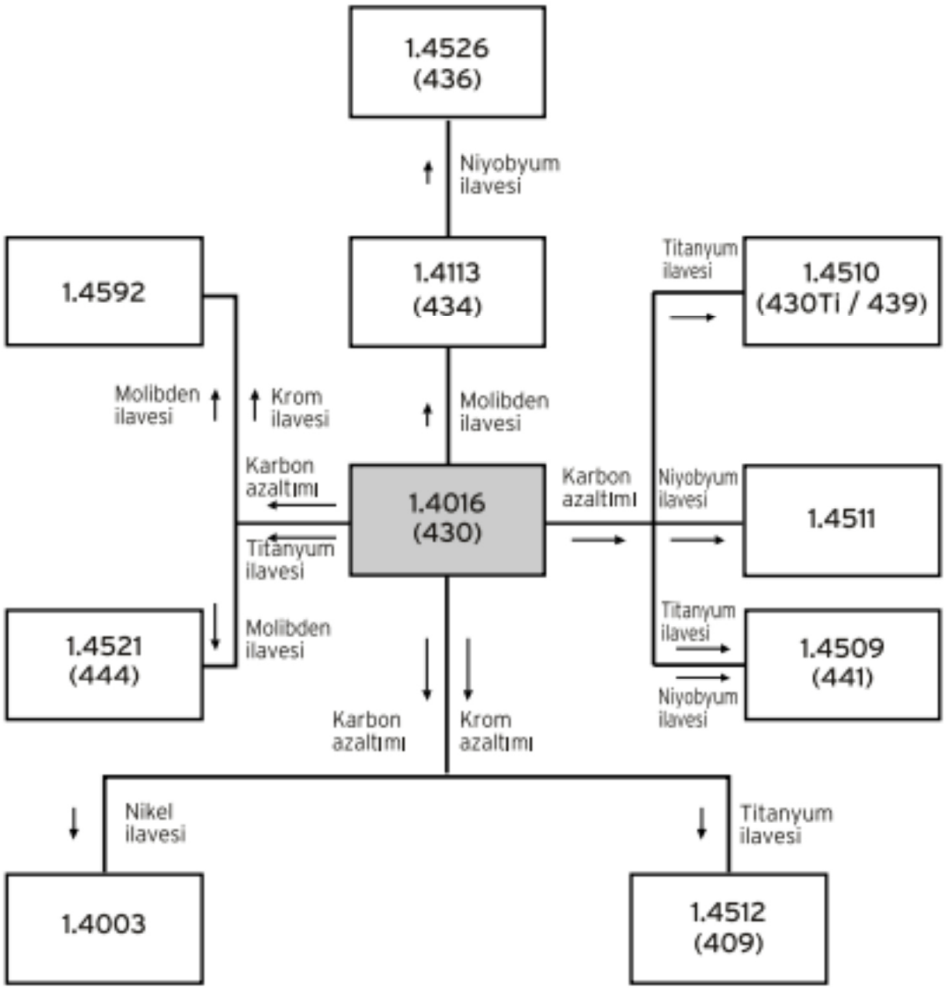
Ferritik paslanmaz çelikler, %12-30 krom (Cr) ve yaklaşık %0,12 karbon (C) içeriğine sahip olan paslanmaz çelik türleridir. Bu çelikler, maliyet açısından östenitik paslanmaz çeliklere göre daha ekonomiktir ve mühendislik alanında geniş bir kullanım alanına sahiptir. Düşük maliyetlerinin bir nedeni, nikel ihtiva eden paslanmaz çeliklere benzer şekilde korozyon direncine sahip olmalarına rağmen yapısında nikel içermemesidir. Ferritik paslanmaz çelikler, hacim merkezli kübik yapıya (YMK) sahiptirler. Literatürde ısıl işlem uygulanamayan malzemeler olarak bilinirler çünkü ısıl işlem sırasında faz dönüşümüne tabi tutulmazlar ve yapıları ferritik olarak kalır.

Ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırıldığında şekillendirilebilme yetenekleri daha sınırlıdır. Kaynak edilebilme yetenekleri zayıf, süneklik seviyeleri düşük ve manyetik özellik gösterirler. Bu tür çelikler, az miktarda karbon eklenerek yüksek sıcaklıklarda su verme işlemine tabi tutulduklarında sertleştirilebilme özelliğine sahiptirler.

Ferritik paslanmaz çeliklerin mikro yapısının şematik gösterimi Şekil 2.5'te sunulmaktadır. Bu çelik türleri, mühendislik uygulamalarında kullanılan ve ısıl işlem gerektirmeyen bir alternatif olarak yaygın bir şekilde tercih edilen paslanmaz çelikler arasında yer almaktadır [9].



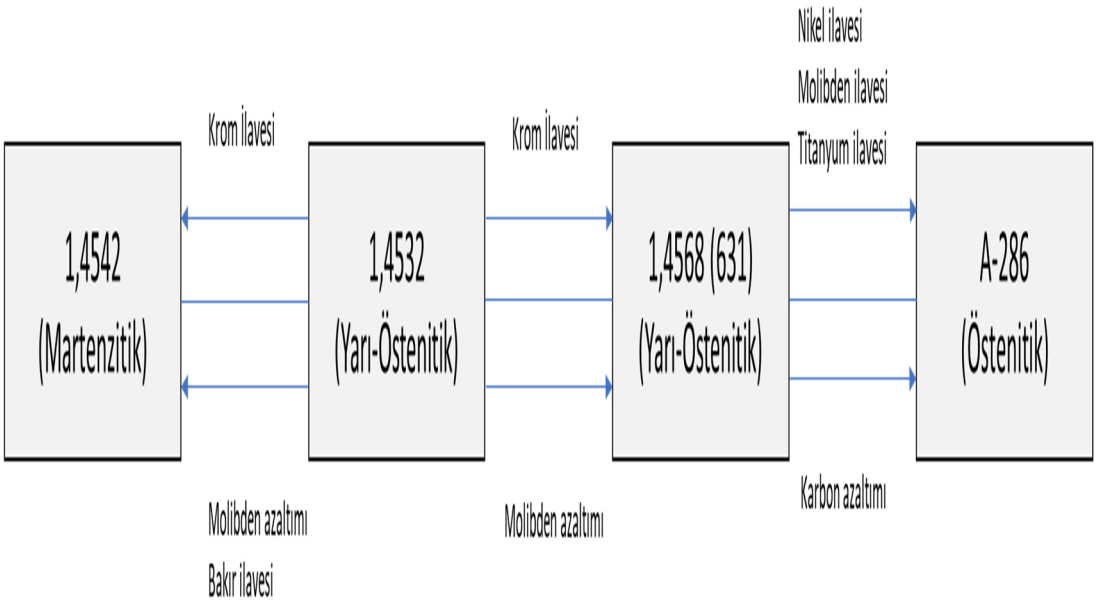
Şekil 2.5. Ferritik paslanmaz çelik mikro yapısı [2].



Şekil 2.6. Ferritik paslanmaz çelik çeşitleri [2].

2.2.4 Çökelmeyle Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler

Çökelme sertleşmesi veya diğer adıyla yaşlandırma prosesi uygulanarak sertleştirilebilen paslanmaz çelikler, ismin bu proseslerden alarak çökelmeyle sertleştirilebilen paslanmaz çelikler olarak bilinirler. Bu paslanmaz çelikler östenitik, yarı östenitik ve martenzitik olmak üzere üç ayrı gruba ayrılmıştır. Çökelmeyle sertleştirilebilen paslanmaz çelikler, yapılarında çok az miktarda karbon bulundurmaları sebebiyle temel sertleştirme işlemi çökelme yöntemiyle gerçekleştirilir. Alüminyum, titanyum, niyobyum ve bakır elementleri alaşımlarında kullanılarak çökeltiler oluşturulur. Bu paslanmaz çelikler tokluk ve süneklik açısından iyi bir performans sergilerken, korozyon direnci orta seviyededir. Akma dayanımları 1700 MPa 'ye kadar çıkabilen bu paslanmaz çelikler, soğuk şekillendirme işleminden sonra yapılan bir yaşlandırma işlemiyle daha da yüksek akma dayanımlarına ulaşabilirler. Çeşitli Endüstrilerde en yaygın olarak kullanılan 630 kalite paslanmaz çelikler, genellikle havacılık ve uzay endüstrisi ile başka teknolojik alanlarda kullanılır. Şekil 2.7'te çökelmeyle sertleştirilebilen paslanmaz çeliklere ait şematik gösterimi yer almaktadır.



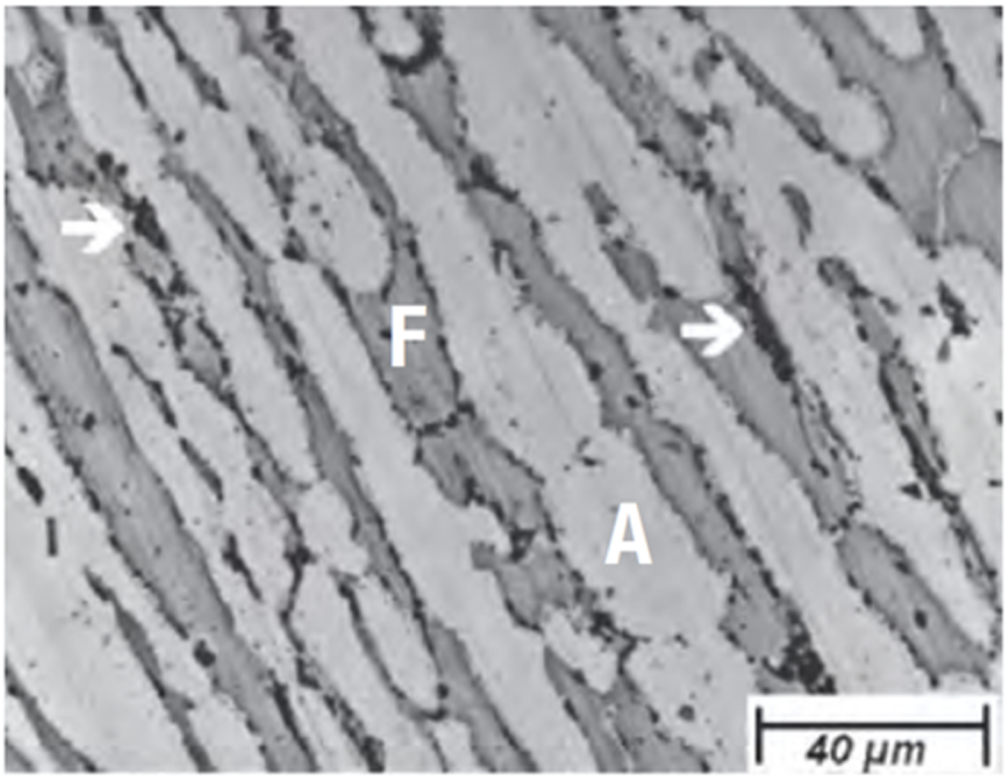
Şekil 2.7. Çökelmeyle sertleştirilebilen paslanmaz çelikler [6].

2.2.5. Dubleks Paslanmaz Çelikler

Dubleks paslanmaz çelikler, iki farklı faz olan östenit ve ferrit fazlarının birleşiminden oluşan bir malzemedir. Bu iki fazın karışımından kaynaklanan bileşenlerin etkilerini incelediğimizde, ferritik faz malzemenin mekanik dayanımını ve gerilmeli korozyon çatlağına karşı direncini artırırken, östenit fazı ise süneklik ve de genel korozyon direnci sağlar [10].

Bu türdeki paslanmaz çeliklerin diğer paslanmaz çelik türlerine nazaran önemli avantajlardan biri daha yüksek dayanıma sahip olmalarıdır. Bu yüksek dayanım, özellikle ince kesitli parçaların üretiminde bu türdeki malzemelerin tercih sebebi olmasını sağlar. Akma dayanımı 400-550 MPa arasında değişen bu malzemeler, köprü gibi yapısal uygulamaların yanı sıra basınçlı kazanlar ve depolama tankları gibi uygulamalarda da tercih edilir. Ayrıca, dubleks paslanmaz çeliklerin petrokimya, gemicilik ve boru hatları gibi alanlarda da kullanıldığı görülmektedir [11].

İlk nesil dubleks paslanmaz çelikler, iyi performans göstermelerine rağmen yapısal kararlılıklarının düşük olması nedeniyle sınırlı kaynaklanabilirlik gösterirler. Kaynak sırasında oluşan ısıdan etkilenen bölgelerde yüksek miktarda ferrit fazının oluşumu, bu bölgelerdeki tokluğu olumsuz etkilerken, aynı zamanda asıl malzemeye nazaran daha düşük bir korozyon mukavemeti sergilemelerine neden olur [12]. Ancak, 1968'den sonra geliştirilen Argon Oksijen Dekarbürizasyon (AOD) yöntemi ile paslanmaz çeliklerin üretim teknolojisinde yeni bir dönemin başlamasını sağlamıştır [13]. Bu teknoloji, azotun bir alaşım elementi gibi eklenmesini ve azot seviyesinin hassas bir şekilde kontrol edilmesini mümkün kılar. Bu sayede, ısıdan etkilenen bölgelerdeki tokluk düşüşü engellenir ve bu bölgeler, ana malzemeye yakın seviyede bir korozyon direnci sergiler



Şekil 2.8. Dubleks paslanmaz çelik mikro yapısı [6].

Dubleks paslanmaz çeliklerin ihtiva ettiği karbon içeriği genellikle %0,03 ila %0,04 arasındadır. Bu çeliklerde yer alan alaşım elementi krom, karbonla yüksek bir afiniteye sahiptir. Krom, demir matrisinde çözünmek yerine karbonla reaksiyona girerek $Cr_{23}C_6$ karbürlerinin oluşumunu tercih eder. Bu karbür oluşumu, kromun çözünmüş durumda bulunduğu demir matrisindeki krom miktarını azalmasına neden olur ve malzemenin paslanmazlık özelliklerini etkileyebilir. Bu nedenle, paslanmaz çeliklerde karbon içeriğinin düşük olması tercih edilir [10].

Dubleks paslanmaz çeliklerde yaklaşık %6 oranında nikel bulunur. Krom, ferrit yapısının kararlılığını artırırken, nikel östenit oluşumunu destekler. Bu sayede, dubleks paslanmaz çeliklerde %50 ferrit ve %50 östenit yapısı elde edilir. Molibden ise malzemede ferritik yapı yüzdesini artırması ile beraber mekanik dayanımında artmasına sebep olur. Azotun etkisi ise korozyon direncini ve östenit miktarını artırmada yardımcı olmaktadır [10].

Diğer paslanmaz çeliklerde olduğu gibi, dubleks paslanmaz çeliklerin ihtiva ettiği alaşım elementleri oranına bağlı olarak değişen korozyon dayanımı açısından farklı seviyelerde sınıflandırılırlar. Teknik literatürde bu grupların nasıl tanımlanacağı konusunda tam anlamıyla bir fikir birliği olmamakla birlikte, bu türdeki paslanmaz çelikleri aşağıdaki beş ana grupta değerlendirmek mümkündür:

Yalın dubleks: Molibdensiz dubleks paslanmaz.

Molibdenli yalın dubleks: Molibdenli dubleks paslanmaz.

Standart dubleks: Yaklaşık olarak %22 Cr ve %3 Mo ihtiva eden dubleks paslanmaz çelikler

Süper dubleks: Yaklaşık %25 Cr ve %3 Mo içeren ve yüksek korozyon dayanımı gösteren dubleks paslanmaz çelikler. (Çukurcuk korozyonu dayanımı eşdeğeri (PREN) 40 – 45 arası.)

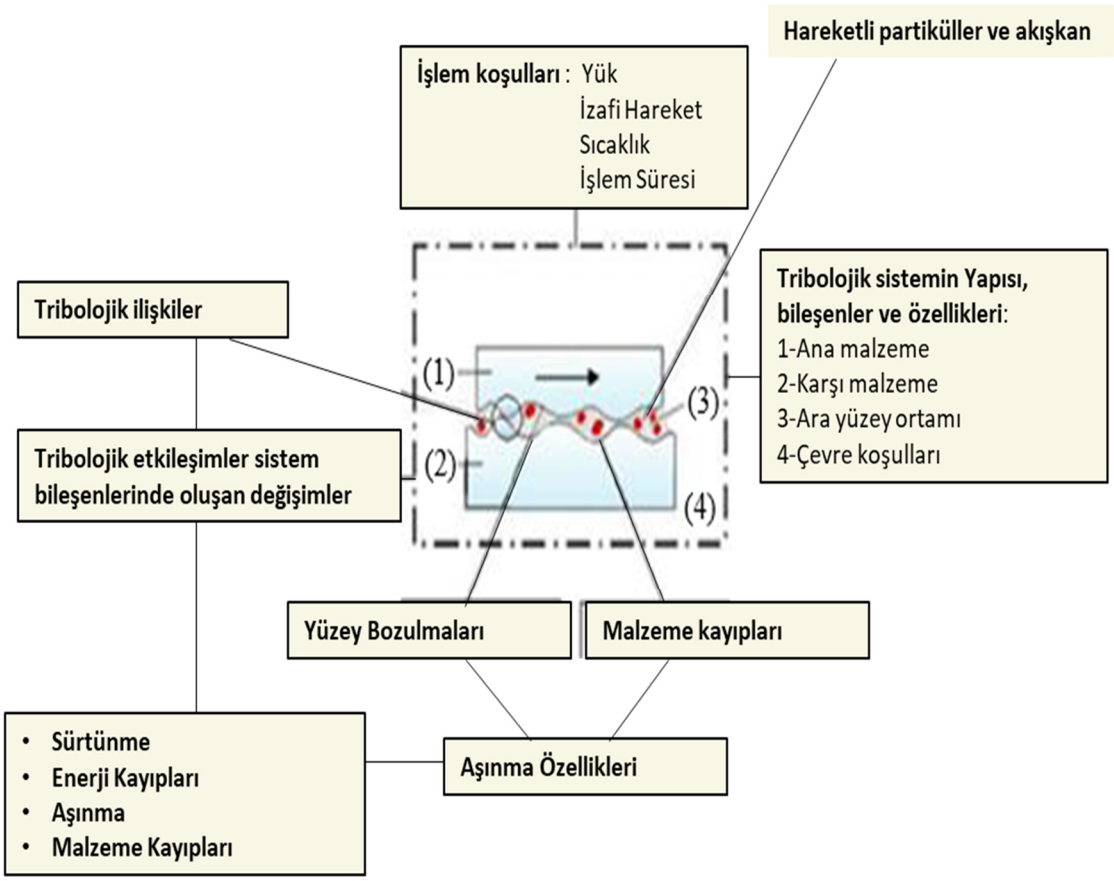
Hiper dubleks: Süper dubleks çelikler ile kıyaslandığında daha yüksek Cr ve Mo içeriği ve daha fazla korozyon dayanımına sahip dubleks paslanmaz çelikler. ((PREN) 45 üzerinde.)

BÖLÜM 3

AŞINMA

Endüstriyel çalışmalarda, özellikle mühendislik çalışmalarında, malzeme seçimi önemli bir kriterdir. Mühendislik malzemeleri seçiminde de üretilen elemanların kullanım ömrünün kısıtlı olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bu elemanların mümkün olduğunca verimli ve kullanım süresinin uzun olması hedeflenmektedir. Makine elemanları ve parça tasarımları da bu amaç doğrultusunda yapılır. Bu elemanların kullanım süresinin azaltan en önemli faktörlerden biri aşınmadır. Aşınma etkisi, triboloji biliminin konusu olup, sürtünme katsayısının düşürülmesi, yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi, temas yüzeyindeki sertlik miktarının artırılması ve de yağlama gibi uygulamalarla azaltılabilir, ancak tamamen ortadan kaldırılamaz. Aşınma problemi, kütle kaybının yanı sıra bakım, tamir ve parça değişimi gibi etkenler nedeniyle zaman ve ekonomik olarak kullanıldığı tesislere zarar vermektedir.

Aşınma, iki farklı yüzey arasında mekanik etkilerin sonucunda veya bir yüzeye katı, sıvı veya gaz maddelerin etki etmesiyle parça yüzeyinden kütle kaybının oluştuğu durumdur. Aşınma, kullanım ömrü ve işlevsellik açısından kesinlikle istenmeyen bir durumdur ve gereken önlemler alınmadığı takdirde öngörülenden çok daha fazla zararlara neden olabilir. DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre, aşınmanın tanımı “Kullanımda olan malzemelerin başka malzemeler (katı, sıvı veya gaz) ile aralarındaki temas sonucunda mekanik etkilerle yüzeyden küçük partiküllerin ayrılmasıyla oluşan ve istenmeyen yüzey bozulması" şeklinde yapılmaktadır ve Şekil 3.1 de şematik olarak gösterilmiştir. Aşınma, kısa vade de sorun yaratmasa da gereken önlemler alınmadığında uzun zaman dilimi içerisinde önemli bir sorun haline gelmektedir. [14]. Aşınma mekanizmaları beş ana başlık altında incelenir: adhezif, abrazif, erozif, korozif ve yorulma aşınması.



Şekil 3.1. Bir tribolojik sistemin şematik gösterimi (DIN 50320) [14].

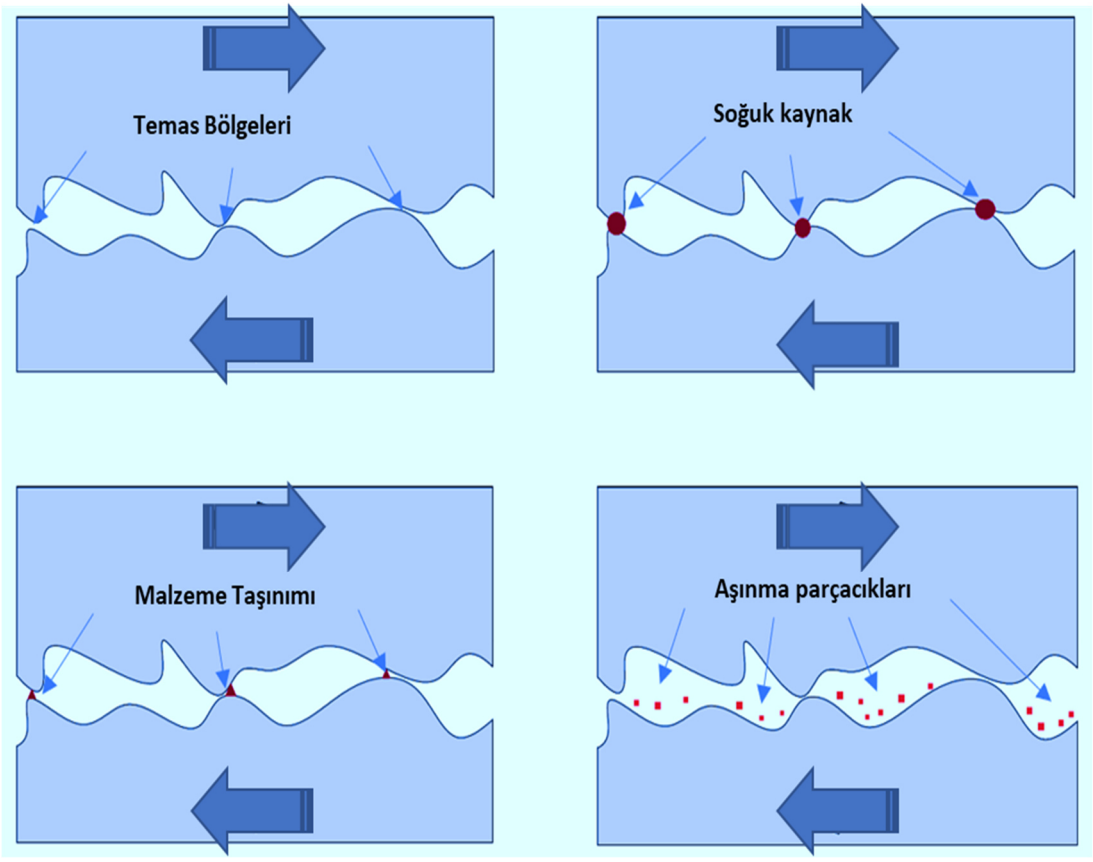
3.1. AŞINMA MEKANİZMA ÇEŞİTLERİ

Aşınma, sadece aşınan malzemenin özellikleriyle değil, aynı zamanda malzemenin içerisinde bulunduğu sistemin özellikleriyle de ilişkili olan bir fenomendir. Aşınma tamamen ortadan kaldırılamazken, uzun yıllardır minimize edilmesi hedeflenmektedir. Aşınma, uzun süreler boyunca yavaşça gelişebileceği gibi ani olarak da ortaya çıkabilir. Bu aşınma mekanizmalarının anlaşılması, aşınmanın etkilerini azaltmak ve daha dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi için önemlidir. Araştırmalar, malzeme seçimi, yüzey işlemleri, uygun yağlama ve bakım stratejileri gibi önlemlerle aşınmanın kontrol altına alınabileceğini göstermektedir.

Aşınma mekanizmaları, bu aşınma çeşitlerini inceleyen beş ana kategori altında sınıflandırılır: Bunlar adhezif aşınma, abrazif aşınma, erozif aşınma, korozif aşınma ve yorulma aşınmasıdır

3.1.2. Adhezif Aşınma

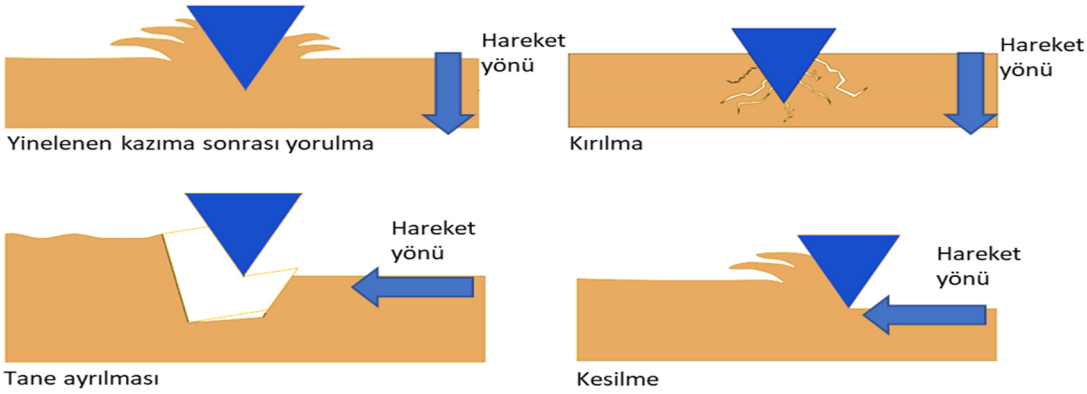
Adhezif aşınma, temas halindeki yüzeyler arasındaki kayma sürtünmesinin meydana geldiği ortamlarda ortaya çıkar. Başlangıçta, yüzeylerden birinden diğer yüzeye soğuk kaynak veya bölgesel bağlanmalar yoluyla parça transferi gerçekleşir. Ardından, kayma hareketleri devam ettiğinde yüzeyden parçaların kaybedilmesiyle aşınma meydana gelir. Mikro yapıları düşünüldüğünde, temas yüzeylerindeki pürüzlülükler tepeciklerin oluşmasına neden olur ve oluşan bu tepeciklere daha fazla basınç uygulanır. Kayma sürtünmesi tarafından uygulanan basınç, tepeciklerin akma sınırının üzerine çıktığında ve plastik deformasyon oluştuğunda, yüzeydeki bu pürüzlerin birbirlerine yapışmasına sebep olur ve diğer parçanın yüzeyine tutunurlar. Kayma hareketi sürdüğünde, bu noktaların kopmasına neden olur ve aşınma ortaya çıkar. Oluşan bu türdeki aşınmaya adhezif aşınma adı verilir. Adhezif aşınmayı önleme konusunda, yağlama ve yüzey sertleştirme uygulamaları oldukça etkilidir. Şekil 3.2'de, adhezif aşınmayı gösteren şematik bir görsel sunulmaktadır [15].



Şekil 3.2. Adhezif aşınma oluşumu şematik gösterimi.

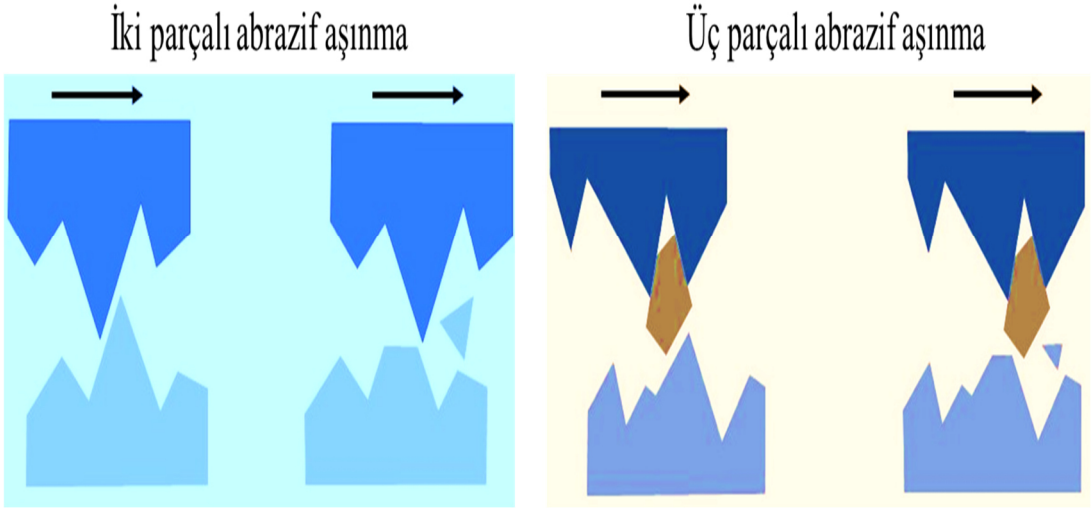
3.1.2. Abrazif Aşınma

Temas halindeki iki yüzeyin kayma sürtünmesiyle birbirlerini aşındırdığı durumlarda, yüzeylerin mikro yapısından kaynaklanan pürüzler nedeniyle daha yüksek sertliğe sahip olan malzemenin parçalarını koparıp aşınmaya neden olduğu bir aşınma türüdür. Bu durumda, sertlik derecesi daha düşük olan malzemenin yüzeyindeki pürüzler, kayma sürtünmesi nedeniyle daha sert malzemeden parçacıkların kopmasına ve aşınmaya yol açar. Bazı durumlarda, iki yüzey arasında yer alan başka bir sert malzeme de bu aşınmaya katkıda bulunabilir [16].



Şekil 3.3. Abrazif aşınma mekanizmaları şematik gösterimi.

Abrazif aşınma, iki alt başlık altında incelenebilir: iki parçalı abrazif aşınma ve üç parçalı abrazif aşınma. İki parçalı abrazif aşınmada, iki yüzeyin teması ve sürtünme hareketi sonucunda aşınma meydana gelir. Bu aşınma türünde, daha yüksek yüzey sertliğine sahip olan yüzey, diğer temas yüzeyinden parçacıklar koparak kütle kaybına neden olur. Örnek olarak, talaşlı imalat işlemleri iki parçalı abrazif aşınmaya açıklayıcı örneklerdir. Üç parçalı abrazif aşınma ise iki yüzey arasına sıkışan ve diğer yüzeylerden en az birine göre daha sert olan bir parçacık ile gerçekleşir. Bu durumda, yüzeylerden en az biri aşınmak suretiyle malzeme kaybına uğrar. İki yüzey arasına sıkışan partikül, temas eden yüzeyler arasından kopması sonucu oluşabildiği gibi dış etkenler nedeniyle de sonradan iki yüzey arasında sıkışmak suretiyle aşınmaya neden olabilir. Cilalama işlemi, üç parçalı abrazif aşınmaya örnek olarak verilebilmektedir [17].



Şekil 3.4. Abrazif aşınma oluşumu ve çeşitlerinin şematik gösterimi.

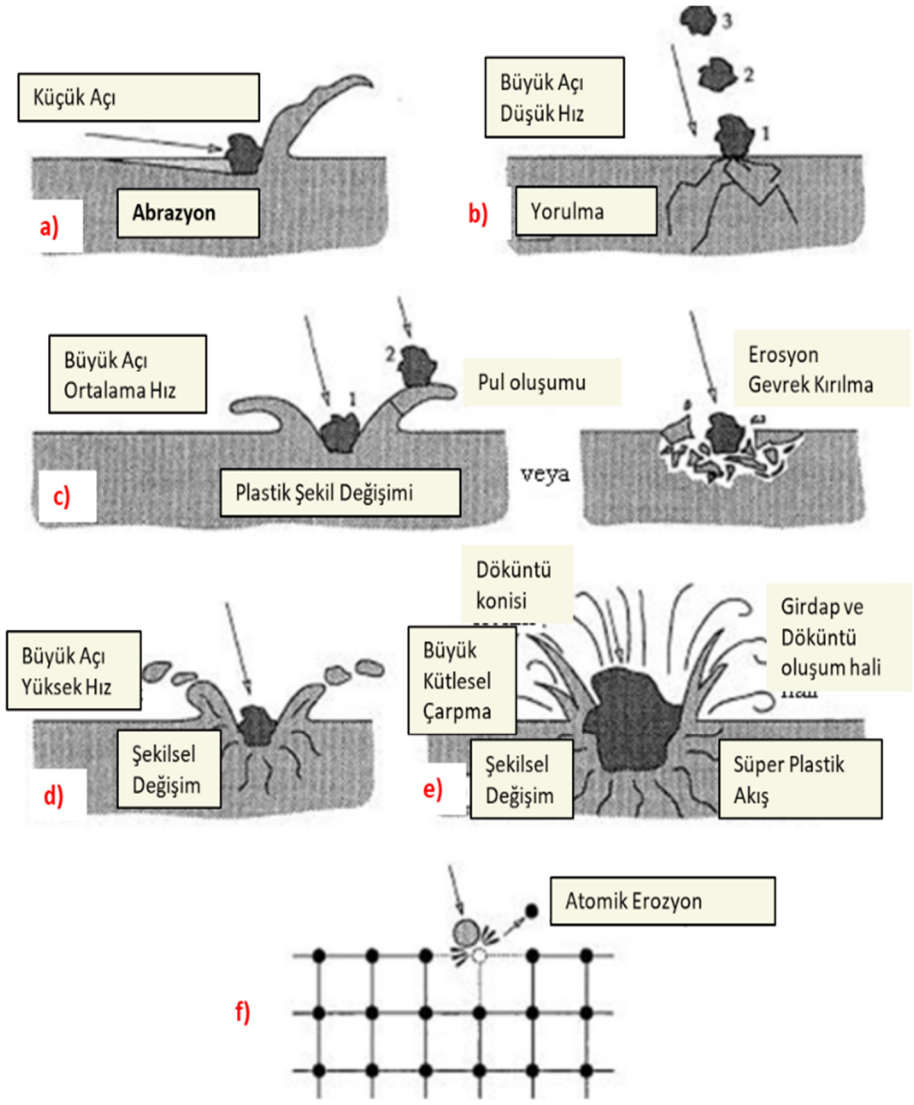
3.1.3. Erozif Aşınma

Akışkan ortam (sıvı veya gaz) içerisinde değişik boyutlarda veya farklı geometrilere sahip aşındırıcı partiküllerin, katı yüzeylerle sürekli darbe etkisiyle temas ederek yüzeylerden parça koparmasıyla gerçekleşen aşınma türüne erozif aşınma denir. Erozif aşınmada, aşındırıcı partiküllerin yanı sıra taşınmalarını da sağlayan sıvı veya gaz akışkanın da aşındırıcı özelliğe sahip olmasından dolayı, bu mekanizmaların herhangi biri veya birlikte, yüksek sıcaklıklar altında gerçekleşen uygulamalarda aşınmaya neden olabilir. Bu nedenle, akışkanların sahip olduğu fiziksel ya da kimyasal spesifikasyonları, erozif aşınmayı etkileyen önemli bir faktördür. Oluşan bu etkiler sebebiyle aşağıdaki altı farklı erozif aşınma çeşidi ortaya çıkar. Bunlar:

- Yıkama,
- Püskürtme,
- Erozyon-kavitasyon,
- Korozyon-erozyon,
- Yağdırma
- Termal aşınma.

Erozif aşınmanın uygulamalarda en sık görüldüğü yerler arasında hidrolik hatlar ve pompalar, pnömatik tesisat hatları, türbin çarkları, kumlama ekipmanları, püskürtme

ekipmanları nozulları, pervane kanatları, fanlar ve boru dirsekleri örnek verilebilir [15]. Şekil 3.5'de Olası Erozif aşınma mekanizmaları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Olası Erozif aşınma mekanizmaları [15].

3.1.3.1. Katı Partikül Erozyonu

Bu aşınma mekanizması, sıvı veyahut gaz olan akışkanın bünyesinde taşınan sert partiküllerin, yüksek hızlı akışın etkisiyle katı malzeme yüzeyine sürekli olarak çarpması sonucunda gerçekleşir. Bu çarpışmalar, yüzeyde deformasyonlara ve malzeme parçacıklarının kopmasına neden olur, bu da kütlesel kayıplara yol açar. Katı partikül erozyonu, aşındırıcı partikül akışı (hızı, çarpma açısı ve konsantrasyonu),

fiziksel özellikleri (boyut, şekil, sertlik) ve aşınan malzeme özellikleri (sertlik, dayanıklılık gibi) gibi üç faktörden etkilenir [18].

3.1.3.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu

Yüksek hız mertebelerinde harekete sahip katı partiküllerin, bunlara oranla çok daha düşük hız mertebelerinde harekete sahip sıvı damlalarına çarpması sonucunda ortaya çıkan aşınma fenomenine sıvı damlası erozyonu denir. Bu tür aşınma, su damlası, yağmur erozyonu veya nem erozyonu olarak da adlandırılır. Bu tip erozyonunun önlenmesi veya azaltılması için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler şunları içerir: katı parçaların yağış boyunca hareketinin engellenmesi, damlaların parça yüzeyine çarpma öncesinde bölünmek suretiyle küçültülmesi ve malzeme seçiminde darbelere daha dayanıklı bir malzeme tercih edilmesi gibi önlemler alınmalıdır [18].

3.1.3.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu-Çamur) Erozyonu

Bu tip erozyonda, akışkan bünyesinde taşınan katı aşındırıcı parçaların, malzemenin yüzeyine sürekli olarak çarpması ile oluşan ve genellikle boruların iç yüzeyinde veya pompalarda görülen bir aşınma türüdür. Sulu çamur erozyonunda etkili olan bazı parametreler şunlardır: taşınan partiküllerin sertliği, çamurun konsantrasyonu, partikül boyutu ve geometrisi, akışkan içindeki partikül hızı, yoğunluğu ve çarpmaya olan açısı gibi faktörlerdir. Aşınma ile Partikül sertliği, çamur konsantrasyonu ve partikül hızı arasında doğrudan bir ilişki vardır. Aşınma miktarını minimize etmek için malzemenin daha sert seçilmesi, optimum akışkan hızı ve yoğunluğunda iyileştirmeler yapılabilir [18].

3.1.3.4. Kavitasyon Erozyonu

Çalışma ortamı sıvı olan makine parçaları, ani basınç değişikliklerine maruz kaldıklarında mekanik titreşimler oluşur. Bu titreşimler, yüksek frekanslı ses dalgalarının oluşmasına ve makine parçalarının yüzeylerinde düşük basınç bölgelerinin ortaya çıkmasına neden olur. Bu bölgelerde, ani olarak birçok küçük

kabarcığın oluşması ve bunların patlaması sonucunda mikron seviyesinde malzemenin yüzeyinden parçalar kopar. Bu aşınma türü, kavitasyon erozyonu olarak adlandırılır [19].

3.1.3.5. Elektro Erozyon

Bu tipteki erozyon aşınması, vakum ortamında veya iletkenliğe sahip olmayan bir sıvı akışkan (saf su örnek olarak verilebilir) içinde, anot ile katot arasında oluşan akımın etkisiyle, katot malzeme yüzeyi üzerinden mikron ölçeğinde parçacıkların koparılmasıyla gerçekleşen bir aşınma mekanizmasıdır. Bu aşınma türü, sanayide yaygın bir şekilde kullanılan tel erozyon ve dalma erozyonu yöntemleriyle gerçekleştirilmektedir. Elektro erozyon yöntemleri, hassas parçaların işlenmesi, kompleks geometrilere sahip malzemelerin kesilmesi veya delinmesi gibi birçok alanda geniş bir kullanım alanına sahiptir [18].

3.1.4. Korozif Aşınma

Yüzeylerin korozyona maruz kaldığı durumlarda, aşınmaya da tabi tutulan yüzeylerde korozif aşınma olarak adlandırılan bir mekanizma ortaya çıkmaktadır. Korozyona uğrayan yüzeyler, aşınmanın yanı sıra kimyasal bozunmaya da maruz kalmaktadır. Temas halindeki yüzeyler arasında bulunan yüzey film tabakası, kimyasal tepkimeler yoluyla oluşarak yüzeydeki potansiyel aşınmaların önlenmesine katkı sağlamaktadır. Ancak, meydana gelen bu yüzey filminin kırılgan yapıda ve ara yüzey bağlarının zayıf olması durumunda, istenilenin aksine yüzeyden kopmak suretiyle aşınma hızında artışa sebep olmakta ve korozif aşınmanın meydana gelmesine yol açmaktadır [15].

3.1.5. Yorulma Aşınması

Birbiriyle yoğun temas halinde olan parçalar arasında meydana gelir. Örneğin dişliler, rulmanlı yataklar ve kam mekanizmaları gibi makine elemanları sürekli temas halinde olduğundan yorulma aşınmasıyla karşılaşırlar. Bu malzemeler tekrarlı yükler nedeniyle yüzey altında çatlaklar oluşturur ve bu çatlaklar parça yüzeyine doğru ilerler. Sonuç olarak, parçalar koparak aşınma gerçekleşir [15].

3.2. AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

3.2.1. Aşınma Deney Yöntemleri

Endüstride kullanımı olan veya kullanılması düşünülen ekipmanların, işlevselliklerinin yanı sıra uzun ömürlü olmaları gerekmektedir. Bu ekipmanlar, tesisin bütünlüğünü sağlamakta olup, herhangi bir sorun yaşandığında üretim kaybına ve maliyet artışına sebep olabilirler. Genellikle ekipman ve malzeme kullanım sürelerini belirleyen faktörler, aşınma temelinde meydana gelmektedir. Bu sebeple, uzun ömürlü bir kullanım için aşınmaya dayanıklı malzemelerin seçilmesi önem taşır. Yeni geliştirilmiş malzemelerin kullanılması durumunda ise, önce aşınma testlerine tabi tutulmaları gerekmektedir. Seçilen malzeme için ömür tahminleri yapılabilir ancak sistemin sağlığı ve sürekliliği için gerçek sistem koşullarını yansıtan deneysel testler de gereklidir. Maliyet ve zaman gibi kısıtlamalar göz önüne alındığında, yapılan deneylerin basitleştirilmiş ve gerçek sistemi yansıtan bir şekilde olması önemlidir. İncelenen aşınma mekanizmaları gerçek malzemelerden seçilmeli ve aşınma etkileri tam olarak simüle edilmelidir. Aşınma durumunda malzeme kaybı, kütlesel ya da hacimsel olarak belirlenebilir. Aşınmanın karakterize edilmesi için öncelikle aşınma çeşidinin belirlenmesi ve ardından uygun deney düzeneklerinin tasarımı gerekmektedir. Aşınma miktarının ölçülmesinde kullanılan metodlar arasında ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişimi ve radyoizotop yöntemleri yer almaktadır [20].

3.2.1.1. Ağırlık Farkı Yöntemi

Aşınma deneyleri sonucunda, kullanılan numunelerin hassas bir terazi kullanılarak 10^{-4} gram hassasiyet değerlerine kadar tartılması ve yüzdesel kütle kaybının hesaplanmasıyla aşınma miktarı belirlenir. Bu yöntem, maliyet açısından uygun olduğu için sıklıkla tercih edilmektedir. Ancak, yöntemin dezavantajı, ağırlık ölçümünün deneyin sonunda aşınmış numunenin yerinden çıkarılmasını gerektirmesidir. Aşınma miktarı birim olarak gram veya miligram cinsinden ifade edildiğinde, sürtünme yolu (metre veya kilometre) başına düşen ağırlık kaybı gr/km veya mg/m olarak, ağırlık kaybının bir alana bağlı olarak belirtilmesi durumunda gr/cm^2 kullanılabilir.

4.2.1.2. Kalınlık Farkı Yöntemi

Aşınma deneylerinin öncesi ve sonrasında yapılan, malzemenin boyutundaki değişmenin ölçülmesiyle aşınma oranının hesaplandığı bir yöntemdir. Bu yöntemler ölçülen kalınlık değişimi baz alınarak hacimsel kayıp ve birim hacimde oluşan aşınma miktarı hesaplanabilir. Ölçme işlemi, µm hassasiyetine sahip ölçme cihazlarıyla gerçekleştirilmelidir [21].

3.2.1.3. İz Değişim Yöntemi

Bu yöntemde plastik deformasyonun sonucu olarak, aşınmaya maruz bırakılacak numune yüzeyinde geometrik bir iz oluşturulmaktadır. Bu yöntem kullanılarak, deney süresince bu geometrik izde meydana gelen değişiklikler gözlemlenir ve meydana gelen aşınma miktarı hesaplanır. Bu yöntemde, Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucu gibi yaygın iz oluşturucular kullanılmaktadır. Bu izlerin şekil ve boyut değişiklikleri dikkate alınarak, aşınma miktarı belirlenir. Bu yöntem, aşınma deneylerinde sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir ve numunenin yüzeydeki iz değişiklikleri üzerinden aşınma miktarının objektif bir şekilde tespit edilmesini sağlar.

Aşındırılacak numunenin yüzeyinde oluşan plastik deformasyon nedeniyle geometrik bir iz oluşturulur. Bu yöntem, deney süresince bu geometrik izde meydana gelen değişiklikleri izleyerek oluşan aşınma miktarını hesaplamaya yönelik bir yöntemdir. Vickers veya Brinell sertlik ölçüm ucu gibi yaygın bir iz oluşturucu kullanılmaktadır

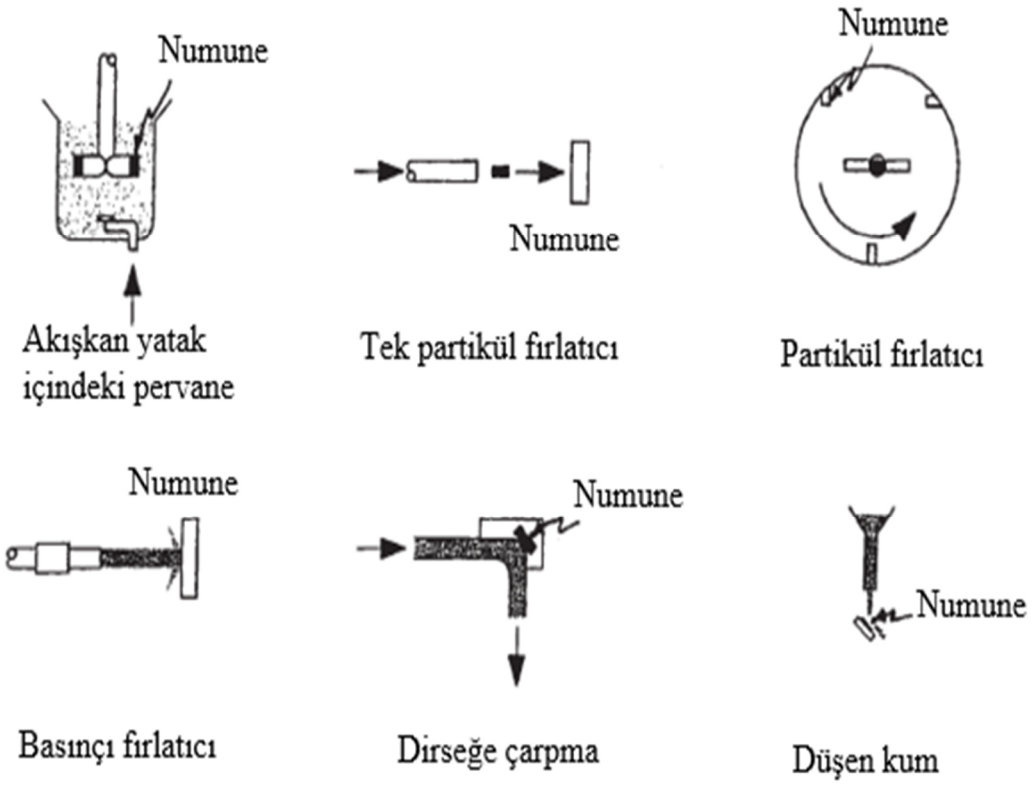
3.2.1.4. Radyo İzotop Yöntemi

Aşınma oluşturulmak istenen yüzeye yüklü α parçacıkları, proton veya nötronların bombardımanı yoluyla yüzeyin radyoaktif hale gelmesi sağlanır. Bu deneysel yöntemde iki önemli avantajı vardır. İlk olarak, aşınmanın ölçümü yüksek hassasiyetle yapılabilir ve ikinci olarak, ortam koşulları değiştirilmeden ölçüm alınabilir. Radyo izotop yöntemi maliyet açısından dezavantajlı olmasına rağmen genellikle çok özel uygulamalar için kullanılmaktadır [22].

3.2.2. Erozif Aşınma Deney Yöntemleri

3.2.2.1. Katı Partikül Erozyonu Deney Yöntemleri

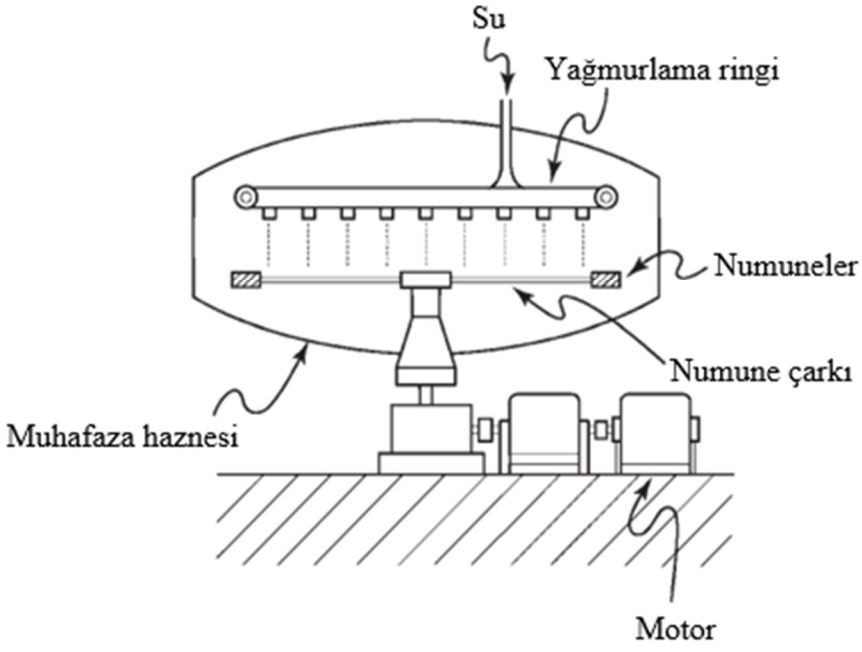
Bu tip erozyon, malzemenin yüzeyine tekrarlı çarpmalar sonucunda parçacık kopmalarının meydana gelmesi olarak tanımlanabilir. Bu tür aşınmayı etkileyen çeşitli parametreler bulunmaktadır. Bu parametreler, aşınmaya maruz kalan malzemeyle alakalı, aşındırıcıyla alakalı ve akışla alakalı olmak üzere üç grupta incelenmektedir. Söz konusu deneylerde kullanılan bazı sistemleri gösteren şematik resimler Şekil 3.6'da belirtilmiştir. Aşındırıcı malzemenin özellikleri, katı partikül erozyonunun karakteri için önemli bir rol oynamaktadır. Aşındırıcı partikülün sertliği, geometrisi, miktarı, yüzeye çarpması açısı ve hızı gibi parametreler önem taşır. Şayet yapılan deneyler esnasında hava ya da reaktif olmayan gaz kullanılıyorsa, kimyasal etki gözlenmez ve aşınma sadece mekanik etkilerden kaynaklanır. Mevcut deneylerde genellikle farklılıklar, özellikle hız üzerinde odaklanmaktadır [23].



Şekil 3.6. Katı partikül erozyon deney düzeneklerinin şematik gösterimi [23].

3.2.2.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu Deney Yöntemleri

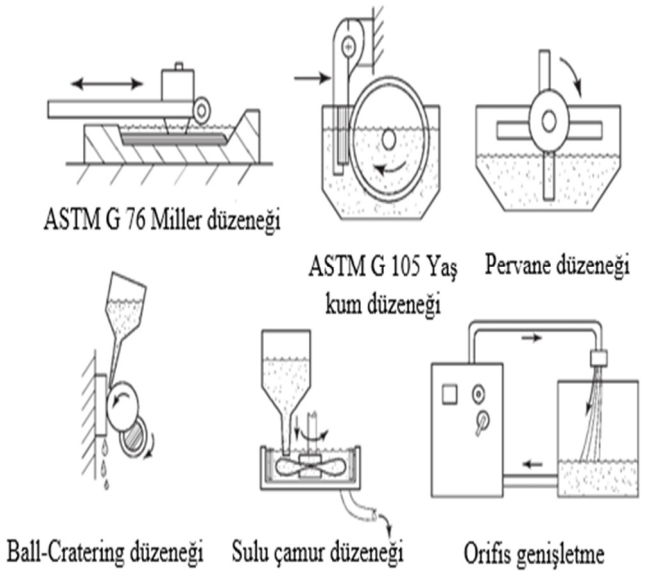
Doğal ortam koşullarında, sıvı ya da su damlalarının yüksek hız mertebelerine ulaşıp formu katı olan yüzeylere çarpmak suretiyle malzemeler üzerinden parça kaldırılması oldukça zor bir süreçtir. Şekil 3.7'de şematik olarak gösterilen Sıvı damla erozyonunda, yüzeyde meydana gelen tahribat, yüksek hız halinde harekete sahip katı partiküllerin sıvı damlalarına çarpması ve oluşan bu etkileşimin tekrarlanması sonucunda oluşan şok dalgalarından kaynaklanır. Bu tür erozyon yağmur erozyonu olarak adlandırıldığı gibi, nem erozyonu olarak da adlandırılır. Dolayısıyla, kayıpların önüne geçilmesi veya en aza indirilmesi amacıyla darbelere dayanıklı malzemelerin seçilmesi, partiküllerin yüzeye çarpmadan parçalanarak daha küçük boyutlara indirgenmesi ve yağmur süresi boyunca aşınmaya maruz kalan malzemenin hareketinin kısıtlanması gibi önlemler alınmalıdır. Bu deneylerle elde edilen Miller numaraları, ortamın ne kadar aşındırıcı olduğunu belirlemekte kullanılır ve bu numaranın büyüklüğüne bakılarak ortamın ne kadar aşındırıcılığa sahip olduğu belirlenebilmektedir. [23].



Şekil 3.7. Sıvı (Su) damlası erozyonu deney düzeneğine ait şematik gösterim [23].

3.2.2.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu Deney Yöntemleri

Bu tip erozyonda, akışkan ortamın gaz ya da sıvı maddeden ve aşındırıcı partiküllerden oluştuğu bir süreçtir. Bu tür erozyonda genellikle pompalar aracılığıyla taşıma gerçekleştirilir. Örneğin, durgun haldeyken jel gibi davranan ancak karıştırıldığında sıvılar gibi davranışta bulunan (tiksotropik) bir akışkanın ihtiva ettiği kalsiyum karbonat partiküllerinden oluşan bir diş macunu konu ile ilgili olarak örnek gösterilebilir. Ayrıca beton pompası ile kullanılan çimento harcı da benzer bir özellik gösterir. Taşıma işlemi sırasında aşındırıcı partiküller içeren karışım, pompa ekipmanı ve boru tesisatında yüzeysel olarak malzeme kaybına neden olur. Şekil 3.8'de bu tür erozyon için değişik deney düzeneklerinin şematikleri verilmiştir. Yaygın olarak kullanılan deney yöntemi ise Miller testi olup, test düzenekleri aracılığıyla ortamın aşındırıcılığı değerlendirilebilir ve farklı aşındırıcı ortamlarda kullanılan pompaların aşınma dayanımları karşılaştırılabilir. Bu deneyler sonucunda elde edilen Miller numaraları, ortamın ne kadar aşındırıcı olduğunu belirlemekte kullanılır ve numaraların büyüklüğü ile ortamın aşındırıcılık etkisi anlaşılabilir [23].

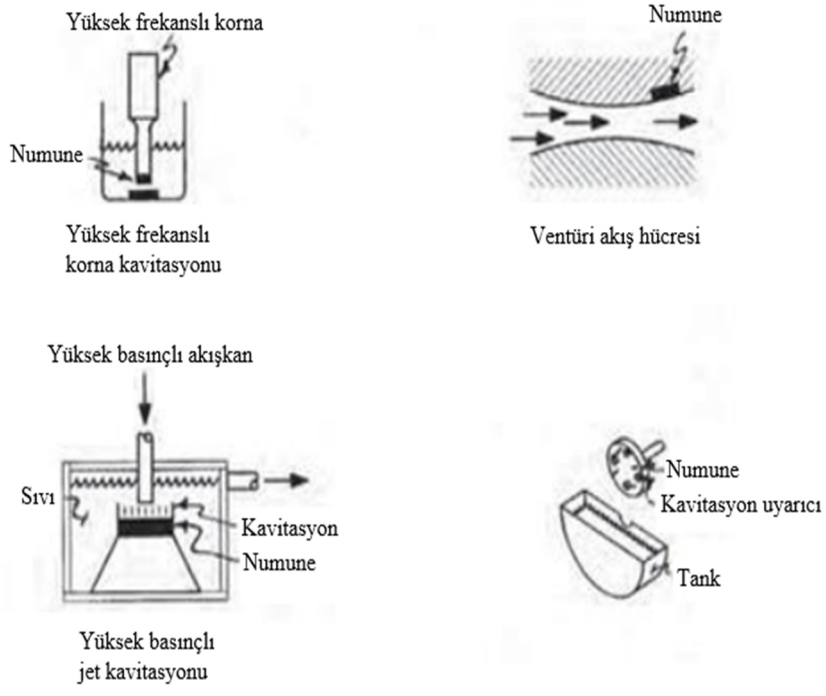


Şekil 3.8. Sulu çamur erozyonunda kullanılan deney düzeneklerine ait şematik gösterim [23].

3.2.2.4. Kavitasyon Erozyonu Deney Yöntemleri

Sıvı akışkan ortamda faaliyet gösteren ekipmanlarda, basınç değişikliklerinin ani olması durumunda yüksek frekansa sahip ses dalgaları oluşur. Bu durum, malzeme yüzeyinde basınçlı bölgelerin oluşmasına yol açar ve oluşan bu bölgelerde anlık olarak kabarcıkların oluşmasına sebep olur. Söz konusu kabarcıklar düşük basınçlı bölgelerden yüksek basınçlı bölgelere doğru yönelir ve bu hareketin sonucunda malzeme yüzeyinden çok küçük parçacıklar koparır.

Kavitasyon aşınmasının neden olduğu kütle kaybının belirlenmesi adına Şekil 3.9'da gösterilen deney tertibatları kullanılabilmektedir [23].



Şekil 3.9. Kavitasyon erozyonu deney düzeneklerine ait şematik gösterim [23].

BÖLÜM 4

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Lynn ve diğ. (1991) [24] tarafından yapılan araştırmalar, aşındırıcı partikül boyutunun artmasıyla aşınma miktarının arttığını göstermektedir.

Krishnan ve Lim (2021) [25] ise farklı boyutlardaki partiküllerin aşındırıcılığını incelemiş ve küçük boyutlu partiküllerin daha fazla aşınmaya yol açtığı sonucuna ulaşmıştır. Bu durum, partikül boyutunun artmasıyla temas eden parçacıkların azalması ve dolayısıyla aşınma miktarının azalmasıyla açıklanmaktadır. Çarpma hızı da önemli bir parametredir ve aşınma miktarıyla doğrudan ilişkilidir.

Krishnan ve Lim (2021) [25] ile Clark (1991) [26] tarafından yapılan çalışmalar, çarpma hızının artmasıyla daha fazla kinetik enerji ve dolayısıyla yüzeyden parça koparma olayının arttığını göstermiştir. Çalışmalar, çarpma hızının büyüklüğü ne kadar yüksek olursa, meydana gelen aşınma miktarının da o denli yüksek olduğunu göstermektedir. Bunun yanında Clark (1991) [26] çalışmasında, ortam sıvısının viskozite değeri ile aşınma miktarı arasında bir ilişki olduğu belirtilmiştir. Ortam sıvısının viskozite değeri arttıkça çarpma hızının azaldığı ve bunun sonucunda aşınma miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Telfer ve diğ. (2012) [27] tarafından yapılan çalışmada, ortam konsantrasyonu ile aşınma miktarı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu bulunmuştur. Aynı çalışmada, çarpma açısının artmasıyla aşınma miktarının da arttığı gözlemlenmiştir. Andrews ve diğ. (2014) [28] yaptıkları çalışmada, yüksek çarpma açılarında (90°) deformasyon aşınmasının, düşük çarpma açılarında (20°) ise kayma aşınmasının meydana geldiğini belirlemişlerdir. Levy ve Chik (1983) [29] ise partiküllerin geometrik yapısının aşınma miktarı ile aralarındaki ilişkiyi incelemiş ve keskin ve köşeli yapıya sahip parçacıkların yuvarlak veya küresel yapıdakilere göre oluşan aşınma miktarının daha fazla olmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir.

Raadnuri S. (2021) tarafından deneysel olarak gerçekleştirilen çalışmada, SS430 paslanmaz çeliği kullanılarak üretilmiş Ø32 mm çapa sahip iki kanatlı bir pervanenin erozif aşınma ortamında davranışı incelenmiştir. Yapılan çalışma, yüksek hıza sahip akış sistem tasarımlara ait mekanik parçalar için erozif aşınmanın minimuma indirgenebileceği yöntemler ve erozif aşınma parametrelerinin değişkenliği hakkında bilgi sağlamayı amaçlamaktadır. Erozif malzeme olarak, tane boyutu ortalama 450-500 µm aralığında olan SiO2 (silisyum dioksit) ve SiC (silisyum karbür) kullanılmıştır. Uygulaması yapılan deney, pervanenin belirli bir konsantrasyondaki sulu çamur karışımına daldırıldığı ve belirli bir süre ve dönme hızıyla aşınmaya maruz bırakıldığı bir kabın içerisinde yapılmıştır. İki faktörlü yarı faktöriyel deney tasarımı kullanılarak sekiz deney yapılmış ve her deney için aynı özelliklerde ayrı bir pervane kullanılmıştır. E2D2R2C2 deney tanımlamasıyla belirtilen 4. deney, 0.50 g kütle kaybıyla en yüksek yüzdesel kütle kaybına neden olan parametreleri içermektedir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen yüzdesel malzeme kayıpları karşılaştırılması yapılarak, pervanenin dönüş hızı, aşındıran malzemenin sertliği ile konsantrasyon-aşındıran malzemenin sertliği kombinasyonu erozif aşınmanın meydana gelmesinde en önemli ve belirleyici parametreler olarak tespit edilmiştir [30].

Clark (2002), yaptığı çalışmada Aşındırıcı partikül ve darbeli aşınma sürecini belirleyen ana faktörler açıklanmıştır. Bu nedenle, parçacık çarpma hızı, çarpma açısı ve çarpma frekansı, numune hakkındaki bulamaç akış rejimi tarafından belirlenmektedir. Bu faktörlerin erozyon oranları (veya erozyon-korozyon oranları) üzerindeki etkisi, yalnızca bulamaç akışı ve parçacık etkisi için nicel bir model ve malzeme kaybını yöneten hız kontrol faktörünün doğasına ilişkin bir varsayım olması açısından anlaşılabilir. Korozyonun olmadığı durumda erozyon için partikül darbe enerjisinin numune yüzeyinde dağılma hızı olarak alınmıştır. Malzeme kaybının kütle kaybından çok yüzey profilindeki değişimlerle ölçülmesi gerektiği ve bu analiz için en iyi numune formunun silindir olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca partikül boyutunun değişiminin, erozyon oranları üzerindeki etkisi tartışılmıştır. Bu deneysel ve analitik tekniklerin uygulanmasının, erozyon-korozyon koşullarında aşınmanın kantitatif analizi için bir araç sağlaması önerilmektedir [31].

Nguyen ve diğerleri (2014), paslanmaz çelik SUS-304'ün çamur erozyon deneylerini, alümina kumu ve suyun çok yönlü akışlarının aşındırıcılar olarak kullanıldığı yeni gelişmiş erozyon test teçhizatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan test sonuçlarının, erozyon oranının başlangıçta yüksek olduğunu ve test süresi boyunca kademeli olarak azaldığını gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca darbe hızındaki artışla aşınma oranının da artması ile beraber, Yüzey pürüzlülüğü, artan test süresi veya darbe hızı ile artmış olması belirtilmiştir. Ayrıca, tüm aşınmış numuneler için "W" şeklindeki yüzey profilleri gözlenmiştir. Mikro yapı karakterizasyonunda ise, iki farklı erozyon rejimi ortaya konulmaktadır. Bunlar; yüksek darbe açılarında plastik deformasyon mekanizması, düşük darbe açılarında ise sürme/kesme mekanizması hakim olduğu durumlardır. Ayrıca çalışma da Erozyon oranı, erozyon profili ve mikro yapı arasındaki ilişki de tartışılmıştır [32].

Rajahram ve diğerleri (2009) Erozyon-korozyonu, katı parçacık erozyonunun mekanik süreçleri ile korozyonun elektrokimyasal süreçleri arasındaki etkileşimi içeren karmaşık bir olgu olduğunu belirtmişlerdir. Bir malzemenin erozyon-korozyon performansı hakkında ilgili bilgileri elde etmeye çalışırken bir tasarımcı tarafından bir dizi sorunla karşılaşıldığını, kısıtlamalar arasında, farklı malzemelerin erozyon-korozyon aşınma oranlarının karşılaştırılmasını ve ölçülmesini çok zorlaştıran, literatürde mevcut olan dağınık test koşulları ve test donanımları bulunmakta olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışma, erozyon-korozyon deneylerinin tekrarlanabilirliğini değerlendirmek ve erozyon-korozyonu etkileyen farklı parametrelerin rolünü araştırmışlardır. Bu çalışmada test edilen malzemeler, paslanmaz çelik (SS316L/UNS S31603), karbon çeliği (AISI 1020/UNSG10200) ve nikel-alüminyum bronzdur (NAB/UNS C63200). Test aparatı olarak bir bulamaç kabı erozyon test cihazı kullanılmış ve erozyon-korozyon üzerindeki etkilerini incelemek için partikül boyutu, aşındırıcı konsantrasyonu, akış hızı ve test çözeltileri gibi test parametrelerini değiştirilmişlerdir. SEM analizi, SS316L ve NAB için benzer bir erozyon-korozyon mekanizmasının görüldüğünü ve tipik olarak erozyonun hakim olduğu malzeme için görülen çoklu kabartı yığılma ve trombositlerin oluştuğunu göstermiş, buna karşılık AISI 1020'nin yüzeyi, korozyon mekanizmasının malzeme üzerinde baskın bir etkiye sahip olduğunu düşündüren krater, çukur ve sığ girintilerin oluşumunu ortaya çıkarmıştır. Testlerdeki hata oranlarının ortalama %5,5 olduğu bulunmuş, bu da test

ölçümlerinin ve test teçhizatından alınan verilerin iyi tekrarlanabilirliğini gösterme açısından nispeten düşük olduğunu belirtmişlerdir. AISI 1020, SS316L ve NBA'nin erozyon-korozyon direnci karşılaştırılmış ve SS316L'nin tüm test koşullarında en düşük erozyon-korozyon kütle kaybı oranlarını gösterdiği bulmuşlardır. Ardından NAB ve sonrasında AISI 1020 gelmiştir. Ancak sinerjistik sıralama açısından, NAB en yüksek negatif sinerji değeri ile erozyon ve korozyonun birleşik eylemine karşı en iyi direnci göstermiştir. %3,5 NaCl'de AISI 1020 ve 0,3MHCl'de SS316L için pozitif sinerji belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Malzemelerin erozyon-korozyon eğilimlerini değerlendirmek için bir aşınma haritası sunulmuştur. Bu çalışma, bir malzeme seçim sürecinde kilit aşamalar olan test tekrarlanabilirliğinin değerlendirilmesini, test koşullarındaki değişimi ve malzeme performansının karşılaştırılmasını birleştirmektedir [33].

Lindgren ve diğerleri (2014) Çalışmalarında çeşitli östenitik ve dubleks paslanmaz çelik kalitelerinin erozyon direnci, farklı boyut fraksiyonlarına ve özelliklere sahip aşındırıcılar kullanılarak bulamaç potası testleri ile incelemişlerdir. İncelenen paslanmaz çelik kalitelerinin sıralaması, aşındırıcının tipine ve özelliklerine rağmen oldukça sistematik olduğu, çıkan sonuçlarda, aşındırma ne olursa olsun, dubleks paslanmaz çelik kalitelerinin sulu bulamaçlarda östenitik kalitelere göre ortalama olarak daha iyi erozyon direnci gösterdiğini ortaya koymuştur. Östenitik sınıflardan 316L, yüksek aşınmaya neden olan aşındırıcılarla test edildiğinde 904L'den daha yüksek erozyon direncine sahip olduğu görülmüştür. Dubleks kaliteler ile ilgili olarak, süper dubleks kalite 2507 en iyi aşınma direncine sahip olduğu, aşındırıcı maddelerin kinetik enerjisi, ölçülen erozyon kütle kaybının önemli bir miktarını açıkladı, ancak örneğin kromit, parçacıkların açısallığından dolayı kinetik enerji bazında beklenenden daha fazla aşınmaya neden olmuştur Östenitik kalitelerin aşınma yüzeyi özelliklerinin, dubleks kalitelerden farklı olduğunu tespit etmişlerdir [34].

Konu ile ilgili yapılan literatür araştırması sonucunda farklı özelliklere sahip metal malzemelerin seçildiği, farklı boyutlardaki aşındırıcıların kullanıldığı, farklı partikül çarpma açılarında ve farklı konsantrasyonlardaki ortam koşullarında çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmada konsantrasyonun aşınmayı arttırdığı bilgisi

dahilinde konsantrasyon değeri sabit tutularak çarpma hızı ve çarpma açısı değerleri değişken olarak alınarak etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 5

MATERYAL VE METOT

Her alanda kullanılan ekipman ve malzemelerin kullanım süresini negatif olarak etkileyen temel faktörler arasında, triboloji biliminin incelenmekte olduğu aşınma önemli bir yer tutmaktadır. Erozif aşınma, aşındırıcı partiküllerin sıvı veya gaz akışkan ortamında farklı geometri ve boyutlarda bulunarak malzeme yüzeyinden parçaları uzaklaştırması ve buna bağlı olarak kütle kaybına neden olması olarak tanımlanmaktadır. Aşınma, ortam faktörlerine bağlı olarak beş ana kategoriye ayrılmaktadır: abrazif, adhezif, erozif, korozif ve yorulma aşınması. Sulu-çamur (slurry) erozif aşınması ise erozif aşınmanın bir çeşidi olup, sıvı veya gaz olan akışkan içerisinde düşük hız mertebelerinde transferi gerçekleşen katı partiküllerin, malzeme yüzeyine uyguladığı tekrarlanan darbelerle parçaların kopmasına ve dolayısıyla kütle kaybına neden olmasını ifade etmektedir.

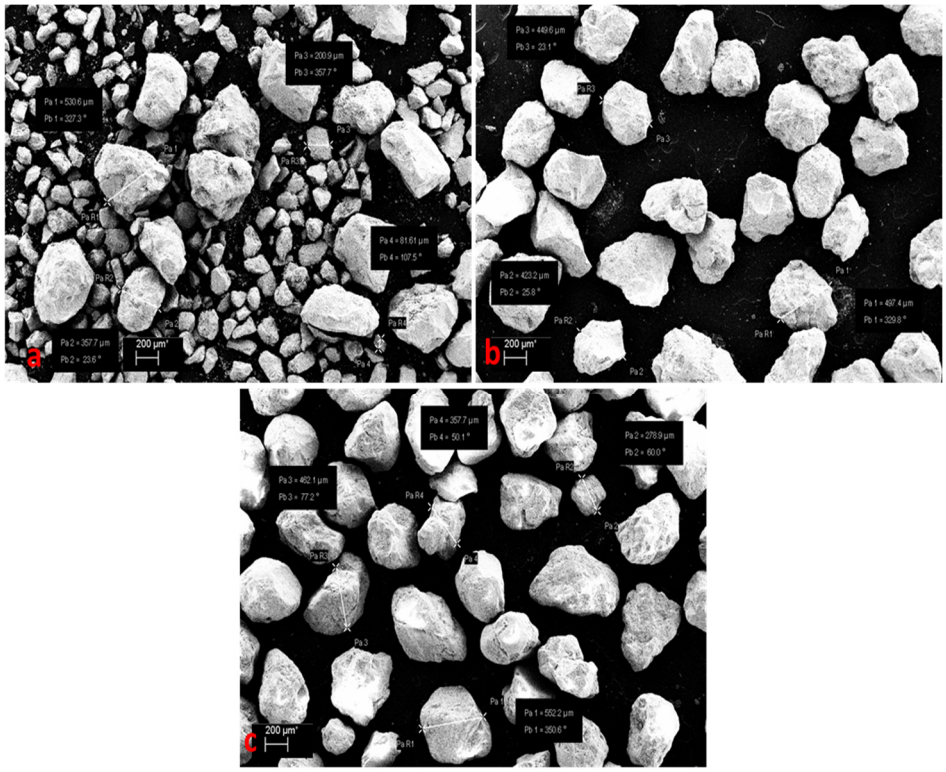
Bu çalışmada, sıvı (su) ile aşındırıcı malzeme (Silika kumu veya SiO2) karışımını içeren bir hazne içine hazırlanan numunelerin konulması ve bu numunelerin devamlı olarak Silika kumu tarafından oluşan darbelerle, yüzeylerinden parçaların koparılması temel alınmıştır. Deneylerden önce, parametrelerin etkisini incelemek amacıyla üç farklı parametre belirlenmiştir. Bunlar; numune çarpma hızı, sıvı ortamdaki aşındırıcı kum konsantrasyonu ve numune çarpma açısıdır. Bu değerlerin tüm kombinasyonlarının, Tam faktöriyel metodu kullanılarak toplam 1X3X3 olacak şekilde, toplamda 9 adet deney tasarımı hazırlanmıştır.

5.1. AŞINDIRICI PARTİKÜL HAZIRLANMASI

SiO2 (silika) kumu, aşındırıcı materyal olarak tercih edilmiştir. Ham haldeki kum iki adet, 600 µm ile 425 µm elek açıklığı değerlerindeki endüstriyel elekler kullanılarak elenmiş ve ortalama partikül boyut aralığı yaklaşık olarak 512,5 µm olacak şekilde hazırlanmıştır. Silika kumu, deney düzeneğinin haznesi içerisine belirlenen konsantrasyon değerinde eklenerek deneyler yapılmıştır. Deneyler yapılmadan önce ve sonra, aşındırıcı kumun ham, elenmiş-kullanılmamış ve elenmiş-kullanılmış durumlarına ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 5.1 de belirtildiği üzere temin edilmiştir. Çizelge 5.1'de SiO2 kumunun kimyasal kompozisyonu sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Aşındırıcı malzeme SiO_2 kumuna ait kimyasal kompozisyon.

	SiO_2	**Al_2O_3**	**Fe_2O_2**	**TiO_2**	**Na_2O**	**MgO**	**K_2O**	**Diğer**
Ağırlıkça (%)	98,3	0,83	0,04	0,22	0,00	0,08	0,02	0,50



Şekil 5.1. Aşındırıcı SiO_2 kuma ait elde edilen SEM görüntüleri a) eleme öncesi b) eleme sonrası c) kullanılmış malzeme

5.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Deneylerde kullanılmak üzere, seçilen AISI 2205 kalite dubleks paslanmaz çelik malzemeden 5x6x30 mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Numune yüzey pürüzlülüklerinin eşit olması için deney öncesinde Kardemir Ar-Ge Laboratuvarı'nda Şekil 5.2'de gösterildiği şekilde bakalitlenen numuneler otomatik zımpara makinesi kullanılarak zımparalanmıştır. Bu sayede bütün numunelere ait yüzey pürüzlülük değerlerinin mümkün olduğunca aynı olması sağlanmıştır. Çizelge 5.2'de ise AISI 2205 numunenin sahip olduğu kimyasal kompozisyonlar verilmektedir.



Şekil 5.2 . Kardemir ARGE Laboratuvarı zımpara makinesi ve zımparalanmış numuneler

Çizelge 5.2. AISI 2205 numuneye ait kimyasal kompozisyonu.

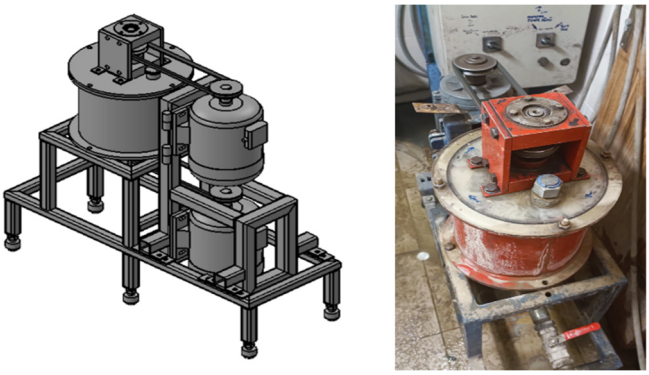
2205	C	Mn	Si	S	P	N	Cr	Ni	Cu	Mo
	0,008	1,329	0,344	0,003	0,0243	2659	22,419	6,058	0,154	3,2880
	V	Ti	As	Sn	Sb	Al	Nb	B	Pb	Ca
	0,1067	0,012	0,004	0,007	0,0018	0,0033	0,0002	0,0024	0,0007	0,0007

5.3 TAM FAKTÖRİYEL DENEY UYGULAMASI

Deneylerin öncesinde, Tam Faktöriyel metodu ile seçilen deney parametreleri ve bu parametrelerin farklı değerlerinin kombinasyonlarıyla bir deney dizaynı oluşturulmuş olup bu deney tasarımı sayesinde, seçilen parametreler arasındaki ilişkiler ortaya konulmuştur. Yapılan deneyler sonucu ölçülen kütle kaybı ve yüzey pürüzlülük değerleri baz alınarak, slurry erozif aşınma sürecindeki etkisi analiz edilmiştir.

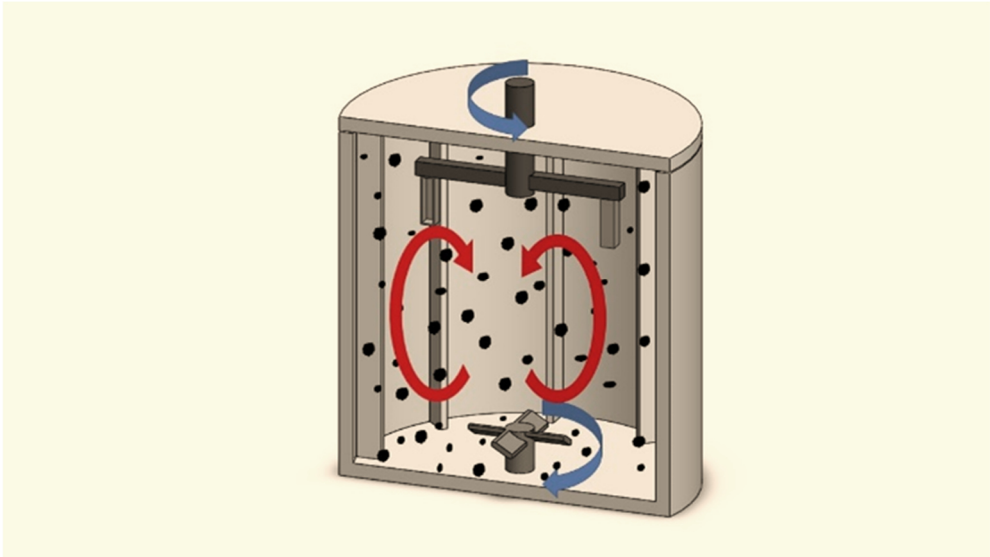
5.4. SULU-ÇAMUR (SLURRY) EROZİF AŞINMA DENEYLERİ

Deneyin yapılanacağı söz konusu aşınma türü olan Sulu-çamur (slurry) erozif aşınması, gaz veya sıvı akışkan ortamda bulunan aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyi ile temas ederek parça koparması sürecidir. Bu parça koparması sonucunda malzeme kütle ve hacim kaybına uğramaktadır. Deneyler, numunelerin farklı konsantrasyonlarda sulu ortamda bulunan aşındırıcı kumlara çarpmasıyla malzeme yüzeyinden parça koparması prensibi üzerine yapılmıştır. Deney düzeneği, iç hacmi 10 litre ve iç çapı Ø240 mm sahip bir silindirik tank, tankın dip kısmında dört kanadı bulunan bir karıştırıcı ile hazırlanan numunelerin yerleştirileceği bir kapaktan oluşmaktadır. Hazne tabanındaki dört kanatlı karıştırıcı ve kapaktaki numunelerin tahriğini sağlamak için bir çift devir ayarlı 1.1 kW gücünde AC elektrik motoru kullanılmaktadır. Motorlar deney düzeneğini tahrik sistemi kayış kasnak mekanizmasından oluşmaktadır. Numuneler ise, numune tutucu aracılığıyla deney düzeneğine bağlanması sağlanır. Numune tutucular, kollara bağlanırken, bu kollar da bir kol tutucuya bağlıdır. Bu kol tutucu bir mil tarafından numunelere çevresel hız sağlamaktadır. Numune tutucular, yerleştirildikleri plakadaki kademeli boşluklar sayesinde 0°-90° aralığında 15°lik ayar kabiliyetine sahiptir. Deney düzeneği üzerindeki bütün numune tutucu, kol ve kol tutucular AISI 316 paslanmaz çelikten imal edilmiştir. Ölçüleri 5x6x30 mm olacak şekilde hazırlanan numunelere ait temas yüzey alanı 150 mm² ve dönme çapı Ø144 mm'dir. Şekil 5.3'da erozif aşınma deney düzeneğinin 3D CAD görseli ve fotoğrafı bulunmaktadır.



Şekil 5.3. Erozif aşınma deney düzeneği şematik görseli ve fotoğrafı.

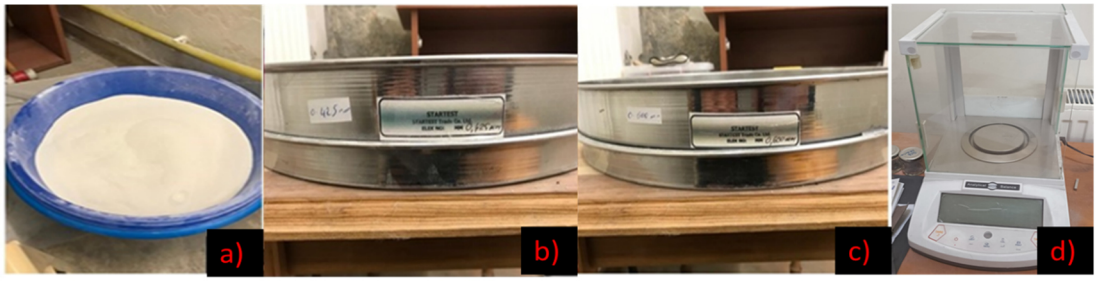
Hazne tabanında, sulu-çamur karışımını homojen hale getirmek amacıyla dört kanatlı bir karıştırıcı bulunmaktadır. Söz konusu karıştırıcı, bağlandığı mil ile beraber kayış kasnak mekanizmasıyla altta bulunan elektrik motoruna bağlanmıştır. Karıştırıcı bütün deneyler için sabit olarak ayarlanan 600 devir/dakika hızında tahrik edilmektedir. Aşınma sonuçlarının daha sağlıklı elde edilebilmesi için numuneler ve karıştırıcı, birbirine ters yönde dönme hareketi yapmaktadır. Şekil 5.4'te, deney düzeneği haznesinin kısmi bir kesiti şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Erozif aşınma deney düzeneği hazne kesitinin şematik görseli.

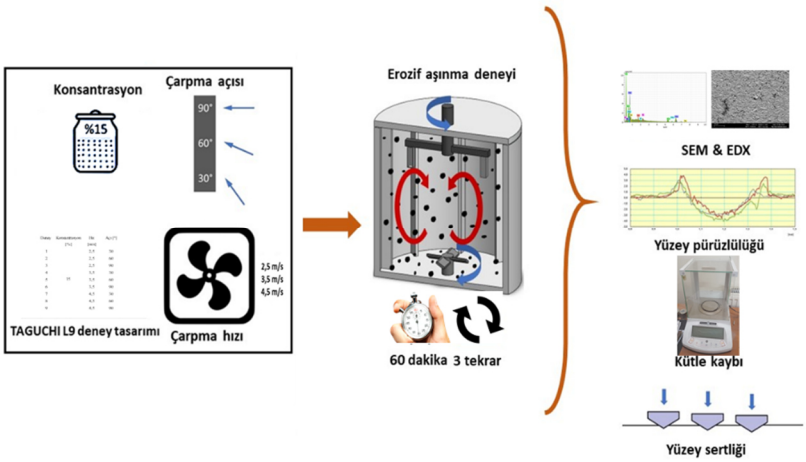
Deneylerde kullanılan yardımcı ekipmanlar Şekil 5.5'te gösterilmiş olup, arasında farklı aralık değerleri bulunan endüstriyel elekler, ağırlık farkı ölçümü için hassas terazi ve aşındırıcı malzeme olan Silika kumu bulunmaktadır. SEM görüntüleri, EDX

analizi ve Yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi çalışmaları, Karabük Üniversitesi bünyesindeki Demir Çelik Enstitüsü'nde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.5. a) elenmiş ve 512,5 µm boyutlarında aşındırıcı silika kumu b) 600 µm açıklıklı elek c) 425 µm açıklıklı elek d) 10^{-4} gram hassas terazi

Deneyler öncesinde tam faktöriyel metodu ile bir deney tasarımı hazırlanmıştır. Belirtilen parametreler doğrultusunda tüm deneyler üçer defa tekrarlanmıştır. Yapılan tekrarlardan alınan sonuçların daha sağlıklı olması için bu üç deneyin ortalaması alınmıştır. Numuneler deneylerden önce suyla temizlenmiş ve ardından kurutma makinesinde yaklaşık 2 dakika kurutulmuştur. Hassas bir terazi (10^{-4} gram) kullanılarak ilk ölçümler gerçekleştirilmesi sonrasında numune tutuculara cıvata yardımıyla bağlanan numunelerin çarpma açısı (30°- 60°- 90°) deney parametrelerine göre ayarlanmıştır. 1 saat olarak belirlenen deney süresi boyunca numuneler aşınmaya maruz bırakılmıştır. Deneyin bitiminde numuneler tekrar suyla temizlenmiş ve ardından her bir numune kurutma makinesiyle 2 dakika boyunca kurutulmuştur. Hassas terazi kullanılarak ikinci ölçümler yapılmış ve böylece her iki kütle ölçümü arasındaki fark hesaplanarak aşınma sonucu oluşan kütle kaybı belirlenmiştir. Şekil 5.6'da slurry erozif aşınma deneyinin aşamaları gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Slurry erozif aşınma uygulamasına ait şematik bir gösterim.

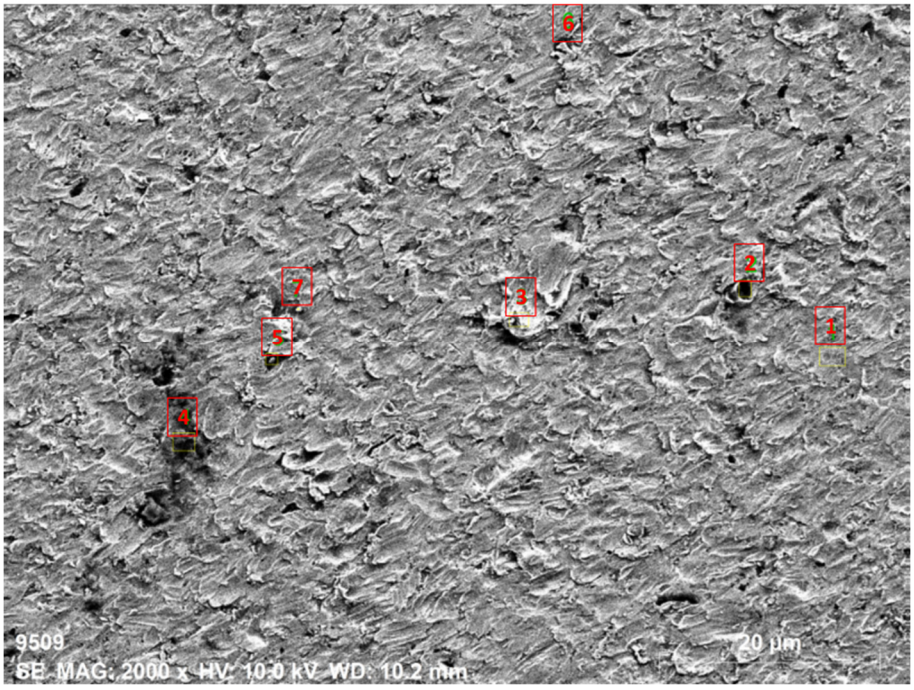
Tüm deneylerin ardından, silindirik hazne içinde bulunan aşındırıcı silika kumu (SiO_2) hazneden boşaltılarak hazne temizlenmiş ve bir sonraki deney için miktarı ayarlanmış yeni aşındırıcı kum konulmuştur. Deneylerde aşınma etkilerinin tespit edilmesi amacıyla sabit bir konsantrasyon değerinde 3 farklı çarpma hızı ve 3 farklı çarpma açısı kullanılmıştır. Çarpma hızları sırasıyla 2,5 m/s, 3,5 m/s ve 4,5 m/s olarak belirlenmiş, çarpma açıları ise 30°, 60° ve 90° olarak seçilerek deneyler yapılmıştır. Tam faktöriyel metoduyla oluşturulan deney tasarımı Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Tam Faktöriyel deney tasarımı.

Deney no	KONSANTRASYON	AÇI	Hız	Kütle kaybı (mg)	Yüzey Pürüzlülüğü
1	%15 wt	90°	2,5 m/s		
2			3,5 m/s		
3			4,5 m/s		
4		60°	2,5 m/s		
5			3,5 m/s		
6			4,5 m/s		
7		30°	2,5 m/s		
8			3,5 m/s		
9			4,5 m/s		

5.5. EDX ANALİZİ

Deneylerde kullanılan ham AISI 2205 dubleks paslanmaz numunelere EDX taraması ile elemental analiz yapılmıştır. Numuneler içerisinde deney parametreleri 4,5 m/s çarpma hızı, 30° çarpma açısı ve ağırlıkça %15 aşındırıcı kum konsantrasyonuna maruz kalan numuneye ait elemental analiz sonuçları ortalaması; %16,21 C, %1,84 N, %1,88 Si, %0,03 P, %0,34 S, %18,05 Cr, %2,07 Mn, %53,04 Fe ve %6,10 Ni olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.7'de 9 numaralı deney numunelerine ait EDX analizinin yapıldığı bölgeler belirtilmiştir. Yapılan EDX analiz sonuçları ise Çizelge 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.7. 9 numaralı deney numunelerine ait EDX analizi ve görüntüsü.

Çizelge 5.4. AISI 2205 numuneye ait EDX sonuçları.

	ELEMENTLER								
Spectrum	C	N	Si	P	S	Cr	Mn	Fe	Ni
1	6,44	1,69	1,32	0,05	1,30	20,06	1,63	59,19	8,32
2	27,95	1,63	0,86	0,10	1,17	17,70	2,36	43,88	4,36
3	9,64	2,09	2,49	0,03	1,25	19,78	2,23	54,63	7,87
4	20,83	2,76	1,85	0,00	1,49	17,67	1,83	45,31	8,25
5	14,64	0,91	1,46	0,00	1,22	17,03	2,28	59,88	2,59
6	14,43	1,08	4,40	0,00	1,14	17,99	2,04	58,74	3,18
7	19,52	2,70	0,80	0,05	0,89	16,12	2,09	49,67	8,16
Ortalama	16,21	1,84	1,88	0,03	1,21	18,05	2,07	53,04	6,10

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Sabit partikül aşındırıcı konsantrasyonunda farklı numune açısı ve partikül çarpma hızı değerlerinde yapılan deneyler sonucunda numunelerin erozif aşınma sonucu oluşan kütlesel kayıpları ölçülmüştür. Numuneler öncelikli olarak deney önce terazide tartılarak ağırlığı bulunmuş, Bütün deney şartları için yapılan dokuz deney kapsamında toplam yirmi yedi adet numuneye ait tespit esilen aşınma değer ortalamaları alınarak değerler Çizelge 6.1'de verilmiştir. Bu kapsamda AISI 2205 dubleks paslanmaz malzemenin erozif aşınma davranışının, beklendiği şekilde partikül çarpma hızındaki artış ve açıdaki küçülme değerlerine bağlı olarak arttığı sonucuna varılmıştır.

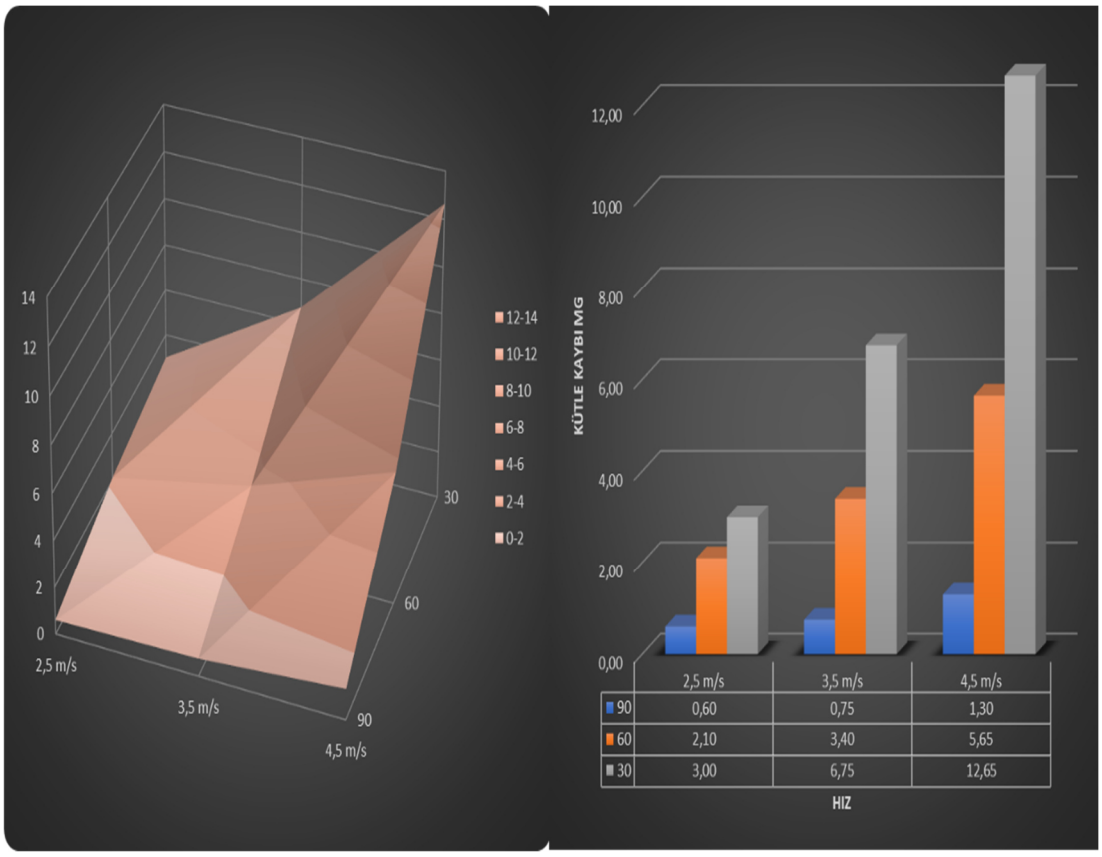
Çizelge 6.1. Tam Faktöriyel Deneysel sonuçları.

Deney no	KONSANTRASYON	AÇI	Hız	Kütle kaybı (mg)	Ra	Kütle kaybı(%)
1	%15 wt	90°	2,5 m/s	**0,60** ±0,2	0,051	0,009%
2			3,5 m/s	**0,75** ±0,15	0,065	0,012%
3			4,5 m/s	**1,30** ±0,1	0,067	0,020%
7		60°	2,5 m/s	**2,10** ±0,2	0,075	0,033%
8			3,5 m/s	**3,40** ±0,3	0,093	0,054%
9			4,5 m/s	**5,65** ±1,25	0,106	0,088%
4		30°	2,5 m/s	**3,00** ±0,5	0,119	0,048%
5			3,5 m/s	**6,75** ±1,55	0,121	0,104%
6			4,5 m/s	**12,65** ±3,05	0,153	0,204%

6.1. AŞINDIRICI PARTİKÜL ÇARPMA HIZI ve NUMUNE BAĞLAMA AÇI PARAMETRELERİNİN AŞINMA YÜZEYLERİ ve MİKTARLARINA ETKİSİ

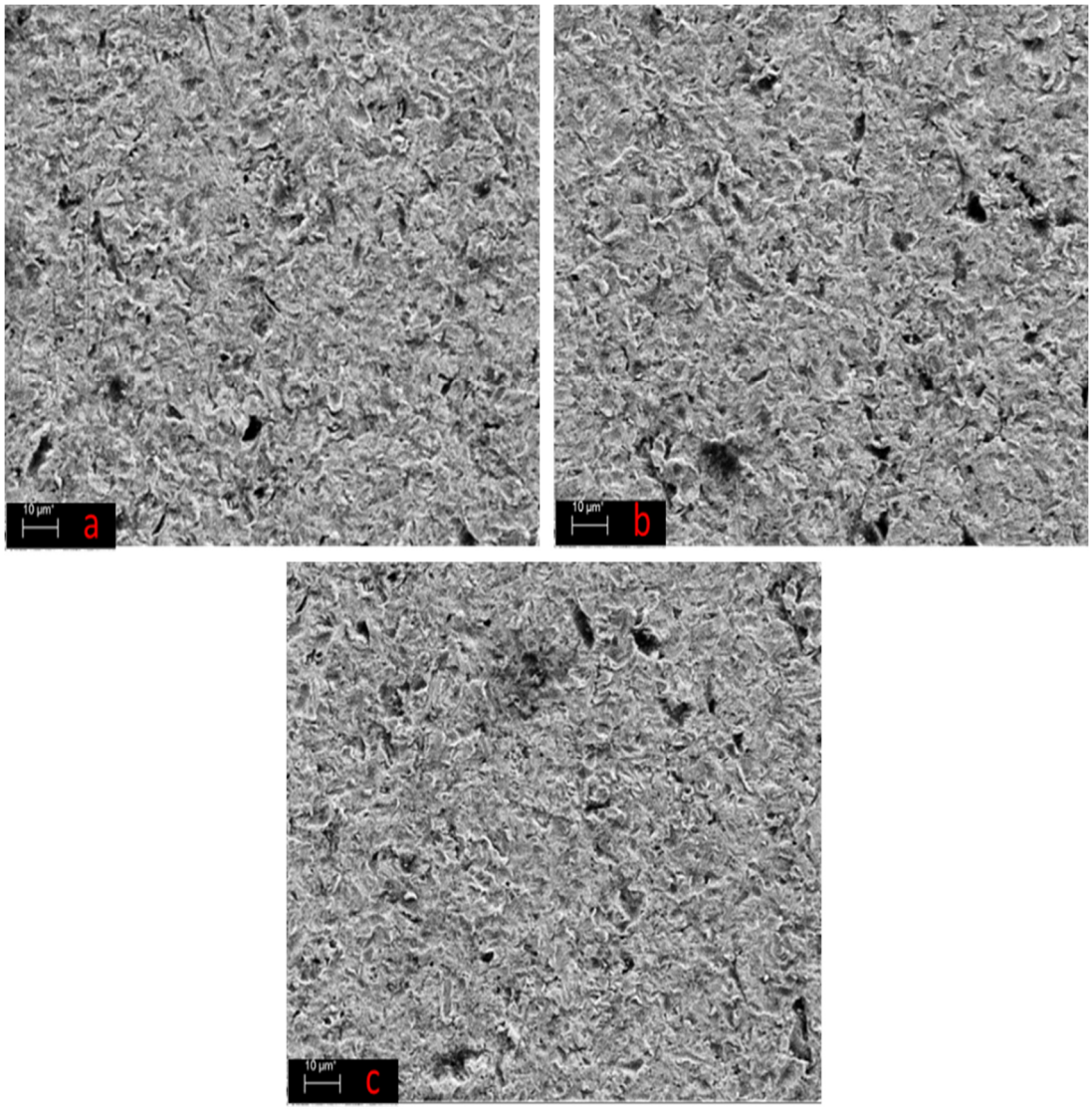
AISI 2205 numuneler bakalit içerisine alınarak zımpara makinasında yüzeyleri ön hazırlığa tabi tutulmuştur. Numune yüzey pürüzlülüklerinin azaltılması ve mümkün olduğunca birbirine eşit olması için bu ince zımparalama işlemi uygulanmıştır. Zımparalama işlemi öncesi de yüzey pürüzlülüğü değeri alınmış olup, ham numune 0,173 µm ve zımparalanmış numune 0,022 µm olarak ölçülmüştür.

Yukarıdaki değerler baz alınarak oluşturulan Şekil 6.1'de belirtilen grafikte, partikül hızındaki artışla beraber artan aşınma miktarının ve yüzey pürüzlülüğünün, numune bağlama açısı ile katlanarak artığı görülmektedir.



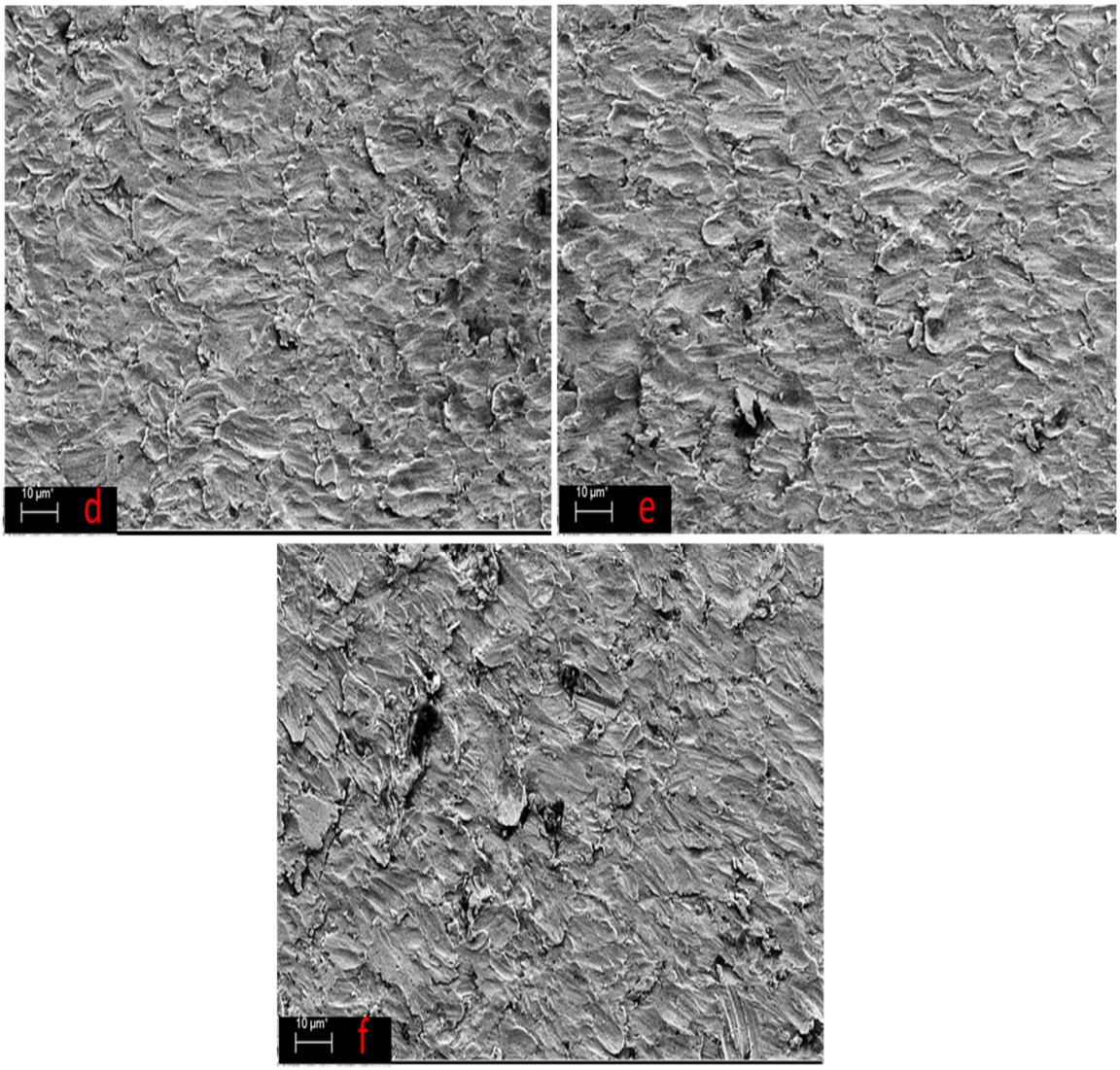
Şekil 6.1 Hız ve açı değerlerine göre kütle kaybı değerleri

90º numune açısı ve değişen hız değerlerinde yapılan deney sonucu numune yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 6.2'de belirtilmiştir.



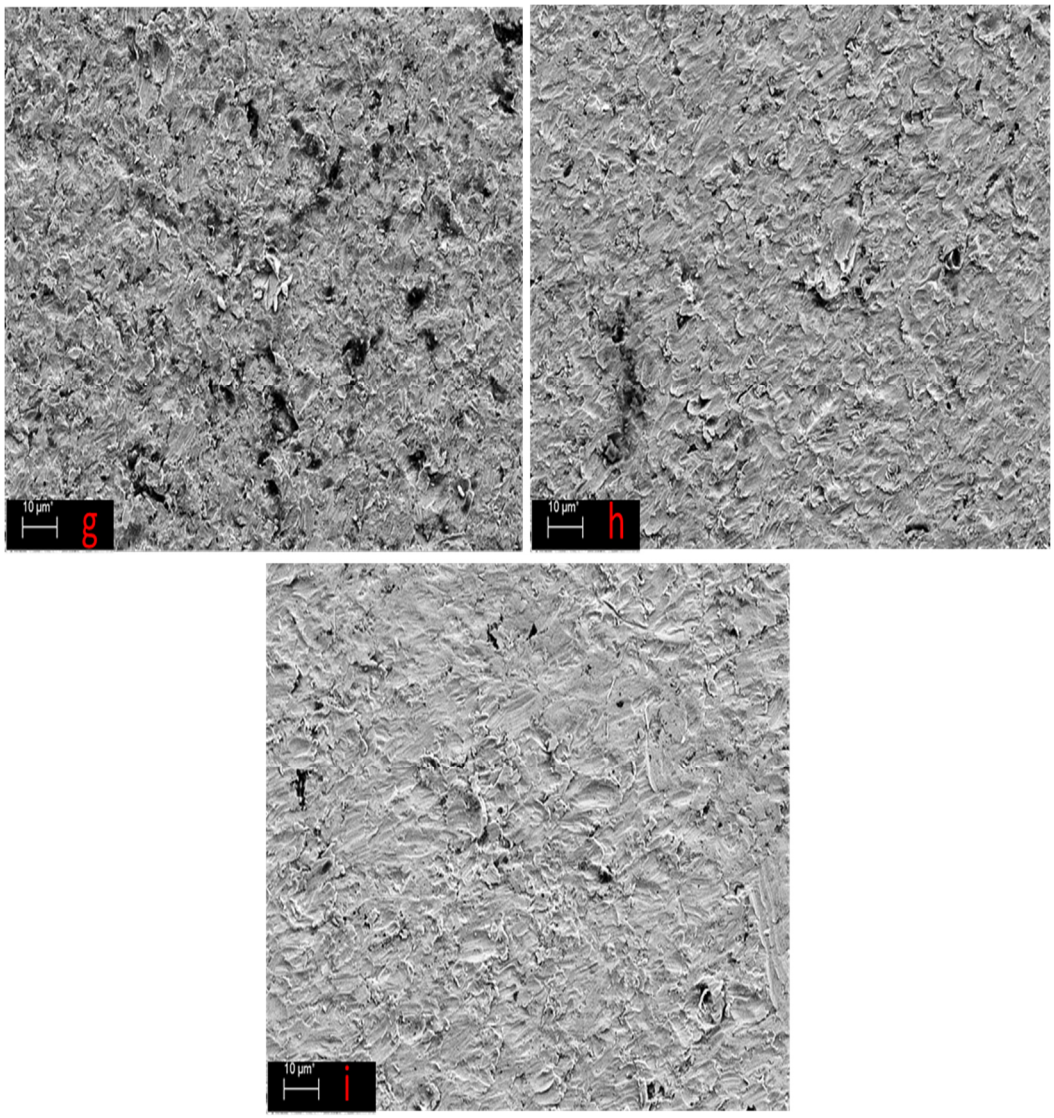
Şekil 6.2 90^{o} açısındaki aşınma durumu a)2,5 m/s- numune 1 b) 3,5 m/s - numune 3 c) 4,5 m/s - numune 5

60^{o} numune açısı ve değişen hız değerlerinde yapılan deney sonucu numune yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 6.3'de belirtilmiştir. Maruziyet açısının düşmesi ile beraber yüzeyde aşınma miktarı ve yüzeydeki bozulmalar, 90^{o} değerlerine göre arttığı gözlenmektedir.



Şekil 6.3 60º açısındaki aşınma durumu a) 2,5 m/s- numune 13 b) 3,5 m/s -numune 15 c) 4,5 m/s - numune 17

30º numune açısı ve değişen hız değerlerinde yapılan deney sonucu numune yüzeylerine ait SEM görüntüleri Şekil 6.4 de belirtilmiştir. Maruziyet açısının düşmesi ile beraber yüzeyde aşınma miktarı ve yüzeydeki bozulmalar, 60º değerlerine göre arttığı gözlenmektedir.



Şekil 6.4 30^{o} numune açısındaki aşınma durumu g) 2,5 m/s- numune 7 h) 3,5 m/s- numune 9 i) 4,5 m/s- numune 11

6.2. KÜTLE KAYBI

Aşındırıcı ortam içerisinde meydana gelen aşınmanın etkisi, malzemenin yüzeyinden parça kopmasıyla sonuçlanarak malzeme kaybına yol açmaktadır ve oluşan bu kayıp hassas bir terazi ile ölçülerek tespit edilmektedir. Bu nedenle, aşınma deneyi öncesinde her bir numune hassas bir terazi kullanılarak tartılmalıdır.

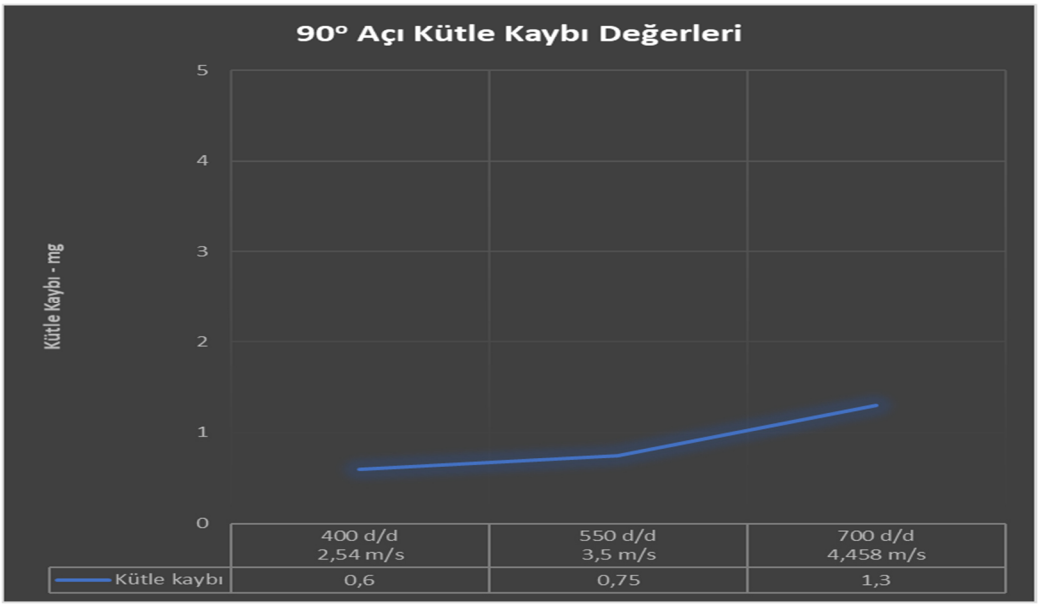
Bu nedenle numuneler, yüzeylerinin tümünde herhangi bir artık malzeme, kalıntı, pislik, toz vb. etkenin bulunmaması için suyla temizlendikten sonra ısıtıcı yardımıyla

yüzeylerinde su ve nem kalmayana dek ısıtılarak kurutulmuştur. Bu işlemlerden sonra ilk tartımlar yapılmış olup, ardından deney tertibatına bağlanarak Tam Faktöriyel deney tasarımına uygun olarak belirlenen parametreler olan hız, açı ve konsantrasyon kullanılarak deneyler yapılmıştır.

Deneylerin ardından, numune yüzeylerinde herhangi bir yabancı madde veya aşındırıcı kum kalıntısı kalmaması için numuneler yeniden su ile temizlenip ısıtıcı yardımıyla kurutulmuştur. Ardından ikinci tartımlar yapılarak meydana gelen kütle kaybı tespit edilmiştir. Yapılan tüm deneyler üçer kez tekrarlanmıştır.

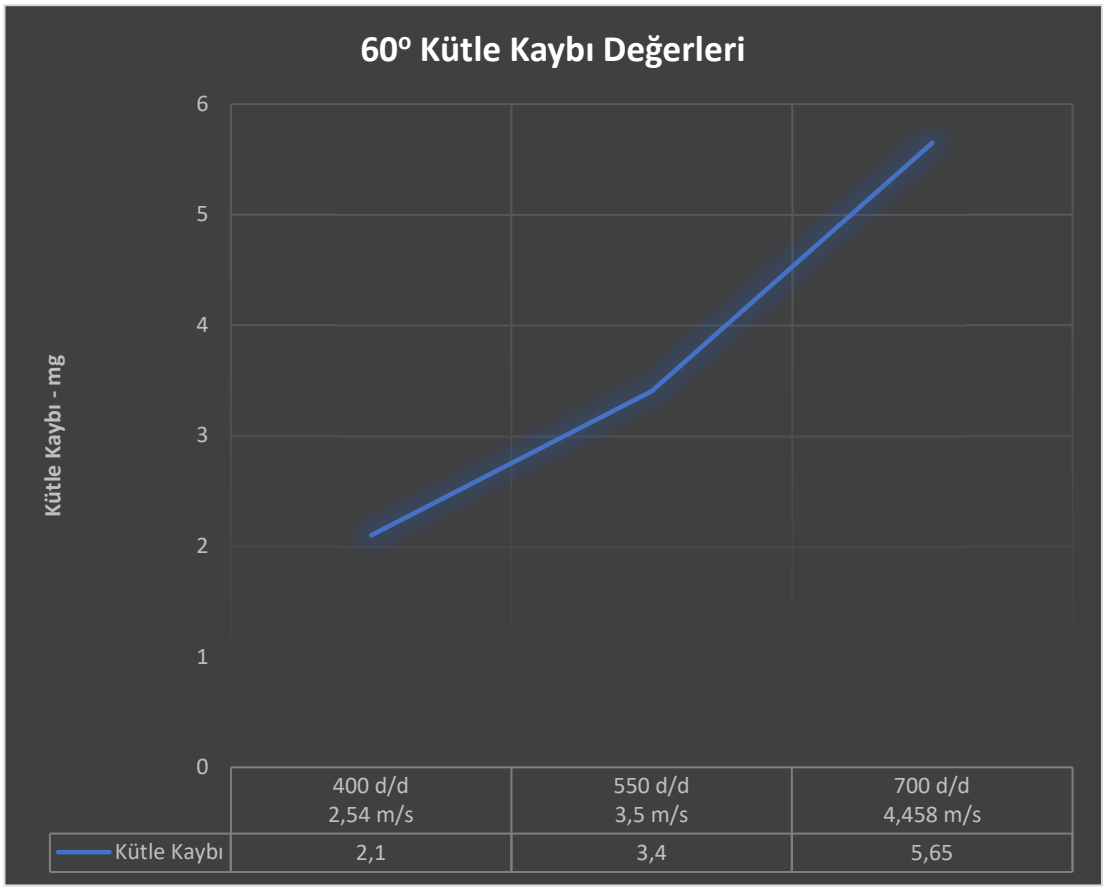
Yapılan deneylerin sonucunda tespit edilen veriler doğrultusunda (Çizelge 6.1), sabit konsantrasyon, çarpma hızları ve çarpma açıları girdi parametrelerine bağlı olarak aşınma miktarlarındaki farklılıklar gözlemlenmiştir. Hız ve açı değerleri ile aşınma miktarı ile arasında doğru bir orantı olduğu net bir şekilde görülmektedir.

AISI 2205 dubleks paslanmaz çelik malzeme için Şekil 6.5'de de belirtildiği gibi %15 konsantrasyon ortamında ve 90° çarpma açısı sırasıyla 2,5 m/s, 3,5 m/s ve 4,5 m/s çarpma hızı parametrelerinde yapılan deneylerin sonucunda meydana gelen kütle kaybı değerleri sırasıyla 0,6 mg, 0,75 mg ve 1,3 mg olarak tespit edilmiştir.



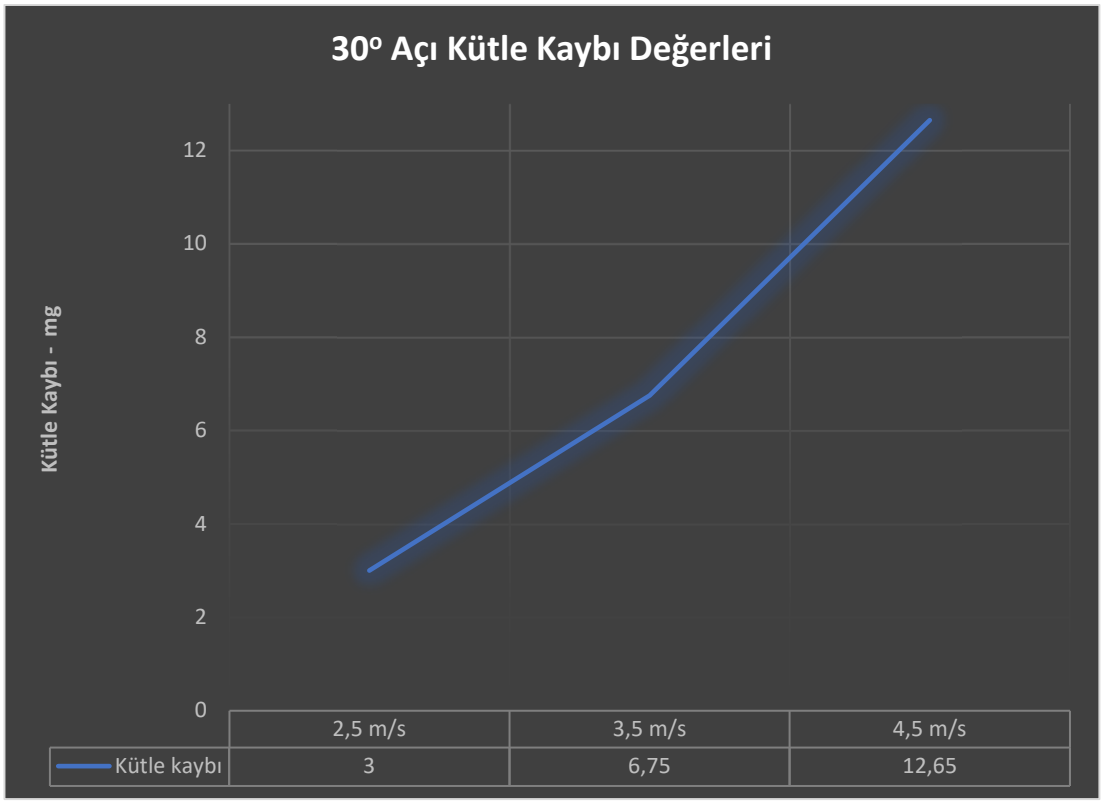
Şekil 6.5 – 90^{o} açı değerlerine göre kütle kaybı değerleri

Yine sabit konsantrasyon Şekil 6.6'te belirtildiği gibi ortamında çarpma açısı 60° olacak şekilde ayarlamak suretiyle, 2,5 m/s, 3,5 m/s ve 4,5 m/s çarpma hızı parametrelerinde yapılan deneylerin sonucunda meydana gelen kütle kaybı değerleri sırasıyla 2,1 mg, 3,4 mg ve 5,65 mg olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.6 – 60° açı değerlerine göre kütle kaybı değerleri

Şekil 6.7'te gösterilen grafikte olduğu gibi sabit konsantrasyon ortamında çarpma açısı 30° olacak şekilde ayarlamak suretiyle, 2,5 m/s, 3,5 m/s ve 4,5 m/s çarpma hızı parametrelerinde yapılan deneylerin sonucunda meydana gelen kütle kaybı değerleri sırasıyla 3 mg, 6,75 mg ve 12,65 mg olarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.7 – 30º açı değerlerine göre kütle kaybı değerleri

Çarpma açısı değeri parametresinin etkisinin tespit edebilmesi için sabit konsantrasyonda ve çarpma hızı değeri sabit kabul edilmek suretiyle çarpma açısı değeri bağımsız değişken olarak kabul edilmiştir.

Çarpma hızı parametrelerinden 2,5 m/s değerinde ayarlanan AISI 2205 malzeme için açı parametreleri olan 90°,60° ve 30° olarak ayarlandığında oluşan aşınma sonucu oluşan malzeme kayıpları sırasıyla 0,6 mg, 2,1 mg ve 3 mg olarak tespit edilmiştir.

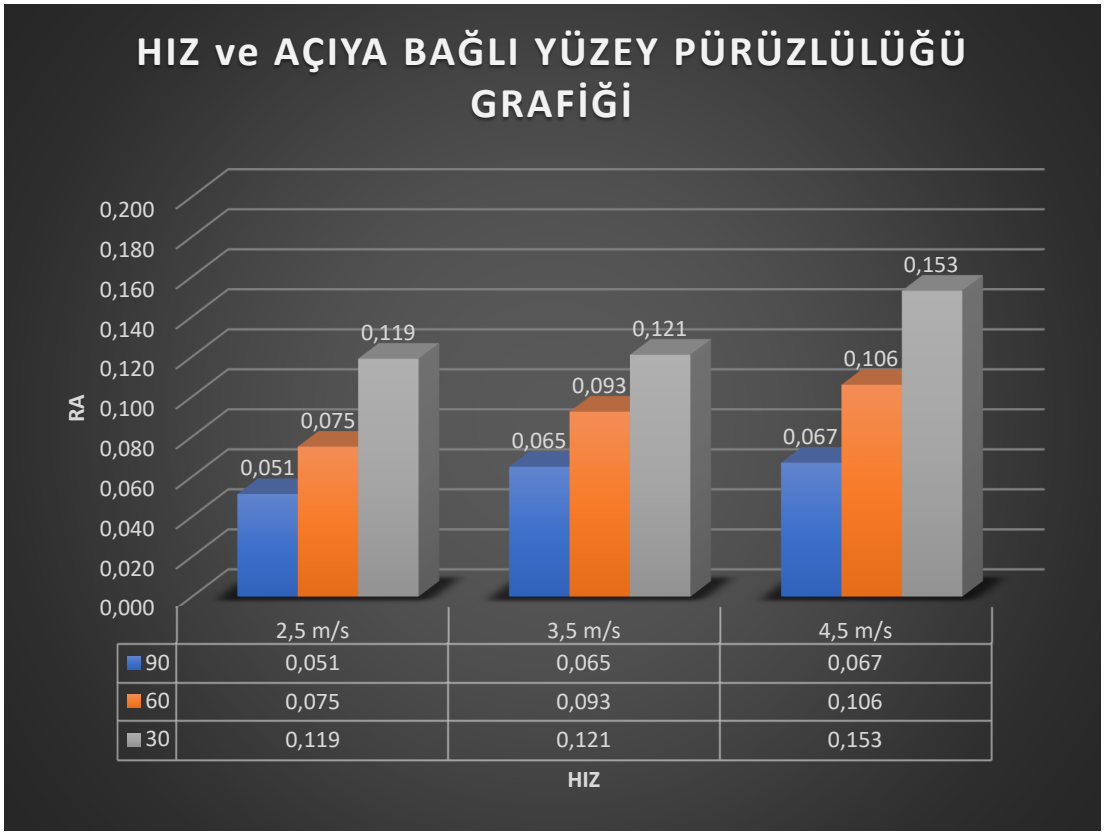
Çarpma hızı parametrelerinden 3,5 m/s değerinde ayarlanan AISI 2205 malzeme için açı değerleri sırasıyla 90°,60° ve 30° olarak ayarlandığında oluşan aşınma sonucu oluşan malzeme kayıpları sırasıyla 0,75 mg, 3,4 mg ve 6,75 mg olarak tespit edilmiştir.

Çarpma hızı parametrelerinden 4,5 m/s değerinde ayarlanan AISI 2205 malzeme için açı değerleri sırasıyla 90°,60° ve 30° olarak ayarlandığında oluşan aşınma sonucu

meydana gelen malzeme kayıpları sırasıyla 1,3 mg, 5,65 mg ve 12,65 mg olarak tespit edilmiştir.

6.3 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 6.8'de belirtilmiş olup, numunelerin yüzey pürüzlülüklerindeki değişimler, deneye parametrelerindeki değişimler ile doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir.



Şekil 6.8– Hız ve açıya bağlı yüzey pürüzlülüğü değerleri

Çarpma hızı parametrelerinden 2,5 m/s değerinde ayarlanan AISI 2205 malzeme için açı parametreleri olan 90°,60° ve 30° olarak ayarlandığında oluşan aşınma sonucu meydana gelen yüzey pürüzlülükleri sırasıyla 0,051 µm, 0,075 µm ve 0,119 µm olarak tespit edilmiştir.

Çarpma hızı parametrelerinden 3,5 m/s değerinde ayarlanan AISI 2205 malzeme için açı parametreleri olan 90°,60° ve 30° olarak ayarlandığında oluşan aşınma sonucu

meydana gelen yüzey pürüzlülükleri sırasıyla 0,065 µm, 0,093 µm ve 0,121 µm olarak tespit edilmiştir.

Çarpma hızı parametrelerinden 4,5 m/s değerinde ayarlanan AISI 2205 malzeme için açı parametreleri olan 90°,60° ve 30° olarak ayarlandığında oluşan aşınma sonucu meydana gelen yüzey pürüzlülükleri sırasıyla 0,067 µm, 0,106 µm ve 0,153 µm olarak tespit edilmiştir.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan deneyler ve tespit edilen veriler ile AISI 2205 dubleks paslanmaz çeliğin slurry erozif aşınma davranışı incelenmiştir. Farklı ortamlarda numunelerin erozif ortamda aşınmasının tespiti için kütle kayıpları ve yüzey pürüzlülükleri tespit edilmiştir. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada belirlenen parametrelere göre üç farklı çarpma hızı değeri (2,5 m/s, 3,5 m/s ve 4,5 m/s), sabit konsantrasyon değeri (%15) ve üç farklı çarpma açısı değeri (30°, 60° ve 90°) kullanılmıştır. Söz konusu parametreler ile Tam Faktöriyel metodu kullanılarak deney tasarımı oluşturulmuştur. Deneylerin tamamlanmasının ardından numune yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri ile oluşan aşınmaların tespiti yapılmış olup, EDX verileri ile elemental analizi yapılmıştır.

1. Çarpma açısı etkileri incelendiğinde, numune bağlama açısının düşmesi ile artan çözelti içerisindeki partiküllerin çarpma açısının dikleşmesi sonucunda aşınma miktarlarında artış gözlenmiştir.

    - 2,5 m/s olan hız için, 90^{o} numune bağlama açısı 60^{o} olduğunda kütle kaybı %46,104 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde 60^{o} numune bağlama açısı 30^{o} olduğunda kütle kaybı %58,67 oranında artış göstermiştir.

    - 3,5 m/s olan hız için, 90^{o} numune bağlama açısı 60^{o} olduğunda kütle kaybı %42,31 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde 60^{o} numune bağlama açısı 30^{o} olduğunda kütle kaybı %30,81 oranında artış göstermiştir.

- 4,5 m/s olan hız için, 90^{o} numune bağlama açısı 60^{o} olduğunda kütle kaybı %58,21 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde 60^{o} numune bağlama açısı 30^{o} olduğunda kütle kaybı %44,34 oranında artış göstermiştir.

2. Çarpma hızı etkileri incelendiğinde, deney düzeneğinde numunelerin dönüş hızının artması ile aşınma miktarlarında artış gözlenmiştir.

    - 90^{o} numune bağlama açısı için 2,5 m/s olan hız 3,5 m/s olduğunda kütle kaybı %26,061 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde 3,5 m/s olan hız 4,5 m/s olduğunda kütle kaybı %73,414 oranında artış göstermiştir.

    - 60^{o} numune bağlama açısı için 2,5 m/s olan hız 3,5 m/s olduğunda kütle kaybı %65,446 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde 3,5 m/s olan hız 4,5 m/s olduğunda kütle kaybı %62,405 oranında artış göstermiştir.

    - 30o numune bağlama açısı için 2,5 m/s olan hız 3,5 m/s olduğunda kütle kaybı %117,811 oranında artış göstermiştir. Aynı şekilde 3,5 m/s olan hız 4,5 m/s olduğunda kütle kaybı %96,084 oranında artış göstermiştir.

Elde edilen bu veriler, daha sonra yapılacak dubleks paslanmaz ya da diğer paslanmaz çeliklerin erozif aşınma ortamında performanslarının belirlenmesi çalışmalarına katkı sağlayabildiği gibi, aynı zamanda endüstriyel uygulamalarda uygun malzeme seçimine yardımcı olabilir. Ayrıca bu veriler erozif aşınma ortamında çalışacak ya da kullanılacak ekipmanların tasarımında göz önünde bulundurularak, ekipman ömürleri arttırılabilir.

Bundan sonraki çalışmalarda farklı kimyasal kompozisyonlardaki dubleks paslanmaz çeliklerin erozif aşınması üzerine çalışılabilir. Söz konusu malzemelere yüzey iyileştirme işlemleri uygulanarak, iyileştirme yapılmış ve yapılmamış malzemelerin aşınma performansları karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Yontar, A. A., "AISI 304 paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Konya, 28-29 (2011).

2. Balkan, A., "AISI 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin perçinlenme prosesinde çatlak oluşumuna etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, ***İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, İstanbul, 3 (2020).

3. Sarıtaş, "Paslanmaz Çelik Üretimi, Kullanımı, Standartları" 2004

4. Odabaş, C., (2007), "Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı", 1, ***Eczacıbaşı***, İstanbul.]

5. Fu, Z., "A study of static strain aging of selected ferritic steels", Master's Thesis, ***Tampere University of Technology Faculty of Engineering Sciences***, Tampere enyliopisto, 16 (2017]

6. Aran, A., Temel, M. A., "Giriş", Paslanmaz çelik yassı mamuller üretimi kullanımı standartları 2. bs., ***Acar Matbaacılık***, İstanbul, 12 (2004

7. Mcguire M. "Stainless Steels for Design Engineers" ***ASTM International*** (2008)

8. Çetin, E., "Paslanmaz çeliklerin lazer nokta kaynak yöntemiyle birleştirilmesinin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, ***Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Düzce, 23-25 (2019)

9. Tikhovskiy, I., Raabe, D., Roters, F., "Simulation of earing of a 17% Cr stainless steel considering texture gradients", ***Materials Science and Engineering A***, 488: 482-490 (2008).

10. Kısaöz A., Karaaslan A., "Dubleks paslanmaz çeliklerde oluşan yüksek sıcaklık fazlarına genel bir bakış", **Metalurji**, 162 (2012)

11. R. Badji, M. Bouabdallah, B. Bacroix, C. Kahloun, K. Bettahar, N. Kherrouba. "Effect of solution treatment temperature on the precipitation kinetic of σ phase in 2205 duplex stainless steel welds". **Materials Science and Engineering A** (2008) 447

12. Ciofu, F., Nioata A., Dobrota D., "Welds in the duplex stainless steel", **Fascicle of Management and Technological Engineering**, 19 (2010)

13. Association I. M., “Introduction”, Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel 3rd ed., ***The International Molybdenum Association***, London, 4 (2014).

14. Demirsöz, R., “Granül cüruf taşımada kullanılan boruların iç yüzeyinin aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi”, Doktora Tezi, ***Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Karabük, 16 (2018).

15. Varol, T., “Aşınma Deneyi”, Laboratuvar Föyü, ***Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi***, Trabzon, 4 (2016)

16. Stachowiak, G., W., Batchelor, A., W., “Abrasive, Erosive and Cavitation Wear”, ***Engineering Tribology***, ***Publisher Butterworth Heinemann***, 483-486 (2000).].

17. Bhushan, B., “Wear”, Principles and Applications of Tribology 2nd ed., ***A John Wiley & Sons Ltd.***, Ohio, 459-462 (2013).

18. Erdoğan, A., “Aşınma Deneyi Deney Föyü”, Malzeme Laboratuvarı II Dersi, ***Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi***, Bartın, 6-7

19. Sarıkaya, Ö., “Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri”, ***Sakarya Üniversites***i, Sakarya (2007)

20. Korkut, M. H., “Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Mikro yapısı ve Aşınması Üzerine Karbür Yapıcı Elementlerin Etkilerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, ***Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, Elazığ, (1997).

21. Kurgan, N., “Triboloji Ders Notları”, ***On dokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü***, İzmir

22. Ulutan, M., “AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri Ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, ***Eskişehir Osmangazi Üniversitesi***, Eskişehir, (2007).

23. Budinski, K. G., “Guide to Friction, Wear, and Erosion Testing”, Bud Labs, ***ASTM International***, USA, (2007).].

24. Lynn R., S., Wong, K., K., Clark H., M., “On the particle size effect in slurry erosion”, ***Wear***, 149: 55-71 (1991).]

25. Krishnan, A., V., Lim, C., Y., H., “Elucidating the specific and combined effects of particle size, impact angle, velocity and stress from an external load on the slurry erosion of mild steel S275JR”, ***Journal of Materials Research and Technology***, 14: 1052-1064 (2021)

26. Clark, H., M., “On the impact rate and impact energy of particle in a slurry pot erosion tester”, ***Wear***, 147: 165-183 (1991)

27. Telfer, C., G., Stack, M., M., Jana, B., D., “Particle concentration and size effect on the erosion-corrosion of pure metals in aqueous slurries”, ***Tribology International***, 53: 35-44 (2012).

28. Andrews, N., Giourntas, L., Galloway, A., M., Pearson, A., “Effect of impact angle of the slurry erosion-corrosion of Stellite 6 and SS316”, ***Wear***, 320: 143-151 (2014)

29. Levy, A., V., Chik, P., “The effect of erodent composition and shape on the erosion of steel”, ***Wear***, 89: 151-162 (1983)

30. Raadnuri, S., “Slurry – erosive wear and wear product alaysis using a SS430 propeller”, ***Wear***, 476 (2021).

31. Clark H.McI. “Particle velocity and size effects in laboratory slurry erosion measurements OR… do you know what your particles are doing?”, ***Tribology International***, 35: 617–624 (2002)

32. Nguyen Q.B., Lim C.Y.H.n, .Nguyen V.B., Wan Y.M., B.Nai B., Zhang Y.W., Gupta M. “Slurry erosion characteristics and erosion mechanisms of stainless steel” ***Tribology International,*** 79: 1–7 (2014)

33. Rajahram S.S., Harvey T.J., Wood R.J.K. “Erosion corrosion resistance of engineering materials in various test conditions” ***Wear*** 267: 244–254 (2009)

34. Lindgren M., Perolainen J. “Slurry pot investigation of the influence of erodent characteristics on the erosion resistance of austenitic and duplex stainless-steel grades”, ***Wear,*** 319:38–48 (2014)

35. Zum Gahr, K., H., “Erosive Wear of Materials”, Microstructure and Wear of Materials, ***Elsevier***, New York, 531 (1987).]

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Ali KAHRAMAN, 2006 senesinde Kırıkkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2010 senesinde Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2007 yılında Kardemir AŞ'de makine mühendisi olarak çalışmaya başlamış olup halen aynı firmada görevine devam etmektedir.