



**AISI 316 AISI 420 PASLANMAZ
ÇELİKLERİN SULU-ÇAMUR EROZİF
AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Sema YILMAZ

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ**

**AISI 316 AISI 420 PASLANMAZ ÇELİKLERİN SULU-ÇAMUR
EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

Sema YILMAZ

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ

T.C.

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

KARABÜK

Mart 2023

Sema YILMAZ tarafından hazırlanan “AISI 316 AISI 420 PASLANMAZ ÇELİKLERİN SULU-ÇAMUR EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ ” 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. 15/03/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

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

.....

Üye : Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ (KBÜ)

.....

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

.....

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

Prof. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Sema YILMAZ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

AISI 316 AISI 420 PASLANMAZ ÇELİKLERİN SULU-ÇAMUR EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Sema YILMAZ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ

Mart 2023, 62 sayfa

Bu çalışmada, erozif aşınmanın bir türü olan sulu-çamur erozif aşınma deneyleri için AISI 316 ve AISI 420 paslanmaz çelik malzemeler kullanılmış olup söz konusu malzemelerin erozif aşınma davranışı incelenmiştir. Deney parametreleri, %5, %10 ve %15 konsantrasyon, 2 m/s, 3,5 m/s ve 5 m/s çarpma hızı, 30°, 60° ve 90° çarpma açısı değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Çarpma açısı ve konsantrasyon değerleri arttıkça meydana gelen aşınma miktarında artış olduğu, çarpma açısı değeri arttıkça meydana gelen aşınma miktarında azalmalar olduğu görülmüştür. Bununla birlikte açı miktarı küçük değerden büyük değere doğru geçiş yaptıkça meydana gelen aşınma türü kesme aşınmasından deformasyon aşınmasına doğru ilerlediği tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Paslanmaz çelik, AISI 316, AISI 420, Erozif aşınma, Sulu çamur aşınma,

Bilim kodu : 91421

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF SLURRY EROSIVE WEAR BEHAVIOR OF AISI 316 AISI 420 STAINLESS STEELS

Sema YILMAZ

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineer**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Recep DEMİRSÖZ

March 2023, 62 pages

In this study, AISI 316 and AISI 420 stainless steel materials were used for slurry erosive wear tests, which is a type of erosive wear, and the erosive wear behavior of these materials was investigated. The test parameters were carried out at 5%, 10% and 15% concentration, 2 m/s, 3.5 m/s and 5 m/s impact velocity, 30°, 60° and 90° impact angles. It was observed that as the impact angle and concentration values increased, there was an increase in the amount of wear occurring, and a decrease in the amount of wear occurred as the impact angle value increased. However, it has been determined that the type of wear that occurs as the amount of angle changes from a small value to a large value progresses from shear wear to deformation wear.

Key Word : Stainless steel, AISI 316, AISI 420, erosive wear, slurry wear.

Science Code : 91421

TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitimim süresince; tez çalışmamın planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda, ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ Bey'e,

Yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sn. Dr. Öğretim Üyesi Abdullah UĞUR Bey'e, çalışmalarım esnasında her zaman yardımcı olan değerli araştırmacı Sn. Dr. Öğretim Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU Bey ve Makine Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Sn. Mehmet Tayyip Özdemir Bey'e, değerli meslektaşım Makine Mühendisi Sn. Oğuzhan ÇAKIR Bey'e,

Hayatımın tüm süreçlerinde benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili annem Fazilet KALAFAT ve sevgili babam Hüseyin KALAFAT'a, en kalben sevgimle canım eşim Serhat YILMAZ ve canımın parçası oğlum Kürşat Toprak YILMAZ'a, çalışmalarımda tecrübelerini ve desteklerini her daim benimle paylaşan manevi destekleri hep üzerimde olan sevgili kardeşim Gül ÖZDEN ve değerli eşi, meslektaşım, manevi kardeşim Hasan Hüseyin ÖZDEN'e sonsuz şükranlarımı sunar, tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Tez çalışmam, Karabük Üniversitesi BAP Kooordinatörlüğü tarafından KBÜ-BAP-22-YL-145 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Verilen destek için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
PASLANMAZ ÇELİKLER VE TÜRLERİ.....	3
2.1.GİRİŞ.....	3
2.1.1. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri.....	3
2.1.2. Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi	4
2.1.3. Paslanmaz Çeliklerin Üretimi.....	8
2.1.4. Paslanmaz Çeliklerin İçerisindeki Alaşım Elementleri ve Etkileri	10
2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	14
2.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	17
2.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler	19
2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	20
2.2.4. Çift Fazlı (Dubleks) Paslanmaz Çelikler	21
2.2.5. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler.....	22
BÖLÜM 3	24
AŞINMA VE TÜRLERİ	24

	<u>Sayfa</u>
3.1. AŞINMA SİSTEMİNDE TEMEL PARAMETRELER.....	24
3.2. AŞINMA MEKANİZMALARI.....	25
3.2.1. Abrazif Aşınma.....	25
3.2.2. Adhezif Aşınma.....	27
3.2.3. Eroziv Aşınma.....	28
3.2.3.1. Katı Partikül Erozyonu.....	28
3.2.3.2. Sıvı (Su) Damla Erozyonu.....	29
3.2.3.3. Katı Partikül Taşıyan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu.....	29
3.2.3.4. Kavitasyon Erozyonu.....	30
3.2.3.5. Elektro Erozyonu.....	30
3.2.4. Koroziv Aşınma.....	30
3.2.5. Yorulma Aşınması.....	31
BÖLÜM 4.....	32
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	32
4.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRMESİ.....	39
BÖLÜM 5.....	40
DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	40
5.1. AŞINDIRICI PARTİKÜL VE SULU ÇAMUR HAZIRLANMASI.....	40
5.2. MALZEME SEÇİMİ VE NUMUNE HAZIRLAMA.....	41
5.3. DENEY SİSTEMİNİN TASARIMI VE PROSEDÜRÜ.....	42
5.4. DENEY PARAMETRELERİ.....	43
BÖLÜM 6.....	44
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	44
6.1. AŞINMA MİKTARLARI.....	44
6.2. AŞINMA YÜZEYLERİ.....	45
6.3. KÜTLE KAYBI.....	47
6.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ.....	49
6.5. SICAKLIK DEĞİŞİMİ.....	51

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 7	54
SONUÇLAR	54
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	62

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.4. Adhezif aşınma mekanizması şematik görüntüsü	28
Şekil 3.5. Katı partikül erozyonu türleri.....	29
Şekil 5.1. Aşındırıcı SiO ₂ kumuna ait SEM görüntüleri a) AISI 316 ile çalışmış b) AISI 420 ile çalışmış c) elemenden önce d) elemenden sonra.....	41
Şekil 5.2. Slurry erozif aşınma uygulaması şematik gösterimi.....	42
Şekil 6.1. AISI 316 ve AISI 420 numuneler için 2 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 1 b) deney 2 c) deney 3.....	46
Şekil 6.2. AISI 316 ve AISI 420 numuneler için 3.5 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 4 b) deney 5 c) deney 6.....	46
Şekil 6.3. AISI 316 ve AISI 420 numune için 5 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 7 b) deney 8 c) deney 9.....	47
Şekil 6.4. Numunelerin farklı aşınma koşullarında sıcaklık değişimi a) AISI 316 paslanmaz çelik b) AISI 420 paslanmaz çelik.....	48
Şekil 6.5. Numunelerin farklı aşınma koşullarında yüzey pürüzlülüğü a) AISI 316 paslanmaz çelik b) AISI 420 paslanmaz çelik.....	50
Şekil 6.6. Numunelerin farklı aşınma koşullarında sıcaklık değişimi a) AISI 316 paslanmaz çelik b) AISI 420 paslanmaz çelik.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Östenit-Ferrit oluşturuçu elementler ile nötr elementler ve etkileri.....	13
Çizelge 2.2. Paslanmaz çelik gruplarına ait mekanik özellikler	16
Çizelge 2.3. Paslanmaz çelik gruplarına ait kimyasal bileşimler.....	16
Çizelge 2.4. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler	17
Çizelge 6.1. Deneysel sonuçlar ve TAGUCHI L9 deney tasarımı	44

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

%	: yüzde
/	: bölme
°	: derece, açı birimi
°C	: santigrat derece
µm	: mikrometre
13Cr-4Ni	: martenzitik paslanmaz çelik
A	: açı
Al	: alüminyum
Al ₂ O ₃	: alüminyum oksit
C	: karbon
c	: konsantrasyon
Cr	: krom
Cr ₂ O ₃	: krom oksit
Cu	: bakır
d/d	: devir/dakika
Fe	: demir
gr	: gram
HB	: brinel sertliği
HV	: vickers sertliği
m/s	: metre/saniye
mg	: miligram
mm	: milimetre
Mn	: mangan
Mo	: molibden
MPa	: megapaskal
N	: azot

Nb	: niobyum
Ni	: nikel
O ₂	: oksijen
P	: fosfor
Ra	: yüzey pürüzlülüğü
S	: kükürt
Se	: selenyum
Si	: silisyum
SiC	: silisyum karbür
SiO ₂	: silisyum dioksit
Ti	: titanyum
V	: hız
vb.	: ve benzeri
W	: tungsten
WC-12 Co	: tungsten karbür kobalt tozu

KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ANOVA	: Analysis Of Variance (Varyans Analizi)
AOD	: Argon Oxygen Decarburization (Argon Oksijen Karbon Gidericisi)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
CVD	: Chemical Vapour Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
DIN	: Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
EAF	: Electric Arc Furnace (Elektrikli Ark Ocağı)
HB	: Hardness Brinell (Brinell Sertlik Derecesi)
HMK	: Hacim Merkezli Kübik
HMT	: Hacim Merkezli Tetragonal
HVOF	: High Velocity Oxygen Fuel (Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme)
MIG	: Metal Inert Gas (Metal İner Gaz)
ML	: Mass Loss (Kütle Kaybı)
PCD	: Polly Crystal Diamond (Çok Kristalli Elmas)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SR	: Surface Roughness (Yüzey Pürüzlülüğü)
TC	: Temperature Change (Sıcaklık Değişimi)
TIG	: Tungsten Inert Gaz (Tungsten İner Gaz)
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Bileşiminde en az %10,5 krom bulunan çelikler “paslanmaz çelik” olarak adlandırılmaktadır. Günümüzde paslanmaz çelikler; sahip oldukları kimyasal özellikleri, yüzey kaliteleri ve fiziksel dayanımları dikkate alınarak her çeşit endüstri ve sanayi kolunda geniş bir kullanım alanı oluşturmakta ve teknolojinin de gelişmesiyle bu çeliklere olan ihtiyaç günden güne artış göstermektedir. Paslanmaz çelikler genellikle; ferritik, martenzitik, çift fazlı (dublex), çökeltme sertleşmesi uygulanabilen ve östenitik paslanmaz çelikler adı altında beş ana başlıkta toplanmaktadır.

Endüstriyel tesislerde malzemeler ilk günkü görüntüsünde kalamayacağı gibi sürekli olarak bir değişim ve dönüşüm içerisinde bulunmaktadır. İki yüzeyin birbirine teması ile meydana gelen çarpma, kayma ya da yuvarlanma hareketleri sonucunda temas halindeki iki yüzeyde veya yalnızca birinde parça kopmasına ve bunun sonucunda kütle kaybetmesine aşınma adı verilmektedir [1]. Aşınma genel olarak istenmeyen bir durum olup triboloji biliminin ele aldığı bir konudur. Çevresel faktörlere bağlı olarak aşınma beş farklı ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar; abrazif, adhezif, erozif, korozif ve yorulma aşınmasıdır.

Bu çalışmanın ele aldığı erozif aşınma, sıvı veya gaz akışkan içerisinde bulunan, boyutsal ve geometrik olarak farklılık gösteren aşındırıcı partiküllerin sürekli olarak katı yüzeylere darbeler uygulaması ile yüzeyden parça koparması durumudur [2]. Eroziyonun bir türü olan sulu-çamur (slurry) erozif aşınması ise gaz veya sıvı akışkan içinde düşük hızlarda taşınan katı partiküllerin içerisinde bulunduğu yüzeye tekrarlı olarak darbe uygulayarak yüzeyden parça kopmasına ve bu yüzden kütle kaybına sebebiyet vermesine denmektedir.

Bu çalışmanın amacı, endüstride büyük bir önem ve yere sahip AISI 316 ve AISI 420 kalite paslanmaz çelik malzemelerin, farklı parametreler kullanılarak (%5, %10 ve %15 konsantrasyon, 2 m/s, 3,5 m/s ve 5 m/s çarpma hızı, 30°, 60° ve 90° çarpma açısı) erozif aşınmanın bir türü olan sulu-çamur (slurry) erozif aşınma yöntemiyle erozif aşınma davranışını incelemektir.

BÖLÜM 2

PASLANMAZ ÇELİKLER VE TÜRLERİ

2.1. GİRİŞ

Kimyasal içeriklerinde kütlece minimum %10,5 oranında krom (Cr) ve maksimum %1,2 oranında karbon (C) içeren demir esaslı alaşımlar olarak tanımlanan paslanmaz çelikler, korozif ortamlarda çalışacak makine ve yapı elemanlarının en önemli malzemesi olmakla beraber; üstün mekanik özelliklerinden dolayı, ilaç endüstrisinde, petro-kimya, gıda, kimya, uçak, takım ve paslanmaz eşya endüstrisinde ve nükleer enerji santrallerinde geniş kullanım alanında büyük bir öneme sahiptirler [3].

İçeriğinde kullanılan krom, çelik yüzeyinde yüzeye tutunmuş sünek ve ince oksit tabakası oluşturmaktadır. Oluşan oksit tabakası ince bir yüzeye sahip olup, yüzeyi aktif olmayan bir hale getirir ve oksidasyonun yüzeyden derinlere ilerlemesine engel olur. Çeliğin içerisindeki krom, oksit tabakası zarar gördüğünde, havadaki oksijen ve nemle etkileşime girerek oksit tabakasını yeniden oluşturarak kendisini onarır [4].

2.1.1. Paslanmaz Çeliklerin Üstünlükleri

Paslanmaz çelikler; hijyenik özellikleri, imalat kolaylığı, yüksek ve düşük sıcaklıklardaki dayanımı, mekanik dayanımı, uzun ömürlülüğü, korozyon direnci ve görünüm özellikleri açısından tercih sebebidir [5].

Mekanik Dayanım: Paslanmaz çeliklerin genelinde soğuk şekillendirmeye pekleşme olur ve bu mekanik direnci artırır. Bu sayede tasarım yapılırken malzeme kalınlığı azaltılıp fiyat ve ağırlıkta önemli düşüşler sağlanır. Bazı türlerde ısı işlem yapılarak yüksek dayanım sağlanır.

İmalat Kolaylığı: Paslanmaz çeliklerin büyük çoğunluğu sıcak ve soğuk şekillendirme, kesme, kaynak ve talaşlı imalat işlemleriyle rahatlıkla biçimlendirebilirler.

Yüksek ve Düşük Sıcaklıklar: Paslanmaz çeliklerin bazı türlerinde, yüksek sıcaklıklarda bile tufallanma ve malzemenin mekanik dayanımında kaydadeğer bir düşüş görülmez. Bazı türleri ise çok düşük sıcaklıklarda dahi tokluklarını korurlar ve gevrekleşmezler.

Görünüm: Paslanmaz çelikler, farklı yüzey kalitelerinde üretilebilmektedirler. Paslanmaz çeliklerin yüzeylerinin kalitesi ve görünümü bakımı kolay olduğundan servis koşullarında uzun süre korunabilir.

Uzun Ömür: Üretilen araçların kullanım ömrü dikkate alındığında, paslanmaz çelikler bakımı kolay ve dayanıklı olduklarından ekonomik malzemelerdir.

Hijyenik Özellik: Paslanmaz çelikler kolay temizlenebilir olması, yüzeylerinde kirlilik ve bakteri vb. tutunabilmesi zor olduğundan dolayı bu özellikleriyle mutfak, hastane, gıda ve ilaç vb. gibi alanlarda yaygın bir şekilde kullanılması sağlar [6].

Korozyon Direnci: Paslanmaz çeliklerin tümünde korozyon dayanımı yüksektir. İçlerinden düşük alaşımlı olan paslanmaz çelikler durağan şartlarda ki atmosferik korozyona dayanabilirken, yüksek alaşımlı olan paslanmaz çelikler ise alkali, asit çözeltilerine hatta klor içeren ortamlarda bile korozyon dayanımı göstermektedirler. Bu tür paslanmaz çelikler ilave olarak yüksek sıcaklık ve basınç şartlarında da kullanılabilirler [7].

2.1.2. Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi

Çeliğe paslanmaz özelliğini sağlayan alaşım elementi olarak kendini gösteren krom, 1797’de Alman Kimyager M.H. Klaproth ve Fransız Louis Nicolas Vauguelin tarafından, Ural Dağları’ndan gelen “Crocoite” adı verilen parlak kırmızı renkli bir mineralin analizi esnasında yeni bir element olarak ortaya çıkmıştır. Bileşiminde %64

oranında kurşun içeren bu cevherden yeni bir elementin ayrıştırma çalışmaları esnasında, mineralin çeşitli renklere bürünmesi sebebiyle, Kristalograf Renejust Haüy'ün önerisi ile Vauguelin bu elemente Yunanca “Renk” kelimesinden türetilmiş olan krom adını vermiştir [8].

Modern metalurjinin dikkate değer bir başarısı olan paslanmaz çelik, 20. yüzyılın önde gelen metalurjistlerinden Carl Zapffe tarafından “mucize metal” ve “metalurjinin parlak başarısı” olarak tanımlanmıştır. Kromun bir element olarak belirlenmesi ile başlayan ilk keşifler, 18. ve 19. yüzyıllarda gerçekleşmiştir [9].

Paslanmaz çeliklerin tarihi ve ilk üretimi 1700'lü yılların sonuna dayanmaktadır. Pierre Berther, Storrad ve Farraday girişimiyle ilk kez Fe-Cr içeren alaşımların asitlere karşı dirençli olduğu tespit edilmiş ancak içeriğindeki Cr oranının düşük olması nedeniyle hedeflenen paslanmazlığa ulaşım gecikmiştir [10].

Demir-krom ve demir-krom-nikel alaşımlarının ticari kullanımına yönelik gerçekleşen bir dizi keşif ile birlikte metalurjinin modern bir mühendislik disiplini olarak ortaya çıkmasının sonucu olarak en önemli ilerlemeler 20. yüzyılın başlarında gerçekleşmiştir. Sonradan paslanmaz çelik olarak adlandırılan bu çeliklerin genellikle başlangıçta çatal-bıçak takımı olarak kullanılan ilk ticari martenzitik paslanmaz çeliği üreten Harry Brearly (1871-1940) tarafından keşfedildiği bilinmektedir [9].

Bununla birlikte paslanmaz çeliğin keşfinde rol alan altı önemli kâşif olarak Leon Guillet, Philipp Monnartz, Harry Brearly, Albert M. Portevin, Eduard Maurer ve W. Giesen olarak belirtilebilir. Michael Faraday (1791–1867) and Stodart çeliğin alaşımlandırması üzerine deneyler yapmışlardır [9].

1820 yılında yayınlanan makaleleri çeliğe gümüş, platinyum, rodyum, nikel ve krom elementlerinin eklenmesi ile ilgili çalışmaları içermektedir. Denedikleri en yüksek krom içeriği %3 oranında kalmıştır. Stodart ve Faraday'ın yayınlanan makalesinde kromu çeliğe eklemeleri Pierre Berthier (1782-1881)'in dikkatini çekmiştir ve 1821 yılında Berthier, birleşik oksitlerin indirgenmesi ile doğrudan şu an ferrokrom olarak bilinen demir-krom alaşımlarını üretmeye başlamıştır. Ferrokromun bulunuşu

paslanmaz çelik üretiminde ergimiş demire eklenebilir olması nedeni ile tarihi bir olaydır. Berthier krom içeren çelik üretmesine karşın alaşım düşük miktarda krom (%1- %1,5) içermektedir [9].

1871 yılında M. Wwoods ve J. Clark, %30-35 arasında krom (Cr) ve %2 tungsten (W) ihtiva etmekte olan ilk paslanmaz özellikte çelik patentini almıştır. Ancak patentli olan bu paslanmaz çelik yağmur suları ile aside karşı direncini koruyabilmiş fakat paslanmazlık bakımından o kadar başarılı bir duruş sergileyememiştir [10].

1872 yılında J.E.T. Woods ve J. Clark, çeliğin %33'ü olacak şekilde %5 tungsten-%95 krom bileşimi ile asit ve hava koşullarına dayanıklı yeni bir alaşım keşfetmişlerdir [9].

Brustlein, paslanmaz çeliklerin ihtiva etmesi gereken karbon (C) ve krom (Cr) oranı hakkında araştırmalarına 1874 yılının sonlarına doğru başlamıştır. Test ve araştırmaların neticesinde, paslanmaz çelik yapısındaki C/Cr oranının çok önemli olduğuna ve bu oranın malzemenin iç yapısına dahi etki ettiğine kanaat getirmiştir. Brustlein paslanmaz çeliklerde C oranının %0,15'i geçmeyecek şekilde kanaatinin olması günümüzde üretilen paslanmaz çeliklerin temelini oluşturmaktadır [10].

1892 yılında A. Hadfield (1858–1940), %16,74 krom ve yüksek karbon (%1- %2) içeren çeliklerin korozyon dayanımını keşfetmiştir. 1895 yılında Hans Goldschmidt (1861–1923), alüminotermik reaksiyon ile düşük karbonlu ferrokrom üretimini keşfetmiştir. Bu durum düşük karbon içeriğine sahip krom çeliklerinin üretilmesine olanak sağlamıştır. [9].

Leon Gulliet (1873-1946), 1904 yılındaki keşifleriyle, halihazırda kullanılan fazlaca martenzitik ve ferritik yapılı paslanmaz çelik kalitelerini ilk kez üretmiştir. Gulliet bu çelikleri AISI standartlarına göre üretmiş olup, 1800'lü yılların sonuna doğru AISI 410, 420, 440, 442 ve 446 gibi martenzitik yapılı paslanmaz çelikler üretmiştir. 1905 yılının sonuna doğru üretilen 300 serisi östenitik yapılı paslanmaz çeliklerin üretimine de önemli katkıları bulunmuştur [10].

1908 yılında Philip Monnartz, yüksek kromlu çeliklerde karbon oranının korozyon dayanımına etkisi üzerine çalışmıştır. 1911 yılında yayınladığı çalışmasında önemli keşifler yer almaktadır. “Paslanmazlık” olarak belirttiği kavramın açıklaması, en az %12 krom içeriğinin alaşımdaki önemi ve ilk kez pasiflik kavramı burada anlatılmıştır. Ayrıca, karbür çökmesini de ilk keşfeden kişi olarak bilinmektedir ve son olarak titanyum gibi elementler ile bir alaşımın nasıl stabilize edilebileceğini de açıklamıştır. Monnartz, paslanmaz çeliği ve paslanmaz çeliğin neden paslanmaz olduğunu keşfettiğini göstermiştir. Monnartz’ın çalışmaları, Guliet’in çalışmalarını tamamlamaktadır [9].

Martenzitik ve ferritik alaşımlar üzerine çalışan ve yayınları bulunan Albert M. Portevin (1880–1962), çalışmalarında çoğunlukla Guillet’in orijinal alaşımlarından yararlanmış ve yeni alaşımları paslanmaz çelikler arasına katmıştır. Bunlardan en önemlisi %17,38 krom ve %0,12 karbon içeren 430 paslanmaz çeliğidir [9].

Paslanmaz çeliklerin globalleşen dünyada kullanım alanlarının gittikçe artış göstermesi nedeniyle araştırmaları ve geliştirmelerinde artış meydana gelmiştir. İngiltere’de I. Dünya Savaşı öncesi silah üretiminde önemli artışlar yaşanmış fakat silah fiçularının iç yüzeyinde meydana gelen erozyon (aşırı aşınma) nedeniyle uygulamada sorunlar ortaya çıkmıştır. Bu nedenle Harry Brearley (1871-1948), yüksek sıcaklıkların sebep olduğu aşınmaya daha dayanımlı yeni çelikler araştırmaya başlamıştır. Malzemenin ergime noktasını yükselttiği bilinen çeliğe, standart karbon çeliklerine kıyasla krom (Cr) eklenmesini incelemeye başlamıştır [10]. Bu araştırmada, karbon (C, ağırlıkça %0,2 civarındaki konsantrasyonlarda) ve krom (Cr, ağırlıkça %6 - %15 arasında) seviyelerinin değiştirilmesinin etkilerini görmeye odaklanmıştır. Deneysel çalışmalarda alaşımların mikro yapısını incelemek için üretilen metalik numunelerin parlatılması ve aşındırılması gerekmiştir. Bir karbon çeliği için, gerekli dağlamayı üretmek için alkol içinde seyreltik bir nitrik asit çözeltisi yeterlidir fakat Brearley yeni krom çeliklerinin kimyasal saldırılara karşı çok dirençli olduğunu keşfetmiştir. Geline bu noktada korozyona karşı bir miktar direnç kazanılmış ancak üreticilerin ihtiyaçlarını karşılamada hala eksikler mevcuttur. Bundan yola çıkarak, bu alanda oldukça fazla araştırma ve geliştirme çalışması yapan

Krupp Iron Works (Alman) firması, Brearley'in ürettiği çelik alaşımına Ni elementi ekleyerek tekrar testler yapmışlardır. Bu testler neticesinde C-Cr-Ni ihtiva eden bu çelik sünelik, korozyon direnci, sertlik ve mukavemet bakımından önceki çeliklerden çok daha iyi özellikler sergilemiştir. Fakat Almanya'nın I. Dünya Savaşına girmesiyle bu girişim oldukça ötelenmiş ve sekteye uğramıştır [10].

1912 yılında, Eduard Maurer ve Benno Strauss, östenitik alaşımların asitlere karşı direnci keşfetmiştir. Bu keşif, Maurer'in çalışmasıyla krom-karbür şeklinde gerçekleşip, çözelti oluşturmak için sünek bir yapıdan daha etkili olduğunu ortaya çıkarmıştır [11].

II. Dünya Savaşı'nın etkisiyle 1950 yılında, Ni tedariginde problemler yaşanmış ve bunun yerine N ve NMn kullanılarak AISI 200 serisi paslanmaz çelik grubu geliştirilmiştir. Bu gibi ihtiyaçlar doğrultusunda düşük C ve N içerikli dubleks ferritik ve süper östenitik paslanmaz çelikler üretilmiştir [8].

1913-1935 yılları arasında endüstride kullanılan birçok paslanmaz çelik kalitelerinin temellerinin atıldığı bilinmektedir. Şu an halihazırda 150'den fazla paslanmaz çelik kalitesi kullanılmaktadır [10].

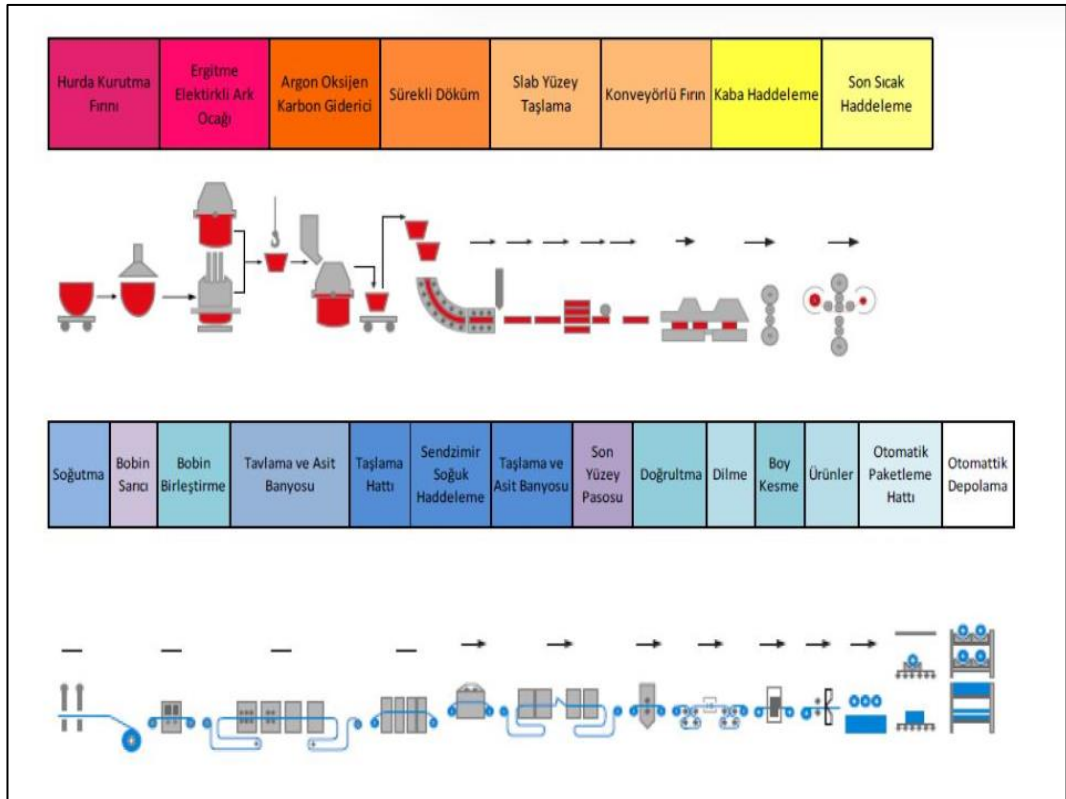
2.1.3. Paslanmaz Çeliklerin Üretimi

Yüksek uzmanlık ve yatırım gerektiren bir teknoloji olan paslanmaz çeliklerin üretimi, ergitmenin genellikle elektrik ark ocağında (EAF) ve arıtmanın argon oksijen karbon gidermesinde (AOD) yapıldığı yöntem ile gerçekleştirilir. Dünya üzerinde paslanmaz çelik üretiminin %80'i, 1970'lerde geliştirilen bu yöntemle yapılmakta olup kalitenin yükseltilmesi ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi avantajlarını sağlamıştır [5].

EAF-AOD yönteminde ergitme işlemi bazik astara sahip elektrik ark ocağında yapılmaktadır. Paslanmaz çelik hurdaları, ferrokrom alaşımları, karbon çeliği hurdaları ve gereken durumlarda alaşım elementleri elektrik ark ocağına yüklenir. Tartımı yapıp çelikhaneye gönderilen malzemeler, öncelikle kurutma fırınında belirli bir süre boyunca tutulur. Daha sonra elektrik ark ocağında ergitilirler [5].

Üretimin en önemli adımı “Argon Oksijen Karbür Gidericisi”nde gerçekleştirilen işlemdir (AOD). Burada paslanmaz çeliğin arzu edilen kimyasal bileşime ulaşması sağlanır. Önce eriyiğe yan memelerden ve üstten oksijen ve argon gazı üflenir. Bu adımda alaşımın bileşiminde bulunan karbon yakılır ve gerektiğinde %0,02’ye kadar indirilebilir. Bu aşamada krom oksitlenmeye karşı hassas olduğundan, bileşimdeki kromun bir kısmı curufa geçer. Bu sebeple kromun alaşım içerisine eklenmesi yüksek ölçüde karbür giderme tamamlandıktan sonra yapılmaktadır [5].

Bir sonraki aşamada alaşımda bulunan kükürtün oranı düşürülür. Sıcaklık ve bileşim hedeflenen aşamaya geldiğinde, eriyik döküm potasına alınır ve yapılan düzenlemeler bazı elementlerin alaşıma ilavesiyle tamamlanır. Argon gazı üflenerek eriyiğin homojenleştirilmesi sağlanır. Şekil 2.1’de AOD işleminin tamamlanmasının ardından gerçekleşen genel üretim aşamaları gösterilmektedir [5].

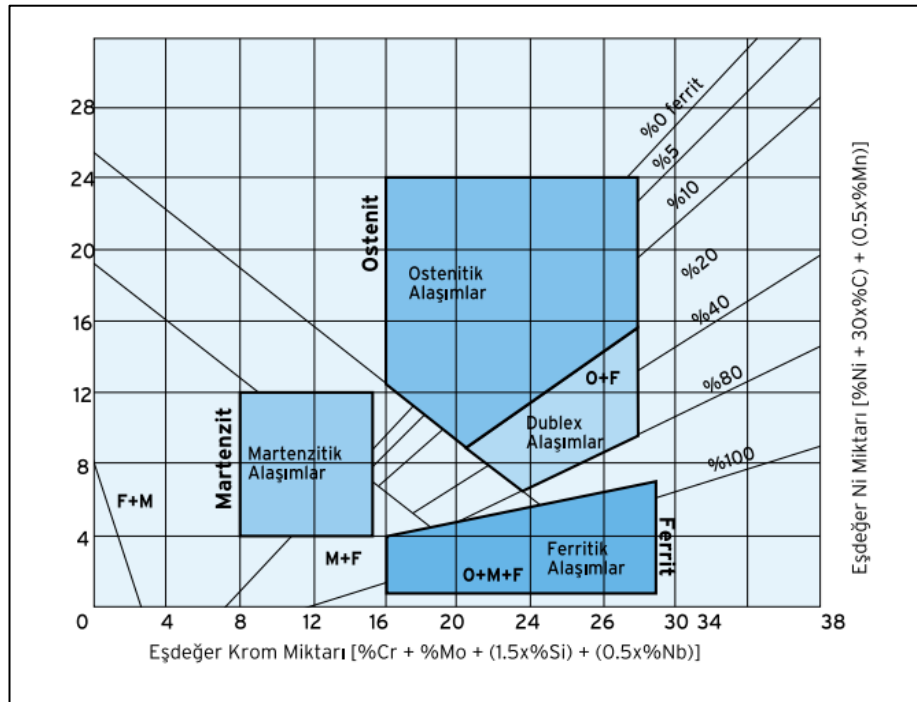


Şekil 2.1. Paslanmaz çelik üretim aşamaları [5]

2.1.4. Paslanmaz Çeliklerin İçerisindeki Alaşım Elementleri ve Etkileri

Paslanmaz çelikler, paslanmazlık özelliğini sağlayan elementlerin yanında özelliklerini geliştirmek amacıyla alaşım elementlerinin eklenmesi ile birçok farklı alanda kullanılabilirler. Her bir alaşım elementinin çelik üzerinde farklı bir etkisi bulunmaktadır [12].

Önem sırasına göre paslanmaz çeliklerde iç yapıyı belirleyen en önemli alaşım elementleri krom, nikel, molibden ve mangandır. Öncelikli olarak krom ve nikel iç yapının ferritik veya östenitik olmasını belirler. Birbirinden farklı paslanmaz çelik kalitelerinin bileşim açısından yerini gösteren Schaeffler Diyagramı Şekil 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Schaeffler diyagramı [5]

Paslanmaz çeliklerin sahip oldukları alaşım elementleri östenit yapıcı ve ferrit yapıcı olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadır. Ferritik oluşturan elementler; krom, molibden, alüminyum, wolfram, titanyum, niyobyum, fosfor, kükürt ve selenyumdur. Östenit oluşturan elementler; karbon, nikel, azot ve bakırdır. Nötr elementler ise; mangan, silisyumdur.

Ferritik oluşturan elementler:

Krom (Cr): Paslanmazlık özelliğine sahip çeliklerin içerdiği başrol elementidir. Aynı zamanda krom ferrit ve karbür oluşumunu sağlamaktadır. Paslanmaya karşı direnç sağlar ve bunun yanı sıra malzemeye parlak bir görüntü kazandırır. Ancak krom elementi paslanmaz çeliklerde mukavemete önemli bir etkisi görülmemektedir [13].

Molibden (Mo): Asit ve klorür içeren ortamlarda paslanmazlık özelliği gösteren çeliğin korozif ortama karşı direncini artırır. Ferrit yapıcıdır. Yüksek sıcaklıklarda malzemenin mukavemetli olmasını sağlar. Redükleyici ortamlarda malzemelerin korozyona karşı dayanımını artırır [13].

Alüminyum (Al): Isıya karşı mukavemet oluşturan alaşımlarda kullanılır. Tufalleşme dayanımını özellikle yüksek sıcaklıklarda artırmaktadır. Oldukça yüksek derecede ferrit yapıcı bir elementtir. Yapı içine katılan Si' un etkisini güçlendirir [13].

Tungsten (W): yüksek sıcaklık alaşımları sürünme dayanımını ve mukavemet dayanımını yükseltmek için ilave edilmektedir. Tungsten elementi ferrit yapıcı bir elementtir [13].

Titanyum (Ti): krom karbür çökmesini önlemek amacı ile özellikle östenitik çeliklerde kullanılır. Alüminyum ile beraber ilave edilmesi durumunda yaşlanma sertleşmesini etkilemek için özellikle ısıya dayanıklı çeliklere katılmaktadır. Titanyum iyi bir ferrit yapıcı elementtir [13].

Niobyum (Nb): Niyobyum karbür yapıcı bir elementtir. Özellikle östenitik alaşımlarının krom karbür çökmesini dengelemektedir. Martenzitik paslanmaz çelikte oluşabilecek sertleşmeyi düşürmek için ilave edilir. Orta şiddette ferrit yapıcı bir elementtir. Taneler arası korozyonu önler [13].

Selenyum (Se), Kükürt (S) ve Fosfor (P): Bu elementleri özellikle kaynak metalinde çatlama oluşumuna sebep olmaktadır. Bu elementlerden herhangi birisi zirkonyum ya

da molibden elementleri ilave edilmesi durumunda, çelikte talaş işleme becerisi yükselmektedir [13].

Östenit oluşturan elementler:

Karbon (C): Tüm demir alaşımlarında bulunan metalik olmayan önemli bir alaşım elementidir. elik yapısı içinde östenit dengeleyici özelliğe sahiptir. Karbon miktarındaki artış sertlik ve dayanımı artırırken, şekillenebilirlik ve kaynak kabiliyetini azaltır. Kaynak metalinin korozyon direncini, tokluğunu olumsuz yönde etkilemektedir. Aynı zamanda karbon ferrit yapıcı bir elementtir [14].

Nikel (Ni): Nikel, krom elementi fazla olan ve karbon oranı düşük olan çeliklere katılmaktadır. Bu çeliklere katılmasının amacı yüksek sıcaklıklarda oluşan tane büyümesini engellemek içindir. Östenit yapıcı ve dengeleyicidir. Nikel mukavemet ve tokluğu artırmaktadır. Mekanik zellikleri iyileştirici etkisi vardır. Kaynak metali tokluğunu artıcı etkisi vardır. Paslanmaz eliklerin yüzeyinde meydana gelen koruyucu pasif tabakaya doğrudan etkisi bulunmamaktadır. Ancak paslanmaz çeliklerde sülfürlü ve klorürlü ortamlarda korozyon direncini arttırmaktadır [4].

Azot (N): Östenit yapıcı bir elementtir. Östenit oluşurmada nikel elementi kadar etkilidir. Düşük karbonlu, kromca zengin olan paslanmaz çeliklerde yüksek sıcaklıklarda oluşan tane büyümesini önlemek için ilave edilir. Azotun ilave edilmesi durumunda mukavemeti artmaktadır. Kaynak bölgesini tokluk bakımından özellikle sıfıraltı sıcaklıklarda olumsuz yönde etkilemektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerde katı eriyik içerisinde znmekte ve akma dayanımını arttırmaktadır [4].

Bakır (Cu): Tesiri düşük olan bir östenit miktarı dengeleyicidir. Korozyon dayanımlarını artırmak amacıyla farklı durumlarda östenitik paslanmaz çeliklere eklenir. Yaşlanma yolu ile sertleşmeye teşvik eder. Oksitlenmeyi azaltarak korozyon direncini artırır [4].

Nötr elementler:

Mangan (Mn): Östenit yapıcı element olarak kullanılır. Alaşım elementleri arasındaki en iyi deoksidasyon metalidir. Sertleşebilme, dayanım ve kaynak kabiliyetini artırır. Yüksek sıcaklıklarda ferrit oluşturmaktadır. Kükürt ile mangan sülfat bileşiği oluşturur [4].

Silisyum (Si): Silisyum, korozyon direncini artırmak için östenitik paslanmaz çeliklere ilave edilmektedir. Ferrit yapıcı bir elementtir. Çekme dayanımı ve elastikiyeti artırır [15].

Çizelge 2.2’de östenit oluşturu, ferrit oluşturu ve nötr elementlerin etkileri gösterilmiştir.

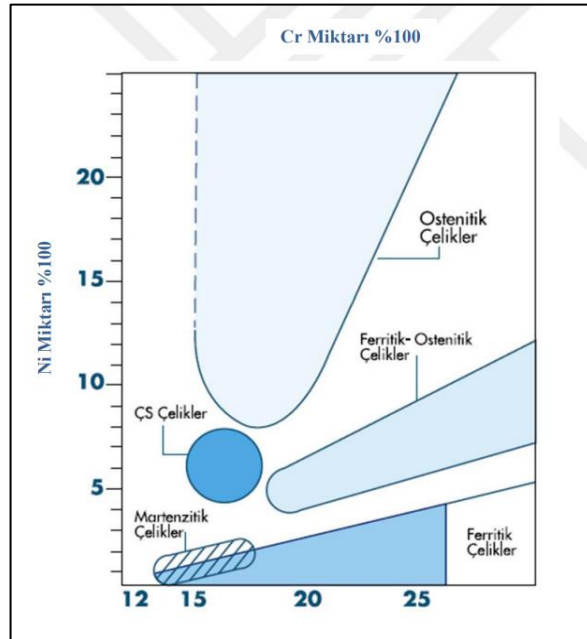
Çizelge 2.1. Östenit-Ferrit oluşturu elementler ile nötr elementler ve etkileri [16].

Elementler	Etkileri
Krom	Ferrit oluşumunda etkili olup, malzemenin korozyon ve oksidasyon mukavemetinin yükselmesine destek olur.
Molibden	Ferrit oluşumunda destekleyicidir. Yüksek sıcaklıklarda malzemelerin mukavemetli olmasına ve redükleyici ortamlarda korozyon dirençlerinin artmasına destek olur.
Niyobyum, Titanyum	Bu iki element paslanmaz çeliklerde taneler arası korozyon hassasiyetini azaltmak için karbonla birleşerek karbür oluşması için yapıya eklenmektedir. Niyobyum karbür yapıcı element olup, tanelerin küçülmesine ve ferrit oluşumuna katkıda bulunur. Sürünme dayanımını artırmasına karşılık sürünme sünekliğini azaltır. Yüksek mukavemetli bazı alaşımlarda mukavemet değerlerinin ve sertliğin artması için eklenmektedir.
Fosfor, Kükürt, Selenyum	Paslanmaz çeliklerin işlenebilme kabiliyetlerini artırmakta ancak kaynak esnasında sıcak çatlak oluşmasına neden olmasından dolayı kaynak kabiliyetini kısıtlamaktadır. Paslanmaz çelikler Tungsten inert gaz (TIG) kaynak kullanılarak birleştirildiğinde nüfuz etmesini artırır.
Karbon	Paslanmaz çeliklerde kuvvetli östenit oluşturu element olup krom ile reaksiyona girerek taneler arası korozyona neden olan karbürleri oluşturur.

Nikel	Östenit oluşumunu sağlamakta ve paslanmaz çeliklerin yüksek sıcaklıkta direncini, korozyona karşı dayanımı ve sünekliğini artırmaktadır.
Azot	Östenit oluşumuna çok kuvvetli etkide bulunmakta olup, çoğu zaman östenit oluşturmada nikel elementi kadar etkilidir.
Bakır	Paslanmaz çeliklere bazı ortamlardaki korozyon dayanımlarını artırmak amacıyla katılmakla beraber gerilmeli korozyon çatlamasına karşı hassasiyeti azaltır ve yaşlanma yoluyla sertleşmeyi teşvik eder.
Mangan	Düşük sıcaklıklarda östenitin kararlı olmasını sağlarken yüksek sıcaklıklarda ferrit oluşturmaktadır.
Silisyum	Paslanmaz çeliklerin tufallenmeye karşı dayanımını yükseltmektedir. Mikroyapıda %1'den daha fazla olduğunda ferrit ve sigma fazlarının oluşumuna etki etmektedir. Her türlü paslanmaz çeliğe oksit giderme için bir miktar eklenir.

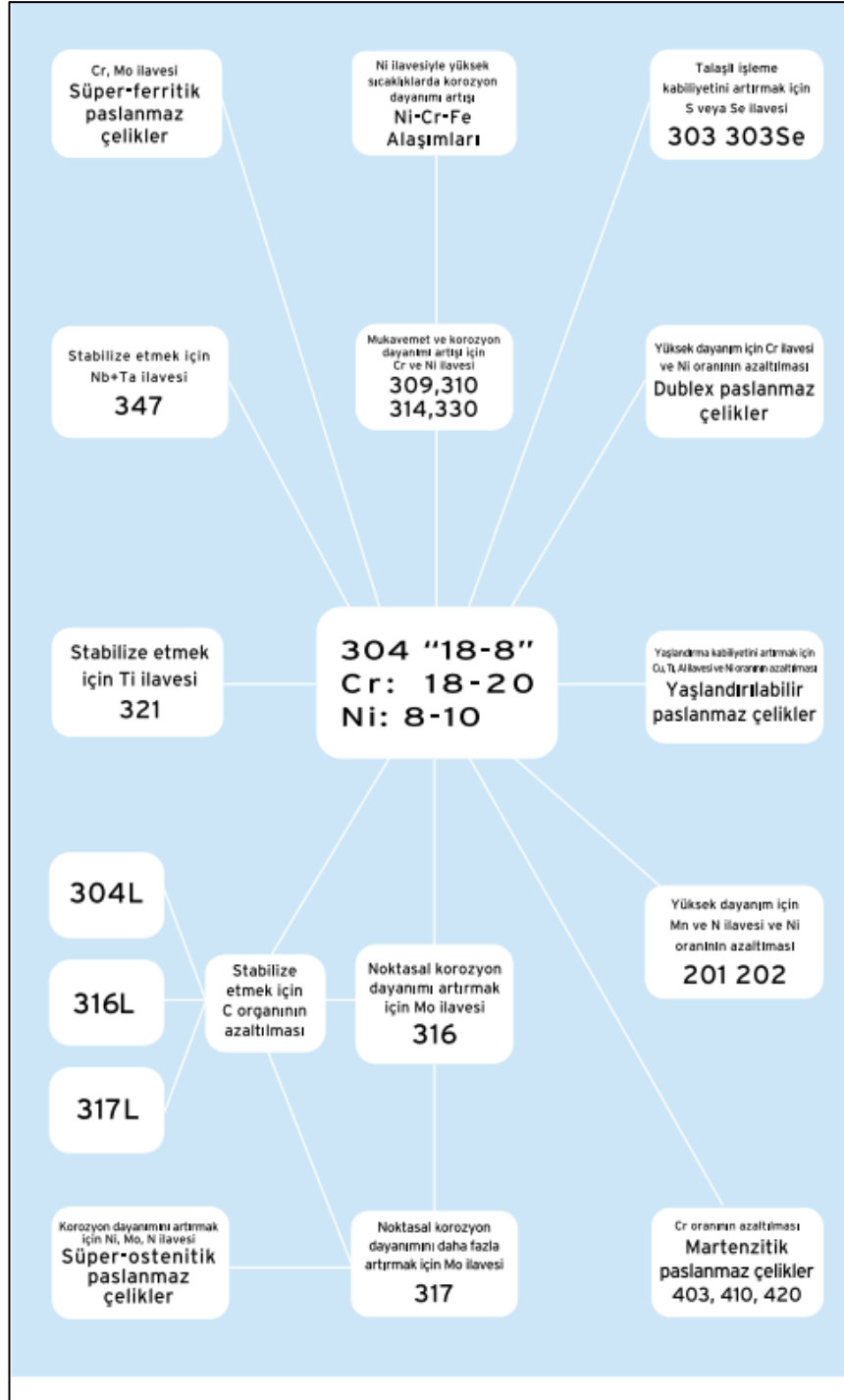
2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Paslanmaz çelikler bileşimlerinde bulunan alaşım elementlerinin etkilerine göre ferritik, östenitik, martenzitik, dubleks ve çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler olarak beş ana başlıkta toplanmıştır. Şekil 2.3'de paslanmaz çelik türlerinin krom ve nikel oranına bağlı miktarları verilmiştir.



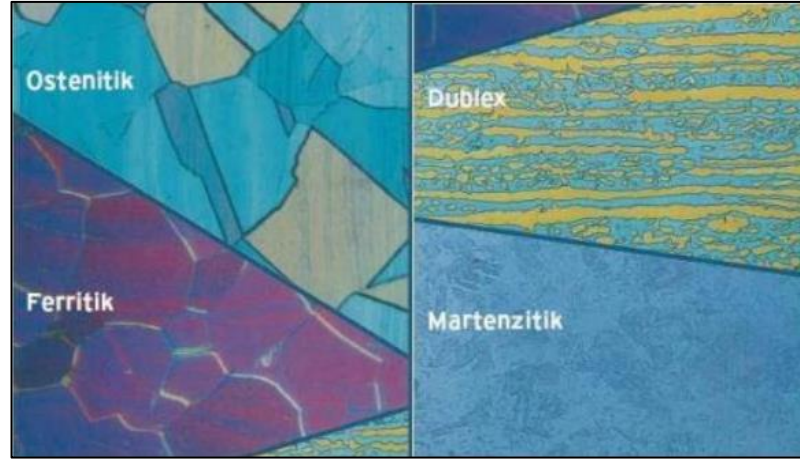
Şekil 2.3. Paslanmaz çelik türleri için krom ve nikel miktarları [17].

Şekil 2.4’de paslanmaz çelik türleri verilmiştir.



Şekil 2.4. Paslanmaz çelik türleri [5].

Paslanmaz çelik türlerinin metalografik yapıları Şekil 2.5’de gösterilmiştir. Ayrıca Çizelge 2.2’de paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri ve Çizelge 2.3’de paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri verilmiştir.



Şekil 2.5. Paslanmaz çeliklerin mikroyapıları [4].

Çizelge 2.2. Paslanmaz çelik gruplarına ait mekanik özellikler [18].

Paslanmaz Çelik Tipi	Mikroyapı	Mekanik Özellikler		
		Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	% Uzama
Östenitik	Östenit	490-860	205-575	30-60
Ferritik	Ferrit	415-650	275-550	10-25
Martenzitik	Martenzit	480-1000	275-860	14-30
Dubleks	Östenitik + Ferrit	680-900	410-900	10-48
Çökleme Sertleşmeli	Östenitik + Martenzit	895-1000	276-1000	10-35

Çizelge 2.3. Paslanmaz çelik gruplarına ait kimyasal bileşimler [5].

ASTM	EN Malzeme No.	Kimyasal Bileşim, ağırlık % max									
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Diğer
Ferritik Paslanmaz Çelikler											
409	1.4512	0.08	1.0	1.00	0.045	0.03	10.5-11.75	-	-	-	(6xC)Ti
430	1.4016	0.12	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-18.0	-	-	-	-
430Ti	(1.450)	0.10	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-19.5	0.75	-	-	(5xC)Ti
439	1.4510	0.07	1.0	1.00	0.04	0.03	17.0-19.0	0.5	-	-	0.2+4(C+N)Ti
Martenzitik Paslanmaz Çelikler											
410	1.4006	0.15	1.0	1.00	0.04	0.03	11.5-13.0	-	-	-	-
420	1.4021	0.15 min	1.0	1.00	0.04	0.03	12.0-14.0	-	-	-	-
440A	-	0.6-0.75	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-19.5	-	0.75	-	-
440C	1.4125	0.95-1.2	1.0	1.00	0.04	0.03	16.0-18.0	-	0.75	-	-
Dubleks Paslanmaz Çelikler											
2205*)	1.4462	0.03	2.0	1.0	0.03	0.02	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.2	-
329	1.4460	0.20	1.0	0.75	0.04	0.03	23.0-28.0	2.5-5.0	1.0-2.0	-	-

ASTM	EN Malzeme No.	Kimsayal Bileşim, ağırlık % max									
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Diğer
201	1.4372	0.15	5.5-7.5	1.00	0.06	0.03	16.0-18.0	3.5-5.5	-	0.25	-
301	1.4310	0.15	2.0	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	6.0-8.0	-	-	-
304	1.4301	0.08	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-10.5	-	-	-
304L	1.4306	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0	-	-	-
304LN	1.4311	0.03	2.0	1.00	0.045	0.03	18.0-20.0	8.0-12.0	-	0.1-0.16	-
309	1.4828	0.20	2.00	1.00	0.045	0.03	22.0-24.0	12.0-15.0	-	-	-
309S	1.4833	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	22.0-24.0	12.0-15.0	-	-	-
310	1.4841	0.25	2.00	1.50	0.045	0.03	24.0-26.0	19.0-22.0	-	-	-
310S	1.4845	0.08	2.00	1.50	0.045	0.03	24.0-26.0	19.0-22.0	-	-	-
316	1.4401	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
316L	1.4404	0.03	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	-
316LN	1.4406	0.03	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	0.1-0.16	-
316Ti	1.4571	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	16.0-18.0	10.0-14.0	2.0-3.0	-	5x(C+N)Ti
321	1.4541	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	17.0-19.0	9.0-12.0	-	-	(5xC)Ti
347	1.4550	0.08	2.00	1.00	0.045	0.03	17.0-19.0	9.0-13.0	-	-	(10xC)Nb
Çökeltme Sertleşme Uygulanabilir Paslanmaz Çelikler											
631	1.4568	0.09	1.0	1.0	0.04	0.04	16.0-18.0	6.5-7.5	-	-	0.75-1.5 Al
632	1.4532	0.09	1.0	1.0	0.04	0.03	14.0-16.0	6.5-7.5	2.0-3.0	-	0.75-1.5 Al

Çizelge 2.4’de paslanmaz çelik türlerinin bazı özellikler açısından kıyaslanması belirtilmiştir.

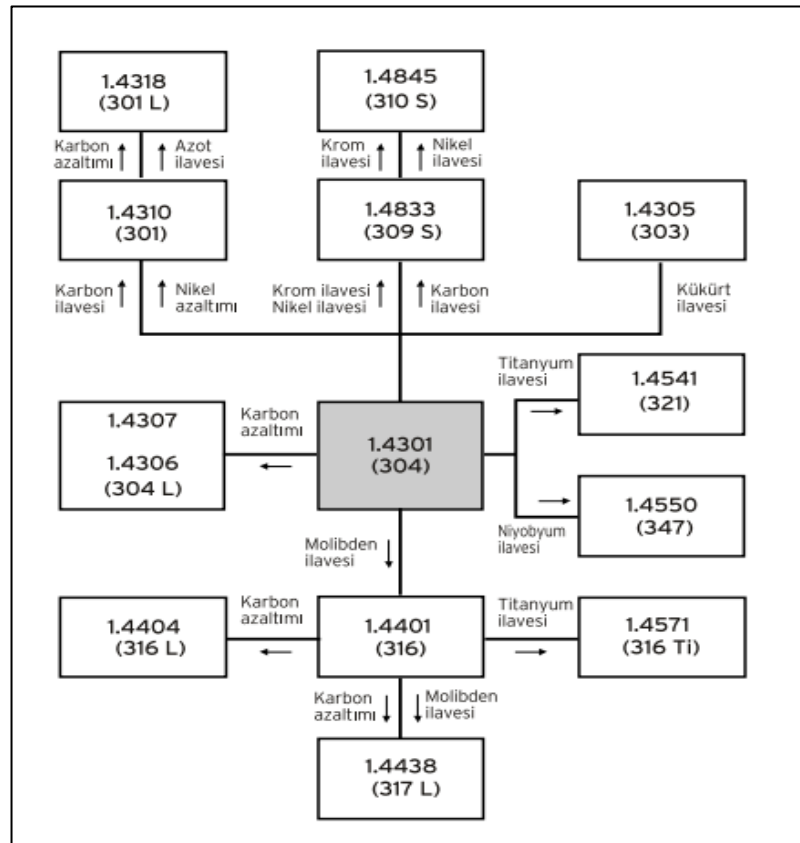
Çizelge 2.4. Paslanmaz çelik gruplarına ait fiziksel özellikler [19].

Alaşım Grupları	Manyetik Tepkiler	İşlem Sertleşme Oranı	Korozyon Direnci	Sünek	Yüksek Sıcaklık Direnci	Düşük Sıcaklık Direnci	Kaynak Olabilme
Östenitik	Hayır (Genellikle)	Çok Yüksek	Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek	Çok Yüksek
Dubleks	Evet	Orta	Çok Yüksek	Orta	Düşük	Orta	Yüksek
Ferritik	Evet	Orta	Orta	Orta	Yüksek	Düşük	Düşük
Martenzitik	Evet	Orta	Orta	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük

2.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Kimyasal bileşiminde genellikle %12-25 Cr, %8-25 Nikel ve yaklaşık %2 ‘ye kadar Mn ihtiva eden paslanmaz çeliklerin içerisinde korozyona karşı dirençleri, yüksek sıcaklıktaki mekanik özellikleri sebebiyle en yaygın kullanıma sahip olan çelik türüdür. Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda yüzey merkezli kübik (YMK) kafesli östenitik içyapılarını korumaktadırlar. Isıl işlemle sertleştirilemezler. Tavlama işlemi sonrası şekillendirilebilme kabiliyetleri, süneklikleri ve toklukları düşük

sıcaklıklarda bile üstündür. Yüksek sıcaklıklarda kolay şekillendirilebilirler. Soğuk şekil değiştirme ile sertleştirilebilir ve mukavemetleri artırabilir. Mukavemetlerinin artırılması için genellikle soğuk şekillendirme işleminden faydalanılır. Östenitik paslanmaz çeliklerde pekleşme, ferritiklerde olduğundan daha fazladır. Ayrıca, şekil değiştirmeye martenzitte oluşturulabilir ve böylelikle manyetik özellik kazandırılır. Mukavemetin artırılması amacıyla alaşımlama da yapılabilir. Korozyona karşı dayanımı ferritik paslanmaz çeliğe göre daha iyidir [20]. Günümüzde kullanımda bulunan paslanmaz çeliklerin yaklaşık %80-90'ını oluşturur. Östenitik paslanmaz çelikler AISI 300 serisi olarak adlandırılır ve en çok tercih edilen türü AISI 304 ve 316 tipleridir [3]. Şekil 2.6'da alaşım ilavelerine göre östenitik paslanmaz çelik kalitelerinin gösterimi verilmiştir.

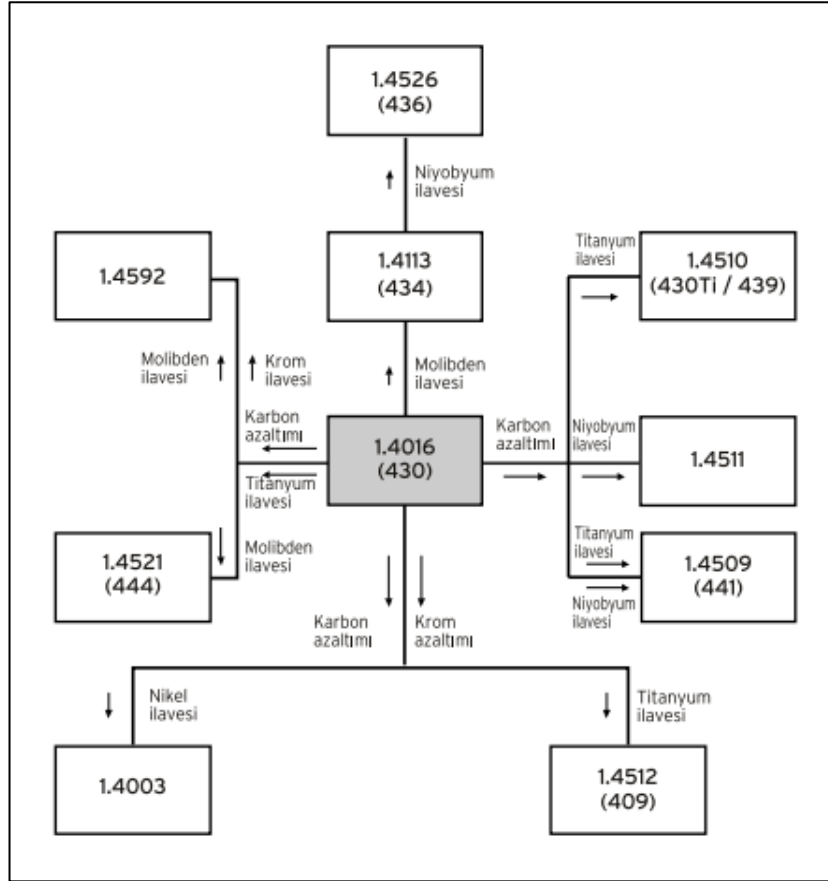


Şekil 2.6. Östenitik paslanmaz çelik kaliteleri [5].

Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıktaki değişikliklere karşı direnç sunar, bu nedenle borular, fırınlar, ısı eşanjörleri, yakma fırınları, mutfak gereçleri ve buhar türbinleri dahil olmak üzere geniş endüstriyel uygulamalara sahiptir [20].

2.2.2. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Kimyasal bileşiminde genellikle %12-18 Cr ve ihtiva eden düşük karbonlu çeliklerdir. Oda sıcaklığında ve daha yüksek sıcaklıklarda demir elementinde olduğu gibi hacim merkezi kübik kristal (HMK) yapıya sahiptirler, östenit-ferrit dönüşümleri de göstermezler. Bu sebeple, ısıl işlemlerle içyapıları ve mekanik özelliklerinin etkilenmesi mümkün değildir. Manyetikler ve atmosferik korozyon ile oksidasyona karşı dayanımlıdır [14]. Ferritik paslanmaz çelikler AISI 400 serisi olarak adlandırılır ve en çok tercih edilen türü AISI 430 tipidir [3]. Şekil 2.7’de alaşım ilavelerine göre ferritik paslanmaz çelik kalitelerinin gösterimi vermiştir.



Şekil 2.7. Ferritik paslanmaz çelik kaliteleri [11].

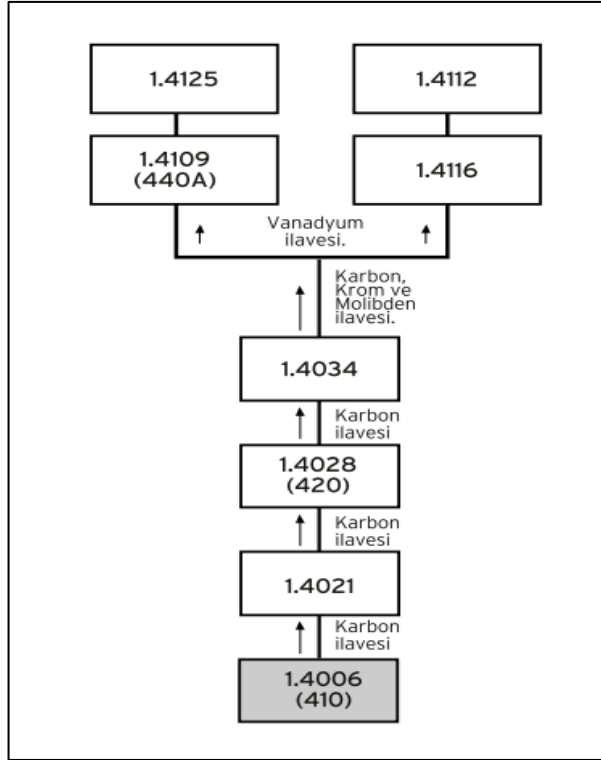
Ferritik paslanmaz çelikler, mutfak gereçleri imalatı, otomotiv sektörü, mimari uygulamalarda, petrol arıtma tesislerinde, bağlama elemanları ve boru sektöründe kullanıma sahiptir [14].

2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, kimyasal bileşiminde genellikle %12-18 Cr ve %0,2-1,2 C ihtiva eden düşük veya yüksek karbonlu üretilen çeliklerdir. Yüksek sıcaklıklarda YMK kafesli olan östenit yapının, yüksek hızda soğutulması sonucunda hacim merkezli tetragonal (HMT) kafesli martenzit yapıya dönüşmesi ile martenzitik paslanmaz çelikler elde edilir. İÇyapılarında tavlanmış yumuşak ferritik faz da bulunur [21].

Dayanım ve manyetik özellikleri iyi olup, yüksek alaşımlı çelikler gibi sertleştirilip temperleme işlemine tabi tutulurlar. Üstün çekme dayanımına sahip olan bu çelikler, su verme işlemi uygulanmış ve temperlenmiş halde kolaylıkla piyasadan satın alınabilir. Sertleşmiş halde düşük tokluğa sahip olup, temperleme ısıl işlemiyle uygun tokluğa getirilebilirler. Farklı dayanım düzeyleri temperleme ısıl işleminin sıcaklığı ile kontrol edilebilir [22]. Martenzitik paslanmaz çelikler AISI 400 serisi grubuna girer ve en çok tercih edilen türü AISI 410 tipidir.

Martenzitik paslanmaz çelikler korozyon direnci gerektiren uygulamalardan başka yüksek sıcaklıklarda mekanik zorlamalara dayanım gerektiren uygulamalarda da kullanılır. Martenzitik paslanmaz çelikler 3 tiptir. Birinci tip, karbon içeren ve alaşım karbürlerinin çökeltilmesi ile güçlendirilen martenzitik paslanmaz çelikleri içerir. İkinci tip, bakır veya intermetalik partiküllerin çökmesiyle güçlenen ve düşük oranda karbon içeren martenzitik paslanmaz çelikleri içerir. Son tip ise, alaşımlı karbür ve ara metallerin çökmesi ile güçlendirilen martenzitik paslanmaz çeliklerdir. Bu 3 tip martenzitik paslanmaz çeliğin ortak özelliği; yüksek oranda krom içeriği ve yüksek sıcaklıklarda östenitleşmeye izin veren alaşım kombinasyonlarına sahip olmasıdır [23]. Şekil 2.8' de alaşım ilavelerine göre martenzitik paslanmaz çelik kalitelerinin gösterimi verilmiştir.

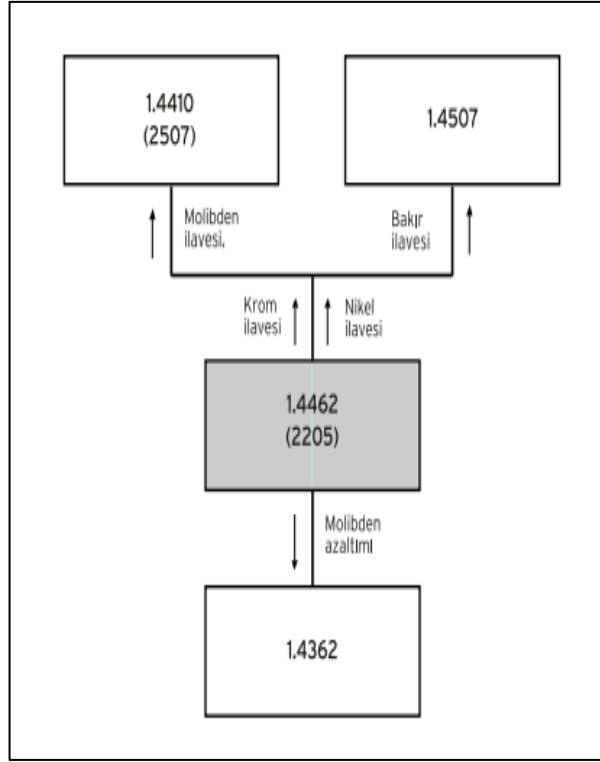


Şekil 2.8. Martenzitik paslanmaz çelik kaliteleri [5].

Düşük karbonlu martenzitik çelikler, gaz-buhar türbünlerinde ve jet motorları bıçaklarında, daha yüksek karbonlu martenzitik paslanmaz çelikler, şaftlar, bıçak-çatal takımları, yaylar, dişçilik ekipmanları, valfler, kamlar, bilyeli yataklar ve makaslarda kullanılmaktadırlar [14].

2.2.4. Çift Fazlı (Dubleks) Paslanmaz Çelikler

Dubleks paslanmaz çelikler, kimyasal bileşiminde genellikle %18-18 Cr, %4,5-8 Ni ve %2,5-4 Mo ihtiva eden çift fazlı çeliklerdir. İç yapılarında hem ferritik hem östenitik fazı birlikte bulunur. Bu çelikler, ferritik ve östenitik fazlarının mekanik özelliklerini ve korozyon dayanımını birleştirmek için üretilmiştir. Östenitik çeliklere göre yüksek gerilme korozyonu dayanımı; ferritik çeliklere göre de yüksek tokluk ve süneklik gösterirler. Yapısında ferrit fazı bulundurması sebebiyle yüksek sıcaklıklardaki özellikleri iyi değildir [5]. Şekil 2.9'da alaşım ilavelerine göre dubleks paslanmaz çelik kalitelerinin gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.9. Dupleks paslanmaz çelik kaliteleri [5].

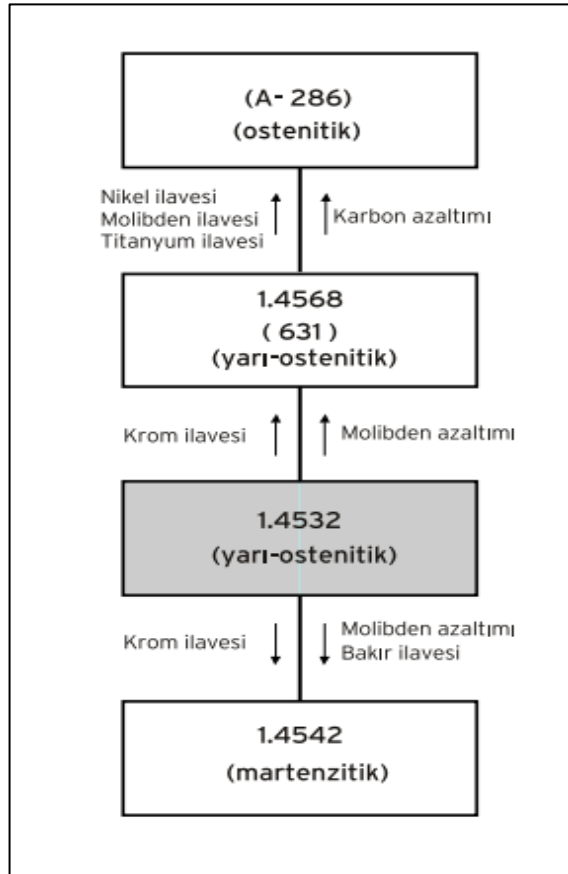
Dupleks paslanmaz çelikler petrokimya endüstrisi, nükleer endüstri, kağıt makineleri ve silindirleri, liman imalatı ve diğer klorürlü ortamlar kullanım alanları arasında yer almaktadır [24].

2.2.5. Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

Bileşiminde Al, Ti, Ni, Cu ve Mo gibi alaşım elementleri içeren ve bu elementlerden biri ya da birkaçının etkisiyle çökelme sertleşmesi gösteren Fe-Cr-Ni içeren demir esaslı çelikler çökelme sertleşmeli paslanmaz çeliklerdir [25].

Çökelme sertleşmesi, alaşımı çözeltiye alma tavlamasından sonra yapılan hızlı soğutma işlemini izleyen bir yaşlandırma işlemidir. Bu tür çeliklerin kimyasal muhteviyatında mevcut olan elementler, çözeltiye alma tavlaması esnasında çözünüp yaşlandırma işlemi esnasında ise çok küçük parçacıklar halinde çökerek matriste dayanım ve sertlik artışına neden olur. Çökelme sertleşmeli paslanmaz çelikler, yaşlandırma sonrasında, östenitik paslanmaz çelik korozyon dayanımına ve martenzitik paslanmaz çelik mekanik özelliklerine ulaşabilir [17].

Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelikler üç ayrı gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar; martenzitik çökeltmeli paslanmaz çelikler, östenitik çökeltmeli paslanmaz çelikler ve yarı östenitik çökeltmeli paslanmaz çeliklerdir. Bu üç gruba ayrılma işlemi çözeltiliye alma tavlama işlemi gerçekleştirildikten sonraki işlemlerle oluşur [26]. Şekil 2.10’ da alaşım ilavelerine göre çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelik kalitelerinin gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.10. Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çelik kaliteleri [5].

Çökeltme ile sertleşen paslanmaz çelikler; yüksek mukavemet, korozyon ve aşınmadirencinin birlikte olması gereken uygulamalarda tercih edilen malzemelerdir. Bu alaşımlar dayanım ve korozyon direnci, tokluk, kaynaklanabilirlik, şekillendirilebilirliğin çok iyi bir bütünlüğüne sahiptir. Tıp ve dişçilik ekipmanı, rulmanlar, türbin kanatları ve aletler bu uygulamalara örnek verilebilir [11].

BÖLÜM 3

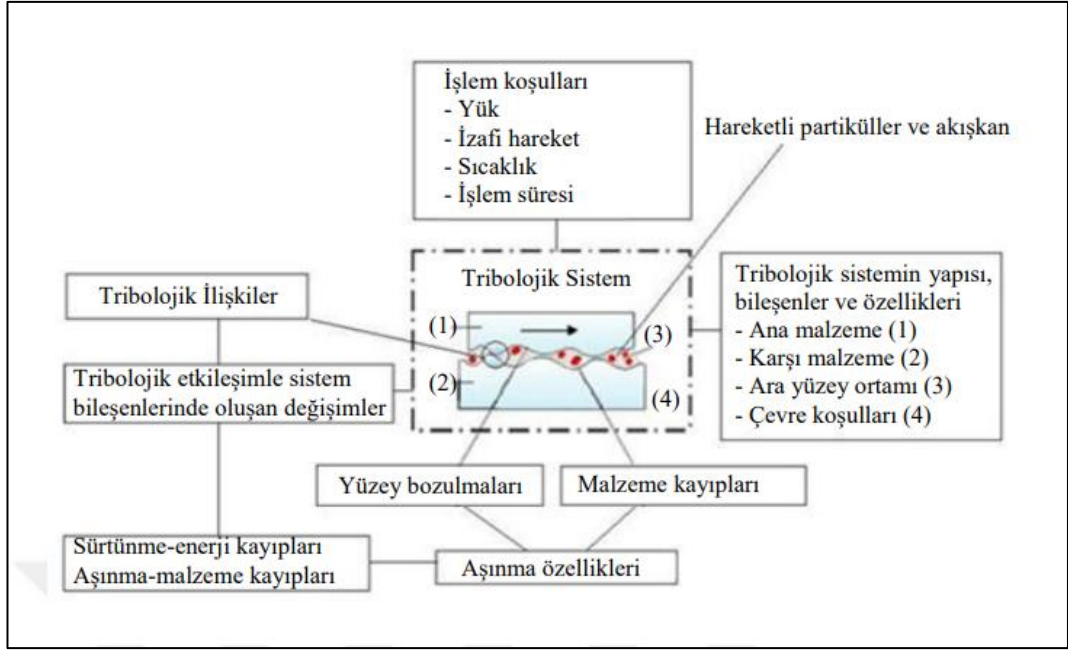
AŞINMA VE TÜRLERİ

Temas halindeki iki yüzeyin veya maddenin fiziksel etkileri ile meydana gelen malzeme kaybı aşınma olarak adlandırılmaktadır. Aşınma istenmeyen bir durum olmakla birlikte aşınmaya karşı önlem alınmaması ekipmanların ömürlerini kısaltarak maliyetlerin artmasına neden olmaktadır [27].

Aşınmanın ASTM G40-93 ve DIN 50320 standartlarındaki tanımı “kullanılan malzemelerin farklı malzemelerle (gaz, katı veya sıvı) temas etmesiyle mekanik etmenlerle yüzeyden küçük parçacıkların kopmasıyla oluşan ve istenmeyen yüzey bozulması” şeklindedir [27, 28]. Ayrıca aşınma tanımlanırken katı cisim yüzeyinden tribolojik bir zorlanmanın neticesi olarak sürekli ilerleyen malzeme kaybı ifadesi kullanılmıştır [28]. Aşınmada öncelikli konu sürekliliktir.

3.1. AŞINMA SİSTEMİNDE TEMEL PARAMETRELER

Bir sistem üzerinde aşınmanın meydana gelebilmesi için belirli parametrelerin olması gerekmektedir. Bu parametreler; aşınan ve aşındıran malzeme, yük ve ortam şartları ile hareketlerdir. Ortam; gaz, katı veya sıvı olabilir. Aşınan ve aşındıran malzemelerin bir araya gelmesiyle “aşınma çifti” oluşur. Aşınma çiftine ilave olarak içerisinde parçacık bulunduran sıvı veya gaz malzemelerinin aynı ortam içerisinde beraber ortaya çıkardığı sisteme de “aşınma kombinasyonu” adı verilmektedir. Bunun yanı sıra aşınma sonucunda oluşan parçacıklar da ara malzemelerle birlikte aşınmaya ilave bir etki yapmaktadır [29]. Şekil 3.1’de DIN 50320 standardına göre tribolojik bir sistemin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.1. DIN 50320 standardına göre tribolojik bir sistemin şematik gösterimi [30].

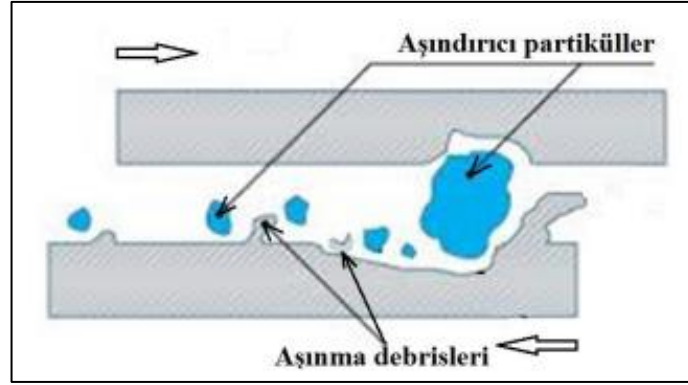
Aşınmayı etkileyen faktörler, ana malzeme, karşı malzeme ve aşındırıcı etkisine bağlı olarak incelenmektedir. Ana malzemeye bağlı etkenler; malzemenin sertliği, kristal yapısı ve boyutu, deformasyon davranışı, yüzey pürüzlülüğü ve elastisite modülü olarak sıralanmaktadır. Karşı malzemeye bağlı ve aşındırıcının etkisine bağlı etkenler; ortam şartları (atmosfer, nem ve sıcaklık) ve servis şartları (kayma yolu, hız, basınç) olarak sıralanmaktadır [31].

3.2. AŞINMA MEKANİZMALARI

Aşınma mekanizmaları; 5 ana başlıkta değerlendirilmektedir. Bunlar; adhezif, erozif, abrazif, korozif ve yorulma aşınmasıdır [32].

3.2.1. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, birbirlerine göre ters yönlerde belirli bir hızda hareket eden iki malzemeden yüzey sertliği yüksek olanın üzerinde bulunan çıkıntılar nedeni ile diğer malzemeden parça kopardığı aşınma türüdür. Şekil 3.2'de abrazif aşınma şematik görüntüsü verilmiştir.



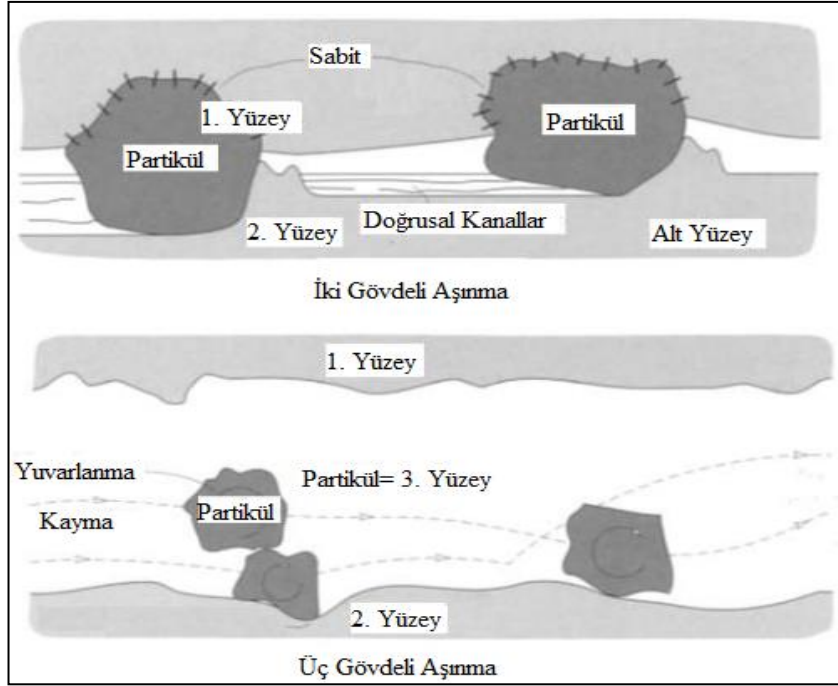
Şekil 3.2. Abrazif aşınma mekanizması şematik görüntüsü [33].

Sürtünen yüzeyler arasında bulunan sert partiküller sisteme dışarıdan dahil olabileceği gibi adhezif aşınma sonucunda sistem içinden de oluşabilmekte ve aşınma sistemine dahil olmaktadır. Abrazif aşınmayı etkileyen en önemli etkenler; malzemelerin sertlik değeri, aşındırıcının türü, hareket hızı, malzemenin geometrisi ve yüzey pürüzlülüğü gibi etkenler olarak belirtilmiştir [34].

Abrazif aşınma mekanizmasında, sürtünen malzemelerden daha sert olanın yüzey pürüzlülüğünün veya yüzeylerden birisine gömülmüş sert malzemelerin diğer yüzeyi kazıyarak malzeme kaldırması gövdeli abrazif aşınma olarak adlandırılmaktadır. Bu aşınma iki ve üç gövdeli olarak iki tipte sınıflandırılmaktadır [34].

Üç gövdeli abrazif aşınmada sert parçacıklar yüzeyler arasında kayarak veya yuvarlanarak serbest bir şekilde hareket etmekte olup, iki gövdeli abrazif aşınmada ise iki yüzey arasında kalmış sert çıkıntılar ya da malzeme içerisine gömülmüş sert malzemeler hareket edememektedir.

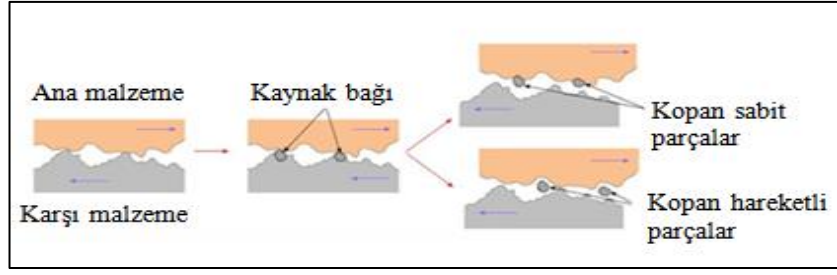
Üç gövdeli abrazif aşınmadaki ağırlık kaybı iki gövdeli aşınmaya kıyasla daha az olmaktadır. Üç gövdeli abrazif aşınmada malzemenin yaklaşık olarak %90' lık kısmı yuvarlanırken, %10' luk kısmı aşınmaya sebep olmaktadır. Bu sebep ile 2 gövdeli abrazif aşınmadaki aşınma miktarı 3 gövdeli abrazif aşınma miktarına göre daha fazla olmaktadır. 2 ve 3 gövdeli abrazif aşınma türleri Şekil 3.3' de gösterilmektedir [29].



Şekil 3.3. İki ve üç gövdeli abrazif aşınma mekanizması şematik görüntüsü [34].

3.2.2. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, iki metal yüzeyin birbirleri ile kayma sürtünmesi yapması durumunda meydana gelen aşınma türüdür. Birbiri ile temas halinde olan iki metal yüzey arasında herhangi bir koruyucu veya yağlayıcı madde bulunmaması durumunda adhezyon kuvveti oluşmaktadır. Bu oluşumun ortaya çıkması için malzemelerin birbiriyle yakın temas halinde olması gerekmektedir. Metal malzemelerin yüzeyindeki pürüzlülükler gelecek olan gerilme kuvveti veya basınç kuvveti fazla olmaktadır. Bu kuvvetlere maruz kalmayan pürüzlülükler plastik deformasyona uğramaktadır. Eğer malzemenin deformasyonu yüksek ise mikro adhezyon alanları hızlı bir şekilde malzeme yüzeyine yayılmaktadır. Genel olarak adhezif aşınmaya maruz kalan malzemelere örnek olarak; yağlanmamış rulmanlar, silindir dış yüzeyleri, kaymalı yataklar, çelik hadde merdaneleri vb. parçalar verilebilmektedir [35]. Şekil 3.4' de adhezif aşınmaya ait şematik gösterimi verilmiştir.



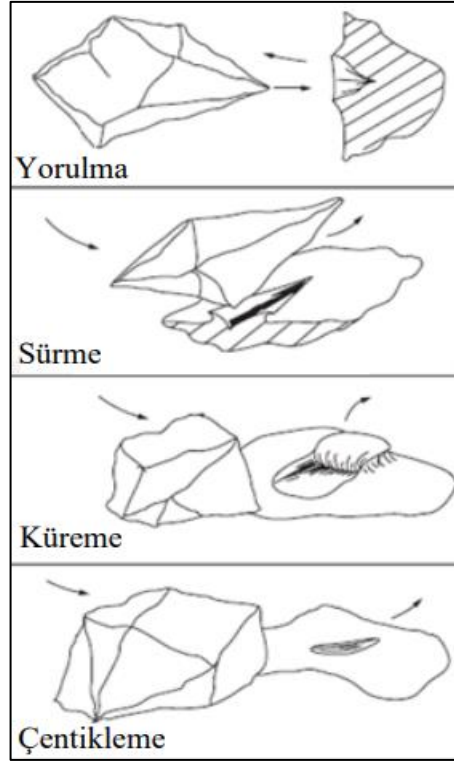
Şekil 3.4. Adhezif aşınma mekanizması şematik görüntüsü [36].

3.2.3. Eroziyon Aşınma

Katı veya sıvı partiküllerin bir yüzeye çarparak o yüzeyden malzeme kaldırması sonucu meydana gelen aşınma türü olup, beş gruba ayrılmaktadır.

3.2.3.1. Katı Partikül Erozyonu

Aşındırıcı parçacıkların belli hızda gaz veya sıvı akışkan içinde malzeme yüzeyine temas etmesiyle yüzeyde ortaya çıkan malzeme kaybı olarak tanımlanmaktadır. Bu aşınmada etkili olan faktörler; katı partikül akışı, partikül özellikleri ve aşınmaya maruz kalan malzemenin özellikleri olarak sıralanabilmektedir. Katı partikül akışındaki en önemli özellikler; hız, çarpma açısı ve akışkanın katı konsantrasyonu olmaktadır. Sanayide imalat sektöründe kumlama ve su jeti ile metal kesmede kullanılmaktadır. Kumlama yönteminde malzemenin yüzeyinde istenmeyen maddeleri (boya, pas, malzeme kesiminden kalan kalıntılar) temizlemek amacı ile kullanılırken, su jeti yönteminde ise suyun içerisine belirli oranda aşındırıcı malzeme ilave edilerek malzeme yüzeyine püskürtülmesi sonucu kesme işlemi yapılmaktadır [32]. Şekil 3.5'de katı partikül erozyon türleri verilmiştir.



Şekil 3.5. Katı partikül erozyonu türleri [37].

3.2.3.2. Sıvı (Su) Damla Erozyonu

Sıvı damlaların kendinden hızca daha yüksek katı malzemelere çarpması sonucu meydana gelmektedir. Sıvı damla erozyonuna; su damlası erozyonu, nem erozyonu veya yağmur erozyonu da denilmektedir. Sıvı partiküllerin neden olduğu yağışın meydana getirdiği aşınma miktarının azaltılması için sıvı damlalarının boyutlarının küçültülmesi, katı malzemenin hareketinin engellenmesi ve daha dayanıklı bir malzeme kullanılması gerekmektedir [38].

3.2.3.3. Katı Partikül Taşıyan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu

Katı partiküllerin sıvı veya gaz akışkan içerisinde taşınma esnasında malzemenin iç yüzeyine çarpması sonucu oluşmaktadır. Endüstriyel tesislerde genellikle pompa çarklarında ve boru hatlarında karşılaşılmaktadır. Sulu çamur erozyonunda aşınmaya etkileyen en önemli özellikler partikül sertliği, katı malzeme konsantrasyonu, partikül boyutları, partikül hızı ve çarpma açısı olarak sıralanmaktadır. Aşınmayı etkileyen

diğer parametreler ise partiküllerin geometrisi, partikül yoğunluğu ve sıvı ortam içerisindeki O₂ miktarıdır. Katı partiküllerin sertlik değeri ve yoğunluğunun aşınma kaynaklı malzeme kaybı ile doğru orantılı olduğu belirtilmektedir. Bu tür aşınmaların azaltılması için daha dayanıklı bir malzeme seçilmesi, taşınan katı konsantrasyonunun düşük seçilmesi ve belirli aralıklarda sistemde kullanılan boruların döndürülerek hareket ettirilmesi ekipmanların ömrünü uzatmaktadır [38].

3.2.3.4. Kavitasyon Erozyonu

Kavitasyon, bir sıvı içerisinde kavitelerin veya kabarcıkların tekrardan büyüme ve şiddetli çarpması olarak tanımlanmaktadır. Kavitasyon erozyonu ise sıvı ortamda çalışan ekipmanların anlık basınç değişimleri nedeniyle titreşim oluşturarak malzemenin mekanik olarak bozulması ile meydana gelmektedir. Bu titreşimler yüksek frekanslı ses dalgaları meydana getirerek, ekipman yüzeyinin basınçlı bölgelerinde anlık çok sayıda kabarcık oluşturmaktadır. Bu kabarcıkların yüzeye ve yüzeye yakın yerlere çarparak patlaması sayesinde katı yüzeyde mekanik bir bozulma meydana gelmektedir. Bu patlamalar sonucu sıvı içerisinde oluşan ve direkt olarak malzemenin yüzeyine yönelen sıvı mikrojetlere neden olmaktadır. Sıvı mikrojetler malzeme yüzeyinde deformasyon oluşturarak malzeme kaybına sebep olmaktadır. Kavitasyon aşınması genel olarak; buhar ortamlarında çalışan pervaneler, türbin kanatları, valf gövdelerinde ve pompa kanatları gibi parçalarda görülmektedir [39].

3.2.3.5. Elektro Erozyonu

İletken olmayan bir sıvı veya vakum altında meydana gelmektedir. Elektro erozyon, anot ve katot kutupları arasında oluşan akım sebebi ile katot malzemesinin yüzeyinden küçük parçacıklar halinde kopması ile meydana gelmektedir [38].

3.2.4. Koroziyon Aşınma

Metalik olan malzemelerin kimyasal bileşimlerini oluşturan alaşım elementlerinin türü ve miktarına bağlı olarak yüzeylerinde doğal bir oksit tabakası bulunmaktadır. Bulunmakta olan oksit tabaka koroziyon etkiye karşı dayanım kazandırmaktadır.

Darbeler ya da mekanik sürtünmeler sonucunda oksit tabakası yok olabilmekte ve zarar gören oksit tabaka bir daha oluşmayabilmektedir. Malzeme yüzeyinin bu Şekilde mukavemetsiz olmasında yüzeyde oluşan kimyasal ve elektrokimyasal reaksiyonlar ile oluşan aşınma korozif aşınma olarak adlandırılmaktadır [36].

3.2.5. Yorulma Aşınması

Yüklerin fazlaca tekrar etmesiyle meydana gelen titreşimler sonucunda yorulma aşınması meydana gelmektedir. Bu tekrarlar malzemelerin yüzey alanlarında meydana gelen çatlakların yüzeye doğru ilerlemesine neden olmaktadır. Bu çatlakların yüzeye ulaşması ile birlikte yüzeyde malzeme ayrılmaları yaşanmaktadır. Yağlama yetersizliğinin neden olduğu aşınmalarda grldğu gibi yağlamanın iyi yapıldığı alanlarda da bu aşınma türü ile karşılaşabilmektedir. Yatak iziklenmesi, yüzey ayrılması ve darbe aşınması vb. türleri bulunmaktadır [38].

BÖLÜM 4

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, deneysel çalışmaya yol göstermesi adına sulu çamur erozyonu olarak bilinen katı partikül taşıyan akışkan ortam erozyonu ile alaklı yapılan literatür araştırmalarına yer verilmiş olup çamur erozyonu aşınmasının deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalar üzerinde durulmuştur. Aşınmaya etki eden değişkenler ve bu değişkenlerin sonuçlara yansıyan etkisi ile aşınma performansı ele alınmıştır.

Levy A. ve Chik P. (1983) çalışmalarında, partiküllerin geometrik yapısı ile aşınma miktarı arasındaki ilişkiyi inceleyip, keskin köşeli parçacıkların yuvarlak ya da küresel yapıda olan parçacıklara göre daha fazla aşınmaya sebebiyet verdiği sonucuna ulaşmışlardır [40].

Lynn R. vd. (1991) [41], Telfer C.G. vd. (2012) [42], yaptıkları çalışmalar sonucunda katı ya da gaz akışkan içerisinde yer alan aşındırıcı partiküllerin boyutlarının artması ile meydana gelen aşınma miktarında da artış olduğunu belirlemişlerdir [41, 42].

Telfer C.G. vd. (2012), yaptıkları çalışma sonucunda ortam konsantrasyonu ve aşınma miktarı arasında doğru orantı olduğunu, konsantrasyon arttıkça aşınma miktarında da artış olacağı sonucuna ulaşmışlardır. Aynı çalışmada çarpma açısı arttıkça aşınma miktarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir [42].

Clark H.M. (1991) [43], Krishnan A.V. ve Lim C.Y.H. (2021) [44], yaptıkları çalışma sonucunda çarpma hızının artması ile daha fazla kinetik enerji meydana geldiğini ve bu sayede yüzeyden parça koparma olayının daha fazla gerçekleştiği sonucuna ulaşmışlardır. Bu sonuca göre çarpma hızı ne kadar fazla olursa aşınma miktarı da o kadar fazla olmaktadır. Ayrıca Clark H.M. (1991) çalışmasında ortam sıvısının

vizkozite değeri ile aşınma miktarı arasındaki ilişkiye de yer vermiştir. Çalışmaya göre ortam sıvısının vizkozite değeri arttıkça çarpma hızı azalmakta ve böylece aşınma miktarı da azalmaktadır [43, 44].

Krishnan A.V. ve Lim C.Y.H. (2021) yaptıkları çalışma sonucunda iki farklı boyutta olan partiküllerin aşındırıcılığını incelemiştirlerdir. Aşındırıcı partiküllerinin akışkan ortam içerisindeki konsantrasyon değerinde bir değişiklik olmaması şartı ile küçük boyutlu partiküllerin daha fazla aşınmaya sebebiyet verdiğini sonucuna ulaşmışlardır. Bunun sebebini ise partikül boyutundaki artış sonucunda temas eden parçacıkların azaldığı ve aşınma miktarını azalttığı şeklinde açıklamışlardır. Bir diğer önemli parametre ise çarpma hızıdır ve bu parametre ile ilgili çalışmalar incelendiğinde çarpma hızı ve aşınma miktarı arasında doğru orantı ve oldukça yüksek etki oranı bulunmaktadır [44].

Shipway ve Hutchings (1996) çalışmalarında, silis karbür, alüminyum, silisyum ve silika olmak üzere dört değişik aşındırıcı malzeme kullanılmış ve yedi farklı malzeme numune olarak seçilmiştir. Bu numune malzemeleri silikadan elde edilmiş cam, borosilikat camı, soda-kireç camı, alümina, kısmi dengelileştirilmiş zirkonya, bor karbür ve silisyum karbür olarak belirlemiştir. Aşındırıcılardan her biri tüm hedef malzemelere uygulanmış ve deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney parametreleri 60 m/s katı partiküllerin hareket hızı ve 90° numune yüzeyine çarpma açısı seçilmiştir. Deneyler sonucunda hedef malzeme, aşındırıcı özellikleri ve çarpma açısının aşınma oranına önemli bir şekilde etkilediğini belirtilmiştir. Seçilen malzemenin sertliği aşındırıcı malzemenin sertliğinden az ise aşınma çok ve girinti sebepli kırık mekanizması şeklinde, fazla ise aşınmanın daha az ve küçük ölçekli çentikli aşınma mekanizması şeklinde olduğu tespit edilmiştir [45].

Wheeler ve Wood (1999) katı partikül erozyonu deneylerini, kimyasal buharla biriktirme (CVD) yöntemi ile karbür, silisyum ve tungsten altlık üzerinde uygulanmış 10-47 µm'lik elmas kaplamalar için yüksek hızlı hava üfleme ve hazneli tip sulu çamur olmak üzere iki farklı erozif aşınma deney düzenineği kullanılmıştır. Deney parametresi, aşındırıcı olarak silis kumu ve 90° normal çarpma açısı seçilmiştir. Sulu çamur düzenindeki parametreler, ortalama partikül çapı 135 µm ile çarpma hızı

16 m/s ve ortalama partikül çapı 235 µm ile çarpma hızı 28 m/s olarak seçilmiştir. Hava üflemleri düzenekte ise ortalama partikül çapı 194 µm olan silis kumu sırası ile 63, 148 ve 268 m/s partikül çarpma hızı değerlerinde seçilmiştir. Deney sonucu ortaya çıkan erozif aşınma oranları paslanmaz çelik ve sinterlenmiş tungsten karbür ile karşılaştırılmıştır. Deney öncesi ve sonrasında numune yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu ile görüntülenmiş ve deneyler sırasında kaplamanın maruz kaldığı aşınma mekanizmalarını belirlenmiştir. 268 m/s'de gerçekleştirilen deneyler neticesinde kaplamalarda meydana gelen aşınma sürelerinin 5 dk.'dan 185 dk.'ya kadar çıktığı görülmüştür. Ayrıca, 268 m/s partikül çarpma hızında, 46 µm CVD elmas kaplamalı tungstendeki erozif aşınma direncinin, sinterlenmiş tungsten karbürün aşınma direncinden yaklaşık altı kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir [46].

Sulu çamur erozyonu, koşullara bağlı olarak taşınan katı partiküllerin boyutu ve sıvı içindeki konsantrasyonu, şekli, çarpma hızı, sıvı ortamın türü, çarpma açısı ve akışkan ortamın sıcaklığı [47-50] gibi farklı parametrelerden etkilenmektedir. Aşınan malzemenin de tokluk, sertlik vb parametreleri önemlidir [51, 52]. Bu değişkenlerin etkilerinin incelenmesi amacıyla çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların gerçekleştirilmesi için farklı deney metotları ve bunların yapılabilmesi adına deney planı oluşturulmuştur [53-55]. Desale vd. (2005) bir hazne içerisinde deneylerin gerçekleştirileceği düzeneği oluşturmuşlardır. Bu düzenekte katı partiküllerin rastgele hareketi minimuma indirmek için hazne tabanına karıştırıcı bir pervane eklenmiştir. Katı partikül konsantrasyonu, çarpma hızı, tane büyüklüğü ve açısı parametrelerinin aşınma üzerindeki etkilerini ölçmek amaçlı farklı ortamlar oluşturulmuştur. Neticede; birbirinden değişik aşınma mekanizmalarının olduğu birbirinden farklı numune açılarında aşınmış yüzeylerden, katı partikül çarpma açılarının tespitinde de destekleyici olacak SEM görüntüleri alınmıştır. Bu hazneli aşınma düzeneğinin sonucunda dirsekler, pompalar ve borular gibi ekipmanlarda belirli konsantrasyon oranlarında ve reel akış hızlarında aşınmaların tahmin edilmesi ve daha gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi hedeflenmiştir [56].

Desale vd. (2006) yaptıkları deneysel çalışmada, hazneli tip sulu çamur deney düzeneği kullanarak, AISI 304L ve AA6063 sünek malzemelerinin aşınma performanslarını test etmişlerdir. 3 m/s çarpma hızı ve 550 µm ort. partikül olan

silisyum karbür, alümina ve kuvars olmak üzere üç farklı aşındırıcı seçilmiştir. Deneyler; %10 katı konsantrasyonlu karışım ile 15° ila 90° aralığındaki çarpma açılarında gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma neticesinde elde etmiş oldukları bulgular şu şekildedir [57];

- En yüksek aşınma her iki malzeme için de düşük açılarda oluşmuştur.
- Sünek malzemelerin erozif aşınma oranı, aşındırıcı sertliği ve şeklinden farklı özelliklerle de değişebilmektedir. Düşük çarpma açılarında yoğunluk değerleri ve şekil yüksek çarpma açılara göre daha etkilidir.
- Bir malzemedeki aşınmanın fazla olduğu açı değeri bütün aşındırıcılar için aynı olukun, farklı aşındırıcılar için her bir açı değerinde farklı aşınmalar olmuştur. Bu durum aşınmanın aşındırıcı özelliklerinden farklı olarak yalnızca aşınan malzemenin özellikleriyle bağlantılı olduğunu göstermiştir. En yüksek aşınma 15°'de alüminyumda olup bu değer paslanmaz çelikte 22,5° dir.
- Malzeme aşınma mekanizması aşındırıcı sertliği ve şeklinin bir bağlantısı olarak meydana gelir. Düşük şekil ve yüksek yoğunluk faktörüne sahip partiküller derin çukurlar meydana getirir. Yüksek şekil ve düşük yoğunluğa sahip aşındırıcılara oranla daha yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü oluştururlar. Böylece, yoğunluğu fazla ve açısız şekilli aşındırıcılarda aşınma oranı belirgin şekilde yüksek olur.

Desale vd. (2008), bakır, yumuşak çelik, AA6063 alüminyum alaşımı, türbin kanat çeliği, 316L AISI, 304L paslanmaz çelik ve bronz olmak üzere yedi farklı malzemedeki, normal çarpma açısında (90°), hazneli tip deney düzeneği kullanarak aşınma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. 550 µm ort. büyüklüğe sahip alümina, silis karbürü ve kuvars kumu aşındırıcı olarak seçilmiştir. Deneyler, 3 m/s partikül çarpma hızında ve %10 katı konsantrasyonunda gerçekleştirilmiş olup aşınma değeri, aşındırıcı ve numune sertlik oranının bir fonksiyonu olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, deneyler değişken katı konsantrasyonunda (%10, %20 ve %30) ve değişken partikül çarpma hızlarında (3, 6 ve 8,37 m/s) gerçekleştirilmiştir. Bu deney sonucunda şu sonuçlara varılmıştır [58];

- Sünek malzemeler, 90° normal çarpma açısında kullanıldığında, aşındırıcı sertliğinin numune sertliğine oranının bir fonksiyonu olarak erozif aşınma ortaya çıkmaktadır. Aşınma oranı sertlik oranı aralığı için neredeyse sabit kalmaktadır. Sertlik oranı bölgeleri bu çalışmada, 4,2- 5,2, 6,9- 12,1 ve 12,5 - 27,5 olarak belirlenmiştir. Üç bölge için, sertlik oranından farklı değişkenlerin etkisine bağlı olarak aşınma oranı, çok dar bir aralıkta değişmektedir.
- Erozif aşınma değeri, normal çarpma açısında (90°), tane boyutuna ve hıza kesinlikle bağlı olmasına rağmen konsantrasyona daha düşük bir seviyede bağlıdır. Sünek malzemelerin aşınmalarının hesaplanabilmesi için bir bağıntı geliştirilmiş olup bu çalışmadaki deneysel verilerle % ±12 hata vermektedir.
- Aşındırıcıların yüzeye etkisi ve SEM görüntüleri ve sonucu aşınmış yüzeylerde ölçülen yüzey pürüzlülük değerleri, sertlik oranının bir fonksiyonudur.

Desale vd. (2011) çalışmalarında alümina, silisyum karbür ve kuvars olarak üç değişik aşındırıcı kullanarak, yumuşak çelik, AA6063 alüminyum alaşımı, türbin kanat çeliği, bronz, AISI 304L ve AISI 316L paslanmaz çelik ve bakır olmak üzere yedi değişik malzeme hazneli tip deney düzeneği kurularak aşınma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneyler, farklı konsantrasyon (% 10, %20 ve %30) ve partikül çarpma hızlarında (3, 6 ve 8,33 m/s) olmak üzere yapılmıştır. Ayrıca üç farklı ortalama partikül boyutları (363, 550 ve 655 µm) aşındırıcı olarak seçilmiştir. Bu çalışma neticesinde aşağıdaki sonuçlara varılmıştır [59];

- Değişken çarpma açılarında kesme aşınma oranının, farklı sünek malzemelerin toplam aşınma oranına etkisi hesaplanmıştır. Çarpma açısı ile kesme aşınması belirli bir açıda en yüksek değerine ulaşana kadar artmış, daha sonra açı değeri 90° kadar artarken kesme aşınması azalmıştır. Kesme aşınma en yüksek değeri için numune malzemesinin sertliği ve açı değeri değerine arasında fonksiyonel bir ilişki olduğu belirlenmiştir.
- Kesme aşınmasının bulunmasında malzeme özelliği ve çalışma parametrelerinin doğrudan etkisi olduğu ortaya çıkmıştır.

- Herhangi bir çarpma açısında kesme aşınma oranının deformasyon aşınma oranına katkısını bulmak için bir bağlantı kurulmuştur. Bu bağlantı malzeme özellikleri ve çalışma parametreleri bilgisine dayanmaktadır. Bu ilişki, bu çalışmadaki deneysel veri aralığı için aşınma oranını, $\pm\%18$ 'lik bir hata ile kesme aşınma değeri ve deformasyona etkisini ortaya çıkarmıştır.

Kumar'ın (2011) çalışmasında, pompa ve boru malzemesi olarak santral külü iletiminde kullanılan 13Cr-4Ni çeliği incelemiştir. Aşınma mukavemetinin artırılması amacıyla, malzeme yüzeyine HVOF yöntemi ile alüminyum oksit (Al₂O₃) ve krom oksit (Cr₂O₃) toz kaplama uygulamıştır. %20 oranında 50 – 350 µm partikül boyutuna sahip santral uçucu külü içeren çamur hazırlanmıştır. Deney düzeneği olarak pompa, boru hattı ve haznededen oluşan bir su jeti kullanılmıştır. Deneyler 30°, 60° ve 90° olmak üzere üç değişik açıda gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda; her iki kaplamanın kaplamasız malzemeden daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkmıştır. Kaplamalı ve kaplamasız malzemelerde 30° ve 90° çarpma açılarında maksimum aşınmanın olduğu görülmüştür. Ayrıca, Cr₂O₃ kaplamalı çeliğinin performansının kaplamasız 13Cr-4Ni çeliğine 3 kat daha iyi olduğu ve her ikisinde de aşınma değerlerinin uygulama ve akış süresi arttıkça artış gösterdiği tespit edilmiştir [60].

Khan (2011) çalışmasında, AISI 202 östenitik paslanmaz çelik ile ısı işlem görmemiş %0,16 ve %0,29 düşük karbonlu çelik malzemesi kullanmıştır. Malzemelerin aşınma direncini arttırmak için yüzeylere HVOF termal spreycaplama yöntemi kullanılarak WC-12Co toz kaplama uygulanmıştır. Santral altı külü ve uçucu kül aşındırıcı olarak kullanmıştır. Üç farklı çamur konsantrasyonu (%20, %40 ve %60) ve farklı numune hızlarında (700,1000 ve 1400 d/d) belirlenerek hazneli tip deney düzeneği yapılmıştır. Yapılan deneyler neticesinde, santral altı külünün uçucu külden daha aşındırıcı olduğu belirlenmiştir. Ayrıca WC-12Co kaplanmış AISI 202 (%18 Cr, %4 Ni, %8 Mn) gibi paslanmaz çeliklerde aşınma miktarlarının 3 kat azaldığı ve uygulanan aynı yöntem ile yumuşak çeliklerde aşınma oranlarının 4 kat azaldığı tespit edilmiştir [61].

Andrews N. vd. (2014) çalışmalarında Stellite 6 malzemesi için yüksek çarpma açısında (90°) deformasyon aşınmasının meydana geldiğini ve yüzeyde çukur ile

krater oluşumunun fazla olduğunu, düşük çarpma açısında (20°) kayma aşınmasının meydana geldiğini gözlemlemişlerdir [62].

More vd. (2014) erozif aşınma üzerinde yapmış olduğu çalışmalarında; hızın, partikül çarpma açısının, tane boyutunun ve konsantrasyonun erozif aşınmaya etkisini incelemiştir. Bu çalışmada aşındırıcı olarak kuvars kumu (550 µm ortalama partikül büyüklüğüne sahip), aşınma malzemesi olarak AISI SS304L çelik seçilmiştir. Deneyler için hazneli tip düzenek hazırlanmış olup, parametre olarak %20 katı konsantrasyonuna sahip çamur ve partikül çarpma hızı 3,71 m/s seçilerek gerçekleştirilmiştir. SEM fotoğrafları, aşınmanın görünmesinde ve çarpma açısının belirlenmesinde katkı sağlamıştır. Deneyde gerçekçi sonuçlara ulaşabilmek adına; gerçek akış hızlarında boru hatları, dirsekler, pompalar vb. ekipmanlar seçilerek test düzeneği tasarlanmış ve aşınma durumları simüle edilmesi amaçlanmıştır. Deney sonucu olarak, sünek malzemelerde alınan numulere kesme ve deformasyon aşınma miktarları için hesaplamaların geliştirildiği ve hesaplanan verilerin deney ile benzer sonuçlar ortaya koyduğu görülmüştür. Bu yöntemde erozif aşınma değeri AISI SS304L malzemesinde % ±15 hata vermiştir [63].

Gökşenli ve Kosa (2015) çalışmalarında, St 37 çeliğinin yüzey sertliğinin aşınması ile aşınma mekanizmasının partikül çarpma açısına etkilerini incelemişler ve bu deney için aynı esnada iki numunenin test edilebileceği hazneli tip deney düzeneği kullanmışlardır. Deneylerde numune olarak; 245 HV yüzey sertliğine sahip sünek St 37 çeliği ve ısıtılmış işlem uygulanarak yüzeyi sertleştirilmiş (510 HV) gevrek St 37 çeliği seçilmiştir. Aşındırıcı olarak 350 µm ortalama partikül büyüklüğüne sahip silika kumu kullanılıp numuneler 4,76 m/s çevresel hız ile hazne içerisinde döndürülmüştür. Deney sonucunda sünek malzemedeki aşınmanın gevrek malzemedeki aşınmadan daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Sünek malzemede 30° çarpma açısında maksimum aşınmanın olduğu ve aşınmanın bu açının artmasıyla azaldığı, gevrek malzemede 45° çarpma açısında aşınmanın maksimum aşınmanın olduğu ve çarpma açısının artmasıyla arttığı görülmüştür [64].

Kumar vd. (2015) çalışmalarında, HVOF yöntemi ile kaplanmış AISI 316 ve 304 paslanmaz çeliklerin erozif aşınma davranışlarını incelemiştir. Deneylerde aşındırıcı

olarak ortalama 205 µm partikül büyüklüğünde kuvars kumu kullanılmış ve numuneler hazne içinde 10,7 m/s çevresel hız ile döndürülmüştür. Önceki çalışmalarında da olduğu gibi, erozif aşınma yoluyla yüzeyde oluşan malzeme kayıplarının iki ayrı mekanizmanın toplamı şeklinde oluştuğunu ve aşınmanın malzemelerin yüzeylerinde meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bunlar kesme ve deformasyon aşınmasıdır. Kesme aşınması deformasyon aşınmasına göre daha düşük açılarda meydana gelmektedir. Çalışmalar sonucunda, AISI 304 malzemesi üzerine yapılan WC-Co-Cr kaplamasında optimum erozif aşınma dayanımı sonuçları elde edilmiştir. Bu çalışmalar doğrultusunda en etkili değişkenlerin katı konsantrasyonu ve çarpma açısı olduğu ve aşındırıcı partikül büyüklüğünün bunlara nazaran daha az etkili olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca 30° çarpma açısında elde edilen aşınma değerlerinin 90°de elde edilenden daha fazla olduğu ve bunun sünek malzemelerin özelliklerinden biri olduğunu belirtilmiştir [65].

4.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRMESİ

Literatür araştırmasının neticesinde; aşınmanın birçok parametreye bağlı olduğu ortaya çıkmıştır. Bunlardan aşındırıcı ile ilgili olan bazı parametreler; taşınan katı partiküllerin boyutu, sıvı içerisindeki konsantrasyonu, çarpma açısı ve hız parametreleridir ve aşınan malzeme ile ilgili bazı parametreler ise; yüzey sertliği değeri vb. gibi birçok parametredir. Yapılan çalışmalar incelendiğinde, daha yüksek hız ve konsantrasyon değerlerinde aşınmanın arttığı ve aşınma değeri üzerinde partikül çarpma hızının konsantrasyondan daha etkili olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca aşındırıcı partikül boyutu ile aşınma miktarı arasında doğru orantı olduğu görülmüştür.

BÖLÜM 5

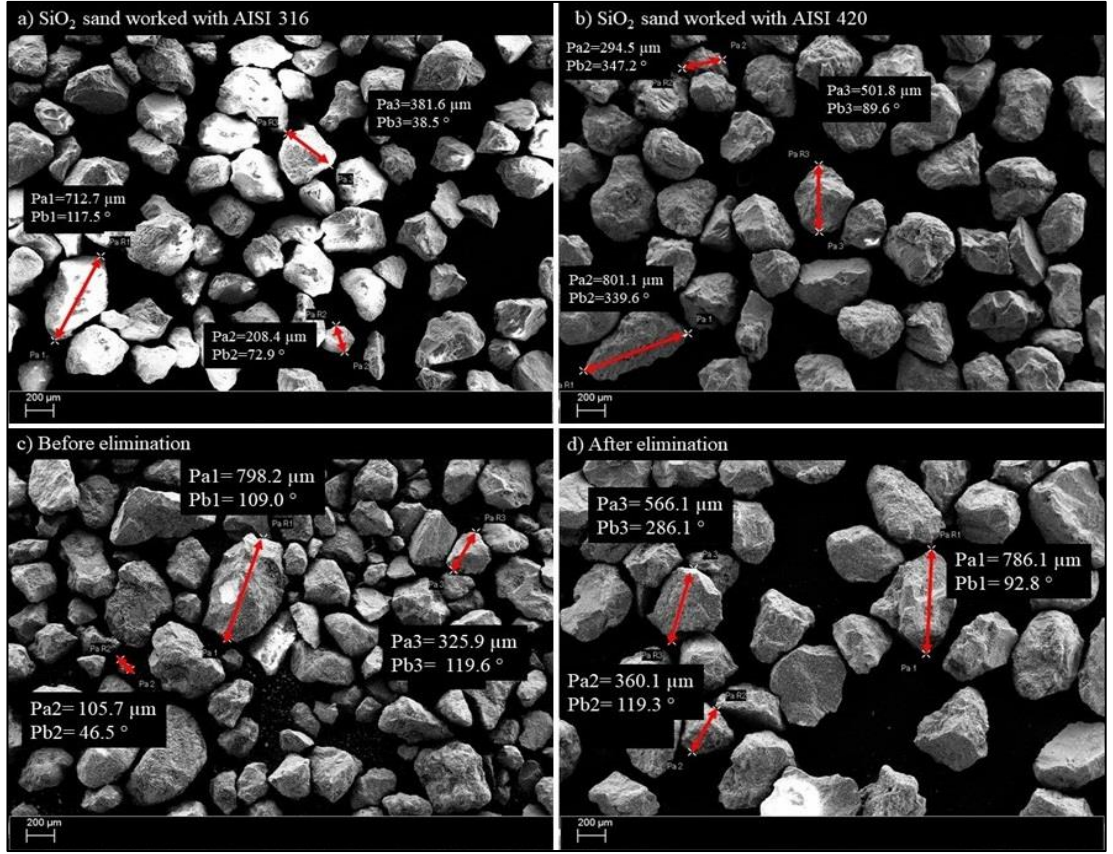
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Yapılması planlanan deneyler, içerisinde sıvı (su) ve aşındırıcı kum (SiO_2) karışımı bulunan bir tank içerisine numunelerin yerleştirilmesi ve bu numunelerin sürekli olarak aşındırıcı kum darbelerine maruz kalarak yüzeyinden parça koparılması temeline dayanarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler öncesinde parametrelerin etkisinin incelenmesi planlandığından dolayı 3 farklı parametre belirlenmiş olup bunlar; numune çarpma hızı, sıvı ortam içerisinde yer alan aşındırıcı kum konsantrasyonu ve numune çarpma açısı olarak belirlenmiştir. Tüm bu değerlerin kombine hali olacak şekilde toplam 27 deney yapılması yerine TAGUCHI L9 metodu ile toplam 9 deney olacak şekilde deney tasarımı oluşturulmuştur.

TAGUCHI metodu, proseste değişkenliği oluşturan ve kontrol edilemeyen faktörlere karşı, kontrol edilebilen faktörlerin düzeylerinin en uygun kombinasyonunu seçerek, ürün ve prosesteki değişkenliği en aza indirmeye çalışan bir deneysel tasarım metodudur. Bu yöntem aynı anda birden fazla faktörün göz önünde bulundurulmasını sağlamakla birlikte daha az deney yapılarak en optimum sonucun elde edilmesini de sağlamaktadır.

5.1. AŞINDIRICI PARTİKÜL VE SULU ÇAMUR HAZIRLANMASI

Aşındırıcı malzeme olarak kütlece %98,6 saflıkta ve %1,4 diğer bileşiklerden meydana gelen SiO_2 (silika) kumu seçilmiştir. Ortalama partikül boyut aralığı, 600 μm ve 425 μm açıklık değerlerine sahip iki endüstriyel elek ile elendikten sonra ortalama 512,5 μm olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu aşındırıcı kum sulu-çamur (slurry) erozif aşınma deney düzeneği haznesine istenen konsantrasyonda eklenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.1’de deneyler öncesinde ve sonrasında aşındırıcı kuma ait elenmemiş, elenmiş-çalışmamış ve elenmiş-çalışmış SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.1 Aşındırıcı SiO₂ kumuna ait SEM görüntüleri a) AISI 316 ile çalışmış b) AISI 420 ile çalışmış c) elemeden önce d) elemeden sonra

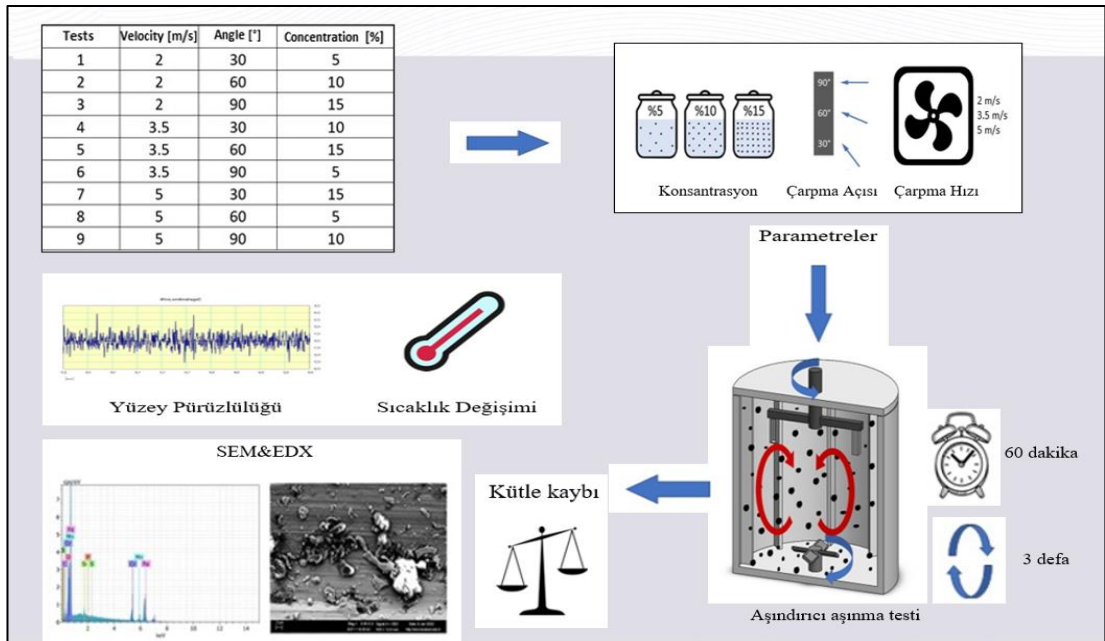
5.2. MALZEME SEÇİMİ VE NUMUNE HAZIRLAMA

Paslanmaz çelikler yapılarında minimum %11 oranında krom içeren ve yüzeylerinde sünek, yoğun, ince ve saydam bir oksit tabakası sayesinde korozyon direncine sahip olan bir çelik türüdür. Bu amorf tabaka sayesinde ana malzeme ile dış ortam arasında gerçekleşebilecek reaksiyon engellenmektedir. Diğer çelik türleri ile kıyaslandığında paslanmaz çelikler daha pahalıdır ancak uzun kullanım ömürleri ve bakım-onarım kolaylıkları düşünüldüğünde uzun vadede paslanmaz çeliklerin kullanımı daha ekonomik olmaktadır [5]. Numuneler, sertlik dereceleri sırasıyla <215 HB ve <230 HB olan AISI 316 ve AISI 420 paslanmaz çelik malzemedен seçilmiş olup her iki numune 5x6x30 mm ölçülerinde hazırlanmıştır. Deneyler öncesinde numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin eşit olabilmesi adına 1200 gritlik karbür zımpara kâğıdı ile zımparalanmış olup bu işlem sonucunda tüm numunelerin yüzey pürüzlülük

değerlerinin eşit olması beklenmektedir. Deneysel öncesinde numunelere ısı işlemleri uygulanmamış olup ham malzeme özelliklerinde kullanılmıştır.

5.3. DENEY SİSTEMİNİN TASARIMI VE PROSEDÜRÜ

Deneysel gerçekleştirilmeden önce TAGUCHI L9 ile deney tasarımı yapılmıştır. Belirlenen parametrelere göre her deney beş kez tekrarlanacak şekilde yapılmıştır ve daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesi adına bu beş deneyin ortalaması alınmıştır. Deneysel öncesinde numuneler hazırlanırken öncelikle üzerlerindeki koruyucu yağ tabakası bir yağ sökücü ile temizlenip ardından suyla temizlenmiş ve daha sonra kurutucu (saç kurutma makinesi) ile kurutulmuştur. 10^{-4} gram hassas terazi ile ilk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numune tutuculara civata yardımı ile bağlanan numunelerin deney parametrelerine göre çarpma açısı (30° - 60° - 90°) ayarlanmıştır. Deney süresi olarak belirlenen 1 saatlik süre boyunca aşınmaya maruz bırakılan numunelerin deney bitiminde tekrar su ile temizlenip hemen ardından kurutucu ile tekrar kurutulmasının sonucu hassas terazide ikinci ölçümleri yapılmıştır. Böylece her iki kütle ölçümleri sonucunda farkları hesaplanmıştır ve kütle kayıpları belirlenmiştir. Şekil 5.2’de slurry eroziv aşınma deneyine ait aşamalar verilmiştir.



Şekil 5.2. Slurry eroziv aşınma uygulaması şematik gösterimi.

Her deney sonrasında deney düzeneği içerisinde yer alan aşındırıcı silika kumu (SiO_2) dışarı tahliye edilip düzenek temizlenmiştir ve yeni bir deneye başlarken hazırlanan diğer silika kumu eklenmiştir.

5.4. DENEY PARAMETRELERİ

Söz konusu parametrelerin incelenmesi maksadıyla, halihazırda yapılmış olan bu çalışmada, 3'er adet farklı konsantrasyon ve hız değerinde sulu çamur hazırlanmıştır. Deney parametreleri, %5, %10 ve %15 konsantrasyon, 2 m/s, 3,5 m/s ve 5 m/s çarpma hızı, 30°, 60° ve 90° çarpma açısı değerlerinde gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

6.1. AŞINMA MİKTARLARI

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda tüm numunelerde aşınma sebebiyle meydana gelen kütle kayıpları, yüzey pürüzlülük değişimleri ve hazne sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır. Yüzey sertliği daha düşük olan malzeme AISI 316 paslanmaz çelik, yüzey sertliği daha yüksek olan malzeme AISI 420 paslanmaz çelik malzemeye göre daha fazla oranda kütle kaybına maruz kalması beklenmektedir.

Çizelge 6.1. Deneysel sonuçlar ve TAGUCHI L9 deney tasarımı.

TAGUCHI L9 deney tasarımı				Kütle Kaybı [mg]				Yüzey Pürüzlülüğü- Ra [μ m]				Sıcaklık Değişimi [$^{\circ}$ C]			
Deney	Hız [m/s]	Açı [$^{\circ}$]	Konsantrasyon [ağ. %]	AISI 316	AISI 316 Standart Sapma	AISI 420	AISI 420 Standart Sapma	AISI 316	AISI 316 Standart Sapma	AISI 420	AISI 420 Standart Sapma	AISI 316	AISI 316 Standart Sapma	AISI 420	AISI 420 Standart Sapma
1	2	30	5	1,2	± 0.85	0,8	± 0.57	0,11	± 0.010	0,09	± 0.004	2,2	± 0.19	0,6	± 0.01
2	2	60	10	1,4	± 0.99	0,9	± 0.64	0,1	± 0.002	0,1	± 0.009	2,4	± 0.31	1,0	± 0.02
3	2	90	15	1,8	± 1.27	1,1	± 0.78	0,1	± 0.007	0,14	± 0.003	2,5	± 0.37	1,2	± 0.16
4	3,5	30	10	2,8	± 1.98	2,5	± 1.77	0,11	± 0.014	0,18	± 0.019	3,2	± 0.33	2,8	± 0.31
5	3,5	60	15	4,2	± 2.97	3,2	± 2.26	0,15	± 0.010	0,17	± 0.003	3,6	± 0.60	3,1	± 0.24
6	3,5	90	5	2,3	± 1.63	1,8	± 1.27	0,12	± 0.001	0,14	± 0.003	3,0	± 0.20	1,8	± 0.11
7	5	30	15	5,7	± 4.03	4,1	± 2.90	0,17	± 0.008	0,22	± 0.004	3,6	± 0.04	3,9	± 0.15
8	5	60	5	3,1	± 2.19	2,7	± 1.91	0,15	± 0.001	0,19	± 0.005	4,0	± 0.34	3,4	± 0.07
9	5	90	10	5,4	± 3.82	4	± 2.83	0,14	± 0.007	0,17	± 0.019	4,2	± 0.50	3,5	± 0.15

Her iki numune için ulaşılmak istenen kütle kaybı, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık değişimi değerleri oluşturulan regresyon denklemlerinde parametrelerin uygun yerlere yazılması ile hesaplanabilmektedir. Bu regresyon denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$ML_{AISI316} = -0,001378 + 0,001089 * V + 0,000170 * C - 0,000017 * A \quad (6.1)$$

$$ML_{AISI420} = -0,001233 + 0,000889 * V + 0,000103 * C - 0,000009 * A \quad (6.2)$$

$$SR_{AISI316} = 0,0666 + 0,01789 * V + 0,00143 * C - 0,000272 * A \quad (6.3)$$

$$SR_{AISI420} = 0,0071 + 0,02622 * V + 0,00307 * C + 0,000417 * A \quad (6.4)$$

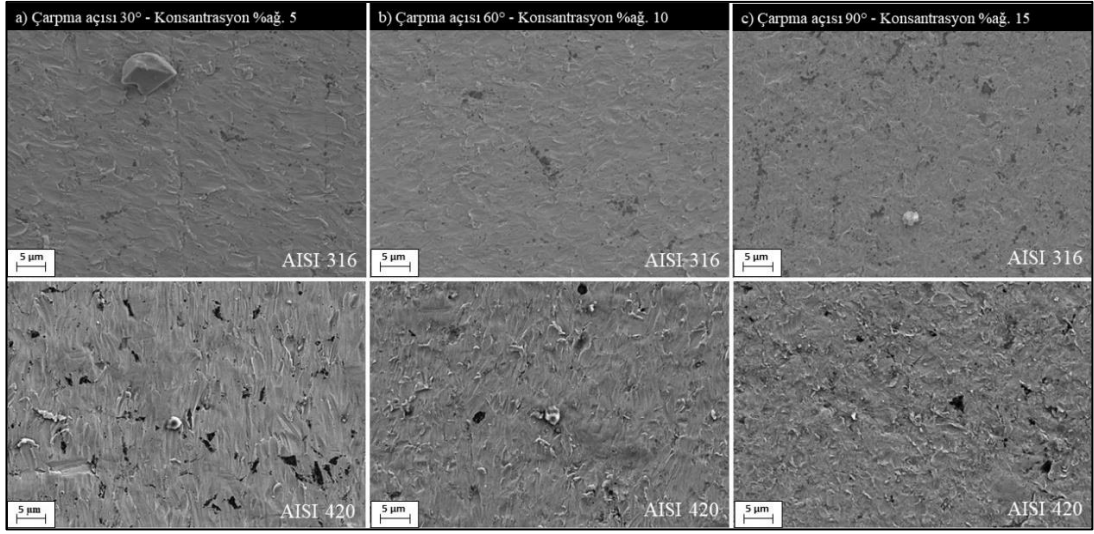
$$TC_{AISI316} = 1,028 + 0,5222 * V + 0,05000 * C - 0,00278 * A \quad (6.5)$$

$$TC_{AISI420} = -1,662 + 0,8944 * V + 0,0811 * C + 0,00139 * A \quad (6.6)$$

ML: Mass Loss (Kütle Kaybı), SR: Surface Roughness (Yüzey Pürüzlülüğü), TC: Temperature Change (Sıcaklık Değişimi), V: Velocity (Hız), C: Concentration (Konsantrasyon), A: Angle (Açı)

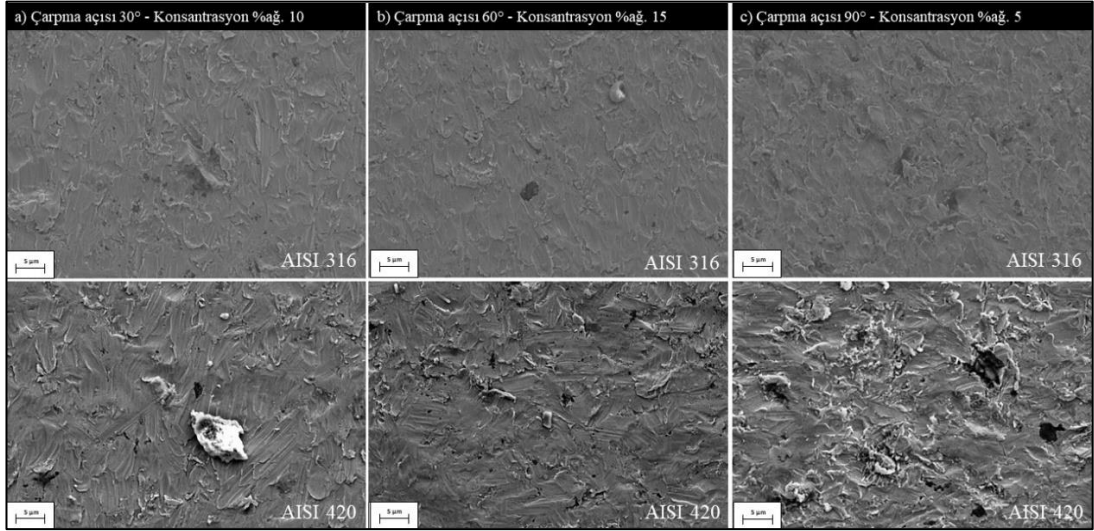
6.2. AŞINMA YÜZEYLERİ

TAGUCHI L9 deney tasarımı sonucunda gerçekleştirilmesi planlanan 9 adet deney belirlenmiş ve gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1'de 2 m/s çarpma hızı değeri ile gerçekleştirilen 1, 2 ve 3 numaralı deneyler neticesinde AISI 316 ve AISI 420 numunelerine ait aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. 2 m/s çarpma hızı değerinde gerçekleştirilen bu deneyler sonucunda elde edilen SEM görüntülerine bakıldığında 30° çarpma açısına ait deney sonuçlarında malzeme yüzeylerinde kesme aşınması daha belirgin gözükmemektedir. Açılı değerleri arttıkça kesme aşınmasından deformasyon aşınmasına geçiş olmaktadır. 90° çarpma açısında gerçekleşen deneylerde ise en yüksek deformasyon aşınması gözükmemektedir. Numunelerin yüzeylerine bakıldığında bariz bir aşınma gerçekleştiği zımpara izlerinin silinmesiyle de desteklenmektedir.



Şekil 6.1. AISI 316 ve AISI 420 numuneler için 2 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 1 b) deney 2 c) deney 3.

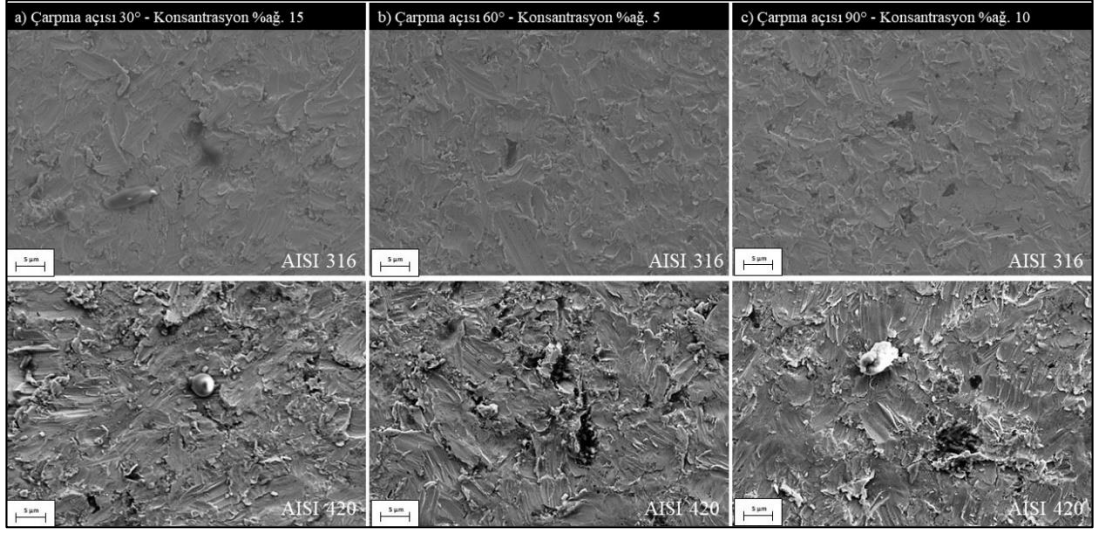
Şekil 6.2’de 3,5 m/s çarpma hızı değerinde ile gerçekleştirilen 4, 5 ve 6 numaralı deneyler neticesinde AISI 316 ve AISI 420 numunelerine ait aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.2. AISI 316 ve AISI 420 numuneler için 3,5 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 4 b) deney 5 c) deney 6

Şekil 6.3’de 5 m/s çarpma hızı değerinde ile gerçekleştirilen 7, 8 ve 9 numaralı deneyler neticesinde AISI 316 ve AISI 420 numunelerine ait aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Çarpma açısı değeri 90° olan her iki numunede de oldukça

belirgin deformasyon aşınması izleri mevcuttur. Konsantrasyon değeri %15 ve çarpma açısı değeri 30° olan her iki numunede de oldukça fazla kesme aşınması izleri mevcuttur. 60° çarpma açısı değerine sahip deneye ait numunelerde ise bölgesel olarak deformasyon ve kesme izleri mevcuttur.



Şekil 6.3. AISI 316 ve AISI 420 numune için 5 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 7 b) deney 8 c) deney 9

6.3. KÜTLE KAYBI

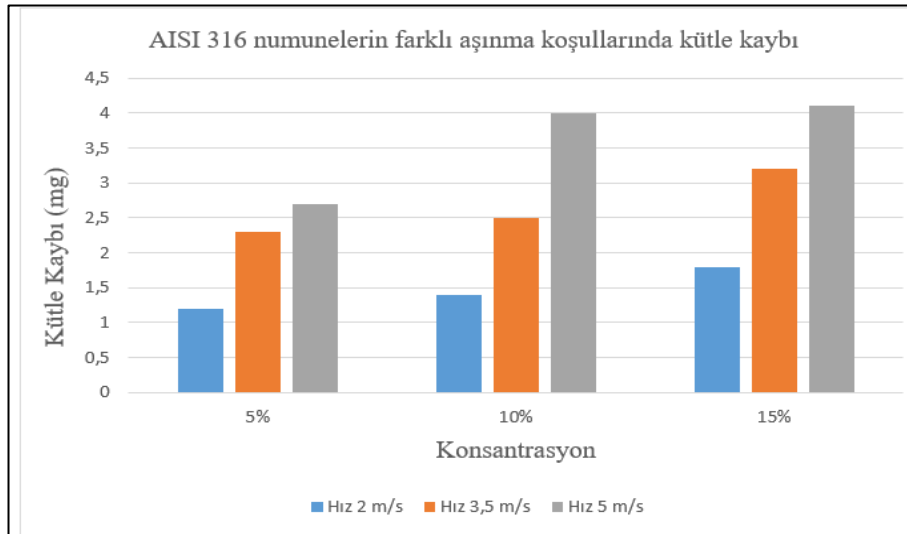
Aşınma etkisiyle malzemenin yüzeyinden parça kopmasıyla kütle kaybı meydana gelmektedir ve bu kütle kaybı aşınma testi öncesi ve sonrasında numunelerin kütlelerinin ölçülmesi sonucunda hesaplanabilmektedir. Her deney beş kez gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçlar (Çizelge 6.1) ve regresyon denklem hesaplamaları incelendiğinde girdi parametreleri olan çarpma hızı, konsantrasyon ve çarpma açısı değerlerine bağlı olarak aşınma miktarında değişiklikler gözlemlenmiştir. Aşınma miktarı çarpma hızı ve konsantrasyon ile doğru, çarpma açısı ile ters orantılıdır.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda Çizelge 6.1’de verilen deney sonuçları incelendiğinde en fazla kütle kaybı AISI 316 ve AISI 420 için sırasıyla 5,7 mg ve 4,1 mg ile 7 numaralı deneyde gerçekleşmiştir. Bu deney parametreleri ise 5 m/s çarpma

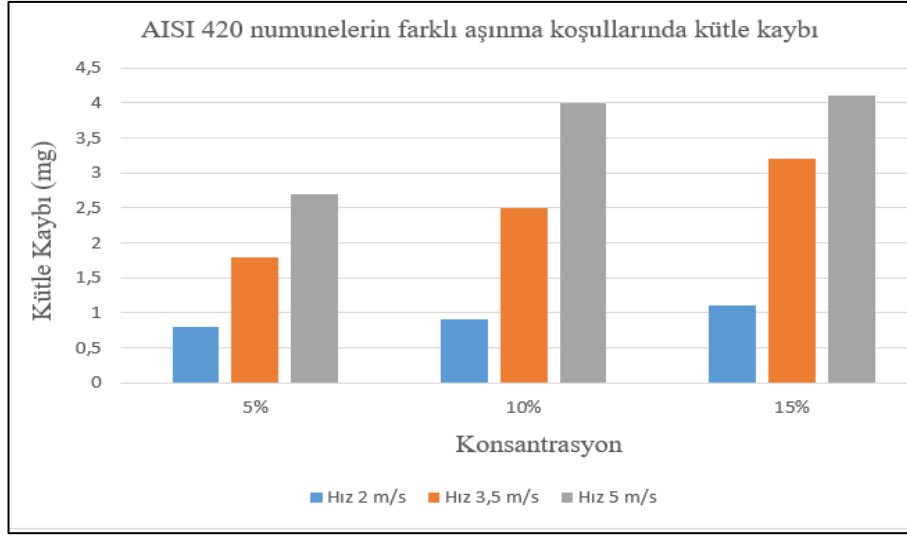
hızı, %15 konsantrasyon ve 30° çarpma açısıdır. AISI 316 deney 7 sonucunda %39,02 oranda daha fazla kütle kaybı yaşamıştır. En düşük kütle kaybı ise AISI 316 ve AISI 420 için sırasıyla 1,2 mg ve 0,8 mg ile 1 numaralı deneyde gerçekleşmiştir. Bu deney parametreleri ise 2 m/s çarpma hızı, %5 konsantrasyon ve 30° çarpma açısıdır. AISI 316 deney 1 sonucunda %50 oranda daha fazla kütle kaybı yaşamıştır.

ANOVA sonuçları incelendiğinde aşınma deney sonuçlarına etkisi yüksek iki parametre gözükmemektedir. Bu parametreler çarpma hızı ve konsantrasyondur. AISI 316 malzeme için aşınma deneylerinde en etkili parametre %72,18 etki oranı ile hız, ikinci olarak ise %19,57 etki oranı ile konsantrasyondur. Bu iki parametreden sonra %7,21 etki oranı ile çarpma açısı gelmektedir. AISI 420 malzeme için ise aşınma deneylerinde en etkili parametre %87,912 etki oranı ile hız, ikinci olarak ise %12,30 etki oranı ile konsantrasyondur. Bu iki parametreden sonra %3,7 etki oranı ile çarpma açısı gelmektedir. Bu hız, konsantrasyon ve açı parametrelerinin P-value değerleri ise AISI 316 için sırasıyla 0,0000087- 0,000211 ve 0,0021196 olarak, AISI 420 için sırasıyla 0,00003347- 0,002886075 ve 0,031000073 olarak gözlemlenmiştir. Deneysel veriler ile regresyon verileri arasında yüksek uyum söz konusudur. AISI 316 ve 420 paslanmaz çelik malzemeleri için bu uyum oranları sırasıyla %98,9 ve %97,9'dur.

Şekil 6.4'de AISI 316 ve AISI 420 numunelerin farklı aşınma koşullarında kütle kaybı grafiği verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.4. Numunelerin farklı aşınma koşullarında kütle kaybı a) AISI 316 paslanmaz çelik, b) AISI 420 paslanmaz çelik

6.4. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

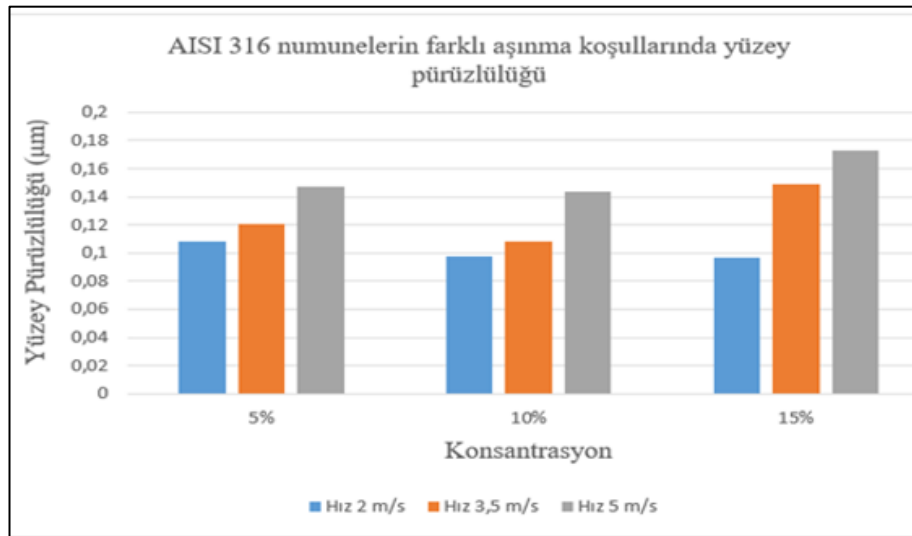
Çizelge 6.1' de yer alan deneysel veriler incelendiğinde numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinden değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Deney parametreleri ile yüzey pürüzlülük değişimleri arasında oldukça yüksek bir ilişki olduğu görülmektedir. Yüzey pürüzlülük değişimi çarpma hızı ve konsantrasyon değerleri ile doğru orantılı olmakla birlikte çarpma açısı ile ters orantılıdır. Deneyler öncesinde AISI 316 ve AISI 420 numuneler 1200 gritlik karbür zımpara ile zımparalanmıştır. Zımpara işlemi sonrasında AISI 316 için 0,039 μm , AISI 420 için 0,053 μm yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Her iki malzeme için yüzey pürüzlülük değerinde gerçekleşen değişim, başlangıçta ölçülen ve deney sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin kıyaslanması ile gözlemlenebilmektedir.

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda Çizelge 6.1'de verilen deney sonuçları incelendiğinde en fazla yüzey pürüzlülük değişimi AISI 316 ve AISI 420 için sırasıyla 0,173 μm ve 0,215 μm ile 7 numaralı deneyde gerçekleşmiştir. Bu deney parametreleri ise 5 m/s çarpma hızı, %15 konsantrasyon ve 30° çarpma açısıdır. En yüksek yüzey pürüzlülüğü değişimi durumunda AISI 316 ve AISI 420 sırasıyla %343,58 ve %305,66 oranlarında yüzey pürüzlülük değerlerinde artış yaşamıştır. En düşük yüzey

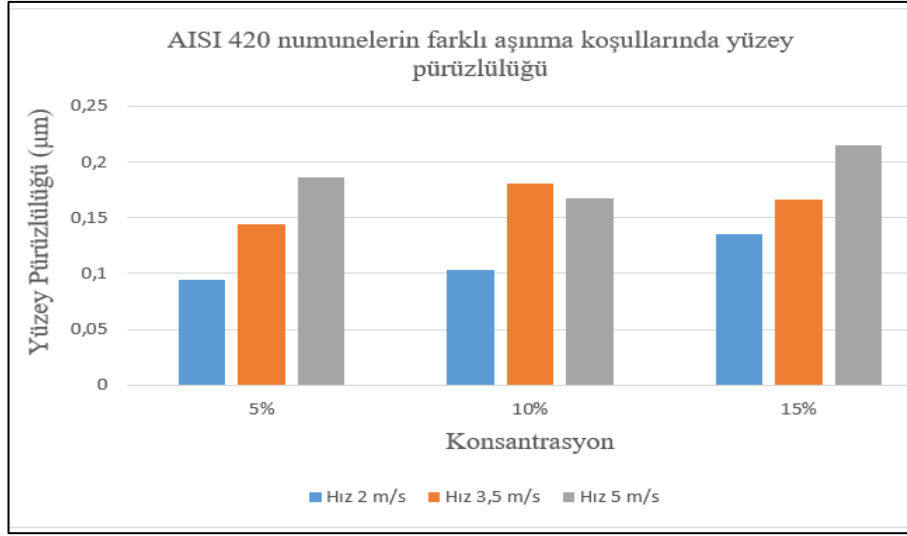
pürüzlülük değişimi ise AISI 316 ve AISI 420 için sırasıyla 0.097 μm ile 3 numaralı deneyde ve 0,094 μm ile 1 numaralı deneyde gerçekleşmiştir. Deney 1 parametreleri 2 m/s çarpma hızı, %5 konsantrasyon ve 30° çarpma açısı, deney 3 parametreleri ise 2 m/s çarpma hızı, %15 konsantrasyon, 90° çarpma açısıdır. En düşük yüzey pürüzlülüğü değişimi durumunda AISI 316 ve AISI 420 sırasıyla %148,71 ve %77,35 oranlarında yüzey pürüzlülük değerlerinde artış yaşamıştır.

ANOVA sonuçları incelendiğinde aşınma deney sonuçlarına etkisi en yüksek parametre çarpma hızıdır. AISI 316 malzeme için yüzey pürüzlülük değişiminde %74,6 etkinlik oranı ile en etkili parametre çarpma hızı, ikinci sırada %6,9 ile çarpma açısı ve son olarak %5,3 ile konsantrasyon yer almaktadır. AISI 420 malzeme için yüzey pürüzlülük değişiminde %74,6 etkinlik oranı ile en etkili parametre çarpma hızı, ikinci sırada %11,3 ile konsantrasyon ve son olarak %7,5 ile çarpma açısı yer almaktadır. Bu hız, konsantrasyon ve açı parametrelerinin P-value değerleri ise AISI 316 için sırasıyla 0,003- 0,214 ve 0,165 olarak, AISI 420 için ise 0,001- 0,032 ve 0,062 olarak gözlemlenmiştir. Deneysel veriler ile regresyon verileri arasında yüksek uyum söz konusudur. AISI 316 ve 420 paslanmaz çelik malzemeler için uyum oranları sırasıyla %86,88 ve %93,45'tir.

Şekil 6.5'de AISI 316 ve AISI 420 numunelerin farklı aşınma koşullarında yüzey pürüzlülüğü grafiği verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.5. Numunelerin farklı aşınma koşullarında yüzey pürüzlülüğü a) AISI 316 paslanmaz çelik, b) AISI 420 paslanmaz çelik

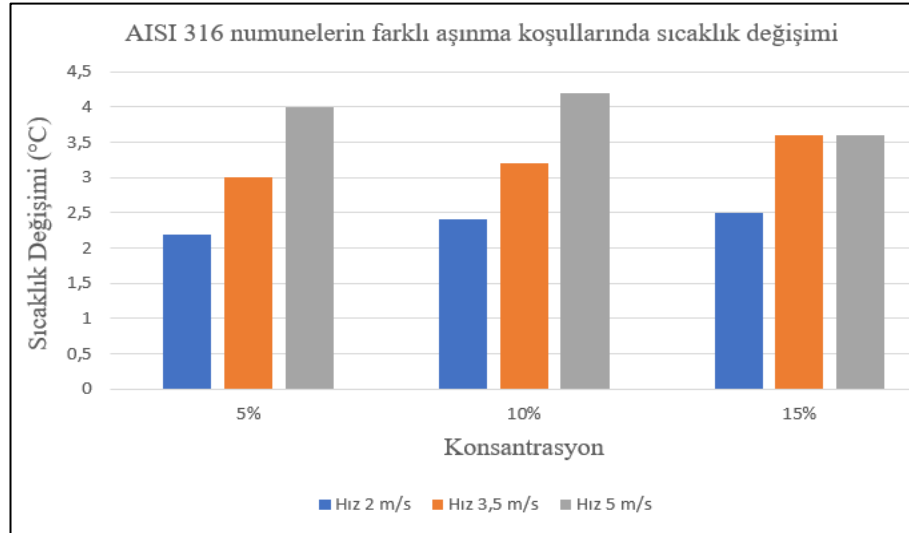
6.5. SICAKLIK DEĞİŞİMİ

Deneyler öncesinde ve sonrasında sıcaklık değişimi hesaplamaları için haznenin altı farklı noktasından, yaklaşık 300 mm uzaklıktan pirometre ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney parametrelerinin sıcaklık değişimine olan etkisi için Çizelge 6.1 incelendiğinde parametrelerin hazne sıcaklık değişimini direkt olarak etkilediği görülmektedir.

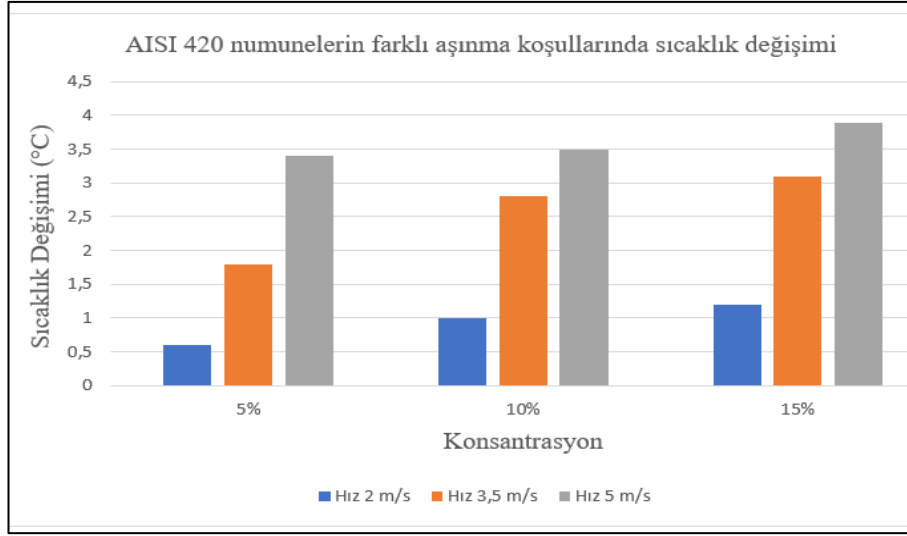
Gerçekleştirilen deneyler sonucunda Çizelge 6.1’de verilen deney sonuçları incelendiğinde en fazla sıcaklık değişimi AISI 316 ve AISI 420 için sırasıyla 4,2 °C ile 9 numaralı deneyde ve 3,9 °C ile 7 numaralı deneyde gerçekleşmiştir. Deney 7 parametreleri 5 m/s çarpma hızı, %15 konsantrasyon ve 30° çarpma açısı, deney 9 parametreleri ise 5 m/s çarpma hızı, %10 konsantrasyon ve 90° çarpma açısıdır. En yüksek sıcaklık değişimi durumunda AISI 316 için %7,69 oranda daha fazla sıcaklık değişimi yaşamıştır. En düşük sıcaklık değişimi ise AISI 316 ve AISI 420 için sırasıyla 2,2 °C ve 0,6 °C ile 1 numaralı deneyde gerçekleşmiştir. Bu deney parametreleri ise 2 m/s çarpma hızı, %5 konsantrasyon ve 30° çarpma açısıdır. Bu deney sonucunda AISI 316 için %266,66 daha fazla sıcaklık değişimi meydana gelmiştir.

ANOVA sonuçlarına göre her iki malzeme için de haznede gerçekleşen sıcaklık değişiminde en etkili parametre çarpma hızıdır. Bu parametreden sonra ise konsantrasyon parametresinin etkisi söz konusu olmaktadır. Son sırada ihmal edilebilir düzeyde çarpma açısı parametresi gelmektedir. AISI 316 ve AISI 420 paslanmaz çelik malzemeler için çarpma hızı parametresinin etki oranı sırasıyla %89,17 ve %87,892'dir. İkinci sırada ise sırasıyla %9,08 ve %8,031 etki oranları ile konsantrasyon gelmektedir. İhmal edilebilir düzeyde olan çarpma açısı parametresinin etki oranı ise sırasıyla %1,01 ve %0,085'tir. Bu hız, konsantrasyon ve açı parametrelerinin P-value değerleri ise AISI 316 için sırasıyla 0,00000209, 0,00054392 ve 0,04760277 olarak, AISI 420 için ise 0,000136, 0,02477 ve 0,757733 olarak gözlemlenmiştir. Deneysel veriler ile regresyon verileri arasında yüksek uyum söz konusudur. AISI 316 ve AISI 420 malzemeler için uyum oranları sırasıyla %99,26 ve %96,01'dir.

Şekil 6.6'da AISI 316 ve AISI 420 numunelerin farklı aşınma koşullarında sıcaklık değişim grafiği verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 6.6. Numunelerin farklı aşınma koşullarında sıcaklık değişimi a) AISI 316 paslanmaz çelik, b) AISI 420 paslanmaz çelik

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu çalışmada AISI 316 östenitik paslanmaz çelik ile AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğin slurry erozif aşınma davranışının kıyaslaması yapılmıştır. Bu kıyaslama numunelerin kütle kayıpları, yüzey pürüzlülükleri ve hazne sıcaklık değişimleri ile yapılmıştır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada üç farklı çarpma hızı değeri (2-3,5 ve 5 m/s), üç farklı konsantrasyon değeri (%5, %10 ve %15) ve üç farklı çarpma açısı değeri (30°, 60° ve 90°) kullanılmıştır. Belirlenen bu parametreler kullanılarak TAGUCHI L9 metodu ile deney tasarımı oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen deneyler sonrasında RSM ile matematiksel bir modelleme ile tahminleme denklemi oluşturulmuştur. Bu denklemler sayesinde her iki numune için de kütle kaybı, yüzey pürüzlülüğü ve hazne sıcaklık değişimi verileri elde edilmiştir. İncelenen her çıkış parametresi üzerinde en etkili parametreyi tespit edebilmek adına ANOVA metodu kullanılmıştır. Bu denklemler sayesinde elde edilen veriler ve gerçekleştirilen deneysel veriler kıyaslandığında aralarında yüksek oranda uyum olduğu görülmüştür. ANOVA sonuçları incelendiğinde çarpma hızı parametresinin en fazla etki oranına sahip olduğu ve daha sonra konsantrasyon parametresinin etkili olduğu gözlemlenmiştir. Çarpma açısı parametresinin etkinliği ise son sırada yer almaktadır. Kütle kaybı, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık değişimi değerleri ile parametreler arasındaki ilişki referans alınıp, oluşturulmuş regresyon denklemleri sayesinde hesaplanan değerler şu şekilde olmaktadır:

- En fazla kütle kaybı durumunda (çarpma hızı 5 m/s, konsantrasyon %15 ve çarpma açısı 30°); AISI 316 numune için 6,11 mg ve AISI 420 numune için 4,49 mg kütle kaybı meydana gelmekte olup, AISI 316 numune de %36 daha fazla kütle kaybı olduğu tespit edilmiştir.

- En az kütle kaybı durumunda (çarpma hızı 2 m/s, konsantrasyon %5 ve çarpma açısı 30°); AISI 316 numune için 0,12 mg ve AISI 420 numune için 0,25 mg kütle kaybı meydana gelmekte olup, AISI 420 numune de %108,33 daha fazla kütle kaybı olduğu tespit edilmiştir.
- En fazla yüzey pürüzlülük değişimi durumunda (çarpma hızı 5 m/s, konsantrasyon %15 ve çarpma açısı 30°); AISI 316 numune için 0,1693 µm ve AISI 420 numune için 0,2217 µm pürüzlülük değişimi meydana gelmekte olup, ilk yüzey pürüzlülüğü ölçümlerine göre AISI 316 ve AISI 420 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla %334,10 ve %318,30 artmaktadır.
- En düşük yüzey pürüzlülük değişimi durumunda (çarpma hızı 2 m/s, konsantrasyon %15 ve çarpma açısı 90°); AISI 316 numune için 0,0850 µm ve AISI 420 numune 0,0874 µm pürüzlülük değişimi meydana gelmekte olup, ilk yüzey pürüzlülüğü ölçümlerine göre AISI 316 ve AISI 420 numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla %117,94 ve %64,90 artmaktadır.
- En fazla sıcaklık değişimi durumunda (çarpma hızı 5 m/s, konsantrasyon %15 ve çarpma açısı 30°); AISI 316 numune için 4,3056 °C ve AISI 420 numune için 4,1516 °C sıcaklık değişimi meydana gelmekte olup, AISI 316 için %3,70 daha fazla sıcaklık değişimi meydana gelmektedir.
- En düşük sıcaklık değişimi durumunda (çarpma hızı 2 m/s, konsantrasyon %5 ve çarpma açısı 30°); AISI 316 numune için 2,0722 °C ve AISI 420 numune için 0,5740 °C sıcaklık değişimi meydana gelmekte olup, AISI 316 için %261,01 daha fazla sıcaklık değişimi meydana gelmektedir.
- Çarpma hızı arttıkça meydana gelen kütle kaybında, yüzey pürüzlülük değişiminde ve sıcaklık değişiminde artış meydana gelmektedir.
- Çarpma açısı parametresinin belirsizliği ve etki oranının ihmal edilebilecek düzeyde olmasından dolayı sonuçlara olan etkisi dikkate alınmamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Bhushan, B., “Wear”, Principles and Applications of Tribology 2nd ed., *A John Wiley & Sons Ltd.*, Ohio, 459-462 (2013).
2. Zum Gahr, K., H., “Erosive Wear of Materials”, Microstructure and Wear of Materials, *Elsevier*, New York, 531 (1987).
3. Tarım, M., “Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Lazer ile Yüzey Sertleştirme Kapiliyetinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Sakarya, (2021).
4. Akyay, S., “AISI 420 Paslanmaz Çelik ve E 360 Çeliğinin Sürtünme Kaynak Yöntemi ile Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Düzce, (2022).
5. Aran, A. & Temel, M. A. (2004). Paslanmaz Çeliklerin Üretimi, Kullanımı, Standartları (2.bs.). Sarıtaş Teknik Yayın No:1, İstanbul: Acar Matbaacılık A.Ş.
6. Baysan, E., “ESD ile İntermetalik Kaplanmış Paslanmaz Çeliklerin Karakterizasyonu ve Korozyon Davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2022).
7. Kerimak, M.Z., “Döküm Paslanmaz Çeliklerin Korozyon ve Kırılma Özelliklerinin Isıl İşlemlerle Değişimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2021).
8. Kanbolu, S., (1996). “Östenitik Krom Nikelli Paslanmaz Çeliklerin Kaynak Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1996).
9. Cobb, Harold M. “History of Stainless Steel”. Materials Park, OH: ASM International, (2010).
10. Acar, F., “Kaynaklanmış Paslanmaz Çelik ve Karbon Çeliğinin Mekanik Özelliklerine Taneler Arası Korozyonun Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, (2020).
11. Balakan, A., “AISI 430 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin Perçinleme Prosesinde Çatlak Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2020).

12. Cunat, P. J., “Alloying Elements in Stainless Steel and Other Chromium Containing Alloys”, *International Chromium Development Association*, Paris, (2004).
13. Açar, İ., “MIG Kaynağı ile Birleştirilen Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Koruyucu Gaz Kombinasyonunun Etkisi” Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2020).
14. Güç, G., “Lazer Kaynak ile İşlenmiş Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2021).
15. Osmanoğlu, T., “AISI 304 ve 430 Kalite Paslanmaz Çeliklerin Mikroyapılarına, Mekanik Özelliklerine ve Korozyon Davranışlarına Soğuk Deformasyonun Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2012).
16. Odabaş, C., Paslanmaz Çelikler, Temel Özellikleri, Kullanım Alanları, Kaynak Yöntemleri, Askaynak, 2.Baskı Tavaslı Matbaası, İstanbul, (2004).
17. Kaya, K., “Östenitik Paslanmaz Çelik ve IF Çeliğinin Nokta Direnç Kaynak Yöntemi ile Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, (2022).
18. Zengin, E., “AISI 316L Paslanmaz Çelik Matrisli, Bor Karbür ve Karbon Nanotüp Takviyeli Nanokompozitlerin Toz Metalurjisi ile Üretimi ve Karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, (2021).
19. Türkoğlu T., “Borlanmış AISI 304, AISI 420 ve AISI 430 Paslanmaz Çeliklerin İçyapı, Sertlik ve Korozyona Dayanıklılık Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2017).
20. W. Jiang vd., “Effects of Nanostructural Hierarchy on the Hardness and Thermal Stability of an Austenitic Stainless Steel”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 12, sayı 7, ss. 376–384, (2021).
21. Akgül, O., “Ağır Silah Mühimmatlarına Sıvı Patlayıcı Doldurma Sisteminin 304L Paslanmaz Çelik Alaşımı ile Kaynaklı Tasarımının Yapısal Bağlantısının Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale, (2022).
22. Kaya, Y., “Patlamalı Kaynak Yöntemi ile Üretilen Grade A Gemi Sacı-Paslanmaz Çelik Kompozitlerin Mikroyapı, Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2014).

23. O. Mutlu, “AISI 304 Paslanmaz Çeliğinde Çok Adımlı Bilyalı Dövme Uygulamalarının Mikroyapı ve Malzeme Özellikleri Üzerine Etkilerinin İncelenmesi”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, (2021).
24. A. N. de Moura, C. A. R. Neto, N. A. Castro, E. A. Vieira and M. Orlando, 73 “Microstructure, Crystallographic Texture and Strain Hardening Behavior in Hot Tensile Tests of UNS S32304 Lean Duplex Stainless Steel”, *Journal of Materials Research and Technology*, c. 12, sayı 1, ss. 1065–1079, (2021).
25. Aydın, T., “Paslanmaz Çeliklerin MIG Kaynağında Kullanılan Gazlar Ve Etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2002).
26. Baylan, O., “Elektrik Ark Kaynak Yöntemiyle Birleştirilen Östenitik- Martenzitik Farklı Paslanmaz Çeliklerin Kaynaklı Bağlantılarında, Mikroyapı ile Özellikler Arasında İlişkinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, (2004).
27. Kiseçik, İ., “Sertleştirilmiş ve Sert Dolgu Kaynağı Yapılmış AISI 1050 Çeliğinin Aşınma Direncinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, (2010).
28. Büyükkelleci, Ü., “Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elâzığ, (2008).
29. Emiroğlu, H.İ., “Bazık Oksijen Fırını (BOF) ile Çelik Üretim Prosesinde Kullanılan Endüstriyel Fandaki Aşınmaların İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2019).
30. Ulutan, M., “AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2007).
31. Karabaşoğlu, M., “Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2008).
32. Puccio F. D. and Mattei L., “Biotribology Of Artificial Hip Joints”, *World Journal of Orthopedics*, 6 (1): 77-94 (2015).
33. Demirtaş, K., “Polimer Aşınma ve Sertlik Deneyi Deney Föyü”, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü*, Samsun (2019).

34. Karaoğlu, Y., “Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2006).
35. Kuş, H., “Bronz Esaslı Seramik Takviyeli Fren Balatalarının Performansının Geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2014).
36. Genç, O., “Bazık Oksijen Fırını (BOF) ile Çelik Üretiminde Malzeme Katkı Şutunun İyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, (2021).
37. Budinski, K. G., “Friction, Wear and Erosion Atlas”, CRC Press, USA, (2014).
38. Demirsöz, R., “Granül Curüf Taşımada Kullanılan Boruların İç Yüzeyinin Aşınma Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2018).
39. Sarıkaya, Ö., “Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri”, *Sakarya Üniversitesi*, Sakarya (2007).
40. Levy, A., V., Chik, P., “The effect of erodent composition and shape on the erosion of steel”, *Wear*, 89: 151-162 (1983).
41. Lynn R., S., Wong, K., K., Clark H., M., “On the particle size effect in slurry erosion”, *Wear*, 149: 55-71 (1991).
42. 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).
43. Clark H., M., “On the particle size effect in slurry erosion”, *Wear*, 149: 55-71 (1991).
44. 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).
45. Shipway, P., H. and Hutchings, L. M., “The role of particle properties in the erosion of brittle materials”, *Wear*, 193: 105-113 (1996).
46. Wheeler, D. W. and Wood, R. J. K., “Solid particle erosion of CVD diamond coatings”, *Wear*, 233–235: 306–318 (1999).
47. Adamiak, M., “Effect of Abrasive Size on Wear, Abrasion Resistance of Materials”, *InTech*, 167-184 (2012).

48. Katsich, C., Badisch, E., Manish, R., Heath, G., R. and Franek, F., “Erosive wear of hard faced Fe–Cr–C alloys at elevated temperature”, *Wear*, 267: 1856–1864 (2009).
49. Jha, A. K., Batham, R., Ahmed, M., Majumder, A. K., Modi, O. P., Chaturved, S. and Gupta, A. K., “Effect of impinging angle and rotating speed on erosion behavior of aluminum”, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 21:32-38 (2011).
50. Lopez, D., Congote, J. P., Can, J. R., Toro, A. and Tschiptschin, A. P., “Effect of particle velocity and impact angle on the corrosion–erosion of AISI 304 and AISI 420 stainless steels”, *Wear*, 259: 118-124 (2005).
51. Doubek, P. and Filipek, J., “Abrasive and erosive wear of technical materials”, *Acta University Agric. Et Silv. Mendel. Brun.*, 3: 13–22 (2011).
52. Kulu, P., Tarbe, R. and Vallikivi, A., “Abrasive Wear of Powder Material S and Coatings”, *Materials Science*, 11: 230-234 (2005).
53. Fort, I., “On Hydraulic Efficiency of Pitched Blade Impellers”, *Chemical Engineering Research and Design*, 8-9: 611–615 (2011).
54. Patil, M. S., Deore, E. R., Jahagirdar, R. S. and Patil, S. V., “Study of the Parameters Affecting Erosion Wear of Ductile Material in Solid-Liquid Mixture”, *Proc. Of the World Congress on Engineering*, London (2011).
55. Franek, F., Badisch, E. and Kirchgassner, M., “Advanced Methods for Characterisation of Abrasion/Erosion Resistance of Wear Protection Materials”, *FME Transactions*, 37: 61-70 (2009).
56. Desale, G. R., Gandhi, B. K. and Jain, S. C., “Improvement in the design of a pot tester to simulate erosion wear due to solid–liquid mixture”, *Wear*, 259: 196- 202 (2005).
57. Desale, G. R., Gandhi, B. K. and Jain, S. C., “Effect of erodent properties on erosion wear of ductile type materials”, *Wear*, 261: 914-921 (2006).
58. Desale, G. R., Gandhi, B. K. and Jain, S. C., “Slurry erosion of ductile materials under normal impact condition”, *Wear*, 264: 322-330 (2008).
59. Desale, G. R., Gandhi, B. K. and Jain, S. C., “Development of Correlations for Predicting the Slurry Erosion of Ductile Materials”, *Journal of Tribology*, 133 (2011).
60. Kumar, R., “Investigation of Erosive Wear Ductile Materials With and Without Coating”, Master of Engineering, *Thapar University*, Patiala (2011).
61. Khan, A. A., “Evaluation of Erosion Wear of Ash Handling Pipes”, Master of Engineering, *Thapar University*, Patiala (2011).

62. 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).
63. More, S. R., Nandre, B. D. and Desale, G. R., “Development of Pot Tester to Simulate the Erosion Wear due to Solid-Liquid Mixture”, *International Journal of Researchers, Scientists and Developers*, 2:6-12 (2014).
64. Gökşenli, A. and Kosa, E., “Effect of Impact Angle on Erosive Abrasive Wear of Ductile and Brittle Materials”, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial, Mechatronic and Manufacturing Engineering*, 9: 1566-1570 (2015).
65. Kumar, S., Mishra, N. K. and Mishra, S. B., “Role of HVOF Sprayed Coating of WC-Co-Cr, NiCrSiB on Slurry Erosion Wear of AISI 304 & 316 Substrates”, *International Journal of Scientific Processes Research and Application*, 1: 13- 18 (2015).

ÖZGEÇMİŞ

Sema YILMAZ; 1999 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp, 2005 yılında mezun oldu. 2005 yılında taşeron firma alt yapısında Lafarge Aslan Çimeto'da şantiye şefliği yaptı. 2006 yılında ilk atamasının yapıldığı 1'inci Ana Bakım Fabrika Komutanlığı (Arifiye/ADAPAZARI)'nda, Ankara'ya tayininin gerçekleşeceği 2013 yılına kadar, Etüt Proje Bölümü ve Tank Proje Ofisi'nde Arge Mühendisi olarak çalıştı. 2013-2019 yılları arasında 11'inci Ana İkmal Merkezi Komutanlığı (Yenikent/ANKARA)'nda Tedarik Uzmanı olarak görev yaptı. 2019 yılında Millî Savunma Bakanlığı Teknik Hizmetler Genel Müdürlüğü (ANKARA)'ne ataması yapıldı ve halen MSB Teknik Hizmetler Genel Müdürlüğü Savunma Sanayi ve Güvenliği Daire Başkanlığı bünyesinde görevine devam etmektedir. 2021 yılında Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. Evli ve bir çocuk annesidir. İngilizce bilmektedir.