

**BAZİK OKSİJEN FIRINI (BOF) İLE ÇELİK  
ÜRETİM PROSESİNDE KULLANILAN  
ENDÜSTRİYEL FANDAKİ AŞINMALARIN  
İYİLEŞTİRİLMESİ**



**2019  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Halil İbrahim EMİROĞLU**

**BAZIK OKSİJEN FIRINI (BOF) İLE ÇELİK ÜRETİM PROSESİNDE  
KULLANILAN ENDÜSTRİYEL FANDAKİ AŞINMALARIN  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Halil İbrahim EMİROĞLU**

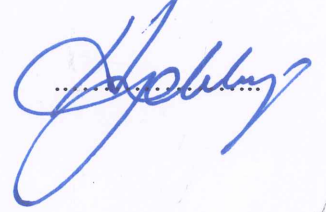
**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK  
Şubat 2019**

Halil İbrahim EMİROĞLU tarafından hazırlanan “BAZİK OKSİJEN FIRINI (BOF) İLE ÇELİK ÜRETİM PROSESİNDE KULLANILAN ENDÜSTRİYEL FANDAKİ AŞINMALARIN İYİLEŞTİRİLMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı



Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 21/02/ 2019

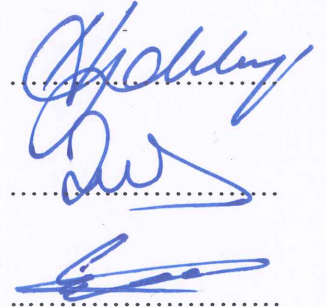
Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA (KBÜ)

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Gökhan SUR (KBÜ)

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Engin NAS (DÜ)

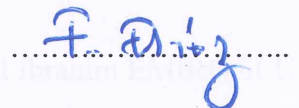


...../...../2019

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Filiz ERSÖZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü V.





*“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.”*

Halil İbrahim EMİROĞLU

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### BAZİK OKSİJEN FIRINI (BOF) İLE ÇELİK ÜRETİM PROSESİNDE KULLANILAN ENDÜSTRİYEL FANDAKİ AŞINMALARIN İYİLEŞTİRİLMESİ

Halil İbrahim EMİROĞLU

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA

Şubat 2019, 68 sayfa

Endüstride, malzeme hareketinin olduğu yerlerde aşınma problemi meydana gelmekte ve gerekli önlemler alınmadığı takdirde büyük sorunlara neden olabilmektedir. Endüstriyel sanayilerin büyük çoğunluğunda proses sonucu oluşan gaz, toz, buhar, ısı vb. etkeni ortamdaki uzaklaştırmak için endüstriyel fanlar kullanılmaktadır. Yüksek devirlerde dönen fan sistemlerinin ilettikleri gaz, toz, buhar, ısı vb. debileri yüksektir. Yüksek hızlarda taşınan akışkanlar fanlarda bir veya daha fazla aşınma türüne bağlı olarak gövdelerinde ve kanatlarında aşınmalar oluşturmaktadırlar. Fanlarda oluşan hasarlar üretim sürecinin duruşuna, duruşa bağlı olarak da üretim kayıplarına neden olmaktadır.

Bu çalışmada, Kardemir A.Ş entegre demir çelik fabrikasında çelik üretimi için kullanılan bazik oksijen fırınlarında (BOF), çelik üretimi aşamasında açığa çıkan

BOF gazının emiş gücü yüksek olan ID fan (Induced Draft) ile emilmesi esnasında ID fan kanatlarında oluşan aşınmalar incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucu ID fan kanatlarında oluşan aşınmaları gidermek için ID fan kanatları AISI 304L paslanmaz elik ile kaplanarak ID fan kanatları iyileştirilmiştir. ID fan kanat malzemesi kalitesi S690QL yüksek mukavemetli elik zerine AISI 304L kalitesindeki paslanmaz elik ile plaka kaplama iyileştirmesi sonucu kanatlarda oluşan aşınma ve kirlenme miktarları incelenmiştir.

ID fan kanatlarının AISI 304L paslanmaz çeliği ile yapılan iyileştirme sonucunda BOF ile elik üretimi aşamasında meydana gelen duruş sresinde azalma, azalmaya bağlı olarak elik üretiminde artış gözlenmiştir. Yıllık olarak 14400 ton sıvı elik üretiminde artış, üretim duruşlarında 108 saatlik azalış ve BOF gazı toplanmasında 972 saatlik artış olmuştur. İyileştirme sonucunda sıvı elik üretiminin % 0.6 artması, geri dönüşüme gönderilen BOF gazının % 5 artması ve ID fan mrlерinin artarak yedek parça maliyetinin % 26.7 düşmesi ile birlikte elde edilen toplam kazanç 6.004.000 ₺ olarak hesaplanmış olup iyileştirmenin maliyeti ise 33.000 ₺ olmuştur.

**Anahtar Sözcükler** : elik retimi, bazik oksijen fırını (BOF), BOF gazı, erozif aşınma, korozif aşınma, endüstriyel (ID) fan.

**Bilim Kodu** : 914.1.093

## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **THE IMPROVEMENT OF INDUSTRIAL OVERVIEW OF STEEL PRODUCTION PROCESS WITH BASIC OXYGEN FURNACE (BOF)**

**Halil İbrahim EMİROĞLU**

**Karabük University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor:**

**Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA**

**February 2019, 68 pages**

In the industry, where there is material movement, wear problem occurs and if not taken the necessary precautions can cause big problems. Gas, dust, steam, heat etc. formed in the majority of industrial industries. industrial fans are used to remove the cause. Gas, dust, steam, heat etc. transmitted by high-speed rotating fan systems. flow rates are high. Fluids carried at high speeds create wear on their bodies and wings due to one or more wear types in the fans. Damage to the fans caused by the production process and production losses.

In this study, the basic oxygen furnaces (BOF) used for the production of steel in the integrated iron and steel plant in Kardemir A.Ş., the ID fan (Induced Draft), which

was exposed during the steel production phase, and the erosion caused by the ID fan blades during the absorption were examined. The ID fan blades were covered with AISI 304L stainless steel and the ID fan blades were improved. ID fan blade material quality S690QL high-strength steel AISI 304L quality stainless steel with plate coating as a result of the improvement in the amount of wear and fouling is investigated.

As a result of the improvement made with AISI 304L stainless steel ID fan blades, it was observed that steel production increased due to decreasing and decreasing time in the production stage with BOF. There has been an increase of 14400 tons of liquid steel production annually, a 108-hour decrease in production downtimes and an increase of 972 hours in the collection of BOF gas. As a result of the improvement, 0.6% increase in liquid steel production, 5% increase in BOF gas sent to recycling and ID fan life increased and spare part cost decreased by 26.7% and total gain was calculated as 6.004.000 ₺ and the cost of improvement was 33.000 ₺.

**Key Words** : Steel production, basic oxygen furnace (BOF), BOF gas, erosive wear, corrosive wear, industrial fan.

**Science Code** : 914.1.093



## TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütölmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Hasan GÖKKAYA'ya sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmamda desteklerini esirgemeyen iş arkadaşlarıma, çalışma hayatımda bana çok büyük katkıları olan Baőmühendisim Orhan SARIOğLU'na, Müdürüm Yusuf ÇAKIR'a, Direktörüm Ahmet AYCAN'a ve Yatırımlar Koordinatörümüz Mansur YEKE'ye teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında beni destekleyen babam Sayın őaban EMİROğLU, annem Kadriye EMİROğLU, kardeşlerim Ayfer, Erdiń, Zeynep, Semra ile sevgili eőim Nagihan EMİROğLU'na ve kızım Asel EMİROğLU'na tüm kalbimle teőekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER .....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xiv
BÖLÜM 1. ....	1
GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2. ....	3
ÇELİK ÜRETİM PROSESİ VE AŞINMA .....	3
2.1. ÇELİK ÜRETİM PROSESİ.....	3
2.1.1. Bazık Oksijen Fırını (BOF) İle Çelik Üretim Prosesi .....	4
2.1.2. BOF Gaz Soğutma, Yıkama ve Geri Kazanımı sistemi .....	6
2.1.3. Emiş Gücü Yüksek Tip (Induced Draft, ID) Fan Sistemi .....	10
2.2. AŞINMA .....	12
2.2.1 Aşınma Sisteminde Temel Parametreler .....	12
2.2.2 Aşınma Mekanizmaları.....	13
2.2.2.1 Adhezif Aşınma .....	13
2.2.2.2 Abrazif Aşınma.....	14
2.2.2.3 Eroziv Aşınma .....	16
2.2.2.4 Korozif Aşınma.....	18
2.2.2.5 Yorulma Aşınması .....	18
BÖLÜM 3. ....	20

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI .....	20
3.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEĞERLENDİRİLMESİ .....	31
BÖLÜM 4. ....	33
DENEYSEL ÇALIŞMA .....	33
4.1. GİRİŞ.....	33
4.2. KARDEMİR A.Ş ÇELİK ÜRETİM TESİSİNDE İD FAN KANATLARININ AŞINMASINA BAĞLI OLARAK ÜRETİM DURUŞUNA NEDEN OLAN SORUNUN ARAŞTIRILMASI... ..	37
4.3. KORUYUCU PLAKA HAZIRLANMASI.....	43
BÖLÜM 5. ....	49
BULGULAR VE TARTIŞMA .....	49
5.1. GİRİŞ.....	49
5.2. ÜRETİM DURUŞ SÜRESİNE ETKİSİ .....	49
5.3. MALİYETE ETKİSİ .....	52
5.4. AŞINMA MİKTARINA ETKİSİ.....	56
5.5. GAZ TOPLAMA MİKTARINA ETKİSİ .....	56
5.6. VİBRASYON DEĞİŞİMİNE ETKİSİ.....	57
BÖLÜM 6. ....	63
SONUÇLAR ve ÖNERİ .....	63
KAYNAKLAR .....	65
ÖZGEÇMİŞ .....	68

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1.	İçerisi refrakter tuğla ile örülmüş bazik oksijen fırını (BOF) a) BOF içerisine oksijen üfleme anı görüntüsü, b) BOF' un bakım için duruş anı görüntüsü.....	5
Şekil 2.2.	Bazik oksijen fırınından (BOF) çelik üretimi aşamalarının gösterimi.....	6
Şekil 2.3.	BOF içerisine oksijen üflenmesi sonucu oluşan reaksiyonların görüntüsü.....	8
Şekil 2.4.	BOF gaz soğutma, yıkama ve geri kazanımı sistemi şematik gösterimi...	9
Şekil 2.5.	BOF ağız ve alçaltılabilir eteklik görüntüsü .....	10
Şekil 2.6.	SMS Siemag Baumco yıkama kulesi (tipik örnek).....	12
Şekil 2.7.	Endüstride hava-gaz-ısı sevkiyatında kullanılan ID ve FD fanların örnek kullanım yerlerinin şematik olarak gösterimi .....	14
Şekil 2.8.	Bir tribolojik sistemin DIN 50320 standardına göre şematik gösterimi .	15
Şekil 2.9.	Adhezif aşınma şematik gösterimi .....	16
Şekil 2.10.	Abrazif aşınma mekanizmaları genel görüntüleri .....	17
Şekil 2.11.	Abrazif aşınma türleri görüntüsü.....	18
Şekil 4.1.	KARDEMİR A.Ş çelik üretim tesisinde 3 numaralı BOF, BOF gazı taşıma sistemi genel görüntüsü Bir tribolojik sistemin DIN 50320 standardına göre şematik gösterimi.....	35
Şekil 4.2.	KARDEMİR A.Ş çelik üretim tesisinde 3 numaralı BOF, BOF gazı taşıma sisteminde kullanılan ID fan genel görüntüsü.....	36
Şekil 4.3.	KARDEMİR A.Ş çelik üretim tesisinde 3 numaralı BOF, BOF gazı taşıma sisteminde kullanılan ID fanın yakından muhafazası sökülmiş görüntüsü .....	37
Şekil 4.4.	2014 yılında çelik üretim tesisi gaz-toz ve kirli su taşıma hattında 1200 mm çapında ana gaz borusunda bakım onarım çalışanları tarafından yapılan iyileştirmenin genel görünümü.....	39
Şekil 4.5.	Kardemir A.Ş Çelik üretim tesisine ait ID fanda oluşan a) Aşınma, kirlilik ve kullanım dışı kalan yüzeyinde oluşan asidik görüntüler b) Tesis duruşunda temizlenen ID fan görüntüsü .....	40
Şekil 4.6.	ID fan kanatlarında oluşan aşınmanın yakın görüntüsü .....	41
Şekil 4.7.	Yapımına karar verilen AISI 304L paslanmaz çelik ID fan kanat formu .....	44
Şekil 4.8.	AISI 304L paslanmaz çelikten yapımı gerçekleştirilen ID fan kanat görüntüsü .....	45

Şekil 4.9. S690QL yüksek mukavemetli çelikten yapılmış ID fan kanat üzerine yapılan AISI 304L kaplama malzemenin deforme olmuş görüntüsü .....	46
Şekil 4.10. ID fan kanat kaplama sacı üzerine çoklu kaynak deliği açılarak kaynak yapılan AISI 304L kaplama malzemesi görüntüsü .....	47
Şekil 4.11. ID fan kanatlarına kaplama işlemi yapıldıktan sonra ID fanın 1 yıl çalışması sonucu fan kanatlarında meydana gelen aşınma görüntüsü.....	48
Şekil 4.12. ID fan kanatlarına AISI 304L kanat kaplama plakasının yanlardan kaynaklı montaj yapılmış haliyle ID fan kanatlarında 1 yıllık çalışma sonucunda gözle görülür bir aşınma olmadığının görüntüsü.....	47
Şekil 5.1. Kardemir A.Ş çelik üretim müdürlüğünde kullanılmakta olan ID fan ekipmanında yapılan balans giderme işlemine ait görüntü .....	54
Şekil 5.2. Gaz toplama verimliliği ile geri dönüşüm kazancı ilişki grafiği.....	58
Şekil 5.3. ID fan kanatlarına yapılan iyileştirme sonrası Kardemir A.Ş çelik Üretim ünitesinde elde edilen yıllık maliyet-kazanç analizi grafiği .....	59
Şekil 5.4. Devir-vibrasyon ilişki grafiği .....	62
Şekil 5.5. İyileştirme öncesi 1200 dev/dak devirle çalışmakta olan ID fanda gün-vibrasyon ilişki grafiği .....	63
Şekil 5.6. Eroziyon ve koroziyon aşınma mekanizmaları kaynaklı ID fan kanatlarında oluşan aşınma görüntüleri.....	64
Şekil 5.7. İyileştirme sonrası 1200 dev/dak devirle çalışmakta olan ID fanlarda oluşan gün-vibrasyon ilişki grafiği.....	65

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 4.1. AISI 304L paslanmaz çeliğin kimyasal kompozisyonu.....	40
Çizelge 4.2. AISI 304L paslanmaz çeliğin mekanik özellikleri.....	40
Çizelge 4.3. Kardemir A.Ş BOF gaz temizleme sisteminde kullanılan suyun kimyasal analiz sonuçları .....	45
Çizelge 4.4. Fan gövdesinden alınan toz numunesinin kimyasal analiz sonuçları ....	46



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

%	: Yüzde
/	: Bölme
°C	: Santigrat derece
"	: İnç
°	: Derece, Açı birimi
₺	: Türk lirası
mm	: Milimetre
mg/l	: Miligram/litre
mm/s	: Milimetre/saniye
bar	: Basınç birimi
m <sup>3</sup> /h	: Debi birimi
m	: Metre
m <sup>3</sup>	: Metre küp
dev/dak	: Devir/dakika
m/s	: Metre/saniye
µm	: Mikron
CO	: Karbonmonoksit
NO <sub>2</sub>	: Azot dioksit
SO <sub>2</sub>	: Kükürt dioksit
CO <sub>2</sub>	: Karbondioksit
C	: Karbon
Mg	: Magnezyum
Cr	: Krom
V	: Vanadyum
W	: Volfram

S	: Kükürt
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
P	: Fosfor
O <sub>2</sub>	: Oksijen
SiO <sub>2</sub>	: Silisyum dioksit
MnO	: Mangan (II) oksit
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	: Difosfor pentaoksit
Ni	: Nikel
TiB <sub>2</sub>	: Titanyum diborür
CrB	: Krom monoboriir
NiB	: Nikel monoboriir
MoB <sub>2</sub>	: Molibden diborür
Fe <sub>2</sub> B	: Demir diborür
Mo	: Mobilden
M23C6	: Metal karbür
100Cr6	: Rulman çeliği
MoS <sub>2</sub>	: Molibden disülfür katı yağlayıcı
MoS <sub>2</sub> -Ti	: Titanyum katkılı molibden disülfür
AISI 440 C	: Martenzetik paslanmaz çelik
S690QL	: Yüksek mukavemetli çelik
AISI 304L	: Düşük karbonlu paslanmaz çelik
vb.	: Ve benzeri



## KISALTMALAR

BOF	: Bazık Oksijen Fırını
ID Fan	: Induced Draft, (Emiş Gücü Yüksek Fan)
FD Fan	: Forced Draft, (İtme Gücü Yüksek Fan)
TRD	: Termo Reaktif Difüzyon
XRD	: X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)
CVD	: Chemical Vapor Deposition (Kimyasal Buhar Biriktirme)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TIN	: Titanyum Nitrür
HSS	: High Speed Steel (Yüksek Hız Çeliği)
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Endüstriyel sanayilerde, malzeme hareketinin olduğu yerlerde aşınma problemi meydana gelmekte ve gerekli önlemler alınmadığı takdirde büyük sorunlara neden olabilmektedir. Aşınmanın görüldüğü yerlerde kullanılan malzemeler, prosesin aşındırma tipine göre, birine veya birkaçına karşı dayanımlı olması istenilir. Bu nedenle, aşınmaların olduğu yerlerde kullanılan malzemeler dayanım ve tokluklarının artırılması için yüzey sertleştirme ve dolgu işlemine tabi tutulurlar [1].

Endüstriyel sanayilerin büyük çoğunluğunda proses sonucu oluşan gaz, toz, buhar, ısı vb. etkeni ortamdaki uzaklaştırmak için endüstriyel fanlar kullanılmaktadır. Yüksek devirlerde dönen fan sistemlerinin ilettikleri gaz, toz, buhar, ısı vb. debileri yüksek olmaktadır. Yüksek hızlarda taşınan akışkanlar, fanlarda bir veya daha fazla aşınma türüne bağlı olarak gövdelerinde ve kanatlarında aşınmalar oluşturmaktadırlar. Fanlarda oluşan hasarlar üretimin sürekliliği için önem arz etmektedir. Fanlarda oluşan hasarlar üretim sürecinin duruşuna, duruşa bağlı olarak da üretim kayıplarına neden olmaktadır [1].

Günümüzde çelik, her yıl ortalama 1.3 milyar ton üretimi ile dünyada en çok kullanılan malzemelerden birisi konumundadır. Çelik üretiminde iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden birincisinde, entegre tesislerde yüksek fırınlar ile demir cevherinden elde edilen sıvı ham demir bazik oksijen fırını (BOF) içerisine elementler ilave edilerek oluşan karışım üzerine oksijen üflenmesi ile çelik üretimi, ikincisi ise mevcut çelik hurdalarının elektrik ark ocaklarında tekrar ergitilmesiyle çelik üretimidir [3].

Bu çalışmada; Kardemir A.Ş. çelik üretim tesisinde BOF (Konverter) ile birinci aşama çelik üretimi prosesinde BOF içerisinde sıvı ham demir, hurda ve alaşımlama

elementleri üzerine saf oksijen üflenmesi sonucu açığa çıkan zehirli ve enerji değeri yüksek BOF gazının (%70 CO, %10 NO<sub>2</sub>, %10 CO<sub>2</sub> %10 SO<sub>2</sub>) endüstriyel emme üfleme santrifüj fan (Induced draft, ID fan) ile emilerek gaz depolama tankına basılması prosesinde ID fan kanatlarında erozif ve korozif aşınmalara bağlı olarak oluşan hasarların oluşum süreci izlenmiş ve Kardemir A.Ş. çelik üretim tesisinde sıvı çelik üretim sürecinde kritik öneme sahip ID fanın kanatlarında oluşan aşınmalar önlenmeye çalışılarak ünite duruşları asgariye indirilmeye çalışılmıştır.



## BÖLÜM 2

### ÇELİK ÜRETİM PROSESİ VE AŞINMA

#### 2.1. ÇELİK ÜRETİM PROSESİ

Çelik, demir elementi ile çoğunlukla %0.2 ile %2.1 oranlarında değişen karbon (C) miktarının bileşiminden oluşan bir alaşımdır [1]. Çeliğin sınıflandırılmasında, içerdiği karbon oranı büyük önem arz etmektedir. Karbon gibi magnezyum (Mg), krom (Cr), vanadyum (V) ve volfram (W) vd. elementler de demir alaşımlamada kullanılmaktadır. Çelikte; sertlik, süneklilik ve gerilme noktası gibi fiziksel özellikleri kontrol eden; alaşımlama da yer alan elementlerin miktarları ve sahip oldukları kafes formlardır. Çeliğin yapısındaki karbon, alaşımı sertleştirmekte ve demir atomlarının kaymasını engellemektir. Çeliğin içindeki karbon miktarı ile oynanarak; sertliği, sünekliliği ve gerilme gücü değiştirilebilmektedir [1].

Çeliğin kullanımının yaygınlaşması 17. yüzyılda başlamıştır. Bessemer değiştirgecinin 19. Yüzyılda icat edilmesi ile birlikte çelik, pahalı olmayan seri üretim materyali olmaya başlamıştır. Üretim sürecinde ilave edilen oksijen; çelik üretim sürecinde üretim maliyetini düşürürken çeliğin kalitesini arttırmada önemli rol oynamaktadır [2].

Dünyada çelik üretiminin yaklaşık 1/3'ü çelik hurdasından; kalan 2/3'lük kısmı ise demir cevherinden BOF yöntemi ile elde edilmektedir. Türkiye'de çelik üretiminde hurda kullanımı, dünyadaki üretim oranlarına göre yüksektir [1].

Çelik; binalarda, alt yapı üretiminde, makinelerde, otomobillerde, gemilerde, aletlerde, aksesuarlarda ve silahlarda ana malzeme olarak kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda artan çelik talebi ihtiyacı ile yatırımlar yapılmakta ve fabrikaların

kapasiteleri arttırılmaktadır. Dünya çelik derneği (worldsteel) tarafından açıklanan verilere göre 2017 yılında dünyada ham çelik üretimi % 5.3 oranında artışla 1.69 milyar tona yükselmiştir [1].

### **2.1.1. Bazık Oksijen Fırını (BOF) İle Çelik Üretimi**

Çelik üretiminde modern anlamda ilk uygulamalar 1850'lerdeki Bessemer uygulamaları ile başlamıştır. Başlangıçta bu uygulamalarda kullanılan BOF'un iç kısımlarında silika refrakter tuğlalar kullanılmıştır. 1879'larda Thomas, fırın içerisini dolomitik tuğlalarla astarlayarak bazık cüruf oluşumunu sağlamıştır. 1970'li yıllarda BOF tabanından sıvı ham demire oksijen üflenmesi bu uygulamada önemli bir yenilik veya gelişme olarak tarihteki yerini almıştır [3].

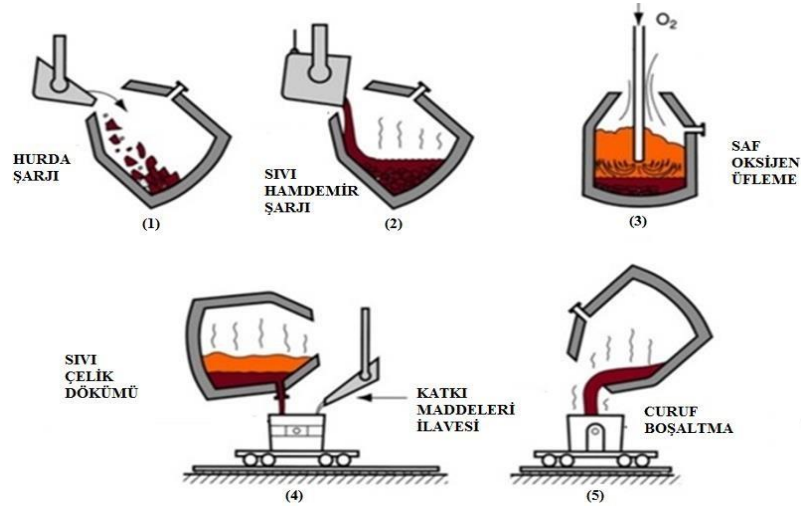
BOF ile çelik üretim işlemi; fırına şarj edilmiş sıcak sıvı ham demir ve beraberindeki hürdanın %99 saf oksijen kullanarak kısa sürede istenen karbon ve sıcaklıkta çelik hâline getirilmesi işlemidir. Çelik üretimi ayrı partiler hâlinde yapılır ve bunların her birine bir döküm denilmektedir [3].

BOF, yatay muylu ekseni etrafında dönebilen, üstü açık, içerisi refrakter tuğla ile örölü fiçı şeklinde bir kaptır (Şekil 2.1) [4].



Şekil 2.1. İçerisi refrakter tuğla ile örülmüş BOF a) BOF içerisine oksijen üfleme anı görüntüsü, b) BOF' un bakım için duruş anı görüntüsü.

Kardemir A.Ş Çelik üretim ünitesinde çelik üretim süreci; Yüksek fırınlarda üretimi gerçekleştirilen sıvı ham demirin torpidolarla sevkiyatı sağlanır. Torpido; içerisinde refrakter malzeme kaplı 300 ton sıvı ham demir kapasiteli lokomotifler vasıtasıyla ray üzerinde gidebilen sıvı ham demir sevkiyatı için gerekli ekipmandır. Çelik üretim ünitesine torpidolar aracılığıyla gelen sıvı ham demir torpido çukurlarındaki potalara dökülmektedir. Sıvı ham demir dolu potalar BOF'a şarj edilmek üzere tavan vinçleri yardımıyla kaldırılmaktadır. BOF ile çelik üretim sürecinin temel adımları, şematik olarak Şekil 2.2'de gösterilmiştir [5].



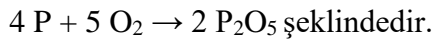
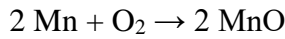
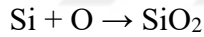
Şekil 2.2. BOF ile çelik üretim aşamalarının gösterimi [5].

BOF ile çelik üretimi prosesinde 1 ile belirtilen birinci aşamada çelik hurdası, 2 ile belirtilen ikinci aşamada ise torpidolardan alınan sıvı ham demir potalar vasıtasıyla BOF içerisine şarj edilir. 3. aşamada sıvı ham demirin içindeki karbon, kükürt (S), silisyum (Si), mangan (Mn) ve fosfor (P) gibi element değerleri fırın içerisine 15-20 dakika saf oksijen üflenerek ve kalsine kireç, dolomit, kok tozu gibi yardımcı malzemeler ilave edilerek istenen değerlere düşürülür. 4. aşamada sıvı çelik haline gelen ve içindeki karbon, kükürt, silisyum, fosfor değerleri istenen miktarlara düşürüldükten sonra yaklaşık olarak 1635 °C sıcaklıkta sıvı çelik olarak potalara alınması sağlanır. 5. ve son aşamada ise BOF, döküm pozisyonuna çevrilerek, içerisindeki cüruf boşaltılır [3].

Şekil 2.2’de gösterilen BOF ile çelik üretim prosesi; Sıvı ham demir içerisinde bulunan karbon oranını %1’in altına indirmek (genellikle %0,1’den düşük), kükürt ve fosfor oranlarının azaltmak veya kontrol etmek, hurda malzeme ilave ederek yaklaşık olarak 1635 °C’ye yükseltmektir. Kardemir A.Ş Çelik üretim ünitesindeki BOF’larda, yaklaşık olarak her 45 dakikada bir (zaman aralığı 30 ila 65 dakika arasındadır) 380 tona kadar üretim yapılabilmektedir [3]. Üretilecek çeliğin kalitesine göre BOF’ a şarj edilen sıvı ham demir, hurda ve curuf yapıcı katkı maddelerinin miktarını BOF kumanda odasında bilgisayar başında çalışan operatörler belirlemektedir. BOF içerisine saf oksijen üfleyen lansın yüksekliği ve üfleme zamanı bilgisayarla otomatik olarak kontrol edilmektedir. Normal üfleme

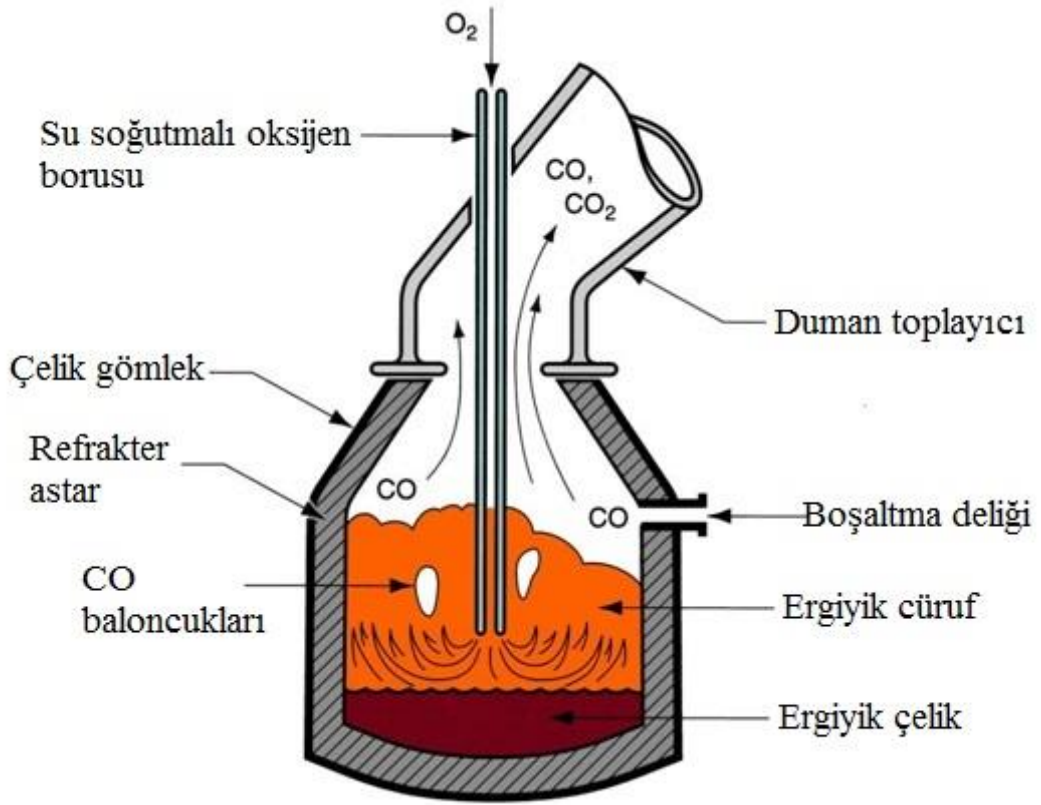
sonucunda üretilen çelik kalitesine göre çelik sıcaklığı düşükse veya çelikteki karbon oranı olması gerekenden fazla ise operatör kontrolü ile tekrar oksijen üfleme yapılır [2,3]. BOF sisteminde saf oksijen üfleme anı şematik olarak Şekil 2.3'de gösterilmiştir. Su soğutmalı lans borusunun hasarlanmaması ve BOF'da taşma olmaması için ergiyik çelik yüzeyinden yaklaşık 1.5 m yukarıdan saf oksijen üfleme şeklinde swichler yardımıyla bilgisayarlar tarafından otomatik olarak ayarlanmaktadır. Operatörün üfleme başlat butonuna basması ile saf oksijen lans borusundan 20 bar basınç ve 300 m<sup>3</sup>/h debi ile üflenmektedir. BOF içerisine saf oksijenin yüksek hızda üflenmesi sonucunda fırın içerisinde bulunan ergiyik sıvı ham demir ile hurda karışımının yüzeyinde yanma ve yüksek ısı oluşmaktadır. Oluşan yüksek ısı ve yanmadan dolayı fazla karbon sıvı çelikten uzaklaşır. Silisyum, mangan ve kükürt gibi safsızlıklar oksitlenir [5]. Aşağıda BOF içerisinde oluşan tepkimeler verilmiştir [5].

BOF'daki tepkimeler;



İlk tepkimede üretilen Karbonmonoksit (CO) ve karbondioksit (CO<sub>2</sub>); ID fanın emiş kuvveti ile BOF'un üst kısmında bulunan bacalar vasıtasıyla BOF'tan uzaklaştırılmaktadır. Diğer 3 tepkimenin ürünleri Silisyum dioksit (SiO<sub>2</sub>), Mangan (II) oksit (MnO), Difosfor pentaoksit (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) cüruf olarak ergiyik çeliğin üzerinde birikmektedir. Çelik üretim sürecinde cüruf yapıcı olarak kireç kullanılmaktadır. Kireç; kireç taşının kireç fabrikalarında yaklaşık 700 °C ısıtılması sonucu oluşmaktadır. Kireç safsızlıkların cürufta toplanmasını sağlayarak sıvı çelikte temizleyici işlevi görmektedir. Oksijen üfleme işlemi esnasında yanma sonucu demirdeki karbon içeriği zamanla doğrusal bir şekilde azalmaktadır. Demirdeki karbon içeriğinin azalması sıvı çelikte hedeflenen karbon seviyesinin oluşumunu kolaylaştırmaktadır [5].



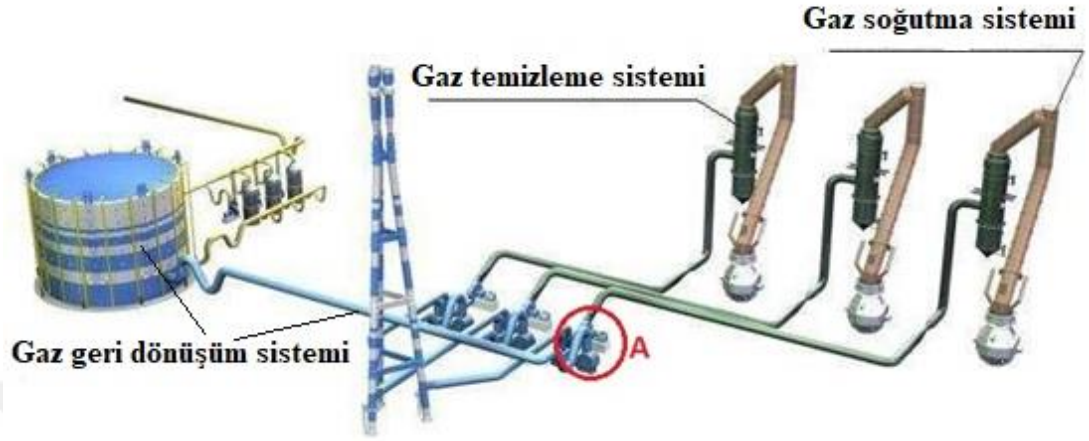


Şekil 2.3. BOF içerisine oksijen üflenmesi sonucu oluşan reaksiyonların görüntüsü [5].

### 2.1.2. BOF Gaz Soğutma, Yıkama ve Geri Kazanımı sistemi

Kardemir A.Ş. çelikhane ünitesinde BOF ile çelik üretim anında oluşan tozların toplanmasında iki farklı sistem kullanılmaktadır. Birincisi sekonder toz toplama sistemi; BOF içerisine sıvı ham demir ve hurda şarjı esnasında oluşan tozlar ile tepkimeler sonucu oluşan sıvı çeliğin potaya dökülmesi (deşarj) anında oluşan tozların emişini sağlamaktadır. Sekonder toz toplama sisteminde yer alan 2 adet endüstriyel fan; şarj vedeşarj esnasında oluşan tozun BOF'un şarj vedeşarj tarafında yer alan dikdörtgen kesit kanallar ile torbalı filtre sistemine emişini sağlamaktadır. İkinci toz toplama sistemi ise Şekil 2.4'te gösterilen primer toz toplama sistemidir. Primer toz toplama sistemi; saf oksijenin BOF içindeki sıvı ham demir, hurda ve alaşımlama elementlerine üflenmesi sonucunda oluşan reaksiyonlar nedeniyle açığa çıkan gazların ve tozların emilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda primer sistem BOF gazının soğutma-yıkama işlemini yerine getirmektedir. Enerji kapasitesi yüksek BOF gazının geri kazanıma gönderilmek amacıyla gazın depolanması için 30000 m<sup>3</sup>

kapasiteli gaz tankına ID fan ve borular vasıtasıyla sevk edilmektedir. Primer toz toplama işlemi gaz sevkiyatını da kapsamaktadır [6].



Şekil 2.4. Kardemir A.Ş çelik üretim tesisindeki BOF gaz soğutma, yıkama ve geri kazanımı sisteminin şematik gösterimi [6].

Bu çalışmanın konusu olan ve Şekil 2.4’de A ile gösterilen bölgede sistemin merkezinde çalışan, fırın ağzından emilen gazın soğutma ve temizleme işlemlerinden sonra depolama tankına gönderimini sağlayan ID fanlar, BOF’ a oksijen üflenmesi esnasında ortalama 1200 dev/dak hız ile dönmesi gerekmektedir. Aksi durumda sistemin oksijen üflenmesine müsaade edilmemekte dolayısıyla da sıvı çelik üretimi sağlıklı bir şekilde gerçekleşmemektedir [6].

BOF içindeki sıvı ham demir, hurda ve alaşımlama elementlerine saf oksijen üfleme işleme sonucu oluşan reaksiyonlar ile açığa çıkan zehirli gaz %70 oranında CO, %10 NO<sub>2</sub> , %10 SO<sub>2</sub> ve %10 oranında CO<sub>2</sub> içeren proses gazıdır. Proses gazı doğrudan BOF şebekesine bağlı olan gaz çıkış sistemi tarafından emilmekte ve BOF kenar halkasının üzerindeki gaz soğutma sistemine aktarılmaktadır. BOF üzerinde yer alan su soğutmalı bacanın alt davlumbaz girişine, üfleme prosesi sırasında BOF ağzı ile davlumbaz girişi arasındaki açıklığı kapatmak üzere 4 adet hidrolik silindir ile 1.5 m aşağı yukarı hareket edebilen ayarlanabilir eteklik monte edilir. Eteklik diye adlandırılan aşağı-yukarı hareket edebilen boru hatları Şekil 2.5’de B ile belirtilmiştir. BOF ile su soğutmalı bacanın alt kısmının yüksekliğinin ayarlanmasını

sağlayan eteklik, ortam havasının gaza erişimini sınırlandırmakta ve BOF gazının yanmasını %10'un altında tutmaktadır (yanma bastırılır) [6].



Şekil 2.5. BOF ağız ve alçaltılabilir eteklik görüntüsü [6].

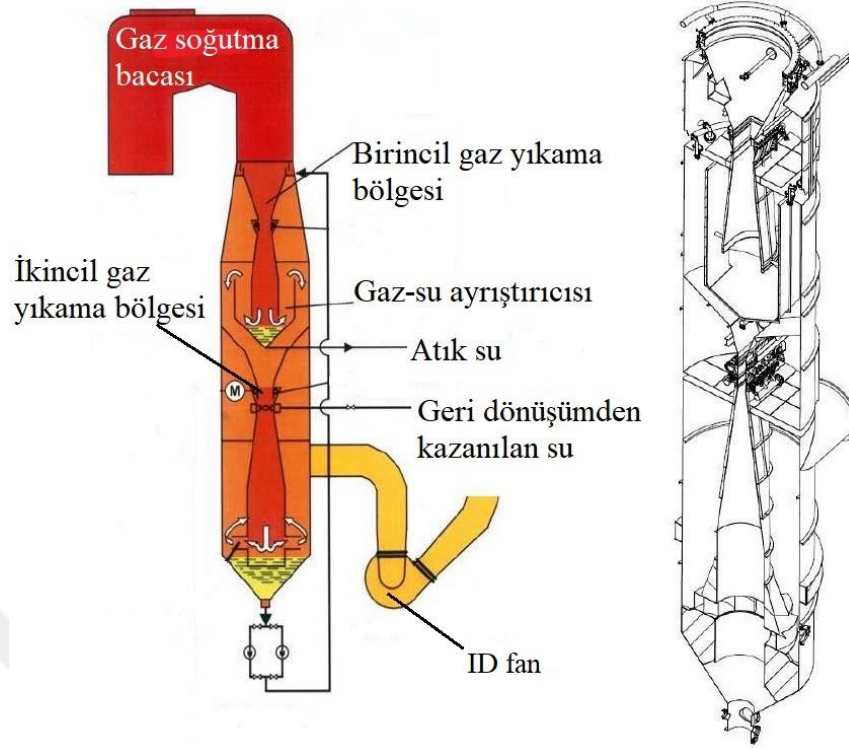
Eteklik, soğutma bacasının alt muhafazası ile BOF ağızı arasındaki boşluğu mümkün olan en yüksek oranda kapatmaktadır. Azaltılan hava girişi sayesinde, soğutma bacasında kontrollü yanma sağlanmakta ve atık gazın önemli bir kısmı geri kazanılmaktadır. Alt baca ve soğutma halkasıyla birlikte ayarlanabilir etek, CO gazlarının kaçmasını mümkün olan en yüksek oranda önlemektedir.

BOF ile sıvı çelik üretiminde saf oksijen üfleme esnasında oluşan gaz ve toz karışımının sıcaklığı 1400 °C civarındadır. Gaza kılavuzluk etme ve gaz yıkama sistemine kadar gazın sıcaklığını 1000 °C'ye düşürme görevi olan su soğutmalı baca 167 adet 1" borunun birbirine birleştirilmesiyle oluşmaktadır. Su soğutmalı bacada 950 m<sup>3</sup>/h debi ile kapalı sistemde dolaşan su sıcaklığı ortalama 80 °C'dir. Bacanın soğutma suyu beslemesi sürekli sağlanmaktadır. Soğutma suyu sıcaklığı 100 °C

üzerine çıkması durumunda borularda çatlamlar meydana gelebilmektedir. Ayarlanabilir etek ortalama 1650 °C sıcaklıktaki sıvı çeliğe çok yakın mesafede çalıştığından, oksijen üfleme prosesi esnasında su giriş çıkışları mutlaka takip ve kontrol edilmektedir. Suyla dolu soğutma borularının yeterli soğutmayı yapması için sistem devamlı su ile beslenmektedir.

BOF gazı soğutma, yıkama ve geri kazanımı; sisteminin ikinci aşaması olan gaz temizleme ünitesi, gaz soğutma sisteminden sonra gelmektedir ve yüksek verimlilikte çalışan iki aşamalı gaz yıkama kulesinden oluşmaktadır (Şekil 2.6). BOF gazı yıkama kulesi birinci yıkama aşamasında 800 °C' deki gazı söndürme suyuyla doğrudan temasla soğutulur. Mevcut gaz sıcaklığına bağlı olarak suyun bir kısmı, söndürücü (Quencher) boğazından gaz geçirilmesi esnasında buharlaşır [6].

Gaz yıkama kulesinde soğutulmuş doymuş gazlar kule iç kanallarına çarparak yavaşlamaktadır. Yer çekimi kuvveti vasıtası ile gazın içerisindeki büyük toz partikülleri ve su zerrecikleri aşağı yönelirken gaz fan emişi nedeniyle yukarı yönelmektedir. Ayrışmanın sağlandığı bu kısma su separatörü denilir. Su separatöründen ID fanın emiş gücüyle ayrılan birincil bölgede temizlenmiş gazlar, detaylı yıkama için gaz temizleme tesisinin ikinci aşamasına geçmektedir. Gaz, bu ikinci aşamaya yaklaştıkça boru kesiti daralır ve gaz yüksek hıza ulaşır. İkinci aşamadaki gazı hızlandırma ve yıkama işlemlerini yapmaya yarayan hidrolik tahrikli ve 6 adet yıkama pistonu içeren çelik konstrüksiyon kesitine venturi denir. İkincil temizleme sonrası su ve tozlardan temizlenen gazlar, ID fanın emiş gücü sayesinde ID fana doğru çekilmektedir [6].



Şekil 2.6. SMS Siemag Baumco yıkama kulesi genel ve kesit görünümü (tipik örnek).

ID fan, kapalı sistemde gazın emilmesi işlemi için gerekli negatif basıncın oluşturulması ve sistemdeki basınç kaybının giderilmesi için sisteme monte edilmiştir. Çelik üretiminde BOF içerisine saf oksijen üflenmesi esnasında oluşan BOF gazında CO gazı oranı %40'ın altında ise gaz toplama sistemine gönderilmemektedir. Bunun yerine, yakılarak atmosfere atılabilmesi için yakma bacasına yönlendirilmektedir. Kalorifik değeri yüksek olan CO gazı oranı %40'dan fazla ise geri kazanım tesisine yönlendirilmektedir [6].

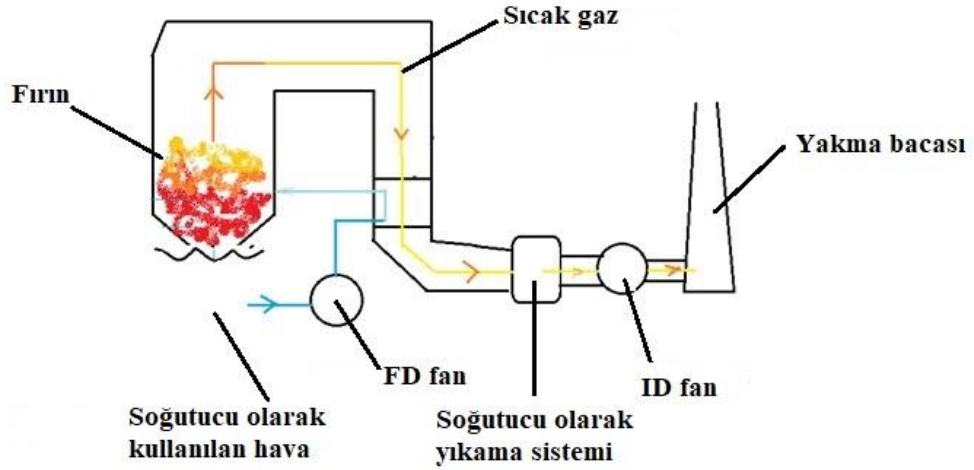
### 2.1.3. Emiş Gücü Yüksek Tip (Induced Draft, ID) Fan Sistemi

Genel olarak fanlar ve blowerlar; hava, azot ve duman gibi gazları belirli bir ortamdan alarak (emerek) kapalı ya da açık bir ortama basılmasını sağlayan yüksek debili ve düşük basınçlı makinelerdir. Sistemlerde genellikle 0.1 bardan düşük basınçta basma yapan makine fan; 0.1–1.0 bar basınçta basma yapabilen makine ise Blower olarak adlandırılmaktadır [7]. Genel olarak fanlar, aksiyal ve santrifüj fan olarak iki sınıfa ayrılır [7]. Aksiyal (Eksenel) fanlar: Gaz rotor (döndürme şaftı)

eksenine paralel ivmelenirler. Santrifüj (Radyal) fanlarda ise gaz, kanat eğrisi üstünde ivmelenir. Tavan ve masa tipi vantilatörler ile soğutma kulelerinde, ısıtma/soğutma ve havalandırma sistemlerinde kullanılan fanlar aksiyal fan grubundandır. Çalışma anında aksiyal fanın kanatları, durgun havaya kuvvet uygulamakta. Ancak, durgun havanın direnç göstermesi nedeniyle moleküller sıkışır ve havanın hacmi azalır. Hacmin azalmasıyla basınç artmaktadır. Aksiyal fanlarda hava basma (üfleme) yönünün tersine, kanatlarda, tepki kuvveti oluşur. Fan ne kadar yüksek devirde çalışırsa o kadar fazla hava aktarır. Aksiyal fanların kanat açıları değiştirilerek debi ayarı yapılabilir. Özellikle ulaşılması zor, yüksek yerlerde bulunan fanlarda kanat ayarları hidrolik sistemle veya el ile yapılmaktadır [7].

Santrifüj fanlar; Santrifüj pompa ve kompresörlere benzetmek mümkündür. Ancak, çıkış (basma) basıncı yaklaşık 0.1 bar'dan düşük olup 300-2950 dev/dak'da çalışırlar. Santrifüj fanlarda gaz, shaft eksenine paralel çark merkezinden içeri girer ve kanatların profiline (eğriliğine) uygun olarak yol alıp çarkın yerleştirildiği gövde içine geçer. Burada basıncı yükselen gaz, fanı çıkış manifoldundan terk eder (Salyangoz-gövde-içinde santrifüj enerji yükselir). Gaz girişine bir davlumbaz takılması gaz giriş hızını, çıkış ağzına da bir difüzör konulması gaz çıkış hızını artırmaktadır. Santrifüj fanlar kaynaklı birleştirme ile sac malzemelerden imal edilir. Malzemelerin seçiminde, basılacak gazın etkisi, korozyon, nem, çevre koşulları, toz, kirlilik vb. esas alınmaktadır [7]. Santrifüj fanlar endüstride iki tip olarak kullanılmaktadır. İtme gücü yüksek olan, basma üflemlerli (Forced Draft) FD fanlar ve emme gücü yüksek olan, emme üflemlerli (Induced Draft) ID fanlar [7].

Kardemir A.Ş çelik üretim ünitesindeki BOF ile çelik üretiminde kullanılan fan emme üflemlerli Santrifüj fanıdır (ID Fan). Şekil 2.7'de şematik olarak endüstride kullanılan santrifüj fanları (ID fan ve FD fan) bir sistem içerisinde gösterilmiştir. FD fan atmosfer basıncını fırın içine basılmasını sağlarken ID fan fırın içerisindeki ısı-gaz emilimini sağlayarak bacadan atılmasını veya uygun koşullar sağlandığında gaz depolama sistemine sevkiyatını sağlamaktadır [8].



Şekil 2.7. Endüstride hava-gaz-ısı sevkiyatında kullanılan ID ve FD fanların örnek kullanım yerlerinin şematik olarak gösterimi [8].

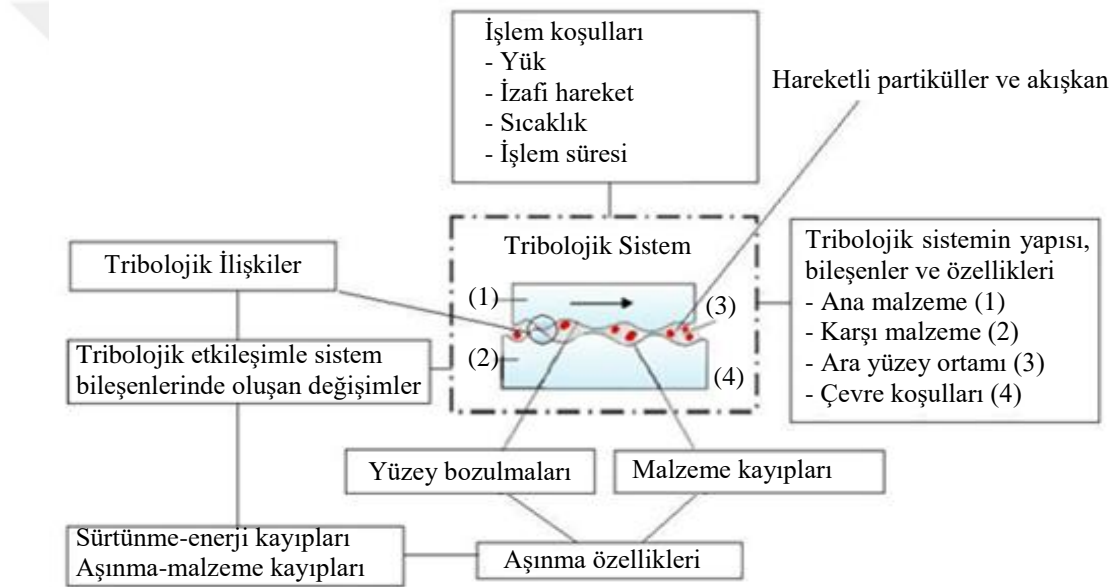
## 2.2. AŞINMA

Aşınma, birbiri ile temas eden yüzeylerin mekanik etkileri sebebiyle ya da herhangi bir yüzeye katı, sıvı veya gaz maruziyeti neticesinde malzeme kaybının meydana gelme olayına denilmektedir [9]. Aşınma istenilmeyen bir durumdur, tedbir veya tedbirler alınmadığı takdirde sistem içerisinde çok ciddi problemlere yol açabilmektedir. Aşınma, ekipman ömürlerini azaltmakta ve maliyetlerin artmasına neden olmaktadır. DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarında aşınmanın tanımı: “kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılmasıyla meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması” şeklindedir [9, 10]. Aşınma tanımlanırken katı cisim yüzey bölgesinden tribolojik bir zorlanmanın sonucu olarak sürekli ilerleyen malzeme kaybı ifadesi kullanılmaktadır [10]. İfadeden de anlaşıldığı üzere aşınma ile ilgili en önemli husus sürekliliktir.

### 2.2.1. Aşınma Sisteminde Temel Parametreler

Sistem içerisinde aşınma oluşması için bir takım parametrelerin olması gerekmektedir. Bu parametreler; aşınan malzeme (ana malzeme), aşındıran malzeme, ara malzeme, hareket, yük ve ortamdır. Ortam; katı, sıvı veya gaz olabilir. Aşınan ve

aşındırıcı malzemelerin bir araya gelmesiyle “aşınma çifti” oluşur. Aşınma çifti ile birlikte sert parçacıklı sıvı, gaz ve buhar ara malzemelerinin oluşturduğu sisteme de “aşınma kombinasyonu” denilmektedir. Aşınma sonucu ortaya çıkan parçacıklar da ara malzemelerle beraber aşınmaya etki yaparlar. Şekil 2.8’de tribolojik bir sistemin DIN 50320 standardına göre şematik gösterimi verilmiştir. Aşınan ve aşındırıcı malzemelerin kimyasal bileşimleri ve yapıları, yüzey sertlikleri, yüzey pürüzlülükleri ve boyutları aşınmayı etkileyen önemli faktörlerdir. Ayrıca ortamın (sıvı veya gaz) sıcaklığı, nemi, asidik veya bazik oluşu da aşınmayı etkileyen faktörlerdir. Basınç, hız vb. gibi çalışma parametreleri de aşınmayı etkileyen unsurlardır [11].



Şekil 2.8. Bir tribolojik sistemin DIN 50320 standardına göre şematik gösterimi [12].

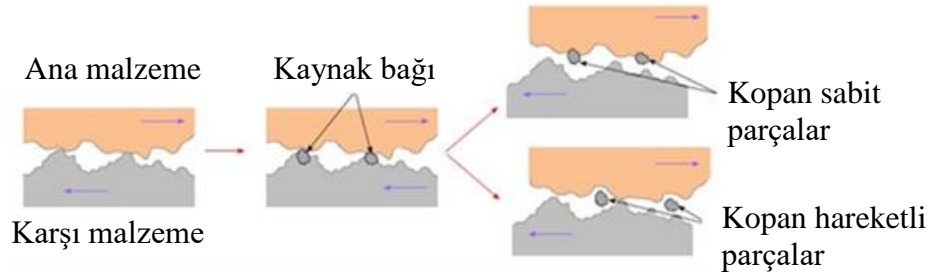
### 2.2.2. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma mekanizmaları; abrazyif aşınma, adhezif aşınma, erozif aşınma, korozif aşınma ve yorulma aşınmasıdır [13].



### 2.2.2.1. Adhezif Aşınma

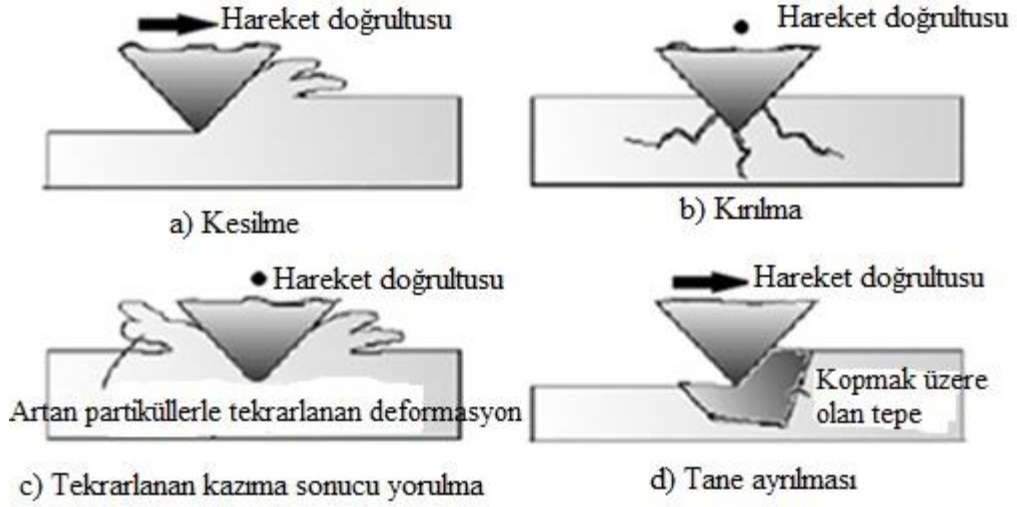
Adhezif aşınma, birbiriyle kayma sürtünmesi yapan, metal-metal aşınma çiftinde meydana gelen aşınmadır. Şekil 2.9’de adhezif aşınma şematik gösterimi verilmiştir. Birbiriyle temas halinde olan ve aralarında herhangi bir yağlayıcı olmayan benzer iki metalik yüzey arasında adhezyon kuvveti denilen bir çekim kuvveti bulunmaktadır. Bu kuvvetin oluşabilmesi için malzemelerin birbiri ile temasta olmaları gerekir. Temas halindeki iki metal, yüzey pürüzlülükleri nedeniyle birbiriyle etkileşirler. Malzeme ağırlığı veya bir dış kuvvetin etkisiyle pürüzlülükler çok küçük olsa dahi yüzeye gelen basınç veya gerilme miktarı çok büyük olabilmektedir. Bu kuvveti taşıyamayan pürüzler plastik deformasyona uğrarlar. Eğer malzemenin deforme olma kabiliyeti yüksek ise mikro adhezyon alanları çabucak temas yüzeyine yayılır. Bazen de bu aşınma türünde yüzeyde bulunan sıvı veya gaz molekülleri, oksit tabakaları parçalanır ve bu parçacıklar abrazif aşınmaya da neden olurlar. Adhezif aşınmaya maruz kalan parçalar genellikle çelik hadde merdaneleri, yağlanmamış rulmanlar, makas bıçakları, silindir iç yüzeyleri gibi parçalardır [13].



Şekil 2.9. Adhezif aşınma şematik gösterimi [13].

### 2.2.2.2. Abrazif Aşınma

Birbirine zıt yönde belirli bir hızda hareket eden iki malzemenin daha sert olanının üzerinde yer alan çıkıntılar nedeniyle sert malzemenin diğer malzeme üzerinden parça kopardığı aşınma türüdür. Bazı durumlarda yüzeyler arasında yer alan sert parçacıklar da benzer aşınmayı oluşturmaktadır. Şekil 2.10’da abrazif aşınma mekanizmaları şematik olarak belirtilmiştir [14].



Şekil 2.10. Abrazif aşınma mekanizmaları genel görüntüleri [14].

Yüzeyler arasında bulunan sert parçacıklar sisteme dışarıdan gelebileceği gibi adhezif aşınma neticesinde sistem içinden de oluşabilmektedir. Aşınma sonucu kopan parçalar aşınma sistemine dahil olurlar. Abrazif aşınmaya neden olan temel etkenler sertlik değeri, aşındırıcı türü, tane geometrisi ve boyutu, yüzey pürüzlülüğünün şekli ve boyutu, uygulanan yük ve hareket hızı şeklindedir [15]

Sürtünen yüzeylerden daha sert olanının yüzeyinde yer alan çıkıntıların veya yüzeylerden birisine gömülmüş sert parçacıkların diğer yüzeyi kazımasına gövdeli abrazif aşınma denir [15]. Gövdeli abrazif aşınma iki gövdeli ve üç gövdeli olmak üzere 2 tiptir [16].

Üç gövdeli abrazif aşınmada sert parçacıklar yüzeyler arasında yuvarlanarak ya da kayarak serbestçe hareket ederken iki gövdeli abrazif aşınmada iki yüzey arasında kalmış sert çıkıntılar ya da gömülmüş sert parçacıklar hareket edemez. Şekil 2.11’de iki ve üç gövdeli abrazif aşınma şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 2.11. Abrazif aşınma türleri görüntüsü [17].

Üç gövdeli aşınmada oluşan aşınma miktarı iki gövdeli aşınmaya göre daha azdır [16]. Suchánek ve diğer araştırmacıların yapmış olduğu çalışmalarda; serbest abrazif parçacıkların katı yüzeyleri arasında oldukları zamanın %10'unda aşınmaya neden olurken % 90'ında yuvarlanarak hareket ettiği ve bu nedenle üç gövdeli abrazif aşınmada iki gövdeli abrazif aşınmaya göre malzeme ayrılmasının boyut olarak daha az olduğu belirtilmiştir [18]. İki gövdeli abrazif aşınmaya örnek olarak kesme, öğütme ve talaşlı imalat işlemleri gösterilebilirken üç gövdeli abrazif aşınmaya örnek abrazif alıştırma ile parlatma işlemleri gösterilir [11].

### 2.2.2.3. Eroziyon Aşınma

Eroziyon aşınma, bir cismin yüzeyine katı veya sıvı parçacıkların çarpması sonucu oluşur. Eroziyon aşınma birçok makinede görülür. Yaygın örnek olarak toz bulutundan geçen bir uçağın pervanelerindeki hasar veya mineral çamurları işleme sistemlerindeki pompa pervanelerindeki aşınma gösterilebilir. Diğer aşınma şekillerinde de olduğu gibi, mekanik dayanım aşınma direncini garantilemez. Bu nedenle, aşınmayı minimize etmek için detaylı bir malzeme karakteristiği çalışması gereklidir [19]. Eroziyon aşınma türü 5 grupta incelenmektedir; Katı partikül erozyonu, sıvı (su) damlası erozyonu, katı partikül taşıyan akışkan ortam (sulu çamur) erozyonu, kavitasyon erozyonu ve elektro erozyondur. Katı partikül erozyonu; sıvı ya da gaz akışkan içerisinde belirli bir hızda akan aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine sürekli çarpması sonucu yüzeyde oluşturduğu malzeme kaybıdır. Bu tür aşınmayı oluşturan etkenler katı partikül akışı, partikül özellikleri ve aşınan malzeme özellikleridir. Katı partikül akışında hız, çarpma açısı ve akışkan konsantrasyonu en

önemli nedenlerdir. Katı partikül erozyonu olumsuz bir durumdur ancak kumlama işlemi ve su jeti ile kesme işlemleri için imalat sanayisinde kullanılabilir. Kumlama işlemi herhangi bir yüzey üzerindeki istenmeyen katmanların (boya, pas vs.) temizlenmesi nedeniyle kullanılırken, su jeti işlemi ise yüksek basınç ve hızdaki suyun içine aşındırıcı katılarak kontrollü olarak kullanılmaktadır [19].

Sıvı damlası erozyonu; yüksek hızla hareket eden bir katı cismin kendisinden daha düşük hıza sahip sıvı damllarına çarpması sonucunda meydana gelir. Bu aşınma erozyonu türü; yağmur erozyonu, su damlası erozyonu ve nem erozyonu olarak da bilinir. Aşınmaya neden olan yağış süresince aşınma erozyonunun azaltılması için; katı hareketinin engellenmesi, damlların parçalanarak yüzeye çarpmasının önlenmesi ve dayanıklı malzeme kullanılması gerekmektedir [20].

Katı partikül taşıyan akışkan ortam erozyonu; bir sıvı ya da gaz içerisinde taşınan katı partiküllerin taşınma sırasında hedef malzemenin iç yüzeyine çarpması nedeniyle oluşan aşınmadır. Endüstride boru hatları, pompalar ve fanlarda sık oluşan bir aşınma türüdür. Katı partikül aşınmasında önemli etkenler; taşınan malzemenin partikül sertliği, ortamdaki katı konsantrasyonu, partikül ebatı, akışkanın içindeki partikülün hızı ve çarpma açısıdır. Partikülün yoğunluğu, geometrisi ve sıvı ortamdaki oksijen içeriği de aşınmayı etkileyen parametrelerdir. Partikül sertliği aşınma nedeniyle oluşan malzeme kaybını artırır. Yoğunluğu fazla olan malzemelerde ise deformasyon ve kesme aşınması boyutu daha fazla olmaktadır. Bu tür aşınmaları azaltmak için malzeme seçilirken taşınan malzemedan daha sert bir yüzeye sahip malzeme seçilmesi, akışkan hızının gereğinden yüksek seçilmemesi, taşınan katı konsantrasyonunun yüksek seçilmemesi ve sistemde kullanılan boruların belirli aralıklarla döndürülmesi gibi çözümlerle ekipman ömrü uzatılabilir [20].

Kavitasyon erozyonu; sıvı ortam içerisinde çalışan ekipmanlarda ani basınç değişimi nedeniyle titreşimler oluşmaktadır. Bu titreşimler sonucu oluşan yüksek frekanslı ses dalgaları ekipman yüzeyinin basınçlı bölgelerinde anlık olarak çok sayıda kabarcığın oluşturmaktadır. Bu kabarcıkların düşük basınçlı bölgeden yüksek basınçlı bölgelere doğru hareket etmesi sonucunda kabarcıkların patlaması gerçekleşmektedir. Bu patlamalar sonucunda ekipman yüzeyinden çok küçük parçacıkların kopmasına

kavitasyon denilmektedir. Kavitasyona karşı dayanımlı olacak herhangi bir malzeme yoktur ancak kobalt esaslı malzemelerin dayanımı bu tür aşınmaların etkisini azaltmaktadır. Bu tür bir aşınma sonucunda, ekipman üzerindeki zayıf alanların kaplanması, aşınabilecek alanların kolay değişime uygun tasarlanması gerekmektedir [20].

Elektro erozyon; bu aşınma türü vakum altında ya da iletken olmayan bir sıvı içerisinde oluşmaktadır. Elektro erozyon, katot ve anot arasında meydana gelen akım neticesinde katot malzemenin yüzeyinden çok küçük taneli parçacıkların kopmasıyla oluşur. Bu aşınma türünden imalat sektöründe çok fazla yararlanılmaktadır. Çeşitli üretim yöntemleriyle birlikte elektro erozyon aşınmasıyla, elektriği ileten bütün malzemelerin işlenmesi mümkündür [20]

#### **2.2.2.4. Koroziyon Aşınma**

Metalik malzemelerin kimyasal bileşimlerinde yer alan alaşım elementlerinin türlerine ve miktarlarına göre yüzeylerinde doğal bir oksit tabakası bulunur. Bu tabaka koroziyon etkiye karşı dayanım kazandırır. Mekanik sürtünmeler ya da darbeler sonucunda bu tabaka ortadan kalkabilir ve hasarlanan tabaka tekrar oluşmaz. Bu şekilde malzeme yüzeyinin dayanıksız hale gelmesi sonucunda yüzeyde meydana gelen kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyonlar ile yaşanan malzeme kaybına koroziyon aşınma denir. Malzeme yüzeyinde oluşan reaksiyonlar adheziyon aşınmanın önlenmesi için fayda olabilir ancak kontrolsüz bir şekilde olduğunda malzeme kayıpları oluşmaktadır. Çalışma ortamı durumuna göre düşük ve yüksek sıcaklık korozyonları olabilir. Yüksek sıcaklık korozyonları kimya, maden, enerji arıtma vs. gibi çok farklı sanayilerde karşılaşılan bir sorun iken düşük sıcaklık korozyonuna havacılık ve gemi sanayisinde meydana gelebilmektedir [20].

#### **2.2.2.5. Yorulma Aşınması**

Yorulma aşınması; çok sayıda tekrarlanan yüklerin neden olduğu titreşimler sonucunda oluşmaktadır. Bu yük tekrarları malzemenin yüzey altında oluşan çatlakların yüzeye doğru hareket etmelerine neden olmaktadır. Bunun sonucunda da

yüzeyden malzeme kopması meydana gelir. Yağlama yetersizliğinin neden olduğu aşınmalardan farklı olarak iyi yapılan yağlamalarda bile görülebilir. Karıncalanma, oyuklanma, yüzey ayrılması, darbe aşınması ve brinelling gibi çeşitleri vardır [20].



## BÖLÜM 3

### LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, deneysel çalışmaya yön vermek ve aşınma problemlerinin doğru tespit yapılabilmesi için literatürde yapılan aşınma ve aşınmaya karşı alınan önlemler üzerine yapılan çalışmaların değerlendirilmesi yapılmıştır.

Shipway ve Hutchings yapmış oldukları çalışmada, erozif aşınmayı katı partiküllerin bir yüzeye çarparak o yüzey üzerinden malzeme kaldırması olarak tanımlamışlardır. Yapmış oldukları çalışmalarında; aşındırıcı malzeme olarak silisyum, silika, alüminyum ve silisyum karbür, ana malzeme olarak ise, gevrek yapıya sahip soda-kireç camı, borosilikat camı, silikadan elde edilmiş cam, kısmi dengelileştirilmiş zirkonya, alümina, silisyum karbür ve bor karbür kullanmışlardır. Her bir aşındırıcı malzeme ile tüm ana malzemelere aşındırma işlemi uygulanmış ve deneyler hava üflemleri bir tesisat ile gerçekleştirilmiştir. Katı partiküllerin hareket hızı 60 m/s ve numune yüzeyine çarpma açıları normal çarpma açısı 90° olarak seçilmiştir. Deneyler sonunda aşınma oranının; ana malzemenin aşındırıcı özelliklerine ve aşındırıcının çarpma koşullarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Aşındırıcının sertlik değeri hedef malzemenin sertlik değerinden fazla ise genelde aşınma fazla ve girinti kaynaklı kırık mekanizması şeklinde fakat aşındırıcı hedef malzemedan daha az sert ise aşınmanın daha az ve küçük ölçekli çentikli aşınma mekanizması şeklinde olduğunu gözlemlemişlerdir [21].

Çakır, çift katmanlı kaplanan inconel 625 alaşımının aşınma direncinin araştırılması isimli çalışmasında, Ni bazlı alaşımlardan olan inconel 625 alaşımına farklı sıcaklık ve sürelerde borlamanın ardından termo reaktif difüzyon işlemi (TRD) uygulanarak çift katmanlı olarak kaplamıştır. Kaplama işlemlerinin ardından geleneksel X ışını kırınım yöntemi (XRD) analizleri sonucunda numunelerde TiB<sub>2</sub>, CrB, NiB, MoB<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>B<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>B fazları ve Co<sub>23</sub>B<sub>6</sub> çökeltisi tespit etmiştir. Çalışmasının sonucunda çift

katmanlı kaplanan tüm numuneler yüzeyi kaplanmayan Inconel 625 alaşımına göre daha iyi aşınma direnci gösterdiğini, kaplama tabakalarındaki sertlik artışının aşınma direncini arttırdığını belirtmiştir. Aşınma mekanizması olarak tüm malzemelerde karışık tip olarak adlandırılan oyuklanma ve yuvarlanma aşınma mekanizmalarının bir arada olduğu aşınma tipi meydana geldiğini ancak sertlik artışı ile oyuklanma tipi aşınmadan yuvarlanma tipi aşınmaya doğru bir geçiş eğilimi olduğunu tespit etmiştir. Ni esaslı süper alaşımlar korozyon ve oksidasyona karşı dirençleri ile ön plana çıktığını, bundan dolayı bu alaşımların yüksek sıcaklık ve korozitif ortam koşullarında sıklıkla tercih edildiğini, Ni-bazlı süper alaşımların uygulama alanlarının başında petrol endüstrisi, kimya endüstrisi ve türbin yapımı geldiğini, ancak nikel esaslı süper alaşımların aşınma dirençlerinin tatmin edici olmadığından bu alaşımlar abrasif veya adhesif aşınma şartlarında kullanılacak ise uygun bir aşınma önleyiciye ihtiyaç olduğunu belirtmiştir [22].

Wheeler ve Wood çalışmalarında, tungsten ve silisyum karbür altlık üzerine kimyasal buharla biriktirme (CVD) yöntemi ile 10-47  $\mu\text{m}$ 'lik elmas kaplamalar uygulanmış hazneli tip sulu çamur ve yüksek hızlı hava üflemleri olmak üzere iki farklı erozif aşınma deney düzeneği kullanarak katı partikül erozyonu deneylerine tabi tutmuşlardır. Aşındırıcı olarak silisyum kumu kullanılmış ve çarpma açısı olarak normal çarpma açısı ( $90^\circ$ ) seçilmiştir. Sulu çamur düzeneğinde, ortalama partikül çapı 135  $\mu\text{m}$  ile çarpma hızı 16 m/s ve ortalama partikül çapı 235  $\mu\text{m}$  ile çarpma hızı 28 m/s değerleri seçilmiştir. Hava üflemleri düzenekte ise ortalama partikül çapı 194  $\mu\text{m}$  olan silisyum kumu, sırası ile 63, 148 ve 268 m/s partikül çarpma hızı değerlerinde seçilmiştir. Elde edilen erozif aşınma oranları sinterlenmiş tungsten karbür ve paslanmaz çelik ile karşılaştırılmıştır. Deneyler sırasında kaplamanın maruz kaldığı aşınma mekanizmalarını belirlemek için deney öncesi ve sonrasında numunelerin yüzeyleri taramalı elektron mikroskopunda görüntülenmiştir. 268 m/s'de gerçekleştirilen deneylerde kaplamaların aşınma sürelerinin 5 dakikadan 185 dakikaya kadar arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, 268 m/s partikül çarpma hızı değerinde, 46  $\mu\text{m}$  CVD elmas kaplamalı tungstendeki erozif aşınma direncinin sinterlenmiş tungsten karbürün aşınma direncinden yaklaşık altı kat kadar fazla olduğu görülmüştür. Ayrıca CVD yöntemi ile elde edilmiş 15  $\mu\text{m}$  kalınlığındaki elmas filminin kaplamasız SiC Hexoloy SA malzeme kalitesine göre aşınma



direncinde önemli bir artış gösterdiği ve CVD elmas kaplamalı SiC'nin çok taneli elmasa (PCD) göre 200 kat erozif aşınma direnci gösterdiğini belirtmişlerdir [23].

Selçuk, toprak işleme tarım makinelerinde kullanılan 5630 kalite çeliğinin aşınma direncinin değişik yüzey prosesleri ile iyileştirilmesi isimli çalışmasında, toprak işleme aletlerinde kullanılan 5630 kalite çeliğinden yapılmış pulluk uç demiri üzerindeki aşınma mekanizmalarının incelenmesi ve iyileştirilmesi üzerinde araştırma yapmıştır. 5630 kalite çelikler içerisinde bor bulunan sıcak haddelemeye tabi tutulmuş yassı çeliklerdir. Tarım aletlerinde kullanılan kesici uçların aşınma direnci yüksek olması istenilmektedir. Araştırmacı, 5630 kalite çelikten yapılan pulluk uçlarının aşınmasını azaltmak için çelik yüzeyini ark kaynağı yöntemi kullanılarak sert dolgu kaynağı yaptırmış ve ayrıca aynı ana malzeme yüzeyine sıvı nitrürleme banyosunda nitrürleme işlemi gerçekleştirmiştir. Bu iki yöntemle, malzemelerin yüzeyleri sert kaplama yapılarak çalıştığı ortamda aşınma direnci ve tokluğunda iyileştirme amaçlanmıştır. Dolgu kaynağı ve sıvı nitrürleme yöntemi uygulanan 5630 kalite çeliklerine aşınma deneyi uygulanarak ana malzemeye göre aşınma dirençlerini karşılaştırmıştır. Araştırmacı, deney numunelerini taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskopta mikro yapılarını incelemiştir. Mikro yapıları ile birlikte numunelerin farklı bölgelerinden alınan mikro sertlikleri ile sertlik değişim grafiklerini oluşturmuş, çentik darbe deneyi ile malzemenin sünek veya gevrek yapıları gözlenerek darbe dirençlerini ölçülmüştür. SEM mikroskobundan alınan görüntülerin analizlerini incelediğinde, 5630 kalite çelik dolgu kaynak yöntemi ile yapılan sert tabakalı yüzey oluşturmada maliyetin düşük olduğunu, aşınma direncinde %50 oranında artış sağlanırken ark kaynağı ile oluşturulan sert kabuk "citomangan sert dolgu elektrotunda" sünekliğin azaldığını gevrek kırılmaya eğilimli bir özellik gösterdiği sonucuna varmıştır. Fakat "EIS-410 NiMo" dolgu elektrotu ile oluşturulan sert kabuğun süneklik özelliği gösterdiğini belirtmiştir. Nitrürleme işlemi, dolgu kaynak yöntemine göre yüksek maliyette olmasına rağmen temperlemenin de etkili olduğu bu işlemde tokluk yönünden daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Ancak nitrürleme işleminde oluşan tabakanın diğer sert kabuklara göre daha ince olması abrasif aşınmaya karşı daha kısa süreli direnç gösterdiğini belirtmiştir [24].

Owsalou, aşınmaya maruz parçaların aşınma dayanımlarının araştırılması çalışmasında, aşınmaya maruz kalan parçaların zaman içerisinde makinenin tahrip olmasına sebep olabileceğini belirtmiştir. Endüstriyel üretim alanında, makine parçalarının teknik hasarlarının %11'i aşınma nedeni ile ortaya çıkmaktadır. Ekonomik açıdan bu orana bakıldığında büyük maliyete neden olmaktadır. Owsalou çalışmasında, aşınmanın farklı türleri için farklı araştırmalar yapılmakta olduğunu, triboloji teorilerine ve aşınma mekanizmalarına dayanlı olan aşınmayı önlemek ve azaltmak için farklı yöntemler kullanıldığını ve yerinde tamir bakım kaynağı bu yöntemlerden bir tanesi olduğunu belirtmiştir. Tamir bakım kaynağı yöntemi, mevcut yüzeyin mevcut ana malzemedan aşınma direnci daha iyi olması nedeni ile endüstriyel işletmelerde çok kullanılan bir metottur. Owsalou, çimento üretim fabrikalarında çimento üretim sırasında öğütücü plakalar sürekli abrasif aşınmaya maruz kaldığını ve bu nedenle de deneysel çalışmasını çimento ara hammaddesi olan Farin ve ondan elde edilmiş Klinker tozu aşındırıcı olarak kullanarak 5 farklı sert dolgu kaynağı ile hazırlanmış numunelerin üzerinde abrasif aşınma deneyi yapmıştır. Aşınma testlerinin sonuçlarını inceleyip değerlendirdikten sonra mikro yapı resimlerini desteklemek için XRD testi yapmıştır. XRD analizi sonucunda, Fazer 65 (kompleks karbürü) sert dolgu kaynağının iç yapısında MC karpitleri ve M7C3'den oluşan fazlar nedeni ile en yüksek sertlik ve ona doğru orantılı olarak artan aşınma direncine sahip olduğunu saptamıştır. Ayrıca içyapı matrislerinde Cr ve Mo ve W alaşımlarını oluşturan karpit fazlarının aşınma direncinin artmasında etkili olduklarını tespit etmiştir [25].

Erdem, AISI 1060 çeliğinin erozif aşınma özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesini araştırmıştır. Aşınmanın tanımını birçok mühendislik malzemesinde görülen istenmeyen bir malzeme kaybı olarak yapmıştır. ASTM G40-02 standardına göre aşınma: katı bir yüzeyde, yüzey ile temas eden parça veya parçacıklar arasındaki bağıl harekete bağlı olarak oluşan, genellikle sürekli malzeme kaybı içeren hasardır tanımlamalarını yapmıştır. Aşınma temel olarak abrazif, erozif, adhezif ve yorulma aşınması olarak dört ana kategoriye ayrılabilir. Erdem çalışmasında, erozif aşınma, katı bir yüzeye parçacıkların tekrarlı çarpması sonucu yüzeyden malzeme kaybı şeklinde görülen bir aşınma türü olduğunu ve daha çok uçak motorları, mineral çamurları işleme sistemleri, buhar kazanları, sondaj cihazları

gibi çeşitli parçalarda görüldüğünü belirtmiştir. Eroziyon aşınma, parçacık türü, açısı, hızı, boyutu, malzeme sertliği, tokluğu gibi birçok parametreye bağlıdır. Malzemeler eroziyon aşınma davranışlarına bağlı olarak sünek veya kırılabilir karakter gösterirler. Sünek malzemeler daha çok 30° gibi eğik açılarda aşınırken, kırılabilir malzemeler 90° gibi dik açılarda aşınırlar. Metaller ve seramiklerin eroziyon aşınma dirençlerindeki en temel fark aşınma açılarıdır. Çeliklerin eroziyon aşınma davranışı ile ilgili çalışmalar, sünek bir çeliğin aşınmaya daha çok dayanıklı olduğunu önerir. Çeliklerin aşınma direncini arttırmak için çeşitli yöntemler uygulanır. Bunları temel olarak yüzey sertleştirme ve ısıtma işlemi ile tüm yapıyı sertleştirmedir. Araştırmacı, Erdemir A.Ş. tarafından üretilen yüksek karbonlu, alaşımsız AISI 1060 çeliği, orijinal ve ısıtma işlemleriyle geliştirilmiş haliyle kum püskürtme metodu ile eroziyon aşınma deneylerine tabi tutmuştur. Elde ettiği sonuçları kıyaslama yapabilmek amacıyla ticari aşınma plakaları olarak piyasada bulunan Hardox 400 ve Hardox 500 çelikleri de eroziyon aşınma deneylerine tabi tutmuştur. Yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucunda elde etmiş olduğu verilere göre, 90° dik çarpma açısında, yumuşatılmış AISI 1060 çeliğinin en yüksek eroziyon aşınma direnci gösterdiği, 30° eğik çarpma durumunda ise Hardox 500 çeliğinin onu da takiben sertleştirilmiş AISI 1060 çeliğinin en yüksek direnci gösterdiğini tespit etmiştir. Elde edilen bu veriler, dik çarpma durumunda sünek malzemelerin daha yüksek direnç, eğik çarpma durumunda ise sert malzemelerin daha yüksek direnç göstereceği sonucuna varmıştır [26].

Çakan, AISI 304 paslanmaz çeliğinin mikro yapı ve aşınma davranışının incelenmesi isimli çalışmada, AISI 304 paslanmaz çeliğin mikro yapısı, çeliği oluşturan elementler ve miktarları ile mekanik özellikleri ve aşınma davranışını araştırmıştır. Deneysel çalışma için hazırlanmış numunelere optik mikroskopta içyapı incelemesi, mikro sertlik, Charpy V-çentik darbe ve pim-disk aşınma testleri yapmıştır. Değişken devirli aşınma deneylerinde belirli bir devir sayısına (kritik devire) kadar devir sayısı artışı ile aşınmadaki artışın ters orantılı olarak değiştiği, kritik devir sayısından itibaren aşınmada görülecek artışın devir sayısındaki artışla doğru orantılı olarak geliştiğini belirtmiştir. Adhesiv aşınma direncinin yüzey sertliği ve mikro sertlik ile ilişkisi tespit edilip bütün numunelerde aşınma direnci ve yüzey sertliği arasındaki doğrudan bir ilişkinin olduğunu belirtmiştir. AISI 304 paslanmaz çeliğin yapısında bulunan 5 ferrit ve bunun ayrışmasından meydana gelen  $\alpha$  fazı ile

metal karbürlerin M23C6 yapılarının varlığı belirlenmiştir. Bunlardan a fazı ve bir miktar da M23C6 karbür yapıda bulunması aşınma direncinin yükselmesinde belli ölçülerde etkili olduğunu tespit etmiştir [27].

Kumar ve Ratol, derleme çalışmalarında;

- ✓ Çamur erozyonu enerji üretim tesisleri için ciddi bir problemdir. Hasarlara neden olmadan önlenmeli veya tespiti yapılmalıdır. Tartışılan tüm tribolojik parametrelerin aşınma üzerine az ya da çok etkisi vardır ve çamur erozyonundan kaynaklı kaplanmış ya da kaplanmamış malzemelerin bozulması tesis bakım maliyetini artırmaktadır.
- ✓ Düşük dayanıma sahip (alüminyum, pirinç, yumuşak çelik vs.) hedef malzemenin erozif aşınma direnci çalışan yüzeyi üzerine kaplama yapılarak artırılabilir.
- ✓ Yüksek termal verimliliğe sahip modern termik santrallerin gelişmesiyle beraber daha yüksek dayanım ve agresif çalışma şartlarına göre geliştirilmiş konstrüksiyon malzemelerinin kullanımı gerekliliği nedeniyle gereksinimler de koruyucu kaplamalar ile sağlanabilir.
- ✓ Spesifik uygulamalar için kaplanmış veya kaplanmamış uygun malzeme kullanımı çamur erozyonu aşınma dayanımı için geliştirilebilir. Malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinin üzerine çalışma yapmak malzeme seçiminde yardımcı olabilir.
- ✓ Çamur erozyonunun minimize edilmesi için birçok teknik belirlenmiş, ancak önemli araştırma çalışmaları ile bu teknikleri uygulamak ve değerlendirmek gerektiğini belirtmişlerdir [28].

Akkaş, TiN kaplama parametrelerinin aşınma davranışı üzerindeki etkisi isimli çalışmasında, malzemeye uygun kaplama yapılmasıyla, sürtünme ve aşınma davranışında önemli oranda bir düşüş gözlenebileceğini, fakat kaplanacak malzeme

ile kaplama malzemesinin özellikleri arasındaki ilişkiler iyi bilinmesi gerektiği belirtilmiştir. Akkaş çalışmasında, HSS malzemesinden üretilmiş numuneler üzerine farklı proses parametrelerinde PVD katodik ark buharlaştırma tekniği ile TİN kaplatmış ve kaplama proses parametrelerinin aşınma davranışı üzerindeki etkisini incelemiştir. İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi kaplama karakterizasyon laboratuvarında, kaplanmış numunelerin aşınma deneylerini yapmış ve numunelerin kaplama kalınlıklarının, yüzey pürüzlülüklerinin, sertliklerinin ve taban malzemeye yapışmalarının belirlenmesi amacıyla karakterizasyon çalışmaları yapmıştır. Aşınma deneylerinde 5 mm çapında alümina bilya kullanılarak, disk üzerinde bilya deney düzeneğinde TİN kaplanmış numunelerin aşınma davranışını incelemiştir. Çalışmaları sonucunda, taban malzemesine bias voltajı uygulanmasının aşınma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve uygulanan bias voltajının artmasıyla aşınma miktarının azaldığını gözlemlemiştir. Daha düşük kaplama kalınlığına ve yüksek sertliğe sahip olan kaplama malzemesinin taban malzemesine yapışmasının ve aşınma dirençlerinin daha iyi olduğunu belirtmiştir [29].

Akgün, AISI 1045 çeliğinin mekanik alaşımlanmış demir esaslı tozlar ile kaplanması ve aşınma davranışının araştırılmasını incelemiştir. Araştırmacı tarafından ilk olarak, hazır alınmış Metco 350 NS ve Metco 101 SF tozları sırasıyla ağırlık bazında %10 ve %90 oranlarında 60 saat boyunca 450 dev/dk hızla dönen yüksek enerjili bir öğütücüde mekanik alaşımlamaları gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, mekanik alaşımlanmış süper alaşımlı tozlar, hazır alınmış demir esaslı Metco 350 NS tozu içerisine yine ağırlık bazında %5, %10 ve %15 oranlarında takviyeleri yapmıştır. Daha sonra hiç takviye yapılmamış demir esaslı tozlar ile takviyeli demir esaslı tozları AISI 1045 malzemesi yüzeyine toz alev püskürtme tekniği kullanılarak kaplamaları gerçekleştirmiştir. Üçüncü aşamada ise kaplamalı yüzeyler, kuru sürtünme şartlarında blok on disk aşınma test cihazında aşınma deneylerini gerçekleştirmiştir. Ayrıca kaplamalı yüzeyleri, mikro sertlik ölçümlerine de tabi tutmuştur. Tozların mekanik alaşımlanmasını göstermek için SEM analizlerinin yanı sıra hem kaplama yüzeyinin hem de aşınmış yüzeylerin optik mikroskoptan görüntülerini almıştır. Akgün, yapmış olduğu çalışmalar sonucunda elde ettiği verilere göre takviye oranındaki artışa bağlı olarak sertlik değerlerinin arttığını belirtmiştir. Kaplamalı yüzeylerden alınan optik görüntülerde, porozite

yoğunluğuna rastlamıştır. Aşınma numuneleri incelendiğinde ise %15 takviye oranı dışında diğer takviyeli numunelerin sertlikle paralel bir şekilde aşınma dirençlerinin arttığı ve altlık malzemeye göre çok daha yüksek olduğunu tespit etmiştir [30].

Demir, farklı çeliklerin yorulma aşınmasında malzeme sertliğinin aşınma üzerine etkisi incelemiştir. Çalışmasında, AISI 4140 çelik malzemesini sertleştirilmeye tabi tutarak farklı sertlik değerleri elde edilmiş ve AISI 4140 çelik malzemesinin yorulma dayanımına etkisini incelemiştir. Demir çalışmasında, kullanmış olduğu AISI 4140 çelik malzeme numunelerini 40, 46 ve 52 HRC sertlik değerine getirerek yorulma deneyleri yapmıştır. Deneyler sonucunda tornalanmış, 40, 46 ve 52 HRC sertleştirilmiş numunelerin yorulma dayanımlarını sırası ile 455, 760, 778 ve 728 MPa olarak bulmuştur. 46 HRC sertleştirilmiş numunede yorulma dayanımı en iyi çıkmıştır. Ayrıca araştırmasında, AISI 1045 çeliğinin yorulma davranışı üzerinde indüksiyonla sertleştirmenin etkisini de incelemiştir. Sonuçlar indüksiyonla sertleştirilmiş AISI 1045 çeliğinin yorulma davranışlarında, işlemsizlerle karşılaştırıldığında, %30 iyileşme sağlandığını tespit etmiştir [31].

More vd., partikül çarpma açısının, konsantrasyonun, hızın ve tane boyutunun erozif aşınma üzerindeki etkisini ölçmek için yapmış oldukları çalışmada aşındırıcı olarak 550 µm ortalama partikül büyüklüğüne sahip kuvars kumu kullanmışlardır. Aşınmaya maruz bırakılacak malzeme olarak da AISI SS304L çelik seçilmiştir. Deneyler hazneli tip deney düzeneğinde %20 katı konsantrasyonuna sahip çamur kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 3,71 m/s partikül çarpma hızı değeri kullanılmıştır. Aşınan yüzeylerin farklı açılarda ortaya çıkan SEM fotoğrafları aşınma mekanizmalarının ortaya çıkarılmasında ve çarpma açısının etkilerinin belirlenmesinde yardımcı olmuştur. Araştırmacılar çalışmalarında aşınma test düzeneği tasarımını yaparken makul katı-sıvı konsantrasyonunda, gerçek akış hızlarında boru hatları, dirsekler, pompalar vs. için aşınma durumlarının simülasyonunu yaparak ve daha gerçekçi sonuçlara ulaşabilmeyi amaçlamışlardır. Yapmış oldukları çalışmalar sonucunda herhangi bir numune açısında kesme ve deformasyon aşınmalarının payları sünek malzemeler için geliştirilen bağıntılarla hesaplandığını, hesaplanan erozif aşınma verileri deneylerden elde edilen sonuçlarla örtüşüğünü belirtmişlerdir [32].

Kara, yüzeyi ince film kaplanmış 100Cr6 rulman çeliğinin çeşitli ortamlarda sürtünme ve aşınma davranışlarını incelemiştir. Sürtünme ve aşınma, özellikle havacılık, uzay, elektronik, kimya, kaplama ve imalat sanayi gibi alanlarda kullanılmakta olan tüm sistemleri olumsuz etkileyen önemli etkenler olduğunu belirtmiştir. Tribolojik uygulamaların çoğunda sürtünme ve aşınma ile ilgili bu güçlükleri aşmak için çeşitli yağlayıcılar kullanıldığı ancak, aşırı koşullarda (aşırı sıcaklık, ortam basıncı ve yüzey basıncı vb.) ortaya çıkacak olan sürtünme ve aşınmayı kontrol edebilmek için günümüzde temas yüzeylerini katı yağlayıcılar ile kaplamak en etkili yöntemlerin başında geldiğini tanımlamıştır. MoS<sub>2</sub> yağlayıcının düşük kayma gerilmesine sahip olması nedeniyle bu alanlarda yaygın olarak kullanılan bir katı yağlayıcı olduğu ancak, MoS<sub>2</sub> bu özelliğini her türlü ortamda sürdüremediği belirtilmiştir. MoS<sub>2</sub>'nin düşük kayma gerilmesi değerini söz konusu ortamlarda da sağlayabilmesi kaplamanın yapısına çeşitli elementler katılarak gerçekleştirilebilmektedir. Kara çalışmasında, darbeli DC kapalı alan manyetik alanda sıçratma yöntemiyle AISI 52100 rulman çeliği taban malzemesi üzerine MoS<sub>2</sub>-Ti kaplamıştır. Kaplanan bu filmlerin mekanik, yapısal ve çeşitli ortamlardaki tribolojik özelliklerini incelemiştir. Elde edilen kaplamalarda kristolografik yönelme, kaplama yapısındaki titanyum oranına bağlı olarak değişmekte olduğu belirlenmiştir. Kaplamaların kalınlığını etkileyen en etkin parametrenin magnetron hedef akımının olduğu belirtilmiştir. Yapıya eklenen titanyum oranının artmasıyla genel olarak kaplamaların vakum ortamındaki tribolojik davranışlarını olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir [33].

Uzun, borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımlarını incelemiştir. Çalışmasında, Ç1040 çeliğine farklı sıcaklık ve sürelerde termokimyasal işlemle bor kaplama ısıl işlemi uygulamıştır. Aynı grup malzemelere 4 farklı borlama işlemi yapmıştır. Birinci borlama işlemi 950 °C de 3 saat bekletip havada soğutma işlemi uygulamıştır. İkinci grup malzemeler aynı sıcaklıkta 5 saat, üçüncü grup malzemeler 1000 °C de 3 saat ve dördüncü grup numuneleri de yine aynı sıcaklıkta 5 saat bekletip havada soğutma işlemi yapmıştır. Her dört grup deneyde yeni susuz boraks (tinkal) ile ferrosilisyum tozunun karışımından oluşan katı ortamda borlama işlemi gerçekleştirmiştir. Termokimyasal borlama işlemleri aynı büyüklükteki potalarda gerçekleştirmiştir. Deney numunelerin de oluşan borür

tabakasının dağlanmadan SEM fotoğrafları vasıtasıyla tabaka kalınlıkları ile mikro sertliklerini incelemiştir. Borlanmış numuneler ile borlanmamış numuneler korozyon ve aşınma deneylerine tabi tutularak aralarındaki dayanım farklarını karşılaştırmıştır. Borlama yapılan numunelerin dayanımlarının daha yüksek olduğunu tespit etmiştir [34].

Demirsöz çalışmasında, sulu çamur erozyonu aşınma deney düzeneği geliştirmiş ve deneylerde yüksek fırın granüle cürufu kullanılarak St 37-2 referans standart boru malzemesi, Hardox400, W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama ve AISI 440 C martenzitik paslanmaz elik malzemelerinin üzerindeki aşındırıcılığını incelemiştir. Yüksek fırın granüle cürufu ortalama 505 µm partikül büyüklüğünde elenmiş ve ağrılıka %10, %20 ve %30 değerlerinde cüruf içeren sulu çamur ortamı hazırlamıştır. Deneyleri 2 m/s ve 4 m/s çevresel hız değerlerinde ve partikül normal çarpma açısında (90°) gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu aşınma deneylerinde belirli partikül büyüklüğünde hazırlanmış olan cürufun aşındırıcılığının partikül konsantrasyonu ve çarpma hızı (malzeme iletim hızı) ile doğrudan ilgili olduğu ve konsantrasyonun partikül çarpma hızının artmasıyla aşınmanın da arttığını tespit etmiştir. Numune olarak kullanılan malzemelerin aşınma değerleri yüksekten düşüğe doğru sırasıyla St 37-2, Hardox400, W<sub>2</sub>C-NiCrBSi kaplama malzemesi ve AISI 440 C martenzitik paslanmaz elik olarak belirlemiştir. Malzemelerin maliyet analizini yapıp mukayese etmiştir. Ayrıca aşınma mekanizmalarının anlaşılabilmesi için aşınmış yüzeylerin morfolojik yapıları SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) kullanılarak incelemiştir [35].

### **3.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASININ GENEL DEđerLENDİRMEŐİ**

Yapılan literatür araştırmaları bir sistem içerisinde veya izafi olarak hareket halinde bulunan malzemelerde görülen aşınmaları azaltmak veya önlemek için genelde aşınan yüzeyler µm seviyede toz veya belirli kalınlıkta malzeme kaplama yapıldığı tespit edilmiştir. Kaplama yapılmasının nedeni kaplama yönteminin hızlı sonuca varma, ekonomiklik ve yüksek performans göstermesi açısından tercih edildiği grlmştir.



Literatürde edinilen kazanımlarla Kardemir A.Ş çelik üretim tesisinde BOF ile çelik üretim prosesinde kullanılan endüstriyel ID fandaki aşınmaların asidik özellikte BOF gazına ve yıkama sularına maruz kalan kanat malzemesi S690QL yüksek mukavemetli çeliğin üzerine, asidik ortam şartlarına daha dayanıklı olduğu Kardemir A.Ş çelik üretim tesisinde tecrübe edinilen AISI304L plaka kaplanmasına karar verilmiştir. Bu çalışma ile literatürde yapılan çeşitli kaplama yöntemlerine göre daha kalın malzemedен yapılacak plaka kaplama olması nedeniyle az sayıda bulunan bu tür çalışmalara zenginlik katmaktadır.



## BÖLÜM 4

### DENEYSEL ÇALIŞMA

#### 4.1. GİRİŞ

Çimento fabrikaları, demir-çelik, termik santraller, entegre ağaç ile maden tesisleri gibi endüstriyel tesislerde fanlar, ağır işletme koşulları altında çalışmakta ve yoğun aşınmalara maruz kalmaktadır. Hava veya gaz ile çok yüksek hızlarda taşınan aşındırıcı partiküller; fan rotor, rotor kanatları, fan gövdeleri, fan giriş ve çıkış bölgelerine büyük zararlar vermektedir. Aşınma, fan malzemesinin incelmesine ve dolayısıyla servis ömrünün kısılmasına sebep olmaktadır. Aşındırıcılardan dolayı farklı bölgelerinde aşınmaya maruz kalan fanlarda, balans sorunu baş göstererek vibrasyon artışı olmaktadır [6]. Vibrasyonun sınır değerini aşması sonucu tesislerde üretim duruşları verilmektedir. Duruşların sık olması, bakım maliyetlerini ciddi ölçüde yükseltmektedir. Tesislerin verimliliğini artırmak ve tesis duruş sürelerini düşürmek için ekipmanların erozif ve korozyif aşınma dayanımı üzerine araştırmalar yapmaya gerek duyulmaktadır. Kardemir A.Ş, çelik üretim tesisinde sıvı çelik üretimi için kullanılan BOF' larda saf oksijen üfleme sonrası oluşan gaz-toz karışımının soğutma ve yıkama işlemlerinden sonra temizlenen gazın geri kazanım sistemine sevkiyatı için ID fan kullanılmaktadır. ID fan, BOF içerisine saf oksijen üflenmesi sonucu açığa çıkan gazların emişini sağlayarak gaz soğutma ve yıkama proseslerinden sonra gazın, gaz depolama tankına veya bacaya sevkiyatını sağlama işlevini yaparken, kanatları erozif ve korozyif aşınmalara maruz kalmaktadır [6]. Bu çalışmanın amacı, Kardemir A.Ş çelik üretim tesisinde sıvı çelik üretim sürecinde kritik öneme sahip ID fanın kanatlarında oluşan aşınmaları önleyerek üretim duruşlarını azaltmaktır. Bu bölümde, Kardemir A.Ş çelikhane BOF tesislerinde BOF gazı elde edilme süreci, elde edilen gazın taşınması, aşınmaya maruz kalan ID fanın kanatlarının kaplanması için kaplama malzeme seçimi ve deneysel çalışmada kullanılan koruyucu plakanın hazırlanması anlatılmıştır. Kardemir A.Ş çelik üretim

tesisinde bulunan 3 numaralı Bazik Oksijen Fırınına (BOF-3) ait BOF gazı taşıma sistemi beş temel ekipmandan oluşmaktadır. BOF-3 fırınına ait BOF gazı taşıma sisteminin genel görüntüsü şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1’de 1 numara ile gösterilen 1200 mm çapındaki boru hattı ana gaz kanalı olarak adlandırılmakta olup BOF’ da oksijen üfleme esnasında açığa çıkan gaz ve tozların ID fan tarafından emilmesi aşamasında gazlara ve tozlara kılavuzluk yapma görevini yerine getirmektedir. 2 numara ile gösterilen gaz yıkama kulesi BOF gazının temizlenmesinde ve temizlemede kullanılan suyun ayrıştırılarak geri dönüşüm havuzlarına gönderilmesi sağlanmaktadır. 3 numara ile gösterilen yakma bacası, BOF gazının geri dönüşümü için depolama tankına gönderilemediği durumlarda, BOF gazının yakılarak atmosfere atılması aşamasında kullanılmaktadır. 4 numara ile gösterilen 1200 mm çapındaki boru hattı ise BOF gazının geri dönüşüm için gaz depolama tankına gönderildiğinde kullanılan boru hattıdır. BOF gazının geri dönüşüme gönderilmesi durumunda yakma bacası boru hattı hidrolik sistem tahrikli klappe ile kapatılır ve 4 numara ile gösterilen boru hattı üzerinden BOF gazı  $30 \times 10^{12}$  mm<sup>3</sup> kapasiteli gaz tankına gönderilmesi sağlanır.



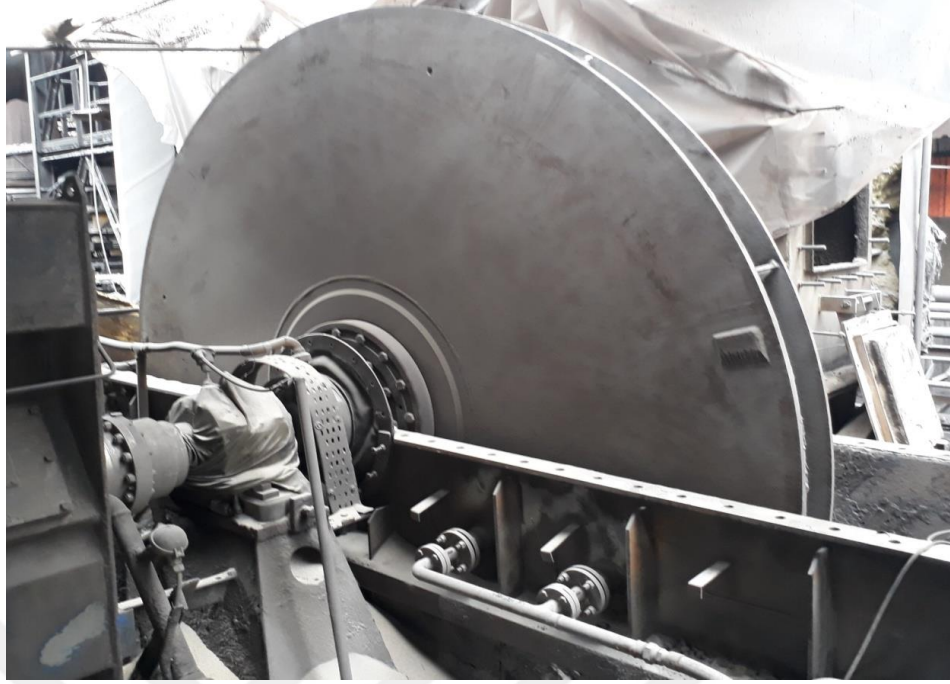
Şekil 4.1. KARDEMİR A.Ş çelik üretim tesisinde 3 numaralı BOF, BOF gazı taşıma sistemi genel görüntüsü.

BOF gazı taşıma sisteminde kullanılan sistemin temel ekipmanları ve ID fanının genel görünümü Şekil 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. KARDEMİR A.Ş. çelik üretim tesisinde 3 numaralı BOF, BOF gazı taşıma sisteminde kullanılan ID fan ve temel ekipmanların genel görüntüsü.

BOF gazı taşıma sisteminde kullanılan temel ekipmanların adları ve görevleri; 1 numara ile gösterilen gaz yıkama kulesi, 2 numara ile gösterilen 200 dev/dak ile 1200 dev/dak arasında dönenebilen 2800 mm çapa sahip ID fanıdır. ID fanının yakından muhafazası sökülmüş genel görünümü Şekil 4.3'de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. KARDEMİR A.Ş çelik üretim tesisinde 3 numaralı BOF, BOF gazı taşıma sisteminde kullanılan ID fanın yakından muhafazası sökülmiş genel görüntüsü.

Şekil 4.2’de 3 numara ile gösterilen ekipman ID fan ile elektrik motoru arasındaki güç aktarma elemanı görevi gören hidrolik kaplin ekipmanıdır. Hidrolik kaplin elektrik motoru sabit devirde dönerken ID fanın değişken devirde dönebilmesini sağlamaktadır. 4 numara ile gösterilen ekipman sabit 1500 dev/dak hız ile dönen elektrik motorudur. 5 numara ile gösterilen ekipman ise hidrolik kaplin içerisinde dolaşan hidrolik yağın soğutulmasını sağlayan boru tip eşanjördür. Eşanjörün içerisinde 100 adet 8 mm çapında bakır boru bulunmaktadır. Boruların içerisinden ısınan yağ dolaşırken boru dış yüzeylerinden soğutma suyu dolaşmaktadır.

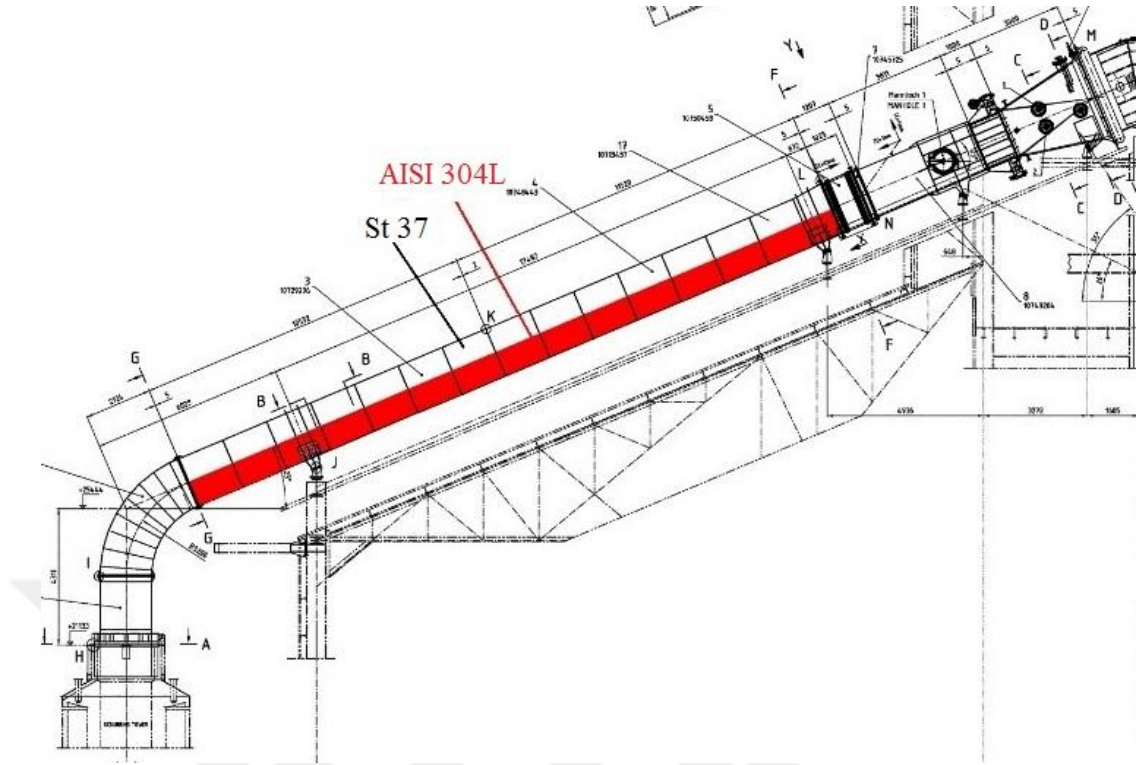
SMS Siemag firması projesi olan BOF komple olarak satın alınmaktadır. Kardemir A.Ş çelik üretim ünitesinde kullanılmakta olan BOF fırınlarında sözleşme gereği üretim hattındaki ana ekipmanlarda herhangi bir değişiklik yapılamamaktadır. Aksi durumda tesis ekipmanları garanti kapsamından çıkmaktadır. Bu nedenle; ID fan çapı, kanat sayısı, ID fan mil çapı ve ID fanda kullanılacak elektrik motoru, hidrolik kaplin vb. ekipmanlar detaylı mühendislik hesaplamaları yapılarak söz konusu firma tarafından belirlenmektedir. ID fanda kullanılan 1500 kW güce sahip elektrik motoru

Siemens marka ve tip model olarak 1LA45604CN80'dir. ID fan hacimsel debisi 41.67 m<sup>3</sup>/s 'dir ve günlük olarak yaklaşık 3.600.000 m<sup>3</sup> emiş yapabilmektedir.

#### **4.2. KARDEMİR A.Ş ÇELİK ÜRETİM TESİSİNDE ID FAN KANATLARININ AŞINMASINA BAĞLI OLARAK ÜRETİM DURUŞUNA NEDEN OLAN SORUNUN ARAŞTIRILMASI**

Kardemir A.Ş çelik üretim tesislerindeki BOF sistemi ile çelik üretim esnasında oluşan CO gazı, CO<sub>2</sub> gazı ve SO<sub>2</sub> gazı karışımları BOF gazı olarak tanımlanmaktadır. BOF gazının %70'i CO gazından oluşmaktadır. Zehirleyici fakat enerji değeri yüksek olan bu gaz karışımının emniyetli bir şekilde emilerek sistemden uzaklaştırılmasını sağlayan ID fan ekipmanında meydana gelen aşınmalar, çelik üretim tesisi bakım onarım birimini aşınmaların önlenmesi veya geciktirilmesi açısından araştırmaya yöneltmiştir.

Çelik üretim tesisi bakım onarım birimi ID fan kanatlarının aşınmasına bağlı olarak duruşa neden olan sorunun araştırmasını yapmadan önce 2014 yılında Çelik üretim tesisinde iyileştirme çalışması yapmıştır ve aşınmayı önlemek için birtakım deneyimlere sahip olmuştur. 2014 yılında yapılan iyileştirmeye ait görüntü Şekil 4.4'de verilmiştir. Bakım onarım birimi çalışanları ID fan kanatlarına iyileştirme yapmadan önce BOF gazı temizleme sistemine ait olan ve BOF' da oksijen üfleme esnasında açığa çıkan gaz ile tozların ID fan tarafından emilmesi aşamasında gaz-toz karışımına kılavuzluk yapma görevi bulunan 1200 mm çapındaki ana gaz borusunun malzemesi St37 kaliteye sahipti. BOF ana gaz borusunun özellikle yıkama sularının geçtiği alt kısımlarında 1 yıl içinde delinmeler görülmüştür. Bakım-onarım birimi tarafından aşınarak delinen bölgelere parça plaka kaynatılarak yama yapmak için üretim duruşları verilmiştir. Duruşu engellemek ve parça malzeme kaynak yapma işlemlerini ortadan kaldırmak için 1200 mm çapında ve 22000 mm uzunluğundaki BOF ana gaz borusunun altta kalan 180°'lik kısmı AISI 304L kaliteden imal ettirilerek montajı yapılmıştır. Gaz-toz ve yıkama sularının taşınmasını sağlayan BOF ana gaz borusunun 180° lik kısmının AISI 304L malzemedan imal edilmesi sonucunda tesiste yaklaşık 4 yıldır delinme ve yırtılmalardan kaynaklı üretim duruşu yapılmamıştır. Bu nedenle, çelik üretim tesisi bakım onarım birimi çalışanları geçmiş yıllarda aşınmadan kaynaklı hasarların giderilmesi konusunda tecrübe edinmişlerdir.



Şekil 4.4. 2014 yılında çelik üretim tesisi gaz-toz ve kirli su taşıma hattında 1200 mm çapında ana gaz borusunda bakım onarım çalışanları tarafından yapılan iyileştirmenin genel görünümü.

BOF ana gaz borusunda kullanılan St37 çelik yerine 180°'lik bölümünün AISI 304L paslanmaz çelik ile kaplama sonucu varılan iyileştirmede kazanılan tecrübe, bakım onarım çalışanlarında BOF gazı ve tozunun taşınmasında kullanılan ve sık sık aşınmaya maruz kalan ID fan kanatlarının da AISI 304L paslanmaz çelik ile kaplanması sonucunda aşınmadan kaynaklı duruşun asgariye indirileceği fikri oluşmuştur.

AISI 304L kalite paslanmaz çeliği dünyada en sık ve çok yönlü kullanılan, kolay şekillenebilme ve kaynak kabiliyeti edilebilme özelliğine sahiptir. Endüstriyel, mimari, ulaşım gibi sektörlerde değişik amaçlarla kullanılmaktadır. AISI 304L paslanmaz çeliğinin kimyasal kompozisyonu çizelge 4.1'de ve mekanik özellikleri ise çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 AISI 304L paslanmaz çeliğinin kimyasal kompozisyonu [36].

Kalite		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	N
304L	max.	0.030	2.0	0.75	0.045	0.030	18.0-20.0	-	8.0-12.0	0.10

Çizelge 4.2 AISI 304L paslanmaz çeliğinin mekanik özellikleri [36].

Kalite	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı 0.2% (MPa)	Uzama (% 50mm)	Sertlik	
				Rockwell B (HR B)	Brinell (HB)
304L	485	170	40	92	201

Kardemir A.Ş çelik üretim müdürlüğü ID fan kanat kaplama iyileştirmesinde AISI 304L paslanmaz çelik seçilmesinin nedeni daha önce gaz kanallarındaki iyileştirmede tecrübe edilen bir kalite olması, ID fana etki eden gaz-toz karışımı sıcaklığın ortalama 60 °C olması, ID fan etki eden asidik etkinin çok yüksek olmaması, 304L kalitenin 316 ve üzeri kalitedeki çeliklere göre maliyetinin düşük olması, 304L kaynak kabiliyetinin ve karbür çökmesi durumlarının yüksek kaliteler ile aynı olması gibi durumlar göz önüne alınarak kullanılmıştır.

Kardemir A.Ş çelik üretim tesisine ait ID fanda erozif mekanizmadan dolayı kanatlarda oluşan aşınmalar ve kullanım dışı kalan fan yüzeyinde asidik etki nedeniyle pas tabakası oluşmaktadır (Şekil 4.5).





a)

b)

Şekil 4.5. Kardemir A.Ş Çelik üretim tesisine ait ID fanda oluşan a) Aşınma, kirlilik ve kullanım dışı kalan yüzeyinde oluşan asidik görüntüler b) Tesis duruşunda temizlenen ID fan görüntüsü.

7/24 çalışması beklenen ID fanın gövdesinde ve kanatlarında kirlenmeler olması doğal karşılanmaktadır. Bu kirlenmeler 3 ile 4 ayda bir olan 1 haftalık planlı üretim duruşlarında fan muhafazalarının sökülmesi sonrasında kumlama yöntemi ile temizlenmektedir. Zaman zaman planlı duruşlarda yapılan temizliklerde ID fan kanatlarında aşınmalar gözlenmektedir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6. ID fan kanatlarında oluşan aşınmanın yakın görüntüsü.

Ana gaz kanalı alt kısmının aşınmadan kaynaklı hasarlı bölümünün paslanmaz malzeme AISI304L ile imal edilmesinde olduğu gibi geçmişte BOF gazının ve yıkama sularının aşındırdığı hatlarda da bakım onarım personeli tecrübe edinmiştir. Edinilen tecrübe ile birlikte fan yüzeyindeki tozların ve gaz yıkamada kullanılan suların analizleri yaptırılarak ID fana etki eden aşındırma kaynağı tespit edilmeye çalışılmıştır. Yurtdışında bağımsız laboratuvarda yaptırılan BOF gaz temizleme sisteminde kullanılan suyun kimyasal analizi sonuçları Çizelge 4.3' de, ID fan gövdesinden alınan toz numunesine ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.4'de gösterilmiştir. Raporda su numunelerinde yüksek oranda Klorür (203 mg/l - 257 mg/l) ve Sülfat (260 mg/l - 357 mg/l) içerdiği tespit edilmiştir. Klorür ve sülfat, çelik plakalarda korozyona neden olduğu laboratuvar yetkilileri tarafından bildirilmiştir.

Çizelge 4.3. Kardemir A.Ş BOF gaz temizleme sisteminde kullanılan suyun kimyasal analiz sonuçları [37].

Su içeriği:		P2016-06162	P2016-06163
Amonyum	mg/l	0,13	<0,10
Kalsiyum	mg/l	49,42	43,80
<b>Klorür</b>	<b>mg/l</b>	<b>257</b>	<b>203</b>
Demir	mg/l	0,0435	<0,0100
Florür	mg/l	3,8	1,4
Toplam sertlik	°dH	7,66	7,80
Hidrokarbonlar (çözülmüş veya emülsiyon)	mg/l	<0,10	<0,10
Bakır	mg/l	<0,0040	<0,0040
Magnezyum	mg/l	3,26	7,30
Silikon	mg/l	4,79	2,36
<b>Sülfat</b>	<b>mg/l</b>	<b>357</b>	<b>260</b>
<b>Asit kapasitesi pH 4,3</b>	<b>mmol/l</b>	<b>0,70</b>	<b>3,0</b>
pH değer		9,1	7,7
İletkenlik	µS/cm	1.657	1.405
Filtrelenebilir katılar	mg/l	16	3,20
Buharlaşma artıkları	mg/l	1.074	930

Çizelge 4.4. Fan gövdesinden alınan toz numunesinin kimyasal analiz sonuçları [38].

Katı madde içeriği:		P2016-06161
Krom	mg/kg	502
Nem oranı- yaş numune	g	567,35
Nem oranı- kuru numune	g	547,40
Bakır	mg/kg	439
Manganez	mg/kg	12828
Nikel	mg/kg	125
Fosfor	mg/kg	1084
Civa	mg/kg	10
Vanadyum	mg/kg	347
Çinko	mg/kg	15223
Nem oranı	M.-%	3,64
Yanma kaybı (950°C)	M.-%	3,79
Demir	M.-%	61,7
Demir metalik	M.-%	0,060
Demir (II) oksit	M.-%	24,3
Demir (III) oksit	M.-%	61,1
<b>Silisyum oksit</b>	<b>M.-%</b>	<b>2,430</b>
Alüminyum oksit	M.-%	0,01
Kurşun oksit	M.-%	0,30
Kalsiyum oksit	M.-%	0,25
Klorür	M.-%	0,027
Florür	M.-%	0,012
Magnezyum oksit	M.-%	0,09
Sodyum oksit	M.-%	0,09
Kükürt, toplam	M.-%	0,33
Titanyum oksit	M.-%	0,00
Toplam karbon	M.-%	0,390

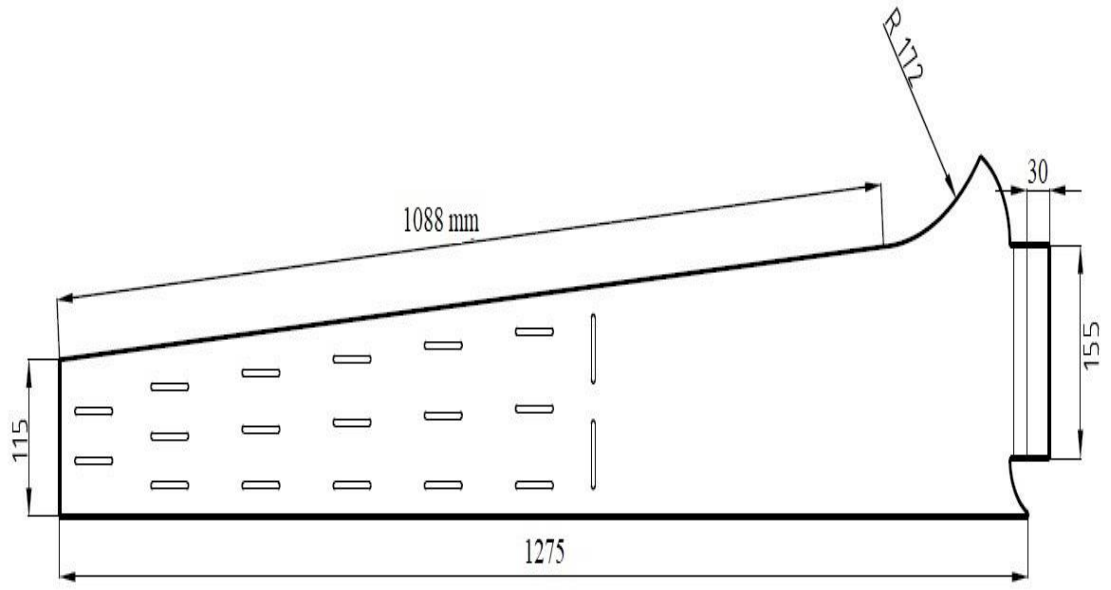
Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'deki su ve toz kimyasal analizlerinde görüldüğü üzere BOF gazının asidik özellikte olduğu tespit edilmiştir. Bu durum, klor ve sülfatın ID fan kanatlarında görülen aşınmaların oluşum sürecini hızlandıracağını göstermiştir.

AISI 304L normal atmosferik ortamda korozyon dayanımı çok iyidir. Asit miktarı mevcut bulunan sıcak ortamlarda, malzemenin içyapısında kılcal çatlak ve çukur oluşturması, sıcaklığı 60°C'nin üstüne çıktığında gerilimden kaynaklanan yarıklar oluşması muhtemeldir. Standart sıcaklıkta kullanım suyunda 200 mg/L, 60°C' nin üzerinde 150 mg/L mevcut kloro dayanıklıdır [38]

ID fanın maruz kaldığı sıcaklık yaklaşık 50°C'dir. Su analizlerinde çıkan klor miktarı ve pH değeri AISI 304L paslanmaz çelikten kanat kaplama yapılmasının bilimsel açıdan karşıt görüş barındırmamaktadır. Çelik üretim prosesinde klor ve sülfat gibi erozyon ve korozyon aşınmaya neden olan durumlar her zaman kontrol edilebilir olmadığından mevcut sistemi korozyona dayanımlı hale getirmek için önceki tecrübe kazanımlarından yola çıkmanın doğru olacağına karar verilmiştir ve ID Fan kanatlarına paslanmaz çelikten kanat formunda koruyucu plakalar temin edilmesi hazırlıklarına başlanılmıştır.

### **4.3. KORUYUCU PLAKA HAZIRLANMASI**

Yapımına karar verilen AISI 304L paslanmaz çelik ID fan kanat formu ölçüleri Şekil 4.7' da, yapımı gerçekleştirilen AISI 304L paslanmaz çelik ID fan kanat görüntüsü Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Yapımına karar verilen AISI 304L paslanmaz çelik ID fan kanat formu ölçüleri.



Şekil 4.8. AISI 304L paslanmaz çelikten yapımı gerçekleştirilen ID fan kanat görüntüsü.

AISI 304L paslanmaz çelikten yapımına karar verilen ID fan kanat kaplamaları; ilk denemede alan darlığı nedeniyle ulaşamadığı için AISI 304L paslanmaz çelik kaplama malzemesi sadece kanatın iki uç kısmından kaynak yapılarak kaplanmıştır. Alan darlığı nedeniyle iki noktada kaynak yapılarak kaplanan kaplama malzemesi Şekil 4.9’da görüldüğü gibi ID fan ana malzemesi olan S690QL yüksek mukavemetli çeliğin üzerinden kalkmış ve parçalanmıştır.



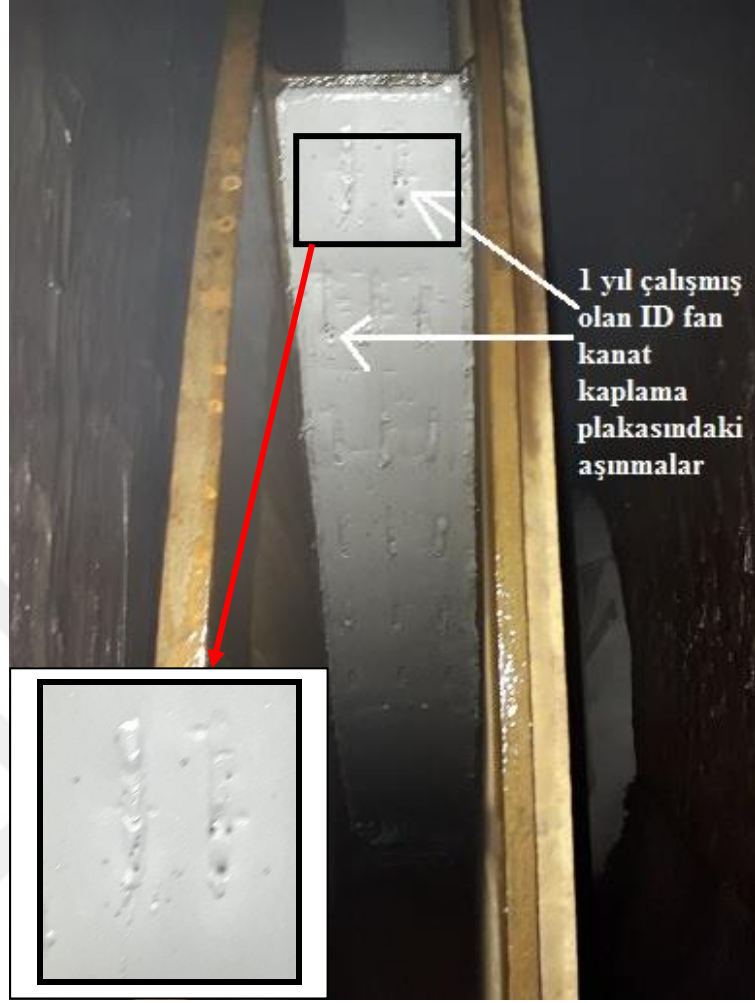
Şekil 4.9. S690QL yüksek mukavemetli çelikten yapılmış ID fan kanat üzerine yapılan AISI 304L kaplama malzemesinin deforme olmuş görüntüsü.

Yaşanan bu tecrübe sonrası Şekil 4.10’da görüldüğü üzere ID fan kanatlarına montajı kolay ve sağlam olması düşünülerek AISI 304L paslanmaz çelik plaka ortalarından kaynak delikleri bırakılarak tasarlanmıştır. 1200 dev/dak ile dönmekte olan ID fanın kanatları üzerine montajı yapılan AISI 304L kaplama malzemesinin deforme olması ciddi problemlere neden olabileceği için kaynak delikleri mümkün olduğunca fazla konulmuştur.



Şekil 4.10. ID fan kanat kaplama sacı üzerine çoklu kaynak deliği açılarak kaynak yapılan AISI 304L kaplama malzemesi görüntüsü.

AISI 304L paslanmaz çelik kaplama yapılan ID fan kanatları üzerinde 1 yıllık deneme sürecinde az miktarda bir aşınma gözlenmemiştir (Şekil 4.11). İyileştirmede kullanılan paslanmaz plakanın kalınlığı 6 mm'dir. Kanat kaplama plakası iyileştirmenin ilk zamanları orta kısımlardan kaynatılırken Böhler marka Fox DCMS KB Ø 3.25 mm kaynak elektrodu kullanılarak elektrik ark kaynağı ile kaynatılmıştır. Yeni fan alımında ise kanat plakasının orta kısımlarında kaynak yaptırılmamıştır. Sadece yan kısımları gazaltı kaynak yöntemi ile kaynatılması imalatçı firmaya bildirilmiştir.



Şekil 4.11. ID fan kanatlarına kaplama işlemi yapıldıktan sonra ID fanın 1 yıl çalışması sonucu fan kanatlarında meydana gelen aşınma görüntüsü.

Aşınmanın azalması neticesinde yeni yedek fan alımında imalat, AISI 304L paslanmaz plakasının orta kısımlarından kaynatılması işlemi iptal edilerek yan taraflardan kaynaklı olacak şekilde imalat yaptırılmıştır (Şekil 4.12). İyileştirmenin son aşaması olan, ID fan kanatlarına AISI 304L kanat kaplama plakasının yanlardan kaynaklı haliyle 1 yıldır çalışmakta olan ID fanın kanat kısımlarında gözle görülür bir aşınma olmadığı Şekil 4.12’de görülmektedir.





Şekil 4.12. ID fan kanatlarına AISI 304L kanat kaplama plakasının yanlardan kaynaklı montaj yapılmış haliyle ID fan kanatlarında 1 yıllık çalışma sonucunda gözle görülür bir aşınma olmadığına görüntüsü.

Çelik üretim tesisinde bu şekilde imalatı yapılan ID fan kanatlarında aşınma sorunu olmadan 1 yıldır çalışmaktadır. ID fanların 5 ayda bir yapılan 1 haftalık planlı duruşlarında bakım onarım personeli tarafından kumlama yöntemi ile temizlikleri yapılan kanatlarda herhangi bir aşınma görülmemiştir.

## BÖLÜM 5

### BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 5.1. GİRİŞ

Kardemir A.Ş Çelik üretim tesisinde kullanılmakta olan ID fan kanatlarındaki aşınma, çelik üretim tesisinin; üretim duruş süresini, ton çelik başına maliyetini, enerji değeri yüksek BOF gazının geri dönüşüm miktarını ve fanda oluşan vibrasyon değerlerini doğrudan etkilemektedir.

#### 5.2. ÜRETİM DURUŞ SÜRESİNE ETKİSİ

Çelik üretim sürecinin kritik ekipmanı olan ve üretimin sürekliliği için 7/24 saat çalışması beklenen ID fanın kanatlarında oluşan aşınmalar ID fanda balans oluşturmaktadır. Oluşan balans, 1200 dev/dak hız ile dönen 2800 mm çapındaki ID fanın kanatlarında vibrasyon değerinin 10 mm/s üzerine çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, oluşan vibrasyon değeri emniyetli üretim için uygun değer aralığında olmamaktadır. ID fan, dönme hareketini yapabilmesi için 1500 kw gücündeki elektrik motoru ile tahrik edilmektedir. ID fanlar, elektrik motoruna kaplinler ve rulmanlarla eş çalışacak şekilde montajları yapılmaktadır. ID fan vibrasyonu uygun değer aralığı üzerine çıkması durumunda rulman yatakları üzerindeki vibrasyon sensörleri vasıtasıyla BOF kumanda odasındaki operatör bilgisayarlarına uyarı olarak bildirilmektedir. ID fanın vibrasyon değeri 10 mm/s üzerine çıkması durumunda ID fan motorunun enerjisi otomasyon sistemleri tarafından otomatik olarak durdurulmaktadır. ID fanı emniyetli bir şekilde üretime dahil etmek için vibrasyon değerinin uygun değerlere düşürülmesi gerekmektedir. Balans ölçümü ve vibrasyon analizi Kardemir A.Ş uzman mühendisleri tarafından SKF marka CV655 model cihazlarla gerçekleştirilmektedir. Şekil 5.1'de ID fanda balans giderme işlemi anındaki görüntü yer almaktadır.



Şekil 5.1. Kardemir A.Ş çelik üretim müdürlüğünde kullanılmakta olan ID fan ekipmanında yapılan balans giderme işlemine ait görüntü.

Şekil 5.1’de 1 ile gösterilen vibrasyon sensörü 2 ile gösterilen devir okuyucu lazer 3 ile gösterilen optik faz referans algılayıcı (SKF marka CMSS6155 model). 4 ile gösterilen ise SKF marka CMVA65 model vibrasyon analiz cihazıdır. Balans gidererek vibrasyonu düşürme işlemi için öncelikle lazerin devri algılaması için kapline özel beyaz bir bant yapıştırılır. Vibrasyon analiz cihazında yeni balans giderme ekranı seçilir ve ID fan devrinin 1200 dev/dak çıkarılması gerektiği BOF kumanda odasındaki operatörlere iletilir. ID fan devri 1200 dev/dak çıktığında vibrasyon analiz cihazındaki gerekli tuşa basılarak, o andaki vibrasyon değeri cihazın hafızasına kaydedilir ve sonrasında ID fan durdurulur. Başlangıç noktası (bant yapıştırılan eksen) ID fan üzerine taşınır. Burası sıfır derece kabul edilerek ID fana 1 adet deneme ağırlığı kaynatılır. Buradaki amaç cihazda kaydedilen vibrasyon değerinden + veya - %30 miktarda vibrasyonu değiştirmektir. Deneme ağırlığının kaç gram ve kaç dereceye kaynatıldığı cihaza girilir. Tekrardan ID fan 1200

dev/dak'ya çıkarılır, ölçüm kaydedilir ve ID fan durdurulur. Bu işlemden sonra cihaz ekranında deneme ağırlığını çıkarın ve cihaz ekranında yazan ağırlığı belirtilen dereceye kaynatın uyarısı çıkmaktadır. Deneme ağırlığı sökülüp cihazın belirttiği ağırlık kaynatıldıktan sonra ID fan yine 1200 dev/dak çıkarılır ve ölçüm alınır. Ölçülen vibrasyon değeri 2 mm/s altında ise balans giderme işlemi sonlandırılır. Vibrasyon 2 mm/s üzerinde ise cihaz ekranında gösterilen yeni ağırlık değerini kaynatmak için ID fan durdurulur. Yeni parça kaynatılır ancak bir önce kaynatılan parça ID fandan sökülmez. Sonrasında tekrardan ID fan çalıştırılır ve ölçüm alınır. Bu şekilde vibrasyon 2 mm/s altına düşürülene kadar balans giderme işlemine devam edilmektedir.

ID fan vibrasyon değerlerinin uygun değerlere getirilmesi süresi yaklaşık olarak 3 saat sürmektedir. Ortalama 3 saat süren ID fan vibrasyonunun uygun değerlere düşürme işlemi süresince BOF'da sıvı çelik üretilememektedir. BOF'da ortalama 40 dakikada 90 ton sıvı çelik üretilmektedir. ID fan kanat aşınmaları neticesinde oluşan vibrasyon nedeniyle meydana gelen her 3 saatlik duruş yaklaşık 400 ton sıvı çelik üretiminin gerçekleştirilememesine neden olmaktadır. Kardemir A.Ş çelik üretim tesisi bakım onarım personelleri tarafından ID fan kanatlarında oluşan aşınmaları önlemek için AISI 304L plaka kaplama işlemi yapılmıştır. ID fan kanatlarına yapılan AISI 304L plaka kaplama neticesinde balans ve vibrasyon oluşumunda iyileşme gözlenmiştir. Bu iyileştirme çalışması yapılmadan önce Kardemir A.Ş çelik üretim tesisinde yer alan 3 adet BOF sisteminde kullanılan ID fanlarda ayda bir defa yukarıda belirtilen nedenlerden kaynaklı üretim duruşu olmaktadır. Çelik üretim tesisinde kullanılan 3 adet ID fanda ayda 3'er saat vibrasyon nedeniyle duruş olduğunda yıllık olarak 108 saat üretim duruşu olmaktadır. Bu üretim duruşları yaklaşık aylık 1200 ton, yıllık 14400 ton sıvı çelik kaybına neden olmaktadır.

Tez konusu olan çalışma ile yapılan iyileştirme sonucunda bir yıldır ID fan kanatlarında vibrasyon değerini artıracak aşınmalar olmamıştır. İyileştirme sonucunda olası sıvı çelik kayıplarının önüne geçilmiş ve üretim verimliliği artırılmıştır.

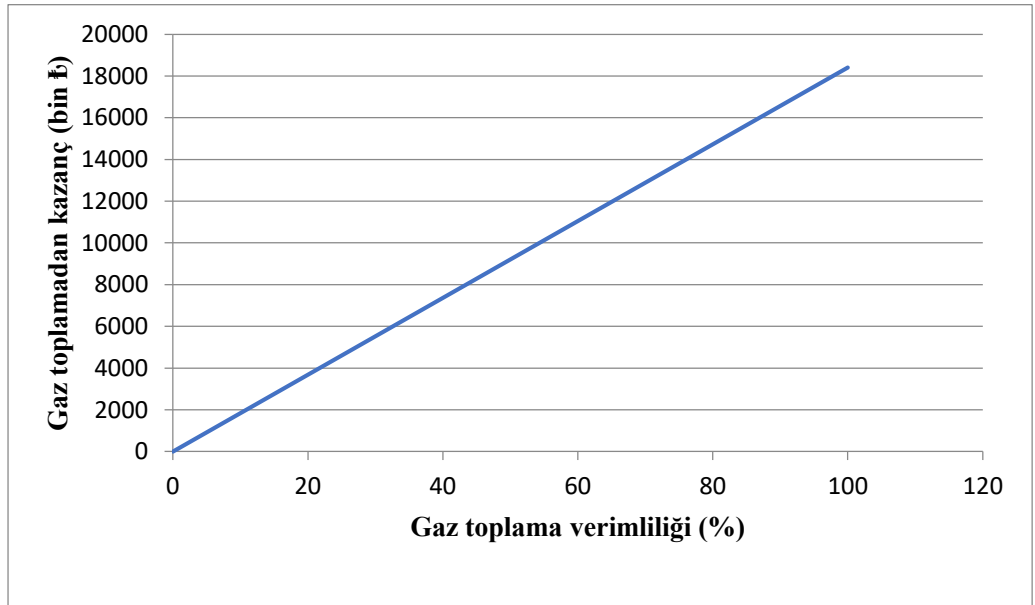
### 5.3. MALİYETE ETKİSİ

Farklı birçok sistemin çalışabilmesi için ortak ekipman olan ID fanın maliyet kalemleri çeşitli ve yüksektir. ID fan maliyet kalemlerini üç ana başlıkta incelenmiştir.

- ✓ Üretim kaybı maliyeti; Yukarıda bahsedildiği üzere tez konusu ID fan kanatlarına AISI 304L kalite kaplama yapılması ile yıllık 14400 ton sıvı çelik üretememenin önüne geçilmiştir. Maliyetler düşürüldükten sonra ton sıvı çelik karı 2017 yılı için yaklaşık 300 ₺'dir. Yapılan iyileştirme çalışması ile yaklaşık olarak yıllık 4.320.000 TL üretim kaybının önüne geçilmiştir. Kardemir A.Ş çelik üretim müdürlüğünde 2018 yılında 2.412.747 ton sıvı çelik üretimi gerçekleşmiştir. Yapılan iyileştirme ile 14.400 ton sıvı çelik kaybının önüne geçilmiştir. İyileştirme yapılmamış olsaydı 2.398.347 ton sıvı çelik üretimi gerçekleşmiş olacaktı. İyileştirme ile 2018 yılında fabrikanın toplam sıvı çelik üretiminde % 0.6 artış sağlanmıştır.
- ✓ Yedek parça maliyeti; ID fan yurtdışından tedarik edilebilen bir ekipmandır. Yaklaşık maliyeti 1.000.000 ₺'dir. 1 adet ID fanın ortalama 2 yıl ömrü olduğundan 2 yılda 3 BOF için toplam 3 adet ID fan değiştirilmektedir. Bu işlemler yedek parça maliyetini artırmakta ve fabrika karını düşürmektedir. Yapılan iyileştirme çalışması sonucunda ID fan kanatlarında meydana gelen aşınmalar nedeniyle tahmini 1 yıl ömrü kalan 3 adet ID fanın çalışma ömrü arttırılmıştır. ID fanın kanatlarına kaplama yapılması neticesinde, ID fan vibrasyonunu arttıracak bir aşınma bir yıldır olmamıştır. ID fan kanat iyileştirmesi ile ID fanların ömürleri en az 4 yıla çıkarıldığını tahmin edilmektedir. ID fanların ömürlerinin en az 4 yıla çıkarıldığı tahmini kanatları aşınan ID fanlara uygulanan AISI 304L kanat kaplama işlemi sayesinde ID fanların bir yıldır verimli bir şekilde çalışmasına bağlanmıştır. Yapılan iyileştirme neticesinde 2 yıl için toplam 3 adet ID fan yedek alımının önüne geçilmiştir. Kardemir A.Ş yedek parça maliyetleri yaklaşık olarak yıllık 1.500.000 ₺ düşürülmüştür. Kardemir A.Ş çelik üretim müdürlüğü mekanik bakım başmühendisliği yedek parça sarfiyatı 2017 yılında 3.551.000 ₺ ve

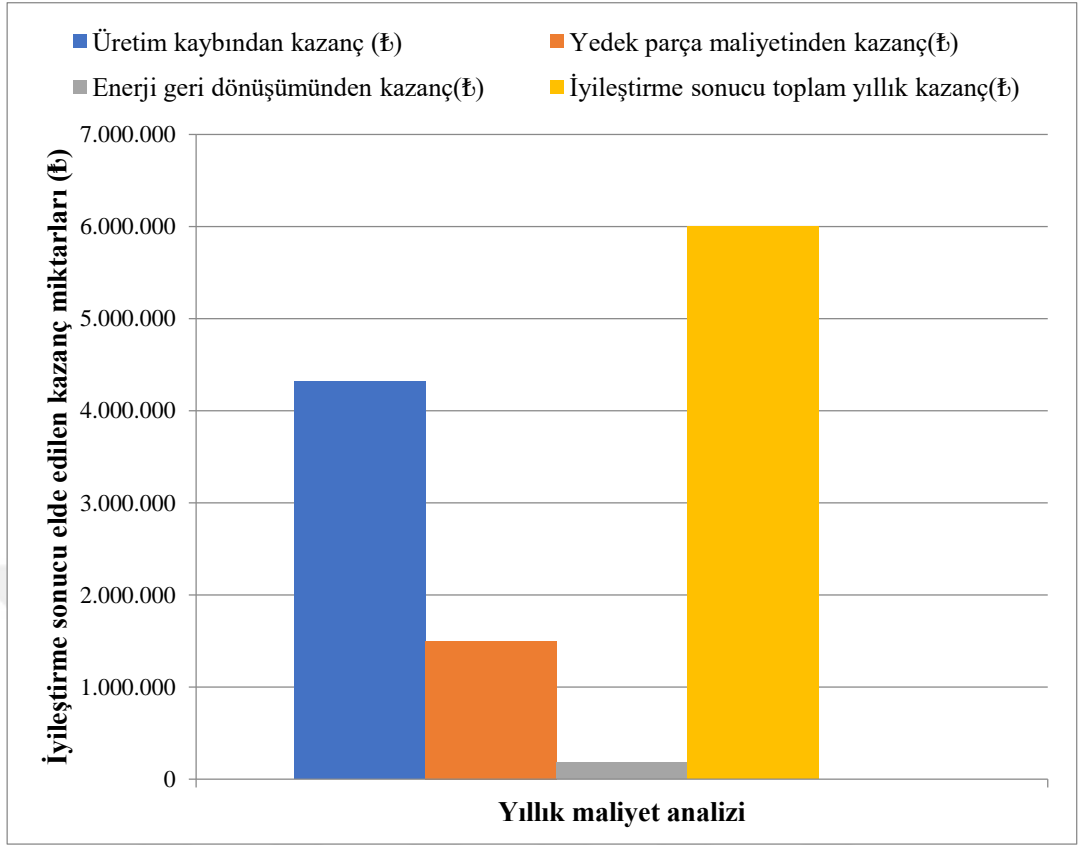
2018 yılında ise 4.672.000 ₺ olmuştur. 2 yıllık ortalama ise 4.111.500 ₺ 'dir. 2016 yılında çalışmalara başlanan ID fan kanat kaplama iyileştirmesi 2017 ve 2018 yıllarında 3 adet BOF fırınına ait ID fanlarda uygulanmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde ID fan ömürlerinin en az 2 yıl arttığı ve yıllık yedek parça maliyetinin 1.500.000 ₺ azaltıldığı tespit edilmiştir. Bu iyileştirme yapılmamış olsaydı 2017 ve 2018 yılları için ortalama yedek parça maliyeti 5.611.500 ₺ olarak gerçekleşecekti. ID fan kanat kaplama iyileştirmesi ile çelik üretim müdürlüğü mekanik bakım başmühendisliğinin yedek parça maliyetinde yıllık % 26.7 tasarruf gerçekleşmiştir.

- ✓ BOF gazı toplanamamasının maliyeti; BOF'ta sıvı ham demir, hurda ve alaşımlama elementlerinin üzerine saf oksijen üflenmesi sonucu oluşan enerji değeri yüksek BOF gazı ID fan vasıtasıyla emilerek gaz tankına gönderilmektedir. Enerji tesislerinin buhar türbinlerinde elektrik enerjisi elde edilebilmesi için kullanılan BOF gazı, gaz tankından ayrı bir fan ve borulama sistemiyle enerji tesislerine gönderilmektedir. Gaz toplama verimliliği ile geri dönüşüm kazancı arasında Şekil 5.2'de görüldüğü üzere doğru orantı bulunmaktadır.



Şekil 5.2. Gaz toplama verimliliği ile geri dönüşüm kazancı ilişkisi grafiği.

BOF gazı geri dönüşümü, Kardemir A.Ş sıvı çelik üretim maliyetini ton çelik başına ortalama 8 ₺ düşürmektedir. Yılda 2.300.000 ton sıvı çelik üretebilen Kardemir A.Ş'de BOF gazı toplama verimliliği %100 olduğunda 18.400.000 ₺ geri dönüşümden kazanç elde edilmektedir. Gaz toplama esnasında ID fan vibrasyonu normale göre 2 mm/s daha yüksek olmaktadır. ID fan vibrasyonu 7 mm/s değerlerindeyken ve ID fan vibrasyonunu düşürmek için üretim duruşu verilmediği durumlarda gaz toplama iptal edilmektedir. Bu gibi durumlarda ortalama 24 saat ID fandan gaz toplama yapılamamaktadır. Yapılan iyileştirme çalışmasıyla bir BOF için aylık 3 saat balans giderme işlemi esnasında gaz toplayamama ve vibrasyon değeri 7 mm/s üzerindeyken üretim duruşu verilmemesi nedeniyle 24 saat gaz toplayamama olumsuzlukları giderilmiştir. Üç adet BOF için aylık 81 saat, yıllık ise 972 saat gaz toplama yapılamamasının önüne geçilmiştir. Yaklaşık yıllık kazanç ise 184.000 ₺'dir. Enerji tesislerinin buhar türbinlerinde yakıt olarak; kok gazı, yüksek fırın gazı ve BOF gazı kullanılmaktadır. ID fan kanatlarına AISI 304L plaka kaplanması ile gerçekleştirilen iyileştirme çalışması Kardemir A.Ş genelindeki gaz toplamaya etkisi olmuştur (%1). Çelik üretim BOF gazı toplama verimliliğine ise yaklaşık olarak %5 oranında civarında katkı sağlamıştır. ID fan kanatlarına yapılan iyileştirme sonrası Kardemir A.Ş çelik üretim ünitesinde elde edilen yıllık maliyet-kazanç analizi şekil 5.3'de grafik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.3. ID fan kanatlarına yapılan iyileştirme sonrası Kardemir A.Ş. çelik üretim ünitesinde elde edilen yıllık maliyet-kazanç analizi grafiği.

İyileştirme yapılan her bir fanda 11 adet AISI 304L paslanmaz çelikten imal edilen kanat plakası kullanılmıştır. 1 plakanın maliyeti 1000 ₺ 'dir. 1 adet ID fan kanat kaplaması için toplam 11.000 ₺ harcanmıştır. 3 adet ID fan için yaklaşık 33.000 ₺ iyileştirme harcaması yapılmıştır. İyileştirmenin kazançları ise olası üretim kaybindan kazanç 4.320.000 ₺, yedek parça maliyetinde kazanç 1.500.000 ₺ ve enerji geri dönüşümünde kazanç 180.400 ₺ olarak hesaplanmıştır.

Aşınmaya maruz kalan parçalar zaman içerisinde makinenin tahrip olmasına sebep olabilmektedir. Endüstriyel üretim alanlarında makine parçalarının teknik hasarlarının %11'i aşınma nedeni ile ortaya çıkmaktadır. Ekonomik açıdan bu orana bakıldığında büyük maliyete neden olmaktadır [25]. ID fan kanatları üzerine AISI 304L paslanmaz çelik kaplama yapılarak ID fan çalışma ömürlerinin artırılması ve duruş sürelerinin azaltılmasının Kardemir A.Ş.'ye yaklaşık yıllık olarak 6.004.000 ₺ tasarruf sağladığı tespit edilmiştir.



#### **5.4. AŞINMA MİKTARINA ETKİSİ**

İşletmeye yeni alınan bir ID fanın işletmeye montajı ve devreye alınmasından 6 ay sonra ID fan kanatlarında aşınmalar oluşmaktadır (Bkz. Şekil 4.6). Aşınan ID fan kanatlarına kaplama iyileştirmesi yapıldıktan sonra ID fan kanatlarının 6 ay çalışması sonrasında yapılan kontrollerde aşınmalar oluşmadığı gözlenmiştir. İyileştirmeden 12 ay sonrasında yapılan gözle kontrollerde ID fan kanatlarında aşınmalar olduğu tespit edilmiştir (Bkz Şekil 4.11). Ancak oluşan aşınmaların ID fanda vibrasyonu artıracak miktarda olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan iyileştirmeler; vibrasyon nedeniyle yaşanan üretim duruşlarının azalmasına, üretim verimliliğinin iyileştirilmesine ve üretim maliyetlerinin azalmasına neden olmuştur.

Ni esaslı alaşımlar korozyon ve oksidasyona karşı dirençleri ile ön plana çıkmaktadır. Yüksek sıcaklık ve korozif ortam koşullarında tercih edilmektedir [22]. İyileştirmede kullanılan AISI 304L kalite paslanmaz çelik kimyasal bileşiminde %9-12 arasında Ni bulunmaktadır. Fan gövde-kanat malzemesi S690QL yüksek mukavemetli çelik kimyasal bileşiminde %2 oranında Ni elementi bulunmaktadır. Bu durum ID fana kanat kaplama iyileştirmesinde seçilen malzeme kalitesini bilimsel olarak desteklemektedir.

#### **5.5. GAZ TOPLAMA MİKTARINA ETKİSİ**

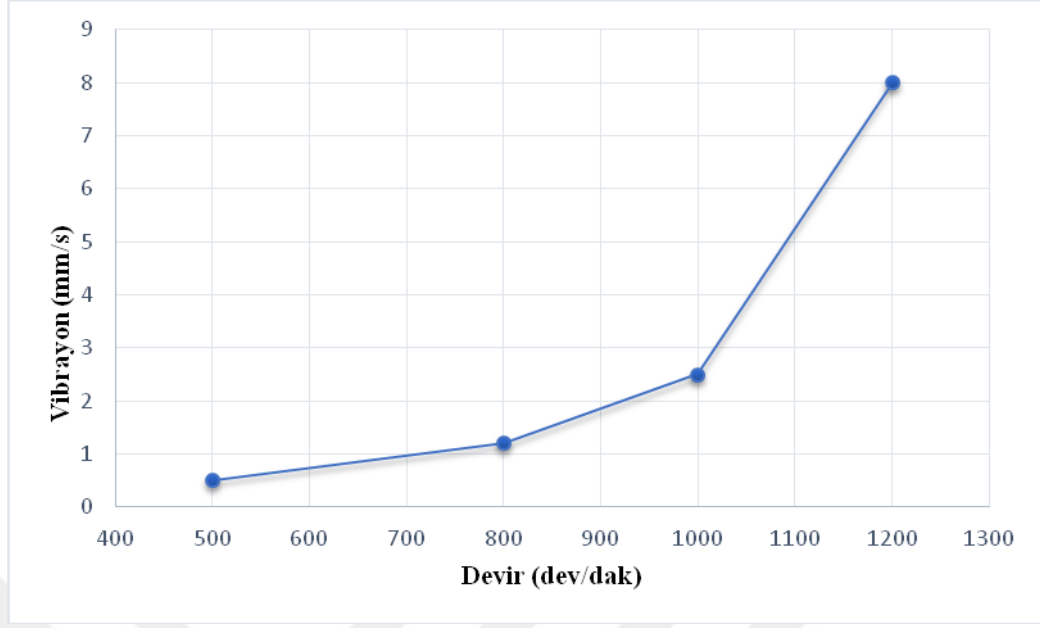
BOF gazı toplama miktarı; BOF gazı içerisinde yer alan CO gazı yüzdesiyle değişmekle beraber üretim miktarıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Kardemir A.Ş çelik üretim tesisinde 90 ton kapasiteli BOF içerisinde yer alan sıvı ham demir, hurda, kireç ve alaşımlama elementlerine 8 dakika süresince saf oksijen üflenmesi sonucunda oluşan tepkimeler neticesinde ortalama 7500 Nm<sup>3</sup>/h BOF gazı toplanmaktadır. ID fan kanatlarında oluşan aşınmalardan kaynaklı vibrasyon artışı nedeniyle zaman zaman çelik üretim tesisinde 3 saatlik arıza duruşları olmaktadır. 3 saatlik bir duruş çelik üretim tesisinde yaklaşık 30.000 Nm<sup>3</sup>/h enerji değeri yüksek gazın toplanamamasına neden olmaktadır. Gaz toplama esnasında ID fan vibrasyonu normal şartlarda çalışan ID fan vibrasyonların 2 mm/s daha yüksek olmaktadır. Bu farkın nedeni gaz toplama esnasında gazın basınçlandırmak için sıkıştırılması

esnasında ID fanın daha fazla yüke maruz kalmasıdır. ID fan vibrasyonu 7 mm/s değerlerindeyken ve ID fan vibrasyonunu düşürmek için üretim duruşu verilemediği durumlarda gaz toplama iptal edilmektedir. ID fan vibrasyonu 7 mm/s iken gaz toplama yapılırsa ID fan vibrasyon değeri 9-10 mm/s değerlerine çıkabilmektedir. Bu durum; üretim duruşuna neden olabilmektedir. ID fan vibrasyonunun yüksek olduğu durumlarda üfleme sonucu oluşan BOF gazı, yakma bacalarından yakılarak atmosfere atılmaktadır. Enerji değeri yüksek BOF gazının yakılarak atmosfere atılması hem enerjiden tasarruf sağlamayı engellemekte hem de atmosfere atılan ısı miktarını arttırarak çevreye zarar vermektedir.

ID fan kanatlarına 304L paslanmaz çelik kaplaması ile yapılan iyileştirme sonucunda vibrasyona bağlı duruştan kaynaklı 30.000 Nm<sup>3</sup>/h enerji değeri yüksek gazın toplanmasını ve atmosfere atılan ısı miktarının azaltılması sağlanarak çevreye karşı duyarlılık sağlanmıştır.

## **5.6. VİBRASYON DEĞİŞİMİNE ETKİSİ**

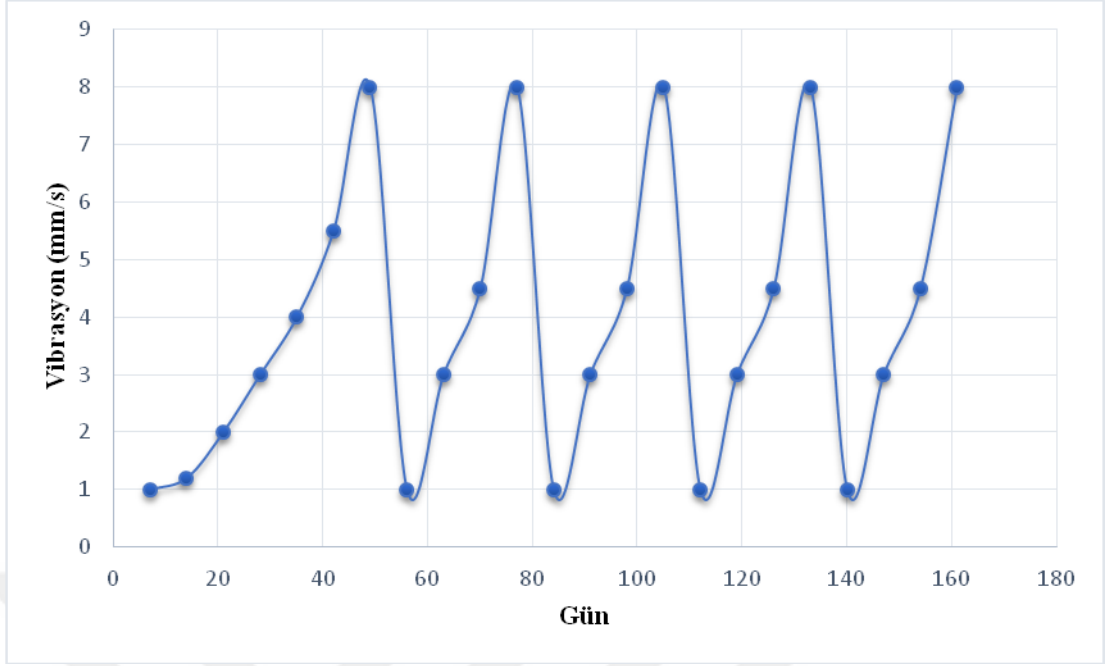
ID fan devri ile vibrasyon arasında lineer bir ilişki bulunmaktadır. Fan devri arttıkça vibrasyon da artmaktadır. Kardemir A.Ş çelik üretim tesisinde vibrasyonu yüksek bir ID fanda, ID fan devri-vibrasyon arasındaki ilişki Şekil 5.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Devir-vibrasyon ilişkisi grafiği.

Yeni bir ID fan devreye ilk kez alındığında ID fan vibrasyon değerleri 1200 dev/dak 'da 1 ile 2 mm/s vibrasyon aralığında değişmektedir. Bu nedenle, ID fanın BOF içerisindeki sıvı ham demir, hurda, kireç vb. malzeme karışımına saf oksijen üfleme devri olan 1200 dev/dak 'da ID fan vibrasyonunun 2 mm/s altında olması istenmektedir. Şekil 5.4'de gösterilen grafikte kanatlarda oluşan aşınma ve kirlenme sonucu vibrasyon değeri devir artışıyla birlikte artış göstermektedir. Kardemir A.Ş çelik üretim ünitesinde BOF içerisindeki yüksek sıcaklığa dayanıklı refrakter tuğla değişimi için 6 ay aralıklarla BOF'da bir haftalık planlı duruşlar verilmektedir. Bu planlı duruşlarda kir tabakası kaplanmış olan ID fan gövdesi ve kanatları kumlama yöntemiyle temizlenmektedir. Kumlama yöntemiyle temizlenmiş ID fan gövdesi görüntüsü gösterilmiştir (Bkz. Şekil 4.5).

İyileştirme öncesi ID fan kanatlarında oluşan vibrasyon değerlerini gösteren grafik şekil 5.5'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5. İyileştirme öncesi 1200 dev/dak devirle çalışmakta olan ID fanda gün-vibrasyon ilişki grafiği.

Şekil 5.5' de verilen grafikte görüldüğü üzere 6 ayda bir yapılan bir haftalık planlı duruşta kumlama yöntemiyle temizlenen ID fan vibrasyon değerleri 1200 dev/dak'da ilk birinci ayda ortalama 4 mm/s vibrasyona kadar çıkmaktadır. İkinci aya yaklaşırken (48 gün) kirlilik ve aşınmalar nedeniyle vibrasyon 8 mm/s'ye yaklaşmaktadır. Bu durum, emniyetli üretim için ID fana müdahale edilmesini gerektirir. ID fana Kardemir A.Ş çelik üretim müdürlüğü uzman bakım personelleri tarafından özel cihazlar ile balans giderme işlemi uygulanmaktadır. Vibrasyon giderme işlemi sonrasında ID fan vibrasyonu 1 mm/s' ye kadar düşmektedir. 3 haftada bir yapılan 3 saatlik duruşlarda zaman darlığı nedeniyle kirlilik ve aşınmalar giderilememektedir. Bu duruşlarda sadece balans giderme parçaları kaynatıldığı için vibrasyon 2-3 hafta içerisinde tekrardan 8 mm/s'ye civarına çıkmakta ve yine balans giderme işlemi uygulanmaktadır. Balans giderme işlemi 3-4 saat kadar sürmektedir. Bu da üretim kayıplarına neden olmaktadır.

BOF gazının en çok temas ettiği ID fan kanatlarında yaşanan erozif ve korozyon aşınma mekanizmalarına bağlı olarak fan kanatlarında delinmeler ya da yırtılmalar olabilmektedir (Şekil 5.6). Kardemir A.Ş çelik üretim müdürlüğünde bir yıl önce balans giderme işlemi için ID fan duruşa aldığıında 11 adet olan fan kanatından 7

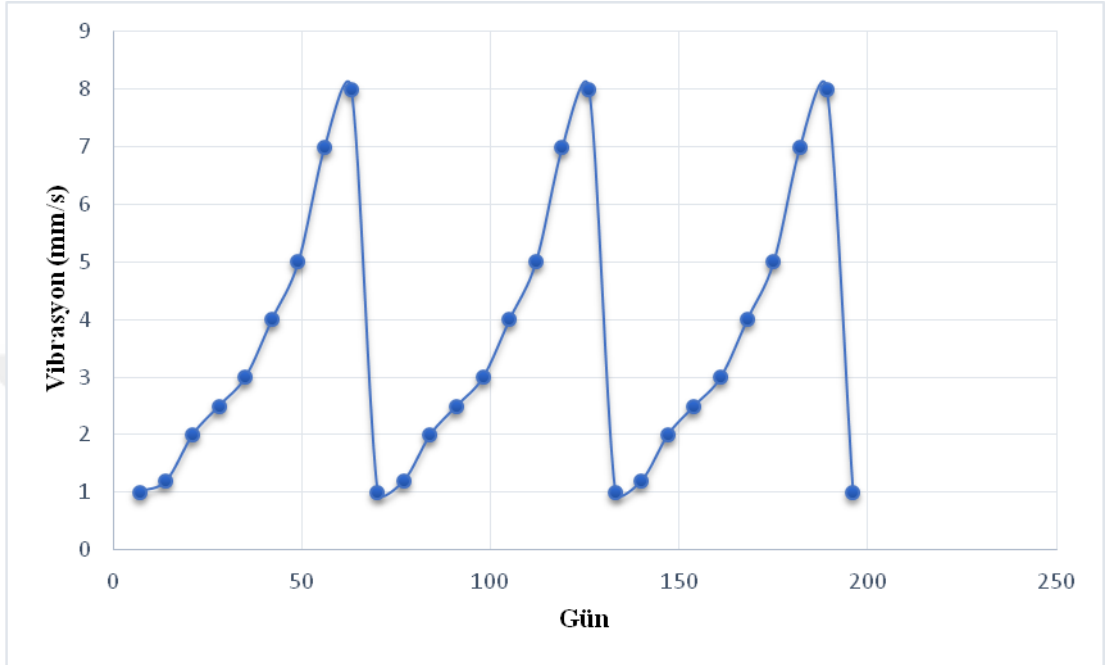
adetine delinmeler olduğu görülmüş ve fan acil olarak yedeği ile değiştirilmiştir. Bu değişim işi iki gün sürmüştür ve plansız gerçekleşen bu durum ciddi üretim kayıplarına neden olmuştur.



Şekil 5.6. Erozif ve korozif aşınma mekanizmaları kaynaklı ID fan kanatlarında oluşan aşınma görüntüleri.

Geçmişte yapılan çalışmalarda AISI 304 paslanmaz çeliğin yapısında bulunan 5 ferrit ve bunun ayrışmasından meydana gelen  $\alpha$  fazı ile metal karbürlerin M23C6 yapılarının varlığı belirlenmiştir. Bunlardan  $\alpha$  fazı ve bir miktar da M23C6 karbür yapıda bulunması aşınma direncinin yükselmesinde belli ölçülerde etkili olduğu tespit edilmiştir [27]. ID fan kanatlarına AISI 304L paslanmaz çelikten kanat kaplama iyileştirmesi sonucunda aşınma mekanizmalarına maruz kalan kanat yüzeylerinin aşınma direnci arttırılmış ve kanat yüzeylerindeki aşınma miktarları gözle görülür bir şekilde azalmıştır. Fan kanatları üzerine montajı yapılan AISI 304L paslanmaz çelik yüzeyinin kaygan özelliği sayesinde ID fan kanatlarında kir, toz birikmesi gerçekleşmemiştir. ID fan kanatlarına AISI 304L paslanmaz çeliği

kaynatılarak yapılan iyileştirmeden sonra üretimi olumsuz olarak etkileyen vibrasyonların oluşumu büyük oranda önlenmiştir. Şekil 5.7’de iyileştirme sonrasında günlere bağlı olarak elde edilen vibrasyon değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.7. İyileştirme sonrası 1200 dev/dak devirle çalışmakta olan ID fanlarda oluşan gün-vibrasyon ilişki grafiği.

İyileştirme öncesi ID fanda gün-vibrasyon grafiği (Bkz. Şekil 5.5) ve iyileştirme sonrası ID fanlarda oluşan gün-vibrasyon grafiği (Bkz. Şekil 5.7) incelendiğinde; ID fan kanatlarına kaplama iyileştirmesi yapılmadan önce bir haftalık planlı duruşlar sonrası kumlanarak temizlendikten sonra devreye alınan ID fanlarda vibrasyon 50 gün içinde 9 mm/s sınır değere yükselmiş ve çalışmaya izin vermemiştir. Vibrasyon düşürme işlemleri sonrası ID fan vibrasyonu 1 mm/s değerine kadar düşürüldükten sonra ID fan vibrasyonu aşınma artışı ve kirlenme nedeniyle kısa sürede ortalama 20 günde tekrardan 9 mm/s değerine çıkmıştır. Bu durum, üretim duruşlarına neden olmuştur. ID fanlara kanat kaplama iyileştirmesi yapıldıktan sonra ise bir haftalık duruşlar sonrası devreye alınan ID fanlarda vibrasyon 65 gün içinde 9 mm/s sınır değere yükselerek çalışmaya izin vermemiştir. Vibrasyon düşürme işlemleri sonrası ID fan vibrasyonu 1 mm/s değerine kadar düşürüldükten sonra fan vibrasyonu kanat yüzeylerinde aşınma miktarının çok az olması sayesinde 20 günde değil 60 günde tekrardan 9 mm/s değerine çıkmıştır. İyileştirme çalışması ile 1 adet ID fanın 2 ay

içinde 2 defa vibrasyon artışı kaynaklı ve en az 3'er saatlik olan duruşlarının önüne geçilmiştir. İyileştirme yapılmamış olması durumunda toplam 3 adet ID fanda yıllık en az 108 saat vibrasyon artışı nedeniyle üretim duruşu gerçekleşecekti. Ayrıca sürekli olabilecek vibrasyon artışları fan ömrünü azaltmakta ve yedek parça maliyetini arttırmaktadır.

Çamur erozyonu enerji üretim tesisleri için ciddi bir problemdir. Hasarlara neden olmadan önlenmeli veya tespiti yapılmalıdır. Tartışılan tüm tribolojik parametrelerin aşınma üzerine az ya da çok etkisi vardır ve çamur erozyonundan kaynaklı kaplanmış ya da kaplanmamış malzemelerin bozulması tesis bakım maliyetini artırmaktadır [28]. Kardemir A.Ş çelik üretim müdürlüğü tesislerinde yapılan ID fan kanat kaplama iyileştirmesi tesis bakım maliyetini düşürmüştür.

## BÖLÜM 6

### SONUÇLAR VE ÖNERİ

Bu araştırmadan elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

- ✓ Kardemir A.Ş çelik üretim tesisi bakım onarım personelleri tarafından ID fan kanatlarında oluşan aşınmaları önlemek için AISI 304L paslanmaz çelik plaka kaplama işlemi yapılmıştır. ID fan kanatlarına yapılan AISI 304L plaka kaplama neticesinde ID fanda vibrasyon oluşum süreleri uzamış ve Kardemir A.Ş çelik üretim tesisi duruşları azalmıştır. Duruşların azalması ile yıllık olarak 14400 ton sıvı çelik kaybı önlenmiştir ve 2018 yılında Kardemir A.Ş fabrikasının toplam sıvı çelik üretiminin artmasına % 0.6 oranında katkı sağlanmıştır.
- ✓ Yapılan iyileştirme çalışması ile yaklaşık olarak yıllık 4.320.000 ₺ üretim kaybının önüne geçilmiştir.
- ✓ Yapılan iyileştirme çalışması ile ID fan ömürlerinde artış olmuştur. Kardemir A.Ş yedek parça maliyetleri yaklaşık olarak yıllık 1.500.000 ₺ azalmıştır. ID fan kanat kaplama iyileştirmesi ile çelik üretim müdürlüğü mekanik bakım başmühendisliğinin yedek parça maliyetinde yıllık %26.7 tasarruf gerçekleşmiştir.
- ✓ BOF gazı geri dönüşüm sisteminde yıllık 972 saat gaz toplama yapılamamasının önüne geçilmiştir. Yaklaşık yıllık kazanç ise 184.000 ₺'dir. İyileştirmenin Kardemir A.Ş genelindeki gaz toplamaya etkisi %1 oranında olurken çelik üretim BOF gazı toplama verimliliğine ise yaklaşık olarak %5 oranında arttırmıştır.



- ✓ İyileştirmeden 12 ay sonrasında yapılan gözle kontrollerde ID fan kanatlarında aşınmalar olduğu tespit edilmiştir. Ancak oluşan aşınmaların ID fanda vibrasyonu artıracak miktarda olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan iyileştirmeler; vibrasyon nedeniyle yaşanan üretim duruşlarının azalmasına, üretim verimliliğinin iyileştirilmesine ve üretim maliyetlerinin azalmasına neden olmuştur.
- ✓ ID fan vibrasyonunun yüksek olduğu durumlarda üfleme sonucu oluşan BOF gazı, yakma bacalarından yakılarak atmosfere atılmaktadır. ID fan kanatlarına 304L paslanmaz çelik kaplaması ile yapılan iyileştirme sonucunda vibrasyona bağlı duruşlar nedeniyle enerji değeri yüksek BOF gazının toplanmamasının önüne geçilmiştir. Böylece atmosfere atılan ısı miktarının azaltılması sağlanarak çevreye karşı duyarlılık sağlanmıştır.
- ✓ AISI 304L paslanmaz çelik malzemesi Kardemir A.Ş çelik üretim tesisinde 1200 mm çapındaki gaz kanallarında ve 2800 mm çapındaki ID fanın kanatlarında uygulanmıştır. Uygulamalar sonucunda AISI 304L paslanmaz çelik malzemesinin ortam sıcaklığının 60 °C altında ve ortam pH değerinin 6 üzerinde olduğu durumlarda korozi ve erozi aşınmaya karşı, St37 çelik ve S690QL yüksek mukavemetli çelik malzemesinden daha dayanıklı olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Endüstride erozi ve korozi aşınma mekanizmalarının birlikte etki ettiği alanlarda ortam sıcaklığı 60 °C altında ve ortam pH değeri 6 üzerinde ise, aşınmaya maruz kalan ana malzeme yüzeyine AISI 304L paslanmaz çelik plakadan kaplama yapılmasını öneririm. Bu tez çalışmasında 33.000 ₺ harcama ile 6.000.400 ₺ kazanç sağlanmıştır. Düşük maliyet girdisi ile yüksek performans beklenen alanlarda aşınan ana malzeme yüzeyine AISI 304L paslanmaz çelik plaka kaplama yapılmasının faydalı olacağına inanıyorum.

## KAYNAKLAR

1. İnternet: Çelik ve Özellikleri, <http://kalitelicelikciler.tr.gg/> (2016).
2. İnternet: Demir Çelik ve Enerji Verimliliği, <http://celik.org.tr/cemtas-celik-makina-sanayi-ve-ticaret-a-s/> (2016).
3. Sezer A., “BOF Çelik Üretim Prensipleri”, *İsdemir Yayınları*, İskenderun 10-25 (2007).
4. İnternet: Alternatif Yapı Malzemeleri, <http://kisi.deu.edu.tr/burak.felekoglu/> (2017).
5. İnternet: Kaliteli Çelikçiler, <http://kalitelicelikciler.tr.gg/sekiller/> (2017).
6. “Primer Gaz Temizleme Tesisi”, *SMS Siemag, Kardemir A.Ş/* (2013).
7. İnternet: Fanlar ve Blowerlar, <http://plusengineering.org/blower-fan-nedir-nasil-calisirlar-nerelerde-kullanilirlar/> (2018).
8. İnternet: ID Fan ve FD Fan farkı, <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-ID-fan-and-FD-fan/> (2017).
9. Kiseçik, İ., “Sertleştirilmiş ve Sert Dolgu Kaynağı Yapılmış AISI 1050 Çeliğinin Aşınma Direncinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sivas, (2010).
10. Büyükkelleci, Ü., “Yeni Bir Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Bazı Metallerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2008).
11. Karabaşoğlu, M., “Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2008).
12. Ulutan, M., “AISI 4140 Çeliğinin Yüzey Sertleştirme İşlemleri ve Kaplama Yöntemleri Sonrası Mekanik Davranışlarının Araştırılması”, Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2007).
13. Puccio F. D. and Mattei L., “Biotribology of artificial hip joints”, *World Journal of Orthopedics*, 6 (1): 77-94 (2015).
14. Stachowiak, G. W. and Batchelor, A. W., “Engineering Tribology”, *Publisher Butterworth Heinemann*, 769: 430-440 (2000).

15. Karaoğlu, Y., “Bir Aşınma Test Cihazının Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2006).
16. Atamert, S., “Stability, Wear Resistance and Microstructure of Iron, Cobalt and Nickel-Based Hardfacing Alloys”, Ph.D Thesis, *University of Cambridge*, (1988).
17. İnternet: Subs Tech - Substances and Technologies “Mechanisms of Wear” [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms\\_of\\_wear](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear) (2017).
18. Chotěborský, R., Hrabě, P., Müller, M., Savková, J., Jirka, M. and Navrátilová, M., “Effect of Abrasive Particle Size on Abrasive Wear of Hardfacing Alloys”, *Research in Agricultural Engineering*, 55(3): 101–113, (2009).
19. Kaplan, M., Karaoğlanlı, A.C. ve Uyaner, M., “Katı Partikül Erozyonu ve Mühendislik Malzemeleri Üzerindeki Önemi”, *Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, Bartın Üniversitesi*, 4 (1): 31-34 (2016).
20. Sarıkaya, Ö., “Aşınmaya Karşı Yüzey Mühendisliği Yöntemleri”, *Sakarya Üniversitesi*, Sakarya (2007).
21. Shipway, P., H. and Hutchings, L. M., “The role of particle properties in the erosion of brittle materials”, *Wear*, 193: 105-113 (1996).
22. Çakır, H., “Çift katmanlı kaplanan inconel 625 alaşımının aşınma direncinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, İskenderun, (2016).
23. Wheeler, D. W. and Wood, R. J. K., “Solid particle erosion of CVD diamond coatings”, *Wear*, 233–235: 306–318 (1999).
24. Selçuk, N., “Toprak işleme tarım makinelerinde kullanılan 5630 kalite çeliğinin aşınma direncinin değişik yüzey prosesleri ile iyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2014).
25. Owsalou, R., “Aşınmaya maruz parçaların aşınma dayanımlarının araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* İzmir, (2012).
26. Erdem, E., “AISI 1060 çeliğinin erozif aşınma özelliklerinin incelenmesi ve geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).
27. Çakan, A., “AISI 304 paslanmaz çeliğinin mikro yapı ve aşınma davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Hatay, (2000).

28. Kumar, S. and Ratol, J. S., “Effects of Tribological Parameters on Slurry Erosion Behaviour of Uncoated and Coated Materials: A Review”, *Materials Engineering*, 20: 119-131 (2013).
29. Akkaş, O., “TİN kaplama parametrelerinin aşınma davranışı üzerindeki etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* İstanbul, (1998).
30. Akgün, G., “AISI 1045 çeliğinin mekanik alaşımlanmış demir esaslı tozlar ile kaplanması ve aşınma davranışının araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü* Diyarbakır, (2012).
31. Demir, A., “Farklı çeliklerin yorulma aşınmasında malzeme sertliğinin aşınma üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, (2012).
32. 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).
33. Kara, L., “Yüzeyi ince film kaplanmış 100Cr6 çeliğinin çeşitli ortamlarda sürtünme ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, (2009).
34. Uzun, A., “Borlama ile yüzeyleri sertleştirilen çeliklerin aşınma ve korozyona karşı dayanımları”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2002).
35. Demirsöz, R., “Granül Curüf Taşımada Kullanılan Boruların İç Yüzeyinin Aşınma Özelliklerinin İyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2018).
36. İnternet: Malzeme kalite bilgileri korozyon dayanımı 1.4301 (AISI 304L), [\(http://www.varzene.com/Urunler/Malzeme-Kalite-Bilgileri/14301-\(din-14307-Aisi-304l\)\)](http://www.varzene.com/Urunler/Malzeme-Kalite-Bilgileri/14301-(din-14307-Aisi-304l)) (2013).
37. “BOF gaz yıkama, soğutma ve temizleme sistemi açık çevrim kimyasal su analizi, numune 6162-6163”, *Kalite Kontrol Müdürlüğü, Kardemir A.Ş/* (2016).
38. “BOF gaz yıkama, soğutma ve temizleme sistemi ID fan gövdesi toz analizi, numune 6162-6163”, *Kalite Kontrol Müdürlüğü, Kardemir A.Ş/* (2016).

## ÖZGEÇMİŞ

Halil İbrahim EMİROĞLU 1986 yılında Kdz. Ereğli’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini Kdz. Ereğli’de tamamladı. Zonguldak Ereğli Lisesi’nden mezun oldu. 2007 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğrenime başlayıp 2011 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2012 yılında KARDEMİR A.Ş. Çelik Üretim Müdürlüğü’nde Mekanik Bakım Mühendisi olarak göreve başladı ve halen aynı fabrikada çalışmaya devam etmektedir. 2014 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : KARDEMİR A.Ş  
Çelik Üretim Müdürlüğü  
Fabrika Sahası 78170 Merkez / KARABÜK  
Tel : (543) 676 7111  
E-posta : hiemiroglu@gmail.com