



**BORLAMA İLE YÜZEYİ SERTLEŞTİRİLMİŞ AISI
420 MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN
EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

**2023
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

Oğuzhan ÇAKIR

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

**BORLAMA İLE YÜZEYİ SERTLEŞTİRİLMİŞ AISI 420 MARTENZİTİK
PASLANMAZ ÇELİĞİN EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ**

Oğuzhan ÇAKIR

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

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

**KARABÜK
Mart 2023**

Oğuzhan ÇAKIR tarafından hazırlanan “BORLAMA İLE YÜZEYİ SERTLEŞTİRİLMİŞ AISI 420 MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ

.....

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 03/03/2023

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Yusuf Aytaç ONUR (BEÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ (KBÜ)

.....

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

.....

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

Prof. Dr. Müslüm KUZU

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Oğuzhan ÇAKIR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORLAMA İLE YÜZEYİ SERTLEŞTİRİLMİŞ AISI 420 MARTENZİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN EROZİF AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Oğuzhan ÇAKIR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ

Mart 2023, 99 sayfa

Günümüz şartlarında teknolojinin oldukça hızlı ilerlediğine ve ihtiyaçlarımız doğrultusunda geliştiğine şahit olmaktayız. Bu teknolojik gelişmeleri düşüncümüzde malzeme konusunun ve bilhassa çelik türevi malzemelerin öneminin oldukça fazla olduğu söylenebilir. Yine günlük hayatımızın vazgeçilmezlerinden olan çelik hemen hemen her sektörde oldukça fazla miktarda kullanılmaktadır. Bunların başında ise inşaat, kontrüksiyon ve imalat, sağlık, gıda, enerji sektörleri gelmektedir. Kullanılacak her çeliğin seçim kriteri olarak başta mekanik özellikleri büyük önem taşımaktadır. Ülkemizde ve dünyada oldukça yaygın olarak kullanılan bir çelik türü olan paslanmaz çeliklerin endüstride kullanım alanı oldukça geniştir. Korozyona dayanım, yüksek ve düşük sıcaklıklarda çalışabilme, imal edilebilirlik, yüksek mekanik dayanım, yüzey görünümü ve kalitesi, hijyenik ve uzun ömürlü olması gibi üstün özelliklerinden dolayı paslanmaz çelikler daha çok tercih edilmektedir. Bu malzemeler kullanılarak üretilmiş

ekipmanların veya muhtelif parçaların aşınmaya maruz kalmaları sonucu ömürleri doğrudan ve olumsuz olarak etkilemektedir. Özellikle aşınmaya maruz kalan yüzeylerin sertlik değerleri ne kadar yüksek olursa aşınmaya karşı dirençleri de o derecede fazla olmaktadır.

Bu çalışmada, paslanmaz çeliklerin çeşitlerinden, borlama yönteminden, borlanmış AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğinden bahsedilip, herhangi bir ısıtma işlemi görmemiş AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliği ile borlama işlemi sonucunda yüzey sertleştirme işlemi gerçekleştirilen AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğinin erozif aşınma ortamında karşılaştırmalı olarak deneysel çalışmaları yapılmıştır. Sonuç olarak aşınma sonucunda meydana gelen kütle kaybı, yüzey pürüzlülüğü ve hazne sıcaklık değişimi miktarının çarpma hızı ve aşındırıcı kum konsantrasyonu ile doğru, çarpma açısı ile ters orantılı olduğu tespit edilmiştir. Yapılan deneyler TAGUCHI L9 yöntemi ile tasarlanmış olup verilerin analizi RSM (Response Surface Method), ANOVA, SEM ve EDX ile analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın amacı; AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğinin yüzeyinin borlama yöntemi ile kaplanıp çok daha iyi yüzey sertlik değerlerine ulaştırılarak aşınma direncinin artırılması konusunun detaylı olarak incelenmesidir.

Anahtar Sözcükler : Paslanmaz çelikler, AISI 420, martenzit, borlama, erozif aşınma
Bilim Kodu : 91421

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EROSIVE WEAR BEHAVIOR OF AISI 420 MARTENSITIC STAINLESS-STEEL SURFACE HARDENED BY BORONIZING

Oğuzhan ÇAKIR

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Recep DEMİRSÖZ

March 2023, 99 pages

In today's conditions, we are witnessing that technology is advancing very quickly and developing in line with our needs. Considering these technological developments, it can be said that the subject of materials and especially steel materials are very important. Steel, which is one of the indispensable parts of our daily life, is used in large quantities in almost every sector. At the beginning of these sectors are construction, construction and manufacturing, health, food and energy sectors. As the selection criteria of each steel to be used, its mechanical properties are of great importance. Stainless steel, which is a type of steel that is widely used in our country and in the world, is widely used in the industry. Stainless steels are preferred more because of their superior properties such as corrosion resistance, ability to work at high

and low temperatures, manufacturability, high mechanical strength, surface appearance and quality, hygienic and long life. As a result of the wear of the equipment or various parts manufactured using these materials, their lifespan is directly and negatively affected. The higher the hardness values of the surfaces exposed to abrasion, the higher their resistance to abrasion.

In this study, the types of stainless steels, boronizing method, boronized AISI 420 martensitic stainless steel are mentioned, and the experimental studies of AISI 420 martensitic stainless steel, which has not undergone any heat treatment, and of AISI 420 martensitic stainless steel, which has been surface hardened as a result of boriding, in the erosive wear environment have been made comparatively. As a result, it has been determined that the amount of mass loss, surface roughness and chamber temperature change as a result of wear are directly proportional to the impact rate and abrasive sand concentration, and inversely proportional to the impact angle. The experiments were designed with the TAGUCHI L9 method and the analysis of the data was analyzed with RSM (Response Surface Method), ANOVA, SEM and EDX.

The aim of this study; It is a detailed examination of the subject of increasing wear resistance by coating the surface of AISI 420 martensitic stainless steel with boronizing method and achieving much better surface hardness values.

Keywords: Stainless steels, AISI 420, martensite, borinizing, erosive wear

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca tüm bilgi birikimi ve tecrübesi ile her an yanımda olan, bu tez çalışmasının oluşumunda, planlanmasında ve ilerlemesinde özverili bir şekilde ilgi gösterip ve destekçim olan değerli hocam Sn. Doç. Dr. Recep DEMİRSÖZ'e teşekkürü borç bilirim.

Her anlamda yardımlarını hissettiğim hocalarım Sn. Dr. Öğr. Üyesi Ahmet Emrah ERDOĞDU, Sn. Dr. Öğr. Üyesi Abdullah UĞUR ve Sn. Arş. Gör. Mehmet Tayyip ÖZDEMİR'e, yüzey pürüzlülük ölçümleri esnasında yapmış olduğu desteklerinden dolayı hocam Sn. Doç. Dr. Mehmet Erdi KORKMAZ'a, borlama işlemi esnasında yapmış olduğu desteklerinden dolayı hocam Sn. Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI ve Sn. Nurullah ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam Karabük Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından KBÜ-BAP-22-KP-039 kodlu proje kapsamında desteklenmiştir. Verilen destekten ötürü teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca bugünlere gelmemi sağlayan ve beni yetiştiren, maddi ve manevi olarak hiçbir zaman desteklerini eksik etmeyen sevgili babam Ali ÇAKIR ve sevgili annem Necla ÇAKIR'a, hep yanımda olan kız kardeşim İrem ÇAKIR'a göstermiş oldukları destek ve sabır için tüm kalbimle teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
PASLANMAZ ÇELİKLER.....	3
2.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN TARİHÇESİ.....	4
2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI.....	5
2.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler	6
2.2.1.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları.....	7
2.2.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler	7
2.2.2.1. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri.....	9
2.2.2.2. AISI 420 Martenzitik Paslanmaz Çelikler	9
2.2.3. Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	10
2.2.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler	11
2.2.5. Çökelmeyle Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler.....	12
BÖLÜM 3	13
YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ.....	13
3.1. KARBÜRLEME (SEMENTASYON).....	14

	<u>Sayfa</u>
3.2. NİTRÜRLEME	14
3.3. NİTROKARBÜRLEME	15
3.4. KARBONİTRÜRLEME	15
3.5. BORLAMA.....	16
3.5.1. Bor Elementi ve Özellikleri	16
3.5.2. Bor Elementi Kullanım Alanları	18
3.5.3. Borlama Yöntemleri.....	20
3.5.3.1. Kutu (Katı) Borlama	20
3.5.3.2. Sıvı Borlama	23
3.5.3.3. Gaz Borlama.....	24
3.5.3.4. Pasta Borlama.....	25
3.5.3.5. Plazma Borlama	25
3.5.4. Borlama İşlemi Avantaj ve Dezavantajları	26
3.5.4.1 Borlama İşlemi Avantajları	26
3.5.4.2. Borlama İşlemi Dezavantajları.....	27
3.5.5. Borlanabilen Malzemeler	28
3.5.6. Borürlerin Genel Özellikleri	28
3.5.7. Borlanmış Yüzeylerin Genel Özellikleri.....	30
3.5.7.1. Borlayıcı Ortam ve Konsantrasyon Etkisi	31
3.5.7.2. Alaşım Elementlerinin Etkisi	32
3.5.7.3. Sıcaklığın Etkisi	33
3.5.8. Borür Tabakasının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	34
3.5.8.1. Borür Tabakasının Oluşması, Büyümesi ve Gelişmesi.....	34
3.5.8.2. Borür Tabakası Çeşitleri ve Kalınlıkları	35
3.5.8.3 Sertlik	37
3.5.8.4. Aşınma	39
3.5.8.5. İç Gerilmeler	39
3.5.8.6. Korozyon Dayanımı	40
BÖLÜM 4	42
AŞINMA.....	42
4.1. AŞINMA MEKANİZMA ÇEŞİTLERİ	43

	<u>Sayfa</u>
4.1.2. Adhezif Aşınma	43
4.1.2. Abrazif Aşınma	44
4.1.3. Eroziv Aşınma	46
4.1.3.1. Katı Partikül Erozyonu.....	47
4.1.3.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu	47
4.1.3.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu-Çamur) Erozyonu	48
4.1.3.4. Kavite Erozyonu	48
4.1.3.5. Elektro Erozyon	48
4.1.4. Koroziv Aşınma.....	49
4.1.5. Yorulma Aşınması	49
4.2. AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ.....	49
4.2.1. Aşınma Deney Yöntemleri.....	49
4.2.1.1. Ağırlık Farkı Yöntemi.....	50
4.2.1.2. Kalınlık Farkı Yöntemi	50
4.2.1.3. İz Değişim Yöntemi	51
4.2.1.4. Radyo İzotop Yöntemi	51
4.2.2. Eroziv Aşınma Deney Yöntemleri.....	51
4.2.2.1. Katı Partikül Erozyonu Deney Yöntemleri.....	51
4.2.2.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu Deney Yöntemleri.....	52
4.2.2.3. Katı Partikül Taşıyan Akışkan Ortam (Sulu Çamur) Erozyonu Deney Yöntemleri.....	53
4.2.2.4. Kavite Erozyonu Deney Yöntemleri	54
 BÖLÜM 5	 56
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	56
 BÖLÜM 6	 60
MATERYAL VE METOT	60
6.1. AŞINDIRICI PARTİKÜL HAZIRLANMASI.....	60
6.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI.....	61
6.2.1. Numunelerin Borlanması	62
6.3 TAGUCHI, RSM ve ANOVA UYGULAMALARI	64

	<u>Sayfa</u>
6.4. SULU-ÇAMUR (SLURRY) EROZİF AŞINMA DENEYLERİ.....	65
6.5. EDX ANALİZİ	69
6.6. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ.....	70
BÖLÜM 7	72
DENEYSEL BULGULAR	72
7.1. AŞINMA YÜZEYLERİ.....	74
7.2. KÜTLE KAYBI.....	77
7.3 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ.....	82
7.4. SICAKLIK DEĞİŞİMİ	86
BÖLÜM 8	89
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ	99

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Paslanmaz çelikler için Ni-Cr miktarları	5
Şekil 2.2. Martenzitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı	8
Şekil 2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler	8
Şekil 2.4. Ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısı.....	10
Şekil 2.5. Çökelmeyle sertleştirilebilen paslanmaz çelikler.....	12
Şekil 3.1 Siyah-Gri Beta Bor	17
Şekil 3.2. Kutu borlama işlemi şematik gösterimi	22
Şekil 3.3. Fe-B denge diyagramı.....	30
Şekil 3.4. İki fazlı borür tabakası şematik gösterimi.....	31
Şekil 3.4. Çeliklerde alaşım elementlerinin bor tabakası kalınlığına etkisi	32
Şekil 3.6. Borür tabakası oluşum ve büyüme aşaması.....	34
Şekil 3.7. Borür tabaka çeşitleri ve sınıflandırılması	35
Şekil 3.8. Borlanmış C45 çeliğinin tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklık parametrelerine göre değişimi.....	37
Şekil 3.9. Tek ve çift fazlı borür tabakasının iç gerilme dağılımı.....	40
Şekil 4.1. DIN 50320 standartlarına göre bir tribolojik sistem şematik görseli.....	43
Şekil 4.2. Adhezif aşınmaya ait şematik gösterim	44
Şekil 4.3. Abrazif aşınma mekanizmaları şematik gösterimi.....	45
Şekil 4.4. Abrazif aşınma türleri şematik gösterimi.....	46
Şekil 4.5. Eroziv aşınma şematik gösterimi.....	47
Şekil 4.6. Korozif aşınma şematik gösterimi	49
Şekil 4.7. Katı partikül erozyon deney düzenekleri şematik gösterimi	52
Şekil 4.8. Sıvı damlası erozyonu deney düzeneği şematik gösterimi	53
Şekil 4.9. Sulu çamur erozyonu deney düzenekleri şematik gösterimi	54
Şekil 4.10. Kavitasyon erozyonu deney düzenekleri şematik gösterimi.....	55
Şekil 6.1. Aşındırıcı SiO ₂ kumuna ait SEM görüntüsü a) elemeden önce b) elemeden sonra	61

Şekil 6.2. Numunelere ait SEM görüntüleri a) Zımpara öncesi AISI 420 b) Zımpara sonrası AISI 420.....	62
Şekil 6.3. Borlama işlemi şematik görseli.....	63
Şekil 6.4. Borlama işlemine ait görseller a) numunelerin bor tozu içerisine gömülmesi b) potaya alınan numunelerin fırına eklenmesi c) 900 °C derecede borlama d) fırından çıkan numuneler	63
Şekil 6.5. PROTHERM PLF 120/5 kamara fırın görseli	64
Şekil 6.6. Eroziyon aşınma deney düzeneğine ait şematik görsel ve fotoğraf.....	66
Şekil 6.7. Eroziyon aşınma deney düzeneğine ait şematik hazne görseli.....	66
Şekil 6.8. a) 0,600 mm endüstriyel elek b) eleme işlemi sonrası elek altı kum c) 10-4 gram hassas terazi d) 512,5 µm elenmiş aşındırıcı kum e) 0,425 mm endüstriyel elek f) görüntülemelerin gerçekleştirildiği Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü. 67	67
Şekil 6.9. Slurry eroziyon aşınma uygulaması şematik gösterimi	68
Şekil 6.10. 5 numaralı deney numunelerine ait EDX analizi yapılan bölgeler	69
Şekil 6.11. Zwick Roell ZHU3000top mikrosertlik ölçüm cihazı	71
Şekil 7.1. Borlanmış ve ham AISI 420 numuneler için 2 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 1 b) deney 2 c) deney 3.....	74
Şekil 7.2. Borlanmış ve ham AISI 420 numuneler için 4 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 4 b) deney 5 c) deney 6.....	75
Şekil 7.3. Borlanmış ve ham AISI 420 numuneler için 6 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 7 b) deney 8 c) deney 9.....	76
Şekil 7.4. Çalışmış SiO ₂ kumu.....	76
Şekil 7.5. Kütle kaybına en çok sebebiyet veren 7 numaralı deney SEM görüntüleri	77
Şekil 7.9. Kütle kaybı sonuçlarının regresyon grafiği	81
Şekil 7.10. Yüzey pürüzlülük sonuçlarının regresyon grafiği.....	85
Şekil 7.11. Hazne sıcaklık değişimine ait regresyon grafiği.....	88

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri	9
Çizelge 3.1. Ekonomik açıdan önemli bor mineralleri	18
Çizelge 3.2. Bor ürünlerinin kullanım sektörleri	19
Çizelge 3.3. Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri	22
Çizelge 3.4. Sıvı borlamada kullanılan bor sağlayıcılar ve özellikleri	23
Çizelge 3.5. Gaz formunda bulunan bor sağlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri.....	25
Çizelge 3.6. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması.....	27
Çizelge 3.7. Farklı borürler ve çeşitli özellikleri.....	29
Çizelge 3.8. Farklı sıcaklıklarda borlanmış C45 çeliğinin tabaka kalınlıkları.....	33
Çizelge 3.9. Farklı malzemelerin oluşturduğu borürlerin sertlik ve ergime dereceleri	38
Çizelge 3.10. Borlanmış ve borlanmamış bazı malzemelerin sürtünme katsayısı.....	39
Çizelge 3.11. Saf demir ve borür tabakasına ait ısıl genleşme katsayıları.....	40
Çizelge 5.1. Erozyon aşınma deney parametreleri	57
Çizelge 6.1. Aşındırıcı SiO ₂ kumun kimyasal kompozisyonu	61
Çizelge 6.2. AISI 420 numuneye ait kimyasal kompozisyonlar ve sertlik dereceleri	62
Çizelge 6.3. TAGUCHI L9 deney tasarımı.....	68
Çizelge 6.4. Borlanmış AISI 420 numuneye ait EDX sonuçları.....	70
Çizelge 6.5. Ham AISI 420 numuneye ait EDX sonuçları	70
Çizelge 7.1. Deneysel sonuçlar	72
Çizelge 7.2 Regresyon denklemleri sonucu elde edilen veriler	73
Çizelge 7.3. Regresyon denklemleri tablosu (H: Çarpma hızı, A: Çarpma açısı, K: Aşındırıcı kum konsantrasyonu, KK: Kütle kaybı, YP: Yüzey pürüzlülüğü ve SD: Sıcaklık değişimi)	73
Çizelge 7.4. Kütle kaybı için ANOVA sonuçları.....	80
Çizelge 7.5. Yüzey pürüzlülük için ANOVA sonuçları.....	84
Çizelge 7.6. Sıcaklık değişimi için ANOVA sonuçları.....	87

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A	: Amper
AC	: Alternative Current
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
Ar	: Argon
B	: Bor
BaF ₂	: Baryum Florür
BCl ₃	: Bor Triklorür
BF ₃	: Boron Triflorür
B ₂ H ₆	: Diboran
B ₄ C	: Bor karbür
C	: Karbon
Cm ²	: Santimetre Küp
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
FeB	: Demir Bor
Fe-B	: Ferroboron
Fe ₂ B	: Demir (2) Bor
Fe ₃ N	: Demir (3) Azot
Fe ₄ N	: Demir (4) Azot
g/mol	: Birim Moldeki Gram
HV	: Vickers
H ₂	: Hidrojen
H ₂ O	: Su
HCl	: Hidroklorik Asit
KBF ₄	: Potasyum Tetrafloroborat
Kg	: Kilogram

kW	: Kilowatt
mg	: Miligram
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
MPa	: Megapaskal
m/s	: Metre/Saniye
N	: Azot
NaBF ₄	: Sodyum Tetrafloroborat
NaB ₄ O ₇	: Sodyum Tetraborat
Na ₂ CO ₃	: Sodyum Karbonat
Nb	: Niyobyum
NH ₄ Cl	: Amonyum Klorür
Ni	: Nikel
P	: Fosfor
S	: Potasyum
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Tarbür
SiO ₂	: Silisyum Oksit
Ta	: Tantal
TEB	: Trietil boran
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
W/m. K	: Ternal İletkenlik
Zr	: Zirkonyum
µm	: Mikrometre
%	: Yüzde
°C	: Santigrat Derece
γ'	: Gamma Üstü
ε	: Epsilon

KISALTMALAR

A	: Çarpma Açısı
ABD	: Anabilim Dalı
AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü)
ANOVA	: Analysis of Variance (Varyans Analizi)
ASLE	: American Society of Lubrication Engineers
ASTM	: American Society for Testing and Materials
DIN	: Deutsche Institute für Normung (Alman Standartları Enstitüsü)
EDX	: Energy Dispersive X-Ray (Enerji Dağılımlı X-Işını)
H	: Çarpma Hızı
K	: Konsantrasyon
KK	: Kütle Kaybı
PRE	: Oyuklanma Direnci
RSM	: Response Surface Method
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskopi)
SD	: Sıcaklık Değişimi
TSE	: Türkiye Standartları Enstitüsü
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik
YP	: Yüzey Pürüzlülüğü

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Paslanmaz çelikler yapılarında minimum %11 oranında krom içeren ve yüzeylerinde sünek, yoğun, ince ve saydam bir oksit tabakası sayesinde korozyon direncine sahip olan bir çelik türüdür. Bu amorf tabaka sayesinde ana malzeme ile dış ortam arasında gerçekleşebilecek reaksiyon engellenmektedir. Diğer çelik türleri ile kıyaslandığında paslanmaz çelikler daha pahalıdır ancak uzun kullanım ömürleri ve bakım-onarım kolaylıkları düşünüldüğünde uzun vadede paslanmaz çeliklerin kullanımı daha ekonomik olmaktadır [4]. Korozyon direnci çok yüksek olan paslanmaz çelikler, aşınma direnci konusunda aynı tutumu sergileyememektedir. İki yüzeyin birbirine teması ile meydana gelen çarpma, kayma ya da yuvarlanma hareketleri sonucunda temas halindeki iki yüzeyde veya yalnızca birinde parça kopmasına ve bunun sonucunda kütle kaybetmesine aşınma adı verilmektedir [44]. Aşınma genel olarak istenmeyen bir durum olup triboloji biliminin ele aldığı bir konudur. Çevresel faktörlere bağlı olarak aşınma beş farklı ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar; abrazyon, adezyon, erozyon, korozyon ve yorulma aşınmasıdır. Bu çalışmanın ele aldığı erozyon aşınma, sıvı veya gaz akışkan içerisinde bulunan, boyutsal ve geometrik olarak farklılık gösteren aşındırıcı partiküllerin sürekli olarak katı yüzeylere darbeler uygulaması ile yüzeyden parça kopması durumudur [57]. Erozyon aşınmanın bir türü olan sulu-çamur (slurry) erozyon aşınması ise sıvı ya da gaz akışkan içerisinde düşük hızlarda taşınan katı partiküllerin içerisinde bulunduğu yüzeye tekrarlı olarak darbe uygulayarak yüzeyden parça kopmasına ve bu yüzden kütle kaybına sebebiyet vermesine denmektedir.

Sulu-çamur (slurry) erozyon aşınma birçok parametreye bağlıdır ve bunlardan bazıları çarpma hızı, çarpma açısı ve akışkan içerisinde yer alan aşındırıcı partikül konsantrasyon, büyüklük ve geometrisidir. Yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde aşındırıcı partikül boyutu ile aşınma miktarı arasında doğru orantı görülmektedir. Lynn R. vd. (1991) [58], Telfer C.G. vd. (2012) [60], yaptıkları çalışmalar sonucunda katı ya da gaz akışkan içerisinde yer alan aşındırıcı partiküllerin boyutlarının artması ile

meydana gelen aşınma miktarında da artış olduğunu belirlemişlerdir. Krishnan A.V. ve Lim C.Y.H. (2021) [61] yaptıkları çalışma sonucunda iki farklı boyutta olan partiküllerin aşındırıcılığını incelemişlerdir. Aşındırıcı partiküllerinin akışkan ortam içerisindeki konsantrasyon değerinde bir değişiklik olmaması şartı ile küçük boyutlu partiküllerin daha fazla aşınmaya sebebiyet verdiğini sonucuna ulaşmışlardır. Bunun sebebini ise partikül boyutundaki artış sonucunda temas eden parçacıkların azaldığı ve aşınma miktarını azalttığı şeklinde açıklamışlardır. Bir diğer önemli parametre ise çarpma hızıdır ve bu parametre ile ilgili çalışmalar incelendiğinde çarpma hızı ve aşınma miktarı arasında doğru orantı ve oldukça yüksek etki oranı bulunmaktadır. Krishnan A.V. ve Lim C.Y.H. (2021) [61], Clark H.M. (1991) [59] yaptıkları çalışma sonucunda çarpma hızının artması ile daha fazla kinetik enerji meydana geldiğini ve bu sayede yüzeyden parça koparma olayının daha fazla gerçekleştiği sonucuna ulaşmışlardır. Bu sonuca göre çarpma hızı ne kadar fazla olursa aşınma miktarı da o kadar fazla olmaktadır. Ayrıca Clark H.M. (1991) [59] çalışmasında ortam sıvısının vizkozite değeri ile aşınma miktarı arasındaki ilişkiye de yer vermiştir. Çalışmaya göre ortam sıvısının vizkozite değeri arttıkça çarpma hızı azalmakta ve böylece aşınma miktarı da azalmaktadır. Telfer C.G. vd. (2012) [60], yaptıkları çalışma sonucunda ortam konsantrasyonu ve aşınma miktarı arasında doğru orantı olduğunu, konsantrasyon arttıkça aşınma miktarında da artış olacağı sonucuna ulaşmışlardır. Aynı çalışmada çarpma açısı arttıkça aşınma miktarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Andrews N. vd. (2014) [62] çalışmalarında Stellite 6 malzemesi için yüksek çarpma açısında (90°) deformasyon aşınmasının meydana geldiğini ve yüzeyde çukur ile krater oluşumunun fazla olduğunu, düşük çarpma açısında (20°) kayma aşınmasının meydana geldiğini gözlemlemişlerdir. Bir diğer çalışmada ise Levy A. ve Chik P. (1983) [63], partiküllerin geometrik yapısı ile aşınma miktarı arasındaki ilişkiyi inceleyip, keskin köşeli parçacıkların yuvarlak ya da küresel yapıda olan parçacıklara göre daha fazla aşınmaya sebebiyet verdiği sonucuna ulaşmışlardır.

BÖLÜM 2

PASLANMAZ ÇELİKLER

Korozif ortamlarda kullanılmak için paslanmaz çelikler tercihler edilir. Bunun sebebi ise korozyon dirençlerinin, alaşımsız ve az alaşımlı olan çelik malzemelere göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Bunun yanı sıra paslanmaz çelikler, oldukça çeşitli mekanik özellikleri olan, çok düşük ve çok yüksek sıcaklıklarda kullanılabilen, plastik şekil verilebilme kabiliyetleri yüksek olan ve estetik bakımdan uygun özellikleri bünyesinde barındırmaktadır [1].

Paslanma olarak bilinen kimyasal olayın çeliklerin ve demir alaşımlarının yüzeyindeki oksitlenme sebebiyle oluştuğu ve birçok çelik ve demir alaşımının oksitlendiği bilinmektedir. Paslanmaz çelik yapısındaki krom miktarı bu çeliklerin ne kadar korozyon direncine sahip olduklarıyla doğru orantılıdır. Kromun asallığı ve demirin asallığı kıyaslandığında elektro-kimyasal gerilim serisine göre kromun asallığı demire göre daha azdır. Metallerin aktif ve pasif olma olma durumları vardır ve şu şekilde açıklanabilir; yapısında krom bulduran metallerin yüzeyleri krom ile kaplı değil ise oksidasyona ve korozyona çok yatkındırlar ve bu duruma aktif denir. Diğer bir durum olan pasiflik ise bu yüzeylerin tamamen krom ile kaplı hale gelmesi ve korozyona dirençli hale gelmesi durumudur. Metalin pasiflik durumu ortam şartlarına ve paslanmaz çeliğin tür bileşimine göre değişkenlik gösterebilir. Her şey korozyonun engellenmesine uygun olarak kurgulansa bile korozyon yine de çok yavaş bir şekilde ilerler ancak pasiflik durumu aynı ölçüde kalıcıdır, uygun şartlar sağlanamayıp krom tabakası ortadan yok olduğunda eğer tekrar uygun şartlar sağlanamaz ise paslanmaz çelik tekrar normal karbonlu ve az alaşımlı bir çelik haline gelir ve tekrar aktif hale gelip korozyona maruz kalabilir [1].

Krom miktarı kütleli olarak %10,5'e eşit veya daha fazla ve karbon miktarı kütleli olarak %1,2'ye eşit ya da daha az olan, korozyon direnci yapısındaki krom tabaka ile

sağlanan ve bu krom miktarı sayesinde doğru orantılı bir şekilde artırılan, kendiliğinden yapılanan, estetik olarak tercih edilen, ısı direnci, toplam ömür maliyeti düşük olan, geri dönüşüme uygun, biyolojik nötrlük, imal edilebilirliği ve kolay temizlenebilme özelliği, mukavemet/ağırlık performansı gibi birçok özellikleri nedeniyle tercih edilen demir alaşımlarına paslanmaz çelik denmektedir [1].

2.1. PASLANMAZ ÇELİKLERİN TARİHÇESİ

Metalurjik keşifler bakımından fazlasıyla zengin olduğu bilinen 20. yüzyılın başlarında demir-karbon etkileşimi sistematik olarak incelenip sonuçları göz önünde bulundurularak sektör içindeki kurallara göre uygulanmaya başlamıştır. General Electric Company 1911 senesinde filament üretimi sebebiyle yapısında %14 – 16 aralıklarında Cr (krom) alaşımı kullanmıştır. Bunun yanı sıra yakın tarihlerde ise bir İngiliz metalurji uzmanı olan Harry Brearley yapısında %12,8 Cr (krom) bulunduran Fe – Cr (demir-krom) alaşımları ile korozyona karşı dirençli malzemeler üretmiştir. Harry Brearley uyguladığı bir deney sonucunda %12'den fazla krom içeren malzemelerin korozyon direncinin daha yüksek olduğunu ortaya çıkarmıştır ve bu bilim insanı paslanmaz çeliğin günümüzde bu kadar ileri seviyelerde kullanılmasına geçmişteki çalışmaları ile öncülük etmiştir ve paslanmaz çeliği geliştirmiştir [2].

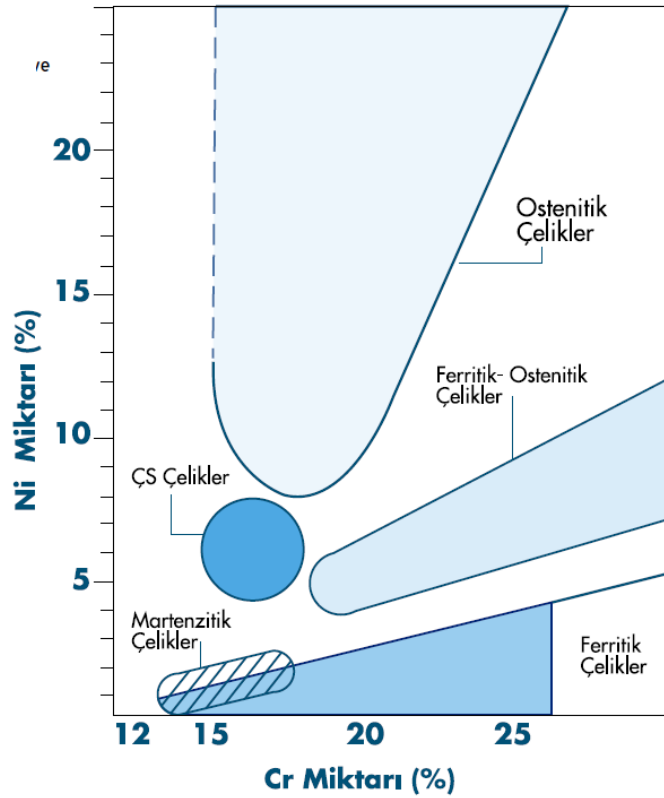
1912 yılında Eduard Maurer ve Benno Strauss östenit yapıda olan alaşım malzemelerin asitlere karşı dirençli olduklarını tespit etmişlerdir. Üretim teknolojilerinin ilerlemesi ve paslanmaz çeliğe olan rağbetin artması sebebiyle 1920 yılından günümüze kadar kimya endüstrisinde geniş bir alanda kullanılmaktadır [2].

1900'lü yılların ortalarında II. Dünya Savaşı sonucunda, alaşımlarda kullanılan Ni (Nikel) elementi temin edilemeyince bu element yerine Mn (Mangan) ve N (Azot) alaşımlarıyla bir paslanmaz çelik serisi olan AISI 200 üretilmiştir. Tekrar bu şekilde, farklı ihtiyaçlar doğrultusunda C (Karbon) ve N (Azot) oranı az olacak biçimde dubleks ferritik ve süper östenitik paslanmaz çelikler geliştirilmiştir [2].

2.2. PASLANMAZ ÇELİKLERİN SINIFLANDIRILMASI

Paslanmaz çelikler kaliteleri, oda sıcaklığında mikroyapılarındaki metalurjik farklılıklar sebebiyle östenitik, martenzitik, ferritik, dubleks ve çökeltmeyle sertleşebilen paslanmaz çelikler olmak üzere beş kategoride sınıflandırılmıştır. Paslanmaz çelikler arasındaki ilişki, yapılarında bulduklarını ve bu çeliklerin ana elementi olan krom ve nikel elementlerinin kütlece yüzdesel oranının farklılıklarıdır [17]. Şekil 2.1’de çeşitli paslanmaz çeliklerin içerdikleri Ni-Cr miktarlarının şematik gösterimi verilmiştir.

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



Şekil 2.1. Paslanmaz çelikler için Ni-Cr miktarları [4].

2.2.1. Östenitik Paslanmaz Çelikler

İçeriklerinde %16 - 26 krom, maksimum %35 nikel ve maksimum %20 mangan bulunan paslanmaz çelik grubuna östenitik paslanmaz çelik denir. Bu çelikler ısı işlem gerçekleşirken iç yapıları östenitik YMK yapıda kaldığı için östenitik olarak isimlendirilirler. Bu paslanmaz çelik türünün temel yapı taşları mangan ve nikelidir. Birçok mühendislik bölümünde kullanılmasının sebebi korozyona karşı dirençli ve şekil verilebilirliğinin kolay olmasıdır. Günümüzde kullanılan östenitik paslanmaz çeliklerinin bileşiminde %16-26 krom, %10-24 nikel, maksimum %0,40 karbon ve farklı uygulama alanları için Mo, Ti, Nb, Ta ve N bulunur [3].

Östenitik paslanmaz çeliklere su verme yoluyla sertleştirme işlemi yapılamamasının sebebi soğuma esnasında östenit ferrit dönüşüm olmamasıdır. Bu çeliklerin şekil değiştirme ve korozyona karşı dirençleri oldukça iyidir ve nemli bölgelerde kullanılmaya çok müsaittir. Molibden ve krom içeriğinin artması, güçlü çözeltilere karşı korozyon dirençlerinin iyileştirmesi rolünde görev alır [3].

Östenitik paslanmaz çelikler içyapıları bakımından kararlı ve yarı kararlı olacak şekilde ikiye ayrılır. Yarı kararlı grubu soğuk şekillendirme uygulamasına maruz kaldıklarında iç yapıları martenzitik veya iğnemsî bir biçimde içyapıya bürünürler. Bunun tam tersi olarak kararlı yapıda bulunan grup ise çok yüksek biçimde soğuk şekillendirme uygulamasına maruz kalsalar bile östenitik yapıları değişmeden durabilir [3].

Korozyon direnci ile ön planda bulunan östenitik paslanmaz çelikler, her türlü açıdan korozyona maruz kalacağı ortamlarda yapısı korunacak şekilde üretilmiştir. Bununla birlikte sıcaklığın oldukça düşük olduğu koşullardan 600 °C sıcaklıklara kadar yüksek tokluğunu muhafaza edebilmektedir [3].

2.2.1.1. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri

1. Korozyon direnci oldukça yüksektir.
2. Kaynak edilebilirlikleri yüksektir.
3. Sünek yapılarından dolayı şekil verilebilirlikleri yüksektir.

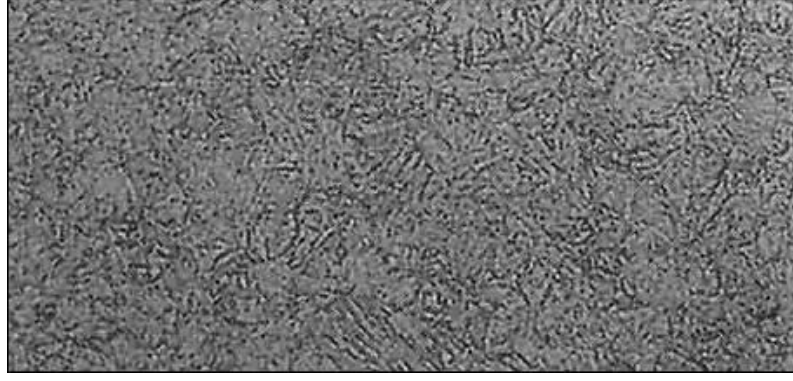
4. Temizlenmesi kolaydır.
5. Düşük ve yüksek sıcaklık değerlerinde mekanik özelliklerini korurlar.
6. Tavllanmış haldeyken manyetik değillerdir.
7. Dayanımlarını yükseltmek için yalnızca pekleşme ile artırılabilir [4].

2.2.1.2. Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Kullanım Alanları

Makine ve imalat sanayinde, asansörlerde, bina ve dış cephede, mimari uygulamalarda, gıda işleme ekipmanlarında, mutfak araç gereçlerinde, kimya tesisleri ve ekipmanlarında, klavye yaylarında kullanılmaktadır [4].

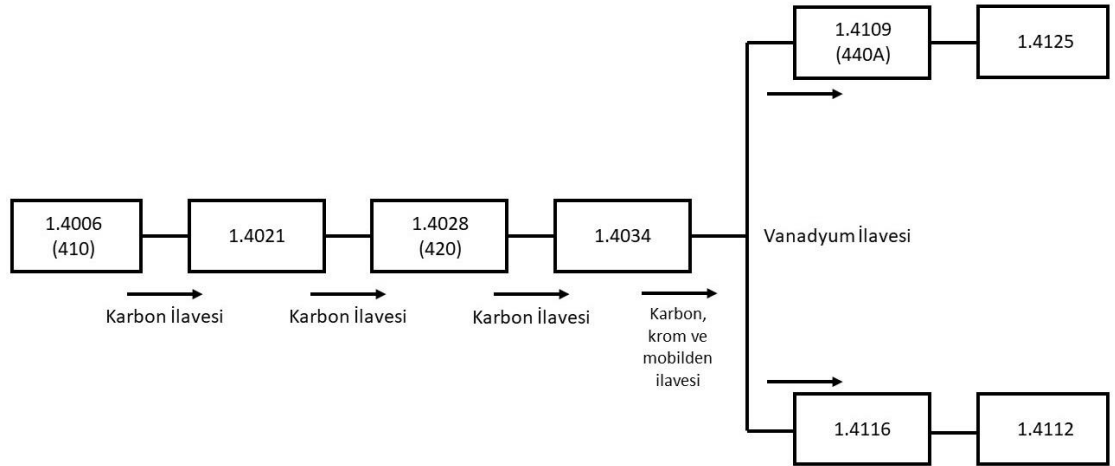
2.2.2. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler yapılarında %11,50 – 18 aralıklarında krom bulundurlar. Mukavemet ve sertlik açısından daha iyileştirilmiş özelliklere sahip olabilmesi adına alaşımlarına bakıldığında, diğer paslanmaz çeliklere kıyasla yapısında %0.15 – 1.20 daha fazla karbon, bazı durumlarda ise ilave olarak molibden bulundurabilirler [5]. Bu çelikler, imalat endüstrisinde korozyona dayanıklılık ve ısıl işleme sertleştirilebilme ihtiyaçlarının karşılanabilmesi doğrultusunda üretilmiştir [6] ve başta gaz türbin motorları, türbin kanatları, rulmanlar ve çatal bıçak takımları olmak üzere birçok mühendislik alanı uygulamasında kullanılmaktadır [7]. Martenzitik paslanmaz çeliklerin kullanım sebeplerinin başında, iyi mekanik özellikleri ve orta düzey korozyon dirençleri gelmektedir ve isminden de anlaşılacağı üzere dayanımlarını, östenit sıcaklığında bulunurken hızlı soğutma ile östenitik yapıdan martenzitik yapıya geçiş yaparak sağlar. Sertleştirilmiş (martenzitik mikro yapı) oldukça kırılgandır ve bu yapıda bulunan martenzitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinin artırılabilmesi için tavlama, süneklik ve tokluk iyileştirmeleri, kalıntı gerilim ve dislokasyon yoğunluğunu azaltmak işlemleri uygulanır [8]. Şekil 2.2'de martenzitik paslanmaz çeliğin mikroyapısının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.2. Martenzitik paslanmaz çeliğin mikroyapısı [4].

AISI formatında 4xx serisi biçiminde sembolize olarak gösterilen martenzitik paslanmaz çelikler, TSE ve DIN normuna referans alındığında yüksek alaşımlı çelikler olarak ifade edilir ve kalitelerine göre ayrıldığında X10Cr13 (403), X15Cr13 (410), X12CrS13 (416), X20Cr13 (420) ve X90CrMoV18 (440B) olarak gösterilir. Düşük karbonlu martenzitik paslanmaz çelikler olarak 410, 416 ve 430 türleri örnek verilebilirken, yüksek karbonlu martenzitik paslanmaz çelik olarak ise 440A, 440B ve 440C örnek olarak gösterilebilirler [9]. Şekil 2.3'te martenzitik paslanmaz çelik gruplarının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3. Martenzitik paslanmaz çelikler.

2.2.2.1. Martenzitik Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri

1. Orta derecede korozyona dayanımına sahiptirler.
2. Isıl işlem uygulanabilmesi halinde yüksek mukavemet ve sertliğe ulaşabilirler.
3. Kaynak edilebilme yetenekleri düşüktür.
4. Manyetiklerdir [4].

Çizelge 2.1. Martenzitik paslanmaz çeliklerin kimyasal bileşimleri [10].

TİP	BİLEŞİM %							
	C	Mn	Cr	Ni	Si	P	S	DiĞER
403	0,15	1,00	11,5-13,0	-	0,50	0,04	0,03	-
410	0,15	1,00	11,5-13,0	-	1,00	0,04	0,03	-
414	0,15	1,00	11,5-13,5	1,25-2,50	1,00	0,04	0,03	-
416	0,15	1,25	12,0-14,0	-	1,00	0,04	0,03	-
420	0,15 min	1,00	12,0-14,0	-	1,00	0,04	0,03	-
422	0,20-0,25	1,00	11,0-13,0	0,5-1,0	0,75	0,25	0,025	0,75-1,25Mo, 0,25-0,15W, 0,15-0,3 V
431	0,20	1,00	15,0-17,0	1,25-2,50	1,00	0,04	0,03	-
440A	0,60-0,75	1,00	16,0-18,0	-	1,00	0,04	0,03	0,75Mo
440B	0,75-0,95	1,00	16,0-18,0	-	1,00	0,04	0,03	0,75Mo
440C	0,95-1,20	1,00	16,0-18,0	-	-	0,04	0,03	0,75Mo

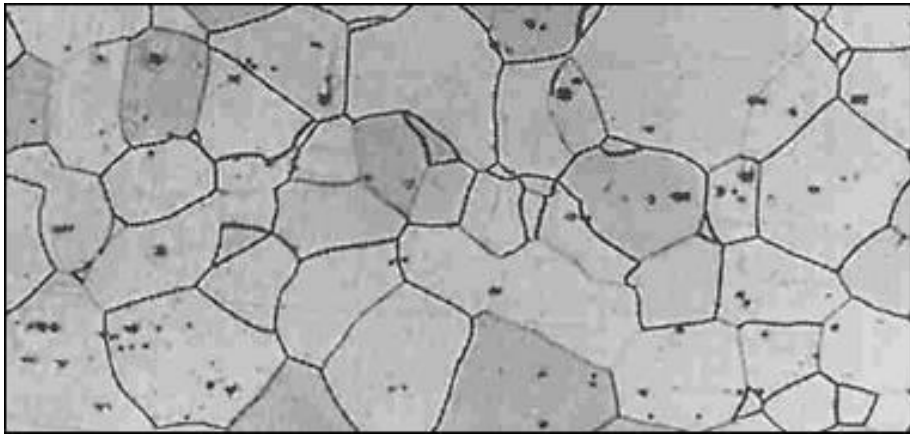
2.2.2.2. AISI 420 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

AISI 420 kalite martenzitik paslanmaz çelikler iç yapısındaki karbon miktarına göre ve üretimi sırasında iç yapısındaki karbonun ne derecede homojen dağıldığına bağlı olarak ve daha sonrasında uygulanacak ısıl işlemin doğruluğuna göre belirli sertlik derecelerine ulaşabilmektedir. Yapısında en az %12 krom içermektedir. Orta derecede korozyon dayanımı vardır. Dövülebilirlik, kaynak uygulanabilme, işlenebilirlik özellikleri mevcuttur. AISI 420 kalite paslanmaz çelikler diğer paslanmaz çelik

türlerine göre daha sert yapıdalardır. Bu paslanmaz çeliklerin bazı kullanım alanları; makine endüstrisi, petrol ve petrokimya endüstrisi, gıda sektörü, dekorasyon, ulaşım, piston ve valfler gibi çeşitler yerlerde kullanılmaktadır [11,12].

2.2.3. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler yapılarında %12-30 Cr, %0,12 civarında C bulundururlar ve maliyet bakımından östenitik paslanmaz çeliklere göre daha uygun olduğundan bu çeliklerin bir alternatifi olarak mühendislik alanında yaygın bir kullanım alanına sahiplerdir. Maliyetlerinin düşük olmasının bir sebebi de nikel içeren paslanmaz çelikler kadar iyi bir korozyon direncine sahip olmalarıyla birlikte, yapılarında nikel bulunmamasıdır. Bu çelikler hacim merkezli kübik yapıya sahiplerdir. Literatürde ısı işlem uygulanamayan malzeme olarak bilinirler ve bunun nedeni; ısı işlem uygulanma sürecinde faz dönüşümüne maruz kalamayıp, yapılarının ferritik olarak kalmaya devam etmesidir. Östenitik paslanmaz çeliklerle kıyaslandığında şekil verilebilme yetenekleri daha düşük seviyede olan ferritik paslanmaz çeliklerin, kaynak edilebilmeleri yetenekleri zayıf, süneklik seviyesi düşük ve manyetikleşme gibi özelliklere sahiptir. Bu kalitede çeliklere az miktarda karbon ilave edildikten sonra yüksek sıcaklık derecelerinde su verme işlemi uygulandığında sertleştirilebilmeleri mümkündür [3,13]. Şekil 2.4'te ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.4. Ferritik paslanmaz çeliğin mikroyapısı [4].

2.2.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler, iyi korozyon direncinin, yüksek dayanımın ve imal edilebilme kolaylığının elde edilebilmesi amacıyla ortaya çıkan ve üretimi yapılan bir paslanmaz çelik kalitesidir. Fiziksel özellik açısından hem östenitik ve hem de ferritik paslanmaz çelikler başlığı altında bulunmasıyla almasıyla birlikte ferritik paslanmaz çelikler ve karbon çeliklerine yönelimleri daha fazladır [14]. Dupleks paslanmaz çelikler korozyon dayanımı yönüyle kullanışlı bir malzeme olmasının yanı sıra yalnızca bununla sınırlı kalmayıp, maliyet, geliştirilmiş mekanik özellikleri, iyileştirilmiş kaynak yapılabilirlik özelliği ve daha uzun ömürlü olması gibi özellikleri sayesinde de endüstriyel kullanımda önemli bir rol oynamaktadır [15]. Dupleks paslanmaz çeliklerin yapılarındaki karbon miktarı %0,03-0,04 aralığındadır. Bu paslanmaz çeliklerin yapısında bulunan krom, ferrit yapıyı kararlı hale getirdiği durumda, nikel ise östenit yapısını kararlı hale getirmektedir. Krom miktarının artışı sonucu paslanmazlık azaldığından dolayı bu çeliklerin yapısında krom miktarının fazla olması istenmez. Bu yüzden dupleks paslanmaz çelik alaşımlarında %6 nikel bulunur. Ferrit yüzdesini artıran bir diğer alaşım malzemesi ise molibdendir ve aynı zamanda dupleks paslanmaz çeliklerin mekanik dayanımını da artırmaktadır. Azot ise korozyon direncini ve östenit yüzdesini artırmaya yardımcı olmaktadır. Dupleks paslanmaz çelikler kimyasal bileşimlerine göre 4 ana gruba ayrılırlar [16].

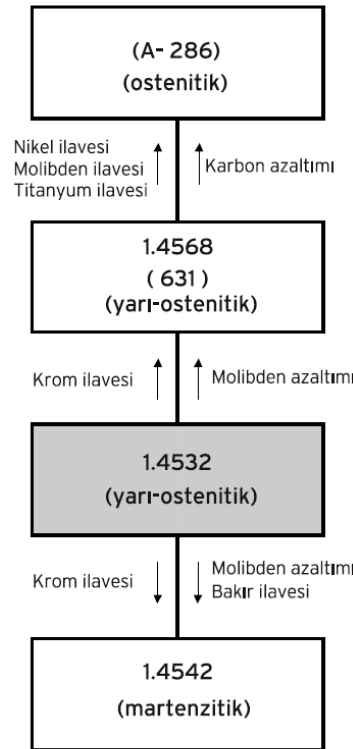
1. %23 Cr içerenler, Mo içermeyenler (PRE≈25)
2. %22 Cr ve Mo içerenler (PRE≈30-36)
3. %25 Cr ve 0-%2,5 Cu içerenler (PRE≈32-40)
4. Süper dupleks paslanmaz çelikler (PRE>40)

Paslanmaz çeliklerin korozyona karşı dayanımlarını oyuklanma direnci (PRE) olarak tanımlanan eşitlik sayesinde belirlenir ve PRE değeri ne kadar yüksek olursa malzemenin oyuklanma korozyon direnci o derece yüksek olmaktadır [16].

$$PRE = \%Cr + 3,3\%Mo + 16\%N \quad (2.1)$$

2.2.5 Çökellemeyle Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler

Çökelleme sertleşmesi (yaşlandırma) işlemi uygulanabilen paslanmaz çelikler çökellemeyle sertleştirilebilen paslanmaz çelikler olarak adlandırılır. İyapıları bakımından östenitik, yarı östenitik ve martenzitik olmak üzere üç farklı grupta yer alırlar. Çökellemeyle sertleştirilebilen paslanmaz çelikler yapılarında çok düşük miktarda karbon bulundurduklarından dolayı temel sertleştirme çökelleme işlemiyle gerçekleşmektedir. Çökelti oluşturmak amacıyla alüminyum, titanyum, niyobyum ve bakır elementleri alaşımlamada kullanılmaktadır. Çökellemeyle sertleşebilen paslanmaz çelikler süneklik ve tokluk bakımından iyi olmalarının yanında, korozyon direnci bakımında orta-iyi derecesinde bulunmaktadır. Bu paslanmaz çeliklerin akma dayanımları 1700 MPa değerlerine kadar çıkabilmektedir ve soğuk şekillendirme işleminin ardından yapılacak bir yaşlandırma işlemi bu akma dayanımını daha da yükseltebilmektedir. Endüstride en yaygın çeşidi 630 kalite olan bu paslanmaz çelikler genellikle uzay-uçak ve bir diğer teknoloji alanlarında kullanılmaktadır [4]. Şekil 2.5'te çökellemeyle sertleşebilen paslanmaz çeliklerin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.5. Çökellemeyle sertleştirilebilen paslanmaz çelikler [4].

BÖLÜM 3

YÜZEY SERTLEŞTİRME İŞLEMLERİ

Yüzey sertleştirme işlemleri malzemenin tamamının aksine sadece malzeme yüzeyinde sertleştirme işlemi sağlayan bir çeşit ısıtma işlemidir ve bununla birlikte yüzeyi sertleştirilmiş malzemelerin çekirdek yapılarında yüzeyine kıyasla daha yumuşak bir yapı elde edilmektedir. Bu sayede yüzey sertleştirme işlemi uygulanmış malzemeler yüzeylerinde yüksek aşınma direnci ve çekirdek yapılarındaki tokluk gibi özelliklerinden dolayı dişli çarklar, kam milleri ve rulmanlar gibi makine elemanlarıyla birlikte türbin uygulamaları ve otomotiv uygulamalarındaki parçalarda da kullanılmaktadır. Malzemenin yalnızca yüzeyinin sertleştirilmesinin bir faydası da maliyet bakımından daha uygun olan düşük ve orta karbonlu çelikleri tamamen sertleştirme sonucunda ortaya çıkabilecek olan mikroyapıdaki bozulmaları ve çatlamları minimuma indirmekle birlikte malzemenin tamamını gevrekleştirmeden çekirdek yapıdaki darbe dayanımı koruyabilmektir [18].

Yüzey sertleştirme işlemleri, yüzey bileşimini değiştiren ve yüzey bileşimini değiştirmeyen yüzey sertleştirme işlemleri olarak iki ana grupta incelenmektedir. Termokimyasal yüzey sertleştirme işlemleri sertleşme yeteneği olmayan çeliklere uygulanır ve bunun amacı, karbon oranları düşük olan bu çeliklerin kimyasal bileşimini değiştirmeden sertleştirme işleminin uygulanmasının olanaksız olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yöntem sayesinde sertleşme yeteneği olmayan çeliklerin yüzeylerine bir miktar alaşım elementleri difüzyon yolu ile emdirilerek yüzeylerine gerekli sertlik özelliğinin kazandırılmasının yanında iç yapılarında gerekli tokluk yeteneğini muhafaza etmesine devam etmesini sağlamaktadır. Bu çeliklerin yüzeylerine karbon, azot, bor gibi alaşım elementleri difüze edilerek sertleştirme işlemi sağlanmaktadır [19]. Yüzey bileşimini değiştiren yüzey sertleştirme işlemleri beş ana başlıkta incelenmektedir.

3.1. KARBÜRLEME (SEMENTASYON)

Sementasyon, oldukça eski zamanlardan günümüze kadar yaygınca kullanılan ve yüksek zorlanmalara maruz kalan küçük boyutlardaki miller ve dişli çarkların yüzey kabiliyetlerini artırarak, yüzeyde yüksek sertlik değeri, yorulma dayanımı ve aşınma dayanımı elde etmek için kullanılan bir yüzey sertleştirme işlemidir. Yapılarındaki karbon oranı %0,25'ten daha az olan düşük karbonlu çeliklerden üretilen makine elemanları, sementasyon ile %0,8-0,9 yüksek karbon oranına sahip bir kabuk yapısının yanında düşük karbonlu bir çekirdek yapı elde etmektedir. Bu sayede bu çeliklerin yüzeyleri oldukça sert ve iç yapıları ise tok bir yapıda bulunmaktadır. Mikroyapılarındaki ve soğuma zamanlarındaki farklılıklardan dolayı iç gerilmeler oluşabilmektedir. Yüzeyde oluşan artık gerilmeler ise bası artık gerilmeleridir ve bunun da avantajı; burma ve eğme zorlanmalarına yararlı olmaktadır. Sementasyon işleminin amacı, uygulanan parçanın aşınma, eğilme ve burulma yorulma dayanımlarıyla birlikte temas yorulma dayanımlarında iyileştirilmesini sağlamaktadır [20].

3.2. NİTRÜRLEME

Nitrürleme işlemi, düşük alaşımlı çeliklerin yüzeylerinde sertleştirme amacıyla yapılan ve metalurjik olarak en önem taşıyan termokimyasal işlemlerden biridir. Bu işlem 480-540 °C sıcaklıkları arasında azot elementinin malzeme yüzeyine difüzyonu ile yapılmaktadır ve uygulama alanları Cr, Mo, Ti ve V gibi azotla reaksiyona girip nitrür çökeltileri oluşturma özellikleri olan elementler kullanılmaktadır. Nitrürlenmiş yüzeyler katmanlı bir yapıya sahiptir ve azot elementinin çeliğe difüzyonu sonucunda ince bir dış tabakayla (beyaz tabaka) beraber kalın bir iç difüzyon tabakası içeren bir nitrür tabakasının oluşmasına yol açmaktadır. Bu dış tabaka çok sert ve gevrek olup kullanımda pullanma biçiminde aşındığından dolayı kullanım açısından dezavantajlıdır. Bu bileşik tabaka iki farklı fazdan oluşur; iç kısımda bulunan tabaka Fe₃N kristal yapılı gamma üssü (γ') fazından, dış kısımdaki beyaz tabaka ise Fe₄N kristal yapılı epsilon (ϵ) fazından oluşmaktadır. Nitrürleme bazı durumlarda çeliklerin korozyon direncini ve yorulma dayanımını artırdıkları gibi bazı çeliklerin de korozyon direncini olumsuz etkileyebilmektedir [21,22].

3.3. NİTROKARBÜRLEME

Nitrokarbürleme, 550-580 °C arasındaki sıcaklık değerlerinde karbon ve azot elementlerinin bir çelik yüzeyine difüzyonu yöntemi ile termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemidir. Bu işlem sonucunda, yüzeyde oluşan 10-20 µm kalınlıktaki ϵ -Fe₂₋₃(N, C) veya γ' -Fe₄(N, C) karbonitrür içeren tabaka (beyaz tabaka) ile bu tabaka altında bulunan difüzyon tabakası oluşmaktadır. Oluşan bu tabakalar sayesinde malzemenin yüzeyinde iyi düzeyde tribolojik özellikler ve korozyon direnci elde edilmektedir. Diğer yüzey işlemlerine kıyasla nitrokarbürleme, düşük işlem sıcaklığı, kısa işlem süresi, yüksek derecede şekil ve boyutsal kararlılığı ile kullanımda tercih edilmektedir. Gaz, sıvı ve plazma olarak üç farklı grupta incelenen nitrokarbürleme, alaşımlı çelikler, dökme demir, takım çelikleri karbon çelikleri, paslanmaz çelikler ve sinterlenmiş malzemeler üzerinde uygulanabilmektedir [23,24].

3.4. KARBONİTRÜRLEME

Karbonitrürleme, bir nitrürleme yönteminden ziyade karbonla birlikte ortam atmosferinde bulunan amonyak gazının ayrışması sonucu östenitik çelik malzemeye karbon ve azot elementlerinin difüzyonu ile gerçekleştirilen bir yüzey sertleştirme işlemidir. Karbon ve azot atomları 800-900 °C'de eş zamanlı olarak malzeme yüzeyine yayılır ve östenitik yapı martenzitik yapıya dönüşmektedir. Azot kullanımı sertleştirmeyi artırdığı için yapıdaki oluşacak çatlama ve çarpılmalar oldukça az olasıkta gerçekleşmektedir. Karbonitrürleme işlemi, tipik bir gaz karbürlemeden daha kısa süre ve daha düşük sıcaklıklarda çalışma imkânı sağlamaktadır. Özellikle sert, aşınmaya dirençli olması istenen 0,075-0,75 mm kalınlıklarında kabuk yapılar elde edilmektedir. Karbonitrürlenmiş bir çeliğin kabuk yapısı ve karbürlenmiş bir çeliğin kabuk yapısıyla kıyaslandığında, içeriğinde bulunan azot atomları sayesinde karbonitrürlenmiş çeliğin yüzeyinde daha sert ve aşınma direnci daha yüksek bir kabuk yapı görülmektedir. Böylece, karbonitrürleme ve su verme yöntemi kullanılarak, karbon veya düşük alaşımlı çelik kullanılarak istenilen kabuk derinliğine göre daha düşük maliyet ve daha kısa sürede yüzey sertlik değeri daha yüksek olan bir malzeme üretilebilmektedir. Genellikle karbonitrürleme işlemi uygulanan çelikler %25'ten düşük karbon oranı içermektedir [19,25].

3.5. BORLAMA

Borlama, özellikle abrazif ve adhezif aşınma ortamlarında zaman ilerledikçe daha da tercih edilen malzemenin yüzey bileşimini değiştiren bir yüzey sertleştirme yöntemidir. Borlama ile çeliklerin yüzeylerinde bor elementinin difüzyonu sağlanarak yüksek sertlik derecelerine ulaşılması sonucu bu çeliklerin korozyon ve aşınma dirençlerini artırılmasının yanında yorulma dirençlerinde etkisi sınırlı olmaktadır. Borlamanın en avantajlı yönü tüm demir esaslı malzemelere uygulanabilir durumda olması ve pahalı parçalar yerine borlanmış ve bu şekilde eşit mekanik özelliklere sahip olan parçaların birçok kullanım alanına sahip olmasıdır. Borlama sonucunda parça yüzeyinde Fe_2B ve FeB fazları oluşmaktadır ve bu fazlar sayesinde parçanın sertliği, malzeme özellikleri ve operasyonun başarılı bir şekilde uygulanmasına göre, 1500-2000 HV değerlerine ulaşmaktadır. Borlama ortamının özellikleri, sıcaklık değeri ve operasyon süresine bağlı olarak oluşan borür tabakanın özellikleri ve kalınlığı meydana gelmektedir. Kabuk yapısında, Fe_2B olmak üzere tek bir faz ya da FeB üst kısımda, Fe_2B ise alt kısımda olacak şekilde iki fazda aynı anda bulunabilmektedir.

Borlama işlemi ortamında oksidasyondan kaçınmak amacıyla koruyucu bir gaz olan argon gazı bulunup ve 800-1050 °C sıcaklıkları arasında uygulanmaktadır. 1-12 saat aralığında gerçekleştirilen borlama işlemi sonucunda 30-150 µm kalınlığında borür tabakası oluşmaktadır. Darbesiz kullanım alanlarında, özellikle abrazif aşınmaya maruz kalacak alanlarda bu tabaka kalınlığı 350-500 µm değerline ulaşabilmektedir ve bu sayede malzeme ömründe oldukça fazla bir artış olmaktadır. Borlama işlemi uygulanacak malzeme alaşımı veya karbon içeriği ne kadar fazla olursa borür tabaka kalınlığı o oranda azalmaktadır. Karbon atomları borür tabakada erimez ve sert borür tabaka altında bir karbon difüzyonu oluşturmaktadır [26].

3.5.1. Bor Elementi ve Özellikleri

Bor elementi, periyodik tabloda 3A grubunun ilk ve kütlece en hafif üyesi olan “B” simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 g/mol, yoğunluğu 2,84 g/cm³, ergime noktası 2200 °C, kaynama noktası 2250 °C olan ve metal ile ametal arası yarı iletken bir elementtir. Bor, kararlı bir yapıda bulunmadığından ve diğer

elementlerle reaksiyona girme isteğinden dolayı doğada saf halde değil, tuz halde bulunmaktadır. Yeryüzünde 230 çeşit civarında bor minerali vardır ve bor atomları oksijen ile tepkimeye girmeye eğimli olması sebebiyle bor-oksijen bileşikleri bulunmaktadır ve bunlara borat adı verilmektedir. Bor elementi, birçok metal ve ametal element ile bileşik oluşturabilme özelliklerinden dolayı, mühendislik uygulamalarında oldukça çeşitli alanlarda kullanıma olanak sağlamaktadır.

Bor elementi ^8B , ^{10}B , ^{11}B , ^{12}B , ^{13}B izotoplarından meydana gelmektedir ancak en kararlı oldukları yapıları ^{10}B , ^{11}B izotoplarıdır ve sırasıyla %19,1-20,3 ve %79,7-80,9 oranlarında doğada bulunmaktadırlar. Türkiye’de cevher yatakları en fazla olan ^{10}B izotop yapısına sahip bor atomudur [27].

Doğadaki bor elementi serbest bir halde bulunamadığından dolayı yapay bor elde edilmesi gerekmektedir. Bu yapay bor amorf ve kristal yapıda olmak üzere iki farklı biçimde elde edilmektedir. Amorf borun yoğunluğu $2,34 \text{ g/cm}^3$, siyah ya da kahverengi toz renkte, kristal borun yoğunluğu $2,33 \text{ g/cm}^3$, siyah renkte, sert ve kırılmandır. Kristal bor; orthorombol ve tetragonal kristal kafes yapısına sahiptir [28]. Şekilde 3.1’de siyah-gri beta bor cevheri gösterilmektedir.



Şekil 3.1 Siyah-Gri Beta Bor [28].

Bor elementinin keşfi, 19. yüzyılın başlarında Joseph Louis Gay-Lussac ve Louis Jacques Thenard isimli iki Fransız bilimadamının yanı sıra Sir Humphery Davy isimli

bir İngiliz bilimadamı tarafından da oldukça yakın tarihlerde bu üç bilimadamının da bor elementini ayrıştırılmalarıyla gerçekleşmiştir. Bütün bu yapılan çalışmalara rağmen %99 saflığa sahip kristalize yapıdaki bor 1909 yılında elde edilebilmiştir. Doğada bulunan yaklaşık 230 çeşit bor mineralinin tamamı ekonomik açıdan önem taşımamaktadır ve ekonomik değere sahip olan bor minerallerine yataklık yapan sayılı yerler bulunmaktadır. Yapısındaki B_2O_3 (bor oksit) bileşiği bakımından değer kıyaslaması yapılan bor elementi, ne kadar yüksek oranda B_2O_3 bileşiği içeriyorsa o derece daha değerli kabul edilmektedir [29]. Ekonomik açıdan değerli bor mineraller örnekleri Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Ekonomik açıdan önemli bor mineralleri [29].

Mineral	Kimyasal Formülü	B_2O_3 (%)	H_2O (%)	Bulunduğu Yerler
Boraks (Tinkal)	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	36,5	47,2	Türkiye (Kırka), ABD, Arjantin
Kernit	$Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$	51,0	26,4	ABD, Arjantin
Kolemanit	$CaB_6O_{11} \cdot 5H_2O$	50,8	21,9	Türkiye (Emet, Bigadiç, Kestelek), ABD, Meksika
Üleksit	$NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$	43,0	35,6	Türkiye (Bigadiç), ABD, Şili
Probertit	$NaCaB_5O_9 \cdot 5H_2O$	49,6	25,6	ABD
Szaybelit	$MgBO_2(OH)$	41,4	10,7	Kazakistan, Çin
Datolit	$Ca_2B_4Si_2O_{12} \cdot 2H_2O$	26,7	5,6	Doğu Rusya ve Kazakistan
Sasolit	H_3BO_3	56,3	43,7	İtalya

3.5.2. Bor Elementi Kullanım Alanları

İlk olarak bilinen ve kullanımına başlanılan bor minerali tinkal (Sodyum Tetraborat-Boraks), birkaç medeniyet tarafından oldukça eski zamandan beri kullanılmaktadır. Sümerler ve Etiler dönemine dayanan bu süreçte bor minerali, oksitlenmiş metallerin yüzeylerinde meydana gelen oksit tabakalarını çözme amacıyla altın ve gümüş gibi değerli madenlerin lehim işlemlerinde, Mezopotamya ve Mısır kesimlerinde antiseptik amacıyla, cam ve seramik üretimi için Çin’de, Roma döneminde arenaların taban kısımlarında dezenfektan görevinde ve cam yapımında, Araplarda ise ilaç sektöründe boraks kullandıkları bilinmektedir [30]. Çizelge 3.2’de bor elementinin kullanım alanları ve kullanım yerleri gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. Bor ürünlerinin kullanım sektörleri [30].

Kullanım Alanı	Kullanım Yerleri
Savunma Sanayi	Zırh plakalar, seramik plakalar, ateşli silah namluları, fişek vb.
Cam Sanayi	Borosilikat camlar, laboratuvar camları, uçak camları, borcam, pyrex, izole cam elyafı, tekstil cam elyafı, optik lifler, cam seramikleri, şişe, diğer düz camlar, otomotiv camları vb.
Elektrik ve Bilgisayar Sanayi	Mikrodalga tüpleri, sensörler, süper iletkenler, yarı iletkenler, magnetler, elektron emitterleri, mikro çipler, lcd ekranları, cd sürücüler, akım levhaları, bilgisayar ağlarında; ısıya-aşınmaya dayanıklı fiber optik kablolar, vakum tüpler, dielektrik malzemeler, elektrik kondansatörleri, kapasitörler, gecikmeli sigortalar, bataryalar, piller, laser yazıcı tonerleri vb.
Enerji Sektörü	Gaz türbinleri, yüksek ısı transistörleri, bor hidrür yakıtları(boranlar), ısı enerjisi depolayıcılar, piller, hidrojen depolayıcılar, güneş enerjisinin depolanması, güneş pillerinde koruyucu olarak, hücre yakıtları vb.
Görüş Sistemleri	Kamera ve mercek camları, fotoğraf makinaları, dürbünler, banyo ve film imalatları
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte ediciler, antiseptikler, diş macunları, lens solüsyonları, kolonya, parfüm, şampuan vb.
İletişim Araçları	Cep telefonları, modemler, televizyonlar vb.
İnşaat Sektöründe	Çimentoya mukavemet artırıcı ve izolasyon amaçlı
Kâğıt Sanayi	Geri kazanılan kağıtların mürekkeplerinden arındırılması, yüksek kaliteli kağıtların parlaklaştırılması, kâğıt hamurunu beyazlatılması
Kimya Sanayi	Bazı kimyasalların indirgenmesi, elektrolitik işlemler, flotasyon ilaçları, banyo çözeltileri, katalistler, atık temizleme amaçlı olarak, petrol boyaları, yanmayan ve erimeyen boyalar, tekstil boyaları, yapıştırıcılar, soğutucu kimyasallar, korozyon önleyiciler, mürekkep, pasta ve cilalar, kibrit, kireçlenme önleyicileri, dezenfektan kimyasallar, kozmetikler, yumuşatıcılar, sabun, toz deterjanlar, toz beyazlatıcılar, ağartıcılar, parlaticılar, ahşap emprenye çözeltileri, mumyalama vb.
Koruyucu	Ahşap malzemeler ve ağaçlarda koruyucu olarak, boya ve vernik kurutucularında, küf ve mantar önleyiciler, vb.
Makine Sanayii	Manyetik cihazlar, zımpara ve aşındırıcılar kompozit malzemeler, titreşim söndürücü malzemeler, sert malzemeler, motorlar, katı yağlayıcılar, yüksek sıcaklık sızdırmazlık contaları, yüksek performanslı motor yağları, vb.
Metalürji	Kaplama elemanları, yüksek sıcaklık refrakterleri, kaplama sanayiinde elektrolit olarak, paslanmaz ve alaşımlı çelik, sürtünmeye-aşınmaya karşı dayanıklı malzemeler, kaynak elektrotları, metalürjik flaks, briket malzemeleri, lehimleme, döküm malzemelerinde katkı maddesi olarak, kesiciler, kompozit malzemeler, zımpara ve aşındırıcılar vb.
Nükleer Sanayi	Nükleer atık depolama (kolemanit cam bloklar), reaktör aksamları, nötron emiciler, reaktör kontrol çubukları, nükleer kazalarda güvenlik amaçlı ve nükleer atık depolayıcı olarak, nükleer teknolojiye emniyet malzemeleri, vb.

Çizelge 3.2. Bor ürünlerinin kullanım sektörleri [30].

Otomobil Sanayi	Titreşim söndürücü malzemeler, hava yastığı şişirme mekanizmaları, bor hidrür yakıtları (boranlar), ısı enerjisi depolayıcılar, hidrojen depolayıcılar, hava yastıklarında, hidroliklerde, plastik aksamda, yağlarda ve metal aksamlarda, ısı ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla, antifrizler, vb.
Seramik Sanayi	Emaye, fayans, porselen boyaları, sırlar, vb.
Spor Malzemeleri	Kayak aksamları, tenis raketleri, ok-yay, balık oltaları, golf sopaları, darbe söndürücüler, vb.
Tarım Sektörü	Sentetik gübreler, biyolojik gelişim ve kontrol kimyasalları, küf ve mantar önleyiciler, böcek-bitki öldürücüler, yabancı otlar, vb.
Tekstil Sektörü	Isıya dayanıklı kumaşlar, yanmayı geciktirici ve önleyici selülozik malzemeler, izolasyon malzemeleri, tekstil boyaları deri renklendiricileri, dericilikte kireç çöktürücü, suni ipek parlatma malzemeleri, vb.
Tıp	Yapay organlar, antibiyotikler(boromicyn), osteopoz tedavilerinde, alerjik hastalıklarda, psikiyatride, kemik gelişiminde ve artiritte, menopoz tedavisinde, bntc terapi yöntemiyle beyin kanserlerinin tedavisinde tümör öldürücüler, manyetik rezonans görüntüleme cihazlarında, vb.
Uzay ve Havacılık Sanayii	Sürtünmeye-aşınmaya ve ısıya dayanıklı malzemeler, roket yakıtı, uydular, uçaklar, helikopterler, zeplinler, balonlar, radar dalgası soğurucular, vb.

3.5.3. Borlama Yöntemleri

Borlama işlemi yüksek sıcaklıklarda (850-1050 °C) ve 1-12 saat aralıklarında uygulanan bir yüzey sertleştirme işlemi olmasıyla birlikte kullanımdaki amaçlarından birisi de sertlik derecesi neredeyse elmasa yakın olan bor elementini kullanarak diğer yüzey sertleştirme işlemlerine kıyasla uygun sıcaklık değeri, kullanılan malzeme sertliği, operasyon ortamı ve proses süreleri gibi parametreler de dikkate alındığında daha yüksek sertlik değerleri elde etmektir. İstenen sertlik değeri, prosese uygunluk ve malzeme cinsine göre bor, katı, sıvı, gaz vb. formlarda bulunabilmektedir. En yaygın kullanım alanına sahip termo-kimyasal borlama işlemleri kutu, sıvı, gaz ve pasta borlama olarak bilinirken termo-kimyasal olmayan borlama yöntemi için ise plazma borlama örnek gösterilebilmektedir.

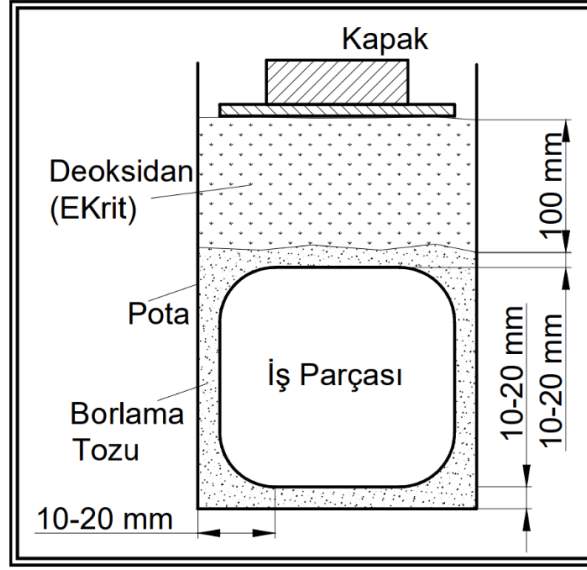
3.5.3.1. Kutu (Kati) Borlama

Kutu borlama, kısmen kullanım pratikliği, güvenli oluşu, kullanılan toz içeriğinin kolay değiştirilebilir ve ekipman sayısının az olması sonucunda ekonomik açıdan

büyük avantaj sağlaması sebebiyle en çok kullanılan borlama işlemi konumundadır. Bu borlama yöntemi için numunelerin, temizlenip pürüzsüz bir yapıya getirildikten sonra 3-5 mm kalınlığında bulunan yüksek sıcaklıklara dayanıklı içerisinde borlama tozu bulunan bir çelik kutu içerisinde paketlenmesi ile yapılmaktadır. Bu şekilde borlanacak yüzeyler çeşitli yüzey kalınlıklarında bor tabakası ile kaplanmaktadır. Katı borlama için birçok farklı bor bileşiğiyle birlikte, seyrelticiler ve aktivatörler kullanılmaktadır [31].

Bor sağlayıcı maddeler olarak bor karbür (B_4C), ferroboron (Fe-B) ve amorf bordur (B). Özellikle ferroboron ve amorf bor, yapılarındaki bor oranları oldukça yüksek ve bor tabakaları oluşumuna sebep olmalarının yanında ekonomik açıdan bor karbüre kıyasla oldukça pahalıdır. Silisyum karbür (SiC) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) seyreltici görevi görerek akışkanlık sağlar ve reaksiyonda yer almamasıyla birlikte SiC bor miktarını kontrol eder, borlama ajanlarının kaybolmasını önler. $NaBF_4$, KBF_4 , $(NH_4)_3BF_4$, NH_4Cl , Na_2CO_3 , BaF_2 ve NaB_4O_7 borlama aktivatörleri olarak kullanılmaktadır. Bor sağlayıcı madde olarak Ekabor tozu gibi çeşitli ticari bor sağlayıcılarda kullanılmaktadır [31]. Amorf bor ve Al_2O_3 kullanılarak uygulanan kuru borlama işlemi sonucunda tabaka kalınlığı sınırlı olmaktadır ancak tüm yüzeyde eşit dağılmaktadır. Bor karbür kullanımında ise her koşulda kaplama gerçekleşmemektedir. Kaplamanın gerçekleşmeme durumu; bor karbür ile kalsiyum klorür, baryum klorür ve borik asit ilave edilmesi, kaplamanın gerçekleşme durumu; bor karbür ile sodyum klorür, HCl , amonyum klorür ve özellikle boraks ilave edilmesi durumları olmaktadır. Literatüre göre optimum boraks oranı %16 olduğu gözlemlenmektedir. İçeriğinde boraks olan katı bor bileşenlerinden serbest bor Eşitlik 3.1'deki gibi elde edilmektedir [32].





Şekil 3.2. Kutu borlama işlemi şematik gösterimi [33].

Ticari borlama toz karışımlarının bileşimleri aşağıda verilmiştir [31].

1. %5 B₄C, %90 SiC, %5 KBF₄
2. %50 B₄C, %45 SiC, %5 KBF₄
3. %85 B₄C, %15 Na₂CO₃
4. %95 B₄C, %5 Na₂B₄O₇
5. %84 B₄C, %16 Na₂B₄O₇
6. Amorf bor (%95-97)
7. %95 amorf bor, KBF₄

Çizelge 3.3. Kutu borlama işleminde kullanılan bor sağlayıcı maddelerin özellikleri [32].

İsim	Formül	Kütle (g/mol)	Teorik bor miktarı (%)	Ergime sıcaklığı (°C)
Amorf bor	B	10,82	95-97	2050
Ferro bor	-	-	17-19	-
Bor karbür	B ₄ C	55,29	77,28	2450

Kutu borlamada kullanılan pota, borlama esnasında bor sağlayıcıların kaybolmaması adına kurşun elementi ile kaplanıp tüm malzemeler eklendikten sonra kapak kısmı demir cürufu ya da beton ile kapatılmalıdır. Potanın hacmi yüksek iç gerilme ve çatlaklara sebep olmaması adına fırının hacminin %60'ını geçmemelidir [32].

3.5.3.2. Sıvı Borlama

Borlanacak malzemelerin 2-6 saat süre ve 800-1000 °C sıcaklık değeri arasında bor verici sıvı ortamda bekletilerek bor yayınının gerçekleştirildiği borlama türü sıvı borlama olarak adlandırılmaktadır. Normal sıvı borlamada ortamın ana malzemesi boraktır ve aktivatör olarak B₄C, SiC, Zr, B kullanılmaktadır.

Elektroliz yöntemi ile sıvı borlama ele alındığında ise işlem sıcaklığı aralığı değişmemekle birlikte tuz banyosu olarak elektrolitin kullanıldığı bir elektroliz uygulamasının özelliklerine benzer özellikler taşımaktadır. Katot ve anot yapılar için sırasıyla iş parçası ve grafit kullanılmaktadır. İşlem süresi 30 dakika-5 saat süre aralıklarında değişebilirken, cm² başına düşen akım değeri 0,2-0,7 A iken gerilim değeri ise 2-12 volt olarak uygulanmaktadır [34].

Çizelge 3.4. Sıvı borlamada kullanılan bor sağlayıcılar ve özellikleri [34].

Malzeme	Formül	Kütle (g/mol)	Teorik bor miktarı (%)	Ergime sıcaklığı (°C)
Boraks	Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	381,42	11,35	-
Susuz boraks	Na ₂ B ₄ O ₇	201,26	21,50	741
Meta bor asidi	HBO ₂	43,83	24,69	-
Sodyum bor florid	NaBF ₄	109,81	9,85	-
Borik oksit	B ₂ O ₃	69,64	31,07	450
Bor karbür	B ₄ C	55,29	78,28	2450

Elektrolitin ana kompozisyonu boraks ve borik asitten oluşmaktadır ve borik aside birtakım aktivatörlerin ilavesi yapılmaktadır ve ikincil bir görev olarak bu aktivatörlerden banyonun alışkanlığını artırması da istenmektedir. Her iki sıvı borlama yönteminde de (normal sıvı, elektroliz) ekonomik anlamda uygunluk ve uzmanlık gerektirmeme gibi ortak avantajların yanında, 850 °C altında uygulanması oldukça zor olması, geometrik açıdan karmaşık olan parçalarda akım farklılıklarından dolayı farklı tabaka kalınlıkları meydana gelebilme ihtimali, parça yüzeyine yapışan tuz tabakasının temizlenmesinin maliyeti daha da artırması, büyük boyutlu parçalara uygulanamaması ve elektroliz yönteminde tesisat maliyetinin oldukça yüksek olması gibi ortak dezavantajlar da mevcut olmaktadır [34].

3.5.3.3. Gaz Borlama

Gaz borlama, borlama işleminin gerçekleştiği ortamın gaz fazında olduğu durumlarda gerçekleşen borlama işlemi olarak adlandırılmaktadır. Bu işlem dış ortamdan bağımsız, sızdırmaz kapalı bir sistem olacak şekilde paslanmaz çelikten imal edilmiş bir oda içerisindeki numune üzerine Ar, H₂ gazlarına ilave olarak bir evapotartör yardımıyla gaz haline getirilmiş bir bor sağlayıcı (BCl₃ gibi) gaz karışımının püskürtülmesi ile gerçekleştirilmektedir [35].

Gaz borlama uygulamasında birçok bor sağlayıcı gazlaştırılıp kullanılmaktadır. Bunların bazıları; BCl₃ (bor triklorür), B₂H₆ (diboran), BF₃ ve TEB (trietil boran) olmakta birlikte redükthan olarak ise hidrojen gazı kullanılmaktadır. Kullanımı diğer bor sağlayıcılara göre fazla olanları bor triklorür ve diborandır. Bu ikilinin gazları tehlikeli ve patlayıcı olmasının yanında çevreyi oldukça olumsuz etkileyebileceğinden ticari alanda yaygınlığı azdır. Gaz borlama sonucu uniform bir tabaka dağılımı elde edilebilmesi bu uygulamanın avantajı olarak söylenebilmektedir. Eşitlik 3.2’de ısı ile aktive edilmiş bor triklorürün reaksiyonu verilmiştir [35].



Hidrojenin bor triklorürü redüklemesi sonucu yalnız kalan bor, demire yayılarak tabaka oluşturur. Reaksiyon Eşitlik 3.3 ve Eşitlik 3.4’te gösterildiği gibi iki aşamada gerçekleşmektedir.



Diboran ve bor triklorürün zehirli ve tehlikeli gazlarının yerine kullanılacak organik bor sağlayıcı gazlardan bazıları ise şunlardır; trimetil borat, TMB, B(OCH₃)₃ ve trietil boran, TEB, B(C₂H₅)₃ boran trietil amin gibi maddeler kullanılmaktadır [35]. Çizelge 3.5’te gaz formunda bulunan bor sağlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.5. Gaz formunda bulunan bor sağlayıcı bileşikler ve bazı özellikleri [34].

Malzeme	Formül	Kütle (g/mol)	Teorik bor miktarı (%)	Donma noktası (°C)
Bor triflorid	BF ₃	67.82	15.95	-128.8
Bor triklorid	BCl ₃	117.9	9.23	-107.3
Bor tribromid	BBr ₃	250.57	4.32	-46
Diboron	B ₂ H ₆	26.69	39.08	-165.5
Bor trimetil	(CH ₃) ₃ B	55.92	19.35	-161.5
Bor trietil	(C ₂ H ₅) ₃ B	98.01	11.04	-94

3.5.3.4. Pasta Borlama

Pasta borlama, kutu borlamada kullanılan bor sağlayıcı tozların bir macun formuna getirilip yüzeyi sertleştirilmek istenen malzemelere bu formda uygulanıp yüzey sertleştirilmesini sağlayan bir borlama yöntemidir. Bu yöntem ile lokal borlama veya karmaşık geometride bulunan malzemelere dahi borlama işlemi uygulanabilmektedir. Bu macun kıvamındaki bor sağlayıcı madde, yüzeye istenen bor tabakası kalınlığına göre 2-5 mm aralarında sürülerek ya da püskürtülerek fırınlama öncesi kurumaya bırakılmaktadır. Macun kurduktan sonra yaklaşık 5 saat boyunca 800 ila 1000 °C arasında fırında borlamaya maruz kalmaktadır. İşlemin uygulandığı ortamda korucuyu olarak gaz bulunmalıdır ve bu gazlar şunlar olabilir; Ar, NH₃ ve N₂. İşlem sonrasında kullanılan macunun malzeme yüzeyine yapışması oldukça sakıncalıdır ve bu durumun azaltılabilmesi için sulu sodyum silikat kullanılması önerilmektedir. Organik yapıda bir çözelti olarak ise, %3 polivinil alkol veya %0,5 metil selüloz içeren sulu çözeltiler kullanılmaktadır [33,34].

3.5.3.5. Plazma Borlama

Malzemeler enerji geçişleriyle form değiştirebilmektedir; Katı bir madde enerji ileterek sıvı forma, sıvı bir madde enerji ileterek gaz forma ve gaz bir madde enerji ileterek plazma forma gelebilmektedir. Yapısı incelendiğinde plazma, iyon, elektron, uyarılmış atom, foton ve nötral atom ya da molekül içeren bir karışım durumundadır. Plazma borlama, redüktan olarak hidrojen gazının kullanıldığı, bor sağlayıcı olarak ise BCl₃, BF₃, B₂H₆ ve TEB (trietil boran) gibi bor bileşiklerinin kullanıldığı, 10-12 bar gibi düşük basınç değerlerinde 800-1100 °C sıcaklıklarda uygulanan bir borlama

işlemdir. Diğer borlama işlemlerine göre oldukça çevreci ve hijyenik olmaktadır. Plazma borlamanın avantajlarının başında, oldukça yüksek enerji etkinliği, oldukça düşük çarpılma, düşük sıcaklık; dezavantajları ise BCl_3 ve B_2H_6 gazlarından dolayı yüksek maliyet, zehirleyici, patlayıcı ve korozif etkilere sebebiyet verilebilmesidir [35].

3.5.4. Borlama İşlemi Avantaj ve Dezavantajları

3.5.4.1 Borlama İşlemi Avantajları

Borlama ile yüzeyi sertleştirme sonucu malzemelerin yüzeylerinde borür tabakalar oluşmaktadır ve bu tabakalar borlama işleminin en büyük avantajı olarak kabul edilmektedir. Bu tabakalar yaklaşık olarak 1450-5000 HV sertlik derecelerine ulaşabilmelerinin yanında yüksek sıcaklıklarda bile bu sertlik değerlerini koruyabilmektedir. Borlanmış malzemelerin sertlik değerlerini ve diğer malzemelerle kıyası Çizelge 3.6'te verilmiştir. Bu çizelge sonucunda borlama işlemiyle yüzeyi sertleştirilmiş malzemelerin sertlik değerlerinin, diğer geleneksel yüzey sertleştirme işlemlerine kıyasla çok daha sert bir tabaka oluşturduğu açıkça görülmektedir [31].

Borlama işleminin diğer avantajları listelenmiştir:

1. Borlama sonucunda oluşan çok sert tabaka ve bu tabakanın yüzey pürüzlülüğünün düşük olması sonucu bu iki parametrenin kombinasyonu ile aşınmaya karşı dayanıklı borür tabakalar oluşmaktadır.
2. Birçok malzemeye uygulanabilmektedir.
3. Demir esaslı malzemelerin korozyon-erozyon direnci önemli oranda artırmasından dolayı kullanım alanı oldukça geniştir.
4. Borlama sonucunda malzemeler 850 °C sıcaklıklara kadar oksidasyon direnci gösterebilmektedir.
5. Borlanan malzemeler oksitleyici ve aşındırıcı ortamlar altında dahi yorulma dayanımları yüksektir [31].

Çizelge 3.6. Borlanmış çeliklerin sertlik değerlerinin diğer işlemlerle ve sert malzemelerle karşılaştırılması [31].

Malzeme	Mikrosertlik (HV)
Borlanmış yumuşak çelik	1600
Borlanmış AISI H13 kalıp çeliği	1800
Borlanmış AISI A2 çeliği	1900
Su verilmiş çelik	900
Su verilmiş ve temperlenmiş H13 çeliği	540-600
Su verilmiş ve temperlenmiş A2 kalıp çeliği	630-700
Yüksek hız takım çeliği BM42	900-910
Nitrülenmiş çelik	650-1700
Sementasyonlu düşük alaşımlı çelik	650-950
Sert krom kaplama	1000-1200
Sementit karbürler, WC+Co	1160-1820 (30kg)
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ seramikler	1483 (30kg)
Al ₂ O ₃ +TiC+ZrO ₂ seramikler	1730 (30kg)
Sialon seramikler	1768 (30kg)
TiN	2000
TiC	3500
SiC	4000
B ₄ C	5000
Elmas	~10000

3.5.4.2. Borlama İşlemi Dezavantajları

1. Borlama işlemi, plazma nitrüleme ve gaz karbürleme kadar esnek olmadığından, işçiliği fazla olduğundan dezavantajlı durumdadır.
2. Çok hassas bir işlem olmasından dolayı hassas işçilik gereklidir. Bu nedenle gaz karbürleme ve plazma nitrülemeye göre daha maliyetlidir.
3. Borlama işleminin sonucu olarak malzeme yüzeyinde %5-25 oranında hacim artışı görülebilmektedir.
4. Geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile yüzeydeki börür tabaka kırılabilmektedir.
5. Malzemeler borlama sonrasında temperleme ve sertleştirmeye tabi tutulacaksa börür tabakasının korunması adına inert ortamda veya vakum altında yapılmalıdır [36].

3.5.5. Borlanabilen Malzemeler

Yüzey sertleştirme işlemlerinin bir parçası olan borlama özellikle çelikler için oldukça önemli bir yer taşımaktadır. Borlama prosesi sonucunda malzeme yüzeyleri oldukça sert bir tabaka ile kaplanmasının yanı sıra diğer önemli avantajı ise birçok malzemeye uygulanabilir olmasıdır. Borlama, yapı, sementasyon, ıslah ve takım çelikleri, çelik döküm, gri dökme demir dışında toz veya başka bir yöntemle üretilmiş olan tüm çeliklere uygulanabilmektedir. Refrakter metaller (W, Ta, Mo, Zr, Hf, Nb), karbürler ve Ni esaslı alaşımlara da borlanabilmektedir. Ti ve Ti esaslı alaşımlara bor difüzyonu ile TiB_2 tabakası elde edilmesi sonucunda aşınma dayanımı artırılmaktadır. Ti ve alaşımlarına uygulanan borlama işlemi 1000-1200 °C arasındaki sıcaklıklarda olabilmektedir. Ti ve refrakter metallerin yüzeylerinde oluşan borür tabaka sertliği kobalt ve nikel yüzeyinde oluşan borür tabakaya göre çok daha sert yapıda bulunmaktadır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte bakır ve alaşımlarına da borlama uygulanabilmesi mümkündür ancak ergime sıcaklıkları düşük olan Zn ve Al borlama için uygun metaller değildir [34].

3.5.6. Borürlerin Genel Özellikleri

Saf bor elementi, yeryüzünde bulunan birçok element ile bileşik oluşturmaya yatkındır ve bu bağlar çok kuvvetli kovalent bağlardan gerçekleşmesi sebebiyle elastisite modülleri, ergime sıcaklıkları ve sertlik dereceleri oldukça yüksektir. Bor bileşiklerinin oluşması, bor ve bileşiği oluşturan diğer element arasındaki atom boyutlarına ve elektrokimyasallıklarına bağlıdır. Borürlerin latis parametreleri ve kafes yapıları benzerlik gösterdiği durumlarda borürler katı eriyik oluşturabilmektedir. Çoğunlukla termal genişleme katsayıları sınırlı ölçüde bulunan borürlerin termal şok dirençleri ve ısı iletkenlik katsayıları yüksektir. Borür yapılarının tokluk ve mukavemet açısından orta derecede sınıflandırılmasının yanı sıra seramik bileşikleriyle kıyaslandığında mukavemet ve sertlik bakımından oldukça yüksek değerlere sahip olmasıyla birlikte birçok borür bileşiği seramiklerle göre daha iyi elektriksel ve kimyasal direnç davranışı sergilemektedir [37].

Borür oluşumunun sağlanabilmesi için elementlerin dış yörüngelerinde bulunan elektronların sp^2 ve sp^3 diziliminde yapılabilmektedir ve bu değişkenliğe göre kuvvetli kovalent bağların oluşmasında değişiklikler oluşabilmektedir. Bu değişiklik, bor ile bileşik oluşumunu sağlayan elementin elektron verme eğilimindeki farklılıklara göre sp^2 ve sp^3 yapılarında olmaktadır. Bu elektron dizilim çeşitlilikleri s^2p , sp , sp^2 ve sp^3 gibi çeşitli borür yapılarını olabilmektedir [37]. Çizelge 3.7’de farklı borürler ve özellikleri verilmiştir.

Borür oluşumu üç ana başlıkta incelenmektedir [37];

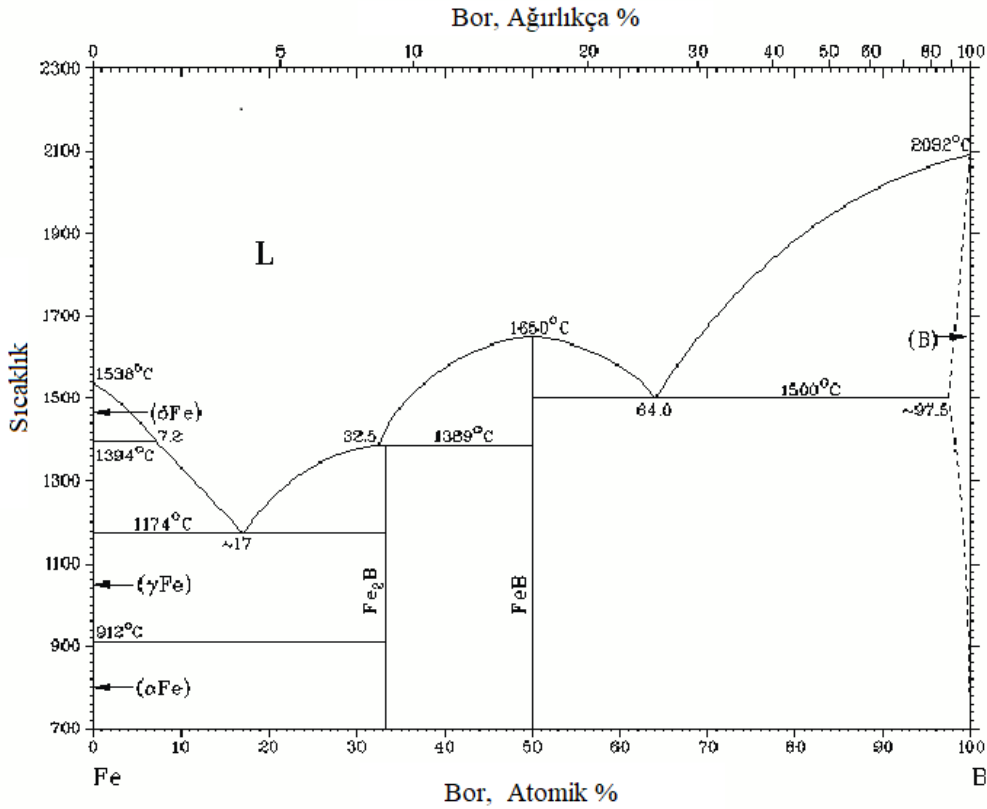
1. Alkali ve toprak alkali elementlerin oluşturduğu, dış yörüngelerinde s seviyesinde elektron bulunduran elementlerin oluşturduğu borürler.
2. Geçiş metalleri, lantanitler ve aktinitlerin oluşturduğu, d iç yörüngesine sahip elementlerin oluşturduğu borürler.
3. s ve p valans elektronlarına sahip olan elementlerin oluşturduğu borürler.

Çizelge 3.7. Farklı borürler ve çeşitli özellikleri [37].

Borür	Kristal Yapı	Teorik Yoğun. (g/cm ³)	Erg. Sıc. (°C)	Termal Genleşme (10 ⁻⁶ /K)	Termal İletkenlik (W/m.K)	Sertlik (Gpa)	Elas. Mod. (Gpa)	Elk. Direnç (10 ⁶ Ωcm)
CrB	Tetra.	6,14	--	12,3 (27-1027 °C)	20,1 (20 °C)	11,8	--	46
Cr ₂ B	Ortog.	6,58	1870	14,2 (27-1027 °C)	10,9 (20 °C)	13,2	--	107
CoB	Ortog.	7,32	--	--	17	11,3	--	33
Co ₂ B	Tetra.	8,05	1260	--	14	11,3	--	76
FeB	Ortog.	6,73	1650	12 (400-1000 °C)	12 (20 °C)	16,2-18,6	343	80
Fe ₂ B	Tetra.	7,34	1410	--	17,4	13,1-17,7	284	38
MnB	Ortog.	6,36	1890	--	7,7	20,1	--	57
Mn ₂ B	Tetra.	7,18	1580	--	6,6	17,7	--	40
NiB	Ortog.	7,17	1590	--	21,9	15,2	--	50
Ni ₂ B	Tetra.	8,05	1225	--	54,8	14	--	14
NbB	Ortog.	7,57	2917	12,9 (27-1027 °C)	15,6 (27 °C)	21,5	--	40
NbB ₂	Hegz.	7,00	3036	8 (27-1027 °C)	23,5 (27 °C)	25,5	637	26
Nb ₃ B	Ortog.	7,28	2935	9,9 (27-1027 °C)	20,5 (27 °C)	22,5	--	34
TiB	Ortog.	4,56	2190	--	--	22,7	--	40
TiB ₂	Hegz.	4,52	3225	--	64,4 (27 °C)	33-25,5	551	9

3.5.7. Borlanmış Yüzeylerin Genel Özellikleri

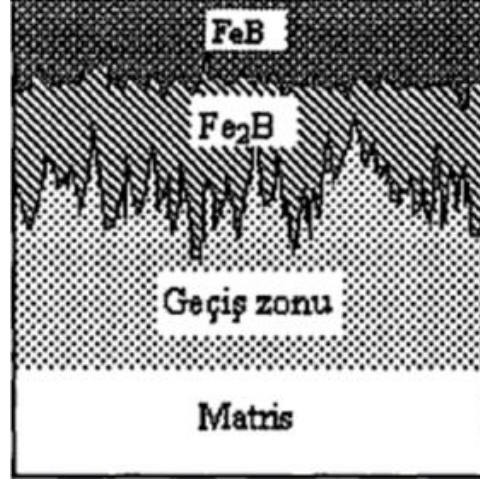
Demir-bor yapıdaki bileşiklerin meydana gelmesi düşünüldüğünde, alaşımlarda alaşım elementleri genelde atom çaplarına göre, ara yer ya da yer alan element olarak sınıflandırılmaktadır. Bununla birlikte, α -Fe için bor atomu hem ara yer hem de yer alan element statüsünde sayılabilmektedir. Bor çelikleride ppm olarak çözünmektedir. Atom çaplarına göre sınıflandırma yapıldığından dolayı, bor atomunun çapı demirin atom çapına göre %27 daha küçük olması durumlarında bor atomu katı eriyik yapabilmektedir. Sıcaklıkların çok yüksek olmadığı durumlarda demir içindeki borun çözünürlüğü kıyaslandığında %2 miktarda arayer atomu olarak, yüksek olasılıkla ise yer alan atomu olarak erimektedir [33]. Şekil 3.3'te Fe-B denge diyagramı verilmiştir.



Şekil 3.3. Fe-B denge diyagramı [38].

Borlama işlemi uygulaması esnasında bor atomları malzeme yüzeyinin bileşimini değiştirerek difüze olur ve malzeme yüzeyinde metal kafes içerisinde bor bileşikleri oluşmaktadır. Bu borürler, tek fazlı veya çift fazlı tabakalar olarak oluşabilmektedir.

Bor tabaka biçimi, büyüklüğü ve oluşan fazların içeriği temel malzemenin kimyasal içeriğine, bor tabaka sertliğine, yeni oluşan bor tabakası biçimine bağlıdır [31]. Şekil 3.4'te iki fazlı borür tabakası şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.4. İki fazlı borür tabakası şematik gösterimi [37].

Demir esaslı malzemelerin borlanması esnasında bor tabakası, genel olarak demir borürlerin oluşumu ve büyüme kaydetmesiyle oluşmaktadır. Termo-kimyasal bir şekilde bor tabakasının oluşması esnasında, FeB/Fe₂B ya da Fe₂B/FeB biçimlerinde sıralanarak borür geçiş fazları dişe benzer bir yapı oluşturmaktadırlar. Oluşan kolonsal borür kristalleri, difüzyon parametrelerine bağımlı olarak, eşit boyutlarda değilse bile başta sertlik olmak üzere oldukça iyi mekanik özelliklere sahip olabilmektedir [33].

3.5.7.1. Borlayıcı Ortam ve Konsantrasyon Etkisi

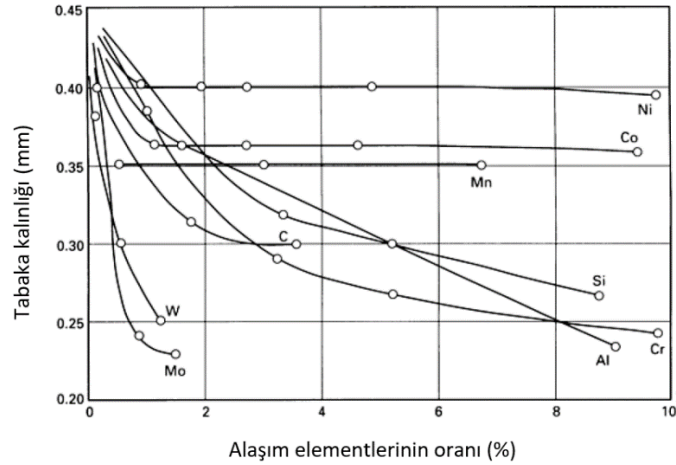
Ortamda ne kadar miktarda bor kaynağı bulunursa, tabaka kalınlığı o oranda artmaktadır. Ortamda bor kaynağı yoksa veya borlama sırasında bor kaynakları tükenirse borür tabaka oluşumu durmaktadır. Bu sebepten dolayı ise istenilenden daha ince bir bor tabakası elde edilebilmektedir. Borlama sırasında yüzeye difüze edilebilmesi için saf bor gereklidir. Bunun için B₄C bileşimin ayrışması gerekmektedir ve bu sebeple ortamda redüksiyon sağlaması için bir redüktan malzeme gereklidir. Bu ihtiyaç SiC ile sağlanmaktadır. SiC ve B₄C reaksiyonu sonucu B (elementel bor) elde edilir ve ortamda serbest kalan bor elementinin oksijenle kimyasal bağ kurma isteği oldukça yüksektir. Bu gerçek sonucu bu iki element sayesinde B₂O₃

bileşigi meydana gelmektedir. Redüksiyon sağlayan SiC aynı şekilde demir elementini de redükler. Bu sayede demir ile bor elementi de bileşik yaparlar ve FeB ve Fe₂B tabakaları meydana gelmektedir. Bor elementinin demire yayılımını hızlandıran ise KBF₄ bileşigidir [33].

3.5.7.2. Alaşım Elementlerinin Etkisi

Alaşım elementleri, demir esaslı ve demir dışı malzemeleri borlama esnasında borür tabakanın ve geçiş bölgelerinin kristal yapısı üzerinde, faz bileşiminde, tabakanın büyüme kinetiğinde ve mekanik özelliklerinin etkisi üzerinde büyük rol oynamaktadır. Alaşım elementleri incelendiğinde, borür tabakada bileşik oluşturabilecek alaşım elementlerine Cr, Ni, V, Mn, Mo gibi elementler örnek gösterilebilirken, C, Cu, Si, Al gibi elementler borür tabakasında çözünme gerçekleştiremezler [37].

Karbon elementi, demir borür bileşiginde çözünemez yalnızca ana malzemeye doğru yayınırlar ve bu durum sayesinde geçiş bölgesi daha düzenli ve sert bir yapıda olabilmektedir. Silisyum elementi de karbon elementi gibi borür bileşiginde çözünemez ve bor atomları sayesinde Fe₂B tabakasının altındaki ana malzemeye doğru itilir. Silisyumların biriktiği bölge yumuşak bir yapıda olduğundan dolayı çatlama, çökme ya da dökülmeler meydana gelebilmektedir. Silisyum içeriğinin %1'den fazla olması tercih edilmemektedir. Şekil 3.5'te çeliklerde alaşım elementlerinin bor tabakası kalınlığına etkisi verilmiştir [37].



Şekil 3.5. Çeliklerde alaşım elementlerinin bor tabakası kalınlığına etkisi [31].

Krom ve nikel, borlamada birer alaşım elementidir. Krom elementi borür tabakada çözüürken, nikel elementi bunun aksine geçiş bölgesinde çözüüp yayınmaktadır. Nikel içeriği %9'un üzerinde olursa kaplamalar tırtıklı yapıdan düz yapıya geçiş yapmaktadır ve bu durum sonucunda Fe₂B fazının etkilenmemesine rağmen FeB fazında sertlik düşüşüne sebep olur. Kromlu ve kromsuz alaşımlar tarafından karşılaştırıldığında ise kromlu alaşımlar konsantrasyon farklılıklarına bağlı olarak tabakanın daha ince ve daha düzgün olduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda krom miktarı artıkça tabakaların sertliği de o oranda artmaktadır [37].

Manganez elementi de krom elementi ile aynı şekilde yani borür tabakada çözüür ve yüzeye yayınıını gerçekteşir. Tabaka kalınlığında azalmasına ve biçimsel olarak düzleşmesine sebebiyet vermektedir. Molibden, titanyum, tungsten, vanadyumdan oluşan alaşım element grubu, çoğunlukla geçiş ve kaplama bölgeleri arasında çözüüp oluşmaktadır. Bu elementler de tabakanın azalmasına sebep olmaktadır. Geçiş bölgesinde tane büyümesine engel olan ve FeB fazında çözüürerek sertlik artışını sağlayan madde titanyum elementidir [37].

3.5.7.3. Sıcaklığın Etkisi

Borlama işleminde sıcaklık ve işlem süresinin artması ile oluşan borür tabaka kalınlığı doğru orantılı olmaktadır.

Çizelge 3.8. Farklı sıcaklıklarda borlanmış C45 çeliğinin tabaka kalınlıkları [37].

Sıcaklık (°C)	700	750	800	850	950	1000
Tabaka Kalınlığı (µm)	2	12	17	30	46	59

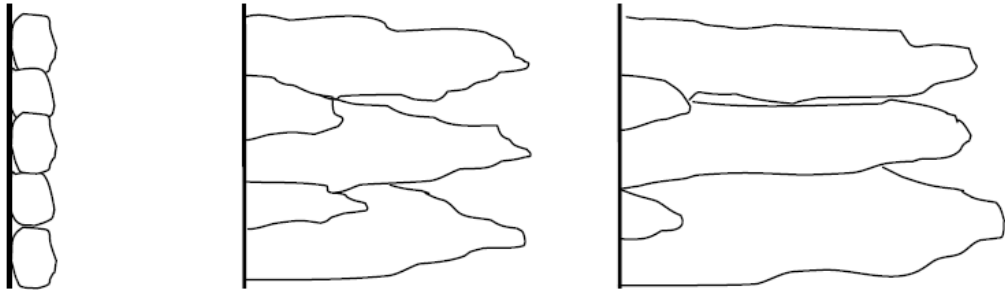
Borlama işleminde sınır sıcaklık, FeB için ergime sıcaklığıdır. FeB için sınır sıcaklığı olan ötektik sıcaklık 1149 °C'dir ve bunun aşılmaması gerekmektedir. Bu sıcaklığın aşılması durumunda malzeme yüzeyinde kısım kısım erimeler ve yüzeyde bozukluklar meydana gelmektedir. Sıcaklık ile tabaka kalınlığı artışının doğru orantılı olmasının yanında sıcaklık artışı oldukça borür tabakanın porozite olma durumuda artmaktadır. Porozite artmasıyla ise borür tabaka daha sert ve gevrek bir yapıya bürünmektedir. Kalınlığın belirlenmesini etkileyen bir diğer parametre ise kırılgenliktir. Tabaka

kalınlığı ve kırılgnlık doğru orantılıdır bu yüzden özellikle çift fazlı tabakalarda kalınlık çok fazla tercih edilmemektedir [37].

3.5.8. Borür Tabakasının Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

3.5.8.1. Borür Tabakasının Oluşması, Büyümesi ve Gelişmesi

Borlama, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen, malzeme yüzeyine bor elementinin difüze edilmesi ile bir bor tabakasının meydana geldiği yüzey sertleştirme işlemidir. İlk olarak borlamanın başlamasıyla borlamanın gerçekleştiği ortam ile borlanacak nesne arasında bir reaksiyon gerçekleşmektedir. Borlama süresi ile doğru orantılı olarak tanelerin yüzeyde çekirdek oluşturmasıyla ilk olarak ince bir bor tabakası meydana gelmektedir. Bu ince tabaka FeB ve Fe₂B olarak meydana gelmektedir ve borlanan malzemenin yüzeyine yayılmaktadır. Uygulama devam ettiği sürece ilk borür çekirdeği malzeme içinde büyümeye devam etmektedir. Bor atomları 001 doğrultusunda daha hızlı bir şekilde yayılma gerçekleştirir. Bu doğrultuda FeB ve Fe₂B borürleri ilerlemeye devam etmektedir. Böylece diğer yönlerde ilerleme daha da yavaşlamaktadır. İlk olarak Fe₂B fazı oluşmaktadır ve ortamda yeteri kadar bor yoğunluğu sağlandığı takdirde FeB fazı da oluşmaktadır. İki faz arasında kıyas yapıldığında FeB fazı daha az sürede oluşumunu tamamlamaktadır bu sebeple FeB fazı Fe₂B fazına kıyasla daha az dayanıklıdır. [35]. Şekil 3.6'da borür tabakasının oluşum ve büyüme aşamaları verilmiştir.

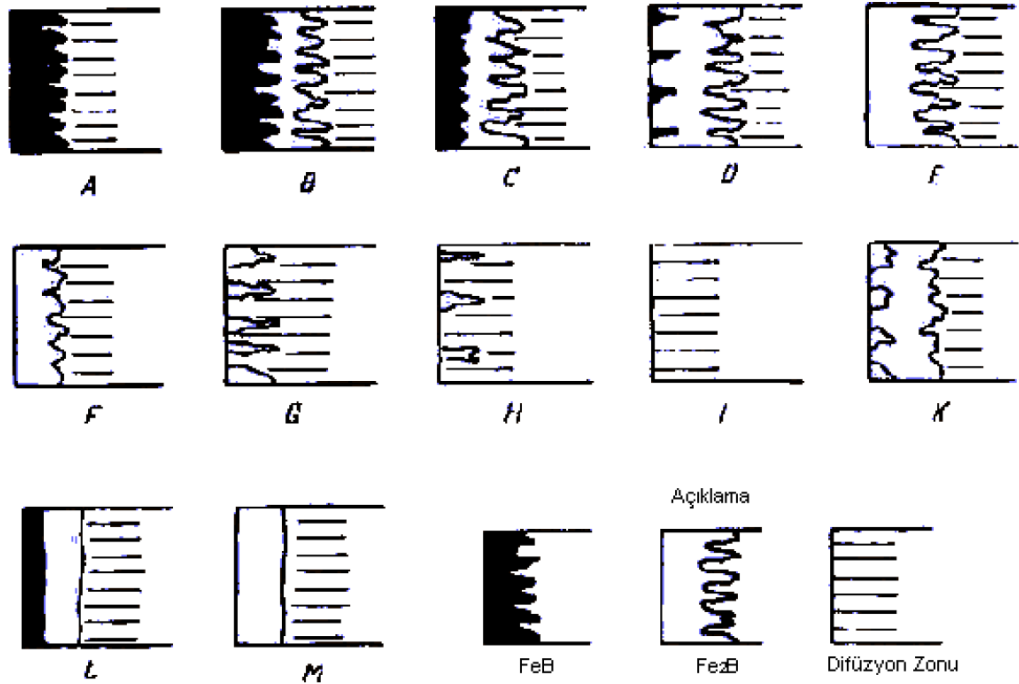


Şekil 3.6. Borür tabakası oluşum ve büyüme aşaması [39].

3.5.8.2. Borür Tabakası Çeşitleri ve Kalınlıkları

Borür tabakasının geometrik görünüşünü ve yapı özelliğini etkileyen parametreler, borlama sırasında uygulanan yöntem, kullanılan bor sağlayıcı element ve borlama sırasında uygulanan işlem çeşitlilikleri olduğu bilinmektedir. Malzemelerin metalografik incelemeleri sonucunda, bu tabakaların FeB ve Fe₂B borür tabakalarından meydana gelerek malzemelerin yüzeylerindeki borür tabaka kalınlığını ve şeklini oluşturduğunu görmek mümkün olmaktadır [28].

Ferro esaslı malzemeler düşünüldüğünde borlama işlemi sonucundan üç farklı tabaka meydana gelebilmektedir; FeB, Fe₂B ve geçiş bölgesi. Bu tabakalar gerek yalnız hallerde gerekse farklı seçeneklerde bir araya gelip bir borür tabaka meydana getirebilmektedir [28]. Şekil 3.7’de çeşitli borür tabakaları ve sınıflandırılmaları gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Borür tabaka çeşitleri ve sınıflandırılması [28].

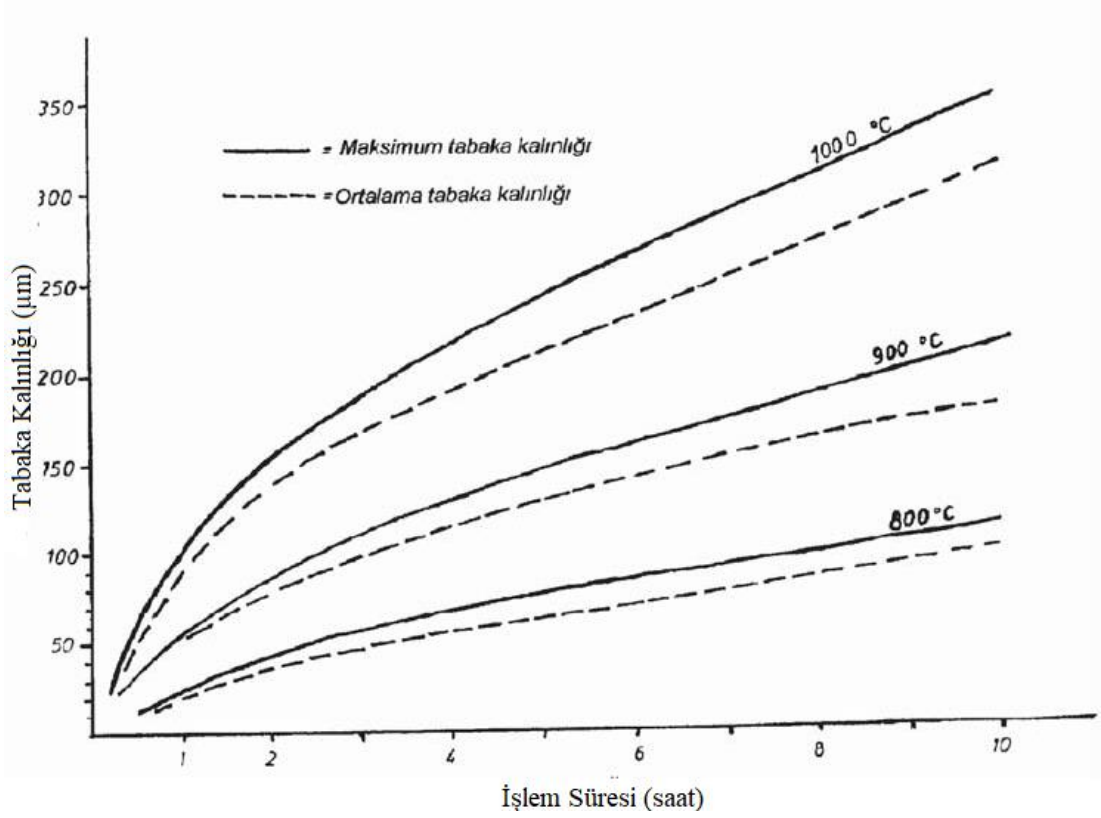
Şekil 3.7’de verilen borür tabaka çeşitleri ve sınıflandırılmasının açıklamaları listelenmiştir:

- A: Tek fazlı tabaka, FeB.
- B: İki fazlı tabaka, FeB ve Fe₂B (Tam tabaka).
- C: İki fazlı tabaka, FeB tabakası B’ye göre daha ince.
- D: İki fazlı tabaka, FeB dişleri izole edilmiş.
- E: Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, güçlü dişler.
- F: Tek fazlı tabaka, sadece Fe₂B, daha az kuvvetli dişler.
- G: Bağımsız Fe₂B dişli tabaka.
- H: İzole edilmiş Fe₂B tabakası.
- I: Geçiş bölgesi.
- K: Dejenere olmuş tabaka.
- L: İki fazlı FeB ve Fe₂B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz.
- M: Tek fazlı ve FeB ve Fe₂B tabakası, düzgün gelişmiş, dişsiz.

Genel anlamda endüstriyel olarak E ve F türünde borür tabaka amaçlanmaktadır ve bu doğrultuda kullanılan birçok bor sağlayıcı malzeme sayesinde hedefe ulaşılmaktadır. Fe₂B elde edilerek kullanılan tek fazlı bir borür tabakanın oldukça düşük gevreklik, borür tabaka özelliklerini bozmadan uygulanabilme ve borlama sonrası yapılan ısıl işlemlerin uygulanabilirliği için parçaya tutunma mukavemeti gibi birçok avantajı bulunmaktadır [28].

Borlama işlemine etki eden parametreler malzeme türü, borlayıcı ortamın kompozisyonu, borlayıcı ortam konsantrasyonu, hangi borlama türünün uygulandığı, uygulama sıcaklığı ve uygulama süresidir. Bu parametrelerin birçok farklı etkileri mevcut olmasıyla birlikte işlem süresiyle birlikte işlem sıcaklığı ile tabaka kalınlığının arasındaki ilişki direkt olarak doğrusaldır ve teoride tabaka kalınlığına ait bir sınır yoktur. Fe-B denge diyagramı ele alındığında, borlamanın uygulama tarafı düşünüldüğünde ise 1149 °C ile ifade edilen ötektoid sıcaklık deresinin altında işlem uygulamak gereklidir. Bunun sebebi ise, bu sıcaklık aşıldığında lokal erimeler başlamasından dolayıdır ve böylece malzeme yüzeyinde istenmeyecek derecede bozulmalar başlayacaktır. Zaman bakımından düşünüldüğünde ise ekonomik açıdan

verimli olmamaktadır [34]. Şekil 3.8’de borlanmış C45 çeliğine ait tabaka kalınlığının zamana ve sıcaklığa bağlı parametrelerine göre değişimi verilmiştir.



Şekil 3.8. Borlanmış C45 çeliğinin tabaka kalınlığının zaman ve sıcaklık parametrelerine göre değişimi [31].

Borlanacak malzeme yüzeyindeki bor difüzyonu azalmasıyla birlikte borür tabakada istenilen dış şeklindeki yapıda düzleşme başlamakta, borür tabaka kalınlığı azalmaktadır ve borlama esnasında alaşım elementleri ve karbon miktarının artmasıyla birlikte bor difüzyonu azalmaktadır. Çelik bazlı malzemelerde kullanıma uygunluk açısından istenilen bor tabakası kalınlığı 20-200 µm aralığındadır [34].

3.5.8.3 Sertlik

Borlama sonucunda malzemenin yüzeyi elmaştan sonra en sert madde olan bor içeren borür tabaka ile kaplanmaktadır. Bu sebeple borür tabakasının özellikleri hakkında yapılan araştırmalar ve incelemeler daha çok sertlik, aşınma ve korozyon üzerinde yapılmaktadır. Borlama işleminin ana amacı borlanacak malzeme yüzeyinde istenilen

derecede sertlik sağlayabilmektir ancak bu sertlik temel borür tabaka fazları olan FeB ve Fe₂B fazlarına bağlıdır. Borlama uygulaması sonra elde edilen sertlikler malzeme türlerine göre değişmektedir; karbon çelikleri 1800-2000 HV, alaşımlı çelikler 2500-2800 HV, titanyumda ise 3000 HV sertlik derecelerine kadar ulaşabilmektedir [34].

Borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş malzemelerin bir diğer özelliğide, borlama sonrası uygulanacak olan bir başka ısıl işleminde dahi bu sert yapısını muhafaza edebilmesidir. Yaklaşık 900 °C sıcaklıklara kadar bu kararlı yapısını koruyabilmektedir ve bu sayede uygulanabilecek birçok ısıl işlemin önünü açmaktadır [34]. Çizelge 3.9'da farklı borürlerin sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 3.9. Farklı malzemelerin oluşturduğu borürlerin sertlik ve ergime dereceleri [31].

Malzeme	Oluşan Bileşik	Sertlik (HV veya kg/mm ²)	Ergime Noktası (°C)
Fe	FeB	1900-1200	1390
	Fe ₂ B	1800-2000	1390
Co	CoB	1850	1390
	Co ₂ B	1500-1600	1390
	Co ₃ B	700-800	1390
Co-27.5Cr	CoB	2200	1390
	Co ₂ B	1550	1390
	Co ₃ B	700-800	1390
Ni	Ni ₄ B ₃	1600	1390
	Ni ₂ B	1500	1390
	Ni ₃ B	900	1390
Mo	Mo ₂ B	1660	2000
	MoB ₂	2330	≈2100
	Mo ₂ B ₅	2400-2700	2100
W	W ₂ B ₅	2600	2300
Ti	TiB	2500	≈1900
	TiB ₂	3370	2980

Zr	ZrB ₂	2250	3040
Re	ReB	2700-2900	2100

3.5.8.4. Aşınma

Aşınma, iki malzemenin birbirine temaslı hareketi sonucu parça koparımı olarak kütle kaybına denmektedir. Borlama sonucu malzemelerin aşınma kabiliyetlerinde artış olduğu bilinmektedir. Borlama uygulaması ile parçada sertlik artışı ve bu sertliğin aşındırıcı malzemeden daha yüksek bir değerde olmasıyla birlikte sürtünme katsayısının da daha düşük olması beklenmektedir. Bu sayede malzemenin aşınma davranışının artırıldığı söylenebilmektedir. Çizelge 3.10'da borlanmış ve borlanmamış bazı malzemelerin sürtünme katsayısı kıyası verilmiştir.

Çizelge 3.10. Borlanmış ve borlanmamış bazı malzemelerin sürtünme katsayısı [40].

Malzeme	Sürtünme Katsayısı	
	Borlanmış	Borlanmamış
Düşük karbonlu çelik	0,17 - 0,19	0,585 - 0,595
Takım çeliği	0,07 - 0,04	0,16 - 0,18
WC + Co Sinter malzeme	0,1939 - 0,2335	0,2617 - 0,2773

3.5.8.5. İç Gerilmeler

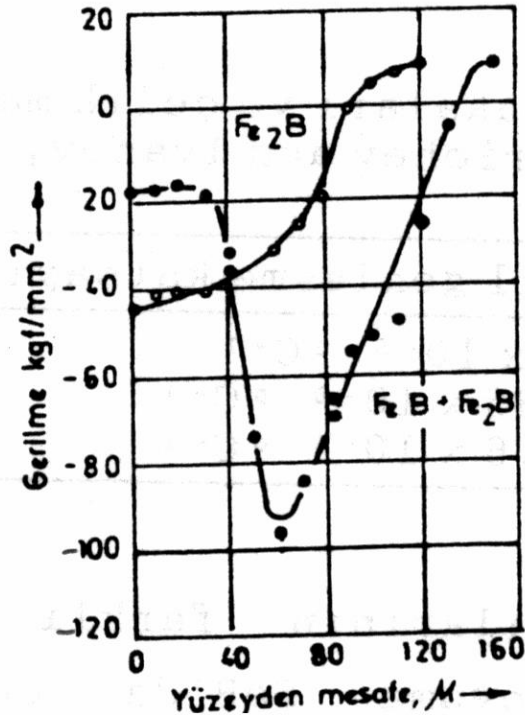
Borlama uygulaması sonrasında metallerde borür tabaka yapısında ve borür tabakası ile ana metalin kesiştiği yerlerde (geçiş fazı) iç gerilmeler oluşmaktadır. Bu iç gerilmelere etki eden birden fazla parametre vardır; malzeme kompozisyonu, borlama koşulları ve uygulanan ısı işlemler bu parametrelerdir. Tabakanın çift veya tek fazlı olması ve düz-tırtıklı yapısı gibi geometrik özellikleri iç gerilmelerin oluşmasında rol oynamaktadır. Borür tabakanın ideal olabilmesi için tek fazlı yapı ve tırtıklı geometri olması gerekmektedir [28].

İç gerilmelerin oluşmasının sebebi ise FeB, Fe₂B ve matris malzemenin ısı genleşme katsayılarının farklılıklarından meydana gelmektedir. Çizelge 3.11'de borür tabaka ve demirin ısı genleşme katsayıları gösterilmiştir [28].

Çizelge 3.11. Saf demir ve borür tabakasına ait ısıl genişleme katsayıları [28].

Malzeme	Isıl genişleme katsayısı
Saf demir	$15,6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
FeB	$23 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
Fe ₂ B	$7,85 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

FeB ve Fe₂B fazlarını içeren çift fazlı borür tabakaları borlama sonrasında Fe₂B fazında bası, FeB fazında ise çeki gerilmeleri oluşmaktadır ve bu sebeple tabakanın çatlamasına sebep olarak tabakanın dökülmesine sebebiyet vermektedir [28]. Şekil 3.9'da tek ve çift fazlı borür tabakasının iç gerilme dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.9. Tek ve çift fazlı borür tabakasının iç gerilme dağılımı [28].

3.5.8.6. Korozyon Dayanımı

Borür tabakası, su ve atmosfer bakımından korozyona karşı dayanımı sınırlıdır ancak bazı asit ve sıvı metallere karşı korozyon dayanımı oldukça yüksektir. HCl, H₂SO₄ ve H₃PO₄ gibi asitlere, alüminyum, kurşun ve çinko gibi metallere karşı oldukça yüksek

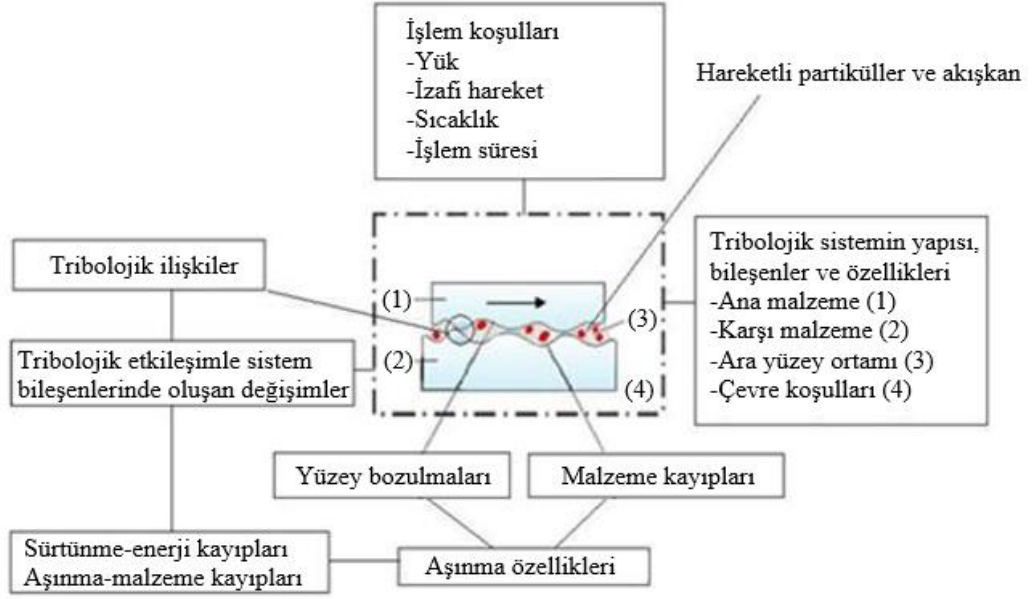
bir korozyon dayanımı sahiptir. Krom bakımından zengin çeliklerde borlama ile koruyucu bileşik olan krom oksit yerine koruyuculuk oranı daha sınırlı olan krom karbür oluşmaktadır. Bu sebeple yüksek alaşımlı maddelerin borlanması ile her zaman korozyon dayanımı bakımından daha iyi bir sonuç elde edilememektedir [34].

BÖLÜM 4

AŞINMA

Endüstriyel çalışmalarda, özellikle mühendislik çalışmalarında en önemli kriterlerden birisi malzeme seçimidir. Her alanda olduğu gibi mühendislik alanında da bu malzeme seçimleri sonucunda üretilmiş tüm elemanların kullanım ömürlerinin sınırlı olduğu bilinmektedir ancak olabildiğince verimli ve uzun ömürlü olmaları istenmektedir. Makine ve parça tasarımları bu doğrultuda yapılmaktadır. Bu elemanların ömrünü azaltan en önemli parametrelerden birisi aşınmadır. Triboloji biliminin ele aldığı aşınma etkisi, sürtünme katsayısının azaltılması, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması, temas yüzeyinin sertliğinin artırılması ve yağlama gibi uygulamalarla azaltılabilesinin yanında teorik olarak kesinlikte yok edilememektedir. Aşınma sorunu, malzeme kaybının yanında, bakım, tamir ve parça değişimi gibi etkenlerden dolayı zaman ve ekonomik olarak üretim tesislerini zarara uğratmaktadır.

Aşınma, temas halinde bulunan iki farklı yüzeyin mekanik etkiler sonucunda veya bir yüzeye katı, sıvı ya da gaz maddelerin etkisi sebebiyle parça yüzeyinden malzeme kaybının meydana gelmesi durumudur. Malzeme ömrü ve işlevsellik fonksiyonları bakımından kesinlikle istenmeyen bir durum olan aşınma, gerekli önlemler alınmadığı takdirde düşünüldüğünden çok daha büyük zararlar sebebiyet verebilmektedir. DIN 50320 ve ASTM G40-93 standartlarına göre aşınma, “kullanılan malzemelerin başka malzemelere (katı, sıvı veya gaz) teması sonucu mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulması” şeklinde tarif edilmektedir. Aşınma her ne kadar anlık etkiler yaratmasa da gerekli tedbirler alınmadığı takdirde uzun vadede oldukça önemli bir sorun olmaktadır [41]. Aşınma mekanizmaları beş ana başlıkta incelenmektedir. Bunlar; adhezif, abrazif, erozif, korozif ve yorulma aşınmasıdır.



Şekil 4.1. DIN 50320 standartlarına göre bir tribolojik sistem şematik görseli. [41].

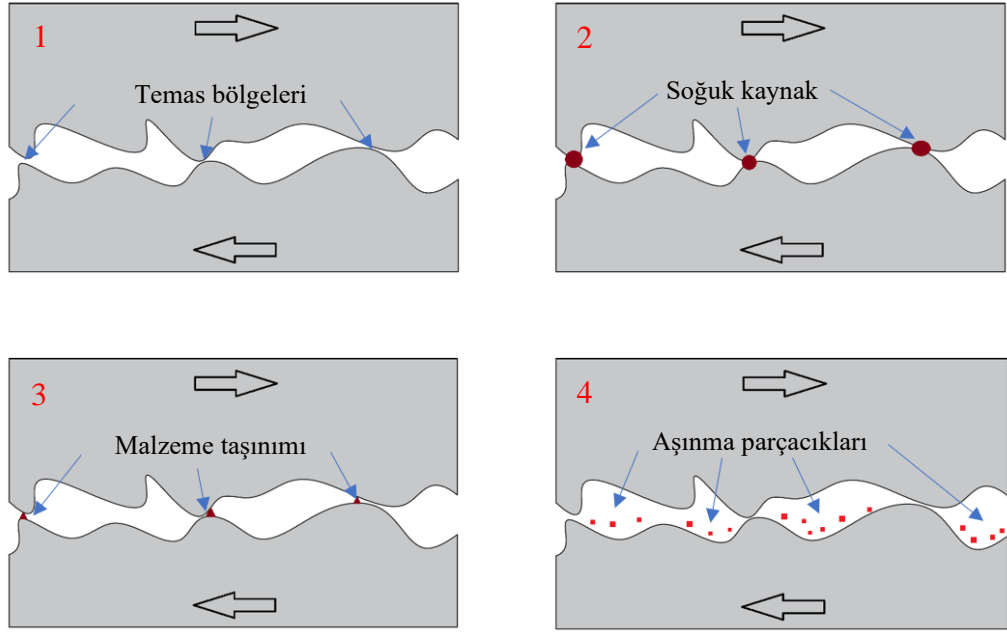
4.1. AŞINMA MEKANİZMA ÇEŞİTLERİ

Aşınmanın meydana gelebilmesi yalnızca aşınan malzeme değil, aşınan malzemenin içinde bulunduğu sisteme bağlı bir durumdur. Aşınma tamamen yok edilememekle birlikte yıllardır minimuma indirgenmeye çalışılmaktadır. Uzun süreler sonucu ve ani olarak meydana gelen iki çeşit aşınma durumu mevcuttur. Bu aşınma türlerini inceleyen aşınma mekanizmaları beş ana başlıkta toplanmaktadır. Bunlar; adhezif aşınma, abrazyif aşınma, erozyif aşınma, korozif aşınma ve yorulma aşınmasıdır.

4.1.2. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, temaslı iki yüzey arasında bir kayma sürtünmesi olduğu durumlarda ilk olarak bir yüzeyden diğerine soğuk kaynak veya bölgesel bağlanmalar ile parçacık transferi ve daha sonra kayma hareketlerinin devam etmesiyle yüzeyden parça kaybedilmesi durumu ile gerçekleşmektedir. Temas yüzeylerinin mikroyapıları düşünüldüğünde, bu pürüzlülükler tepeciklere yol açmaktadır ve bu tepeciklere daha fazla basınç uygulanmaktadır. Kayma sürtünmesinin uyguladığı basınç değeri bu tepeciklerin akma sınırını aştığında plastik deformasyon meydana geldiğinde bu

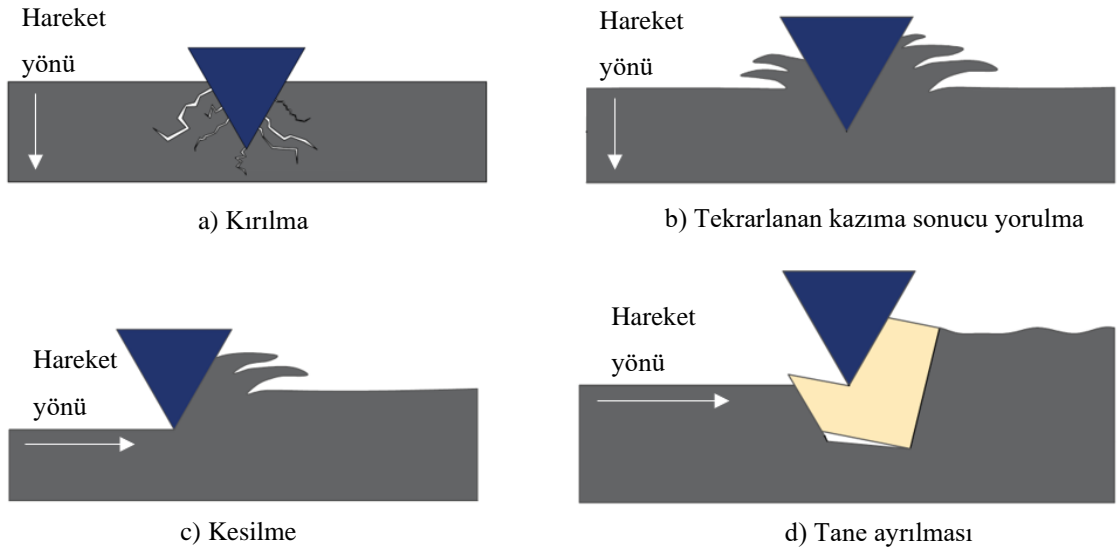
pürüzler birbirlerine sıvanıp diğer parça yüzeyine tutunmaktadır. Kayma hareketinin devam etmesiyle bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya sebebiyet vermektedir. Bu tür aşınmaya adhezif aşınma denmektedir. Adhezif aşınma engellemede yüzey sertleştirme uygulamaları ve yağlama uygulamaları oldukça etkili yöntemlerdir [42]. Şekil 4.2’de adhezif aşınmanın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.2. Adhezif aşınmaya ait şematik gösterim.

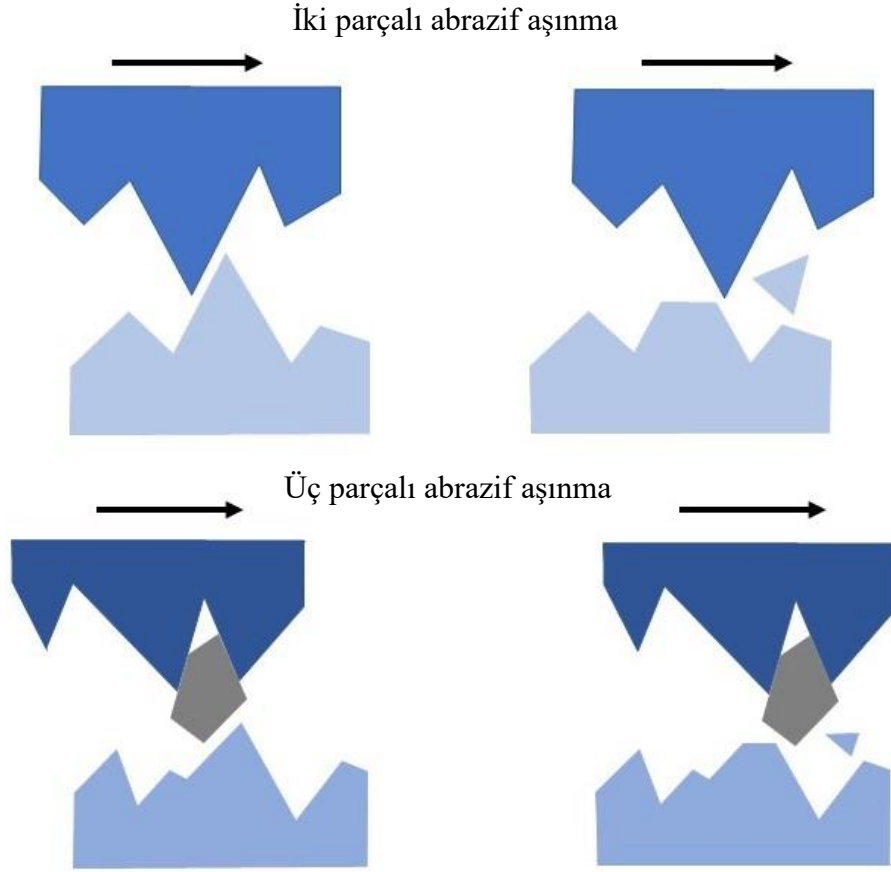
4.1.2. Abrazif Aşınma

Birbirine temas halinde olan iki yüzeyin birbirini aşındırmaya yönelik hareketleri yani kayma sürtünmesi olan durumlarda daha yüksek sertlik derecesine sahip olan malzemenin yüzeyindeki pürüzlülüğünden kaynaklı mikro yapıdaki çıkıntılarının sebebi ile sertlik derecesi daha düşük malzemeden parça kopardığı ve bu sonuçla aşınmaya yol açtığı aşınma türüdür. Bazı durumlarda iki yüzey arasına giren bir diğer sert malzemelerde bu aşınmaya sebebiyet vermektedir [43].



Şekil 4.3. Abrazif aşınma mekanizmaları şematik gösterimi.

Abrazif aşınmanın iki alt başlıkta incelenmesi mümkündür. Bunlar; iki parçalı ve üç parçalı abrazif aşınmadır. İki parçalı abrazif aşınma, iki yüzeyin birbirine temasıyla birlikte bir sürtünme hareketinin meydana getirdiği aşınmanın sonucu meydana gelmektedir. Bu aşınma türünde temas eden iki yüzeyden yüzey sertlik değeri daha yüksek olanın diğer temas yüzeyinden parçacıklar kopararak kütle kaybı yaşatmasıyla gerçekleşmektedir. Taşlama, torna ve freze işlemleri iki parçalı abrazif aşınma türü için oldukça açıklayıcı örneklerdir. Üç parçalı abrazif aşınma ise adından da anlaşılacağı üzere iki yüzey arasında sıkışmış ve diğer iki yüzeyden en az birine göre daha sert bir yapıda bulunan bir parçacık ile diğer yüzeylerin en az birinin aşınarak kütle kaybına uğramasıyla gerçekleşmektedir. İki yüzey arasında sıkışmış parçacık, iki temas yüzeyi arasında parça kopmasıyla kendiliğinden de oluşabilir ya da dış etkenler sebebiyle sonradan da iki yüzey arasında sıkışarak aşınmaya neden olabilmektedir. Üç parçalı abrazif aşınmaya ise cilalama işlemi açıklayıcı bir örnek olmaktadır [44].

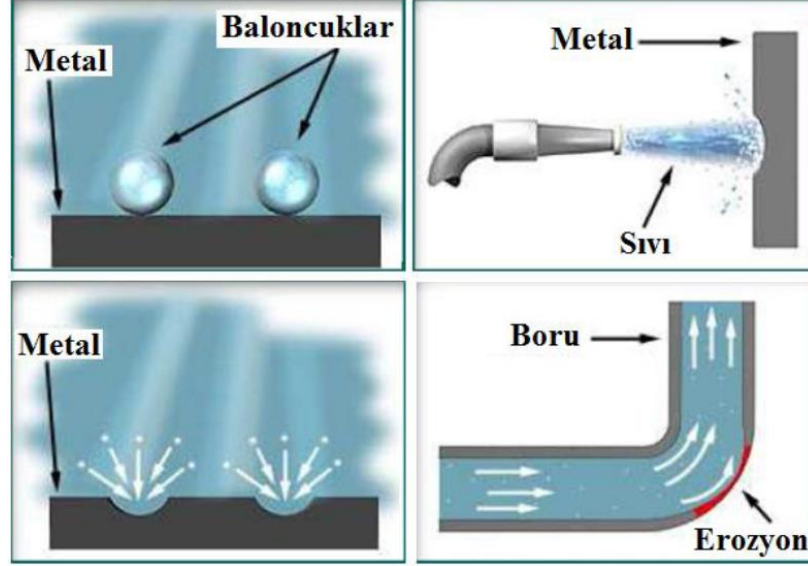


Şekil 4.4. Abrazif aşınma türleri şematik gösterimi [45].

4.1.3. Eroziyon Aşınma

Sıvı veya gaz akışkan içerisinde farklı boyut ya da geometride bulunan aşındırıcı partiküllerin temas halinde oldukları katı yüzeylere devamlı darbe etkisi ile yüzeyden parça kaldırarak gerçekleşen aşınma türü eroziyon aşınma olarak adlandırılmaktadır [42,46]. Aşındırıcı partiküllerin yanı sıra bu partiküllerin taşınmasında rol oynayan sıvı ya da gaz akışkanın da bir tür aşındırıcı olma özelliğinden dolayı, bu mekanizmaların herhangi birinin tek başına, kombineli ve yüksek sıcaklıklar altında gerçekleşen uygulamaları da aşınmaya sebebiyet vereceği düşünüldüğünde bu akışkanların fiziksel veya kimyasal özellikleri eroziyon aşınmayı etkileyen önemli bir faktör durumundadır. Bu etkiler doğrultusunda altı farklı eroziyon aşınma mekanizması oluşmaktadır. Bunlar; yıkama, püskürtme, erozyon-kavitasyon, korozyon-erozyon, yağdırma ve termal aşınma. Eroziyon aşınmanın en yaygın gözlemlendiği uygulama alanları olarak hidrolik pompalar, pnömatik hatlar, türbin çarklarında, kumlama

makinelerinde, püskürtme lülelerinde, pervanelerde, fanlarda, nozullarda ve boru dirseklerinde olarak örneklendirilebilmektedir [42,46,47].



Şekil 4.5. Erozif aşınma şematik gösterimi [42].

4.1.3.1. Katı Partikül Erozyonu

Sıvı ya da gaz akışkan taşıyıcı içerisinde bulunan sert aşındırıcı partiküllerin yüksek hızdaki akış vasıtası ile katı malzeme yüzeyine devamlı çarpması sonucunda yüzeyde oluşturduğu deformasyon ve yüzeyden parça kaldırma ile kütleli kayıplara yol açan olaya katı partikül erozyonu adı verilmektedir. Katı partikül erozyonunu etkileyen üç parametre vardır, bunlar; partikül akışı (hızı, çarpma açısı ve konsantrasyonu), partikül özellikleri, aşınan malzeme özellikleri [41,48].

4.1.3.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu

Sıvı damlası erozyonu yüksek hızlarda hareket eden katı parçaların kendilerine kıyasla çok daha düşük hızlarda hareket eden sıvı damlalara çarpması sonucu oluşmaktadır. Bu türe, yağmur erozyonu, su damlası erozyonu veya nem erozyonu olarak da adlandırılmaktadır. Sıvı damlası erozyonunu hasarının önlenmesi ya da azaltılabilmesi için uygulanan bazı yöntemler; yağış süresince katı hareketinin önlenmesi, damlaların parça yüzeyine çarpmadan önce bölünerek küçültülmesi ve

malzeme seçimi darbelere daha dayanıklı bir malzemedan yana kullanılmalıdır [41,48].

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

Sulu çamur erozyonu sıvı veya gaz aşındırıcı katı partiküllerin akışkan içerisinde nispeten düşük hızlarda taşınması sırasında malzeme yüzeyine devamlı olarak çarpması sonucu oluşan ve yaygın olarak boruların iç yüzeylerinde ya da pompalarda karşılaşılan bir aşınma türüdür. Sulu çamur erozyonu oluşumunda etkili parametrelerden bazıları; taşınan malzemenin partikül sertliği, ortam konsantrasyonu, partikül boyut ve geometrisi, akışkanın içinde yer alan partikül hızı, yoğunluğu ve çarpma açısıdır. Partikül sertliği, akışkan ortam konsantrasyonu ve partikül hızı ile aşınma arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur. Aşınmayı minimuma indirmek için, daha sert malzeme seçimi, optimum akışkan hızı ve yoğunluğu gibi iyileştirmeler yapılabilmektedir [41,48].

4.1.3.4. Kavite Erozyonu

Sıvı ortamda bulunan makine parçalarının aniden basınç değişimlerine maruz kalmaları sonucunda oluşan mekanik titreşimlerden dolayı meydana gelen yüksek frekanslı ses dalgalarının makine parçalarının yüzeylerin düşük basınçlı bölgeler oluşmasına sebebiyet vermektedir. Bununla birlikte bu düşük basınç bölgelerinde anlık olarak birçok küçük kabarcık oluşması ve bu kabarcıkların patlaması sonucu malzeme yüzeyinden mikron seviyesinde parça kopması sonucu gerçekleşen aşınma türüne kavite erozyonu adı verilmektedir [41,48].

4.1.3.5. Elektro Erozyon

Elektro erozyon vakum altında veya iletken olmayan bir sıvı (örneğin saf su) içerisinde anot ve katot arasında oluşan akım ile katot malzeme yüzeyinden mikron seviyesinde parçacık koparak gerçekleşen aşınma türüdür. Tel erozyon ve dalma erozyon olarak sanayide oldukça yaygın kullanım alanına sahip bir yöntemdir [41,48].

4.1.4. Korozif Aşınma

Yüzeylerde aşınma olup olmadığı farketmeksizin korozyona maruz kalmaktadır ancak aşınmaya maruz kalan yüzeylerin korozyona da uğradığı durumlar korozif aşınma olarak adlandırılmaktadır. Temas eden yüzeyler arasında görülen bu yüzey film tabakası vasıtası ile oluşturulan kimyasal tepkimeler yüzeyde oluşabilecek aşınmaları engellemektedir ancak oluşan yüzey filmi kırılgan ve ara yüzey bağları zayıf ise istenenin aksine yüzeyden koparak aşınma hızını artırmaktadır [42].



Şekil 4.6. Korozif aşınma şematik gösterimi [49].

4.1.5. Yorulma Aşınması

Birbiri ile çok fazla temas eden parçalar arasında meydana gelmektedir. Birbiri ile sürekli temas halinde olan yüzeylere örnek verilecek olursa, dişliler, rulman yatakları ve kam mekanizmaları gibi makine elemanları yorulma aşınmasına oldukça fazla maruz kalmaktadır. Bu malzemelerin birbirine yaptıkları tekrarlı yük sonucunda malzemenin yüzeyinin altında çatlaklar oluşmaktadır ve parça yüzeyine doğru ilerlemektedir ve yüzeyden parça koparak aşınma meydana gelmektedir [42].

4.2. AŞINMA DENEYLERİ VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

4.2.1. Aşınma Deney Yöntemleri

Endüstriyel kullanım alanlarında ekipmanlarda en çok istenen özelliklerin başında kullanılacak amaç için uygunluğu ve maliyetinin yanı sıra bir özelliği daha kullanım

ömürleridir. Makine ekipmanlarının aşınması sonucu ömürlerinde kısaltmaya sebebiyet vermektedir. Bu sonuçta parça maliyeti artmakta, onarım veya değişim için bir hayli süre harcanmakta en önemlisi de üretim hattında oldukça kayıplar yaşanmaktadır. Aşınmanın önüne çekilebilecek en önemli setlerden birisi aşınmaya karşı dayanıklı sert malzemeler kullanmaktır. Bahsi geçen sert malzemelerin seçimini yapabilmek adına önceden bu malzemelerin hangi malzemeler oldukları testip edilmelidir ve bunun için laboratuvar şartlarından kimyasal ve fiziksel özellikleri aynı olan üretimi kolay olabilecek basit geometride bir numune ile deneysel olarak çalışılmaktadır. Parça makineye bağlanarak çeşitli aşınma işlemlerine maruz kalmaktadır. ASLE (American Society of Lubrication Engineers) tarafından yaklaşık yüz adet aşınma deney sistemi belirlenmiştir. En popüler olanı bir abrazif aşınma deney sistemi olan pin-on-disk sistemidir. Aşınma deneylerinin sonucunda ölçüm yapılması gerekmektedir ve dört adet aşınma deney ölçüm çeşidi mevcuttur. Bunlar; ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişim ve radyoizotop yöntemleridir [50].

4.2.1.1. Ağırlık Farkı Yöntemi

Aşınma deneyi sonunda numunelerin 10^{-3} veya 10^{-4} gram hassasiyet değerlerine duyarlı bir terazi ile tartılarak yüzdesel kütle kayıpları hesaplanmakta ve aşınma gözlemlenmektedir. Maliyet bakımından uygun olmasından dolayı oldukça tercih sebebi olmaktadır. Yöntemin dezavantajı ise ağırlık ölçümünün, deney sonunda aşınmaya uğramış numunenin yerinden sökülüp yapılması gerekmektedir. Aşınma miktarı gram veya miligram olarak ifade edildiği zaman, sürtünme yoluna göre (metre veya kilometre) ağırlık kayıp miktarları gr/km, mg/m şeklinde, ağırlık kaybı bir alan için ifade edilecekse gr/cm^2 olarak ifade edilebilmektedir [51].

4.2.1.2. Kalınlık Farkı Yöntemi

Aşınma deneyi öncesi ve sonrasında deneye tabi tutulan malzemenin boyutundaki değişikliğin ölçülmesi sonucunda karşılaştırılarak aşınma oranının hesaplanabildiği yöntemdir. Ölçülen kalınlık farkından yola çıkılarak hacimsel kayıp ve birim hacimdeki aşınma hesaplanabilmektedir. Ölçme operasyonu μm hassasiyette olan ölçme aletleri ile yapılmalıdır [51].

4.2.1.3. İz Değişim Yöntemi

Aşındırılacak numune yüzeyinde plastik deformasyon sonucu geometrik bir iz oluşturulur. İz değişim yöntemi deneyi boyunca bu geometrik izde oluşan değişimler takip edilir ve oluşan aşınma miktarı hesaplanmaktadır. En yaygın iz oluşturucu olarak Vickers veya Brinell sertlik ölçme ucu kullanılmaktadır [51].

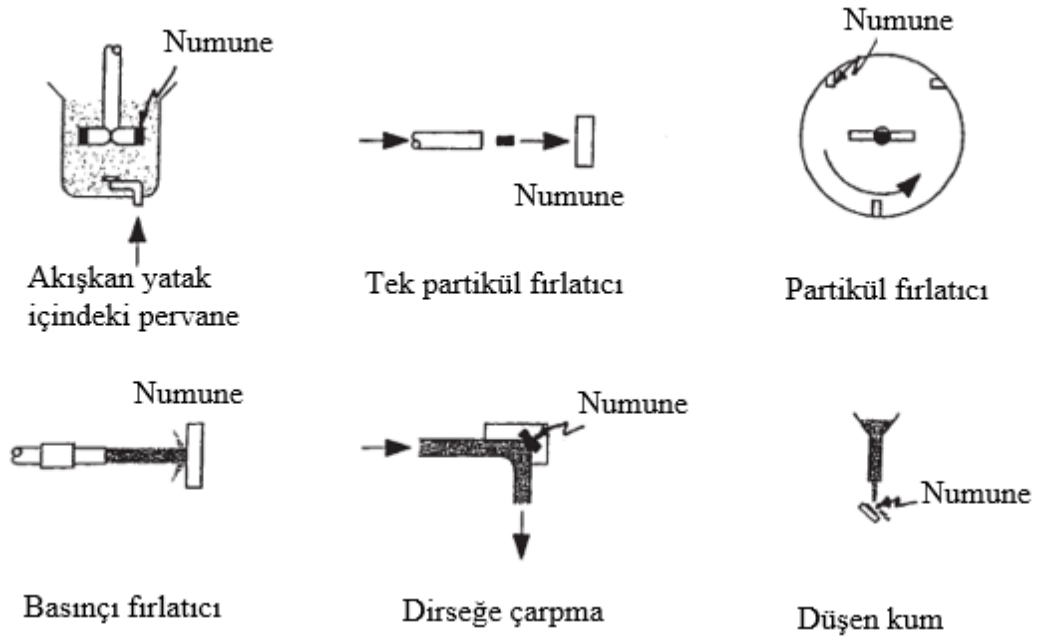
4.2.1.4. Radyo İzotop Yöntemi

Aşınmanın oluşması istendiği yüzeye proton, nötron veya yüklü α parçacıklarının bombardımanı sonucunda yüzeyin radyoaktif hale getirilmesi sağlanmaktadır. Deney yönteminin iki büyük avantajı söz konusudur. Bunlar; aşınma yüksek hassasiyetle ölçülebilmektedir ve çalışma şartları değiştirilmeden ölçü alınabilmesidir. Maliyet bakımından dezavantajlı durumda bulunan radyo izotop yöntemi genellikle özel amaçlar için kullanılmaktadır [51].

4.2.2. Erozyon Aşınma Deney Yöntemleri

4.2.2.1. Katı Partikül Erozyonu Deney Yöntemleri

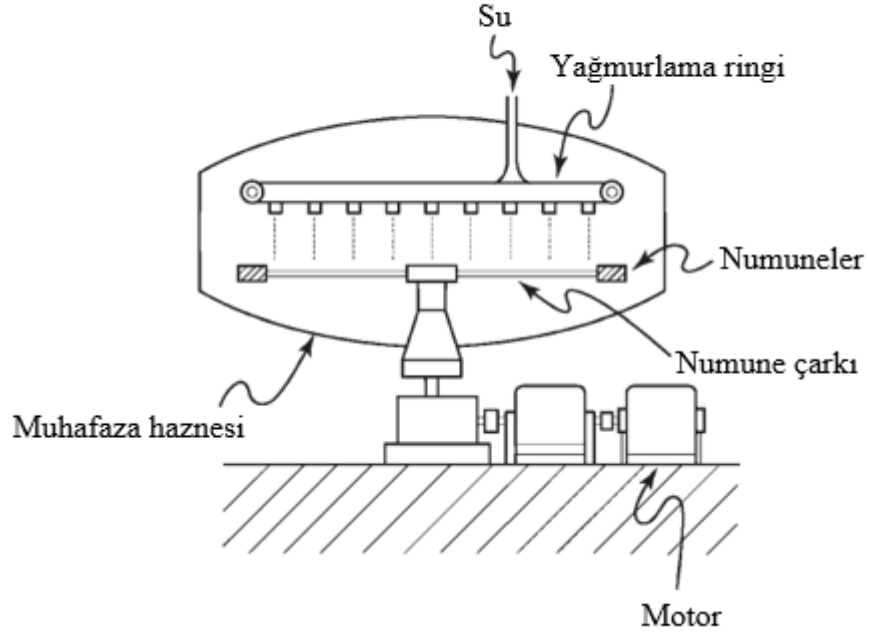
Katı partikül erozyonu akışkan içerisinde bulunan aşındırıcı katı partiküllerin aşınan yüzeye devamlı darbeleri sonucu malzeme yüzeyinden parça kopararak kütleli malzeme kaybına sebebiyet veren erozyon çeşididir. Katı partikül erozyonu için bazı deney düzenekleri Şekil 4.7' de şematik olarak gösterilmiştir. Bu aşınma türünde aşındırıcı katı partiküllerin konsantrasyonu, sertlik değeri, geometrisi, yüzeye çarpma açısı, malzeme miktarı ve hızı gibi sahip olduğu değişken parametreler oldukça belirleyici konumdadır. Akışkan olarak hava veya inert bir gaz kullanıldığı zaman herhangi bir kimyasal tepkime gerçekleşmez ve bu sonuçla katı partikül erozyonunun bir mekanik hasarlanmaya sebebiyet verdiği anlaşılmaktadır. Bu aşınma türü için literatürde belirleyici parametre akışkanın ve partiküllerin hızı olarak bilinmektedir [52].



Şekil 4.7. Katı partikül erozyon deney düzenekleri şematik gösterimi [52].

4.2.2.2. Sıvı (Su) Damlası Erozyonu Deney Yöntemleri

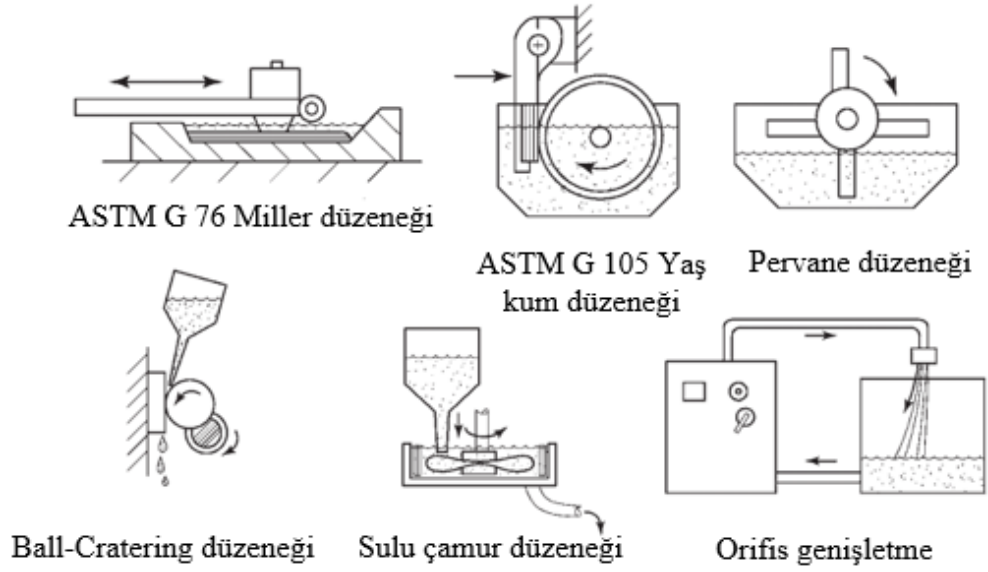
Su damlası erozyonu sıvı damlaların malzeme yüzeyine devamlı çarpması sonucu malzeme yüzeyinden parça kaldırma olayıdır. Hız bakımından aşındırıcı sıvı ve aşınan malzeme kıyaslandığında aşındırıcı sıvıların hız değerinin aşınan malzemenin hızına göre oldukça yüksek değerde olduğu gözlemlenmektedir. Bu aşınmanın azaltılabilmesinin en önemli yollarından bazıları; darbe dayanımı yüksek malzeme seçimi, yüzeye çarpan sıvı partiküllerin çarpma gerçekleşmeden önce küçültülmesi ve yağmur süresince malzemenin hareket ettirilmemesi olarak belirlenmiştir [41,48]. Şekil 4.8’de sıvı damlası erozyon deney düzeneği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Sıvı damlası erozyonu deney düzeneği şematik gösterimi [52].

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

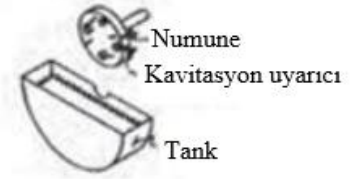
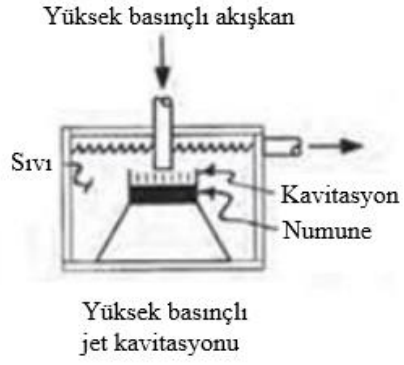
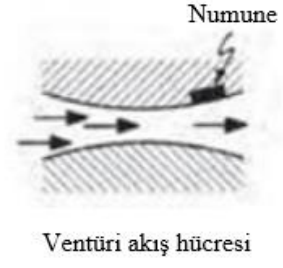
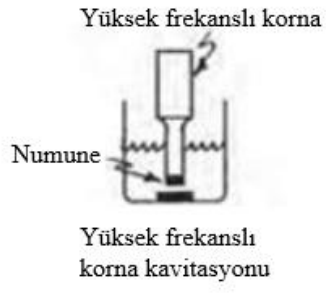
Katı partikül taşıyan akışkan ortam erozyonu sıvı veya gaz bir akışkan içerisinde yer alan aşındırıcı katı partiküllerin oluşturduğu yarı akışkan bir karışımın aşınacak malzeme yüzeyine nispeten düşük hızlarda tekrarlı darbeleri sonucunda yüzeyden parça kaldırarak aşınmaya yol açan erozif aşınma türüne verilen isimdir. Şekil 4.9'da bu aşınma türü için deney düzeneklerinin şematik gösterimi verilmiştir. Miller deney düzeneği bu tür aşınma için yaygın kullanılan aşınma düzeneğidir [52].



Şekil 4.9. Sulu çamur erozyonu deney düzenekleri şematik gösterimi [52].

4.2.2.4. Kaviteasyon Erozyonu Deney Yöntemleri

Sıvı ortamlarda çalışan makine elemanlarının ani basınç değişmelerinin sonucunda ortaya çıkabilen yüksek titreşimler sonucunda oluşturduğu yüksek frekans değerlerinde olan ses dalgalarının sebebiyet vermesiyle aşınan malzeme yüzeyinde oluşan birçok sayıdaki kabarcıkların düşük basınçlı bölgelerden yüksek basınçlı bölgelere ilerme isteği sonucunda meydana çıkabilen patlamaları sonucundan malzeme yüzeyinde çok düşük miktarlarda malzeme kaybı yaşanmaktadır. Bu durum kaviteasyon erozyonu olarak adlandırılmaktadır [41,48] ve Şekil 4.10'da kaviteasyon erozyonu deney düzeneklerinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.10. Kaviteasyon erozyonu deney düzenekleri şematik gösterimi [52].

BÖLÜM 5

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Raadnuri S. (2021) yapmış olduğu deneysel çalışmada, AISI 430 paslanmaz çelik (SS430) kullanarak üretilmiş 32 mm çapında iki kanatlı bir pervanenin erozif aşınma davranışını deneysel olarak incelemeyi hedeflemiştir. Bu çalışmada yüksek hızlı akış sistem tasarımlarının bir parçası olan bazı mekanik parçalar açısında en büyük sorunlardan biri kabul edilen erozif aşınmanın hangi yöntemlerle en aza indirgenebileceği hakkında ve erozif aşınma parametrelerinin değişkenliği sonucunda numunenin yüzdesel kütle kayıpları sonucunda belirleyici parametreler belirlenmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak ortalama tane boyutu 450-500 µm aralıklarında olan SiO₂ (silisyum dioksit) ve SiC (silisyum karbür) kullanılmıştır. Diğer deney parametreleri Tablo 5.1’de gösterilmiştir. Deney uygulaması, pervanenin belirli bir konsantrasyondaki sulu çamur karışımı bulunan bir kaba daldırılıp belirli bir süre boyunca belirli bir dönme hızında bekletilmesi sonucunda aşınmaya maruz kalması ile gerçekleştirilmiştir. İki faktörlü yarı faktöriyel deney tasarımı sonucunda sekiz tane deney yapılması belirlenmiş ve her deney için yeni bir pervane kullanılmıştır. Bu erozif aşınma deneyleri sonucunda E2D2R2C2 deney tanımlaması ile belirtilen 4. deney sonucu 0.50 g kütle kaybı ile en fazla yüzdesel kütle kaybına sebebiyet veren parametreleri içermektedir. Bu deneyler sonucunda yüzdesel kütle kayıpları kıyaslanarak sıralandığında numune dönme hızı, aşındırıcı malzeme sertliği ve konsantrasyon-aşındırıcı malzeme sertliği kombinasyonu erozif aşınma oluşumunda en belirleyici parametreler olarak belirlenmiştir [53].

Çizelge 5.1. Eroziyon aşınma deney parametreleri [53].

Aşındırıcı sertliği	E1	SiO ₂ – 820 kgf·mm ²
	E2	SiC – 2480 kgf·mm ²
Deney süresi	D1	2 saat
	D2	4 saat
Dönme hızı	R1	2000 rpm
	R2	4000 rpm
Konsantrasyon	C1	50 g/150 cc
	C2	100 g/150 cc

Singh A. vd. (2021) bu çalışmada, yüksek hızlı oksijen yakıtlı püskürtme yöntemi (HVOF) ile SS420 paslanmaz çeliğinin yüzeyini Ni-20%Al₂O₃ ve Ni-20%Cr₂O₃ tozlarına ilave olarak %5 oranında besleme stoğu tozu TiO₂ karıştırılarak yüzeyleri kaplanmıştır. Bu işlem sonucunda eroziyon aşınma dirençlerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Aşındırıcı malzeme olarak uçucu kül seçilmiştir. Eroziyon aşınma deney düzeneği 2 litre hazneli silindirik bir kap, bir mil ve vidalı krikodan oluşmaktadır. Kriko ile numunenin yükseklik ayarı yapılmaktadır daha sonra numunelere 750-1000 rpm dönme hızında ve 30-120 dakika süre aralıklarıyla deney uygulanmaktadır. Numunelerin daha homojen bir ortamda deneye maruz kalabilmesi adına silindirik kap tabanında bir adet pervane bulunmaktadır. Numunenin kütle kaybının ölçülmesi adına her deney sonrası asetonla nizami bir şekilde temizliği yapıp kurutulmaya bırakılmaktadır. Daha sonra en az 0,0001 gram hassasiyette bir elektronik mikrodengeleyici ile kütle kayıpları belirlenmiştir. Bu çalışma sonucunda, tüm test parametrelerinin maksimum koşulları altında (1500 rpm dönüş hızı, %50 konsantrasyon, 150-250 µm aşındırıcı toz tane boyutu ve 120 dakika deney süresi) işlem görmemiş numuneler ve Ni-Al, Ni-Cr, Ni-Al-Ti ve Ni-Cr-Ti kaplamalı numuneler kıyaslandığında erozyon oranında sırasıyla 14,8-16,6-19,27 ve 21,77 iyileşme gözlemlenmiştir. Ni-Cr-Ti kaplama Ni-Al-Ti kaplamaya kıyasla %2,5 daha fazla erozyon direncine sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmada kaplanmış ve çıplak numuneler arasındaki erozyon direnci şu şekildedir; Ni-Cr-Ti kaplamalı SS420 > Ni-Al-Ti kaplamalı SS420 > Ni-Cr kaplamalı SS420 > Ni-Al kaplamalı SS420 > Kaplamasız SS420 [54].

Kumar N. vd. (2021) yaptıkları çalışmada, 5 mm çapında ve 60 mm uzunluğunda bir nozul içeren jet tipi erozif aşınma düzeneği ile azotla güçlendirilmiş 21-4N (IS: X53Cr22Mn9Ni4N) östenitik paslanmaz çelik ve CA6NM (13Cr-4Ni) martenzitik paslanmaz çelik numuneleri kullanarak erozif aşınma davranışlarını incelemişlerdir. 21-4N östenitik paslanmaz çelik numuneler 2 saat süre boyunca 950 °C'de tavlandıktan sonra su kullanarak su verme işlemi uygulanmıştır. CA6NM martenzitik paslanmaz çeliği 4 saat süre boyunca 1050 °C'de östenitlenmiştir. Daha sonra yağ kullanılarak su verme işlemi uygulanmıştır ve ardından 620 °C'de 4 saat süre boyunca temperlenmiştir. 21-4N östenitik paslanmaz çeliğini aşındırmak için Aquaregia (HCl + 3HNO₃), CA6NM martenzitik paslanmaz çeliğini aşındırmak için ise Vilella Reaktif kullanılmıştır. Numunelerin çarpma açıları 30° ve 90°, uzaklık 10 mm, karışımdaki aşındırıcı kum oranı ağırlıkça %10 ve bulamaç hızı 21 m/s olarak belirlenmiştir. 30x20x5 mm ölçülerinde olan numunelerin test öncesinde yüzeyleri parlatılmıştır. Numuneler her 30 dakikada bir 10-3 gram hassasiyetli bir hassas tartı ile malzeme kaybı ölçülmüştür ve test toplam 120 dakikada tamamlanmıştır. Bu çalışma sonucunda 21-4N östenitik paslanmaz çeliği ve CA6NM martenzitik paslanmaz çeliğinin erozif aşınma sonuçlarına göre karşılaştırması yapılmıştır. Çalışmadaki koşullara göre, 21-4N çeliğinin CA6NM çeliğine göre daha iyi bir erozif aşınma direnci gösterdiği belirlenmiştir. 21-4N çeliğinin yüksek sertliği ve sertleştirilebilme özelliği sayesinde erozyona dayanıklı çalışmalar için martenzitik çeliklerden üstün kılmaktadır [55].

Girisha K. G. vd. (2018), martenzitik bir paslanmaz çelik çeşidi olan EN56B çeliği üzerine ortalama tane boyutları 50 µm olan Al₂O₃-40%TiO₂ toz partiküllerini atmosferik plazma püskürtme yöntemi ile kaplayarak 200 µm kalınlığından bir tabaka kalınlığı elde etmişlerdir. Tabaka ve paslanmaz çelik arasına yapışkanlığın artması adına altlık malzeme olarak Ni/Cr kullanmışlardır. Test öncesi numuneler mikrofotografı çekilip uygulanan kaplamanın homojen olarak malzeme yüzeyine dağıldığı gözlemlenmiştir. Daha sonra bu numuneler sulu-çamur (slurry) erozyonuna tabi tutulmuştur. 2 litre hacimli hazne içerisine litre başına %3,5 NaCl tozu ve 200 gram/litre konsantrasyonda olacak şekilde aşındırıcı malzeme (silika) eklenmiştir. Aşındırıcı malzeme boyutları 312 µm olacak şekilde hazırlanmıştır. Test oda sıcaklığında, üç farklı çarpma hızında (500, 1000, 1500 rpm) ve üç farklı süre boyunca

(5, 10, 15 saat) olarak uygulanmıştır. Bu çalışma sonucunda plazma kaplı çelik yüzeyler, işlem görmemiş yüzeylere göre daha fazla erozyon direncine sahip olmaktadır ve çarpma hızı arttıkça malzeme kaybı daha da artmaktadır [56].

BÖLÜM 6

MATERYAL VE METOT

Malzemelerin kullanım ömrünü olumsuz yönde etkileyen en önemli faktörlerin başında triboloji biliminin incelemekte olduğu aşınma gelmektedir. Aşınma türlerinden biri olan erozif aşınma; sıvı ya da gaz akışkan içerisinde yer alan farklı geometri ve boyutlarda olan aşındırıcı partiküllerin aşınan malzeme yüzeyinden parça uzaklaştırarak kütle kaybına sebebiyet vermesi olarak adlandırılmaktadır. Çevresel faktörlere bağlı olarak aşınma beş farklı ana başlıkta yer almaktadır. Bunlar; abrazyif, adhezif, erozif, korozyif ve yorulma aşınmasıdır. Erozyif aşınmanın bir türü olan sulu-çamur (slurry) erozif aşınması ise sıvı ya da gaz akışkan içerisinde düşük hızlarda taşınan katı partiküllerin içerisinde bulunduğu yüzeye tekrarlı olarak darbe uygulayarak yüzeyden parça kopmasına ve bu yüzden kütle kaybına sebebiyet vermesine denmektedir. Yapılan çalışmada, içerisinde sıvı (su) ve aşındırıcı kum (SiO_2 ya da silika) karışımı yer alan bir tank içerisine numunelerin yerleştirilmesi ve bu numunelerin sürekli olarak aşındırıcı kum darbelerine maruz kalarak yüzeyinden parça koparılması temeline dayanarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel öncesinde parametrelerin etkisinin incelenmesi planlandığından dolayı 3 farklı parametre belirlenmiş olup bunlar; numune çarpma hızı, sıvı ortam içerisinde yer alan aşındırıcı kum konsantrasyonu ve numune çarpma açısı olarak belirlenmiştir. Tüm bu değerlerin kombine hali olacak şekilde toplam 27 deney yapılması yerine TAGUCHI L9 metodu ile toplam 9 deney olacak şekilde deney tasarımı oluşturulmuştur.

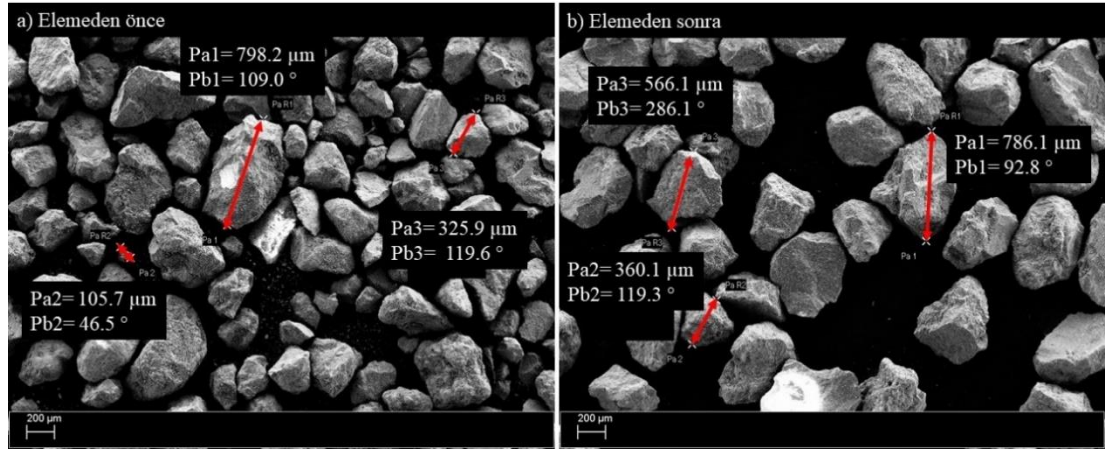
6.1. AŞINDIRICI PARTİKÜL HAZIRLANMASI

Aşındırıcı malzeme olarak SiO_2 (silika) kumu seçilmiştir. Ortalama partikül boyut aralığı, 600 μm ve 425 μm açıklık değerlerine sahip iki endüstriyel elek ile elendikten sonra ortalama 512,5 μm olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan bu aşındırıcı kum sulu-çamur (slurry) erozif aşınma deney düzeneği haznesine istenen konsantrasyonda

eklenerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler öncesinde ve sonrasında aşındırıcı kuma ait ham, elenmiş-çalışmamış ve elenmiş-çalışmış SEM görüntüleri elde edilmiştir. Çizelge 6.1’de aşındırıcı kum olan SiO₂’ye ait kimyasal kompozisyon verilmiştir.

Çizelge 6.1. Aşındırıcı SiO₂ kumun kimyasal kompozisyonu.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₂	TiO ₂	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	Diğer
Ağırlıkça (%)	98,6	0,58	0,0056	0,25	0,02	0,03	0,27	0,2444



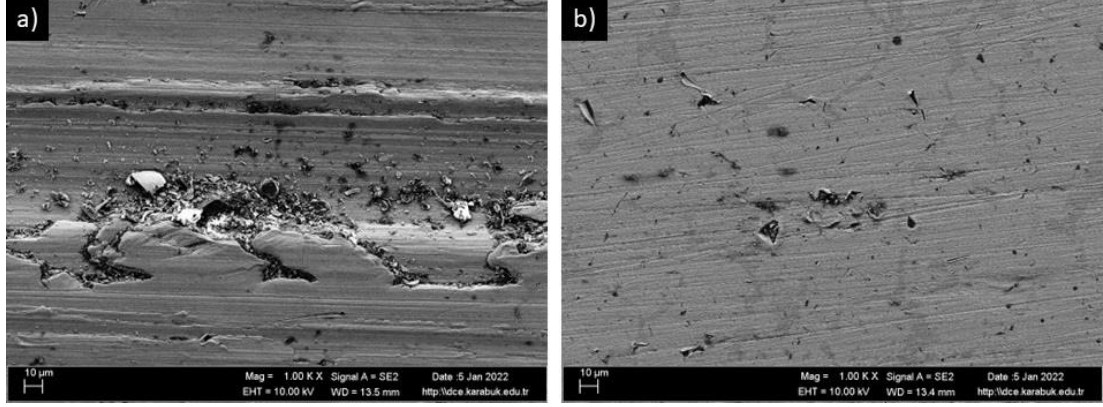
Şekil 6.1. Aşındırıcı SiO₂ kumuna ait SEM görüntüsü a) elemenden önce b) elemenden sonra

6.2. NUMUNELERİN HAZIRLANMASI

Numuneler AISI 420 kalite martenzitik paslanmaz çelik malzemeden seçilmiş olup tüm numuneler 5x6x30 mm boyutlarında hazırlanmıştır. Deneyler öncesinde numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin eşit olabilmesi adına 1200 gritlik karbür zımpara kağıdı ile zımparalanmış olup bu işlem sonucunda tüm numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin eşit olması beklenmektedir. Şekil 6.2’de numunelere ait zımpara öncesi ve sonrası SEM görüntüleri yer almaktadır. Çizelge 6.2’de AISI 420 numuneye ait kimyasal kompozisyonlar ve sertlik dereceleri verilmiştir.

Çizelge 6.2. AISI 420 numuneye ait kimyasal kompozisyonlar ve sertlik dereceleri.

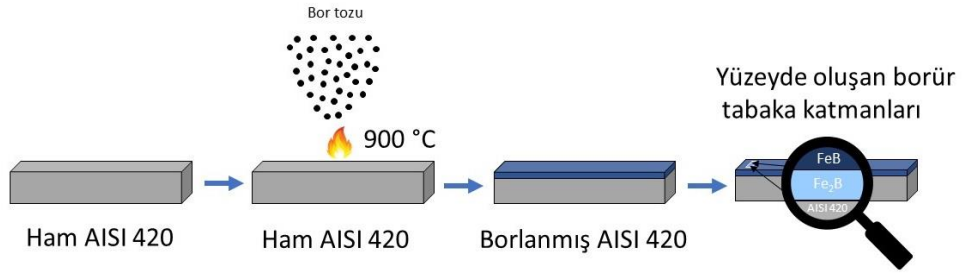
Numune	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Sertlik (HB)
AISI 420	0.20	<1.0	<0.04	<0.03	<1.0	13.0	-	-	<230



Şekil 6.2. Numunelere ait SEM görüntüleri a) Zımpara öncesi AISI 420 b) Zımpara sonrası AISI 420

6.2.1. Numunelerin Borlanması

Borlama ile çeliklerin yüzeylerinde bor elementinin difüzyonu sağlanarak yüksek sertlik derecelerine ulaşılması sonucu bu çeliklerin korozyon ve aşınma dirençlerini artırılmaktadır. Deneyi gerçekleştirilmek üzere 20 adet AISI 420 kalite numune hazırlanmış olup bu numunelerin 10 tanesine termokimyasal bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama işlemi uygulanmıştır. Bu borlama işlemi, AISI 420 kalite paslanmaz çelik numunelerin pota içerisinde yer alan bor tozuna gömülmesi ve pota ağzının bir kapakla kapatıldıktan sonra hava girişi olmayan bir fırın içerisinde 900 °C ve 6 saat süre boyunca uygulanmıştır. Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te borlama işlemine ait görseller yer almaktadır.



Şekil 6.3. Borlama işlemi şematik görseli.



Şekil 6.4. Borlama işlemine ait görseller a) numunelerin bor tozu içerisine gömülmesi b) potaya alınan numunelerin fırına eklenmesi c) 900 °C derecede borlama d) fırından çıkan numuneler.

Borlama işlemi Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi bünyesinde yer alan Makine Mühendisliği laboratuvarlarında yer alan 1100-1600 °C sıcaklıklarda çalışmaya uygun ve çift kat kaplamalı yalıtıma sahip olan PROTHERM marka PLF 120/5 model kamara fırınında gerçekleştirilmiştir. Bu fırına ait görsel şekil 6.5'te verilmiştir.



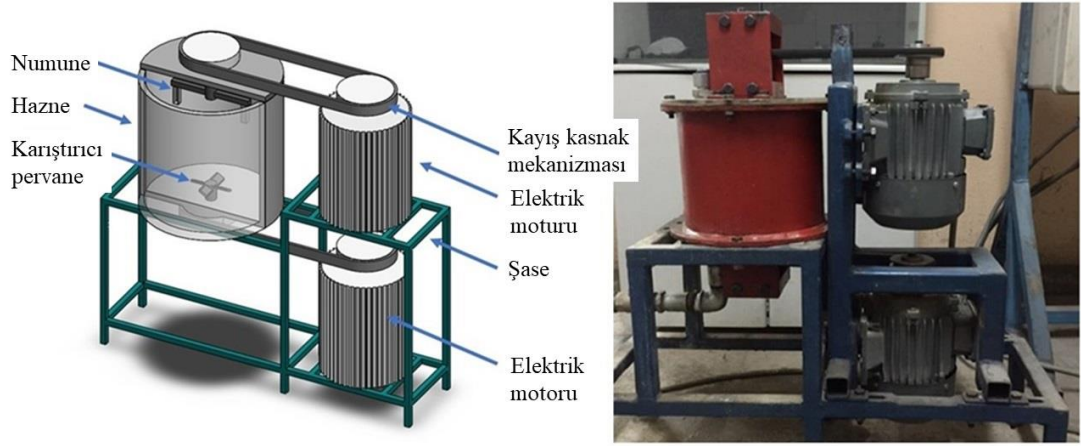
Şekil 6.5. PROTHERM PLF 120/5 kamara fırın görseli.

6.3 TAGUCHI, RSM ve ANOVA UYGULAMALARI

Deneyler öncesinde TAGUCHI metodu kullanılarak tüm parametreler ve bu parametrelerin farklı değerlerinin kombinasyonu ile bir deney tasarımı yapılmaktadır. Bütün parametrelerin birbiri ile olan ilişkisinden oluşan tüm deneyleri yapmak yerine TAGUCHI deney tasarımı sayesinde yapılması gereken minimum deney sayısı belirlenerek az sayıda deney yapılmaktadır. Response Surface Metodu (RSM) kullanılarak kütle kaybı, yüzey pürüzlülük değerleri ve haznede gerçekleşen sıcaklık değişimleri matematiksel olarak modellenmekte ve diğer deney sonuçlarına ilişkin optimum değerler elde edilmektedir. Her bir parametre için regresyon denklemi (yaklaşım denklemi) çıkarılıp, tahmini ve deneysel veriler kıyaslanmaktadır. Bu kıyaslama sonucunda verilerin doğruluğunu gösteren bir R-kare değeri elde edilmektedir. Son aşamada ANOVA metodu kullanılarak her parametrenin slurry erozif aşınma sürecinde ne oranda etkili olduğu analiz edilmektedir.

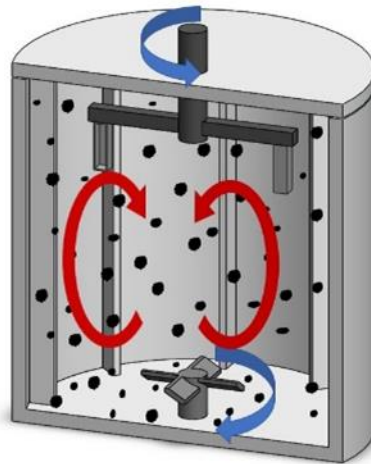
6.4. SULU-ÇAMUR (SLURRY) EROZİF AŞINMA DENEYLERİ

Erozif aşınmanın bir türü olan sulu-çamur (slurry) erozif aşınması sıvı ya da gaz akışkan ortam içerisinde yer alan aşındırıcı partiküllerin temas ettiği malzeme yüzeyinden parça kaldırması olarak adlandırılmaktadır. Parça kaldırılması sonucunda malzemede kütle ve dolayısıyla hacim kayıpları meydana gelmektedir. Deneyler, numunelerin sıvı ortamda farklı konsantrasyonlarda bulunan aşındırıcı kumlara çarpması sonucu malzeme yüzeyinden parça kaldırması prensibine dayanarak yapılmıştır. Yapılan bu deneylerin gerçekleştirildiği deney düzeneği 10 litre iç hacme ve 240 mm iç çapa sahip bir silindirik tank, bu tankın tabanında yer alan dört kanatlı bir karıştırıcı ve numunelerin konumlandırılacağı bir kapaktan oluşmaktadır. Tank tabanında bulunan dört kanatlı karıştırıcı ve kapakta bulunan numunelerin tahrik edilmesi adına iki adet 1.1 kW güce sahip devir ayarı yapılabilen AC elektrik motoru bulunmaktadır. Her iki motor da kayış kasnak mekanizması ile deney düzeneğini tahrik etmektedir. Numuneler deney düzeneğine bir numune tutucu ile bağlanır. Numune tutucular ise kollara, bu kollar ise bir kol tutucuya bağlıdır. Son olarak bu kol tutucu bir mile bağlıdır. Bahsedilen elektrik motorlarından bir tanesi bu sistemi tahrik etmektedir. Bu sayede numunelere çevresel hız değeri kazandırılmaktadır. Numune tutucular üzerine yerleştirildikleri plakada yer alan kademeli boşluklar sayesinde 0°-90° aralıklarında 15'er derecelik hareket sağlayabilmektedir. Kapak üzerinde yer alan düzenek elemanları (numune tutucular, kollar ve kol tutucular) AISI 316 östenitik paslanmaz çelik malzemeden elde edilmiştir. Ölçüleri 5x6x30 mm olan numunelerin temas alanı 1,5 cm², dönme yarıçapları 72 mm'dir. Şekil 6.6'da erozif aşınma deney düzeneğine ait şematik görsel ve fotoğraf yer almaktadır.



Şekil 6.6. Erozif aşınma deney düzeneğine ait şematik görsel ve fotoğraf.

Silindirik tank tabanında dört kanatlı karıştırıcı bulunmaktadır. Karıştırıcının amacı sulu-çamur karışımını homojen duruma getirmektir. Bu karıştırıcı bir mile ve bu mil ise kayış kasnak mekanizması ile bahsedilen ikinci elektrik motoruna bağlıdır. Her deney için sabit olarak 600 dev/d ile karıştırıcıyı tahrik etmektedir. Daha sağlıklı aşınma sonuçları elde edebilmek adına kapak kısmında yer alan numuneler ve dört kanatlı karıştırıcı birbirleri ile ters yönde dönmektedir. Şekil 6.6’da deney düzeneği haznesine ait kısmi kesit görseli şematik olarak verilmiştir.



Şekil 6.7. Erozif aşınma deney düzeneğine ait şematik hazne görseli.

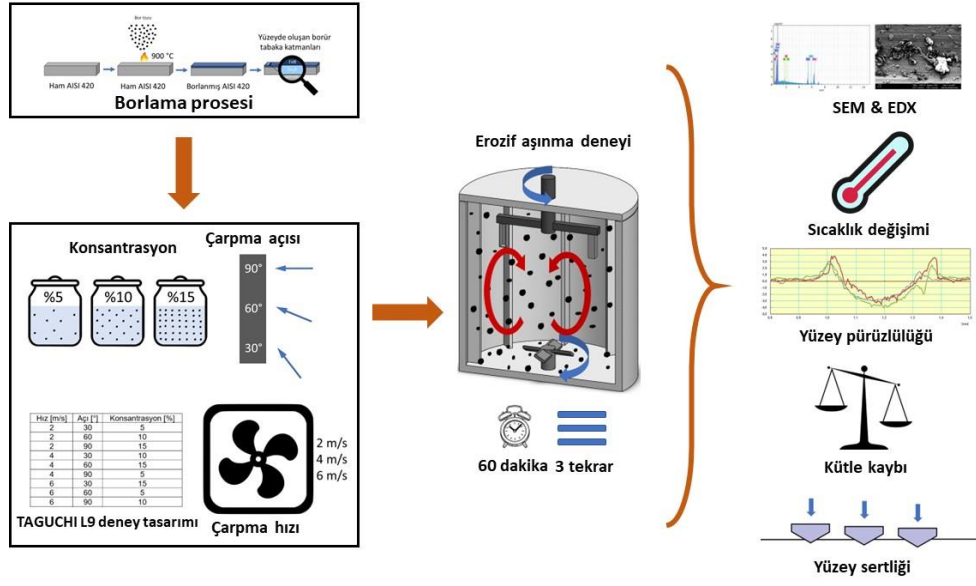
Deneyle esnasında ve öncesinde kullanılan yardımcı ekipmanlar oldukça önem arz etmektedir. Bunlardan bazıları çeşitli aralık değerlerine sahip endüstriyel elekler,

hassas terazi, aşındırıcı kum olarak listelenebilir. Görüntülemelerin gerçekleştirdiği yer ise Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü'dür. Şekil 6.8'de bazı yardımcı ekipmanlar ve deneylerin gerçekleştirildiği yere ait görseller verilmiştir.



Şekil 6.8. a) 0,600 mm endüstriyel elek b) eleme işlemi sonrası elek altı kum c) 10^{-4} gram hassas terazi d) 512,5 μm elenmiş aşındırıcı kum e) 0,425 mm endüstriyel elek f) görüntülemelerin gerçekleştirildiği Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü

Deneyler gerçekleştirilmeden önce TAGUCHI L9 ile deney tasarımı yapılmıştır. Belirlenen parametrelere göre her deney üç kez tekrarlanacak şekilde yapılmıştır ve daha sağlıklı sonuçlar elde edilmesi adına bu üç deneyin ortalaması kabul edilmiştir. Deneyler öncesinde numuneler su ile temizlenip ardından kurutma makinesi ile yaklaşık 2 dakika boyunca kurutulmuştur ve 10^{-4} gram hassas terazi ile ilk ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numune tutuculara cıvata yardımı ile bağlanan numunelerin deney parametrelerine göre çarpma açısı (30° - 60° - 90°) ayarlanmıştır. Deney süresi olarak belirlenen 1 saatlik süre boyunca aşınmaya maruz bırakılan numunelerin deney bitiminde tekrar su ile temizlenip hemen ardından kurutma makinesi ile yaklaşık 2 dakika boyunca kurutulmasının ardından hassas terazide ikinci ölçümleri yapılmıştır. Böylece her iki kütle ölçümleri sonucunda farkları hesaplanmıştır ve kütle kayıpları belirlenmiştir. Şekil 6.9'da slurry erozif aşınma deneyine ait aşamalar verilmiştir.



Şekil 6.9. Slurry erozif aşınma uygulaması şematik gösterimi.

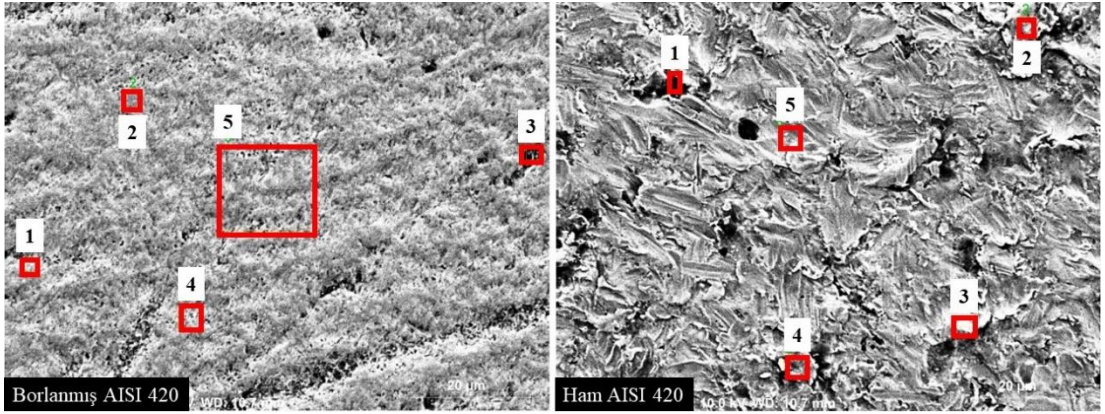
Her deney sonrasında silindirik tank içerisinde yer alan aşındırıcı silika kumu (SiO_2) tanktan dışarı tahliye edilip tankın içi temizlenmiştir ve yeni bir deneye başlarken hazırlanan diğer silika kumu eklenmiştir. Deneylerde etkisinin incelenmesi adına 3 adet çarpma hızı, 3 adet çarpma açısı ve 3 adet konsantrasyon değeri parametre olarak belirlenmiştir. Çarpma hızları 2 m/s, 4 m/s ve 6 m/s değerlerinde, çarpma açıları 30°, 60° ve 90° değerlerinde ve aşındırıcı kum sulu-çamur ortamında ağırlıkça %5, %10 ve %15 konsantrasyon değerlerinde olacak şekilde deneyler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 6.3'te TAGUCHI L9 metodu ile oluşturulmuş deney tasarımı verilmiştir.

Çizelge 6.3. TAGUCHI L9 deney tasarımı.

Deney	Hız [m/s]	Açı [°]	Konsantrasyon [%]
1	2	30	5
2	2	60	10
3	2	90	15
4	4	30	10
5	4	60	15
6	4	90	5
7	6	30	15
8	6	60	5
9	6	90	10

6.5. EDX ANALİZİ

900 °C’de 6 saat süre ile borlama işlemine tabi tutulan AISI 420 kalite paslanmaz çelik ve herhangi bir ısıl işleme maruz kalmayan ham AISI 420 kalite paslanmaz çeliklere EDX taraması yapılmıştır. EDX taraması yapılmış numunelere ait deney parametreleri; 4 m/s çarpma hızı, 60° çarpma açısı ve ağırlıkça %15 aşındırıcı kum konsantrasyonudur. Elde edilen EDX verilerine göre borlanmış AISI 420 numune için elemental analiz sonuçları ortalaması; %18,95 B, %6,97 C, %5,10 O, %4,02 Si, %0,34 S, %6,90 Cr, %1,06 Mn, %28,87 Fe ve %27,80 Ni olarak hesaplanmıştır. Ham AISI 420 numune için elemental analiz sonuçları ortalaması; %18,83 C, %6,65 O, %1,92 Si, %0,17 S, %0,01 P, %10,72 Cr, %1,70 Mn ve %60,01 Fe olarak hesaplanmıştır. Şekil 6.10’da 5 numaralı deney numunelerine ait EDX analizi yapılan bölgeler verilmiştir.



Şekil 6.10. 5 numaralı deney numunelerine ait EDX analizi yapılan bölgeler.

Çizelge 6.4’te borlanmış AISI 420 numune için işaretlenmiş bölgelere ait elemental analiz sonuçları yüzdesel olarak verilmiştir.

Çizelge 6.4. Borlanmış AISI 420 numuneye ait EDX sonuçları.

Bölge	Elementler									
	B [%]	C [%]	O [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]	Ni [%]
1	18.75	6.84	3.07	5.46	0.00	0.15	5.19	0.84	18.93	40.77
2	23.33	3.67	0.99	1.90	0.00	0.45	9.01	1.39	38.47	20.78
3	12.16	14.60	17.58	5.35	0.00	0.24	5.71	0.76	26.89	16.71
4	19.59	5.03	1.96	3.81	0.00	0.46	7.26	1.00	28.95	31.96
5	20.90	4.72	1.89	3.57	0.00	0.42	7.32	1.30	31.08	28.81
Ortalama	18.95	6.97	5.10	4.02	0.00	0.34	6.90	1.06	28.87	27.80

Çizelge 6.5'te ham AISI 420 numune için işaretlenmiş bölgelere ait elemantel analiz sonuçları yüzdesel olarak verilmiştir.

Çizelge 6.5. Ham AISI 420 numuneye ait EDX sonuçları.

Bölge	Elementler							
	C [%]	O [%]	Si [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Mn [%]	Fe [%]
1	28.72	7.95	1.82	0.00	0.03	11.07	2.03	48.38
2	14.27	4.35	2.30	0.00	0.28	11.91	1.49	65.40
3	8.49	6.40	2.07	0.00	0.15	10.70	0.81	71.38
4	24.65	7.89	1.67	0.00	0.17	9.22	2.10	54.29
5	18.02	6.64	1.73	0.00	0.20	10.68	2.07	60.63
Ortalama	18.83	6.65	1.92	0.01	0.17	10.72	1.70	1.70

6.6. MİKROSERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Yüksek sıcaklıklarda (800-1050 °C) ve 1-12 saat süre aralıklarında uygulanabilen ve uygulandığı bölgenin yüzey bileşimini değiştirip malzemeye difüze olarak yüzey sertleştiren bir termokimyasal işlem olan borlama sonucunda malzeme yüzeylerinde oldukça yüksek sertlik değerleri elde edilebilmektedir. Bu çalışmada numuneler, 900 °C'de ve 6 saat süre boyunca borlama işlemine tabi tutulmuştur. Herhangi bir ısıl işlem görmemiş ham AISI 420 kalite paslanmaz çeliğe ait mikrosertlik değeri 418 HV olarak ölçülmüştür. Borlanmış AISI 420 kalite paslanmaz çeliğe ait mikrosertlik ölçüm sonucu ise 1642 HV olarak ölçülmüştür. Ölçümler her numune için 3 farklı noktadan gerçekleştirilmiş olup değerlerin ortalamaları kabul edilmiştir. Ölçümlerin gerçekleştirildiği cihaz Zwick Roell marka ZHU3000top modelde olup KARDEMİR A.Ş. bünyesinde yer alan Kalite Güvence Metalurji Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.11'de mikrosertlik ölçüm cihazına ait fotoğraf verilmiştir.



Şekil 6.11. Zwick Roell ZHU3000top mikrosertlik ölçüm cihazı.

BÖLÜM 7

DENEYSEL BULGULAR

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda tüm numunelerde aşınma sebebiyle meydana gelen kütle kayıpları, yüzey pürüzlülük değişimleri ve hazne sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır. TAGUCHI L9 deney tasarımı ile gerçekleştirilen deneyler sonucuna göre yapılan bu hesaplamalar Çizelge 7.1’de verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde yüzey bileşimini değiştiren bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlamanın uygulandığı AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik numuneler ile herhangi bir işleme maruz kalmayan ham AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik numuneler kıyaslandığında; borlanmış numunelerin daha az kütle kaybı yaşadığı tespit edilmiştir. RSM metodu ile oluşturulan regresyon denklemleri ile elde edilen veriler ve regresyon denklemleri sırasıyla Çizelge 7.2 ve Çizelge 7.3’te verilmiştir.

Çizelge 7.1. Deneysel sonuçlar.

Deney	Hız [m/s]	Açı [°]	Konsantrasyon [ağ. %]	Kütle Kaybı [mg]		Yüzey Pürüzlülüğü – Ra [µm]		Sıcaklık Değişimi [°C]
				Borlanmış – AISI420	Ham – AISI420	Borlanmış – AISI420	Ham – AISI420	
1	2	30	5	0,7	0,9	0,227	0,101	1,62
2	2	60	10	0,9	1,1	0,189	0,109	1,84
3	2	90	15	1,4	1,2	0,167	0,129	1,72
4	4	30	10	1,9	3	0,249	0,146	2,24
5	4	60	15	2,3	3,5	0,271	0,151	3,48
6	4	90	5	1,7	1,9	0,233	0,132	2,28
7	6	30	15	4,4	4,3	0,323	0,211	6,5
8	6	60	5	2,8	2,8	0,297	0,162	4,86
9	6	90	10	3,2	4,1	0,324	0,184	4,84

Çizelge 7.2 Regresyon denklemleri sonucu elde edilen veriler.

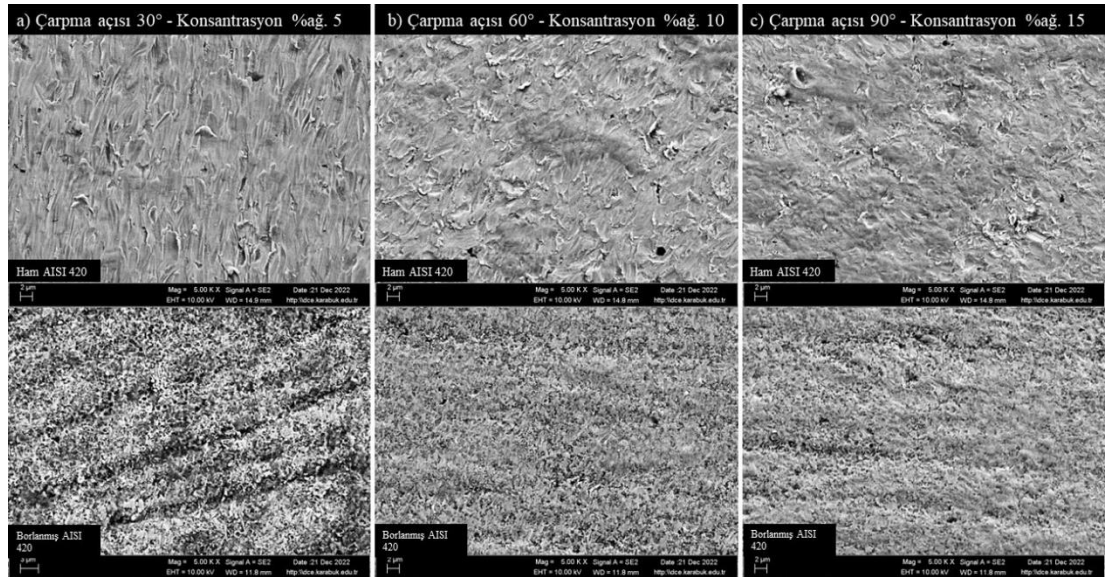
Hız [m/s]	Konsantrasyon [ağ. %]	Açı [°]	Kütle Kaybı [mg]		Yüzey Pürüzlülüğü – Ra [µm]		Sıcaklık Değişimi [°C]
			Borlanmış AISI 420	Ham AISI 420	Borlanmış AISI420	Ham AISI 420	Borlanmış – Ham AISI 420
2	5	30	0,5611	0,8001	0,20491	0,09708	1,1928
		60	0,3943	0,6333	0,19234	0,09492	0,9396
		90	0,2275	0,4665	0,17977	0,09276	0,6864
	10	30	0,9946	1,3666	0,20551	0,11308	1,6828
		60	0,8278	1,1998	0,19294	0,11092	1,4296
		90	0,661	1,033	0,18037	0,10876	1,1764
	15	30	1,4281	1,9331	0,20611	0,12908	2,1728
		60	1,2613	1,7663	0,19354	0,12692	1,9196
		90	1,0945	1,5995	0,18097	0,12476	1,6664
4	5	30	1,8445	2,1335	0,26519	0,13342	3,0288
		60	1,6777	1,9667	0,25262	0,13126	2,7756
		90	1,5109	1,7999	0,24005	0,1291	2,5224
	10	30	2,278	2,7	0,26579	0,14942	3,5188
		60	2,1112	2,5332	0,25322	0,14726	3,2656
		90	1,9444	2,3664	0,24065	0,1451	3,0124
	15	30	2,7115	3,2665	0,26639	0,16542	4,0088
		60	2,5447	3,0997	0,25382	0,16326	3,7556
		90	2,3779	2,9329	0,24125	0,1611	3,5024
6	5	30	3,1279	3,4669	0,32547	0,16976	4,8648
		60	2,9611	3,3001	0,3129	0,1676	4,6116
		90	2,7943	3,1333	0,30033	0,16544	4,3584
	10	30	3,5614	4,0334	0,32607	0,18576	5,3548
		60	3,3946	3,8666	0,3135	0,1836	5,1016
		90	3,2278	3,6998	0,30093	0,18144	4,8484
	15	30	3,9949	4,5999	0,32667	0,20176	5,8448
		60	3,8281	4,4331	0,3141	0,1996	5,5916
		90	3,6613	4,2663	0,30153	0,19744	5,3384

Çizelge 7.3. Regresyon denklemleri tablosu (H: Çarpma hızı, A: Çarpma açısı, K: Aşındırıcı kum konsantrasyonu, KK: Kütle kaybı, YP: Yüzey pürüzlülüğü ve SD: Sıcaklık değişimi).

Değer	D= W+X*H+Y*K+Z*A
KK _{Borlanmış} [mg]	-0,989 + 0,6417*H – 0,00556*A + 0,0867*K
KK _{Ham} [mg]	-0,933 + 0,6667*H – 0,00556*A + 0,1133*K
YP _{Borlanmış} [µm]	0,1566+0,03014*H-0,000419*A+0,00012*K
YP _{Ham} [µm]	0,0469+0,01817*H - 0,000072*A+0,003200*K
SD [°C]	-0,88 + 0,918*H - 0,00844*A + 0,0980*K

7.1. AŞINMA YÜZEYLERİ

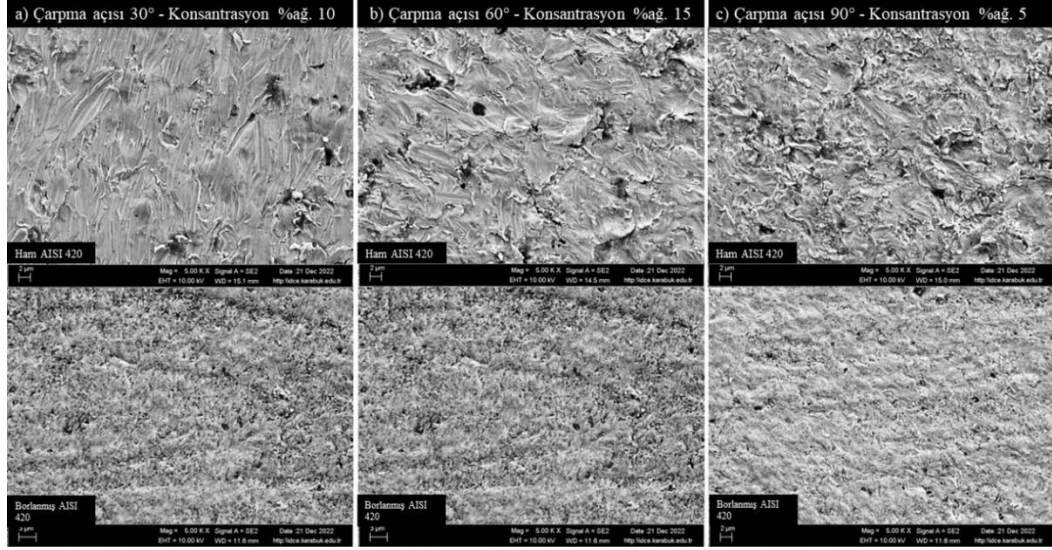
TAGUCHI L9 deney tasarımı sonucunda gerçekleştirilmesi planlanan 9 adet deney belirlenmiş ve gerçekleştirilmiştir. Şekil 7.1’de 2 m/s çarpma hızı değerinde ile gerçekleştirilen 1, 2 ve 3 numaralı deneyler neticesinde borlanmış AISI 420 ve AISI 420 numunelerine ait aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. 2 m/s çarpma hızı değerinde gerçekleştirilen bu deneyler sonucunda elde edilen SEM görüntülerine bakıldığında 30° çarpma açısına ait deney sonuçlarında malzeme yüzeylerinde kesme aşınması daha belirgin gözükmemektedir. Açılı değerleri arttıkça kesme aşınmasından deformasyon aşınmasına geçiş olmaktadır. 90° çarpma açısında gerçekleşen deneylerde ise en yüksek deformasyon aşınması gözükmemektedir. Numunelerin yüzeylerine bakıldığında bariz bir aşınma gerçekleştiği zımpara izlerinin silinmesiyle de desteklenmektedir.



Şekil 7.1. Borlanmış ve ham AISI 420 numuneler için 2 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 1 b) deney 2 c) deney 3

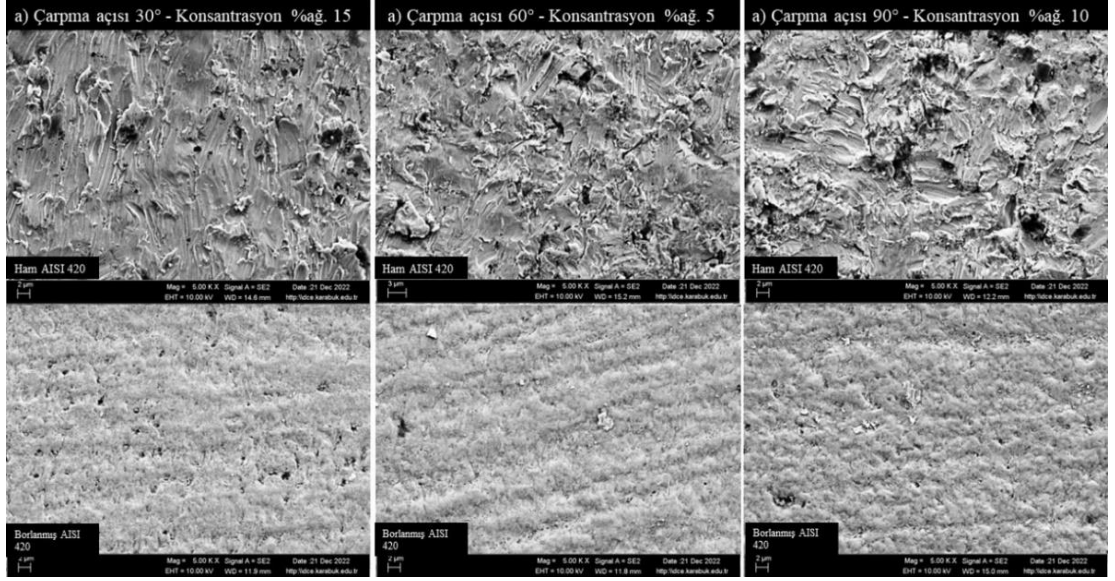
Şekil 7.2’de 4 m/s çarpma hızı değerinde ile gerçekleştirilen 4, 5 ve 6 numaralı deneyler neticesinde borlanmış AISI 420 ve AISI 420 numunelerine ait aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Şekil 7.1 ile kıyaslandığında 30° çarpma açısı deneyinde konsantrasyon değeri %5 iken, Şekil 7.2’de 30° çarpma açısının bulunduğu deneyde konsantrasyon değeri %10’dur ve konsantrasyon parametresi aşınmayı

önemli ölçüde etkilediğinden dolayı kesme aşınması izleri daha belirgin durumdadır. Aynı şekilde çarpma açısı değeri büyüdükçe kesme aşınmasından deformasyon aşınmasına bir geçiş gerçekleşmektedir.



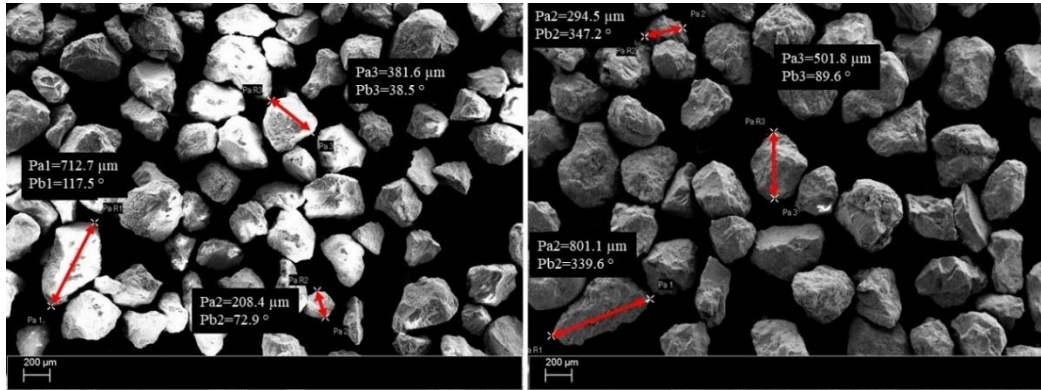
Şekil 7.2. Borlanmış ve ham AISI 420 numuneler için 4 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 4 b) deney 5 c) deney 6

Şekil 7.3'te 6 m/s çarpma hızı değerinde ile gerçekleştirilen 7, 8 ve 9 numaralı deneyler neticesinde borlanmış AISI 420 ve AISI 420 numunelerine ait aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri verilmiştir. Çarpma açısı değeri 90° olan her iki numunede de oldukça belirgin deformasyon aşınması izleri mevcuttur. Konsantrasyon değeri %15 ve çarpma açısı değeri 30° olan her iki numunede de oldukça fazla kesme aşınması izleri mevcuttur. 60° çarpma açısı değerine sahip deneye ait numunelerde ise bölgesel olarak deformasyon ve kesme izleri mevcuttur.



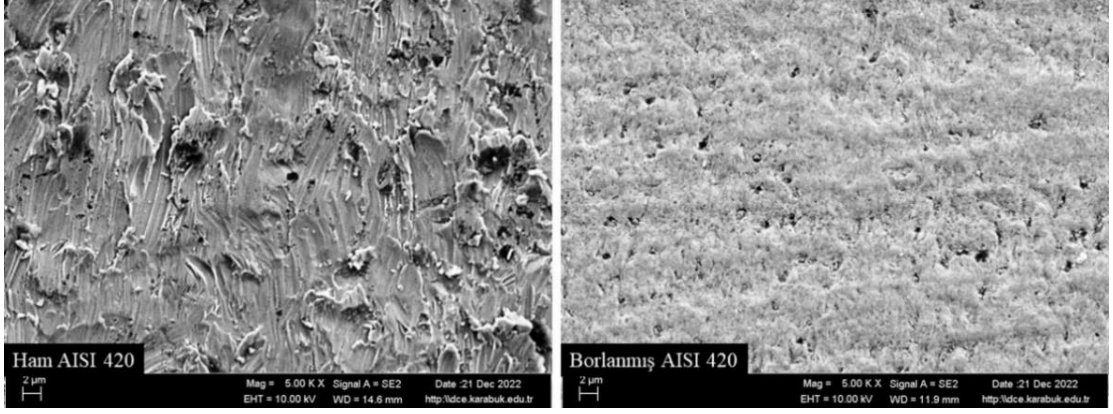
Şekil 7.6. Borlanmış ve ham AISI 420 numuneler için 6 m/s çarpma hızında gerçekleşen deneylerin SEM görüntüleri a) deney 7 b) deney 8 c) deney 9

Şekil 7.7’de her iki malzeme ile çalışmış SiO_2 kumuna ait görseller ayrı ayrı verilmiştir. Kumlara ait çalışma öncesi ve sonrasında elde edilen SEM görüntüleri incelendiğinde kumlara ait geometrik yapılarda değişiklik olduğu gözlemlenmiştir. Bu değişiklikler, keskin yapıda bulunan bu kumların köşelerinde yuvarlanmalar ve sürekli çarpma etkisi ile kırılmalar sonucu tanelerde küçülme meydana gelmesidir.



Şekil 7.7. Çalışmış SiO_2 kumu.

Kütle kaybına en çok sebebiyet veren 7 numaralı deney parametreleri; 6 m/s çarpma hızı değeri, %15 konsantrasyon değeri ve 30° çarpma açısı değeridir. Bu parametreler ile gerçekleştirilen 7 numaralı deney sonucunda Ham AISI 420 numune ve borlanmış AISI 420 numuneye ait SEM görüntüleri Şekil 7.8’de verilmiştir.



Şekil 7.8. Aşınma mekanizmaları

7.2. KÜTLE KAYBI

Aşınma etkisiyle malzemenin yüzeyinden parça kopmasıyla kütle kaybı meydana gelmektedir ve bu kütle kaybı hesaplanabilmektedir. Bunun için ilk olarak aşınma deneyi öncesi her bir numunenin hassas terazi ile tartılması gerekmektedir. Tartım işlemi öncesinde her numunenin yüzey kalitesi eş olabilmesi adına 1200 gritlik zımpara ile zımparanmıştır ve daha sonra bu numuneler, yüzeylerinde herhangi bir kalıntı kir, toz vb. etken olmaması adına su ile yıkanıp bir ısıtıcı yardımı ile tüm su ve nem buharlaşana kadar kurutulmuştur. Bu işlemler sonrasında ilk tartım işlemleri gerçekleştirilmiştir ve deney düzeneğine bağlanıp TAGUCHI L9 deney tasarımına göre belirlenen çarpma hızı, çarpma açısı ve aşındırıcı kum konsantrasyonu parametrelerine göre deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonrasında yüzeyde herhangi bir madde ya da aşındırıcı kum olan silisyum oksit kalmaması adına tekrar su ile yıkanıp bir ısıtıcı yardımı ile kurutulmuştur. Bu işlem sonrasında ikinci tartımları gerçekleştirilip meydana gelen kütle kaybı hesaplanmıştır. Her deney üç kez gerçekleştirilmiştir.

Slurry erozif aşınma deneyleri sonucunda elde edilen veriler incelendiğinde (Çizelge 7.1.) girdi parametreleri olan çarpma hızı, konsantrasyon ve çarpma açısı değerlerine bağlı olarak aşınma miktarında değişiklikler gözlemlenmiştir. Aşınma miktarı ile hız ve konsantrasyon değerleri arasında doğru orantı olduğu açık bir şekilde görülmektedir. Bunun yanında aşınma miktarı ile çarpma açısı arasından bir ters orantı olduğu görülmektedir. Konsantrasyon değeri parametresinin deney sonuçlarına

etkisini tespit edebilmek için diğ er iki parametre olan çarpma hızı ve çarpma açısı sabit bir değ er seçilerek konsantrasyon değ eri bağımsız değ işken olarak kabul edilmiştir. Borlanmış AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için 2 m/s çarpma hızı ve 30° çarpma açısı değ erlerinde ve sırasıyla %5, %10 ve %15 konsantrasyon ortamında gerçekleştirilen deneyler sonucu gelen kütle kayıpları sırasıyla 0,561 mg, 0,995 mg ve 1,428 mg olarak hesaplanmıştır. Tüm deney parametrelerinin aynı olduğu ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için bu kütle kayıp değ erleri ise sırasıyla 0,800 mg, 1,366 mg ve 1,933 mg olarak hesaplanmıştır. Borlanmış AISI 420 numune için konsantrasyon değ eri %5 değ erden %10 değ ere çıktığından aşınma miktarı %77,25 oranında artmaktadır. Konsantrasyon değ eri %10'dan %15 değ eri çıktığından ise aşınma miktarı %43,58 artmaktadır. Aynı koşullarda ham AISI 420 numune için konsantrasyon değ eri %5'ten %10 değ erine çıkarıldığında ise aşınma miktarı %70,80 artarken, konsantrasyon değ eri %10'dan %15'e çıkarıldığında ise aşınma miktarı %41,45 artmaktadır. Aynı çarpma hızı ve çarpma açısı değ erlerinde her iki numune için %5 konsantrasyon değ erinde aşınma miktarları kıyaslandığında ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme borlanmış AISI 420 paslanmaz çelik malzemeden %42,59 oranında daha fazla kütle kaybına maruz kalmıştır. Aynı kıyaslama %10 ve %15 konsantrasyon değ erlerinde yapıldığında ise ham AISI 420 paslanmaz çelik malzemede daha fazla kütle kaybı meydana gelmiştir ve bu oranlar sırasıyla %37,40 ve %35,36 olarak hesaplanmıştır.

Çarpma hızı değ eri parametresinin deney sonuçlarına etkisini tespit edebilmek adına ise konsantrasyon ve çarpma açısı sabit kabul edilerek çarpma hızı değ eri bağımsız değ işken olarak kabul edilmiştir. Bu durum için konsantrasyon değ eri %10 ve çarpma açısı değ eri ise 90° olarak belirlenmiştir. Borlanmış AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için hız değ erleri sırasıyla 2 m/s, 4 m/s ve 6 m/s olarak artış gösterdiğinde aşınma sonucu meydana kütle kayıpları sırasıyla 0,661 mg, 1,944 mg ve 3,227 mg olarak hesaplanmıştır. Ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için aynı durumda meydana gelen kütle kayıpları sırasıyla 1,033 mg, 2,366 mg ve 3,699 mg olarak hesaplanmıştır. Çarpma hızı değ eri artış gösterdikçe her iki malzemede de aşınma miktarının artış gösterdiği görülmektedir. Borlanmış AISI 420 için çarpma hızı 2 m/s'den 4 m/s değ erine yükseldiğinde aşınma miktarının %194,09 arttığı, çarpma hızı 4 m/s'den 6 m/s değ eri yükseldiğinde ise aşınma miktarının %61,83 arttığı

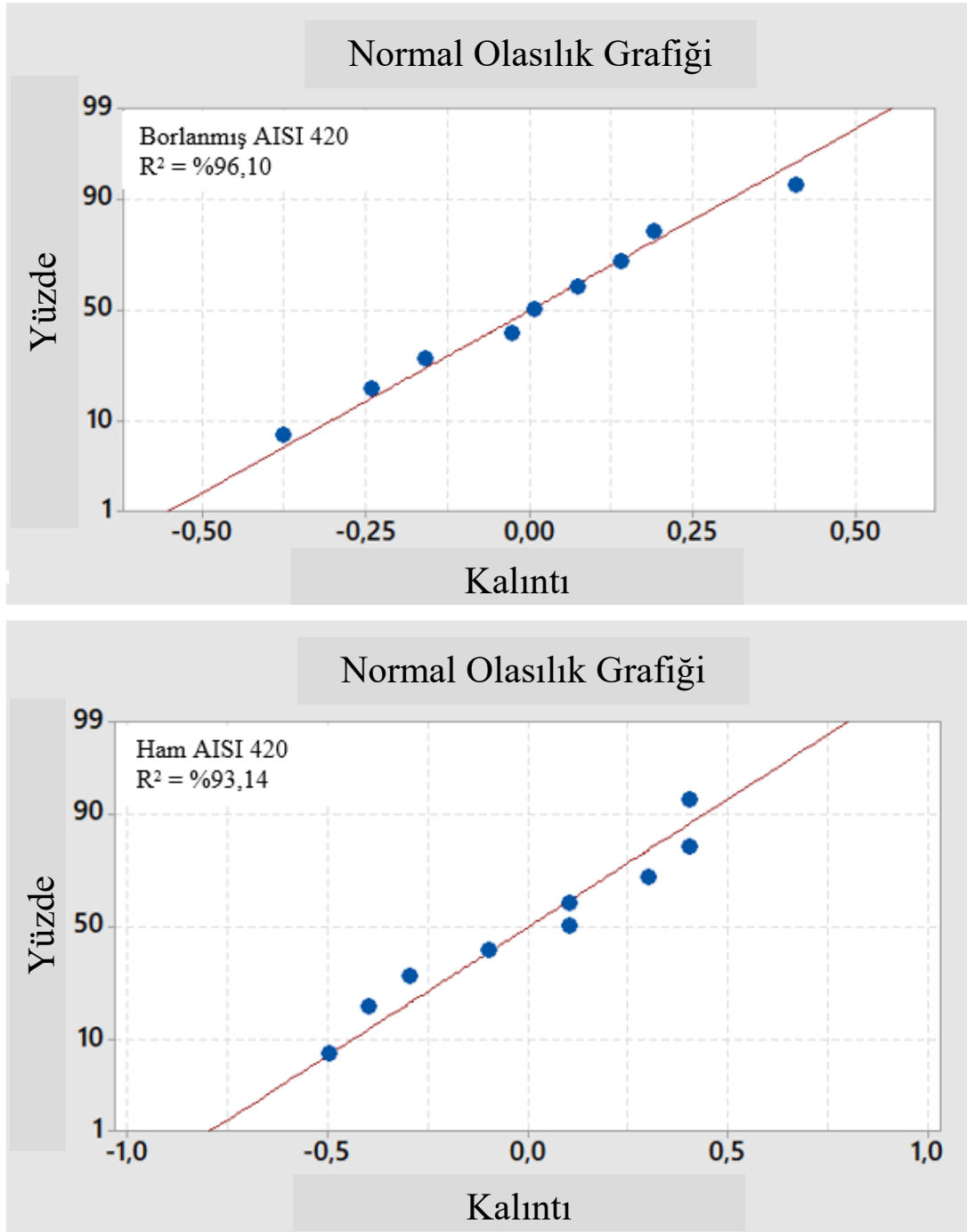
hesaplanmıştır. Ham AISI 420 için çarpma hızı 2 m/s'den 4 m/s değerine yükseldiğinde aşınma miktarının %129,04 arttığı, çarpma hızı 4 m/s'den 6 m/s değeri yükseldiğinde ise aşınma miktarının %56,33 arttığı hesaplanmıştır. Her iki numunede meydana gelen kütle kayıpları hesaplandığında ise ham AISI 420 malzemede daha fazla kütle kaybı olduğu görülmektedir. Çarpma hızları 2 m/s, 4 m/s ve 6 m/s olarak kabul edilirse ham AISI 420 malzeme aşınma sonucunda sırasıyla %56,20, %17,15 ve %14,6 oranlarında daha fazla kütle kaybı yaşamıştır.

Çarpma açısı değeri parametresinin deney sonuçlarına etkisini tespit edebilmek adına ise konsantrasyon ve çarpma hızı sabit kabul edilerek çarpma açısı değeri bağımsız değişken olarak kabul edilmiştir. Bu durum için konsantrasyon değeri %15 ve çarpma hızı değeri ise 2 m/s olarak belirlenmiştir. Borlanmış AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için çarpma açısı değerleri sırasıyla 30°, 60° ve 90° olarak artış gösterdiğinde aşınma sonucu meydana kütle kayıpları sırasıyla 1,428 mg, 1,261 mg ve 1,094 mg olarak hesaplanmıştır. Ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için çarpma açısı değerleri sırasıyla 30°, 60° ve 90° olarak artış gösterdiğinde aşınma sonucu meydana kütle kayıpları sırasıyla 1,933 mg, 1,766 mg ve 1,599 mg olarak hesaplanmıştır. Çarpma açısı ile aşınma miktarı arasında ters orantı olduğu görülmektedir. Borlanmış AISI 420 için çarpma açısı 30°'den 60° değerine yükseldiğinde aşınma miktarının %11,67 azaldığı, çarpma açısı 60°'den 90° değeri yükseldiğinde ise aşınma miktarının %13,56 azaldığı hesaplanmıştır. Ham AISI 420 için çarpma açısı 30°'den 60° değerine yükseldiğinde aşınma miktarının %8,63 azaldığı, çarpma açısı 60°'den 90° değeri yükseldiğinde ise aşınma miktarının %9,45 azaldığı hesaplanmıştır. Her iki numunede meydana gelen kütle kayıpları hesaplandığında ise ham AISI 420 malzemede daha fazla kütle kaybı olduğu görülmektedir. Çarpma açıları 30°, 60° ve 90° olarak kabul edilirse ham AISI 420 malzeme aşınma sonucunda sırasıyla %35,36 %40,04 ve %46,16 oranlarında daha fazla kütle kaybı yaşamıştır.

Çizelge 7.4. Kütle kaybı için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Ham AISI 420			Borlanmış AISI 420		
		Adj SS	P-Değeri	Etki Oranı %	Adj SS	P-Değeri	Etki Oranı %
H - Hız [m/s]	1	10,6667	0,001	%77,85	11,175	0	%84,97
K - Konsantrasyon [ağ. %]	1	1,9267	0,024	%14,06	9,8817	0,017	%9,69
A - Açılı [°]	1	0,1667	0,39	%1,22	0,1667	0,233	%1,43
Hata	5	0,94			1,1267		
Toplam	8	13,7			0,4539		

Çizelge 7.4'te verilen ANOVA sonuçları incelendiğinde aşınma deney sonuçlarına etkisi yüksek iki parametre gözükmemektedir. Bu parametreler çarpma hızı ve konsantrasyondur. Ham AISI 420 malzeme için aşınma deneylerinde en etkili parametre %77,85 etki oranı ile hız, ikinci olarak ise %14,06 etki oranı ile konsantrasyondur. Bu iki parametreden sonra %1,22 etki oranı ile çarpma açısı gelmektedir. Borlanmış AISI 420 malzeme için ise aşınma deneylerinde en etkili parametre %84,97 etki oranı ile hız, ikinci olarak ise %9,69 etki oranı ile konsantrasyondur. Bu iki parametreden sonra %1,43 etki oranı ile çarpma açısı gelmektedir.



Şekil 7.9. Kütle kaybı sonuçlarının regresyon grafiği.

RSM ile elde edilen veriler sonucunda Şekil 7.9'da verilen her iki grafik incelendiğinde deneysel veriler ile tahminleme verileri arasında yüksek uyum yakalandığı söylenebilmektedir. Borlanmış AISI 420 paslanmaz çelik malzeme ve ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için uyum oranları sırasıyla %96,10 ve %93,14'tür.

7.3 YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

Gerçekleştirilen deneyler sonucunda Çizelge 7.2. incelendiğinde numunelerin yüzey pürüzlülük değişimleri parametreler ile direkt ilişkilidir. Bu yüzey pürüzlülük değerleri çarpma hızı ve konsantrasyon değerleri ile doğru orantılı olmakla birlikte çarpma açısı ile ters orantılıdır. Deneyler gerçekleştirilmeden önce her iki malzeme olan borlanmış AISI 420 ve ham AISI 420 paslanmaz çelik numunelerin yüzey kaliteleri eş olabilmesi adına 1200 gritlik karbür zımpara ile zımparalanmıştır ve bu zımpara işlemi sonucunda borlanmış AISI 420 malzeme için yüzey pürüzlülük değeri 0,113 μm , ham AISI 420 malzeme için ise bu değer 0,057 μm olarak ölçülmüştür. Konsantrasyon parametresinin deney sonuçlarına etkisini tespit edebilmek adına ise çarpma hızı ve çarpma açısı sabit kabul edilerek çarpma konsantrasyon değeri değişken olarak kabul edilmiştir. Bu kıyaslanmanın yapılabilmesi adına çarpma hızı 4 m/s ve çarpma açısı 60° olarak kabul edilmiştir. Üç farklı değere sahip olan konsantrasyon değeri ise %5, %10 ve %15 olarak belirlenmiştir. Her iki malzeme için eşit şartlar geçerli olarak kabul edilmiştir. Borlanmış AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için belirtilen çarpma hızı ve çarpma açısı değerleri ile verilen konsantrasyon değerleri için yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,252 μm , 0,253 μm ve 0,254 μm olarak ölçülmüştür. Ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için ise belirtilen çarpma hızı ve çarpma açısı değerleri ile verilen konsantrasyon değerleri için yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,131 μm , 0,147 μm ve 0,163 μm olarak ölçülmüştür. Her iki malzeme için yüzey pürüzlülük değerinde gerçekleşen değişim, başlangıçta ölçülen ve deney sonrası ölçülen yüzey pürüzlülük değerlerinin kıyaslanması ile gözlemlenebilmektedir. Borlanmış AISI 420 için konsantrasyon değeri %5 olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %123 oranında artış, konsantrasyon değeri %10 olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %123,9 oranında artış ve son olarak konsantrasyon değeri %15 olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %124,77 oranında artış görülmektedir. Ham AISI 420 için konsantrasyon değeri %5 olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %129,82 oranında artış, konsantrasyon değeri %10 olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %157,89 oranında artış ve son olarak konsantrasyon değeri %15 olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %185,96 oranında artış görülmektedir.

Çarpma hızı parametresinin deney sonuçlarına etkisini tespit edebilmek adına ise konsantrasyon ve çarpma açısı sabit kabul edilerek çarpma hızı değeri değişken olarak kabul edilmiştir. Bu kıyaslamanın yapılabilmesi adına konsantrasyon %10 ve çarpma açısı 30° olarak kabul edilmiştir. Üç farklı değere sahip olan çarpma hızı değeri ise 2 m/s, 4 m/s ve 6 m/s olarak belirlenmiştir. Her iki malzeme için eşit şartlar geçerli olarak kabul edilmiştir. Borlanmış AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için belirtilen konsantrasyon ve çarpma açısı değerleri ile verilen çarpma hızı değerleri için yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,205 µm, 0,265 µm ve 0,326 µm olarak ölçülmüştür. Ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için ise belirtilen konsantrasyon ve çarpma açısı değerleri ile verilen çarpma hızı değerleri için yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,113 µm, 0,149 µm ve 0,185 µm olarak ölçülmüştür. Borlanmış AISI 420 için çarpma hızı 2 m/s olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %81,41 oranında artış, çarpma hızı 4 m/s olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %134,51 oranında artış, çarpma hızı 6 m/s olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %188,49 oranında artış görülmektedir. Ham AISI 420 için çarpma hızı 2 m/s olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %98,24 oranında artış, çarpma hızı 4 m/s olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %161,40 oranında artış, çarpma hızı 6 m/s olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %224,56 oranında artış görülmektedir.

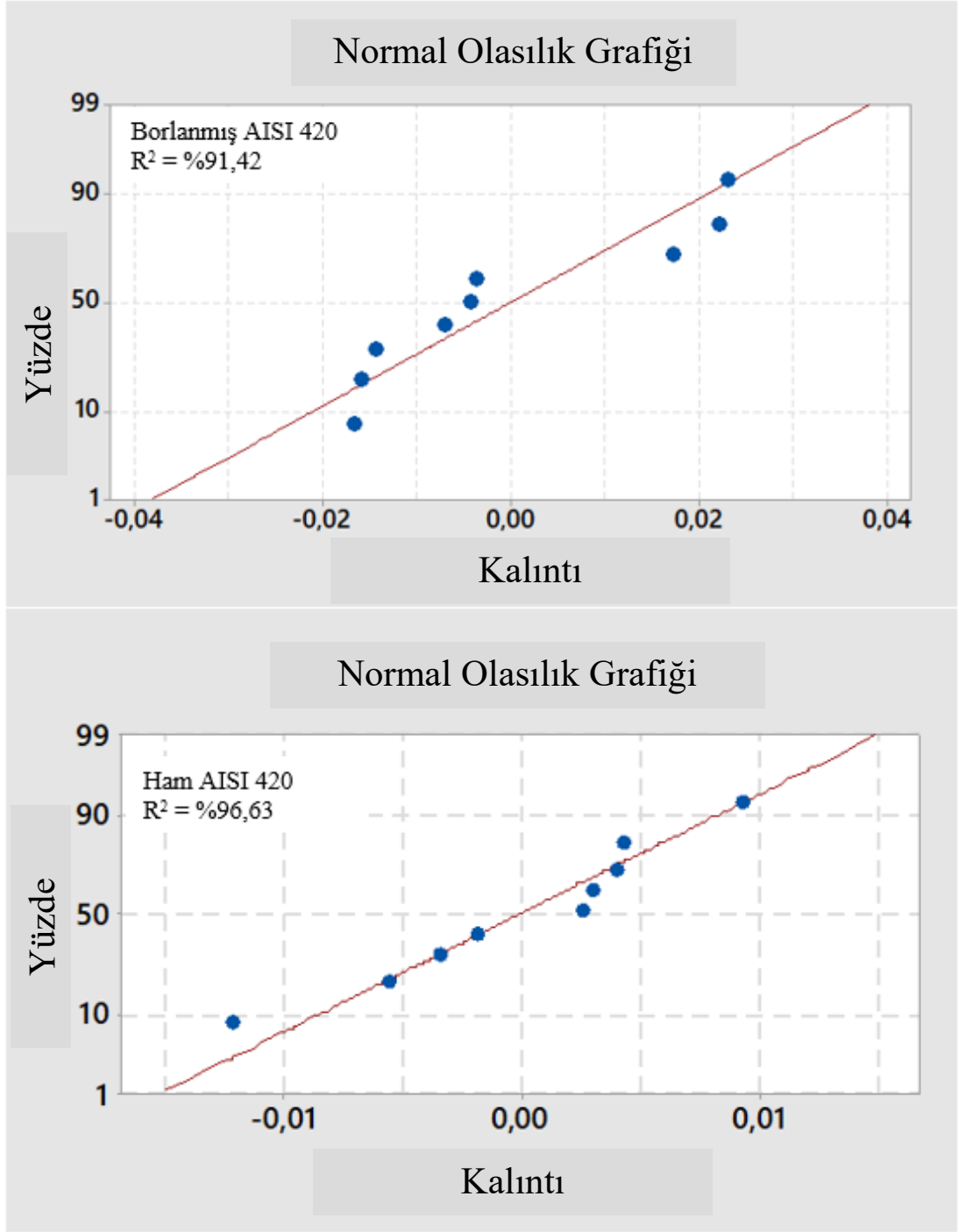
Çarpma açısı parametresinin deney sonuçlarına etkisini tespit edebilmek adına ise çarpma hızı ve konsantrasyon sabit kabul edilerek çarpma açısı değeri değişken olarak kabul edilmiştir. Bu kıyaslamanın yapılabilmesi adına çarpma hızı 6 m/s ve konsantrasyon %15 olarak kabul edilmiştir. Üç farklı değere sahip olan çarpma açısı değeri ise 30°, 60° ve 90° olarak belirlenmiştir. Her iki malzeme için eşit şartlar geçerli olarak kabul edilmiştir. Borlanmış AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için belirtilen çarpma hızı ve konsantrasyon değerleri ile verilen çarpma açısı değerleri için yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,326 µm, 0,314 µm ve 0,301 µm olarak ölçülmüştür. Ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için belirtilen çarpma hızı ve konsantrasyon değerleri ile verilen çarpma açısı değerleri için yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,201 µm, 0,199 µm ve 0,197 µm olarak ölçülmüştür. Borlanmış AISI 420 için çarpma açısı 30° olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %188,49 oranında artış, çarpma açısı 60° olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %177,87

oranında artış, çarpma hızı 90° olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %166,37 oranında artış görülmektedir. Ham AISI 420 için çarpma açısı 30° olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %252,63 oranında artış, çarpma açısı 60° olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %249,12 oranında artış, çarpma hızı 90° olduğunda malzemenin yüzey pürüzlülük değerinde %245,61 oranında artış görülmektedir.

Çizelge 7.5. Yüzey pürüzlülük için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Borlanmış AISI 420			Ham AISI 420		
		Adj SS	P-Değeri	Etki Oranı %	Adj SS	P-Değeri	Etki Oranı %
H - Hız [m/s]	1	0,0218	0,0218	87,60	0,007921	0,00	80,69
K - Konsantrasyon [ağ. %]	1	0,000002	0,000002	0,001	0,001536	0,005	0,28
A - Açı [°]	1	0,000946	0,000946	3,80	0,000028	0,543	15,64
Hata	5	0,002136	0,000427	8,58	0,000331		3,37
Toplam	8	0,024885			0,009816		

Çizelge 7.5'te verilen ANOVA sonuçları incelendiğinde her iki malzeme için yüzey pürüzlülük değerlerine etkisi en yüksek parametre çarpma hızıdır. Borlanmış AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için çarpma hızının deney sonuçlarına etkisi %87,60 oranla ilk sırada yer almaktadır. Daha sonra sırasıyla %3,80 etki oranı ile çarpma açısı ve son olarak %0,001 etki oranı ile konsantrasyon yer almaktadır. Ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme incelendiğinde ise ilk sırada yine %80,69 etki oranı ile hız parametresinin olduğu görülmektedir. Daha sonra %15,64 etki oranı ile konsantrasyon ve son olarak %0,28 etki oranı ile çarpma açısı yer almaktadır.



Şekil 7.10. Yüzey pürüzlülük sonuçlarının regresyon grafiği

RSM ile elde edilen veriler sonucunda Şekil 7.10'da verilen her iki grafik incelendiğinde deneysel veriler ile tahminleme verileri arasında yüksek uyum yakalandığı söylenebilmektedir. Borlanmış paslanmaz çelik malzeme ve ham AISI 420 paslanmaz çelik malzeme için uyum oranları sırasıyla %91,42 ve %96,63'tür.

7.4. SICAKLIK DEĞİŞİMİ

Deneyle öncesinde ve sonrasında sıcaklık değişiminin hesaplanabilmesi adına deney düzeneği haznesinin belirlenmiş olan altı adet noktasından sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu sıcaklık ölçümleri yaklaşık 300 mm mesafeden hazneye dik olacak şekilde bir pirometre yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Deney parametrelerinin sıcaklık değişimine olan etkisi için Tablo 7.2. incelendiğinde parametrelerin hazne sıcaklık değişimini direkt olarak etkilediği görülmektedir.

Konsantrasyon değerinin hazne sıcaklık değişimine olan etkisini incelemek adına çarpma hızı ve çarpma açısı değerleri sabit kabul edilerek, sırasıyla 4 m/s ve 30° olarak seçilmiştir. Konsantrasyon değerleri ise %5, %10 ve %15'tir. Her iki malzeme için bu şartlardaki hazne sıcaklık değişimleri sırasıyla 3,028 °C, 3,518 °C ve 4,008 °C olarak hesaplanmıştır. AISI 420 malzeme için ise sıcaklık değişimleri sırasıyla 1,9156 °C, 2,3211 °C ve 2,7266 °C olarak hesaplanmıştır. Her iki paslanmaz çelik malzeme için gerçekleştirilen deneyde konsantrasyon değeri %5'ten %10 değerine yükseldiği durum sonunda hazne sıcaklık değişiminde %16,18 oranında bir artış, konsantrasyon değeri %10'dan %15 değerine yükseldiğinde ise hazne sıcaklık değişiminde %13,92 oranında bir artış gerçekleşmiştir.

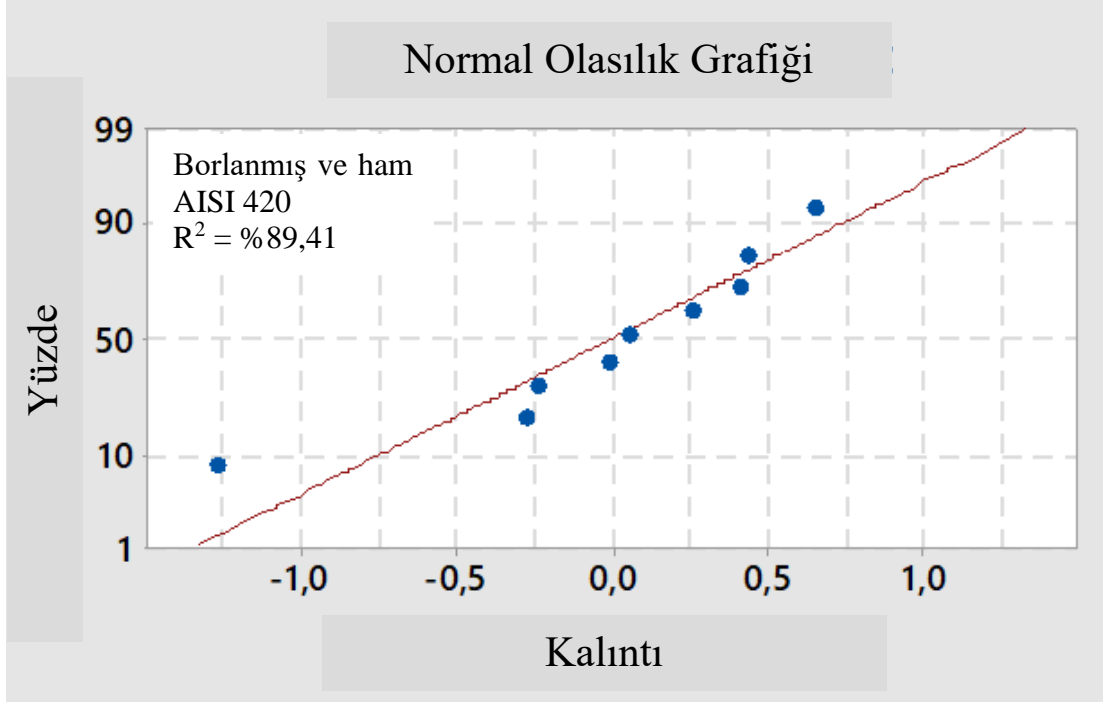
Çarpma hızı değerinin hazne sıcaklık değişimine olan etkisini incelemek için değişken değer olarak çarpma hızı, sabit değer olarak konsantrasyon ve çarpma açısı parametreleri seçilmiştir. Sabit olarak kabul edilen ilk değer olan konsantrasyon için %15 değeri, ikinci değer olan çarpma açısı için 90° değeri seçilmiştir. Çarpma hızı değerleri ise 2 m/s, 4 m/s ve 5 m/s olarak seçilmiştir. Bu şartlarda her iki malzeme için meydana gelen hazne sıcaklık değişimleri sırasıyla 1,666 °C, 3,502 °C ve 5,338 °C olarak hesaplanmıştır. Borlanmış ve ham AISI 420 paslanmaz çelik malzemeler için gerçekleştirilen deneyde çarpma hızı 2 m/s değerinden 4 m/s değerine yükseldiğinde hazne sıcaklık değişiminde %110,20 oranında bir artış, çarpma hızı 4 m/s değerinden 6 m/s değerine yükseldiğinde ise hazne sıcaklık değişiminde %52,42 oranında bir artış gerçekleşmiştir.

Çarpma açısı değerinin hazne sıcaklık değişimine olan etkisini incelemek adına çarpma hızı ve konsantrasyon değerleri sabit kabul edilerek, sırasıyla 6 m/s ve %10 olarak seçilmiştir. Çarpma açısı değerleri 30°, 60° ve 90°'dir. Borlanmış ve ham AISI 420 malzeme için hazne sıcaklık değişimleri sırasıyla 5,354 °C, 5,102 °C ve 3,4,848 °C olarak hesaplanmıştır. Çarpma açısı 30° değerinden 60° değerine yükseldiğinde hazne sıcaklık değişiminde %4,71 oranında bir azalma, çarpma açısı 60° değerinden 90° değerine yükseldiğinde ise hazne sıcaklık değişiminde %4,97 oranında bir azalma meydana gelmektedir.

Çizelge 7.6. Sıcaklık değişimi için ANOVA sonuçları.

Kaynak	DF	Borlanmış ve Ham AISI 420		
		Adj SS	P-Değeri	Etki Oranı %
H - Hız [m/s]	1	20,2401	0,002	82,01
K - Konsantrasyon [ağ. %]	1	1,4406	0,158	5,83
A - Açı [°]	1	0,3851	0,430	1,56
Hata	5	2,6149		10,59
Toplam	8	24,6806		100,00

Çizelge 7.6'da görüldüğü gibi her iki malzemenin yer aldığı haznede gerçekleşen sıcaklık değişiminde en etkili parametre çarpma hızıdır. Bu parametreden sonra ise konsantrasyon parametresinin etkisi söz konusu olabilir. Son sırada ihmal edilebilir düzeyde çarpma açısı parametresi gelmektedir. Çarpma hızının sıcaklık değişiminde deneylere olan etki oranı %82,01, konsantrasyonun deneylere olan etki oranı %5,83 ve son olarak çarpma açısının deneylere etki oranı %1,56 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7.11. Hazne sıcaklık değişimine ait regresyon grafiği.

RSM ile elde edilen veriler sonucunda Şekil 7.11'de verilen grafik incelendiğinde deneysel veriler ile tahminleme verileri arasında yüksek uyum yakalandığı söylenebilmektedir. Bu uyum oranı %89,41 olarak hesaplanmıştır.

BÖLÜM 8

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada yüzey bileşimini değiştiren bir yüzey sertleştirme işlemi olan borlama ile yüzeyi sertleştirilen AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik ile herhangi bir işlem görmemiş ham AISI 420 martenzitik paslanmaz çeliğin slurry erozif aşınma davranışının kıyaslaması yapılmıştır. Bu kıyaslama numunelerin kütle kayıpları, yüzey pürüzlülükleri ve hazne sıcaklık değişimleri ile yapılmıştır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada üç farklı çarpma hızı değeri (2 m/s, 4 m/s ve 6 m/s), üç farklı konsantrasyon değeri (%5, %10 ve %15) ve üç farklı çarpma açısı değeri (30°, 60° ve 90°) kullanılmıştır. Belirlenen bu parametreler kullanılarak TAGUCHI L9 metodu ile deney tasarımı oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen deneyler sonrasında RSM ile matematiksel bir modelleme ile tahminleme denklemleri oluşturulmuştur. Bu denklemler sayesinde her iki numune için de kütle kaybı, yüzey pürüzlülüğü ve hazne sıcaklık değişimi verileri elde edilmiştir. İncelenen her çıkış parametresi üzerinde etkili parametreyi tespit edebilmek adına ANOVA metodu kullanılmıştır. Bu denklemler sayesinde elde edilen veriler ve gerçekleştirilen deneysel veriler kıyaslandığında aralarında yüksek oranda uyum olduğu görülmüştür. Deneyler sonrasında SEM görüntüleri ve EDX verileri elde edilen numunelerin yüzeylerinde meydana gelen aşınma mekanizmaları tespit edilip elemental analizi yapılmıştır.

1. Borlanmış AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik malzeme için en yüksek kütle kaybı miktarı 3,995 mg ile 6 m/s çarpma hızı, %15 konsantrasyon ve 30° çarpma açısı değerleri ile gerçekleştirilen deneydir. Ham AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik için en yüksek kütle kaybı miktarına bakıldığında ise aynı deney şartlarında ve 4,599 mg olduğu görülmektedir. Bu durum da şunu açıklamaktadır; çarpma hızı ve konsantrasyon değerleri maksimum değerlere (6 m/s, %15), çarpma açısı minimum değere (30°) ulaştığında aşınma miktarı en yüksek miktarda görülmektedir. Her iki numune en yüksek kütle kayıpları

2. bakımından kıyaslandığında ham AISI 420 malzeme, borlanmış AISI 420 malzemeye göre %15,11 oranda daha fazla kütle kaybı yaşamıştır. Her iki numune için de en az kütle kaybının yaşandığı deney parametreleri ise minimum çarpma hızı (2 m/s) ile minimum konsantrasyon değeri (%5) ve maksimum çarpma açısı değeri (90°) olarak tespit edilmiştir. Borlanmış AISI 420 ve ham AISI 420 malzeme için bu kütle kayıpları sırasıyla 0,227 ve 0,466 mg olarak hesaplanmıştır. Her iki numune en düşük kütle kayıpları bakımından kıyaslandığında ham AISI 420 malzeme, borlanmış AISI 420 malzemeye göre %105,28 oranda daha fazla kütle kaybı yaşamıştır.
3. Her iki malzemenin de en yüksek yüzey pürüzlülük değerine ulaştığı deney parametreleri maksimum çarpma hızı (6 m/s), maksimum konsantrasyon (%15) ve minimum çarpma açısı (30°) olarak görülmektedir. Borlanmış AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik ve ham AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik malzemeler için bu yüzey pürüzlülük değerleri sırasıyla 0,326 µm ve 0,201 µm olarak hesaplanmıştır. Deneyler gerçekleştirilmeden önce numunelere ait yüzey pürüzlülük değerleri, borlanmış AISI 420 malzeme için 0,113 µm, ham AISI 420 malzeme için ise 0,057 olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerindeki artış borlanmış AISI 420 ve ham AISI 420 malzeme için sırasıyla %188,49 ve %254,38 olarak hesaplanmıştır. Borlanmış AISI 420 malzeme için en düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 0,179 µm ile minimum çarpma hızı (2 m/s), minimum konsantrasyon (%5) ve maksimum çarpma açısı (90°) değerlerinin olduğu deneyler sonucu gerçekleştiği görülmektedir. Ham AISI 420 malzeme için en düşük yüzey pürüzlülük değeri ise 0,092 µm ile minimum çarpma hızı (2 m/s), minimum konsantrasyon (%5) ve minimum çarpma açısı (30°) değerlerinin olduğu deneyler sonucu gerçekleştiği görülmektedir. Bu verilere göre numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerindeki artış borlanmış AISI 420 ve ham AISI 420 malzeme için sırasıyla %58,40 ve %61,40 olarak hesaplanmıştır.
4. Hazne sıcaklık değişim miktarlarına bakıldığında ise en fazla sıcaklık değişim miktarı çarpma hızının 6 m/s, konsantrasyonun %15 ve çarpma açısının 30° olduğu deney sonucunda 5,844 °C olarak hesaplanmıştır. En düşük sıcaklık değişim değeri 0,686 °C olarak, çarpma hızının 2 m/s, konsantrasyonun %5 ve çarpma açısının 90° olduğu deney sonucunda hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın devamı olarak farklı borlama sıcaklık ve sürelerinin, farklı paslanmaz çelik türlerinin ve farklı yüzey sertleştirme yöntemlerinin aşınma davranışı üzerine etkilerinin incelenmesi gibi konular üzerine çalışılabilir.

KAYNAKLAR

1. Yontar, A. A., “AISI 304 paslanmaz çeliklerin işlenebilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 28-29 (2011).
2. Balkan, A., “AISI 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin perçinlenme prosesinde çatlak oluşumuna etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 3 (2020).
3. Çetin, E., “Paslanmaz çeliklerin lazer nokta kaynak yöntemiyle birleştirilmesinin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Düzce, 23-25 (2019)
4. Aran, A., Temel, M. A., “Giriş”, Paslanmaz çelik yassı mamuller üretimi kullanımı standartları 2. bs., *Acar Matbaacılık*, İstanbul, 12 (2004).
5. Pierre-Jean Cunnat, *Alloying Elements in Stainless Steel and Other Chromium-Containing Alloys*.
6. Scheuer, C. J., Possoli, F. A. A., Borges, Cardoso, R. P., Brunatto, S. F., “AISI 420 martensitic stainless steel corrosion resistance enhancement by low-temperature plasma carburizing”, *Electrochimica Acta*, 317: 70-82 (2019).
7. Sun, Y., Bell, T., Wood, G., “Wear behaviour of plasma-nitrided martensitic stainless steel”, *Wear*, 178: 131-138 (1994).
8. Bonagani, S. K., Vishwanadh, B., Tenneti, S., Kumar, N. N., Kain, V., “Influence of tempering treatments on mechanical properties and hydrogen embrittlement of 13wt% Cr martensitic stainless steel”, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 176: 103969 (2019).
9. Kayalı, Y., “Borlanmış AISI 316L paslanmaz çeliğin korozyon ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Doktora Tezi, Afyon *Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyonkarahisar, 13-14 (2011).

10. Acar, F., “Kaynaklanmış paslanmaz çelik ve karbon çeliğinin mekanik özelliklerine taneler arası korozyonun etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü**, Karabük, 20 (2020).

11. İnternet: Birçelik, "420 (1.4021-1.4028-1.4034) Paslanmaz Çelik", <https://bircelik.com/tr/kategori/420-1-4021->
12. İnternet: Avas Metal, "AISI 420", <https://www.avasmetal.com.tr/?/paslanmaz/aisi420>
13. Tikhovskiy, I., Raabe, D., Roters, F., "Simulation of earing of a 17% Cr stainless steel considering texture gradients", *Materials Science and Engineering A*, 488: 482-490 (2008).
14. Association I. M., "Introduction", Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel 3rd ed., *The International Molybdenum Association*, London, 4 (2014).
15. Gagnepain, J. C., "Duplex stainless steels: success story and growth perspective", *Stainless Steel World America 2008 Conference & Expo.*, Le Creusot, 31 (December 2008)
16. Kısasöz, A., Karaaslan, A., "Dubleks paslanmaz çeliklerde oluşan yüksek sıcaklık fazlarına genel bir bakış", *Metallurji*, 162: 57-61 (2012).
17. Fu, Z., "A study of static strain aging of selected ferritic steels", Master's Thesis, *Tampere University of Technology Faculty of Engineering Sciences*, Tampereen yliopisto, 16 (2017).
18. Lampman, S., "Introduction to Surface Hardening of Steels", ASM Handbook Vol. 4, *ASM International*, Material Park, Ohio, 389 (1991).
19. Yılmaz, U., "Gaz ortamında nitrüleme ve nitrokarbürleme yüzey sertleştirme işlemlerinin AISI 4140, 1.7131 ve 1.8550 çeliklerinin aşınma, mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 17-21 (2016).
20. Asi, O., Can, A., Ç., "Sementasyon çeliklerinde körsertleştirilmiş ve sementasyon yapılmış durumlarda meydana gelen artık gerilmelerin karşılaştırılması" *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7 (2): 183-187 (Haziran 2001).
21. Deng, X., Ju, D., "Prediction of phase composition and nitrogen concentration during the nitriding process in low-alloy steel", *Material Research*, 19 (2): 353-359 (December 2015).
22. İnternet: Alper Isıl İşlem, "Nitrasyon", <https://www.alper.com.tr/hizmetler/isil-islem/nitrasyon.html> (2021).

23. Bell, T., Sun, Y., Suhadi, A., “Environmental and technical aspect of plasma nitrocarburizing”, *Vacuum*, 59: 14-23 (2000).
24. Zarchi, M., K., Shariat, M., H., Dehghan, S., A., “Characterization of nitrocarburized surface layer on AISI 1020 steel by electrolytic plasma processing in an urea electrolyte”, *J. Matter Res. Technol.*, 2(3): 213-220 (2013)
25. Dossett, J., “Carbonitriding of Steels”, ASM Handbook Vol 4., *ASM International*, Material Park, Ohio, (1991).
26. Demirci, A., H., “Fe-Esaslı Malzemeler: Çelikler ve Dökme Demirler”, Mühendislik Malzemeleri: Önemli Endüstriyel Malzemeler ve Isıl İşlemleri, *Alfa Akademi*, İstanbul, 97-103 (2004).
27. İnternet: Boren, “Bor elementi”, <https://www.boren.gov.tr/Sayfa/bor-elementi/23> (2021).
28. Ayter, T., “Borlama işleminin çeliklerin yüzey kalitesi ve aşınma davranışına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 4 (2005).
29. Yılmaz, A., “Her derde deva hazinemiz bor”, *Bilim ve Teknik*, 414: 34-48 (Mayıs 2002).
30. TMMOB Metalurji Mühendisler Odası, “Bor Raporu”, *Metalurji*, 134: 1-50 (Temmuz 2003).
31. Sinha, A., K., “Boriding (Boronizing) of Steels”, ASM Handbook Vol 4., ASM International, Material Park, Ohio, 437-447 (1991).
32. Şen, U., “Küresel grafitli dökme demirlerin borlanması ve özellikleri” Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 17-18 (1997)
33. Uluköy, A., Can, A., Ç., “Çeliklerin borlanması”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12 (2): 189-198 (2006).
34. Baştürk, S., Erten, M., “Borlama ile yüzeyi sertleştirme çalışmaları” *Mühendis ve Makina*, 47 (563): 57-74 (2006).
35. Bayça, S., U., Şahin, S., “Borlama”, *Mühendis ve Makina*, 45 (532): 51-59 (2004).
36. İnternet: Alper Isıl İşlem, “Borlama”, <https://www.alper.com.tr/hizmetler/isil-islem/borlama.html> (2021).

37. Kondul, B., “Borlama ile yüzeyi sertleştirilmiş ray çeliğinin aşınma davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, 12 (2020).
38. Do, T., Shin, S., S., Stetsko, D., VanConant, G., Vartanian, A., Pei, S., Kwon, P., “Improving structural integrity with boron-based additives for 3D printed 420 stainless steel” *Procedia Manufacturing*, 1: 263-272 (2015).
39. Xu, C., H., Gao, W., Yang, Y., L., “Superplastic boronizing of a low alloy steel- microstructural aspect”, *Journal of Material Processing Technology*, 108: 349-355 (2001).
40. Bozkurt, N., “Bor yayınımla çeliklerde yüzey sertleştirme”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 13-14 (1984).
41. Demirsöz, R., “Granül cüruf taşımada kullanılan boruların iç yüzeyinin aşınma özelliklerinin iyileştirilmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 16 (2018).
42. Varol, T., “Aşınma Deneyi”, Laboratuvar Föyü, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Trabzon, 4 (2016).
43. Stachowiak, G., W., Batchelor, A., W., “Abrasive, Erosive and Cavitation Wear”, Engineering Tribology, *Publisher Butterworth Heinemann*, 483-486 (2000).
44. Bhushan, B., “Wear”, Principles and Applications of Tribology 2nd ed., *A John Wiley & Sons Ltd.*, Ohio, 459-462 (2013).
45. İnternet: Subs Tech, Substances and Technologies “Mechanisms of Wear” http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear (2021).
46. Yıldızlı, K., Odabaş, D., Nair, F., “Borlanmış AISI 1020 çeliğinin eroziv aşınma davranışının incelenmesi”, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5 (1): 130-140 (2003).
47. Zum Gahr, K., H., “Microstructure and Wear of Materials”, Tribology Series Vol. 10, *Elsevier*, Siegen, 531 (1987).
48. Erdoğan, A., “Aşınma Deneyi Deney Föyü”, Malzeme Laboratuvarı II Dersi, *Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Bartın, 6-7.

49. Yıldız, T., Gür, A., K., “Aşınma sistemleri”, *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*, 4 (2): 86-91 (2006).
50. Korkut, M., H., “Ferritik paslanmaz çeliklerin mikroyapısı ve aşınması üzerine karbür yapıcı elementlerin etkilerinin araştırılması”, Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 42 (1997).
51. Kurgan, N., “Triboloji Ders Notları”, *Ondokuz Mayıs Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü*, İzmir.
52. Budinski, K., G., “Erosion Testing”, Guide to Friction, Wear and Erosion Testing, *ASM International*, USA, 86-92 (2007).
53. Raadnuri, S., “Slurry – erosive wear and wear product alaysis using a SS430 propeller”, *Wear*, 476 (2021).
54. Singh, A., Kumar, H., Kumar, S., “Comparison of slurry performance of thermally sprayed coating with the addition of TiO₂ feedstock powder”, *Materials Today: Proceedings*, 45 (2021).
55. Kumar, N., Arora, N., “Effect of solution treatment on slurry erosive wear performance of martensitic and nitrogen strengthened austenitic stainless steel”, *Materials Letters*, 284 (2021).
56. Girisha, K., G., Rao, S., Prasad, D., “Slurry Erosion Resistance of Martenistic Stainless Steel with Plasma Sprayed Al₃O₃-40% TiO₂ Coating”, *Materials Today: Proceedings*, 7388-7893 (2018).
57. Zum Gahr, K., H., “Erosive Wear of Materials”, Microstructure and Wear of Materials, *Elsevier*, New York, 531 (1987).
58. Lynn R., S., Wong, K., K., Clark H., M., “On the particle size effect in slurry erosion”, *Wear*, 149: 55-71 (1991).
59. Clark, H., M., “On the impact rate and impact energy of particle in a slurry pot erosion tester”, *Wear*, 147: 165-183 (1991).
60. Telfer, C., G., Stack, M., M., Jana, B., D., “Particle concentration and size effect on the erosion-corrosion of pure metals in aqueous slurries”, *Tribology International*, 53: 35-44 (2012).
61. Krishnan, A., V., Lim, C., Y., H., “Elucidating the specific and combined effects of particle size, impact angle, velocity and stress from an external load on the slurry

erosion of mild steel S275JR”, *Journal of Materials Research and Technology*, 14: 1052-1064 (2021).

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

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

ÖZGEÇMİŞ

Oğuzhan ÇAKIR; ilk ve orta öğrenimini Teğmen Burak Evirgen İlköğretim okulunda tamamlamış olup lise öğrenimini Medine Tayfur Sökmen Lisesi'nde 2015 senesinde tamamladı. 2016 senesinde Karabük Üniversitesi Yabancı Diller Yüksekokulu'nda İngilizce hazırlık eğitimini tamamladıktan sonra 2020 senesinde Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2020 senesinde Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı. 2023 senesinde HG İnşaat ve Makine A.Ş. firmasında makine mühendisi olarak çalışmaya başlamış olup halen aynı firmada görevine devam etmektedir.