

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAE 10XX (XX=10, 20, 30, 40, 50, 60) ÇELİKLERİNDE KARBON İÇERİĞİNİN**  
**AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN TAGUCHİ**  
**İLE İNCELENMESİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ARIF YİĞİT**

**MART 2025**

**ZONGULDAK BÜLENT ECEVİT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SAE 10XX (XX=10, 20, 30, 40, 50, 60) ÇELİKLERİNDE KARBON İÇERİĞİNİN**  
**AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN TAGUCHİ**  
**İLE İNCELENMESİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Arif YİĞİT**

**DANIŞMAN: Doç. Dr. Engin KOCAMAN**

**ZONGULDAK**  
**Mart 2025**

**KABUL:**

Arif YİĞİT tarafından hazırlanan “SAE 10XX (XX=10, 20, 30, 40, 50, 60) Çeliklerinde Karbon İçeriğinin Aşınma ve Korozyon Davranışı Üzerindeki Etkilerinin Taguchi ile İncelenmesi” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 11.02.2025

**Danışman:** Doç. Dr. Engin KOCAMAN .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay  
Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Prof. Dr. Ömer SAVAŞ .....  
Yıldız Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Denizcilik Fakültesi, Gemi Makineleri  
İşletme Mühendisliği Bölümü

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Turgay ÇOŞKUN .....  
Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği  
Bölümü

---

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. ....../....../20....

Prof. Dr. Fikret GÖLGELEYEN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



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

Arif YİĞİT

## ÖZET

# SAE 10XX (XX=10, 20, 30, 40, 50, 60) ÇELİKLERİNDE KARBON İÇERİĞİNİN AŞINMA VE KOROZYON DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN TAGUCHİ İLE İNCELENMESİ

Arif YİĞİT

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Engin KOCAMAN

Mart 2025, 81 sayfa

Bu çalışmada farklı karbon içeriğine sahip SAE 10XX (XX= 10, 20, 30, 40, 50 ve 60) çeliklerinde çeliğin karbon içeriğinin mikroyapı, sertlik, aşınma ve korozyon özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Ayrıca çalışmada aşınma ve korozyon testleri için Taguchi deney tasarımı kullanılmıştır. Bu amaçla SAE 10XX (XX= 10, 20, 30, 40, 50 ve 60) çeliklerine Taguchi L18 ortogonal dizisi kullanılarak bir tasarım yapılmıştır. Aşınma testleri için üç farklı yük (3, 6 ve 9 N), üç farklı mesafe (150, 300 ve 450m) ve üç farklı hız (20,40 ve 60 m/s), seviye ve faktör olarak belirlenmiştir. Korozyon testleri ise üç farklı çözeltide (NaCl, HCl ve NaOH) ve bu çözeltilerin üç farklı konsantrasyonunda (0.1, 0.5 ve 1M) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmada artan karbon miktarı ile mikroyapıdaki perlit miktarı artmış ve buna bağlı olarak sertlikte artışa neden olmuştur. Aşınma test sonuçlarına göre karbon içeriği sürtünme katsayısı ve aşınma oranı üzerinde etkili olmasına rağmen yapılan testlerde en etkili parametre yük faktörü olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde çelik bileşimindeki karbon içeriği korozyon direnci üzerinde etkili olmasına rağmen farklı çözeltilerde ve derişimlerde gerçekleştirilen korozyon testlerinde en etkili faktör çözelti türü olarak tespit edilmiştir.

## **ÖZET (devam ediyor)**

**Anahtar Kelimeler:** Çelik, SAE, Mikro yapı, Sertlik, Korozyon

**Bilim Kodu:** 625.02.05.



## **ABSTRACT**

**M. Sc. Thesis**

### **INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CARBON CONTENT ON WEAR AND CORROSION BEHAVIOR IN SAE 10XX (XX=10, 20, 30, 40, 50, 60) STEELS USING THE TAGUCHI METHOD**

**Arif YIĞİT**

**Zonguldak Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering**

**Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Engin KOCAMAN**

**March 2025, 81 pages**

In this study, the effect of carbon content in SAE 10XX (XX = 10, 20, 30, 40, 50, and 60) steels on the microstructure, hardness, wear, and corrosion properties was investigated. Additionally, the Taguchi experimental design was used for wear and corrosion tests in the study. For this purpose, a design was carried out by using Taguchi L18 orthogonal array for SAE 10XX (XX= 10, 20, 30, 40, 50 and 60) steels. The wear tests were conducted using three different loads (3, 6, and 9 N), three varying distances (150, 300, and 450 m), and three distinct speeds (20, 40, and 60 m/s) as levels and factors. Corrosion tests were carried out in three different solutions (NaCl, HCl and NaOH) and three different concentrations of these solutions (0.1, 0.5 and 1 M). In the study, the amount of pearlite in the microstructure increased with the increasing amount of carbon and caused an increase in hardness accordingly. According to the wear test results, although the carbon content was effective on the friction coefficient and wear rate, the most effective parameter in the tests was determined to be the load factor. Similarly, although the

## **ABSTRACT (continued)**

carbon content in the steel composition was effective on corrosion resistance, the most effective factor in the corrosion tests carried out in different solutions and concentrations was determined to be the solution type.

**Keywords:** Steel, SAE, Microstructure, Hardness, Corrosion

**Science Code:** 625.02.05



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, tez çalışmamın planlanmasından yazımına kadar olan tüm aşamalarında yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen danışman Doç. Dr. Engin KOCAMAN'a ve Yıldız Teknik Üniversitesi'nde bölüm başkanlığı yapmakta olan Ömer SAVAŞ hocama katkılarından dolayı teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarımnda desteğini ve kıymetli vaktini ayıran arkadaşım Berkay GEÇGEL'e teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımın gerçekleştirilmesinde desteklerini esirgemeyen Doç. Dr. Oğuz KOÇAR'a ve Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hep yanımda hissettiğim, bu süreç boyunca gösterdikleri sabır ve fedakarlıklarından dolayı aileme sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL: .....	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
BÖLÜM 2 ÇELİKLER .....	3
2.1 GİRİŞ.....	3
2.2 ÇELİK TARİHİ.....	3
2.3 DEMİR CEHVERİNİN ÇELİĞE DÖNÜŞÜMÜ.....	4
2.4 ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ÇELİĞE ETKİSİ .....	5
2.4.1 Karbon Elementinin Etkisi.....	5
2.4.2 Krom Elementinin Etkisi .....	7
2.4.3 Nikel Elementinin Etkisi.....	8
2.4.4 Manganez Elementinin Etkisi .....	8
2.4.5 Silisyum Elementinin Etkisi .....	8
2.4.6 Molibden Elementinin Etkisi .....	9
2.4.7 Vanadyum Elementinin Etkisi .....	9
2.4.8 Tungsten (Wolfram) Elementinin Etkisi.....	10
2.4.9 Kobalt Elementinin Etkisi.....	11
2.5 ÇELİK TÜRLERİ.....	11
2.6 KARBON ORANINA GÖRE ÇELİKLER.....	12

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.6.1 Düşük Karbonlu Çelikler .....	12
2.6.2 Orta Karbonlu Çelikler .....	13
2.6.3 Yüksek karbonlu Çelik .....	13
2.7 DÖKME DEMİR ÇEŞİTLERİ.....	15
BÖLÜM 3 AŞINMA.....	17
3.1 GİRİŞ.....	17
3.2 AŞINMA ÇEŞİTLERİ .....	18
3.2.1 Abrasif Aşınma .....	18
3.2.2 Adheziv Aşınma.....	19
3.2.3 Oksidasyon Aşınması.....	20
3.2.4 Yorulma Aşınması .....	20
3.3 AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER .....	21
3.3.1 Malzemenin Sertliği.....	21
3.3.2 Elastiklik Modülünün Etkisi .....	21
3.3.3 Deformasyon Davranışının Etkisi.....	21
3.3.4 Malzemenin Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi .....	22
3.3.5 Isıl İşlemin Etkisi .....	22
3.3.6 Malzeme Boyutunun Etkisi.....	23
3.3.7 Aşındırıcının Etkisi .....	23
3.3.8 Sıcaklığın Etkisi .....	23
3.3.9 Nemin Etkisi .....	24
3.3.10 Yükün Etkisi .....	24
3.3.11 Hızın Etkisi .....	25
BÖLÜM 4 KOROZYON .....	27
4.1 GİRİŞ.....	27
4.2 KOROZYON ÇEŞİTLERİ .....	28
4.3 UNİFORM KOROZYON .....	29
4.3.1 Galvanik Korozyon.....	29

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.3.2 Erozyon Korozyonu .....	29
4.3.3 Oyuk (çukurcuk) Korozyonu .....	29
4.3.4 Yüzey Korozyonu .....	30
4.3.5 Bölgesel Korozyon.....	30
4.3.6 Aralık (Kravice) Korozyon .....	30
4.3.7 Stress Korozyon .....	31
4.4 YERELLEŞTİRİLMİŞ KOROZYON .....	31
4.4.1 Taneler Arası Korozyonu.....	31
4.4.2 Kavitasyon Korozyonu .....	31
4.4.3 Yorulmalı Korozyon .....	31
4.4.4 Seçimli Korozyon .....	31
4.4.5 Filiform Korozyon .....	32
<b>BÖLÜM 5 TAGUCHİ .....</b>	<b>33</b>
5.1 GİRİŞ .....	33
5.1.1 Taguchi Yaklaşımının Kalite Sisteminde Kullanımı.....	33
5.1.2 Çevrimiçi (On-Line) ve Çevrimdışı (Off-Line) Kalite Kontrol.....	34
5.2 TAGUCHİ YÖNTEMİNDE ORTOGONAL SERİLER .....	34
5.2.1 Ortogonal Dizilerin Kullanımı .....	35
5.3 SİNYAL GÜRÜLTÜ ORANLARI.....	35
5.4 TAGUCHİ METODUNDA ETKİLEŞİMLER.....	36
5.5 VARYANS ANALİZİ (ANOVA).....	37
5.6 HESAPLAMALAR KULLANILAN DENKLEMLER.....	37
5.7 DOĞRULAMA TESTLERİ.....	38
5.8 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI GÖRE TAGUCHİ YÖNTEMİ UYGULAMALARI..	38
<b>BÖLÜM 6 DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>41</b>
6.1 GİRİŞ.....	41
6.2 DENEYSEL NUMUNELER .....	41
6.2.1 Metalografik İşlemler.....	42

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
6.2.2 Mikroyapı Görüntüleme İşlemleri .....	43
6.2.3 Sertlik Testi .....	44
6.2.4 Aşınma Testi .....	45
6.2.5 Korozyon Testi.....	47
BÖLÜM 7 DENEYSEL SONUÇLAR .....	49
7.1 GİRİŞ .....	49
7.1.1 Mikro Yapı.....	49
7.1.2 Sertlik Testi .....	53
7.1.3 Aşınma Testleri.....	54
7.1.3 Korozyon Davranışı .....	63
7.2. SONUÇLAR.....	69
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ .....	81

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Demirin İmâlâtı Fırın Şematik Gösterim .....	5
Şekil 2.2 Demir-Sementit Faz Diyagramı .....	6
Şekil 2.3 Çelikte Karbon Oranı Etkisi.....	7
Şekil 2.4 Çeliklerin Sınıflandırılması.....	12
Şekil 2.5 a Beyaz Dökme Demir, b Gri Dökme Demir.....	15
Şekil 2.6 Dökme Demir Çeşitlerinin Sınıflandırılması .....	16
Şekil 3.1 Aşınma Oluşumu.....	17
Şekil 3.2 Abrasif Aşınma .....	19
Şekil 3.3 Adheziv Aşınma.....	20
Şekil 3.4 Yorulma Aşınması .....	20
Şekil 4.1 Korozyon Çeşitlerinin Sınıflandırılması .....	28
Şekil 5.1 Taguchi Yaklaşımı .....	33
Şekil 6.1 Tavlama İşlemi Prosedürü. ....	42
Şekil 6.2 Metalografik Zımparalama ve Parlatma Makinesi.....	43
Şekil 6.3 Mikro Yapı Görüntüleme Cihazı .....	44
Şekil 6.4 Brinell Sertlik Ölçme Cihazı. ....	44
Şekil 6.5 Aşınma Test Cihazı.....	45
Şekil 6.6 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı. ....	46
Şekil 6.7 Korozyon Test Cihazı. ....	47
Şekil 7.1 Numunelerin Optik Mikro Yapısı. ....	50
Şekil 7.2 Deneysel Numunelerin % Perlit Oranları. ....	51
Şekil 7.3 a) SEM - 1000X, b) SEM - 5000X .....	52
Şekil 7.4 a) SEM – 1000X, b) SEM – 5000X.....	53
Şekil 7.5 Sertlik Ölçümleri.....	54
Şekil 7.6 Sürtünme Katsayısı Grafikleri. ....	55
Şekil 7.7 Sürtünme Katsayıları İçin Çizilen Faktörlerin Etki Grafiği.....	58
Şekil 7.8 Aşınma Oranı İçin Çizilen Faktörlerin Etki Grafiği. ....	62
Şekil 7.9 Tafel Grafiği.....	64
Şekil 7.10 Korozyon Hızı İçin Çizilen Faktörlerin Etki Grafiği. ....	68



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Bazı Çeliklerin Farklı Standartlarda Gösterimi. ....	14
Çizelge 5.1 L9 - Ortogonal Dizi Çizelgesi .....	35
Çizelge 6.1 Spektral Analiz Verileri. ....	42
Çizelge 6.2 Aşınma Testleri İçin Belirlenen Faktör ve Seviyeleri.....	46
Çizelge 6.3 Taguchi Tasarımında Korozyon Seviye ve Faktörleri. ....	48
Çizelge 7.1 Sürtünme Katsayıları Verileri. ....	56
Çizelge 7.2 Sürtünme Katsayısı için Varyans Analiz Çizelgesi (ANOVA). ....	57
Çizelge 7.3 Aşınma Oranı Verileri.....	60
Çizelge 7.4 Aşınma Oranı için Varyans Analiz Çizelgesi (ANOVA) .....	61
Çizelge 7.5 Tafel Test Sonucunda Elde Edilen Korozyon Verileri. ....	65
Çizelge 7.6 Korozyon Hızı (Cr) İçin Varyans Analiz Çizelgesi (ANOVA). ....	66



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

Al	: Alüminyum
Al-Si	: Alüminyum-Silisyum
Al-Ti	: Alüminyum-Titanyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum Oksit
AlB <sub>2</sub>	: Alüminyum Diborür
AlN	: Alüminyum Nitrat
CH <sub>4</sub>	: Metan
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
dB	: Desibel
Ekor	: Korozyon Potansiyeli
g	: Gram
g/cm <sup>3</sup>	: Gram/Santimetreküp
HB	: Brinell Sertliği
HCl	: Hidroklorik Asit
Hv	: Vickers Sertliği
Ikor	: Korozyon Akımı
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
MPa	: Mega Pascal
N <sub>2</sub>	: Azot
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
SiC	: Silisyum Karbür
Sn	: Kalay

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

Ti	: Titanyum
TiB <sub>2</sub>	: Titanyum Diborür
V	: Vanadyum
Zr	: Zirkonyum
ZrB <sub>2</sub>	: Zirkonyum Diborür
$\beta_a$	: Anodik Beta Tafel Sabiti
$\beta_c$	: Katodik Beta Tafel Sabiti
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
NaCl	: Sodyum Klorür
NaOH	: Sodyum Hidroksit
( $\alpha$ )	: Ferrit yapılı
( $\gamma$ )	: Östenit yapılı

### KISALTMALAR

<b>HMK</b>	: Hacim Merkezli Kübik
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SMK</b>	: Seramik Matrisli Kompozit
<b>XRD</b>	: X-Işınları Difraksiyonu

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Günümüzde hemen her alanda karşımıza çıkan çeliklere olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Çeliğin bu denli vazgeçilmez bir malzeme olmasının önemli nedenlerinden bazıları çeliğin farklı endüstrilerde esnek bir şekilde uygulanabilir olması, sahip olduğu üstün özellikleri nispeten ekonomik olarak sunması ve her geçen gün yeni nesil çelikler geliştirilerek diğer malzemeler ile rekabetini sürdürebilmesi olarak sıralanabilir. Bu sebeple çelik malzemeler makine, gemi, savunma sanayii, otomobil ve mutfak aletleri başta olmak üzere her alanda kullanılmaktadır (Çınar 2023).

Çeliklerin özellikleri ısıtma işlemleri, mekanik/termo-mekanik işlemler veya alaşım elementi ilavesi ile geliştirilebilmektedir. Alaşım elementlerinin her birinin çeliğe önemli katkıları bulunmakla birlikte çelik içerisine ilave edilen alaşım elementleri çeliklerin başta tokluk, süneklik, mukavemet ve işlenebilirlik gibi bir çok özelliğini değiştirmektedir. Çeliğe Cr (krom), Mn (manganez), Si (silisyum), Mo (molibden), V (vanadyum), Nb (niobyum) ve W (tungsten) gibi çeşitli alaşım elementleri ilave edilebilmektedir. Bu elementler arasından şüphesiz ki çeliğin temel alaşım elementi olan karbon oldukça kritik bir öneme sahiptir. Esasen çelik bir demir karbon alaşımıdır. Çelik içerisindeki artan karbon miktarı ile çeliğin sertlik ve dayanımını artırmaktadır. Öte yandan çoğu zaman çeliğin kırılma veya sünek bir davranış sergilemesi kompozisyondaki karbon miktarına göre değişir. Genel olarak karbon oranındaki artış ile çeliğin sünekliliği azalır ve kırılma direnci artmaktadır. Karbon aynı zamanda çeliğin korozyon ve aşınma direncini üzerinde önemli etkilere sahiptir (Altuntaş 2019).

Oldukça geniş bir kullanım skalasına sahip olması çeliğin maruz kaldığı ortamların özelliklerini değiştirmektedir. Bu durum çeliklerin farklı ortamlara olan tepkilerinin araştırılmasını zorunlu kılmaktadır. Öte yandan günümüz bilimsel çalışmalarında daha az zaman ve maliyet ile daha verimli çalışmaların gerçekleştirilmesi ve daha doğru sonuçlara ulaşılması kritik bir önem arz etmektedir. Bu durum deneysel çalışmaların çeşitli yöntemler ile optimizasyonunu zorunlu

kılmaktadır. Son 20 yılda deney tasarımları gerçekleştirilirken YSA (yapay sinir ağı) (Kocaman, Şirin ve Dispınar 2021), Genetik Algorıtmalar (Das, Mukherjee, Ganguly, Bhattacharyay ve Datta 2009) (Okur ve Atlas 2020), Makine öğrenmeleri (Xiong, Zhang ve Shi 2020) (Tosunoğlu, Yılmaz, Özeren ve Sağlam 2021) gibi çeşitli yaklaşımlar kullanıldığı görölmektedir. Bu yaklaşımlardan biri de Taguchi deney tasarım yöntemidir. Taguchi yöntemi, yöntemeye uygun bir deney tasarımı ile çoklu değerlerin anlaşılması için sonuçların geneli hakkında bilgi verebilecek daha az sayıda deney ile süreç yönetiminde kaliteyi artırmak, maliyeti düşürmek için kullanılan bir yöntemdir (Akyol 2024).

Literatürde denizaltılarda aşınma ve korozyona maruz kalan kompozit malzemelerde Taguchi yöntemini kullanarak parçalarda iyileştirmelerin gerçekleştirildiği çalışmalar bulunmaktadır. (Cevher 2024). Yine literatürde çeliklerin proses parametrelerinin, işleme kabiliyetinin, alışım tasarımının, çevresel etkilerinin Taguchi deneysel tasarım yöntemi ile incelendiği çok sayıda çalışma bulunmaktadır (Chandraker ve Kosaraju 2015), (Jönsson, Samuelsson ve Wei 2023). Bu durum çeliklerin farklı ortam ve koşullarda özellikle aşınma ve korozyon davranışının anlaşılması için Taguchi yönteminin kullanılabilceğini işaret etmektedir. Çelik oldukça geleneksel bir malzeme olması ve bu konuda çok sayıda çalışma yapılmasına rağmen literatürde farklı aşınma parametreleri ve farklı korozyon çözeltileri kullanılarak karşılaştırmalı bir çalışmaların yeterli seviyede yapılmadığı anlaşılmaktadır. Bu çalışmada SAE 10XX (XX= 10, 20, 30, 40, 50 ve 60) çeliklerinde karbon içeriğinin çeliğin mikroyapı ve sertliği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca karbon içeriğinin ve çeşitli deney parametrelerinin aşınma ve korozyon direnci üzerindeki etkilerinin incelenmesi için bir L18 ortagonal dizisine göre Taguchi deney tasarımı gerçekleştirilmiştir.

## BÖLÜM 2

### ÇELİKLER

#### 2.1 GİRİŞ

Çelik esasen bir demir (Fe) karbon (C) alaşımıdır ve bileşiminde bulunan karbon oranı çeliğin özelliklerini belirler. Karbon oranı arttıkça çelik daha sert ve dayanıklı hale gelir. Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Aynı zamanda farklı sektörlerde ve kritik uygulamalarda kullanımı da bulunmaktadır. Tarihsel olarak çeliğin ilk kullanım oldukça eski olmasına rağmen özellikle sanayi devrimi sonrası kritik bir hale gelmiş ve kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Sanayi devrimi ile çelikte yaşanan bu gelişim günümüzde hala devam etmektedir. Araştırmacılar günümüzde gerek çelik çeşitleri gerekse çelik üretim prosesleri konusunda oldukça yoğun bir şekilde çalışmaya devam etmektedir.

#### 2.2 ÇELİK TARİHİ

Çeliğin tarihi, insanlık tarihinin erken dönemlerine kadar uzanır. İnsanlar, binlerce yıldır demiri tanıyorlardı, ancak demiri çeliğe dönüştürme yöntemlerini geliştirme süreci oldukça uzun zaman almıştır. M.Ö. 3000 civarında, Orta Doğu ve Anadolu'da demir kullanımı başlamıştır. İlk başlarda, demir dövme yöntemiyle işlenerek kullanılmıştır, ancak dövme demir, sertlik ve dayanıklılık açısından sınırlı bir malzeme olarak kalmıştır.

Çelik üretimi, M.Ö. 1200'lerde Asyalılar ve Hintliler tarafından kullanılan wootz çeliği ile önemli bir aşama kaydetmiştir. Wootz çeliği (Pota çeliği), özel bir işleme tabi tutularak üretilen, yüksek karbon içeren bir çelikti ve yüksek sertlik ile dayanıklılığa sahipti. Bu çelik, Orta Doğu, Hindistan ve Çin gibi bölgelerde değerli bir malzeme olarak kullanılmıştır (URL-11).

Demir ve çelikler, yüzyıllar önce yalnızca silahlar ve insanların kullandığı eşyalar aracılığıyla yaygınlaşmaya başlamıştır. Daha sonraki dönemde, demir ve çelik üretimi konusunda birçok

gelişme yaşanmıştır. Özellikle Sanayi Devrimi'nde, yeni teknolojik ilerlemelerle çelik üretimi büyük bir artış göstermiştir. 1800'lü yıllarda endüstrinin gelişimiyle birlikte İngiltere'de ve Avrupa'da çelik üretimi artmış ve bu süreç, köprülerin inşası gibi yapısal uygulamalar ve özellikle makine ve taşıt parçalarının teknolojisinin gelişmesine olanak sağlamıştır.

Öte yandan çelik üretimindeki gelişimin en kritik noktalarından biri şüphesiz Henry Bessemer ve Thomas Gilchrist gibi bilim insanlarının, çelik üretim süreçlerini iyileştiren önemli buluşlar yaparak çelik üretimindeki dönüşümü hızlandırmış ve maliyetleri düşürmüş olmasıdır. 1855 yılında Bessemer, 1864'te Martin ve 1879'da Thomas'ın geliştirdiği yöntemler sayesinde çelik üretim miktarı ve kalitesinde önemli bir gelişim yaşanmıştır. Bu yöntemler sayesinde ham demir, sıvı hale getirilerek saflaştırılabilir ve daha kaliteli çelik üretimine olanak sağlamıştır. Çelik üretiminde yaşanan bu gelişim 1800'lü yıllarda başlamış ve günümüze kadar giderek artan bir hızla devam etmiştir (Türkoğlu 2011).

### **2.3 DEMİR CEVHERİNİN ÇELİĞE DÖNÜŞÜMÜ**

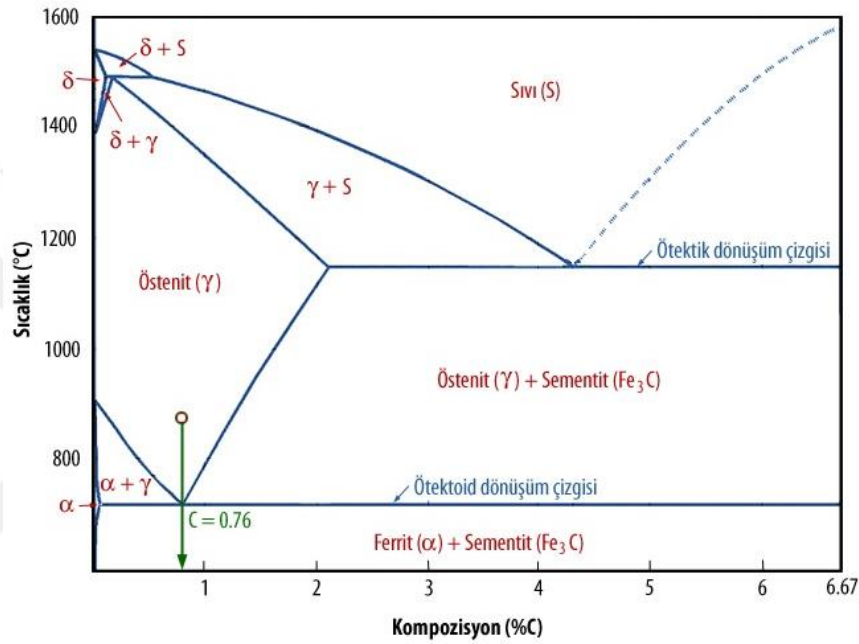
Demir, pek çok metal gibi, yeryüzü kabuğunda oksijen veya sülfür gibi diğer elementlerle birleşmiş bir şekilde yalnızca cevher olarak bulunur. Doğada  $Fe_2O_3$  (hematit),  $Fe_3O_4$  (manyetit),  $FeO$  ve  $FeS_2$  (pirit) gibi farklı demir cevherleri bulunmakla birlikte üretim için tenör miktarı dikkate alınmaktadır (Ovalıoğlu 1969), (Yalçın ve Ateşok 1979). Yüksek tenör içeriğine sahip demir cevheri Şekil 2.1'de şematik görünümü verilen yüksek fırında cevherdeki oksijen uzaklaştırılarak demire indirgediği proses içerisinde pik demire dönüştürülür.

Yüksek fırına şarj edilen girdiler çoğu zaman toz veya pelet adı verilen sıkıştırılmış formlarda gerçekleştirilir. Bu toz, parça ya da pelet formundaki demir cevherinin gaz veya katı redükleyici kullanılarak redüklenmesi sonucu elde edilen üründür. Bu ürün, yüksek oranda metalik demir içermenin yanı sıra, indirgenmemiş demir oksitleri, bir miktar karbon ve cevherden gelen gang bileşenlerini de taşır. Redüklenen cevher, süngerimsi bir yapıya sahip olduğu için "sünger demir" olarak adlandırılmıştır.

Bu aşamanın sonunda demir cevherinden çelik üretimi çeşitli rafinasyon kademelerinde gerçekleştirilmektedir. Yüksek fırından alınan ham demirde, karbon da dahil olmak üzere tüm yabancı maddelerin oksijene yüksek bir ilgisi vardır. Bu nedenle, ham demir eriyiğine farklı yöntemlerle oksijen verilerek bu maddeler uzaklaştırılabilir. Bu saflaştırma işlemi için genel



Şekil 2.2’de verilen demir-Sementit faz grafiğinde, farklı şekilde oluşan katı fazlar görülmektedir. Bu fazlar arasında ferrit ( $\alpha$ ), östenit ( $\gamma$ ), ferrit ( $\delta$ ) ve sementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) yapıları yer almaktadır. Ferrit ( $\alpha$ ) fazı, hacim merkezli kübik (HMK) kristal yapısına sahip olup, karbon miktarı oldukça düşük olan bir ara çözeltili yapısı gösterir. HMK kristal kafes yapısına sahip Ferrit ( $\delta$ ) fazı ise  $\alpha$  fazından farklı bir sıcaklık aralığında oluşur. Ferrit ( $\delta$ ), daha yüksek sıcaklıklarda meydana gelir ve atomik yapısı açısından daha kararlı bir yapıya sahiptir. Bu faz, 1495 °C’de hacim merkezli kübik (HMK) katı çözeltili yapısı olarak ortaya çıkar (Erdoğan 1998).

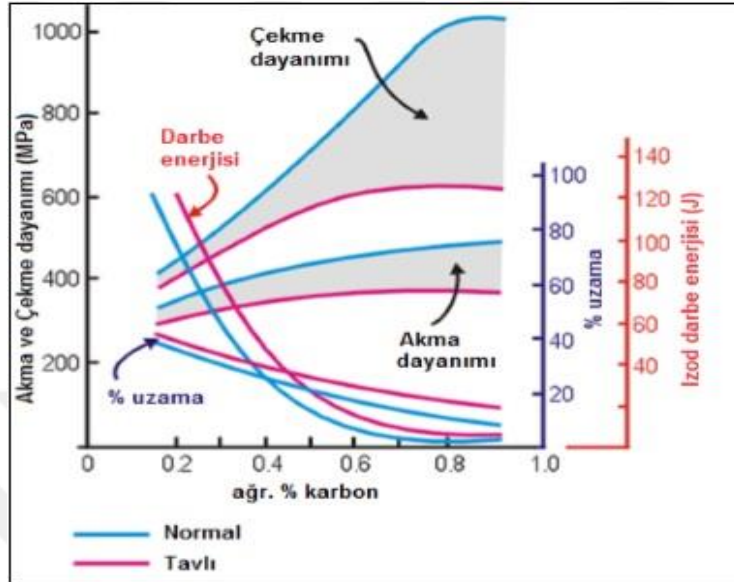


Şekil 1.2 Demir-Sementit Faz Diyagramı (URL-6).

Karbon aynı zamanda çeliğin mekanik özelliklerini de doğrudan etkilemektedir. Çeliğe eklenen karbon miktarı, çeliğin sertlik, dayanıklılık, çekme mukavemeti ve işlenebilirliği gibi temel özelliklerini belirler. Karbonun demirle birleşerek oluşturduğu sementit yapısı çeliği sertleştirir ve özellikle aşınma dayanımını artırır. Ancak, karbon miktarının artması, çeliğin şekillendirilebilirliğini ve kaynaklanabilirliğini azaltır (Çiçek 2009).

Karbon oranı düşük olan çelikler, daha yumuşak ve şekillendirilebilirken, karbon oranı arttıkça çelik daha sert ve dayanıklı hale gelir. Yüksek karbonlu çelikler, genellikle aşınma direnci ve dayanım gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Bununla birlikte, yüksek karbon içeren çeliklerin işlenmesi daha zordur ve daha kırılabilirler (Yangaz 2019). Yani karbon, çeliğin mekanik özelliklerini belirleyen bir alaşım elementidir. Ayrıca çeliğin ısı işlem ile sertleştirilmesi için de kritik bir rol oynar. Karbon miktarına bağlı olarak çelik farklı

sıcaklıklarda farklı özellikler gösterebilir. Karbon oranındaki miktar artarken % uzama, darbe özelliği değerlerinde azalma görülür, akma ve çekme mukavemeti artar. Şekil 2.3'te karbon miktarının çeliğin mekanik özellikleri üzerindeki etkisi verilmiştir.



Şekil 2.2 Çelikte Karbon Oranı Etkisi (Çiçek 2009).

#### 2.4.2 Krom Elementinin Etkisi

Krom, çeliğe ilave edilen önemli alaşım elementlerinden biridir. Çeliğe eklenen krom, sertliği ve aşındırma direncini artırarak çeliğin dayanıklılığını önemli seviyede iyileştirir. Ayrıca krom, çelikte korozyon oluşumunu engelleyerek, çeliği paslanmaya karşı daha dirençli hale getirir. Bu özellik, özellikle paslanmaz çelik üretiminde büyük bir avantaj sağlar (Kocaman, Kılınç, Durmaz, Şen ve Şen 2021).

Kromun diğer bir avantajı, yüksek sıcaklıklara karşı çeliğin dayanımını artırarak, çeliğin sıcaklık değişimlerine karşı daha stabil olmasını sağlar. Çeliğin mekanik özellikleri üzerinde olumlu etkiler yaratan krom, özellikle çekme dayanımını ve sertliği artırır. Ancak, krom oranı arttıkça çeliğin şekillendirilebilirliği ve kaynaklanabilirliği azalabilir.

Çelikte genellikle %1 ile %5 arasında krom bulunur ve bu, çeliğin hem fiziksel hem de kimyasal dayanımını artırır. Özellikle endüstriyel uygulamalarda, yüksek aşındırma ve korozyon direnci gerektiren koşullarda, kromlu çelikler tercih edilmektedir (Elal 1994).

### **2.4.3 Nikel Elementinin Etkisi**

Çeliğe ilave edildiğinde mukavemetini ve sünekliliğini artırmaktadır. Nikel yüksek sıcaklıklarda oksidasyon düşük sıcaklıklarda ise darbe direncini geliştirmektedir. Nikel, çeliğin sertliğini artırırken aynı zamanda döküm özelliklerini de iyileştirir, bu sayede çelik daha kolay döküm işlemlerine tabi tutulabilir (Gündoğdu, 2012).

### **2.4.4 Manganez Elementinin Etkisi**

Manganez, çeliğe önemli mekanik ve kimyasal özellikler kazandıran bir alaşım elementidir. Çeliğe eklenen manganez, çeliğin dayanıklılığını artırır ve çekme mukavemetini iyileştirir. Ayrıca manganez çeliğin sertliğini artırarak aşınma direncini de önemli ölçüde iyileştirir. Manganez, çeliğin yüksek sıcaklıklara karşı direncini artırarak, özellikle yüksek ısı işlem gerektiren uygulamalarda kullanılmasını sağlar.

Çeliğe manganez ilavesi kükürt ve oksijen gibi zararlı elementlerin etkilerini de azaltır. Bu elementlerin çelik yapısında olumsuz etkiler yaratmasını engelleyerek, çeliğin kalitesini iyileştirir. Ayrıca manganez çeliğin işlenebilirliğini iyileştirir ve daha kolay şekillendirilmesini sağlar.

Manganez, aynı zamanda çeliğin döküm özelliklerini de iyileştirir ve çeliğin sıvı haldeki yapısının daha stabil olmasını olanak tanır. Bu özellik, çelik döküm işlemlerinde özellikle önemlidir. Manganez oranı arttıkça, çelik daha güçlü ve aşınmaya karşı dirençli hale gelir, bu da endüstriyel uygulamalarda, otomotiv, inşaat, makine ve madencilik sanayi gibi alanlarda tercih edilmesine neden olmaktadır (Uygur 2007).

### **2.4.5 Silisyum Elementinin Etkisi**

Silisyum, çeliğe önemli mekanik ve kimyasal özellikler kazandıran bir alaşım elementidir. Silisyum, çeliğin sertliğini ve dayanıklılığını artırırken, aynı zamanda çeliğin elektriksel iletkenliğini de iyileştirir. Çeliğe eklenen silisyum, özellikle aşınma ve oksidasyona karşı direnç kazandırarak çeliğin korozyon direncini artırır. Bu nedenle silisyumlu çelikler genellikle elektrik ve enerji sektörlerinde, özellikle trafolar ve elektrikli ekipmanlarda tercih edilir.

Silisyum, ayrıca çeliğin yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklılığını artırır. Yüksek sıcaklıkta çalışan ekipmanlarda silisyumlu çelikler daha stabil davranış sergilemektedir. Çeliğin ilave edilen silisyum çeliğin işlenebilirliğini artırır, bu da şekillendirme ve döküm işlemlerini daha verimli hale getirir (Güneş 2018). Silisyumun çeliğe kazandırdığı bir diğer önemli etki ise çelikteki karbonun çözünürlük seviyesini değiştirmesi ve çeliğin daha homojen bir yapıya sahip olmasına katkıda bulunmasıdır (Jenicek vd. 2017).

#### **2.4.6 Molibden Elementinin Etkisi**

Molibden, çeliğe eklenen önemli bir alaşım elementidir ve çeliğin birçok özelliğini geliştirir. Molibden çeliğin sıcaklık dayanımını artırarak yüksek sıcaklıklarda daha stabil hale gelmesini sağlar. Özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan makineler ve ekipmanlar için molibdenli çelikler aranan malzemelerdir. Molibden ayrıca çeliğin sertliğini ve çekme mukavemetini artırarak dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirir (Dwivedi ve Menghani 2016).

Molibden, çeliğin aşınma direncini de artırır, bu nedenle aşındırıcı ortamlarda veya yüksek basınç altında çalışan uygulamalarda kullanımı yaygındır. Aynı zamanda korozyon direncini de artırarak çeliğin oksidasyona karşı daha dirençli olmasını sağlar. Molibdenli çelikler, özellikle asidik ortamlarda veya deniz suyu gibi zorlu koşullarda daha uzun ömürlüdür (Chen, Zhai, Dong, Hua Dai ve Mohrbacher 2019).

Bir diğer önemli etki ise molibdenin, çeliğin mikro yapısını iyileştirerek, daha homojen bir yapı elde edilmesini sağlamasıdır. Bu, çeliğin işlenebilirliğini artırır ve ürün kalitesini yükseltir. Ayrıca, molibdenin çeliğin sıcaklıkla daha az genleşmesini sağlaması, çelik yapıların termal streslere karşı daha dayanıklı olmasına yardımcı olur (Özgün 2007).

#### **2.4.7 Vanadyum Elementinin Etkisi**

Çeliğe ilave edilen vanadyum çeliğin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Vanadyum çeliğin sertliğini artırarak yüksek çekme mukavemeti sağlar. Ayrıca, çeliğin aşınma direncini artırarak özellikle aşındırıcı ortamlarda kullanılan çeliklerin ömrünü uzatır (Kılınç, Kocaman, Şen ve Şen 2021).

Vanadyum, çeliğin mikro yapısında stabilize eder ve daha ince taneli bir yapı oluşumuna katkı sağlar. Bu durumu çeliğin mekanik özelliklerini geliştirir. İnce taneli yapı, çeliğin darbe dayanımını artırır ve düşük sıcaklıklarda daha iyi performans göstermesini sağlar. Bunun yanı sıra vanadyum çeliğin ısı ile sertleştirilmesini destekler ve yüksek sıcaklıklarda daha stabil olmasını sağlar.

Vanadyum, çelikteki karbon ve diğer alaşım elementleriyle reaksiyona girerek karbürler oluşturur. Bu karbürler, çeliğin aşınma direncini artırır ve çeliği daha dayanıklı hale getirir. Ayrıca, vanadyum, çeliğin korozyon direncini iyileştirir ve oksidasyona karşı daha dayanıklı hale getirir (Erden, Barlak, Adalı ve Çelikkıran 2018).

#### **2.4.8 Tungsten (Wolfram) Elementinin Etkisi**

Tungsten çeliğin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Tungsten, çeliğin sertliğini ve çekme mukavemetini artırarak dayanıklılığını yükseltir. Özellikle yüksek sıcaklık koşullarında, tungstenin çeliğe katkısı çok belirgindir. Tungsten, çeliğin yüksek sıcaklık dayanımını artırarak, yüksek ısılarda bile çeliğin formunu ve özelliklerini korumasını sağlar (Zhao, Lee, Lee, Jiang ve Lee 2013).

Tungsten, ayrıca çeliğin aşınma direncini artırır. Bu özellik tungstenli çeliklerin aşındırıcı ortamlarda ve zorlu koşullarda uzun ömürlü olmasını sağlar. Çeliğin işlenebilirliğini azaltmadan dayanıklılığını artırarak uzun süreli kullanımda avantaj sağlar.

Tungsten, çeliğin mikro yapısında sert karbürler oluşturarak, aşınmaya karşı dirençli ve yüksek dayanımlı yüzeyler elde edilmesine olanak tanır. Bu karbürler, özellikle yüksek hızda çalışan ekipmanlar ve araçlar için ideal hale getirir.

Son olarak, tungsten, çeliğin genleşme oranını düşürerek, yüksek sıcaklıklarda daha stabil hale gelmesini sağlar. Bu özellik, çelik yapıların termal streslere karşı dayanıklılığını artırır (Serindağ, Tardu, Kırçiçek ve Çam 2022).

## 2.4.9 Kobalt Elementinin Etkisi

Kobalt çeliğe eklenen önemli bir alaşım elementidir ve çeliğin birçok mekanik ve kimyasal özelliğini iyileştirir. Kobalt, çeliğin sıcaklık dayanımını artırarak yüksek sıcaklıklarda daha stabil hale gelmesini sağlar. Bu özellik, özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan motorlar, jet motorları ve enerji santralleri gibi uygulamalarda önemli bir avantaj sağlar.

Kobalt çeliğin sertliğini ve çekme mukavemetini artırarak, dayanıklılığını önemli ölçüde iyileştirir. Ayrıca çeliğin aşınma direncini de artırarak, aşındırıcı ortamlarda uzun süre dayanıklı olmasını sağlar. Kobalt bu nedenle özellikle zorlu çalışma koşullarında ve aşındırıcı uygulamalarda tercih edilen bir elementtir (Sharov ve Zikeev 1977).

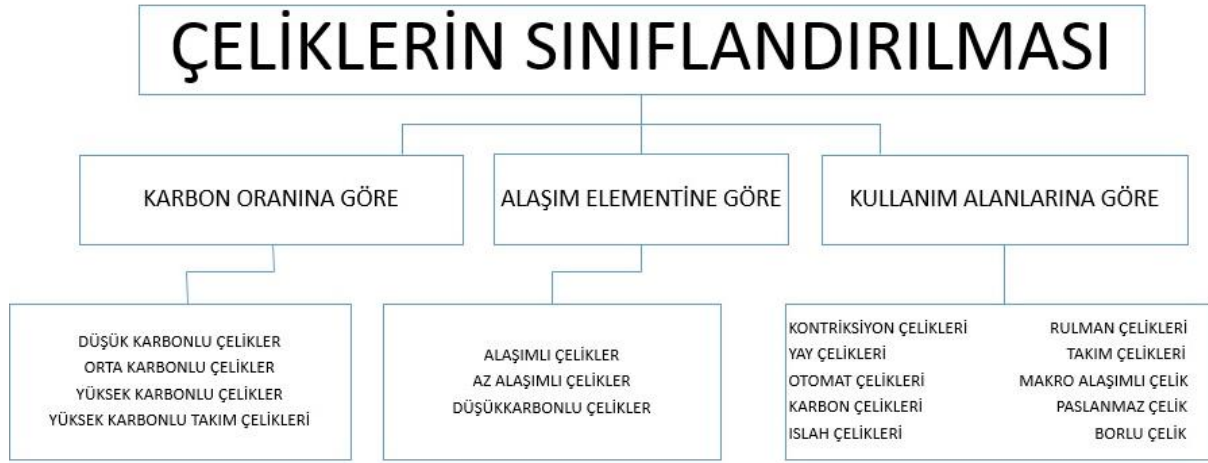
Kobalt çeliğin manyetik özelliklerini de geliştiren bir elementtir. Kobalt içeren çelikler özellikle manyetik uygulamalarda kullanılmak üzere geliştirilmiş alaşımlar yapma konusunda önemli bir rol oynar. Manyetik özelliklerin iyileştirilmesi, çeliğin elektrik ve manyetik alanlarda performansını artırır.

Kobalt ayrıca çeliğin oksidasyona ve korozyona karşı direncini artırarak, çeliğin ömrünü uzatır. Kobalt içeren çelikler, özellikle asidik ortamlar ve yüksek nem gibi zorlu koşullarda daha uzun süre dayanabilir (Şap ve Çelik 2012).

## 2.5 ÇELİK TÜRLERİ

Çelik çok fazla kullanılmasının yanında oldukça farklı sektörlere de hitap etmektedir. Bu durum çeliğin sınıflandırılmasını zorlaştırmaktadır. Fakat genel olarak çeliklerin sınıflandırılması üç ana kategoriye ayrılır. Bunlar karbon çelikleri, alaşımli çelikler ve kullanım alanına göre çelikler olarak yapılmaktadır. Bu sınıflandırmada, bazen kullanım alanı göre değilde özel çelikler olarak yapılan daha spesifik bir sınıflandırma ile değiştirilebilir. Çelikler, farklı endüstriyel ihtiyaçları karşılamak amacıyla alaşım elementleri (örneğin, krom, nikel, vanadyum gibi) eklenerek modifiye edilebilir. Bu durum onların sertlik, çekme dayanımı, korozyon direnci gibi özelliklerini etkiler. Çeliklerin sınıflandırılması, aynı zamanda uluslararası standartlar ve kodlar ile yapılmaktadır. Bu sistemler, çeliklerin belirli özelliklere ve kaliteye sahip olmasını sağlayarak mühendislik ve üretim süreçlerinde doğru malzeme seçimlerinin yapılmasını kolaylaştırır. Çeliğin sınıfı, genellikle numaralar, harfler veya bir kombinasyonuyla

ifade edilir ve her sınıfın kendine özgü teknik özellikleri ve kullanım alanları vardır. Şekil 4'te çeliklerin sınıflandırılmasını gösteren örnek bir grafik verilmiştir.



Şekil 2.4 Çeliklerin Sınıflandırılması (URL-8).

## 2.6 KARBON ORANINA GÖRE ÇELİKLER

### 2.6.1 Düşük Karbonlu Çelikler

Düşük karbonlu çelikler: Bu çelikler ağırlıkça %0.25'ten daha az karbon içerirler. Endüstride çok sık kullanılan bu çelikler genellikle çok kritik olmayan yapısal uygulamalarda tercih edilirlenler. Maliyetleri düşük olup proses edilebilmeleri kolaydır. Kaynağa oldukça elverişli olan bu malzemelerin korozyon direnci nispeten düşüktür (Altuntaş 2019), (Gandy 2007).

Düşük karbonlu çelikler iyi süneklik özelliğe sahiptir. Östenit stabilizasyonu ve karbonun martenzitik matris içerisinde homojen dağılımı, malzemenin darbe tokluğunu ve şekil değiştirme kapasitesini önemli ölçüde artırmaktadır (Santofimia, Zhao, Petrov ve Sietsma 2008). Düşük karbonlu çelikler otomotiv, petrol boru hatları, otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar (Shennawy vd. 2016). Düşük karbonlu çelikler maliyet açısından Cr, Ni, ve Mo alaşımlı çelikler yerine kullanılabilir (Gao, Xue ve Yang 2015).

Yaygın olarak kullanılan mukavemet oranı yüksek olan yapı çelikleri içerisinde bulunan karbon ve manganez oranı çeliğin mukavemet özelliğini etkilemektedir ve mikro yapısı ferrit-perlit yapı olarak görülmektedir (Mohrbacher 2010).

## 2.6.2 Orta Karbonlu Çelikler

Bileşiminde ağırlıkça %0.25 ile %0.5 arasında oranında karbon içeren çelikler orta karbonlu çelikler sınıfına girmektedir. Bazı kaynaklarda üst sınır %0.6-0.65 olarak belirtilmektedir (Kalpakjian 2010), (Noor Mazni, Kecik, Khatif ve Shaharudin 2016). Karbon oranı orta düzeyde olan bu çelikler karbon çelikleri grubunun içerisinde ısıl işlem ile sertleştirilebilen çelikler olarak bilinmektedir. Yaygın olarak makina sanayi ve aşınma direnci istenen bir çok endüstriyel uygulamada tercih edilir. İşlenebilirlik ve şekil verme açısından düşük karbonlu çeliklere göre çeşitli dezavantajlara sahiptir. Genellikle makine sanayide talaşlı imalat yöntemleri ile dişliler, dingiller, bağlantı elemanları, inşaat araç gereçleri gibi alanlarda üretimde kullanılmaktadırlar (Singh 2020).

Orta karbonlu çeliğin süneklik, tokluk, mukavemet, sertlik ve çekme dayanımı açısından istenilen mekanik özelliklerin elde edilmesi için çeşitli ısıl işlemler uygulanmaktadır. Örneğin yüksek süneklik ve minimum tokluk için orta karbonlu çeliklerde tavlama işlemi oldukça olumlu sonuçlar vermektedir. Sertlik ve aşınma direncinin artırılması için su verme işlemi tercih edilmektedir (Senthilkumar ve Ajiboye 2012).

Bu çelikler ağırlıkça %0.25 ile %0.55 karbon içerirler (Stefanescu 1991). Orta sınıf karbon çelikleri sertleştirilebilme kabiliyetleri bulunmaktadır. Sanayide kaynaklanabilirlik ve işlenebilirlik açısından düşük karbonlu çeliklere nazaran daha az tercih edilirler (Altuntaş 2019) (Gandy 2007).

Orta karbon çeliklere uygulanan ısıl işlemler sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerde önemli değişikliklere neden olabilir. Ayrıca uygulanan bu ısıl işlemler sadece mekanik özelliklerin değiştirilmesi için değil aynı zamanda ısıl ve elektriksel iletkenliğini de uygulanan ısıl işleme prosedürüne göre değişmektedir (Noor Mazni, Kecik, Khatif ve Shaharudin 2016).

## 2.6.3 Yüksek karbonlu Çelik

Yüksek karbonlu çelikler karbon oranı ( $>0.5C$ ) fazla olan çeliklerdir. Bu çelikler karbon oranları göz önünde bulundurulduğunda ve ısıl işleme tabi tutulduğunda aşınma direnci bakımından çok iyi sonuç veren çelik türüdür. Sertlik bakımından yüksek değerlere ulaştığında

kırılgan yapıya dönüşebilen bu çelik türü menevişleme gibi bir ısıtma işlemi uygulandığında sertliği tekrar düşürülerek kullanılabilir. Bu tür çeliklere uygulanan ısıtma işlemleri genellikle akma ve çekme mukavemetini artırmak, sünek ve tokluk yapısını verimli kılmak, aşınma dayanımı artırmak için uygulanır (Kuzyaka 2014).

Bu çelikler ağırlıkça % 0.60 ve daha fazla karbon içeriğine sahiptirler. Mukavemetleri yüksek olmasına rağmen ve düşük sünekliliğe sahiptirler. Yüksek karbonlu çeliklerin aşınma dirençleri oldukça yüksektir. Bu çelikler ısıtma işlemine tabii tutulduğunda sertleşir fakat bu durum onların özel yöntemlerle kaynaklanabilir hale getirmektedir (Altuntaş 2019), (Gandy 2007).

Literatürde yapılan çalışmalarda yüksek karbonlu çeliklerin mikro yapısal özelliklerinin ve ısıtma işlemlerinin, mekanik özellikleri ve aşınma özellikleri üzerinde önemli etkileri olduğu gözlemlenmiştir (Modi, Mondal, Prasad, Singh ve Khaira 2003).

Çelik, demir ile birleşerek yapısında %0.2 ile %2.1 arasında değişen karbon miktarıyla oluşur. Çeliklerin en genel sınıflandırması içerdiği karbon oranına göre yapılır (Kara 2014).

Orta sınıf karbonlu çelikler: Bu çelikler ağırlıkça %0.25 ile %0.55 karbon içerirler (Stefanescu 1991). Orta sınıf karbon çelikleri sertleştirilebilme kabiliyetleri bulunmaktadır. Sanayide kaynaklanılabilirlik ve işlenebilirlik açısından düşük karbonlu çeliklere nazaran daha az tercih edilirler (Altuntaş 2019), (Gandy 2007).

**Çizelge 2.1** Bazı Çeliklerin Farklı Standartlarda Gösterimi.

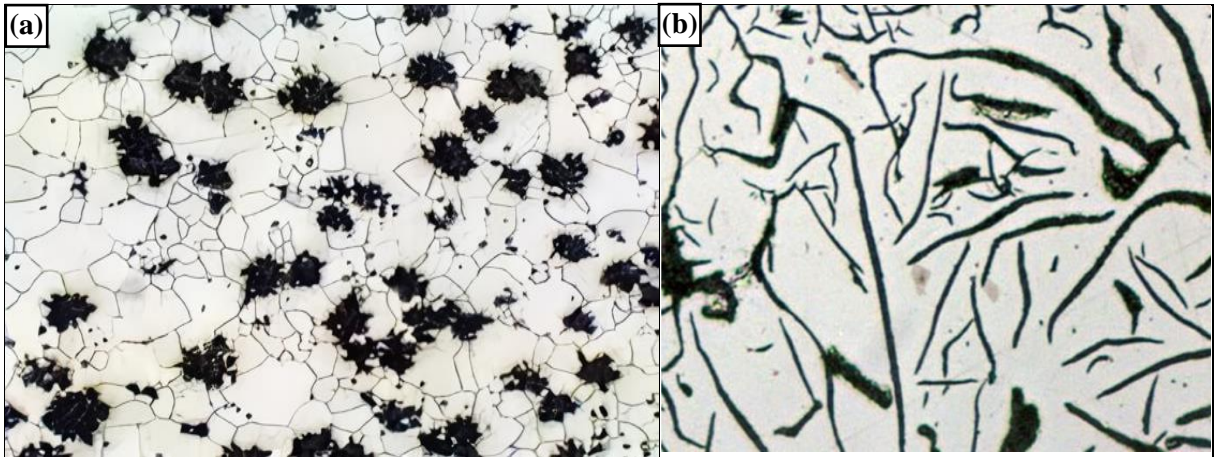
ALMANYA DIN	U.S.A AISI / SAE	FRANSA AFNOR	İNGİLTERE BS	İTALYA UNI	İSVEÇ SS	İSPANYA UNE	JAPONYA JIS
CK10	1010	CC10	040 A 10		1264		S10C
C22	1020	CC20	050 A 20	C20C21	1450	F.112	
Ck30	1030	XC32	080 M 30	C30			S 30 C
C40	1040	AF 60 C40	080 M 40	C40			
Cf53, Ck50	1050	XC48TS	060 A 52	C53	1674		S50C
C55	1055	AF70C55	070 M 55	1C55			
Ck60	1060	XC60	080 A 62	C60	1678		S58C
Ck67	1070	XC68	060 A 67	C70			S70C

## 2.7 DÖKME DEMİR ÇEŞİTLERİ

Dökme demir, genelde ağırlıkça %2-4 arasında karbon içeren demir-karbon alaşımlarıdır. Bu oran demir-karbon faz diyagramına göre ağırlıkça %2-6.67 arasındadır. Dökme demirler içerisine eser miktarda silisyum, nikel, krom ve molibden gibi elementlerde içerebilir. Dökme demirler yüksek karbon içeriği nedeniyle daha kırılğan bir yapıya sahip olmalarına rağmen çeşitli avantajları bulunmaktadır. Dökme demirlerin beyaz dökme demir ve gri dökme demir olarak başlıca iki ana türü vardır.

Beyaz dökme demir, yüksek oranda sementit ( $Fe_3C$ ) içerir ve bu nedenle serttir. Ancak, kırılğanlık bir yapıya sahiptir. Genellikle, yüksek sertlik ve aşınma direnci gereken uygulamalarda kullanılır (Öztürk 2013). Şekil 2.5.a'da beyaz dökme demire ait örnek bir mikroyapı verilmiştir.

Gri dökme demir, karbonun büyük bir kısmının grafit formunda bulunduğu bir dökme demir türüdür. Bu tür dökme demir, beyaz dökme demire göre daha düşük sertliğe ve daha yüksek sünekliğe sahiptir. Gri dökme demir döküm işlemi sırasında grafit yapılarının ortaya çıkması nedeniyle gri bir renk alır ve iyi bir titreşim yutma kapasitesine sahiptir. Bu özellikleri, gri dökme demirin makine parçaları, otomotiv motor blokları ve diğer mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmasına olanak tanır. Şekil 2.5.b'de gri dökme demire ait örnek bir mikroyapı verilmiştir.



Şekil 2.5 a Beyaz Dökme Demir, b Gri Dökme Demir (URL-4)

Beyaz ve gri dökme demirin dışında farklı dökme demirlerde bulunmaktadır. Genel olarak dökme demirler yapısal özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Örnek bir sınıflandırma şekli Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 Dökme Demir Çeşitlerinin Sınıflandırılması (URL-13).

Dökme demir, yüksek karbon içeriği ve sementit ( $Fe_3C$ ) yapısının etkisiyle iyi bir aşınma direncine sahiptir. Bu nedenle, dökme demir, pompalar, vanalar, dişliler, fren diskleri gibi aşınmaya maruz kalan parçalarda kullanılır (Charre 2004).

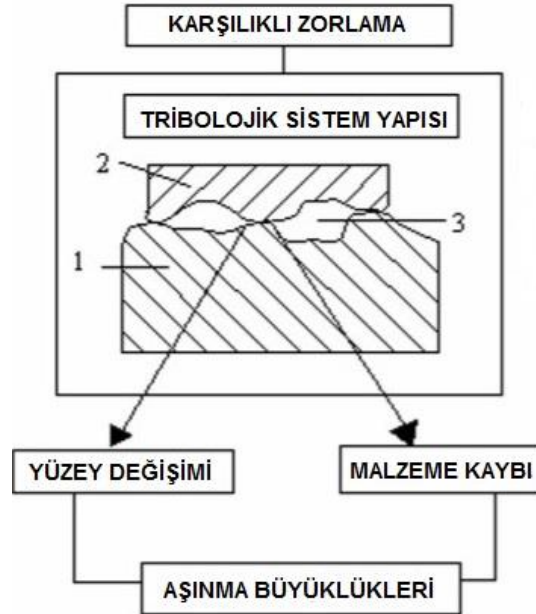
Dökme demir, döküm işlemi sırasında iyi akışkanlık gösterir ve karmaşık şekillerde kolayca döküm yapılabilir. Bu, özellikle dökme demir parçaların büyük, karmaşık ve uygun maliyetli üretimi için avantajlıdır. Gri dökme demir, grafit yapısı nedeniyle iyi bir titreşim yutma kapasitesine sahiptir. Bu özelliği, makine parçalarında ve otomotiv motorlarında kullanımı yaygınlaştırır (James ve Boyer 2020).

## BÖLÜM 3

### AŞINMA

#### 3.1 GİRİŞ

İki cismin birbirine temas etmesi sonucu sert olan malzeme yumuşak malzemenin yüzeyinden parçacık olarak istenmeyen bir pürüzlülük meydana getirir. Sürtünme ortamlarında aşınmanın kaçınılmaz olduğu bilinse de aşınmanın tamamen engellenmesi mümkün değildir. Aşınma, makine elemanlarında istenmeyen bir durumdur ve geleneksel imalat süreçlerinde genellikle parlatma gibi işlemlerle düzeltilmeye çalışılır. Aşınma, özellikle makine elemanları olan yataklar, kızaklar, dişliler, eksantrik miller ve kamalar gibi yüksek hassasiyet gerektiren parçalarda önemli bir sorun teşkil eder (Kılıçay 2012). Şekil 3.1’de örnek bir aşınma oluşumu şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.1 Aşınma Oluşumu.

Ayadi ve Hadji yaptıkları çalışmada ısıl işlem ve alaşım elementi ilavesinin manganez çeliği üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada alaşım elementi ilavesinin ve ısıl işlemin sertlik ve aşınma direnci üzerinde etkili olduğu rapor edilmiştir (Ayadi ve Hadji 2021).

Taşcıoğlu ve arkadaşları yaptıkları çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile ürettikleri aısı 316 çeliğine farklı ısıl işlemler uygulayarak aşınma direncini incelemiştir. Çalışmada eklemeli imalat yöntemi ile üretilen parçalarda ısıl işlem sıcaklığının parçanın mikroyapısal ve porozite gibi özelliklerini etkilediğini bu durumda dolaylı olarak aşınma direncini etkilediğini belirtmişlerdir (Tascioglou, Karabulut ve Kaynak 2020).

Khorsand ve arkadaşları yaptıkları çalışmada düşük alaşımlı çeliklerin aşınma davranışı üzerindeki ısıl işlemin etkilerini incelemiştir. Çalışmada malzemelerdeki çatlak oluşumunun yüzeye yakın gözenek kümelerinde başladığını ve oluşan bu porlar boyunca yayıldığını belirterek, toplam gözenekliliğin artmasıyla aşınma dayanımının azaldığı bildirilmiştir (Khorsand vd. 2002).

Fontalvo ve Mitterer yaptıkları çalışmada metallerin aşınmasındaki oksit filmlerinin etkisini araştırmışlardır. Çalışmada 500 °C ve atmosfer koşullarındaki aşınma testleri yapılmış, alüminyum ve silisyumun elementlerinin oksit film kalınlığını azalttığını ve bu nedenle sıcaklık arttıkça mekanik aşınmada bir artışa yol açtığını belirtmişlerdir (Fontalvo ve Mitterer 2005).

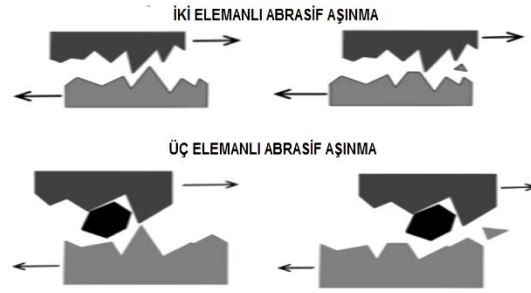
Ping Ji ve arkadaşları yaptıkları çalışmada yüksek vanadyumlu yüksek hızlı çeliğin kuru kayma aşınma davranışı üzerine karbon içeriğinin etkisini araştırmışlardır. Yüksek hız çeliğinin aşınma direncinin mikroyapıdaki matris ve karbürler tarafından güçlü bir şekilde etkilendiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışmada çeşitli karbon miktarlarını içeren çeliklerde aşınma testleri gerçekleştirilmiş ve aşınma yükündeki değişimin bu tür çeliklerin aşınma davranışında önemli etkiye sahip olduğunu rapor etmişlerdir (Ping Ji, Wu, Xu, Li ve Wei 2012).

## **3.2 AŞINMA ÇEŞİTLERİ**

### **3.2.1 Abrasif Aşınma**

Sert bir malzemenin, daha az sert olan bir malzeme yüzeyinde plastik deformasyona yol açmasına abrazyon veya abrazif aşınma denir (Yıldız ve Gür 2006). Bu tür aşınma, genellikle

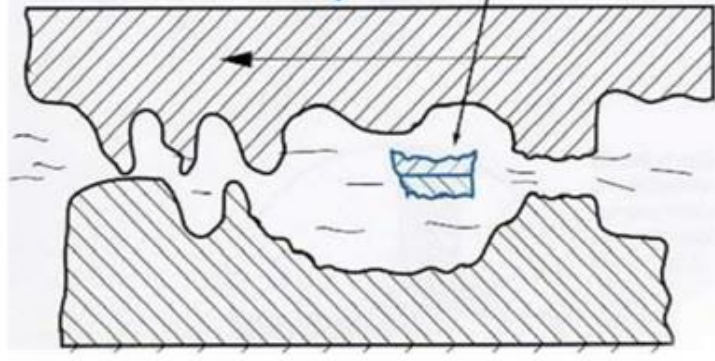
talaşlı imalat süreçlerinde ortaya çıkar ve iki cisim arasındaki sürtünme nedeniyle meydana gelir. Abrasif aşınmanın diğer bir türü ise iki yüzey arasında üçüncü bir cismin bulunmasıyla ortaya çıkar ve bu durumda, ya ikinci parçanın yüzeyi ya da her iki parçanın yüzeyleri aşınır. Bu tipe ise ‘üç elemanlı abrasif aşınma’ adı verilir (Kılıçay 2012). Şekil 3.2’de iki elemanlı ve üç elemanlı abrasif aşınmaya ait bir şematik görünüm verilmiştir.



Şekil 3.2 Abrasif Aşınma

### 3.2.2 Adheziv Aşınma

Sürtünme etkisiyle, iki metal cismin basınç altında birbirine yapışarak yüzey pürüzlerinde mikro kaynakların oluşmasına ve sonrasında kopmasına neden olan aşınma türüne adhezif aşınma denir. Sertlik değerleri birbirine yakın olan malzemelerde görülür ve hasar her iki malzeme yüzeyinde de gözlemlenir. Adhezif aşınma, iki yüzeyin kayma hareketi sırasında birbirleriyle etkileşimde bulunarak oluşur. Adhezyon (bağlanma, yapışma) yüzeydeki pürüzlerin birbirine bağlanmasıyla gerçekleşir. Kayma sırasında oluşan kesme gerilmeleri sonucunda, bağlantı noktalarında kopmalar meydana gelir ve bu kopmalar malzeme kaybına yol açar. Adhezif aşınma sürecinde, yüzeydeki pürüzler birbirine kaynar ve ardından bağlantı noktalarından kopmalar gerçekleşir. Bu sebeple adhezif aşınmada türünde basınç, yüzey kalitesi ve malzeme sertliği gibi faktörler önemli rol oynamaktadır (Gürgeç 2017). Şekil 3.3’de adheziv aşınmaya ait şematik görünüm verilmiştir.



Şekil 3.3 Adheziv Aşınma

### 3.2.3 Oksidasyon Aşınması

Bu aşınma türü aşınmasının oksidatif bir ortamda gerçekleşmesiyle meydana geldiği aşınma türüdür. Metallerde oksidatif aşınma, metallerin oksijen, su veya diğer reaktif maddelerle etkileşime girerek kimyasal değişiklikler ve bozulmalar yaşaması sürecidir. Bu tür aşınma, metalin yüzeyinde oksit tabakalarının oluşmasına veya metalin yapısal bütünlüğünün zayıflamasına yol açabilir. Oksidatif aşınma genellikle "paslanma" olarak adlandırılır, ancak bu terim sadece demir ve çelik gibi bazı metaller için kullanılır (Çakır 2018).

### 3.2.4 Yorulma Aşınması

Mekanik parçaların birbirine sürtünmesi sonucu, ani sıcaklık artışları ve düşüşleri ile darbe yükünün maksimum ve minimum değerler arasında değişkenlik göstermesi, yorulma türünün oluşmasına yol açar. Bu tür yorulma, malzemelerde çatlak oluşumu ile gözlemlenir. Darbe yükü ve malzemenin sertlik oranı yüksek olduğunda, bu yorulma türü daha belirgin hale gelir (Çakır, 2018). Şekil 3.4’de yorulma aşınmasına ait şematik görünüm verilmiştir.



Şekil 3.4 Yorulma Aşınması (URL-10).

### **3.3 AŞINMAYA ETKİ EDEN FAKTÖRLER**

#### **3.3.1 Malzemenin Sertliği**

Malzemenin sertliği, içerdiği alaşım elementlerinin türü ve miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Alaşım elementleri, malzemenin mekanik özelliklerini değiştirerek genellikle mukavemetini ve sertliğini artırır. Çeliklerde karbon miktarının artması, sertliğin de artmasına yol açar. Aşınma direnci, malzemenin yüzeyinin aşınmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Bu, malzemenin sürtünme, çarpma ve diğer dış etkenlere karşı dayanıklılığını ifade eder. Genellikle, malzemenin sertliği arttıkça aşınma direnci de artar. Bu durum, sertlik ile aşınma direnci arasında doğrusal bir ilişki olduğunu gösterir. Ayrıca, mikro yapı ve yüzey işlemleri, malzemenin aşınma direncini etkileyen önemli faktörlerdir (Moshkovich ve Rapoport 2023).

#### **3.3.2 Elastiklik Modülünün Etkisi**

Elastiklik modülü yüksek olan malzemeler daha az deformasyona uğrar. Bu durum uygulanan yükün temas yüzeyi üzerinde daha dar bir alanda yoğunlaşmasına neden olabilir. Yük, pürüzlü yüzeylerin zirve noktalarında daha fazla desteklenir ve bu da gerçek temas alanının küçülmesine yol açar. Yani pürüzlü yüzeyler arasındaki temas yükünün daha fazla konsantre olmasına neden olur. Pürüzlere uygulanan yük arttıkça, malzemenin yüzeyinde daha fazla deformasyon ve yerel gerilme meydana gelir. Bu durumun bir sonucu olarak kaynak bağlarının oluşumunu tetiklenebilir çünkü malzeme daha fazla zorlanır ve bu zorlanma sonucunda mikro düzeyde bağlar meydana gelebilir. Sonuç olarak, aşınma miktarı artabilir çünkü yoğun ve konsantre bir şekilde uygulanan kuvvetler, malzemenin yüzeyini daha fazla aşındırabilir. Bu nedenle, elastiklik modülü yüksek malzemelerde, gerçek temas alanının azalması aşınma miktarını artırabilir (Gür 2009).

#### **3.3.3 Deformasyon Davranışının Etkisi**

Soğuk şekil değiştirme işlemi, malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli değişikliklere yol açarak aşınma direncini artırabilir. Bu süreçte malzeme moleküler düzeyinde yeniden oryante olarak kristal yapısında değişiklikler meydana gelir. Soğuk deformasyon malzeme içinde pekleşme yaratır, bu da kristal kusurlarının azalması ve kristal kırılabilirliğinin artmasıyla sonuçlanır. Pektleşme malzemenin mukavemetini ve sertliğini artırırken yüzeyde daha homojen

bir yapı oluşarak aşınma direncini de yükseltir. Aşınma esnasında malzeme yüzeyine uygulanan kuvvetler plastik deformasyon ve yerel pekleşme oluşturabilir, bu da malzemenin mukavemetini artırarak aşınma direncini güçlendirir (Keleştemur 1989).

### **3.3.4 Malzemenin Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi**

Yüzey pürüzlülüğü, gerçek temas alanını önemli ölçüde etkileyerek malzemenin aşınma ve sürtünme özelliklerini belirler. Yüksek yüzey pürüzlülüğü, gerçek temas alanını küçültür ve bu da pürüzlü yüzey noktalarına uygulanan yükün artmasına neden olur. Bunun sonucunda, daha küçük bir temas alanında daha fazla yük taşındığı için aşınma direnci azalır. Aşınma sürecinin başlangıcında yüzey pürüzlülüğünün kontrolü genellikle daha kolaydır, çünkü malzemenin yüzeyi işleme veya kaplama gibi yöntemlerle değiştirebilir (Gürgeç 2017).

Ancak, aşınmanın çalışma sırasında nasıl gerçekleşeceği tam olarak öngörülemediğinden, yüzey pürüzlülüğünün kontrolü zorlaşabilir. Bu sebeple, uyumlu çalışma çiftlerinin doğru seçilmesi büyük önem taşır. Birbirleriyle daha iyi uyum sağlayan malzemelerin seçilmesi ve aşınma direncini artırmak amacıyla optimize edilmiş yüzey pürüzlülüğünün sağlanmasını içerir (Özay 2004).

### **3.3.5 Isıl İşlemin Etkisi**

Isıl işlem, malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler oluşturan bir tekniktir. Isıl işlem malzemenin mikro yapısını kontrol ederek sertlik, dayanıklılık, mukavemet ve diğer mekanik özelliklerini optimize edebilir. Isıl işlem ile malzemenin sertliği artırılabilir ve aşınma direnci geliştirilebilir. Örneğin, sertleştirme işlemi malzemenin sertliğini artırarak aşınma direncini iyileştirebilir. Isıl işlem aynı zamanda malzemenin mikro yapısını değiştirerek farklı özellikler kazandırabilir. Her bir mekanik özellik malzemenin aşınma davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. Daha yüksek sertlik genellikle daha iyi aşınma direnci ile ilişkilendirilir çünkü sert malzemeler daha az aşınmaya maruz kalır. Ancak sadece sertlik değil mukavemet, elastikiyet, tokluk gibi diğer mekanik özellikler de aşınma davranışını etkileyebilir. Sonuç olarak ısıl işleme malzemenin mekanik özellikleri kontrol edilerek aşınma direnci ve diğer kritik özellikler iyileştirilebilir, bu da istenen performansın elde edilmesine olanak tanır. Bu nedenle, malzeme seçimi ve işleme süreçlerinde ısıl işlemin dikkate alınması büyük önem taşır (Gürgeç 2017).

### 3.3.6 Malzeme Boyutunun Etkisi

Malzemenin aşınmaya uğrayan bölgesinin genişliği, aşınma sırasında ortaya çıkan ısının dağılımını ve transferini etkiler. Bu durum, malzemenin ısınma hızını ve mikro yapısındaki değişimleri yönlendirebilir. Geniş bir aşınma alanı, ısının daha verimli bir şekilde yayılmasını sağlayarak malzemenin daha düşük bir hızla ısınmasına yol açar. Bu koşulda, mikro yapısındaki değişiklikler daha sınırlı olabilir çünkü ısı hızla dağılır ve aşırı ısınmanın önüne geçilir. Bu da aşınma direncinde belirgin bir değişiklik meydana gelmesini engeller. Ancak dar bir aşınma alanı söz konusu olduğunda, ani sıcaklık artışları yaşanabilir ve malzemenin mikro yapısında önemli değişiklikler meydana gelebilir. Özellikle aşırı ısınma durumunda, tanecik boyutunda küçülme ya da başka yapısal değişiklikler gözlemlenebilir. Bu değişiklikler aşınma direncini artıracak şekilde etkiler yaratabilir. Yani aşınmaya dar aşınma alanları, ani sıcaklık artışlarına yol açabilir ve bu da mikro yapısal değişiklikleri tetikleyerek aşınma direncini artırabilir (Gürgenç 2017).

### 3.3.7 Aşındırıcının Etkisi

Aşınma testlerinde genellikle Alüminyum oksit ( $Al_2O_3$ ), Silisyumnitür  $Si_3N_4$ , SiC ve WC gibi aşındırıcılar kullanılır.  $Al_2O_3$  aşındırıcıları genellikle sert ve köşeli yapılarıyla tanınır. Bu tür tanecikler, malzeme üzerinde kesici bir etki yaratabilir ve aşınma oranını artırabilir. Silisyum karbür (SiC) gibi diğer aşındırıcılar ise genellikle  $Al_2O_3$ 'e kıyasla daha sert ve daha keskin bir yapıya sahiptir. Ancak, SiC'nin kırılma eğilimi, potansiyel bir dezavantaj teşkil edebilir (Muratoğlu 1997).

Kırılma eğilimi, aşındırıcı parçacıkların daha hızlı bir şekilde parçalanmasına yol açarak, dolayısıyla aşınma miktarının artmasına neden olabilir. Genel olarak, aşındırıcının sertlik ve keskinlik seviyesi arttıkça, malzeme üzerindeki aşınma miktarı da artar. Bununla birlikte, aşındırıcıların sertliği ve şekli kadar, kırılma eğilimi gibi diğer fiziksel özellikleri de göz önünde bulundurulmalıdır, çünkü bu faktörler de aşınma sürecini etkileyebilir (Gürgenç 2017).

### 3.3.8 Sıcaklığın Etkisi

Aşınma sürecindeki sıcaklık artışı malzemenin mekanik özelliklerinde değişikliklere yol açarak aşınma oranını etkileyebilir. Aşınma bölgesindeki sıcaklık yükseldikçe malzemenin sertliği

genellikle azalır. Bu durum ısının malzeme üzerinde yumuşama etkisi yaparak daha kolay plastik deformasyona neden olmasıyla ilişkilidir (Gür 2009).

Düşük sertlik malzemenin aşınma direncini azaltabilir çünkü bu durumda malzeme daha hızlı şekil değiştirir ve daha hızlı aşınabilir. Ayrıca yüksek sıcaklıklar plastik deformasyonun artmasına yol açabilir ve bu da malzemenin şekil değiştirmesi ve yüzeyinde çatlaklar veya diğer deformasyonların oluşmasına neden olabilir. Bu tür deformasyonlar malzemenin yüzeyinde daha fazla mikro yapısal değişiklik oluşturarak aşınma miktarını artırabilir. Bununla birlikte çevre sıcaklığındaki artış aşınma sürecini olumlu yönde etkileyebilir (Yılmaz 1991).

Yüksek sıcaklıklar yüzeydeki oksit tabakasının kalitesini iyileştirerek yüzey özelliklerini geliştirebilir. Bu durum, malzemenin aşınma direncini artırarak daha dayanıklı bir yüzey oluşturarak aşınma sürecini yavaşlatabilir. Ancak aşınma sürecindeki sıcaklık artışının etkileri, malzemenin mekanik özelliklerindeki değişikliklerle birlikte karmaşık bir etkileşim sergileyebilir. Sıcaklık artışının malzeme üzerindeki etkileri aşınma koşulları ve malzemenin özellikleri gibi bir dizi faktöre bağlıdır (Gürgeç 2017).

### **3.3.9 Nemin Etkisi**

Bağıl nem havadaki su buharının yoğunluğunu ifade eder ve bağıl nem oranının artması havada bulunan su buharı miktarını artırır. Bu artış malzeme yüzeyindeki su filmi kalınlığını artırarak yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltabilir. Daha kalın su tabakası yüzeyler arasında daha iyi kayma sağlarken sürtünme katsayısını düşürüp aşınma miktarını azaltabilir. Ancak bağıl nemin yükselmesi bazı durumlarda aşınma sürecini olumsuz etkileyebilir. Özellikle suyun varlığı su bazlı aşındırıcıların etkinliğini artırarak aşınma hızını artırabilir. Bu durum metal yüzeylerde korozyon ve aşınma oluşumunu tetikleyebilir (Parlar 2002).

### **3.3.10 Yükün Etkisi**

Sürtünme kuvveti malzeme yüzeylerinin temas ettiği noktalar üzerinde mikroplastik deformasyonlara yol açabilir ve yerel ısı artışına neden olabilir ve bu durum aşınma miktarını artırabilir. Bununla birlikte bazı durumlarda yük artışı sürtünme kuvvetini artırırken aşınma miktarı da artabilir. Statik yükler, yüzey üzerinde sabit bir etki yaparak aşınma miktarının daha tutarlı olmasına neden olabilir. Öte yandan dinamik yükler genellikle sürekli değişen

kuvvetlerdir. Dinamik yükler altındaki malzemelerde yükün sürekliliği ve titreşimlerin etkisi aşınma miktarını etkileyebilir. Özellikle titreşimlerin etkisiyle yüzeyler arasındaki temasın düzensizleşmesi ve sürtünme kuvvetinin azalması söz konusu olabilir. Bu durumda, aşınma miktarı azalabilir. Ancak bu durum tamamen malzemenin ve uygulamanın özelliklerine bağlıdır ve genelleştirilemez (Kurgan 2020).

### **3.3.11 Hızın Etkisi**

Araştırmalar yüksek aşınma hızlarının karbür gibi sert malzemelerin yüzeyinden kopmasına veya aşındırıcı ile malzeme arasına entegre olarak aşınma sürecine dahil olmasına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, malzemenin aşınma direncini zayıflatabilir, çünkü karbürler veya takviye elemanlarının miktarındaki azalma, malzeme yüzeyinde artan aşınma ile sonuçlanır. Özellikle aşırı yüksek aşınma hızları altında, malzemenin mikro yapısındaki karbürler veya takviye elemanları aşındırıcı ile doğrudan temasa geçerek aşınma sürecine katkı sağlar. Bu etkileşim, aşınma miktarının artmasına yol açar çünkü aşındırıcı malzeme ile temas ederek daha fazla malzeme kaldırır. Dolayısıyla aşınma hızının artması, malzemenin mikro yapısındaki karbürlerin veya takviye elemanlarının miktarını azaltarak aşınma direncini düşürebilir. Bu durum malzemenin sertliğini ve ağırlığını kaybetmesine neden olarak aşınma direncini olumsuz yönde etkiler (Kurgan 2020).



## BÖLÜM 4

### KOROZYON

#### 4.1 GİRİŞ

Korozyon, genellikle metallerin çevresi ile kimyasal veya elektrokimyasal olarak reaksiyona girmesi sonucu meydana gelen bir süreçtir. Bu süreç, metal yüzeylerinde oksidasyon veya çözünme ile gerçekleşir ve çoğunlukla pas veya benzeri korozif tabakaların oluşmasına yol açar. Korozyon, özellikle metal yapılar, makineler ve araçlar için ciddi bir sorun teşkil edebilir. Özellikle korozyon malzemenin dayanıklılığını zayıflatabilir ve genel performansını olumsuz yönde etkileyebilir. Bu nedenle korozyonun önlenmesi veya etkilerinin kontrol altına alınması malzemelerin ve yapıların uzun ömürlü olabilmesi açısından kritik öneme sahiptir (Kaftan 2006).

Yapılan literatür araştırmalarına göre korozyonun yüksek maliyetlere yol açması dünya çapındaki birçok endüstriyel kurum için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Korozyon özellikle evsel araç gereçler kamu yapıları ve endüstriyel malzemeler üzerinde olumsuz etkilere neden olmakta ve bu durum birçok sektörde ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Sadece petrol sektöründe gelişmiş ülkelerde yıllık korozyon maliyetinin 170 milyar dolar civarında olduğu tahmin edilmektedir. Korozyon yalnızca maliyet açısından büyük bir yük oluşturmakla kalmaz aynı zamanda ekipmanların arızalanmasına bağlı olarak sağlık ve çevresel risklere de yol açabilmektedir. Bu bağlamda korozyona dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi ve korozyon azaltma süreçlerinin uygulanması kaçınılmaz hale gelmiştir. Araştırmalar endüstride yaygın olarak kullanılan düşük maliyetli karbon çeliklerinin endüstriyel şartlar altında korozyona karşı duyarlı olmasına rağmen nispeten iyi korozyon direncine sahip oldukları belirtilmektedir.

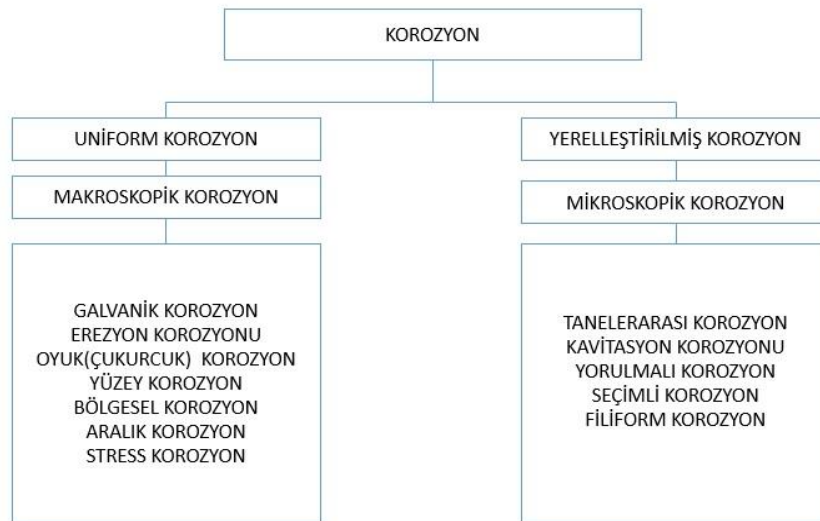
Çoğu korozyon hasarı çelik konstrüksiyonun ve karbon çeliğinin maruz kaldığı koşullara bağlıdır. Çeliğin maruz kalacağı ortama uygun malzeme seçimi önemli bir parametredir. Örneğin, karbon çeliklerinde eklenen Cr ve Ni gibi eser miktardaki alaşım elementleri çeliğin korozyon özelliklerini değiştirmektedir. Çeliklerin kimyasal bileşimi ve üretim süreçlerine dayalı olarak

Çelikler sıcak haddelenmiş, soğuk haddelenmiş, kusurlar, tane boyutları ve dislokasyon yoğunlukları ile elik bulunduğu ortama karşı farklı özellikler kazanabilir ( Dwivedi, Lepkova ve Becker 2017).

Clover ve arkadaşları tarafından boru hatlarından kullanılan karbon çeliklerinin korozyonu üzerine bir çalışmada korozyon hassasiyeti için perlit fazı üzerinde durulmuş ve korozyon etkilerinin perlitin fazının dağılımındaki farklılıklardan kaynaklandığı vurgulanmıştır. Çalışmada ayrıca Ferrit/Perlit yapısına sahip çeliklerin, korozyona karşı daha dşuk direnç gösterdiği ifade edilmiştir. Ayrıca, ince taneli ferrit yapılarının daha iri taneli yapılarla kıyaslandığında, tavlanmış martenzit mikro yapılarının daha iyi korozyon performansı sergilediği belirtilmiştir. Literatür araştırmalarına göre, ferrit yapısının perlit yapısına kıyasla ortalama korozyon hızının daha dşuk olduğu ve korozyon hızına bağlı olarak daha iyi performans gösterdiği rapor edilmiştir (Clover, Kinsella, Pejic ve De Marco 2005).

## 4.2 KOROZYON ÇEŞİTLERİ

Korozyon, metalin yapısal btnlğun bozar ve zamanla metali zayıflatarak konstrüksiyonun hasara uğramasına neden olur. Bu durum farklı çevresel koşullar ve etkileşimler nedeniyle çeşitli Şekillerde meydana gelebilir. Yani her korozyonun meydana gelmesinde farklı bir mekanizma etkilidir. Bu sebeple korozyonun genel olarak mekanizmalarına göre farklı türleri vardır ve bu Şekilde sınıflandırılırlar. Şekil 4.1’de korozyon çeşitlerinin sınıflandırılması belirtilmiştir.



**Şekil 4.1** Korozyon eşitlerinin Sınıflandırılması (Fomichov, Linyucheva, Vasylijev ve Chvertko 2024).

## 4.3 UNIFORM KOROZYON

Anot ile katod ikilisinin tüm yüzey boyunca homojen bir şekilde dağılarak meydana geldiği bir korozyon türüdür. Bu korozyon türü, genellikle metalin tüm yüzeyini etkiler ve yerel derin çukurlar ya da pitting (çukur) oluşumu gibi lokalize bozulmalar meydana gelmez. Uniform korozyon çoğu zaman atmosferdeki oksijen, su veya asidik/bazik ortamlara maruz kalan metallerde yaygın olarak gözlemlenir (Coşkun 2011).

### 4.3.1 Galvanik Korozyon

Farklı elektrokimyasal potansiyele sahip iki metalin temas ettiği durumlarda ortaya çıkar. Bu durumda, daha aktif olan metal (anot) ve daha az aktif olan metalin (katot) korozyonuna neden olur. Örneğin, demir ve alüminyum bir araya geldiğinde, demir daha hızlı korozyona uğrar. Bu olay elektrokimyasal bir reaksiyon sonucu bir metalin (anot) oksitlenmesi ve diğer metalin (katot) korunmasıyla gerçekleşir. Galvanik korozyonun oluşumu için iletken bir ortam ve farklı metal türlerinin bir arada kullanılması gerekir (Onaran 2006).

### 4.3.2 Erozyon Korozyonu

Erozyon korozyonu metal yüzeyinin hem korozyona uğraması hem de mekanik aşınmaya maruz kalması sonucu meydana gelir. Genellikle yüksek hızlı akışkanların (sıvı veya gaz) metal yüzeyine sürtünmesiyle ortaya çıkar. Bu sürtünme, metalin koruyucu tabakasını kaldırabilir ve altındaki metali açığa çıkararak korozyona neden olabilir. Örneğin, suyun içindeki çamur veya partiküllerin metal borulara sürtünmesi sonucu erozyon korozyonu meydana gelebilir. Bu tür korozyon metalin yüzeyinde delikler veya oyuklar şeklinde görülebilir (Tansel 1995).

### 4.3.3 Oyuk (çukurcuk) Korozyonu

Metal yüzeyinde belirli bölgelerde yoğun bir şekilde aşınma meydana gelirken diğer bölgeler etkilenmez. Örnek olarak, pitting (oyuklaşma) korozyonu veya crevice (kertik) korozyonu gibi durumlar bu gruba girer. Bu tür korozyon, metal yüzeyindeki yerel faktörlerin etkisiyle oluşabilir. Bu tür korozyon, genellikle paslanmaz çelik ve alüminyum gibi paslanmaya karşı dayanıklı materyallerde görülür ve genellikle metal yüzeyinin belirli bir noktasında başlar. Oluşturduğu çukurun içinde elektrokimyasal bir hücre oluşur ve bu hücrede anot ve katod

bölgeleri belirginleşir. Anod bölgesinde metal çözünürken, katod bölgesinde ise pasifleşme (koruyucu oksit tabakası) oluşur. Çukurcuk korozyonu hızlı gelişen bir korozyon türüdür ve metal yüzeyinde sadece küçük alanlarda, özellikle mikroskobik çukurlar halinde meydana gelir. Genellikle gözle görülmeyen küçük çukurlar şeklinde başlar, ancak zamanla derinleşebilir ve metalin dayanıklılığını ciddi şekilde zayıflatabilir. Bu sebeple tehlikeli bir korozyon türüdür (Kaftan 2006).

#### **4.3.4 Yüzey Korozyonu**

Metal yüzeyinin sürtünme veya aşınma etkisiyle aşınırken aynı zamanda korozyona uğraması durumudur. Bu, mekanik aşınma ile kimyasal korozyonun birleşimidir. Özellikle metal yüzeylerin sürtünmeye maruz kaldığı ve aynı zamanda agresif kimyasal ortamlarla temas ettiği durumlarda meydana gelir. Örneğin, deniz suyu içinde hareket eden bir geminin pervane kanatları, sürekli su sürtünmesi ve tuzlu suyun neden olduğu kimyasal etkilerle aşınma korozyonuna maruz kalabilir. Aşınma korozyonu, metal yüzeyinde düzensiz aşınma, oyuklar veya çukurlar şeklinde görülebilir (Kaftan 2006).

#### **4.3.5 Bölgesel Korozyon**

Bölgesel veya lokalize korozyon olarak bilinen bu korozyon çeşidinde hasar metal yüzeyinin sadece belirli bir bölgesinde meydana gelmektedir. Bölgesel korozyon genellikle daha hızlı bir şekilde ilerler ve metalin önemli bölgelerinde ciddi hasara yol açabilir. Bu tür korozyon, genellikle bölgesel oksitlenme veya çukurlaşma (pitting) şeklinde görülür (Song, Shan, Chen ve Han 2009).

#### **4.3.6 Aralık (Kravice) Korozyon**

Bu korozyon türü iki parçanın yüzeylerinin temassız kalarak, yüzey aralarında oksijen sebebiyle açığa çıkardığı korozyon türüdür. Parçaların yüzeyi ve korozyon bulunan bölge arasında oksijen yönünden farklılık olduğunda anot etki ile meydana gelir (Şahin 2020).

### **4.3.7 Stress Korozyon**

Hidrojen gevrekliği oralarak bilinen korozyon türü, elektrolit içerisindeki çatlağın taşınma yolu ile parça üzerine çeki gerilmesinden sonra oluşur (Erdemir 2017).

## **4.4 YERELLEŞTİRİLMİŞ KOROZYON**

### **4.4.1 Taneler Arası Korozyonu**

Özellikle metalin tane sınırlarında yoğunlaşmış olan korozyon türüdür. Bu tür korozyonda tane sınırlarındaki genellikle daha fazla aşınma ve zayıflama görülür. Bu durum korozyonun özellikle tane sınırlarında yoğunlaşması ve metalin bu bölgelerde belirgin bir şekilde zayıflamasıyla neden olabilir. Tane sınırları korozyonu genellikle belirli ortamlarda (örneğin, belirli kimyasal çözeltilerde) belirli metal alaşımlarında duyarlıdır (Kocaman 2020).

### **4.4.2 Kavitasyon Korozyonu**

Bir metalin akışkan içerisinde bulunurken metal içerisindeki gazın basınçtan dolayı paylaması ile ortaya çıkan korozyon türüdür (Ebnesajjad 2014).

### **4.4.3 Yorulmalı Korozyon**

Değişken koşullarda tekrarlı olarak gerilme ve basınç etkisine uğrayan malzemelerde küçük çatlaklar oluşabilir. Bu çatlaklar aşınmanın ilerlemesi için uygun bir ortam sağlar. Yorulma ve kimyasal etkileşim birbirini güçlendirerek kısa zamanda malzemenin zarar görmesine sebep olur (Kocaman 2020).

### **4.4.4 Seçimli Korozyon**

Bir metal ya da fazın etken sebeple alaşımla etkileşim içerisinde bulunarak açığa çıkan korozyon türüdür (Ahmad 2006).

#### **4.4.5 Filiform Korozyon**

Herhangi bir cismin tabakasının alt kısmında açığa çıkan korozyon türüdür. Boyanan yüzeylerde ve kaplama ile alt tabakaları arasında açığa çıktığı görülmüştür (Kocaman 2020).



## BÖLÜM 5

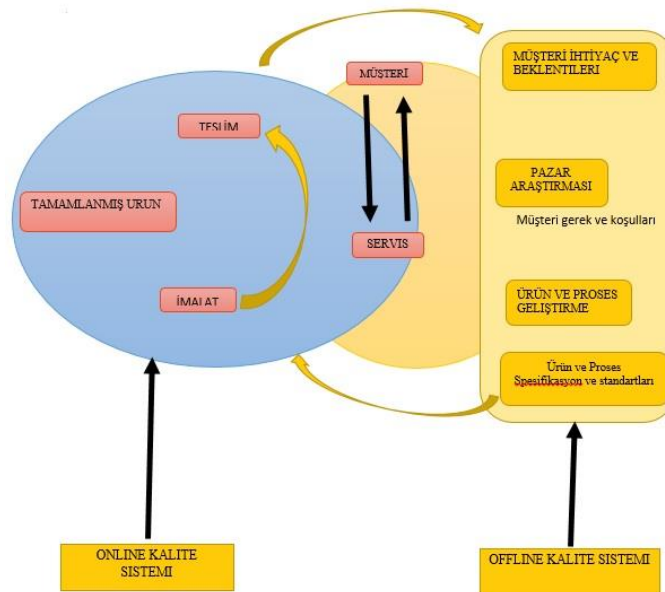
### TAGUCHİ

#### 5.1 GİRİŞ

Taguchi yöntemleri, Genichi Taguchi tarafından ürün kalitesini artırmak amacıyla geliştirilen istatistiksel bir yöntemdir. Başlangıçta mühendislik alanında kullanılan bu yöntem, biyoteknoloji, pazarlama ve reklamcılık gibi farklı alanlara da uygulanmıştır (Rosa vd. 2009; Rao vd. 2008, Selden, 1997). Taguchi'nin değişkenliği incelemeye yönelik tasarımları, profesyonel istatistikçiler tarafından başarılı bulunmuş ve iyileştirme süreçlerinde etkili olduğu belirtilmiştir (Kumar Karna ve Sahai 2012).

#### 5.1.1 Taguchi Yaklaşımının Kalite Sisteminde Kullanımı

Kalite sisteminde sürekli iyileştirme kapsamında, Taguchi'nin çevrim dışı (off-line) ve çevrim içi (on-line) yöntemleri kullanılarak kalite ve ürün arasındaki ilişki aşağıdaki Şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Taguchi Yaklaşımı (Aksu 2024).

### 5.1.2 Çevrimiçi (On-Line) ve Çevrimdışı (Off-Line) Kalite Kontrol

Üretim süreci ve sonrasındaki kalite beklentileri çevrimiçi kalite kontrol kapsamında değerlendirilir. Bu süreçte, ürün üzerindeki iyileştirme denemeleri ve istatistiksel oranların artırılması hedeflenir (Aksu 2024).

Taguchi'nin çevrimdışı kalite yöntemi, ürün ve proses tasarımında üç temel aşamayı içerir:

- Sistem tasarımı
- Parametre tasarımı
- Tolerans tasarımı

Taguchi, kaliteyi sadece üretim aşamasıyla sınırlı tutmaz; ürünün kullanım ömrü boyunca ortaya çıkan kayıpları da kaliteyi belirleyen unsurlar arasında görür. Parametre tasarımının temel amacı, üretim sonrası yaşanabilecek olası problemleri analiz ederek maliyetleri minimize etmektir. Üretilcek nesnenin belirlenmesi sırasında metalürjik özellikler de göz önünde bulundurulur, kullanım ömrü boyunca maliyet etkinliğinin korunması hedeflenir (Aksu, 2024).

## 5.2 TAGUCHİ YÖNTEMİNDE ORTOGONAL SERİLER

Ortogonal diziler (orthogonal arrays - OA), Taguchi yönteminde deney tasarımı (DOE - Design of Experiments) için kullanılan sistematik bir matris yapısıdır. Bu diziler, en az sayıda deneyle en fazla bilgi elde etmeye yardımcı olur. Ortogonal seriler, birden fazla faktörün ve bu faktörlere ait seviyelerin belirli bir düzen içinde kombinasyonlarını içerir (Hernadewita, Rochmad, Hendra, Hermiyetti ve Yuliani 2019).

Ortogonal Serilerin Temel Özellikleri

- Denge (Balance): Her faktör seviyesi, eşit sayıda diğer faktör seviyeleriyle test edilir.
- Bağımsızlık (Independence): Faktörler birbirlerinden bağımsız olarak analiz edilir.
- Verimlilik (Efficiency): Tam faktöriyel tasarımlara göre daha az deney yaparak anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlar.

### 5.2.1 Ortogonal Dizilerin Kullanımı

Ortogonal dizilerde, L harfi ortogonal dizi olduğunu, rakam ise deney sayısını ifade eder.

Örneğin:

L4 (2<sup>3</sup>): 3 faktör, 2 seviyeli (toplam 4 deney)

(Hernadewita, Rochmad, Hendra, Hermiyetti ve Yuliani 2019).

Aşağıdaki Çizelgede A, B ,C ve D dört faktörlü , 3 seviyeli L9 dizisi verilmiştir. L harfi “ortogonal diziyi” 9 rakamı izi “deney” sayısını belirtmektedir. Yapılacak deney sayısı sonuçlarına normal şartlarda 3<sup>4</sup> adet sayısında ulaşırken Taguchi metodu ile 9 deneyde ulaşılmaktadır (Ünal ve Dean 1990).

**Çizelge 5.1** L9 - Ortogonal Dizi Çizelgesi (Türe 2024).

DENEY NUMARASI	FAKTÖR VE SÜTUN SAYISI			
	1 A	2 B	3 C	4 D
1	L	L	L	L
2	L	2	2	2
3	L	3	3	3
4	2	L	2	3
5	2	2	3	L
6	2	3	L	2
7	3	L	3	2
8	3	2	L	3
9	3	3	2	L

### 5.3 SİNYAL GÜRÜLTÜ ORANLARI

Sinyal – Gürültü oranı (S/N), deney yapıldıktan sonra yaklaşım sonuçlarının gerçek değerden hangi oranda uzaklaştığını ortaya koyar. Buradaki belirtilen oran, sinyal miktarı / gürültü oranı olarak bilinir. Yaklaşım sonucu performans düzeyini belirleyen sinyal, düzeyden sapmayı ifade eden ise gürültüdür (Türe 2024).

Aşağıda sinyal gürültü denklemleri yazılmıştır (Propst, Lochnar ve Matar 1992)

Performans karakteristiğinin en düşük – en iyi olduğu durum;

$$\text{Denklem 1. } \frac{S}{N} = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n yi^2\right) \quad (5.1)$$

Performans karakteristiğinin en yüksek – en iyi olduğu durum;

$$\text{Denklem 2. } \frac{S}{N} = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{yi^2}\right) \quad (5.2)$$

Performans karakteristiğinin nominal – en iyi olduğu durum;

$$\text{Denklem 3. } \frac{S}{N} = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y^{-2}}{s^2}\right) \quad (5.3)$$

#### 5.4 TAGUCHİ METODUNDA ETKİLEŞİMLER

Taguchi yaklaşımı için en önemli faktörler olarak bilinen, deney methodu için faktör belirlemek ve açığa çıkan verilerin irdelenmesidir. Bu yaklaşım sayesinde, proses değerlerini irdelemek, faktörlerin birbiri ile bağımlı anlayabilmek ve verimli terkiplerini belirlemek için önemli etkidir. Taguchi yaklaşımında X ve Y değişkenleri faktör etkenlerini gösterir. Bu iki değişkenin kullanıldığı an düzen üzerinde önemli etki yaratması beklenir. Taguchi metodunda, etkileşim, bir deney tasarımındaki faktörlerin birbirleriyle etkileşimlerini ifade eder. X x Y şeklinde temsil edilir, X ve Y faktörlerinin etkileşimini gösterir. Her ikisinin de bulunduğu durumda, sistem üzerinde bir etkiye sahip olmaları anlamına gelir. Bu yöntem, deneysel çalışmalar sırasında çok sayıda değişkenin etkileşimini anlamak için önemlidir. Taguchi tasarımında, her faktörün gereken oranı ve bu oranlar için bir kombinasyonu vardır. Kombinasyonların bir düzen şekilde olması gereklidir. Bu düzende kombinasyonun birbirleri ile olan bağlarında etkileşimlerin belirlenmesi için sütunlar atanarak ortogonal seriler yardımı ile sonuçlara etki edecek varyasyonlar hesap edilebilir (Savaş 2010).

## 5.5 VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

ANOVA analizi, deneylerdeki faktörlerin önemli etkilerini belirlemek ve önemsiz faktörleri saptamak için kullanılan bir yöntemdir. Varyans analizinin temel amacı, çıktı verileri üzerindeki tasarım parametrelerinin etkisini incelemektir. Bu yöntemde, varyans ve kareler toplamı hesaplanarak %95 güven seviyesinde F-Testi uygulanır. ANOVA, bağımsız grup ortalamalarının istatistiksel olarak farklı olup olmadığını değerlendirir ve değişken durumların deneysel veya rastlantısal olup olmadığını belirlemek için hata ve etkileri karşılaştırarak etkileşimleri analiz eder (Rao ve Padmanabhan 2012).

## 5.6 HESAPLAMALAR KULLANILAN DENKLEMLER

Kareler Toplamı

Yapılan literatür araştırmasına göre toplam varyasyon denklemleri (Türe 2024) aşağıda özetlemiştir.

$$\text{Denklem 4. } \mathbf{SS}_T = \mathbf{SS}_A + \mathbf{SS}_B + \mathbf{SS}_{AXB} + \mathbf{SS}_E \quad (5.4)$$

$$\text{Denklem 5. } \mathbf{SS}_T = \left[ \sum_{i=1}^N y_i^2 \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.5)$$

*Denklemde kullanılan  $T$  = Toplam Sinyal – Gürültü oranıdır ( $S/N$ ) şeklinde gösterildiğini, " $N$ " deney sayısını, " $y_i$ " her deneyin  $S/N$  oranını temsil etmekte olduğunu söylemiştir.*

A faktörü varyans denklemi;

$$\text{Denklem 6. } \mathbf{SS}_A = \sum_{i=1}^{KA} \left[ \frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right] - \frac{T^2}{N} \quad (5.6)$$

Hata varyans denklemi;

$$\text{Denklem 7. } \mathbf{SS}_E = \mathbf{SS}_T + \mathbf{SS}_A + \mathbf{SS}_B + \mathbf{SS}_{AXB} \quad (5.7)$$

olarak belirtilmiştir (Türe 2024).

Serbestlik Derecesi

Literatür araştırmalarına göre Anova izelgesi oluşturulurken kullanılan yaklaşım metodudur. Deneme sayısında 1 eksigiidir (Savaş 2010).

$$\text{Denklem 8. } \mathbf{U}_T = N - 1 \quad (5.8)$$

Bir faktörün belirlenmesi için faktör seviyesi adetinin 1 eksigiidir (Savaş 2010).

$$\text{Denklem 9. } \mathbf{U}_A = \mathbf{k}_A - 1, \mathbf{U}_B = \mathbf{k}_B - 1 \quad (5.9)$$

Etkileşimlerin serbestlik derecesi için Denklem 10 şeklinde ifade edilmektedir (Savaş 2010).

$$\text{Denklem 10. } \mathbf{U}_{AXB} = \mathbf{U}_A \mathbf{U}_B \quad (5.10)$$

Hataların serbestlik derecesi için, faktörlerin serbestlik derecesi toplam serbestlik derecesinden çıkarılır (Savaş 2010).

$$\text{Denklem 11. } \mathbf{U}_e = \mathbf{U}_T - \mathbf{U}_A - \mathbf{U}_B - \mathbf{U}_{AXB} \quad (5.11)$$

## 5.7 DOĞRULAMA TESTLERİ

Taguchi yaklaşımında doğrulama testi, sürecin istenen performansa ulaşıp ulaşmadığını kontrol eden son adımdır. Bu aşamada, beklenen ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak sürecin güvenilirliği değerlendirilir. Güven aralıkları belirlenir ve kalite açısından uygunluğu teyit edilir. Eğer sonuçlar güven aralığında değilse, hatalar tespit edilerek deneyler tekrarlanmalıdır (Türe 2024).

## 5.8 LİTERATÜR ARAşTIRMASI GÖRE TAGUCHİ YÖNTEMİ UYGULAMALARI

Agboola vd. (2020), orta karbonlu çeliklerin ısıl işleme iyileştirilmesini Taguchi yaklaşımıyla optimize etmiştir. Çalışmada akma mukavemeti, sertlik ve çekme mukavemeti incelenmiş, L9 ortogonal dizisi ile 9 deney gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada Sinyal-Gürültü oranı yöntemi, ikinci aşamada ise GRA yöntemi kullanılmıştır. Optimum koşullar belirlenmiş ve ANOVA

analizine göre bekletme süresinin en önemli faktör olduğu görülmüştür. Su verme işleminin en düşük performansa sahip olduğu, gelecekteki çalışmaların korozyon ve aşınma direnci gibi özelliklere odaklanabileceği belirtilmiştir. Taguchi ve GRA analizlerinin uyumlu olduğu kanıtlanmıştır.

Literatür araştırmalarına göre (Fıçıcı, Kapsız ve Durat 2011) yaptıkları çalışmada, AISI 1040 çeliğinin aşınma direnci modelini, Taguchi yaklaşımı kullanarak borlama süresi, yük kayma mesafesi ve kayma hızı parametrelerini geliştirmişlerdir. Aşınma testleri, farklı koşullar altında pim – disk makinesinde yapılmıştır. Deneysel tasarımda Ortogonal dizi, sinyal – gürültü oranı ve varyans yöntemleri kullanılmıştır. Deneysel sonuçlarda, AISI 1040 çeliğinin ağırlık kaybını etkileyen faktörün arasında borlama süresi önemli parametre olarak belirtilmiştir. 1040 çeliğinin aşınma üzerindeki en önemli faktörün borlama süresi olduğu ve sonraki parametrenin kayma mesafesi olarak açığa çıktığı belirtilmiştir. Yük ve kayma hızı etkisi düşük bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Ortogonal dizi olarak L27 kullanılmıştır. ANOVA sonuçları, aşınma üzerinde en büyük etkiye sahip olan faktörün borlama süresi olduğunu, bunu kayma mesafesinin takip ettiğini göstermiştir. Optimum test parametrelerini doğrulamak için ek deneyler gerçekleştirilmiş ve tahmin edilen aşınma kaybı ile gerçek ölçümler arasında %3,5 anlamlılık düzeyinde iyi bir uyum olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada borlanmış numunelerdeki aşınma oranı borlanmamış numunelere nazaran daha büyük aşınma direncine sahip olduğu belirlenerek, borlama süresi ve kayma mesafesinin toplam katkı oranı sırasıyla %93,96 ve %2,14 olarak hesap edildiği belirtilmiştir. Sonuç olarak, Taguchi yöntemi ile gerçekleştirilen parametre tasarımının aşınma testi parametrelerinin optimizasyonunda basit, sistematik ve verimli bir yöntem sağladığı kanıtlanmıştır (Fıçıcı, Kapsız ve Durat 2011).

Shinyar, Hussein ve Abbas (2021), elektroless kaplanmış düşük karbonlu çeliğin mikro sertliği ve korozyon davranışını deneysel olarak incelemiş ve Taguchi metodu ile analiz etmiştir. ANOVA analizine göre, en önemli süreç parametresinin %47 etki oranı ile nanomalzeme olduğu belirlenmiştir. XRD analizi, Ni-P-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaplamasının amorf-kristal karışımı olduğunu göstermiştir. En uygun parametreler 90°C banyo sıcaklığı, 120 dakika kaplama süresi ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanomalzemesi olarak belirlenmiş, bu koşullarda maksimum sertlik ve minimum korozyon oranı elde edilmiştir.



## BÖLÜM 6

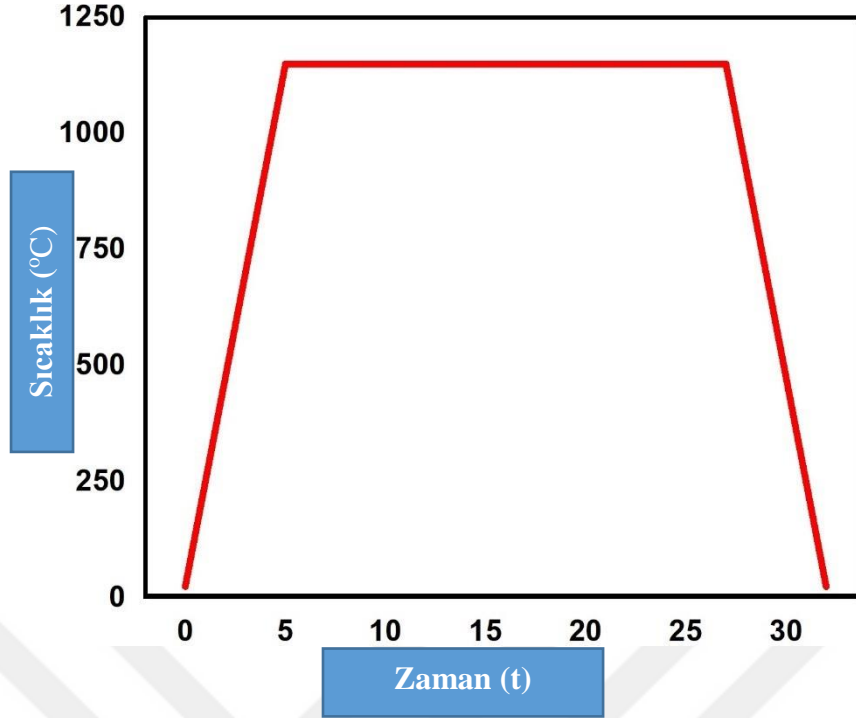
### DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 6.1 GİRİŞ

Günümüzde farklı endüstriyel uygulamalarda sıklıkla tercih edilen çelikler havacılıktan taşımacılığa, gemi-inşaa endüstrisinden yapı malzemelerine hemen her alanda kullanılmaktadır. Kullanım miktarı olarak ise düşük ve orta karbonlu çeliklerin oldukça fazla tercih edildiği görülmektedir. Öte yandan karbon çeliğin birçok fiziksel ve kimyasal özelliğini etkilemektedir. Fakat çelikler kullanım miktarının yüksek olmasından dolayı farklı uygulamalarda farklı servis koşullarına maruz kalmaktadır. Bu sebeple çelikteki karbon içeriğinin farklı servis koşullarında nasıl bir tepki vereceği önem arz etmektedir. Bu çalışmada farklı karbon içeriklerine sahip SAE 10XX (XX= 10, 20, 30, 40, 50 ve 60) çelikleri mikroyapısal olarak incelenmiş ve sertlik testleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çeliklerin farklı aşınma ve korozyon şartları altında davranışlarının incelenmesi için Taguchi yöntemi kullanılarak bir tasarım yapılmış ve farklı test parametreleri altındaki aşınma ve korozyon davranışları incelenmiştir.

#### 6.2 DENEYSEL NUMUNELER

Tez çalışmada kapsamında ilk olarak deneysel numunelerin geçmişte uygulanan mekanik veya termomekanik işlemlere ait etkilerinin giderilmesi için tavlama işlemine gerçekleştirilmiştir. Tavlama işlemi için numuneler Protherm marka atmosfer kontrollü fırın içerisinde 1150 °C'de 24 saat süre ile bekletilmiştir. Tavlama işlemi sırasında atmosfer kontrolü ile birlikte yanma kayıplarının engellenmesi için numuneler dökme demir talaş içerisinde konulmuştur. Uygulanan tavlama işlemine ait ısıl prosedür Şekil 6.1'de verilmiştir.



Şekil 6.1 Tavlama İşlemi Prosedürü.

Tavlama işlemi sonrası numunelere spektral analiz işlemi uygulanmıştır. Spektral analiz işlemi için Oxford marka EOS cihazı kullanılmıştır. Spektral analiz sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir.

Çizelge 6.1 Spektral Analiz Verileri.

Sample	C	Mn	S	P	Fe
1010	0.11	0.43	<0.02	<0.01	Bal.
1020	0.19	0.51	<0.01	<0.03	Bal.
1030	0.31	0.73	<0.03	<0.02	Bal.
1040	0.40	0.69	<0.01	<0.01	Bal.
1050	0.53	0.72	<0.01	<0.01	Bal.
1060	0.62	0.71	<0.01	<0.02	Bal.

### 6.2.1 Metalografik İşlemler

DeneySEL numunelerin test ve analizler için yüzey hazırlama işlemleri zımparalama ve parlatma olarak iki kademe gerçekleştirilmektedir. Zımpara ve parlatma işlemleri Şekil 6.2’de verilen Metkon marka parlatma cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak numunelerin yüzeyleri sırasıyla 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2000 ve 2500 mesh boyutundaki SiC zımpara kullanılarak zımparalanmıştır. Sonrasında sırasıyla 6, 1 ve 0.05  $\mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  (alümina)

solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. Parlatma sonra Taylor Hobson marka 2D profilometre kullanılarak gerçekleştirilen yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde numunelerin ortalama 0.05-0.06 µm yüzey pürüzlüğüne sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.2 Metalografik Zımparalama ve Parlatma Makinesi.

### 6.2.2 Mikroyapı Görüntüleme İşlemleri

Numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.3'te verilen Leica 1750 M metal mikroskobu kullanılarak alınmıştır. Numunelerin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri Jeol 6060-V kullanılarak marka elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Mikroyapısal incelemelere tabi tutulacak numuneler %3 Nital (97 ml etanol and 3 ml HNO<sub>3</sub>) çözeltisi kullanılarak 15 saniye süre ile dağlanmıştır. Optik mikroskop görüntüleri ile mikroyapıdaki fazların miktarının belirlenmesinde Image-J programı kullanılmıştır.



**Şekil 6.3** Mikro Yapı Görüntüleme Cihazı

### **6.2.3 Sertlik Testi**

DeneySEL çalışmalar kapsamında numunelerin Brinell sertlikleri ölçülmüştür. Sertlik testleri Bulut Makine DIGIROCK RB model Brinell sertlik test makinası kullanılarak 187.5 kgf altında 15 saniye süre ile gerçekleştirilmiştir. Sertlik cihazının görünüm Şekil 6.4’de verilmiştir. Sertlik ölçümleri için her bir numunenin farklı noktalarından 10 ölçüm alınarak ortalama sertlik değeri hesaplanmıştır.



**Şekil 6.4** Brinell Sertlik Ölçme Cihazı.

## 6.2.4 Aşınma Testi

DeneySEL çalışmalar kapsamında farklı karbon içeriğine sahip numunelerin aşınma direnci ölçülmüştür. Aşınma testleri TriboTester marka git-gel (reciprocating) hareketli aşınma cihazı kullanılarak yapılmıştır. Aşınma testleri için kullanılan cihaza ait görüntü Şekil 6.5’de verilmiştir. Aşınma testlerinden sonra aşınma izlerinden Şekil 6.6’da verilen Taylor-Hobson marka 2D profilometre ile alan ölçümü gerçekteştirilmiş ve sonrasında hacimsel kayıp hesaplanmıştır.

Sürtünme Katsayısı (SK) Denklemi;

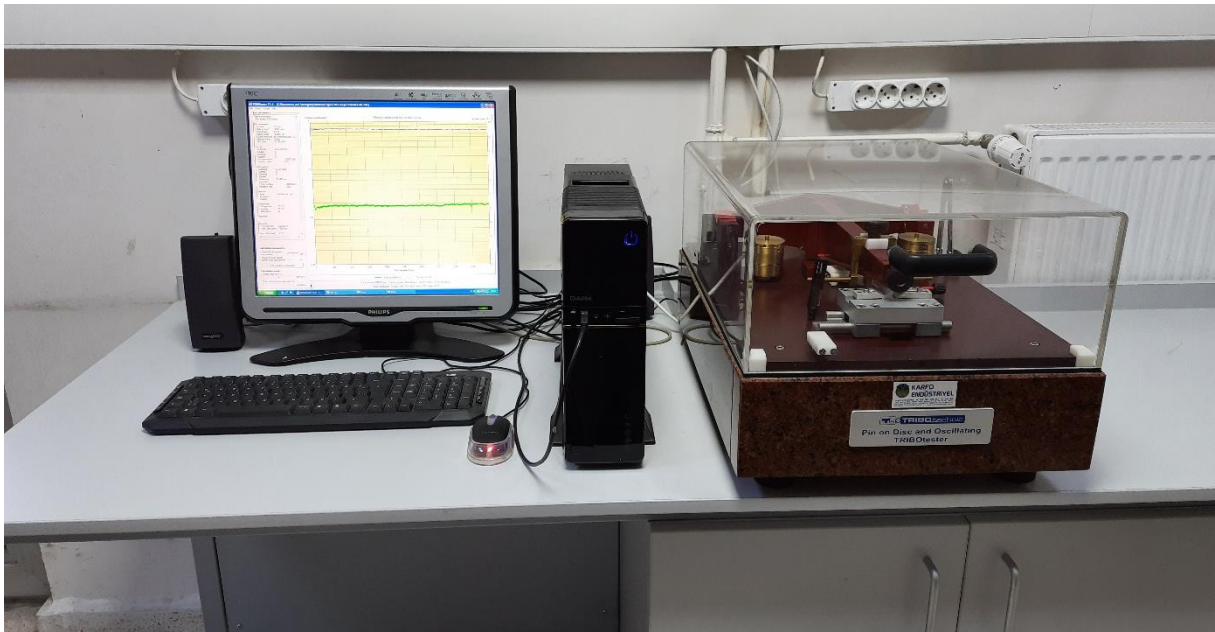
$$\text{Denklem 12. } SK = \frac{F_s}{F_n} \quad (6.1)$$

- $F_s$ = Yanal kuvvet
- $F_n$ = Normal yük

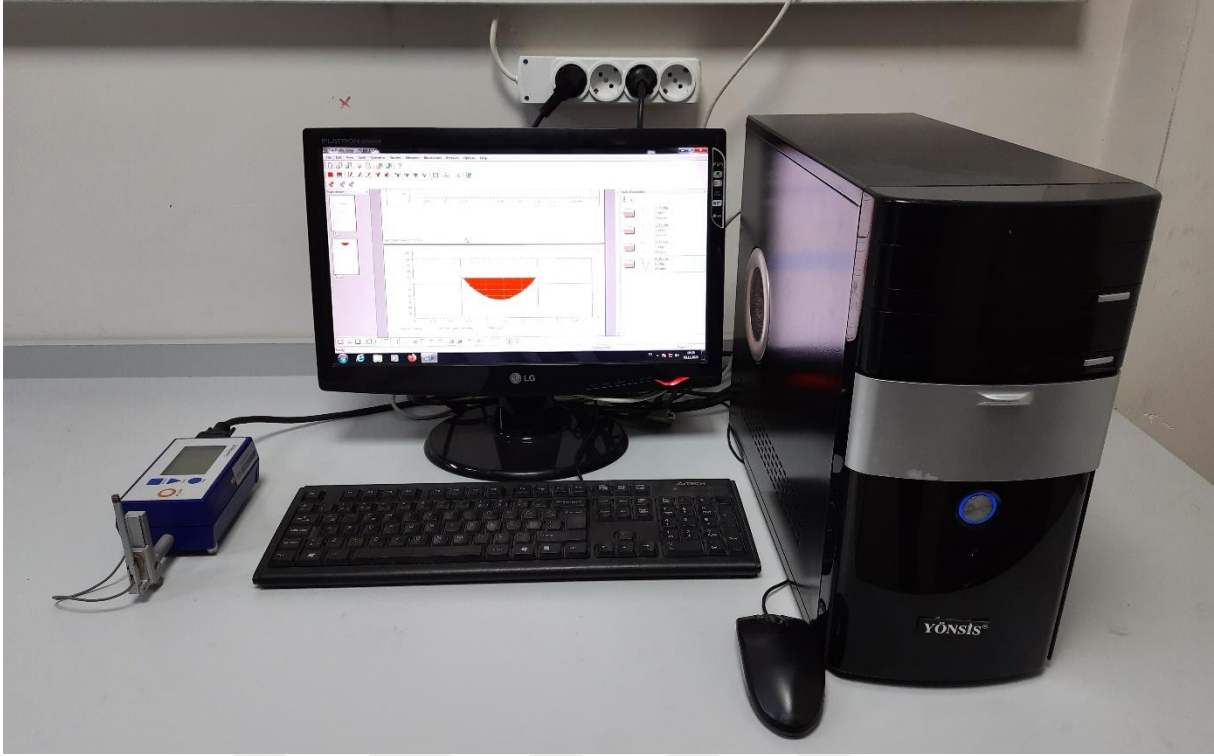
Aşınma oranı (AO)

- $V$  = Hacim mm<sup>3</sup>
- $S$  = kayma mesafesi

$$\text{Denklem 13. } AO = \frac{V}{S} \quad (6.2)$$



Şekil 6.5 Aşınma Test Cihazı.



**Şekil 6.6** Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Cihazı.

Aşındırıcı olarak  $\text{Si}_3\text{N}_4$  bilye kullanılmış ve testler  $25\text{ }^\circ\text{C} (\pm 3)$  ve  $\%40 (\pm 5)$  nem koşulları altında yapılmıştır. Aşınma test parametrelerine bağlı olarak karbon içeriğinin aşınma üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu nedenle oluşturulan deney parametrelerinin birbiri ile olan bağı Taguchi deney tasarımıyla gerçekleştirilmiştir. Taguchi deneysel tasarım yöntemine göre belirlenen faktör ve seviyeler Çizelge 6.2’de verilmiştir.

**Çizelge 6.2** Aşınma Testleri İçin Belirlenen Faktör ve Seviyeleri.

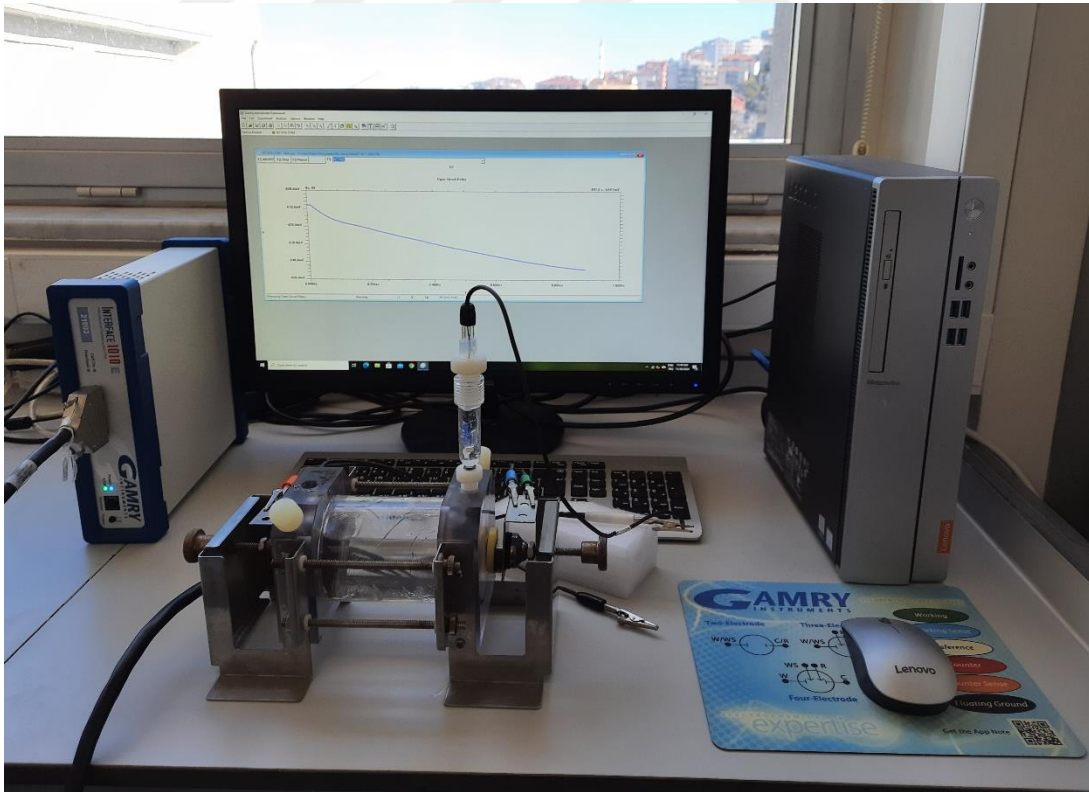
Faktörler	Faktör Seviyeleri					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
Carbon Content	AISI 1010	AISI 1020	AISI 1030	AISI 1040	AISI 1050	AISI 1060
Yük (N)	3	6	9			
Hız, m/s	20	40	60			
Mesafe (m)	150	300	450			

## 6.2.5 Korozyon Testi

Korozyon testleri uygulanırken Gamry 1010-E marka makine kullanılmıştır. Yapılan korozyon testinde 300 ml. kapasiteli yatay hücre kullanılmıştır. Şekil 6.7’de korozyon test ünitesinin görünümü verilmiştir. Testler Ag/AgCl referans elektrot ve grafit karşıt elektrot kullanılarak -0.5V ile +1V potansiyel değer arasında 0.166 mV tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Tafel test verileri Gamry Echem programı kullanılarak ekstrapole edilmiş ve Eşitlik 6.3’de verilen formül göre korozyon hızı hesaplanmıştır.

$$\text{Denklem 14. } KH = \frac{0.129 \times i \times Eq}{\rho} \quad (6.3)$$

- $i$  = Akım yoğunluğu ( $A/cm^2$ )
- $Eq$  = Eşdeğer Ağırlık
- $\rho$  = Yoğunluk ( $gr/cm^3$ )



Şekil 6.7 Korozyon Test Cihazı.

Aşınma testlerine benzer şekilde korozyon testleri için de Taguchi tasarımından yararlanılmıştır. Taguchi tasarımında birbirinden farklı üç çözelti ve bu çözeltilerin üç farklı konsantrasyonu seviye ve faktör olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarda Taguchi deney tasarımına göre yapılan faktör ve seviyeler Çizelge 6.3’ de verilmiştir. Korozyon hesaplama formülleri aşağıda verilmiştir.

**Çizelge 6.3** Taguchi Tasarımında Korozyon Seviye ve Faktörleri.

Faktörler	Faktör Seviyeler					
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4	Seviye 5	Seviye 6
Carbon Content	AISI 1010	AISI 1020	AISI 1030	AISI 1040	AISI 1050	AISI 1060
Çözelti Türü	NaCl	HCl	NaOH			
Derişim	0.1	0.5	1			

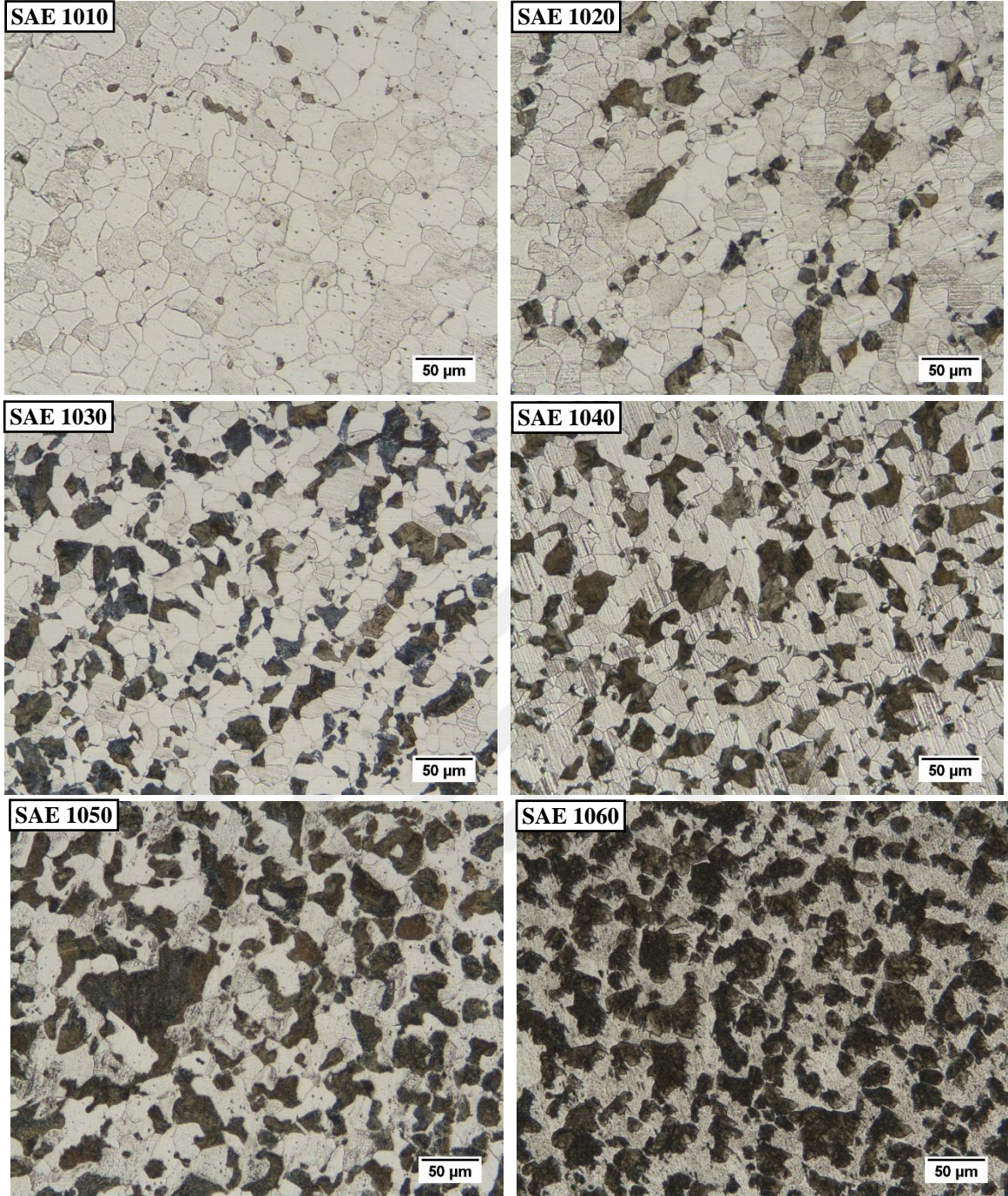
## BÖLÜM 7

### DENEYSEL SONUÇLAR

#### 7.1 GİRİŞ

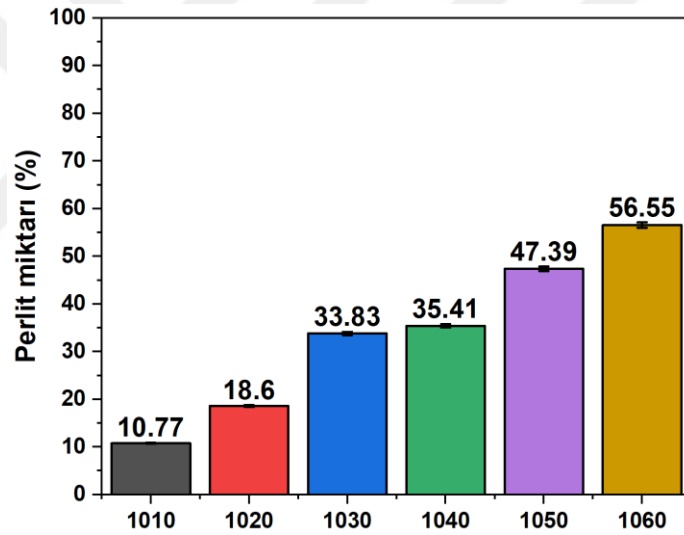
##### 7.1.1 Mikro Yapı

Karbonun demir içerisinde çözünürlüğü oda sıcaklığında %0.002 gibi çok düşük bir değere sahiptir. Yani  $\alpha$ -Fe katı ergiyiği çok dar bir alanda yer almaktadır. Artan karbon miktarı ile mikroyapıda  $\alpha$ -Fe'in yanında  $\alpha$ -Fe ve  $Fe_3C$  fazlarından oluşan ve perlit adı verilen tabakalı bir yapı oluşur. Mikroyapı içerisindeki perlit miktarı diyagramın %0.76 karbon içerdiği bölgeye kadar artar. Fe-C faz diyagramında %0.76 C içeren çelik perlitik çelik olarak bilinmektedir ve mikroyapısının %100 oranında perlit fazından oluşması beklenmektedir. Ötektoid noktanın sağ tarafı ise sementit olarak bilinen  $Fe_3C$  fazına bağlanmaktadır. Şekil 7.1'de farklı karbon içeriğine sahip SAE 10XX çeliklerinin optik mikroskop sonuçları görülmektedir.

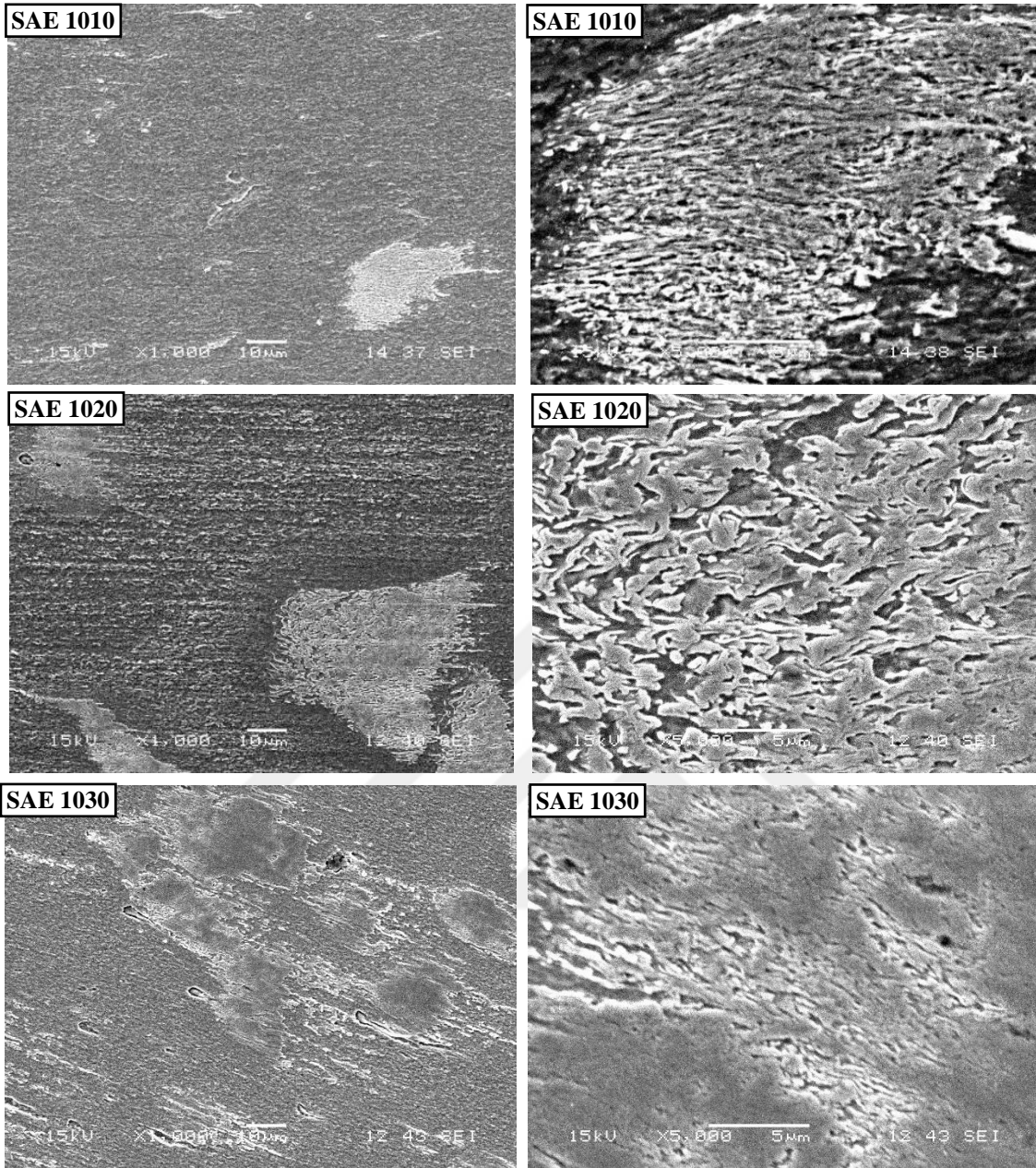


Şekil 7.1 Numunelerin Optik Mikro Yapısı.

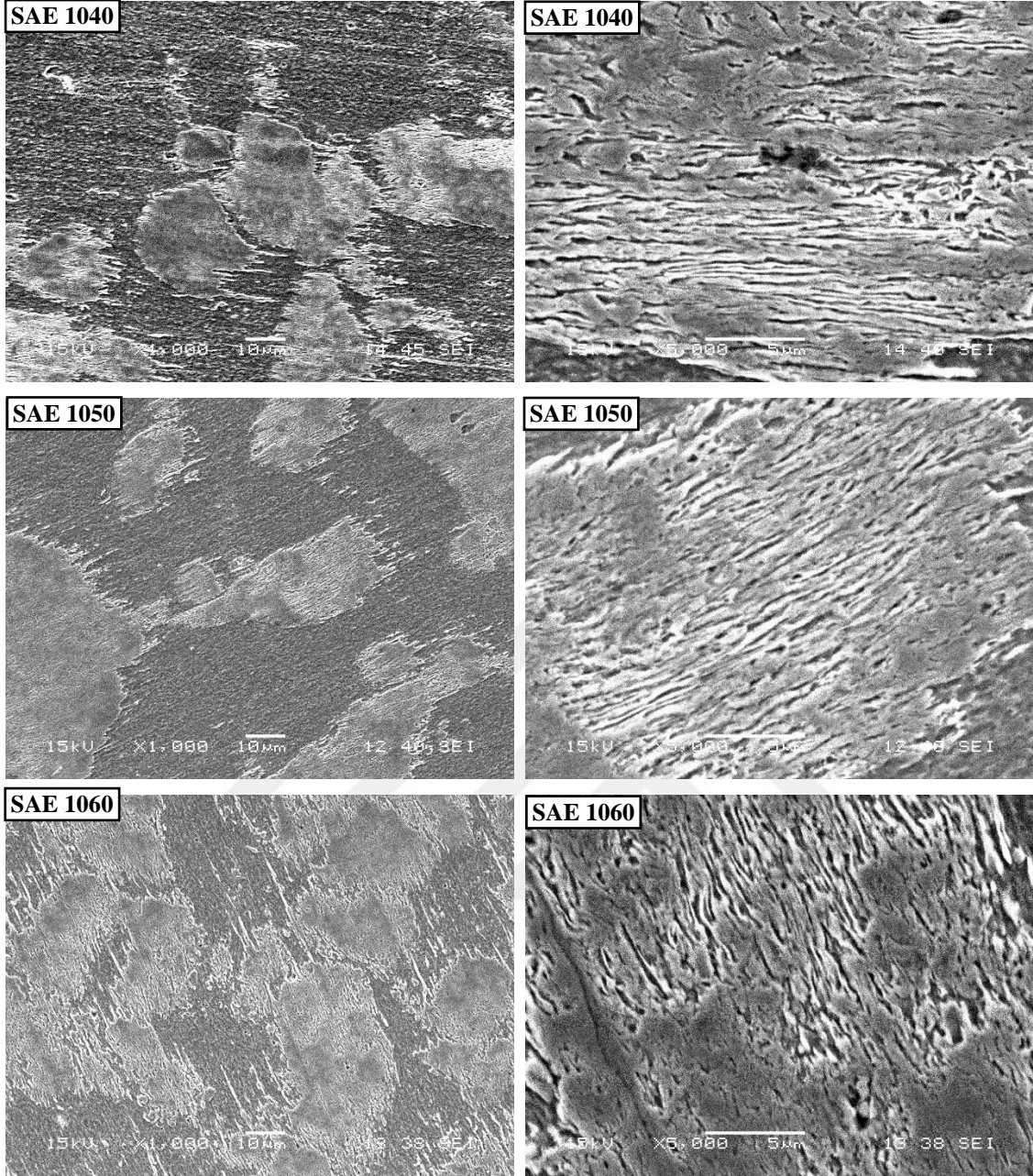
Demir karbon denge diyagramına göre ağırlıkça 0-0.6 karbon içeren çelikler demir karbon denge diyagramında ötektoid noktanın sol tarafında kalmaktadır. Yani bu çeliklerinin mikroyapılarının ferrit ve perlit fazlarından oluşması beklenmektedir. Şekil 7.1’de verilen optik mikroskop görüntülerinde açık renkli adacıklar  $\alpha$ -Fe fazının ve siyah adacıklar ise perlit fazını temsil etmektedir. Image J programı kullanılarak yapılan ölçümlerde mikroyapıda bulunan perlit miktarları Şekil 7.2’de verilmiştir. Normalde perlit miktarının bir miktar daha fazla olması beklenir. Görüntü işleme methodları ile yapılan ölçümlerde perlit miktarının eser miktarda düşük olmasının sebebi ısıl işlem koşulları veya ölçümsel faktörlerden kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir. Şekil 7.3.a - b ve Şekil 7.4.a - b’de deneysel numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Görüntülerde koyu ve açık renkli olmak üzere iki farklı kontrasta sahip fazların oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu fazlardan koyu renkli bölgeler matris fazı olan  $\alpha$ -Fe’i ve açık renkli adacıklar ise perlit fazını temsil etmektedir.



Şekil 7.2 Deneysel Numunelerin % Perlit Oranları.



Şekil 7.3 a) SEM - 1000X, b) SEM - 5000X

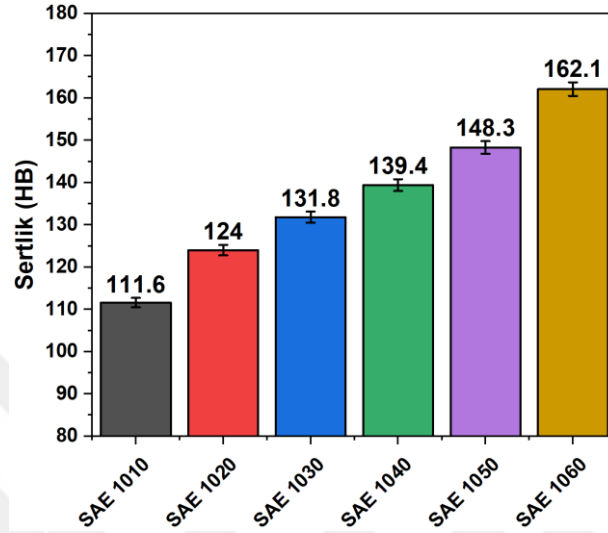


Şekil 7.4 a) SEM – 1000X, b) SEM – 5000X

### 7.1.2 Sertlik Testi

Şekil 7.5’de farklı oranlarda karbon içeren çeliklerin sertlik sonuçları verilmiştir. Bileşimdeki karbon miktarının artması ile sertlik artmıştır. Literatürde çelik içerisindeki karbon miktarının artması ile sertlikte artış olduğunu bildiren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genel olarak sertlik artışı mikroyapısal değişikliklere bağlanmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında Şekil 7.1’de verilen mikroyapı görüntülerinden de anlaşılacağı üzere sertlik mikroyapıda artan perlit miktarı ile artmıştır. Perlit fazı  $\alpha$ -Fe ve yüksek sertlikte  $Fe_3C$

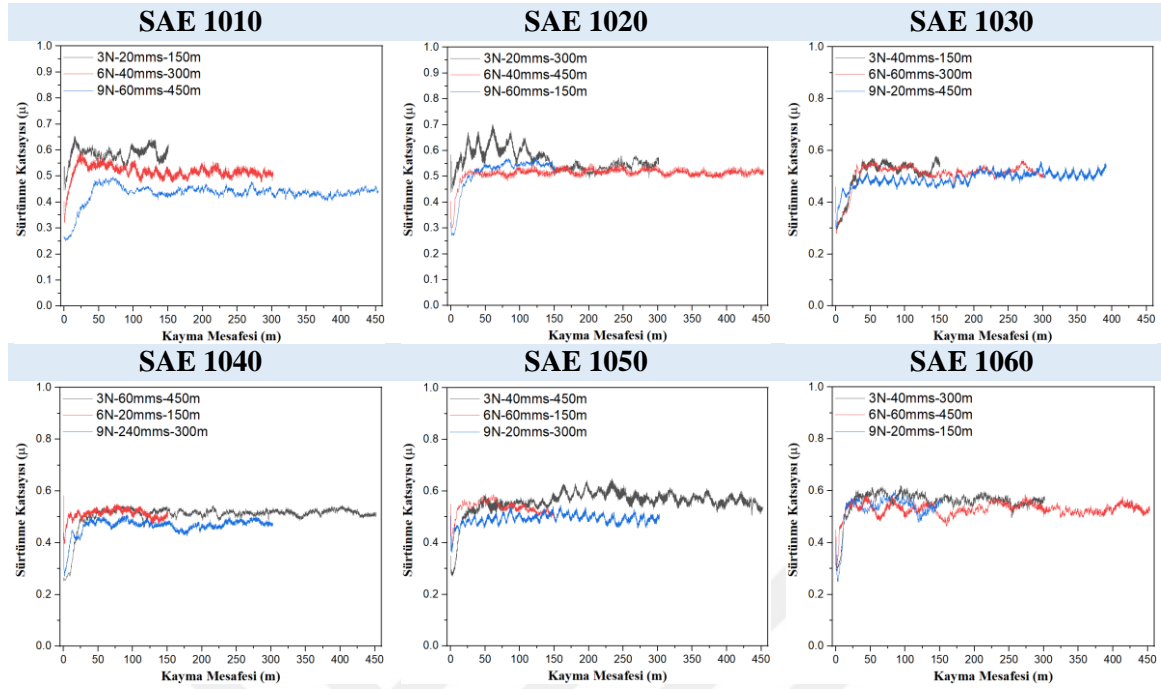
tabakalarından oluşmaktadır. Bu kompozit karakterli yapının sertliği matris  $\alpha$ -Fe'e göre oldukça yüksektir bu durum artan perlit miktarı ile sertlikte bir artmış olmasına neden olmaktadır. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda benzer bulguların elde edildiği görülmektedir (Nam, Sim ve Lee 2004).



Şekil 7.5 Sertlik Ölçümleri.

### 7.1.3 Aşınma Testleri

Şekil 7.6'da sürtünme katsayısı grafikleri verilmiştir. Sürtünme katsayısı değerleri 0.4-0.6 arasında değişmektedir. Çelik bileşiminde bulunan karbon miktarı ve sürtünme katsayısı arasında doğrudan bir korelasyon olmadığı anlaşılmaktadır. Grafiğe göre sürtünme katsayısının mesafeden bağımsız hareket ettiği görülmektedir. Fakat Çizelge 7.1'de verilen ortalama sürtünme katsayısı grafiklerine göre sürtünme katsayısı artan aşınma hızı ile birlikte azalmaktadır. Öte yandan karbon içeriğinin artması ile sürtünme katsayısında lineer bir davranış gözlenmemiştir.



Şekil 7.6 Sürtünme Katsayısı Grafikleri.

Çizelge 7.1’de, L18 ortogonal serisinin önerdiği deney reçeteleri dikkate alınarak belirlenen sürtünme katsayıları ve en düşük en iyidir kalite karakteristiğine göre hesaplanan S/N oranları verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda en düşük sürtünme katsayısı 0,45 olarak 3 numaralı deney reçetesinde, en yüksek sürtünme katsayısı ise 0,6 olarak 13 numaralı deney reçetesinde elde edilmiştir. Çizelge 7.1 incelendiğinde, sürtünme katsayısı üzerinde hangi faktörün daha etkili olduğunu belirlemenin zor olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni, deneylerde faktör seviyelerinin eş zamanlı olarak değiştirilmesidir. Klasik analiz yöntemlerinde, bir faktörün etkisini ortaya koyabilmek için diğer tüm faktörler sabit tutulurken yalnızca incelenen faktörün seviyesi değiştirilerek etkisi gözlemlenir. Ancak bu yöntem, deneylerin gerçek sistem davranışını tam olarak yansıtamayabileceğinden, her zaman en sağlıklı sonucu vermeyebilir. Bu nedenle, faktörlerin etkisinin belirlenebilmesi için diğer faktörlerin farklı seviyelerdeki etkilerinin de incelenmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, Taguchi yaklaşımına göre hazırlanan ortogonal seriler kullanılarak yapılan deneyler sonucunda elde edilen ham veriler doğrudan faktörlerin etkisini ortaya koymamaktadır.

**Çizelge 7.1** Sürtünme Katsayıları Verileri.

D. No	Carbon Content	Yük (N)	Mesafe (m)	Hız, mm/s	sk	S/N
1	0.1	3	150	20	0.60	4.44
2	0.1	6	300	40	0.55	5.19
3	0.1	9	450	60	0.45	6.94
4	0.2	3	300	20	0.57	4.88
5	0.2	6	450	40	0.5	6.02
6	0.2	9	150	60	0.52	5.68
7	0.3	3	150	40	0.57	4.88
8	0.3	6	300	60	0.55	5.19
9	0.3	9	450	20	0.48	6.38
10	0.4	3	450	60	0.56	5.04
11	0.4	6	150	20	0.55	5.19
12	0.4	9	300	40	0.52	5.68
13	0.5	3	450	40	0.6	4.44
14	0.5	6	150	60	0.58	4.73
15	0.5	9	300	20	0.5	6.02
16	0.6	3	300	60	0.59	4.58
17	0.6	6	450	20	0.52	5.68
18	0.6	9	150	40	0.56	5.04

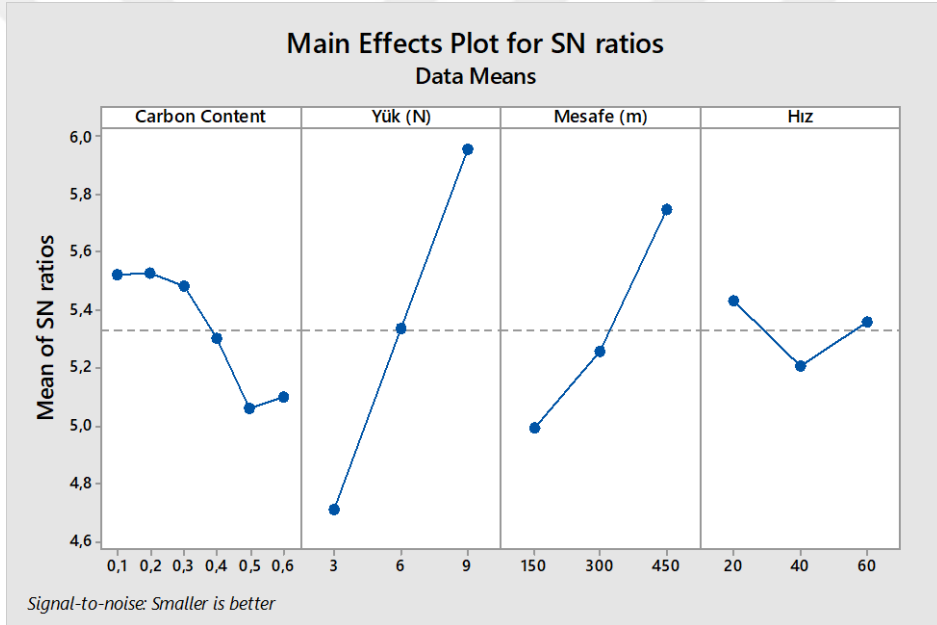
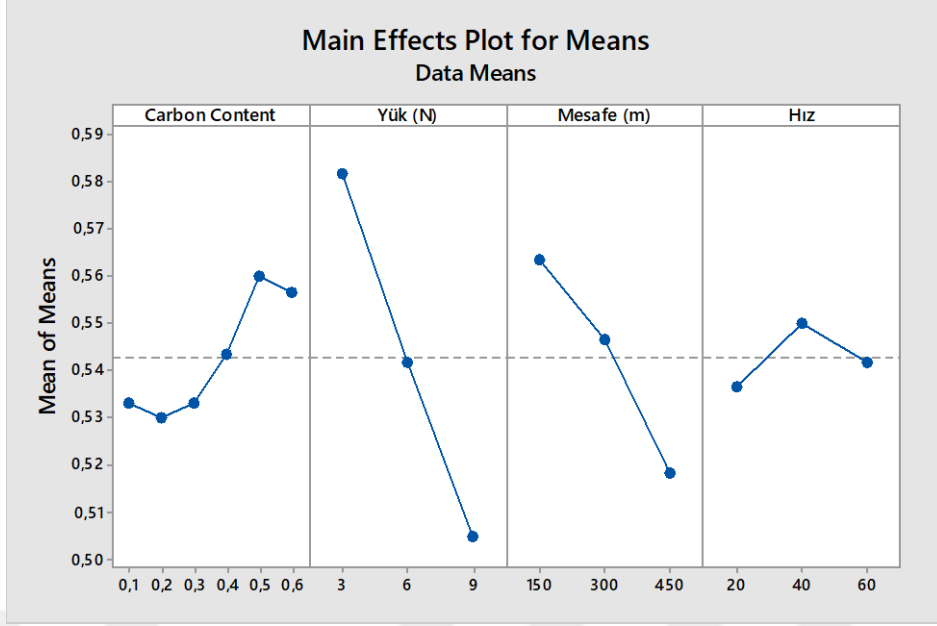
Taguchi yaklaşımına göre faktörlerin etkilerini ortaya koymak amacı ile elde edilen ham veriler kullanılarak ANOVA analizi yapılmaktadır. Çizelge 7.2’de sürtünme katsayıları için hazırlanmış ANOVA Çizelgesi verilmiştir. Çizelge 7.2’de karbon içeriği faktörünün P değeri 0.9 olup 0.05 anlamlılık seviyesinin üzerinde olduğu için aşınma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır. Kayma hızı faktörünün P değeri 0.52 olup 0.05 anlamlılık seviyesinin üzerinde olduğu için aşınma oranı üzerinde bu faktörde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır. Yük (N) faktörünün P değeri 0.004 olup 0.05’ten küçük olduğu için aşınma oranı üzerinde en güçlü etkiye sahip faktördür. F değeri 15.53 ile diğer faktörlerden çok daha büyük olup yük arttıkça aşınma oranının önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Mesafe (m) faktörünün P değeri 0.039 olup P değeri 0.05’ten küçük olduğu için istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahiptir. F değeri 5.87 olup, yük faktörüne kıyasla daha az etkili olduğu görülmektedir. Hata terimi düşük olduğu için modelin güvenilir sonuçlar verdiğini ve açıklanamayan değişkenliğin nispeten az olduğunu göstermektedir. Bu analiz sonucunda yük faktörünün aşınma oranını en çok etkileyen değişken olduğu, mesafenin etkisinin daha sınırlı olduğu ve karbon içeriğinin istatistiksel olarak anlamlı bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir.

**Çizelge 7.2** Sürtünme Katsayısı için Varyans Analiz Çizelgesi (ANOVA).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Carbon Content	5	0.6733	0.6733	0.13465	0.9	0.536
Yük (N)	2	4.6495	4.6495	2.32473	15.53	0.004
Mesafe (m)	2	1.7562	1.7562	0.87809	5.87	0.039
Hız	2	0.1558	0.1558	0.07791	0.52	0.619
Residual Error	6	0.8981	0.8981	0.14968		
<b>Total</b>	<b>17</b>	<b>8.1328</b>				

Faktörlerin sürtünme katsayısı üzerindeki etkilerinin grafiksel gösterimi Şekil 7.7’de verilmiştir. Genel olarak grafik incelendiğinde, artan karbon oranı ile sürtünme katsayısının arttığı görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni, karbon oranının artmasıyla çeliğin sertliğinin yükselmesidir. Sertlik arttıkça, malzeme yüzeyinde plastik deformasyon azalır ve temas yüzeyindeki değişiklikler nedeniyle sürtünme katsayısı artabilir.

Grafikte uygulanan yükün sürtünme katsayısı üzerindeki etkisine bakıldığında, artan yükte birlikte sürtünme katsayısının lineer bir şekilde düştüğü görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni, yük arttıkça temas yüzeyinde mikro kaynak bağlarının (asperit temasları) daha kolay kırılması, bu da sürtünme katsayısının düşmesine olabilir. Veya yüksek basınç altında gevşek aşınma parçacıklarının bir kaygan film oluşturması, yüzeyler arası sürtünmeyi azaltabilir. Bu sonuçlar, yükün artmasının sürtünme mekanizmasını değiştirebileceğini ve temas yüzeyi üzerinde farklı etkiler oluşturabileceğini göstermektedir.



**Şekil 7.7** Sürtünme Katsayıları İçin Çizilen Faktörlerin Etki Grafığı.

Grafikte artan kayma mesafesi ile birlikte sürtünme katsayısının düştüğü görülmektedir. Bunun muhtemel nedenleri şunlar olabilir; Kayma mesafesi arttıkça, yüzeyden kopan aşınma parçacıkları sürtünme yüzeyi üzerinde birikerek kaygan bir tabaka oluşturabilir. Bu tabaka, temas yüzeylerinin doğrudan temasını azaltarak sürtünme katsayısını düşürebilir. Veya kayma süresi uzadıkça, sürtünme nedeniyle yüzey sıcaklığı artabilir. Artan sıcaklık, malzeme yüzeyinde ince bir oksit tabakası oluşumuna neden olabilir, bu da kayganlık sağlayarak sürtünme katsayısını düşürebilir.

Şekil 7.7'de, en düşük sürtünme katsayısının 0,2 karbon içeren çelik malzemenin 9 N yük altında, 60 m/s kayma mesafesinde ve 450 m kayma mesafesinde yapılan aşınma deneyinde elde edileceği (A2B3C3D1) görülmektedir. Doğrulama deneyleri için belirlenen bu optimum deneme reçetesi doğrultusunda yapılan hesaplamalar sonucunda, sürtünme katsayısının S/N oranının 6.66 dB olması ve %95 güven düzeyi için 6.16 ile 7.17 dB arasında değişim göstermesi gerektiği hesaplanmıştır. Optimum deneme reçetesi şartlarında yapılan doğrulama deneyinde, ortalama sürtünme katsayısı 0.44 ve S/N oranının 7.13 dB olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler, tahmini güven aralığında yer aldığından, yapılan çalışmanın doğruluğu teyit edilmiştir.

Farklı deney şartlarında sürtünme katsayılarının belirlenmesine yönelik olarak aşağıda lineer regresyon denklemi sunulmuştur.

Regresyon Denklemi

Sürtünme katsayısı için;

$$S/N = 3.774 - 1.053 \text{ Carbon Content} + 0.2075 \text{ Yük (N)} + 0.002514 \text{ Mesafe (m)} - 0.00179 \text{ Hız}$$

Çizelge 7.3'de, aşınma deneyleri sonucunda elde edilen aşınma oranı sonuçları sunulmuştur. Çizelge 7.3'de, 18 farklı deney reçetesine bağlı olarak elde edilen aşınma oranı sonuçlarını, bu sonuçların ortalamasını ve en düşük en iyi kalite karakteristiğine göre hesaplanan S/N oranlarını içermektedir.

Çizelge 7.3, farklı karbon içeriğine sahip çeliklerin 3, 6 ve 9 N yük altında ve 150, 300 ve 450 m kayma mesafesinde ve 20, 40 ve 60 mm/s kayma hızında aşındırılması sonucunda elde edilen aşınma oranlarını göstermektedir. Çizelge incelendiğinde, çeliklerin karbon oranı, uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesine bağlı olarak aşınma oranlarında belirgin bir değişim gözlenmemektedir. Ancak Çizelgede aşınma oranlarının  $221 \times 10^{-6}$  ile  $42 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/m arasında değiştiği görülmektedir. En düşük ortalama aşınma oranı, %0.6 karbon içeren çelik malzemenin 6 N yük altında, 20 m/s kayma hızında ve 450 m kayma mesafesinde aşındırılması sonucunda (17. reçetede)  $56.07 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/m olarak belirlenmiştir. En yüksek ortalama aşınma oranı ise %0,1 karbon içeren çelik malzemenin 9 N yük altında, 60 m/s kayma hızında ve 450 m kayma mesafesinde aşındırılması neticesinde  $210,15 \times 10^{-6}$  mm<sup>3</sup>/m olarak tespit edilmiştir.

Taguchi yaklaşımına göre faktörlerin etkilerini belirlemek amacıyla, Çizelge 7.3’de hesaplanan aşınma oranlarının S/N oranları kullanılarak ANOVA Çizelgesi oluşturulmuştur. Elde edilen Çizelge istatistiksel olarak yorumlanarak, faktörlerin aşınma oranı üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Çizelge 7.4’de hazırlanan ANOVA Çizelgesi sunulmuştur.

**Çizelge 7.3 Aşınma Oranı Verileri.**

D.No.	Carbon Content	Yük (N)	Mesafe (m)	Hız (m/s)	Aşınma Oranı 1 ( $10^{-6}$ mm <sup>3</sup> /m)-1	Aşınma Oranı 2 ( $10^{-6}$ mm <sup>3</sup> /m)-2	Aşınma Oranı 3 ( $10^{-6}$ mm <sup>3</sup> /m)-3	S/N,dB	S. sapma	Ort.
1	0.1	3	150	20	73.75	119.17	114.58	-40.38	25.00	102.50
2	0.1	6	300	40	149.20	161.60	167.20	-44.06	9.21	159.33
3	0.1	9	450	60	211.56	197.89	221.00	-46.46	11.62	210.15
4	0.2	3	300	20	73.67	80.67	81.33	-37.91	4.25	78.56
5	0.2	6	450	40	80.00	91.11	81.11	-38.51	6.12	84.07
6	0.2	9	150	60	187.69	200.00	153.85	-45.18	23.90	180.51
7	0.3	3	150	40	86.00	83.33	96.67	-38.97	7.06	88.67
8	0.3	6	300	60	91.67	100.00	83.33	-39.27	8.33	91.67
9	0.3	9	450	20	115.11	151.51	93.33	-41.75	29.39	119.99
10	0.4	3	450	60	66.67	77.78	68.89	-37.06	5.88	71.11
11	0.4	6	150	20	100.00	83.33	100.00	-39.53	9.62	94.44
12	0.4	9	300	40	126.67	105.67	120.00	-41.42	10.73	117.44
13	0.5	3	450	40	58.89	62.44	65.33	-35.89	3.23	62.22
14	0.5	6	150	60	100.67	83.33	79.33	-38.92	11.34	87.78
15	0.5	9	300	20	107.67	122.33	105.33	-40.99	9.22	111.78
16	0.6	3	300	60	85.67	85.00	78.67	-38.40	3.86	83.11
17	0.6	6	450	20	42.00	64.00	62.22	-35.11	12.22	56.07
18	0.6	9	150	40	116.54	120.49	114.07	-41.37	3.24	117.04

ANOVA Çizelgesinde faktörlerin etkili olup olmadığı, P değerlerine bakılarak değerlendirilir. P değerinin 0.05’in altında olması, ilgili faktörün anlamlı bir etkisinin olduğunu gösterir. P değerinin 0.05 anlamlılık değerinin üzerinde olması ise faktörün anlamlı bir etkisinin olmadığını ifade eder. Çizelgedeki F değeri, faktörlerin etkisinin büyüklüğünü gösterir. F değerinin yüksek olması, faktörün etkisinin daha güçlü olduğu anlamına gelir.

Çizelge 7.4’de elde edilen ANOVA sonuçlarına göre, uygulanan yük faktörü,  $p = 0.001$  değeriyle aşınma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahiptir ve F değeri 27.59 ile diğer faktörlere kıyasla en güçlü etkiye sahip olduğu görülmektedir. Çeliklerdeki karbon oranı,  $p = 0.011$  değeriyle 0.05 anlamlılık seviyesinin altında olup aşınma oranı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunan ikinci en önemli faktördür ve F değeri 8.38’dir. Kayma mesafesi faktörü,  $p = 0.119$  ile 0.05 anlamlılık seviyesinin üzerinde olduğundan aşınma oranı üzerinde anlamlı bir etkisi

bulunmamaktadır. Benzer şekilde, kayma hızı faktörünün p değeri 0.134 olup 0.05 anlamlılık seviyesinin üzerinde kaldığından aşınma oranına etkisi istatistiksel olarak anlamlı değildir ve F değeri .,86 ile diğer faktörlere kıyasla en düşük etkiye sahiptir. Son olarak, hata terimi, birçok faktörden daha düşük olup modelin güvenilir sonuçlar verdiğini ve açıklanamayan değişkenliğin nispeten az olduğunu göstermektedir. Genel olarak, uygulanan yük faktörü aşınma oranı üzerinde en güçlü etkiye sahipken, karbon oranı ikinci derecede etkili olup, kayma mesafesi ve kayma hızının aşınma oranı üzerinde anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır.

Taguchi yaklaşımında, faktörlerin etkilerini grafiksel olarak göstermek ve en düşük aşınma oranını sağlayan deneme kombinasyonunu belirlemek için faktör etki grafikleri çizilir. Bu grafikler, her faktör seviyesinin etkisini görselleştirerek en uygun seviye kombinasyonunun belirlenmesine yardımcı olur.

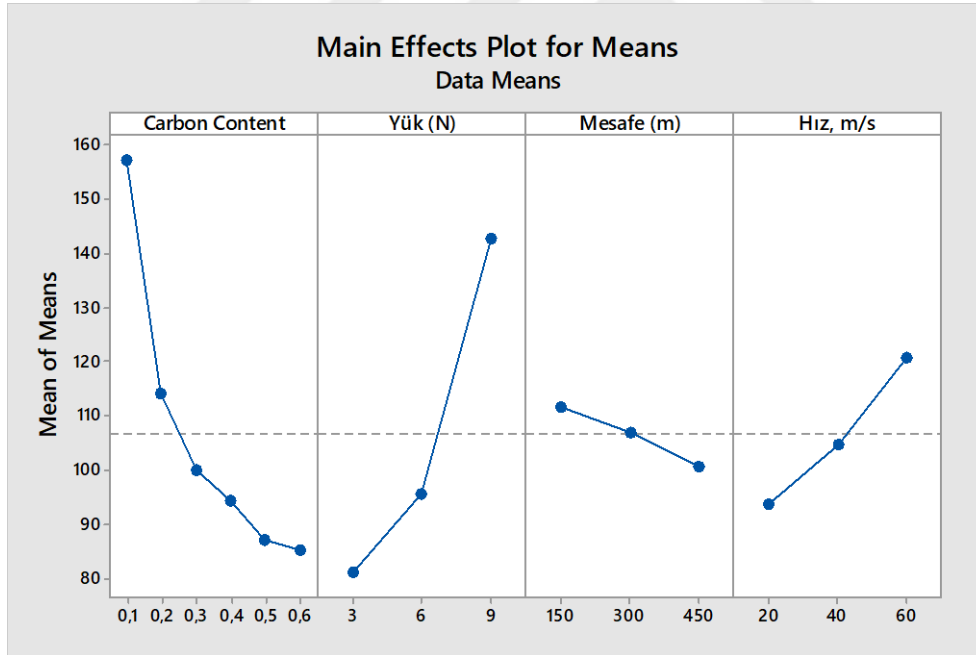
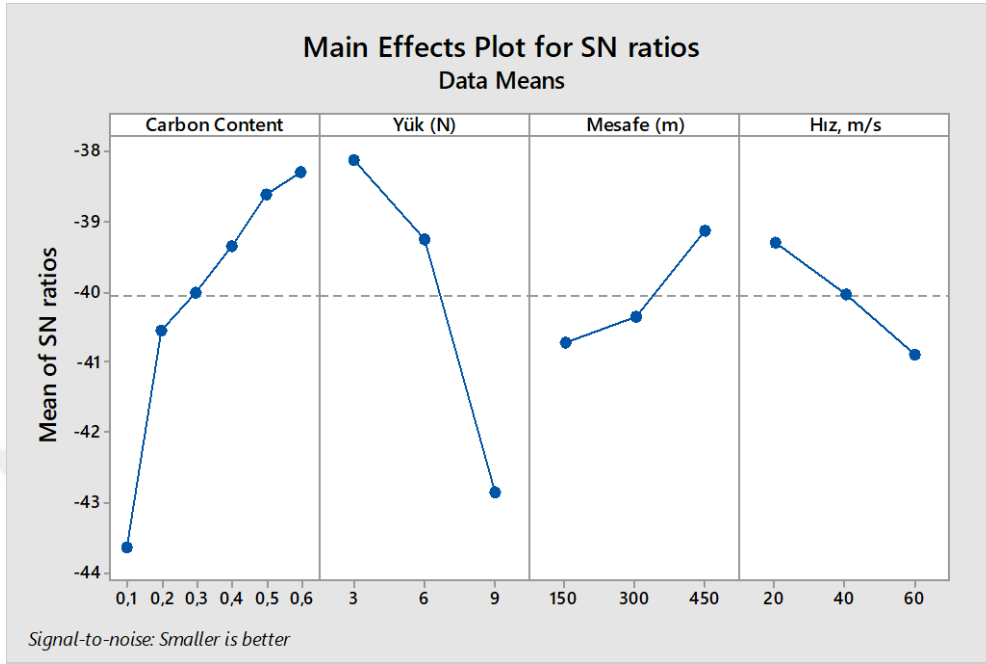
**Çizelge 7.4** Aşınma Oranı için Varyans Analiz Çizelgesi (ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Karbon Oranı	5	56.34	56.34	11.268	8.38	0.011
Yük (N)	2	74.2	74.2	37.1	27.59	0.001
Mesafe (m)	2	8.328	8.328	4.164	3.1	0.119
Hız (m/s)	2	7.692	7.692	3.846	2.86	0.134
Hata (Residual)	6	8.067	8.067	1.344	-	-
Toplam (Total)	17	154.626	-	-	-	-

Şekil 7.8’de aşınma oranı ve S/N oranı için çizilmiş faktörlerin grafiksel gösterimi verilmiştir. Grafikte, faktörlerin seviye değişimine bağlı olarak aşınma oranındaki ve S/N oranlarındaki değişim gözlemlenmektedir. Grafikte, çeliklerin içerdiği karbon miktarının artışına bağlı olarak aşınma oranındaki değişim incelendiğinde, artan karbon oranının çeliklerin aşınma oranını azalttığı görülmektedir. Yani, karbon miktarı arttıkça aşınma oranı düşmektedir. Bu durum, Şekil 7.8’de görüldüğü gibi karbonun çeliğin sertliğini artırarak aşınma direncini iyileştirmesinden kaynaklanabilir.

Şekil 7.8’de yük grafiğinde, artan yük ile birlikte aşınma oranının arttığı görülmektedir. Bu durum, aşınmanın doğal bir sonucudur. Artan yük, yüzeylerin birbirine daha fazla temas etmesine neden olarak yüzeydeki malzeme kaybını artırmış ve aşınma miktarının yükselmesine sebep olmuştur. Bir diğer sebepte yük arttığında sürtünme kuvveti de artar. Daha yüksek sürtünme, malzeme yüzeylerinden daha fazla parçacığın kopmasına yol açarak aşınmayı hızlandırır. Şekil 7.8’de, artan kayma mesafesi ile aşınma oranının azaldığı görülmektedir. Bu

azalmanın muhtemel nedenlerinden biri, yüzeyde oluşan oksit tabakasının koruyucu bir bariyer oluşturarak aşınmayı azaltması olduğu düşünülmektedir.



**Şekil 7.8** Aşınma Oranı İçin Çizilen Faktörlerin Etki Grafiği.

Şekil 7.8’de kayma hızının artması ile aşınma oranının arttığı görülmektedir. Bunun nedeni kayma hızının artışı daha fazla ısı üretimine, oksit tabakasının bozulmasına, malzemenin daha fazla deformasyona uğramasına ve aşınan parçacıkların aşındırıcı etki göstermesine neden olarak aşınma oranını artırmış olabilir. Taguchi yaklaşımına göre yapılan çalışmanın

doğruluğunu test etmek amacıyla doğrulama deneylerinin yapılması gereklidir. Doğrulama deneyinde, en düşük aşınma oranını veren deney reçetesi ele alınmaktadır. Bu reçete sonucunda elde edilecek tahmini aşınma oranı ile bu reçete dikkate alınarak yapılan gerçek deney sonucunun belirlenen bir güven aralığında olması beklenmektedir. Bu durum, Taguchi yöntemi ile belirlenen optimum parametrelerin doğruluğunu ve güvenilirliğini test etmek için kritik bir adımdır. Güven aralığının hesaplanmasında denklem 1-5 kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, Şekil 7.8'deki grafik dikkate alındığında, en düşük aşınma oranının A6B1C3D1 reçetesinde elde edileceği görülmektedir. Yani, 0.6 karbon içeren çelik malzemenin, 3 N yük altında, 450 m kayma mesafesinde ve 20 m/s kayma hızında en düşük aşınma oranına sahip olacağı görülmektedir. Belirlenen bu deney reçetesine göre tahmini S/N oranı aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmış ve ortalama -34.61 dB olması gerektiği, %95 güven düzeyi için ortalama -36.13 ile -33.09 dB arasında değişim göstermesi gerektiği hesaplanmıştır. Optimum deneme reçetesi şartlarında yapılan doğrulama deneyinde, ortalama aşınma oranı  $57.18 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{m}$  ve -35.14 dB olarak bulunmuştur. Elde edilen bu değerler, tahmini güven aralığında yer aldığından, yapılan çalışmanın doğruluğu teyit edilmiştir.

$$\text{Denklem 15. } \mu = \overline{A6} + \overline{B1} + \overline{C3} + \overline{D1} - \overline{4T} \quad (7.1)$$

$$\text{Denklem 16. } IC = \sqrt{\frac{F_f V_e}{n}} \quad (7.2)$$

$$\text{Denklem 17. } \mu - IC \leq \mu \leq IC + \mu \quad (7.3)$$

Ayrıca, farklı deney şartlarında aşınma oranını belirlemek için elde edilmiş lineer reglasyon denklemi aşağıda sunulmuştur. Bu denklem kullanılarak, çelik içeriğindeki karbon oranı ve farklı aşınma koşulları altında aşınma oranları belirlenebilmektedir.

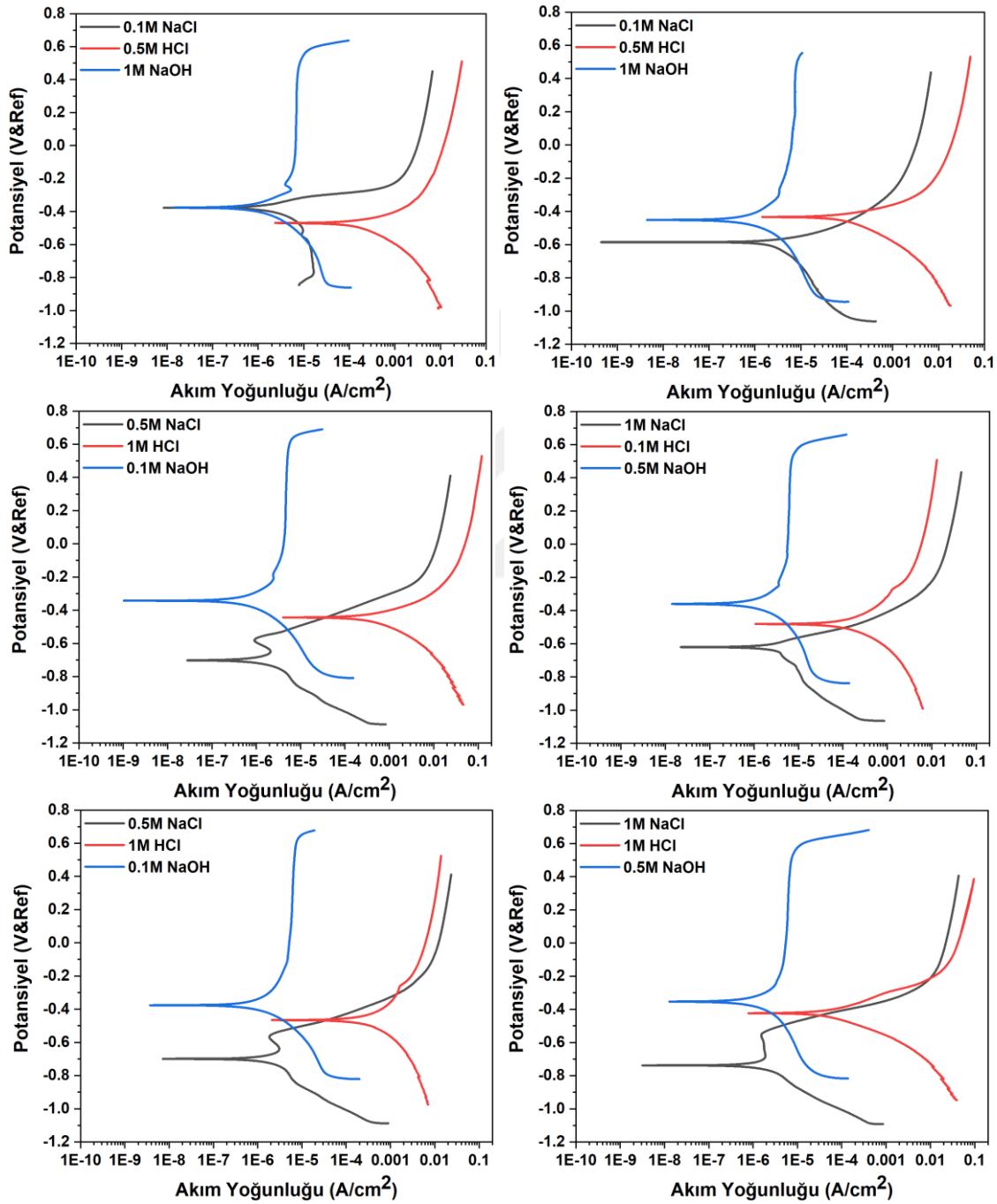
Regresyon Denklemi

Aşınma oranları için  $S/N = SNRA2 = -38.62 + 9.48 \text{ Carbon Content} - 0.793 \text{ Yük (N)} + 0.00532 \text{ Mesafe (m)} - 0.0400 \text{ Hız, m/s}$

### 7.1.3 Korozyon Davranışı

Şekil 7.9'da korozyon testleri sonucu elde edilen Tafel eğrileri verilmiştir. Grafiklerde korozyon testlerinde kullanılan çözeltilerin Tafel eğrileri üzerinde önemli değişikliklere neden

olduğu anlaşılmaktadır. Korozyon testlerinde kullanılan NaCl ve HCl asidik karakterlidir ve pH seviyeleri sırasıyla 7 ve 3 civarındadır. NaOH ise bazik karakterli bir çözelti olup pH 13 civarındadır. Eğrilere göre korozyon potansiyelleri çözeltinin çeşidi veya derişimine göre değişmeği görölmektedir. Fakat genel olarak bütün numunelerde NaOH çözeltisi içerisinde gerçekleştirilen testlerde korozyon potansiyelleri daha pozitif söylenebilir.



Şekil 7.9 Tafel Grafiği.

Tez kapsamında korozyon testleri altı farklı karbon oranına sahip çelik malzemeler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Testler, 0.1 M, 0.5 M ve 1 M molalardaki NaCl, HCl ve NaOH çözeltileri içinde uygulanmıştır. Taguchi yaklaşımı kullanılarak 18 farklı deney reçetesi belirlenmiş ve deneyler Çizelge 7.5’de gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Testler sonrasında, faktörlerin etkisini belirlemek amacıyla korozyon hızları Taguchi yaklaşımına göre "en düşük en iyidir" karakteristiğine göre S/N oranları hesaplanmıştır. Bu analiz, farklı faktör seviyelerinin korozyon üzerindeki etkisini daha iyi anlamak ve en uygun parametreleri belirlemek için gerçekleştirilmiştir. Çizelge 7.5 incelendiğinde, genel olarak NaOH ve NaCl çözeltilerine kıyasla HCl çözeltisi içinde çelik malzemelerin daha düşük korozyon direnci gösterdiği dikkat çekmektedir. En yüksek korozyon hızı, 0.3 karbon içeren çelik malzemenin 1 M’lık HCl çözeltisi içinde 520,895 mpy olarak ölçülmüştür. En düşük korozyon hızı ise 0.3 karbonlu çelik malzemenin 0.1 M’lık NaCl çözeltisi içinde 0.485 mpy olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre kabaca HCl çözeltisinin çelik üzerinde daha agresif bir korozyon etkisi yarattığını göstermektedir.

**Çizelge 7.5 Tafel Test Sonucunda Elde Edilen Korozyon Verileri.**

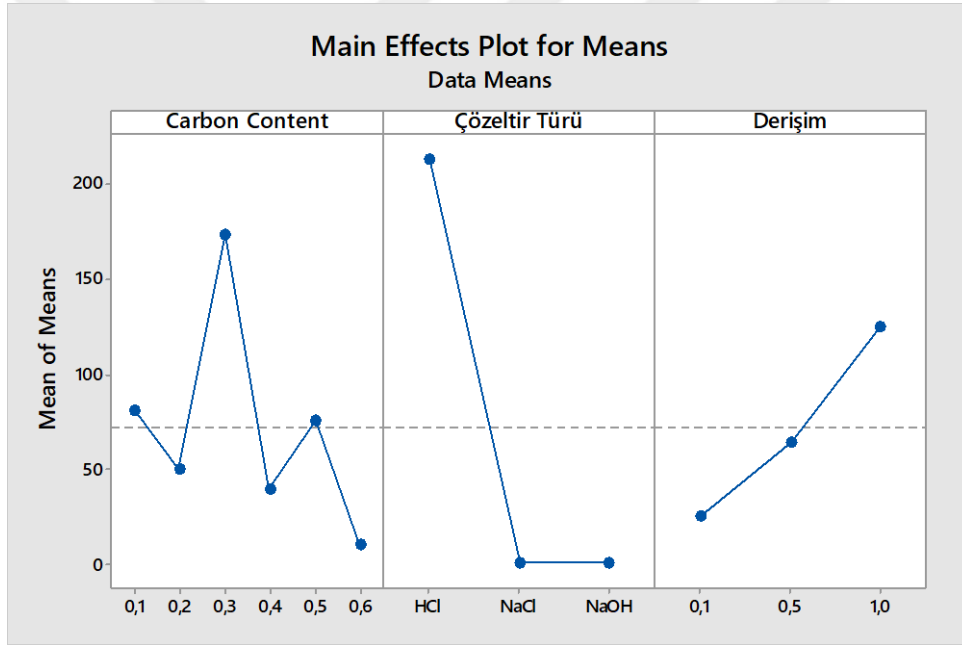
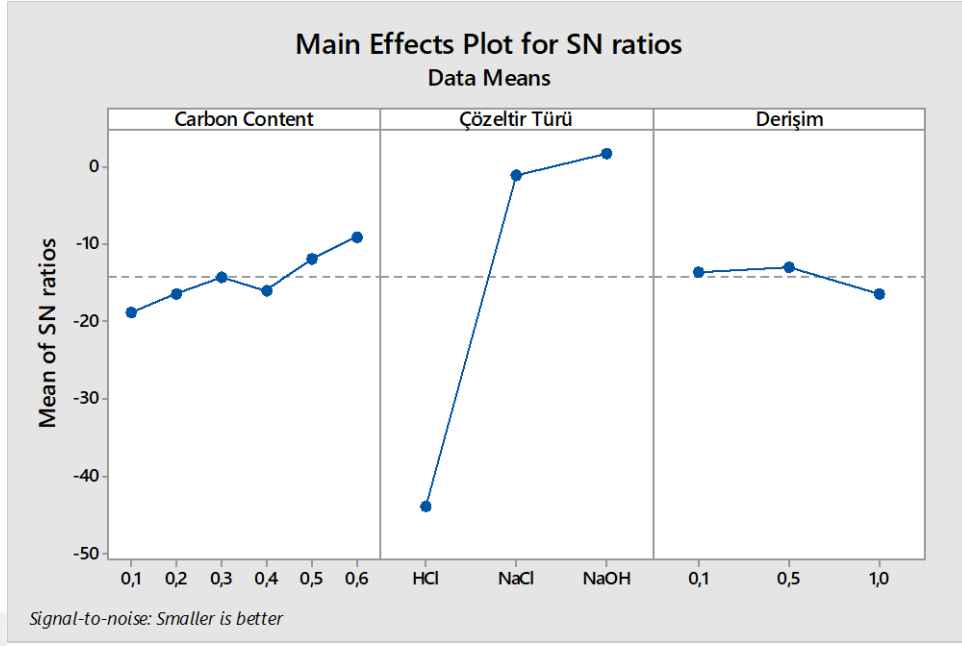
D. No	C İçeriği	Çözelti	Konsantrasyon	Ecor (mV)	Icor ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	KH (mpy)	SNRA1
1	0.1	NaCl	0.1	-375.643	5.374	3.113	-9.86358
2	0.1	HCl	0.5	-469.817	413.09	239.361	-47.5811
3	0.1	NaOH	1	-373.384	1.546	0.895	0.963539
4	0.2	NaCl	0.1	-583.514	5.057	2.938	-9.36104
5	0.2	HCl	0.5	-433.444	252.858	146.942	-43.3429
6	0.2	NaOH	1	-449.447	1.152	0.669	3.491478
7	0.3	NaCl	0.5	-701.011	0.977	0.561	5.020743
8	0.3	HCl	1	-441.275	906.792	520.895	-54.335
9	0.3	NaOH	0.1	-340.959	0.846	0.485	6.285165
10	0.4	NaCl	1	-620	3.358	1.921	-5.67055
11	0.4	HCl	0.1	-480.39	202.025	115.626	-41.2611
12	0.4	NaOH	0.5	-360.322	1.963	1.127	-1.03848
13	0.5	NaCl	0.5	-698.308	0.599	0.342	9.319478
14	0.5	HCl	1	-463.692	397.62	226.519	-47.1021
15	0.5	NaOH	0.1	-374.25	1.406	0.803	1.905689
16	0.6	NaCl	1	-737.457	1.184	0.674	3.426802
17	0.6	HCl	0.1	-421.7	55.784	31.886	-30.072
18	0.6	NaOH	0.5	-352.642	1.912	1.089	-0.74056

Çizelge 7.6’da korozyon hızı üzerinde etkili olan faktörlerin istatistiksel analiz sonuçlarını göstermektedir. Sonuçlara göre, karbon içeriği, çözelti türü ve çözelti derişimi gibi faktörlerin korozyon hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İlk olarak, karbon oranı ile korozyon hızı arasındaki ilişki incelendiğinde, F değeri 0.6 ve P değeri 0.704 bulunmuştur. Bu sonuçlar, karbon içeriğinin korozyon hızı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi olmadığını göstermektedir. Yani karbon oranındaki değişiklikler, korozyon hızını belirgin şekilde etkilememektedir. Diğer bir faktör olan çözelti türü, korozyon hızı üzerinde çok güçlü bir etkiye sahiptir. F değeri 65.35 ve P değeri 0.00001 olarak bulunmuş olup,  $P < 0.05$  olması nedeniyle çözelti türünün korozyon hızına etkisi istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu durum, farklı çözeltilerin (HCl, NaCl, NaOH) çelik malzemelerin korozyon hızları üzerinde farklı derecelerde etkili olduğunu ortaya koymaktadır. Derişim (kontrasyon) faktörü ise korozyon hızı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip değildir. F değeri 0.34 ve P değeri 0.722 olan bu faktör, çözelti konsantrasyonunun korozyon hızı üzerinde önemli bir fark yaratmadığını göstermektedir. Son olarak, hata terimi (Residual Error) incelendiğinde, 481.26 değerinde kalmış olup, bu da modelin deney sonuçlarını açıklamada kısmi olarak başarılı olduğunu göstermektedir. Ancak, karbon oranı ve çözelti derişiminin korozyon hızı üzerinde anlamlı bir etki yaratmaması, bu faktörlerin korozyon hızındaki derişimi pek fazla etkilemediğini ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, korozyon hızını en çok etkileyen faktörün çözelti türü olduğu söylenebilir. Karbon oranı ve derişimin korozyon hızına etkisi istatistiksel olarak anlamlı olmamakla birlikte, çözelti türünün seçimi korozyon hızını önemli derecede etkilemektedir. Bu bulgular, çeliğin korozyon dayanımını artırmak için en uygun çözeltinin seçilmesinin kritik bir faktör olduğunu vurgulamaktadır.

**Çizelge 7.6** Korozyon Hızı (Cr) İçin Varyans Analiz Çizelgesi (ANOVA).

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Karbon İçeriği	5	179.65	179.65	35.93	0.6	0.704
Çözelti Türü	2	7862.98	7862.98	3931.49	65.35	0.00001
Derişim	2	40.86	40.86	20.43	0.34	0.722
Residual Error	8	481.26	481.26	60.16		
<b>Total</b>	17	8564.76				

Şekil 7.4’de, korozyon hızı üzerinde etkili olan faktörlerin grafiksel gösterimi sunulmuştur. Bu grafik, her bir faktörün korozyon hızı üzerindeki etkisini görsel olarak analiz etmeyi sağlar. Grafik, karbon oranı, çözelti türü ve derişim gibi faktörlerin korozyon hızına olan etkilerini açıkça ortaya koymaktadır. Grafiklerde çelik içerisindeki karbon oranına bakıldığında, azda olsa artan karbon oranının çeliğin korozyon hızını azalttığı görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni, yüksek karbon içeriğinin çeliğin yüzeyinde daha kararlı bir pasivasyon tabakasının oluşmasına yardımcı olmasıdır. Bu pasifleşmiş yüzey, metalin oksitlenmesini ve daha fazla korozyon yaşamasını engelleyebilir. Ayrıca, yüksek karbon içeriği çeliğin mikro yapısında sementit gibi karbürlerin oluşmasına yol açabilir. Bu karbürler, çeliğin yüzeyinde daha stabil fazlar oluşturarak korozyonun ilerlemesini engelleyebilir. Grafikte, korozyon hızı üzerinde en etkili faktör olan çözelti türüne bakıldığında, HCl çözeltisi içerisinde çeliklerin korozyon hızının NaCl ve NaOH çözeltilerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni, HCl çözeltisinin asidik yapısı, hidrojen iyonlarının konsantrasyonunu yüksekliği için metal yüzeyindeki pasifleşmiş tabakaları çözme yeteneği oluşturarak, çeliğin korozyon hızının NaCl ve NaOH çözeltilerine kıyasla artmasına neden olmaktadır.



**Şekil 7.10** Korozyon Hızı İçin Çizilen Faktörlerin Etki Grafiği.

Şekil 7.10'da çözelti derişim oranının korozyon üzerindeki etkisine bakıldığında, derişim oranı arttıkça korozyon hızının da arttığı görülmektedir. Bunun muhtemel nedeni, daha yüksek derişime sahip çözeltilerin metal yüzeyinde daha agresif bir kimyasal etkileşim oluşturmasıdır. Birçok kaynaklarda da belirtildiği gibi, özellikle asidik ve tuzlu çözeltilerde, iyon konsantrasyonunun artması, metalin çözünme sürecini hızlandırarak korozyon hızını artırmaktadır.

Yapılan doğrulama sonucunda, A6B3C2 optimum deneme reçetesine göre tahmini korozyon hızı için ortalama 8.51 dB, tahmini güven aralığının ise -0.95 ile 17.96 dB arasında değişeceği belirlenmiştir. Belirlenen optimum deneme, Çizelge 10'da 18. denemede yer almakta olup, bu denemedeki S/N oranı -0.74056 dB olarak bulunmuştur. Elde edilen değer, belirlenen güven aralığı içinde yer aldığından, yapılan deneylerin doğruluğu teyit edilmiştir.

### Regresyon Denklemi

#### Çözelti Tipi

HCl için  $S/N = -48.22 + 17.19 \text{ Karbon oranı, \%} - 3.28 \text{ Çözelti Derişimi, M}$

NaCl için  $S/N = -5.46 + 17.19 \text{ Karbon oranı, \%} - 3.28 \text{ Çözelti Derişimi, M}$

NaOH için  $S/N = -2.46 + 17.19 \text{ Karbon oranı, \%} - 3.28 \text{ Çözelti Derişimi, M}$

Yukarıda çelik malzemelerin farklı çözelti türleri içerisinde korozyon hızını belirlemek için oluşturulmuş lineer regresyon denklemleri sunulmuştur.

## 7.2. SONUÇLAR

Bu çalışmada farklı karbon içeriğine sahip SAE 10XX (XX= 10, 20, 30, 40, 50 ve 60) çeliklerin mikroyapı özellikleri incelenmiş ve sertlik, aşınma ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ayrıca aşınma ve korozyon testleri için Taguchi yöntemi kullanılarak farklı aşınma ve korozyon test parametrelerine ile L18 ortogonal dizisi kullanılarak bir tasarım deney tasarımı gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen bulgular şu şekildedir;

- 1) Farklı karbon içeriğine sahip çeliklerin mikroyapılarının  $\alpha$ -Fe fazı ve perlit ( $\alpha$ -Fe+Fe<sub>3</sub>C) yapılarından oluştuğu ve artan karbon miktarına bağlı olarak çelik mikroyapısında perlit miktarı arttığı tespit edilmiştir.
- 2) Çelik mikroyapısındaki artan perlit miktarına bağlı olarak sertlikte artış gözlemlenmiştir. Çalışmada en düşük sertlik değeri SAE 1010 çeliğinde 111.6 HB ve en yüksek sertlik değeri SAE 1060 çeliğinde 162.1 HB olarak ölçülmüştür.
- 3) ANOVA sonuçlarına göre, uygulanan yük faktörü ( $p = 0,001$ ,  $F = 27,59$ ) aşınma oranı üzerinde en güçlü etkiye sahip faktördür. Çeliklerdeki karbon oranı ( $p = 0,011$ ,  $F = 8,38$ ) ise ikinci önemli faktör olup, aşınma oranını istatistiksel olarak anlamlı şekilde etkilemektedir. Kayma mesafesi ( $p = 0,119$ ) ve kayma hızı ( $p = 0,134$ ) ise 0,05 anlamlılık seviyesinin üzerinde kaldığından, aşınma oranı üzerinde anlamlı bir etkileri bulunmamaktadır.

- 4) Aşınma deneyleri sonucunda ANOVA analizlerine göre sürtünme katsayısı üzerine, yük (N) faktörü,  $p = 0,004$  ve  $F = 15,53$  ile sürtünme katsayısı üzerinde en güçlü etkiye sahip değişken olarak belirlenmiştir. Yük arttıkça sürtünme katsayısı da önemli ölçüde yükselmektedir. Mesafe (m) faktörü,  $p = 0,039$  ve  $F = 5,87$  ile istatistiksel olarak anlamlı bir etkiye sahip, ancak yük faktörüne kıyasla daha az etkilidir. Karbon içeriği ( $p = 0,9$ ) ve kayma hızı ( $p = 0,52$ ) faktörlerinin sürtünme katsayısı üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir etkisi bulunmamaktadır. Yapılan doğrulama deneyi neticesinde en düşük sürtünme katsayısı, 0,2 karbon içeren çelik malzemenin 9 N yük altında, 60 m/s kayma mesafesinde ve 450 m kayma mesafesinde yapılan aşınma testi sonucunda 0,44 olarak tespit edilmiştir.
- 5) Aşınma deney sonuçlarına göre en düşük ortalama aşınma oranı, %0,6 karbon içeren çelik malzemenin 6 N yük altında, 20 m/s kayma hızında ve 450 m kayma mesafesinde gerçekleştirilen test sonucunda (17. reçetede)  $56,07 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$  olarak belirlenmiştir. En yüksek ortalama aşınma oranı ise %0,1 karbon içeren çelik malzemenin 9 N yük altında, 60 m/s kayma hızında ve 450 m kayma mesafesinde aşındırılması neticesinde  $210,15 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{m}$  olarak tespit edilmiştir. Yapılan doğrulama deneyleri sonucunda en düşük aşınma oranı, A6B1C3D1 reçetesinde 0,6 karbon içeren çelik malzemenin, 3 N yük altında 20 m/s kayma hızında ve 450 m kayma mesafesinde aşındırılması neticesinde elde edileceği görülmüştür.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Chandraker S and Kosaraju S** (2015) Taguchi Analysis on Cutting Force and Surface Roughness in Turning MDN350 Steel. *ScienceDirect* 2(4-5): 3388-3393.
- Charre M** (2004) *Microstructure of Steels and Cast Irons*. 1st edition, ISBN-10: 3540209638, Springer Yayınevi, Heidelberg, 418 p.
- Chen X, R Zhai Q J, Dong H, Hua Dai B and Mohrbacher H** (2019) Molybdenum Alloying In Cast Iron And Steel. *Advances in Manufacturing*. 8: 3-14.
- Clover D, Kinsella B, Pejčić B and De Marco R.** (2005) The influence of microstructure on the corrosion rate of various carbon steels. *Journal of Applied Electrochemistry*. 35: 139-149.
- Coşkun S** (2011) Üniform Korozyona Maruz Betonarme Binalarda Deprem Davranışının İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, 134 s.
- Çakır M C** (2018) *Modern Talaşlı İmalatın Esasları*. 3, ISBN: 9786052470053, Dora Yayıncılık, Bursa, 305 pp/s.
- Çalık A, Düzgün A, Şahin O ve Uçar N** (2014) Effect of Carbon Content on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steels. Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi, 65(5): 468-472
- Çiçek E** (2009) Karbon Oranının Alaşımız Çelik Filmaşınlerden Elde Edilen Tel Ürünlerin Performansına Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli, 77 s.
- Çınar M T** (2023) Aşınmaya Dayanıklı Zırh Çelikleri İle Yapı Çeliklerinin Mag Kaynağı İle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Karabük, 122s.
- Das P Mukherjee S, Ganguly S, Bhattacharyay B and Datta S** (2009) Genetic algorithm based optimization for multi-physical properties of HSLA steel through hybridization of neural network and desirability function. *Computational Materials Science*. 45(1): 104 - 110.
- Dwivedi D, Lepkova K and Becker T** (2017 ) Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. *Royal Society Of Chemistry*. 7: 4580-4610.
- Dwivedi K and Menghani J** (2016) Effect Of Molybdenum Addition On Microstructure And Mechanical Properties Of Plain Carbon Steel Weld. *Metallurgical and Materials Engineering*. 22(4): 269-284.
- Ebnesajjad S** (2014) *Corrosion Control in the Oil and Gas Industry*. 1 st edition, Hardback eBook ISBN: 9780123973061, Elsevier Publishing House, Waltham Massachusetts, Amerika Birleşik Devletleri, 1020 p.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ekinci C** (2011) Düşük Karbonlu Mikro Alaşımli Çeliklerin Sertlik Ve Mikro Yapıları Üzerine Soğuma Hızının Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, Isparta, 54 s.
- Elal İ** (1994) Östenitik Paslanmaz Çeliklerde Tanelerarası Korozyonun Çekme Dayanımına Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 36s.
- Erdem S** (2006) Yüksek Karbon İçeriğine Sahip, Yüksek Kromlu, Manganlı Ve Alaşımısız Düşük Karbonlu Çeliklerin Aşınma Davranışlarının Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Ana Bilim Dalı, Elazığ, 83 s.
- Erdemir H** (2017) Plakalı Eşanjörlerde Gerilmeli Korozyon Çatlağının İncelenmesi Ve Bunun İç Test Düzenine Hazırlanması. *Yüksek Lisans Tezi*, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İzmir, 128s.
- Erden M A, Barlak S, Adalı B ve Çelikkıran Ö** (2018) Toz Metalurjisi İle Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Vanadyum İlavesinin Mikroyapı Mekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*. 6(3): 629-636.
- Erdoğan M** (1998) *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*. 1, ISBN numarası 975-591-040-9, Nobel Yayın Dağıtımı, Ankara, 1020 pp/s
- Fıçıcı F, Kapsız M and Durat M** (2011) Applications of taguchi design method to study wear behaviour of boronized AISI 1040 steel. *International Journal of the Physical Sciences*. 6(2): 237 - 243.
- Fomichov S, Linyucheva O, Vasyliiev G, and Chvertko Y** (2024) *Types of Corrosion*. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering, 49: 222
- Fontalvo G and Mitterer C** (2005) The Effect Of Oxide-Forming Alloying Elements On The High Temperature Wear Of A Hot Work Steel. *Wear*. 258(10): 1491-1499.
- Gandy D** (2007) Carbon Steel Handbook. Electric Power Research Institute, California, A.B.D, (e-book), 1-172 pp/s.
- Gao Y, Xue X and Yang H** (2015) Effect of Boron Concentration on Dynamic Recrystallization Behavior of Low-Carbon Steel. *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)*. 28(7): 931 - 939.
- Geçgel B** (2024) Manganez Bronz Alaşımına İlave Edilen Al5ti1b Tane İnceltici Ve Nano Tib2 Toz Katkılı Tane İncelticilerin Alaşımın Mikroyapı, Mekanik Ve Korozyon Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nanoteknoloji Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Zonguldak, 91 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Geçgel B, Kocaman E, Altıntaş Y, Koçar O, Çelen Ö, Köklü U ve Yasir A M** (2023) AlSi6, AlSi12 ve AlSi18 Alaşımlarında Silisyumun İşlenebilirliğe Etkisi. *Effect of Silicon on Machinability*. 16(4): 1467-1479.
- Geveci A, Keskinliç E, ve Topkaya Y** (2006) Pota Fırını Curuflarının Kükürt Giderme Davranışlarının İncelenmesi. 13. *Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, Kasım 2006*, İstanbul, 1-9.
- Gündoğdu A S** (2012) Yüksek frekanslı indüksiyon kaynağı yöntemiyle üretilen boyuna dikişli çelik borularda kullanılan mikro alaşımlı malzemelerin kaynak zayıflığının azaltılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 139 s.
- Güneş T** (2018) Silisyum alaşımlı çeliklerde indüklenen anizotropinin manyetik domain yapısına göre incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 20(2): 508 - 519.
- Gür A** (2009) Plazma (PTA) yöntemiyle düşük karbonlu çeliğin yüzey modifikasyonuna koruyucu gazların etkisi. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Ana Bilim Dalı, Elazığ, 277 s.
- Gürgeç T** (2017) AISI 1020 Çeliğinin Plazma Transfer Ark Yöntemi İle Alaşımlandırılmasında Bor Katkısının Yüzey Özellikleri Üzerine Etkisi. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elazığ, 331 s.
- Godefroid B, Souza L T and Pinto A** (2020) Fracture toughness, fatigue crack resistance and wear resistance of two railroad steels. *Journal Of Metarials Research and Teknology*. 9(5): 9588-9597.
- Hayat F** (2010) Trıp Çeliklerinin Otomotiv Endüstrisinde Kullanımının İncelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*. 25(4): 701-712.
- Hernadewita, Rochmad, Hendra and Hermiyetti** (2019) An Analysis of Implementation of Taguchi Method to Improve Pro-duction of Pulp on Hydrapulper Milling. *International Journal of Production Management and Engineering*. 7(2): 125
- Singh R, James J and Boyer L (2020) *Applied Welding Engineering*. 3, ISBN: 9780128213483, Butterworth-Heinemann, New Jersey, Amerika Birleşik Devletleri, 442 pp/s.
- Jenicek S, Vorel I, Kana J, Opatova K, Rubesova K, Kotesovec V, and Masek B** (2017) Evolution Of Microstructure And Mechanical Properties During Q&P Processing Of Medium-Carbon Steels With Different Silicon Levels. *Materials Science and Engineering, Chemnitz Seminar on Materials Engineering*, Chicago, 1-6.
- Jönsson P, Samuelsson P and Wei W** (2023) Alloy Design Optimization of Stainless Steel's Performance and Environmental Impact Through Taguchi-Based Grey Relational Analysis. *WileyOnlineLibrary*. 95(3): 1-20

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Kaftan M A** (2006) Çelik Yapılarda Korozyon Oluşumu Ve Korozyondan Korunma Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Denizli, 106 s.
- Kara M K** (2014) Sürekli Tavlama Yöntemi İle Yeni Kalite Bir Emaye Çeliği Üretimi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 179 s.
- Keleştemur H** (1989) Makine yapı çeliklerinin abrasiv aşınma direncine yüzey sertliğinin etkisi ve diğer mekanik özelliklerle etkisinin araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Elazığ, 120 s.
- Khorsand H, Habibi S, Yoozbashizadea H, Janghorban K, Reihani S, Seraji H and Ashtari M** (2002) The Role Of Heat Treatment On Wear Behavior Of Powder Metallurgy Low Alloy Steels. *Materials & Design*. 23(7): 667-670.
- Kılıçay K** (2012) AISI 1020 Çeliğinin Frezelenmesinde Katı Yağlayıcı Kullanımının Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir, 111 s.
- Kılınc B, Kocaman E, Şen Ş and Şen U** (2021) Effect Of Vanadium Content On The Microstructure And Wear Behavior Of Fe(13-X)Vxb7 (X = 0–5) Based Hard Surface Alloy Layers. *Materials Characterization*. 179: 1-9
- Kınıkoğlu N** (2010) *Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi*. 1, ISBN: 9789755114545, Birsen Yayınevi, İstanbul, 281 pp/s.
- Kocaman E** (2020) Fe-Cr-Ti-B Esaslı İN-SİTU Kompozit Sert Yüzey Alaşımlama Elektrotlarının Geliştirilmesi. *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya, 225 s.
- Kocaman E, Kılınc B, Durmaz M, Şen Ş and Şen U** (2021) The Influence Of Chromium Content On Wear And Corrosion Behavior Of Surface Alloyed Steel With Fe(16–X)Cr(B,C)4 Electrode. *Engineering Science and Technology an International Journal*. 24(2): 553-542.
- Kocaman E, Şirin S, ve Dispınar D** (2021) AlSi10Mg Alaşımında Tane İnceltme Performansının Yapay Sinir Ağı Modellemesi. *International Journal of Metalcasting*. 15: 338 - 348.
- Kumar Karna S and Sahai R** (2012) An Overview on Taguchi Method. *International Journal of Engineering and Mathematical Sciences*. 1: 11-18.
- Kuzuyaka M S** (2014) Yüksek Karbonlu Bir Çeliğin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerine İzotermal Tavlamanın Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 61 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Modi O, Mondal D, Prasad B, Singh M and Khaira H** (2003) Abrasive wear behaviour of a high carbon steel: effects of microstructure and experimental parameters and correlation with mechanical properties. *Materials Science and Engineering:A*. 343(1-2): 235-242.
- Mohrbacher H** (2010) Principal effects of Mo in HSLA steels and cross effects with microalloying elements. *International Seminar in Applications of Mo in Steels, 28 Jun 2010*, Beijing China, 1-18.
- Moshkovich A and Rapoport L** (2023) The Effect Of The Structural Parameters On The Friction And Wear Properties Of Some FCC Metals. *Journal of Materials Research and Technology*. 24: 3913-3924.
- Muratoğlu M** (1997) SiC katkılı 2124 alüminyum kompoziti ve yaşlandırılmış kompozitin aşınma davranışlarının araştırılması. *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Ana Bilim Dalı, Elazığ, 181 s.
- Nam W J, Sim H J and Lee Y B** (2004) Ductility of hypo-eutectoid steels with ferrite-pearlite structures. *Journal of Materials Science*. 39: 1849-1851
- Noor Mazni I, Kecik M, Khatif N and Shaharudin M** (2016) The Effect Of Heat Treatment On The Hardness And Impact Properties Of Medium Carbon Steel. *Materials Science and Engineering*. 114(1): 1-6
- Okur E ve Atlas M** (2020) Araç Rotalama Probleminin Genetik Algoritma ile Çözümü. *Anadolu Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*. 20(3): 227-254.
- Onaran K** (2006) *Malzeme Bilimi*. 12, ISBN-13: 978-975-540-017-2 , Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul, 383 pp/s.
- Ovaloğlu R** (1969) Marin Sedimanter Demir Yataklarının Önemi ve Jönezleri Hakkında Yeni Düşünceler. *Bilimsel Madencilik Dergisi*. 8(3): 0-0
- Özay Ç** (2004) TM yöntemiyle üretilen Cu-C-Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> kompozitinin abrasiv aşınma dayanımının araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Ana Bilim Dalı, Elazığ, 88 s.
- Özek F** (1993) Çelikte metalik olmayan kalıntıların oluşumu, etkileri ve mikroskopik yöntemlerle değerlendirilmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi Ana Bilim Dalı, İstanbul, 99 s.
- Özgün Ö** (2007) Toz Metalurjisi İle Üretilen Alaşımli Çeliklerin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, Sakarya, 155 s.
- Parlar Z** (2002) Poliamid Malzemelerin Sürtünme ve Aşınma Karakteristiğine Sıcaklığın Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Doktora Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrüksiyon Ana Bilim Dalı, İstanbul, 140 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Ping Ji Y, Wu S, Xu L, Li Y and Wei S** (2012) Effect Of Carbon Contents On Dry Sliding Wear Behavior Of High Vanadium High Speed Steel. *Wear*. 294-295: 239-245.
- Propst A, Lochnar R and Matar J** (1992) *Designing for Quality, an Introduction to the Best of Taguchi and Western Methods of Statistical Experimental Design. 1*, ISBN: 0412400200, Springer Publishing House, NewYork, 253 pp/s.
- Rao Sreenivas R, Ganesh Kumar C, Prakasham R and Hobbs P** (2008) The Taguchi Methodology As A Statistical Tool For Biotechnological Applications:A Critical Appraisal. *Biotechnology Journal*. 3(4): 510-523.
- Rao S R and Padmanabhan G** (2012) Application of Taguchi methods and ANOVA in optimization of process parameters for metal removal rate in electrochemical machining of Al/5%SiC composites. *International Journal of Engineering Research and Applications*. 2(3): 192-197.
- Rosa Luiz J, Robin Alain, Silva M B and Pedro M** (2009) Electrodeposition of copper on titanium wires: Taguchi experimental design approach. *Journal of Materials Processing Technology*. 209: 1181-1188.
- Santofimia M, Zhao L, Petrov R and Sietsma J** (2008) Characterization of the microstructure obtained by the quenching and partitioning process in a low-carbon steel. *Materials Characterization*. 59(12): 1758-1764.
- Savaş Ö** (2010) Alüminyum Esaslı İn-Situ Borür Takviyeli Kompozitlerin Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, Sakarya, 234 s.
- Selden P** (1997) *Sales Process Engineering: A Personal Workshop*. 1, ISBN-10: 0412400200, ASQ Quality Press, Milwaukee Wisconsin A.B.D, 310 pp/s.
- Senthilkumar T and Ajiboye T** (2012) Effect of Heat Treatment Processes on the Mechanical Properties of Medium Carbon Steel. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*. 11(2): 143-152.
- Serindağ T, Tardu C, Kırçıçek İ Ö ve Çam G** (2022) Gaz Tungsten Ark Kaynaklı 9Ni Kriyojenik Çelik Bağlantının İyapı ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. *Mühendis ve Makine*. 63(706): 117-137.
- Sert B** (2012) Ferritik Çeliklerde Karbon Oranının Kırılma Tokluğuna Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metal Eğitimi Ana Bilim Dalı, Afyon, 52 s.
- Sharov B and Zikeev V** (1977) Effect Of Cobalt On The Structure And Properties Of Steel 18Kh2N4MA. *Metal Science and Heat Treatment* 19: 265-268.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Shennawy M, Farahat A, Masoud M and Abdel-Aziz A I** (2016) Effect of Boron Content on Metallurgical and Mechanical Characteristics of Low Carbon Steel. *International Journal of Mechanical Engineering*. 5(2): 1-14.
- Shinyar M, Hussein A and K Abbas L** (2021) A Desirability Function for Evaluation of Corrosion Behavior for Nanocoated- Steel Using Electroless Technique. *Engineering and Technology Journal*. 39(6): 946-955.
- Singh R** (2020) *Applied Welding Engineering Processes, Codes, and Standards*. 1, ISBN-10: 0-12-821348-2, CRC Press, Florida Boca Raton ABD, 442 pp/s.
- Song Y, Shan D, Chen R and Han E H** (2009) Corrosion characterization of Mg–8Li alloy in NaCl solution. *Corrosion Science*. 51(5):1087-1094.
- Stefanescu D** (1991) *Properties and Selection Irons, Steels and High-Performance Alloy*. 10, ISBN-10: 0871703777 ASM Metals Handbook, Cleveland Ohio ABD, 1521 pp/s.
- Şahin M** (2020) CaD-Cam Frezeleme ve Lazer Sinterleme Teknikleri İle Üretilen Titanyum ve CO-CR Alaşımlarının Korozyon, İyon Salınımı ve Yüzey Sertliği Açısından Değerlendirilmesi. *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Sağlık Bilimleri Enstitüsü, Protetik Diş Tedavisi Ana Bilim Dalı, İstanbul, 133 s.
- Şap E ve Çelik H** (2012) Kobalt Esaslı Alaşımların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Ti ve Mn İlavesinin Etkisinin İncelenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*. 9(3): 25-33.
- Tansel O** (1995) Gemilerin Korozif Etkilerden Korunma Yöntemlerinin Araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 98s.
- Tascioğlu E, Karabulut Y and Kaynak Y** (2020) Influence Of Heat Treatment Temperature On The Microstructural, Mechanical, And Wear Behavior Of 316L Stainless Steel Fabricated By Laser Powder Bed Additive Manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 107: 1947-1956.
- Tosunoğlu E, Yılmaz R, Özeren E ve Sağlam Z** (2021) Eğitimde Makine Öğrenmesi: Araştırmalardaki Güncel Eğilimler Üzerine İnceleme. *Ahmet Keleşoğlu Eğitim Fakültesi Dergisi*. 3(2): 178-199.
- Türe S** (2024) Alüminyum Esaslı Zirkonyum Diborür Takviyeli Fonksiyonel Derecelendirilmiş Kompozitlerin Üretimi ve Karakterizasyonu. *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 120 s.
- Türkoğlu M** (2011) Bir Çelik Yapı Uygulaması İçin Toplam Kalite Yönetiminin Süreçlerinin Belirlenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul, 140 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- URL-1** <<http://www.scribd.com>>, Ziyaret Tarihi: 11.09.2024
- URL-2** <<http://www.mmo.org.tr>>, Ziyaret tarihi: 15.08.2024
- URL-3** <<http://cdn.bartın.edu.tr/metalurji>>, Ziyaret Tarihi : 10.10.2024
- URL-4** < <https://bartın.edu.tr>>, Ziyaret Tarihi: 10.10.2024.
- URL-5** < <http://researchgate.net>>, Ziyaret Tarihi: 07.10.2024.
- URL-6** < <http://muhendishane.org>>, Ziyaret Tarihi: 01.11.2024.
- URL-7** < <http://https://ekcmetallurgy.org>>, Ziyaret Tarihi: 13.12.2024.
- URL-8** < <http://uslularhadde.com>>, Ziyaret Tarihi: 13.12.2024.
- URL-9** <<https://www.mmo.org.tr>>, Ziyaret Tarihi: 17.10.2024
- URL-10** <<http://avys.omu.edu.tr>>, Ziyaret Tarihi: 25.09.2024.
- URL-11** <<https://unallarmetal.com>>, Ziyaret Tarihi: 25.09.2024.
- URL-12** <<https://www.slideshare.net/slideshow/dkme-demirlerpdf/253809458>>, Ziyaret Tarihi: 12.10.2024.
- URL-13** <<http://www.dokumanyapi.bys.subu.edu.tr>>, Ziyaret Tarihi: 10.10.2024
- Uygur İ** (2007) Fe-Cu-C Çeliklerine Mangan İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 22(3): 325-330.
- Ünal R, and B Dean E** (1990) Taguchi Approach To Design Optimization For Quality And Cost An Overview. *Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts*, 1 January 1990, United States, 1-10.
- Xiong J, Zhang T and Shi S** (2020) Machine learning of mechanical properties of steels. *Science China Technological Sciences*. 63: 1247–1255.
- Yalçın T ve Ateşok G** (1979) Demir Cevherlerinin Zenginleştirilmesi. *Bilimsel Madencilik Dergisi*. 18(2): 20-32.
- Yaluk D ve Yılmaz Ş** (2012) Çelik Sistemlerin Yüzey Özelliklerinin Sıcak Daldırma Galvaniz Kaplamalara Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 23(2): 144-149.
- Yangaz M** (2019) Yüksek Sıcaklık Şartlarında Çalışan Vana Çeliğinin Kaynak Sonrası Mikroyapısal Ve Mekanik Özellikleri Üzerine Isıl İşlemin Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya, 73 s.

## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Yıldız T ve Gür A** (2006) Aşınma Sistemleri. *Fırat Üniversitesi Doğu Araştırmaları Dergisi*. 4(2): 86-91.
- Yılmaz A** (2019) Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Termal Analiz Yöntemi İle Karbon Eşdeğerliğinin Tayini, Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya, 173 s.
- Yılmaz O** (1991) Aşınmaya Etki Eden Faktörler ve Aşınmanın Azaltılması İçin Alınabilecek Tedbirler. *Denizli Malzeme Sempozyumu*, 24-25-26 Nisan 1991, Denizli, 651-664.
- Yoshikazu S, Toshiyuki H and Michio H** (1992) Characteristics of High-carbon High Speed Steel Rolls for Hot Strip Mill. *J-STAGE home/ISIJ International* 32(11): 1194-1201.
- Zhao J, Lee T, Lee J, Jiang Z and Lee C** (2013) Effects Of Tungsten Addition On The Microstructure And Mechanical Properties Of Microalloyed Forging Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 44: 3511-3523.

## ÖZGEÇMİŞ

Arif YİĞİT, İlköğretim eğitimi Zonguldak'ta, Lise eğitimini Zonguldak Anadolu Teknik Endüstri Meslek Lisesinde tamamlayarak, 2011 yılında Önlisans eğitimini Kocaeli Üniversitesi Mekatronik Teknolojisi alanında yapmıştır. Lisans eğitim hayatına Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Makine Mühendisliği alanında tamamlayarak, Yüksek Lisans eğitimini yine Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi'nde tamamlamıştır. 2020-2021 yıllarında geleneksel imalat ağırlıklı Veysel Kütüklü A.Ş 'de üretim mühendisi olarak tamamlayarak, 2021 yılında M.F.A Maske şirketinde Makine Bakım Mühendisi olarak devam etmiştir. 2023 yılında Has Fastaners şirketinde Departman Sorumlusu olarak devam ederken almış olduğu iş teklifi üzerine Global şirkett Tarkett' te çalışma hayatına Bakım Mühendisi olarak devam etmiştir.