



**T.C.  
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI ORTAM SEMENTASYONU UYGULANMIŞ İF ÇELİKLERİNİN  
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**ARİF CANBULDU**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN  
Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM**

**KIRIKKALE – 2025**





**T.C.  
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KATI ORTAM SEMENTASYONU UYGULANMIŞ İF ÇELİKLERİNİN  
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**ARİF CANBULDU**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN  
Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM**

**KIRIKKALE – 2025**

Arif CANBULDU tarafından hazırlanan “KATI ORTAM SEMENTASYONU UYGULANMIŞ İF ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM

Makine Mühendisliği A.B.D., Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Osman BİCAN

Makine Mühendisliği A.B.D., Kırıkkale Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Emre YURTKURAN

Makine Mühendisliği A.B.D., Sivas Bilim ve Teknoloji  
Üniversitesi

İmza.....

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 14.02.2025

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Recep ÇALIN  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

# ETİK BEYANI

Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Arif CANBULDU

14/02/2025

# ÖZET

## KATI ORTAM SEMENTASYONU UYGULANMIŞ IF ÇELİKLERİNİN MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Kırıkkale Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi  
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM  
Şubat 2025, 87 sayfa

Arayer atomsuz çelikler (IF çelikleri), içeriğinde ara yer atomu bulundurmayan ve ferritik matrise sahip olan bir çelik türüdür. Pratikte IF çeliği 'temiz çelik' olarak da adlandırılır, çünkü yapı içerisindeki çökeltilerin toplam hacim oranı oldukça azdır. Buna rağmen az olan çökeltilerin IF çeliklerinin mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu bilinmektedir. Düşük akma mukavemeti değerleri ve düşük elastik modüle sahip IF çelikleri, daha düşük kesme ve darbe kuvvetleriyle kolayca şekillendirilebilirler. IF çeliklerinin kolay şekillendirilebilme özelliklerinin yanı sıra özellikle düşük kesme kuvvetlerinden ötürü sac metal şekillendirmede takım-kalıp aşınmasının az olması ve seri imalata olanak tanınmaları bakımından otomotiv sanayisinde çok kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, literatürde daha önce sementasyon yoluyla sertleştirilme çalışması yapılmamış olan IF çeliklerinin yüzeyine katı ortam sementasyonu yöntemiyle karbon difüzyonu sağlanarak yüzey sertliği ve sertlik derinliği belirlenmiştir. Katı ortam sementasyonu 900-950-1000 °C farklı sıcaklıklarda ve 1-2-4 saat sürelerde uygulanmıştır. Karbon verici olarak meşe kömürü tozu kullanılmıştır. Aynı zamanda aktivatörün yüzey sertleştirme işlemine olan etkisini incelemek amacıyla karbon verici ortama ağırlıkça %5 ve %10 oranında sodyum karbonat ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) eklenmiştir. Deneyler sonucunda en yüksek yüzey sertliği olan 553 HV değerine, %10 aktivatör oranında, 1000 °C sıcaklıkta ve 4 saat süre uygulanan katı ortam sementasyonu ile ulaşılmıştır. Katı ortam sementasyonu işleminde aktivatör kullanımının daha kısa sürelerde aynı yüzey sertliğine ulaşmada etkin rol oynadığı görülmüştür. Yüzeyler için yapılan optik mikroskop çalışmalarında karbon difüzyonunun gerçekleştiği sınır bölgeler tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** IF çelikleri, Arayer atomsuz çelikler, Katı ortam sementasyonu, Karbürleme

# ABSTRACT

## INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOLID MEDIA CEMENTED IF STEELS

Kırıkkale University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Mechanical Engineering, Master's Thesis  
Supervisor: Asst. Prof. Dr. Oğuz ERDEM  
February 2025, 87 pages

Interstitial free steel (IF steel) is a type of steel that does not contain interstitial atoms and has a ferritic matrix. In practice, IF steel is also called 'clean steel' because the total volume ratio of precipitates in the structure is quite low. Despite this, it is known that the low precipitates have significant effects on the mechanical properties of IF steels. IF steels, which have low yield strength values and low elastic modulus, can be easily shaped with lower shear and impact forces. In addition to the easy-to-form properties of IF steels, they are widely used in the automotive industry, especially due to their low shear forces, which cause less tool-die wear in sheet metal forming and allow for mass production. In this study, surface hardness and hardness depth were determined by providing carbon diffusion to the surface of IF steels, which have not been previously hardened by cementation in the literature, by using the solid medium cementation method. Solid medium cementation was applied at different temperatures of 900-950-1000 °C and for 1-2-4 hours. Oak charcoal powder was used as a carbon donor. At the same time, sodium carbonate ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) was added to the carbon donor medium at 5% and 10% by weight in order to examine the effect of the activator on the surface hardening process. As a result of the experiments, the highest surface hardness value of 553 HV was achieved with solid medium cementation applied at 10% activator ratio, 1000 °C temperature and for 4 hours. It was observed that the use of activator in the solid medium cementation process played an active role in reaching the same surface hardness in shorter periods. In the optical microscope studies conducted for the surfaces, the border regions where carbon diffusion occurred were determined.

**Keywords:** IF steels, Steels without interstitial atoms, Solid media carburization, Carburization

## TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her koşulda desteğini benden esirgemeyen, tüm zorluklarda yanımda olup aşmama yardımcı olan saygı değer danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Sementasyon ile ilgili tüm çalışmalarında tecrübelerini paylaşarak önemli katkılarda bulunan Prof. Dr. Osman BİCAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Sertlik ölçüm işlemleri için Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarını kullanmama izin verdiği için Prof. Dr. Recep ÇALIN'a ve Doç.Dr. Tuna AYDIN'a teşekkür ederim.

Metalografi laboratuvarındaki cihazların kullanımı ile ilgili tecrübelerini benimle paylaşan Arş. Gör. Sefa KAZANÇ'a teşekkür ederim.

IF çeliği temini için yardımcı olan Ereğli Demir ve Çelik Fab. T.A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Sodyum karbonat temini için yardımcı olan Eti Soda A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen babam Ali CANBULDU ve annem Gülşen CANBULDU'ya teşekkür ederim.

Desteğini her zaman yanımda hissettiğim eşim Ebru CANBULDU, kızlarım Hanzade CANBULDU ve Ada CANBULDU'ya teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT .....	iv
TEŞEKKÜR .....	iv
İÇİNDEKİLER .....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	viii
SİMGELER DİZİNİ .....	iv
KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>7</b>
<b>2. SEMENTASYON.....</b>	<b>9</b>
2.1. Sementasyon Çeşitleri .....	10
2.2. KOS İşleminin Mekanizması .....	12
2.3. KOS İşleminin Parametreleri .....	13
2.4. KOS İşleminin Çıktı Performansları .....	14
2.4.1. Sementasyon Derinliği.....	14
2.4.2. Yüzey Sertliği .....	16
2.4.3. Çekirdek Sertliği .....	16
2.5. KOS İşleminde Kullanılan Aktivatörler .....	17
2.6. KOS İşlemi Yapılabilen Malzemeler .....	18
2.7. KOS İşleminin Avantajları .....	18
2.8. KOS İşleminin Dezavantajları.....	19
2.9. KOS İşleminin Uygulama Alanları .....	20
2.10. Sementasyon Konusunda Literatür Araştırması.....	21
<b>3. İF ÇELİKLERİ .....</b>	<b>34</b>
3.1. İF Çeliklerinin Üretim Süreçleri.....	35

3.2. IF Çeliklerinin Sınıflandırılması .....	37
3.2.1. Ultra Düşük Karbonlu IF Çelikleri .....	38
3.2.2. Ekstra Derin Çekilebilen Kalitede IF Çelikleri .....	39
3.2.3. Yüksek Mukavemetli IF Çelikleri .....	39
3.2.4. Fosforlu IF Çelikleri .....	39
3.2.5. Fırında Sertleştirilebilen IF Çelikleri.....	40
3.3. IF Çeliklerinin Kullanım Alanları .....	40
3.4. IF Çelikleri Konusunda Literatür Araştırması.....	41
<b>5. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>48</b>
5.1. Numune Temini ve Hazırlanması.....	48
5.2. Aktivatör Seçimi ve Temini .....	50
5.3. KOS İşleminde Karbon Verici Ortam Seçimi ve Temini.....	52
5.4. KOS İşleminde Kullanılan Ekipmanlar.....	52
5.5. Deney Parametreleri ve Metodu.....	53
5.6. Optik Mikroskop İle Metalografik İnceleme.....	56
5.7. Mikrosertlik ölçümleri.....	58
<b>6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ .....</b>	<b>61</b>
6.1. Optik Mikroskop Görüntüleri.....	61
6.2. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları.....	65
<b>7. SONUÇ.....</b>	<b>76</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>78</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>87</b>

# ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1. Erdemir A.Ş. tarafından üretilen IF çeliklerin kalite numaraları ve kimyasal bileşimleri [58].....	38
Çizelge 3.2. Erdemir A.Ş. tarafından üretilen IF çeliklerin bazı mekanik özellikleri [58] .....	38
Çizelge 5.1. IF 7114 çeliğinin spektral analiz sonucu .....	49
Çizelge 5.2. Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> kimyasal özellikleri [78].....	51
Çizelge 5.3. Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> fiziksel özellikleri [78] .....	51
Çizelge 5.4. Deney Grupları.....	54
Çizelge 6.1. 900 °C’de yapılan işlemde elde edilen HV <sub>(0,5)</sub> sertlik değerleri .....	67
Çizelge 6.2. 950 °C’de yapılan işlemde elde edilen HV <sub>(0,5)</sub> sertlik değerleri .....	68
Çizelge 6.3. 1000 °C’de yapılan işlemde elde edilen HV <sub>(0,5)</sub> sertlik değerleri .....	69

# ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Demir-karbon denge diyagramı [2, 3].	9
Şekil 2.2. 950 °C’de 8 saat karbürlenmiş çeliğin farklı derinliklerdeki sertlik değişimi [2, 5].	10
Şekil 2.3. GOS fırını [2, 3].	11
Şekil 2.5. Fırın ve kutu içi sıcaklığının zamanla değişimi [1, 2].	13
Şekil 2.6. Sementasyon derinliğinin karbürleme sıcaklığı ve karbürleme süresine bağlı olarak değişimi [1, 2].	14
Şekil 2.7. Sementasyon derinliğinin karbürleme sıcaklığı ve karbürleme süresine bağlı olarak değişimi [1, 2].	15
Şekil 2.8. Farklı çap ölçülerindeki Ck15 çeliklerinin 925°C’deki sementasyon işlemi sonrasında sertleştirme işlemi ile ulaşılan çekirdek sertlik değerleri [2, 3].	17
Şekil 2.9. Çeşitli çelikler için kullanılan difüzyon işlemleri [2, 13].	18
Şekil 2.10. KOS yöntemiyle kaplama işleminde gerçekleşen reaksiyonların şematik gösterimi.	21
Şekil 3.1. Farklı çelik guruplarının % uzamaya karşılık dayanım grafiği [54, 55].	35
Şekil 3.2. Sürekli döküm yöntemiyle IF çeliği üretim diyagramı [54, 55].	36
Şekil 3.3. IF 210 Çeliğinden üretilmiş otomobil parçaları: a) kapı ve b) ön kaputu [61].	40
Şekil 5.1. IF 7114 çeliği.	48
Şekil 5.2. IF 7114 çeliği numunesi a) Resmi b) Ölçüleri.	49
Şekil 5.3. Thermo Scientific ARL OES marka spektrometre.	49
Şekil 5.4. Eti Soda A.Ş. üretimi Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .	50
Şekil 5.5. Meşe kömürü tozu.	52
Şekil 5.6. Magma Therm marka ısıtma işlem fırını.	52
Şekil 5.7. Sementasyon kutusu a) Görseli b) Boyut ölçüleri.	53
Şekil 5.8. Deney numunesinin sementasyon kutusu içerisinde şematik gösterimi.	55
Şekil 5.9. Isıtma işlem fırınından çıkan sementasyon kutuları.	55
Şekil 5.10. Mikrotest marka hassas kesim cihazı.	56
Şekil 5.11. Mikrotest marka bakalite alma cihazı.	56
Şekil 5.12. Bakalite alınan numuneler.	57

<b>Şekil 5.13.</b> Mikrotest marka zımparalama ve parlatma cihazı.....	57
<b>Şekil 5.14.</b> Nikon Eclipse MA100 marka optik mikroskop.....	58
<b>Şekil 5.15.</b> Vakum cihazı.....	58
<b>Şekil 5.16.</b> Vickers sertlik ölçme yöntemi.....	59
<b>Şekil 5.17.</b> Galileo marka sertlik ölçme cihazı .....	59
<b>Şekil 6.1.</b> IF7114 içyapısı (100x büyütme ile).....	61
<b>Şekil 6.2.</b> 900 °C’de 1 saat işlem görmüş numuneler (100x).....	62
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile.....	62
<b>Şekil 6.3.</b> 900 °C’de 2 saat işlem görmüş numuneler (100x).....	62
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile.....	62
<b>Şekil 6.4.</b> 900 °C’de 4 saat işlem görmüş numuneler (100x).....	62
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile.....	62
<b>Şekil 6.5.</b> 950 °C’de 1 saat işlem görmüş numuneler (100x).....	63
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile.....	63
<b>Şekil 6.6.</b> 950 °C’de 2 saat işlem görmüş numuneler (100x).....	63
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile.....	63
<b>Şekil 6.7.</b> 950 °C’de 4 saat işlem görmüş numuneler (100x).....	63
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile.....	63
<b>Şekil 6.8.</b> 1000 °C’de 1 saat işlem görmüş numuneler (100x).....	64
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile.....	64
<b>Şekil 6.9.</b> 1000 °C’de 2 saat işlem görmüş numuneler (100x).....	64
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile.....	64
<b>Şekil 6.10.</b> 1000 °C’de 4 saat işlem görmüş numuneler (100x).....	64
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile.....	64
<b>Şekil 6.11.</b> Numune üzerinde Vickers sertlik izlerinin konumu a) Resmi b) Ölçüleri .....	65
<b>Şekil 6.12.</b> İşlem görmemiş IF 7114 çeliği, yüzeyden itibaren derinlik - sertlik grafiği .....	66
<b>Şekil 6.13.</b> 900 °C’de 1 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği ...	70
<b>Şekil 6.14.</b> 900 °C’de 2 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği ...	71
<b>Şekil 6.15.</b> 900 °C’de 4 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği ...	72
<b>Şekil 6.16.</b> 950 °C’de 1 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği ...	72
<b>Şekil 6.17.</b> 950 °C’de 2 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği ...	73
<b>Şekil 6.18.</b> 950 °C’de 4 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği ...	73

**Şekil 6.19.** 1000 °C’de 1 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği . 74

**Şekil 6.20.** 1000 °C’de 2 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği . 74

**Şekil 6.21.** 1000 °C’de 4 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği . 75



## SİMGELER DİZİNİ

%	: Yüzde
Al	: Alüminyum
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	: Alüminyum oksit
Ar	: Argon
As	: Arsenik
$\alpha$ -Fe	: Ferrit
B	: Bor
BaCO <sub>3</sub>	: Baryum karbonat
C	: Karbon
°C	: Santigrat derece
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	: Asetilen
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	: Etan
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	: Propan
CaCO <sub>3</sub>	: Kalsiyum karbonat
CH <sub>4</sub>	: Metan
CO	: Karbon monoksit
CO <sub>2</sub>	: Karbon dioksit
cm	: Santimetre
Cr	: Krom
Fe	: Demir
g	: Gram
$\gamma$ -Fe	: Östenit
H <sub>2</sub> O	: Su
Hg	: Civa
IF	: Interstitial Free
KCN	: Potasyum siyanür
KCO <sub>3</sub>	: Potasyum karbonat
kgf	: Kilogram kuvvet

kW	: Kilovat
MPa	: Megapaskal
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
$\mu\text{m}$	: Mikrometre
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
N	: Nitrojen
$\text{Na}_2\text{CO}_3$	: Sodyum karbonat
NaCl	: Sodyum klorür
NaCN	: Sodyum siyanür
$\text{NH}_4\text{Cl}$	: Amonyum klorür
Nb	: Niyobyum
Ni	: Nikel
$\text{O}_2$	: Oksijen
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
ppm	: Milyonda bir
r	: İncelmeye karşı gösterilen direnç
S	: Sülfür
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum karbür
$\text{SiO}_2$	: Silisyum dioksit
Ti	: Titanyum
TiC	: Titanyum karbür
V	: Vanadyum
Zn	: Çinko
ZnO	: Çinko oksit

## KISALTMALAR DİZİNİ

AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
BCC	: Vücut merkezli kübik
BH	: Fırında sertleştirilebilen
BOF	: Üstten üfleme bazik oksijen fırın
DP	: Çift fazlı
EDDQ	: Ekstra derin çekilebilen kalitede
GOS	: Gaz ortam sementasyonu
HMK	: Hacim merkezli kübik
HRC	: Rockwell sertlik değeri
HSS	: Yüksek mukavemetli
HV	: Vickers sertlik değeri
KOS	: Katı ortam sementasyonu
KTB	: Kawasaki üst üfleme
LDS	: Düşük yoğunluklu çelik
RD	: Devridaim gaz giderme
SAE	: Otomotiv Mühendisleri Topluluğu
SOS	: Tuz banyosunda sementasyon
TEM	: Taramalı elektron mikroskobu
TIG	: Tungsten inert gaz
ULC	: Ultra düşük karbonlu
VD	: Vakum giderme
VOD	: Pota veya konvertörde vakumlu oksijen dekarburizasyonu
VSD	: Vickers sertlik değeri
WISCO	: Wuhan Demir ve Çelik Şirketi
YMK	: Yüzey merkezli kübik
YS	: Yüzey sertliği
YSD	: Yetersiz sertleşme derinliği



## 1. GİRİŞ

Sementasyon yöntemi çeliklerin yüzey sertleştirilmesinde kullanılan en eski ve aynı zamanda en yaygın yöntemlerden biridir. Sementasyon yapıldığı ortama göre katı, sıvı ve gaz sementasyon olarak adlandırılır. Çelik yüzeylerine karbon difüzyonu sağlanarak düşük karbonlu çeliklerin yüzeylerinde sertlik artışı meydana getirilir. %0,10 ila %0,25 karbon içeren çeliklere 920-950 °C sıcaklık aralığında uygulanmaktadır. Yüzeyde %0,8'den fazla karbon oranı martenzit oluşumuna neden olduğundan kırılganlığı arttırmaktadır. Literatürde genellikle farklı çeliklere uygulanan sementasyon işlemleri sonrası çeliklerdeki mekanik özellik değişimleri incelenmiştir. Karbon verici olarak, meşe kömürü tozu, kok kömürü tozu, yumurta kabuğu, hurma çekirdeği, Hindistan cevizi kabuğu, inek kemiği, istiridye kabuğu, bambu kömürü, grafit, keçi kemiği ve okaliptüs kömürü kullanılan çalışmalar yapılmıştır. Fakat endüstride katı ortam sementasyonunda en sık kullanılan karbon verici meşe kömürü tozudur. Aktivatör olarak ise baryum karbonat ( $BaCO_3$ ), sodyum karbonat ( $Na_2CO_3$ ), kalsiyum karbonat ( $CaCO_3$ ), potasyum karbonat ( $KCO_3$ ), yumurta kabuğu, istiridye kabuğu gibi farklı materyaller yapılan deneylerde kullanılmıştır. Aktivatör kullanımının temel amacı, sementasyon işleminin süresini kısaltarak süreçte tüketilen enerji miktarının azaltmaktır. Böylece daha ekonomik olarak amaçlanan yüzey sertliklerine ulaşmak mümkün olmaktadır. Sementasyon ile ilgili literatürde yapılan çalışmalarda denenen değişken parametreler; sıcaklık, süre, aktivatör tipi ve aktivatör oranıdır. Araştırmacıların çoğu daha kısa zamanda, daha az enerji tüketerek ve de ülkelerinde daha kolay bulunabilen malzemeleri kullanarak çelik yüzeylerinde istenen sertlik değerlerine ulaşmak amacıyla deneysel çalışmalar yapmışlardır.

IF çelikleri 1970 yılında Japonya'da vakumla gaz giderme teknolojisinin kullanılmaya başlanmasıyla ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. Bu yöntem bulunmadan önce aşırı düşük C ve N içeren bu çeliklerin sanayide kullanılması ekonomik olmadığı için tercih edilmemiştir. Vakumla gaz giderme işlemi sayesinde çelikte karbon ve nitrojen oranı ağırlıkça %0,003 seviyelerine indirilebilmekte bu sayede çeliğe yüksek

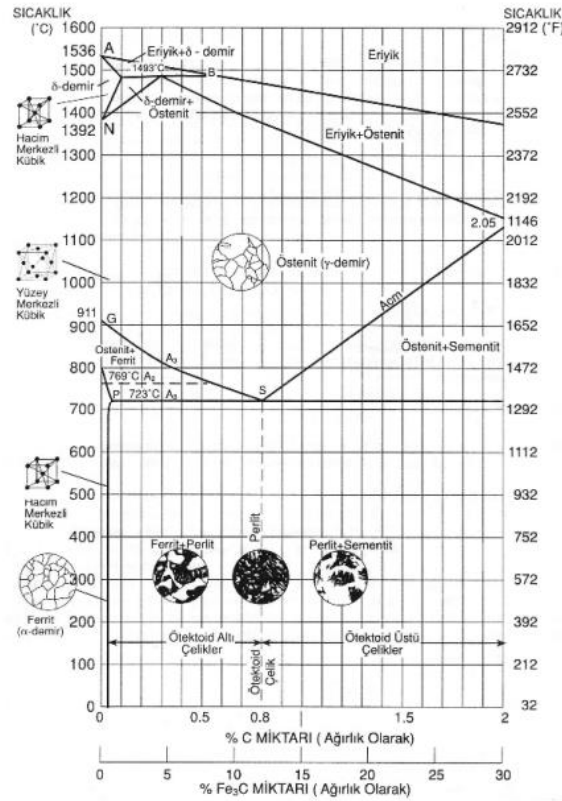
şekillendirilebilirlik kabiliyeti kazandırılmaktadır. Bu özelliği sayesinde IF çelikleri otomotiv ve beyaz eşya sektöründe yoğunlukla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, üstün özellikleri bulunan IF çeliklerin yüzey sertliklerini ve aşınma dirençlerini artırarak sanayinin farklı kollarında kullanılabilirliği araştırılmıştır. Yüzey sertleştirmede kullanılan katı ortam sementasyonu farklı değişkenler ile denenerek en uygun parametreler tespit edilerek özgün bir çalışma gerçekleştirilmiştir.



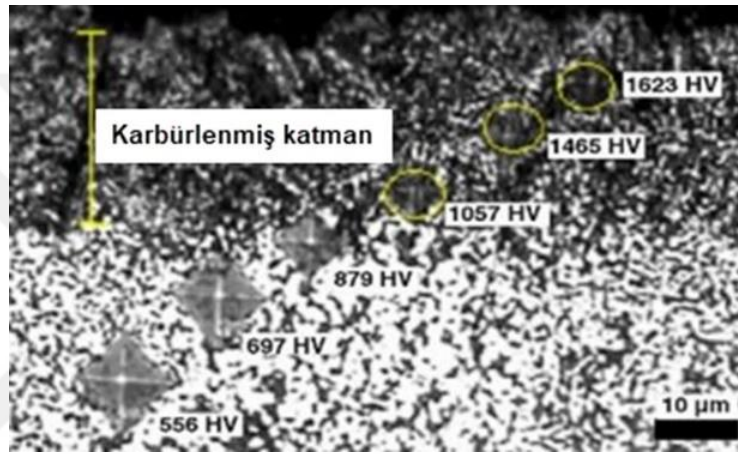
## 2. SEMENTASYON

Sementasyon; karbon içeriği düşük olan çelik malzeme yüzeyine katı, sıvı veya gaz ortamda karbon verilmesi esasına dayanan en eski yüzey sertleştirme işlemidir. Yüzey sertleştirmesi sayesinde malzeme yüzeyinde elde edilen sert katmanın, malzemenin elastik deformasyonuna izin verecek kadar tok ve aşınmalardan etkilenmeyecek kadar dayanıklı olması gerekmektedir. Sementasyon işlemi 800-950 °C arasında yapılan termokimyasal bir işlemdir. Çelik ısıtılarak sıcaklığı Şekil 2.1.'de görülen östenitik nokta üzerine çıkarılır. Düşük sıcaklıklarda mevcut olan hacim merkezli kübik (HMK) kafesli ferrit ( $\alpha$ -Fe) oldukça düşük miktarda karbon çözüdürebildiğinden sementasyon işlemi yüzey merkezli kübik (YMK) kafesine sahip olan ve %2,14'e kadar karbon çözüdürebilen östenit ( $\gamma$ -Fe) yapı sıcaklıklarında yapılmaktadır [1, 2].



Şekil 2.1. Demir-karbon denge diyagramı [2, 3].

İşlemin yapıldığı ortamda karbonca zengin bir koruyucu atmosfer meydana getirilerek çeliğin yüzeyinden çekirdeğine doğru karbon emdirilmesi sağlanır. Sementasyon yapılacak olan çelik öncelikle karbon difüzyon işlemi yapılabilmesi için östenit faz sıcaklığına çıkarılır ve ardından karbon verici ortamda karbonun malzemenin yüzeyine difüzyon olması beklenir. Daha sonra parçaya su verilerek yüzeyin sertleştirilmesi sağlanır. Sementasyon katı, sıvı veya gaz ortamlarda gerçekleştirilebilir. Fakat karbon verici ortam hangisi olursa olsun karbonun taşınımı gaz fazında gerçekleşmektedir. Karbon verici ortama göre sementasyon derinliği de farklılık gösterebilmektedir [2, 4]. Şekil 2.2.'de farklı derinliklerdeki sertlik değişimi görülmektedir.



Şekil 2.2. 950 °C'de 8 saat karbürleşmiş çeliğin farklı derinliklerdeki sertlik değişimi [2, 5].

## 2.1. Sementasyon Çeşitleri

Katı ortam sementasyonu (KOS) (kutu sementasyonu), sıvı ortam sementasyonu (SOS) (tuz banyosunda sementasyon) ve gaz ortam sementasyonu (GOS) olmak üzere farklı karbon verici ortamlarda sementasyon işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Metal endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bu sementasyon yöntemleri her boyuttaki parçalar için kullanılabilir. Sementasyonun üç yönteminde de karbon elementi moleküler olarak değil atomik olarak çelik yüzeyine difüzyon olur. Sementasyon tüm yöntemlerde çeliğin östenit fazı sıcaklığına kadar ısıtılmasıyla metal-gaz reaksiyonu sonucunda gerçekleşir. Her metot çelik yüzeyinde birbirinden farklı sementasyon derinlikleri ortaya çıkarır ve sementasyon sonrasında uygulanan sertleştirme işlemine göre birbirinden farklı sertlik değerleri elde edilir [2, 6].

SOS işleminde potasyum siyanür (KCN) veya sodyum siyanür (NaCN) gibi tuzlar karbon verici olarak kullanılmaktadır. Uygulanacak sementasyon sıcaklığına ve buna bağlı olarak istenen sementasyon derinliğine göre, kullanılacak tuzun seçimi gerçekleştirilir. Buna göre kullanılan tuzlar; ince sementasyon derinliği veren tuzlar (düşük sementasyon sıcaklığında çalışan) ve sementasyon derinliğini arttıran (yüksek sementasyon sıcaklığında çalışan) tuzlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Siyanür tuzları insan sağlığı için zararlı olduğundan kullanımında dikkatli olunması gerekmektedir [2, 7].

GOS işleminde, Şekil 2.3.'te de görüldüğü gibi parçanın bulunduğu sızdırmaz bir fırın içerisine karbon verici gaz gönderilerek sementasyon işlemi gerçekleştirilir. Bu gazlar genellikle metan (CH<sub>4</sub>), etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), asetilen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) veya propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) gibi hidrokarbon esaslıdır [2, 3].

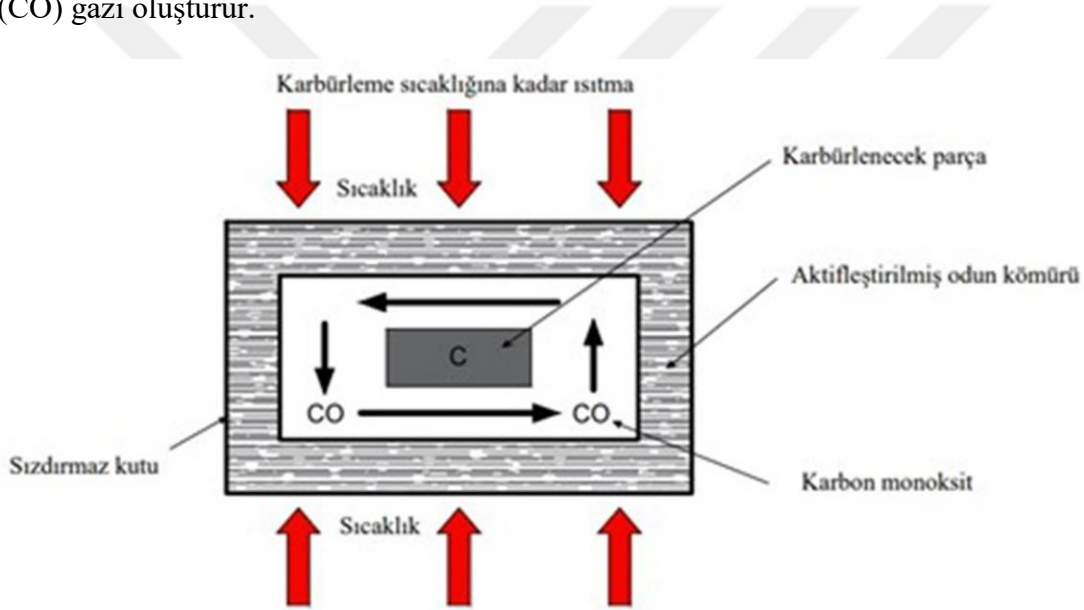


**Şekil 2.3.** GOS fırını [2, 3].

KOS işleminde ise karbon verici ortam olarak odun kömürü, sığır kemiği, sığır boynuzu ve hindistan cevizi kabuğunun külü gibi çok farklı malzemeler kullanılmaktadır. KOS işleminde, yüzey sertleştirme yapılacak olan çelik, karbon verici toz ve aktivatör malzemeyle birlikte sızdırmaz bir kutuya yerleştirilip fırında gerçekleştirildiği için pratikte “kutu sementasyonu” olarak da anılmaktadır.

## 2.2. KOS İşleminin Mekanizması

KOS, sertleştirme yapılacak olan çeliğin sementasyon kutusunun içinde bulunan herhangi bir karbon kaynağı ortamında, östenit faz sıcaklığına kadar ısıtılmasıyla karbonun yüzeylere difüzyonu ile gerçekleştirilen bir yöntemdir. Pratikte genellikle odun kömürü KOS işleminde karbon kaynağı olarak tercih edilir. Çeliğin ortamda ısıtıldığı sıcaklık 850-930 °C değerleri arasında olmakla beraber çeliğin sertleşme derinliğine göre ısıtma süresi genellikle 1-10 saat civarındadır [1,2]. Şekil 2.4.'te şematik gösterimi verilen KOS işleminde karbon elementi, sıcaklığın yükselmesiyle kutu içerisindeki havanın oksijeni ile tepkimeye girerek karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) gazı oluşturur. CO<sub>2</sub> gazı da karbon elementi ile tekrar reaksiyona girerek karbon monoksit (CO) gazı oluşturur.



Şekil 2.4. Kutu sementasyonunun şematik gösterimi [2, 8].

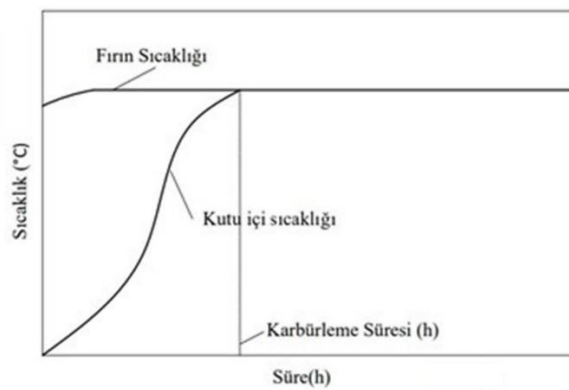
KOS işleminin kimyasal formüller ile ifadesi Denklem 2.1. ve 2.2.'de gösterildiği gibidir. Buradan da KOS işleminin CO gazı ile gerçekleştiği görülmektedir.



CO gazı çelik yüzeylerinde ayrışarak CO<sub>2</sub> gazı ve atomik karbonu oluşturur. Atomik karbon, östenit faza ulaşan çelik yüzeyce emilerek yapıda çözünür. Bu sayede çelik yüzeyine karbon verilmiş olur. Ortaya çıkan CO<sub>2</sub> gazı, yine odun kömürü ile reaksiyona girerek CO gazı oluşturur. Reaksiyonlar tekrar tekrar devam eder. Sementasyon kutusundaki oksijen (O<sub>2</sub>) miktarı zamanla azalacağından gerekli CO<sub>2</sub>

gazı üretilebilmesi için karbon kaynağına aktivatör maddeler katılması gerekir. Bunlar  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  ve  $\text{KCO}_3$  gibi yüksek sıcaklıklarda parçalanabilen toprak alkali karbonatlardır [2, 3].

KOS için, çelik parça yüzeyleri iyice temizlenip yağ ve oksitlerinden arındırıldıktan sonra kutunun alt kısmına serilen karbon verici madde üzerine yerleştirilir. Daha sonra karbon verici malzemenin kalanı kutu içine dökülerek yerleştirme işlemi tamamlanır. Hava sızdırmazlığı için kutu kapağı kapatılır ve gerekirse kapak çevresi şamot ile sıvanır. KOS işleminde kullanılan karbon verici maddeler düşük ısı iletkenliğe sahip oldukları için Şekil 2.5.'te de gösterildiği gibi kutu içi sıcaklığının karbürleme sıcaklığına erişmesi belli bir zaman almaktadır. KOS işleminden sonra çelik parçaların menevişleme metodu ile sertliği bir miktar azaltılarak sertleştirme sonrası çelik parçalardaki artık gerilmeler giderilir. Genellikle sertleştirme sonrasında çelik parçalar 160-220 °C arasındaki bir sıcaklıkta 1-2 saat menevişleme işlemine tabi tutulurlar [1, 2].



Şekil 2.5. Fırın ve kutu içi sıcaklığının zamanla değişimi [1, 2].

### 2.3. KOS İşleminin Parametreleri

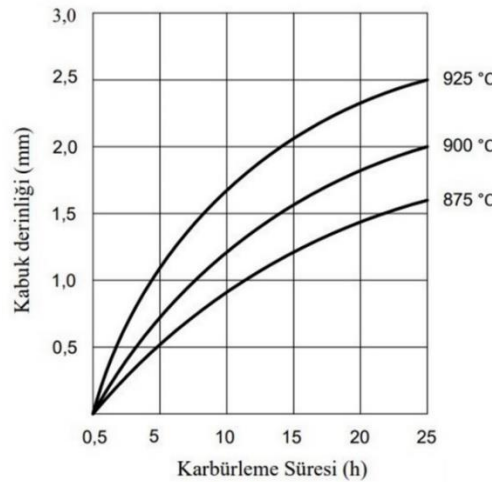
KOS işleminde, nihai ürünün mekanik özelliklerine birçok parametre etki etmektedir. Bunlar; çeliğin alaşım yapısı, sementasyon sıcaklığı ve süresi, karbon verici malzeme ve oranı, aktivatör malzeme cinsi ve oranıdır. İmalatçıların KOS işleminden önce karar verme aşamasında bu parametreleri dikkatlice belirlemeleri gerekmektedir. Yüzeyde istenen sertlik derinliğinin elde edilebilmesi için sementasyon ortamının belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir sürede şartlandırılması gerekir. Sürenin ve sıcaklığın artmasıyla sertlik derinliği de doğru orantılı olarak artmaktadır. Pratikte KOS 930 °C civarındaki

sıcaklıkta uygulanan bir işlemdir. Bu sıcaklıkta çelik parçalar istenilen sertlik derinliğine göre belirlenen bir süre bekletilirler. Sıcaklığın değerinin artırılmasıyla, sementasyon süresi önemli ölçüde azaltılmaktadır. Fakat parçaların çarpılması veya mekanik özelliklerinin zayıflaması gibi risklerden ötürü daha yüksek sıcaklıklara çıkılması uygun değildir. Örneğin; 0,5 mm sertlik derinliği için sementasyon sıcaklığının 950 °C'den 1050 °C'ye yükseltilmesiyle sementasyon süresi yarı yarıya azaldığı deneysel çalışmalarla ispatlanmıştır [16]. Ayrıca, sementasyon süresinin artmasıyla yüzey sertliği ve sementasyon derinliği artışının doğru orantılı olduğu birçok çalışmayla tespit edilmiştir [2, 9].

## 2.4. KOS İşleminin Çıktı Performansları

### 2.4.1. Sementasyon Derinliği

TS 1719'da ki tanıma göre sementasyon derinliği veya diğer adıyla etkili sementasyon derinliği; 1 kgf (9,8 N) yükte ölçüldüğü zaman Vickers sertliği 550 VSD olan karbonlanmış ve sertleştirilmiş tabaka ile yüzey arasındaki dik uzaklığa denir. Pratikte ise sementasyon derinliği teriminden, çeliğin yüzeyinden itibaren merkezine doğru çelik parça kesitindeki kimyasal bileşimde karbon miktarının arttığı noktaya kadar olan dik mesafe anlaşılır. KOS işlemi esnasında istenen sertlik derinliğinin ayarlanmasında önemli olan iki faktör uygulanan sıcaklık ve süredir (Şekil 2.6.).



Şekil 2.6. Sementasyon derinliğinin karbürleme sıcaklığı ve karbürleme süresine bağlı olarak değişimi [1, 2].

Sementasyon derinliği basit bir şekilde denklem 2.3. ile hesaplanabilmektedir.

$$SD = K\sqrt{t}$$

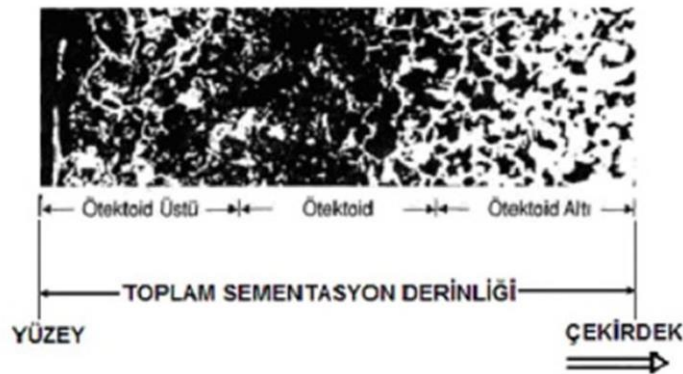
Denklem 2.3.

- SD : Sementasyon derinliği (mm)
- K : Sıcaklık ve difüzyon sabiti (mm/h<sup>-1/2</sup>)
- t : Sementasyon süresi (h)

Çelik sementasyon sıcaklığından yavaş yavaş soğutulursa, KOS işleminin etkilediği nüfuz derinliğince değişken karbon miktarlarına bağlı farklı mikroyapılar ortaya çıkar. Öncelikle yüzeyde oluşan ötektoid üstü bölgede perlit ve sementit yapıları görölmektedir. Bu yapının altındaysa ötektoid bölgede sadece perlitik yapılar görölmektedir. Çekirdeğe yakın bölgelerdeyse ferritik ve perlitik yapılardan oluşan ötektoid altı bölge meydana gelir ve çekirdeğe yaklaştıkça ferritik yapı artmaktadır [2, 10].

Çeliğin yüzey kısmında sertleşmiş tabaka derinliği aşırı artırıldığında artık östenit yapı, daha fazla karbon içeriği nedeniyle büyür ve aynı nedenden dolayı, karbürlerin çökmesi ve tane sınırlarının oksidasyonu meydana gelir. Bu mekanizma ise kalıntı östenit yapı varlığına sebep olmakta ve yorulma direnci üzerinde olumsuz etkilere neden olmaktadır [2, 11].

Şekil 2.7.'de işlem öncesi %0,2 oranında karbon ihtiva eden bir çeliğin sementasyon işleminden sonra yüzeyden çekirdeğe doğru ortaya çıkan mikroyapı değişiklikleri görölmektedir. Başlangıçta %0,2 karbon içeren çelik parça sementasyon kutusunda 925 °C sıcaklıkta 6 saat karbürlendikten sonra kutu içinde soğutulmuş ve ardından %2'lik nital çözeltilinde dağlanarak mikroskopta 30 kez büyütölerek mikroyapıya bakılmıştır. Çekirdeğe yaklaştıkça ferrit miktarında artış gözlenmiş, yüzeye yakın bölgelerde ise perlit ve sementit yapılarında artış tespit edilmiştir [2, 6].



**Şekil 2.7.** Sementasyon derinliğinin karbürlenme sıcaklığı ve karbürlenme süresine bağlı olarak değişimi [1, 2].

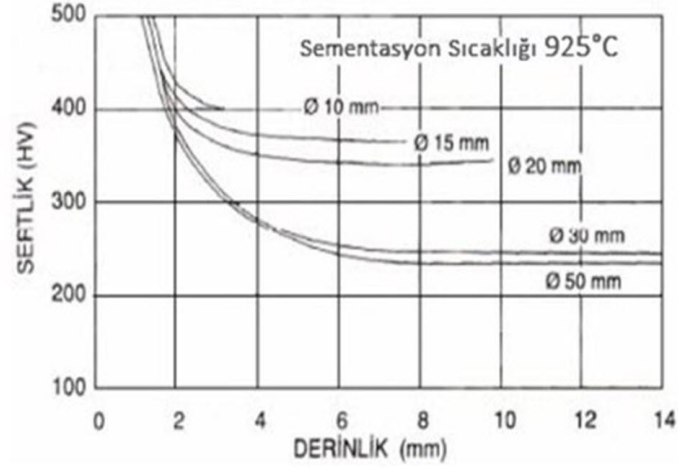
### 2.4.2. Yüzey Sertliği

Yüzey sertliğini belirleyen ana faktör östenit fazdaki çözünen karbon miktarıdır. KOS işlemi sonrasında çelik yüzeyindeki karbon oranı %0,8 - %1 arasında olmalıdır. Yüzeydeki karbon oranının bu değerlerin üzerine çıkmasının bazı sakıncaları vardır. Öncelikle, eğer çelik sementasyon sıcaklığından itibaren yavaş yavaş soğutulursa perlit tane sınırlarında sementit ağı oluşur. KOS işlemi sonrasındaki sertleştirme işlemlerinde parça Şekil 2.1.'deki östenit bölgesinin altındaki sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra sertleştirilirse, bu işlem sonunda çelik yapısında sementit ağı olduğu gibi kalır. Bu durum çeliğin kırılma dayanımına sebep olur. İkincisi ise, yüzeyde %0,8 üzerindeki oranda karbon miktarı oluşması durumunda sertleştirmenin ardından martenzit yapıda artık östenit kalmasına ve azalan sertliğe neden olur. Yüksek alaşımlı çeliklerde, %0,8 oranının üzerinde yüzeydeki karbon oluşumuna özellikle dikkat edilmelidir [2, 6].

Yüzey sertliği açısından bir diğer önemli faktörde sementasyon süresidir. Sementasyon süresinin uzatılmasıyla östenit fazda çözünen karbon miktarı artar ve bu yüzden sertleştirme sonrasında martenzitik yapıda daha çok artık östenit kalır. Bu nedenle de yüzey sertlik değeri düşer. Çelik daha düşük bir sıcaklıktan yine sertleştirilirse artık östenitin azalmasıyla sertlikte artış olur [2, 6, 12, 13].

### 2.4.3. Çekirdek Sertliği

Çelik parça boyutlarının ve sementasyon sonrasındaki sertleştirme sıcaklıklarının çekirdek sertliği üzerinde önemli etkileri olmaktadır. Şekil 2.8.'de çapları 10-15-20-30-50 mm olan Ck15 kaliteli çelik parçalar için, parça boyutunun ve sementasyon sonrası sertleştirme sıcaklıklarının çekirdek sertliğine olan etkileri görülmektedir. Parçalara 925°C sıcaklıkta sementasyon derinliğinin 1 mm olacağı şekilde KOS işlemi yapılmıştır. Aynı sementasyon sıcaklığında (925°C) parça boyutunun büyümesiyle çekirdek sertliğinin azaldığı, küçülmesiyle çekirdek sertliğinin arttığı tespit edilmiştir [2, 3, 6].



**Şekil 2.8.** Farklı çap ölçülerindeki Ck15 çeliklerinin 925°C’deki sementasyon işlemi sonrasında sertleştirme işlemi ile ulaşılan çekirdek sertlik değerleri [2, 3]

## 2.5. KOS İşleminde Kullanılan Aktivatörler

KOS işleminde en çok kullanılan aktivatörler,  $BaCO_3$ ,  $CaCO_3$ ,  $KCO_3$  ve  $Na_2CO_3$  gibi alkali metal karbonatlarıdır. Aktivatörler işlem esnasında sementasyon ortamında azalan karbonmonoksiti tekrar sağlarlar. Böylece karbürleme süresi üzerinde azaltıcı etkileri vardır. Aktivatör oranı %11’i aştığında dekarbürizasyon olayı başlamaktadır ki bu kutu sementasyon işleminde istenmeyen bir durumdur. Dekarbürizasyon yaratan diğer neden ise kutu içindeki hava boşlukları ya da sementasyon kutusunun kapağının sızdırmasıdır. Daha fazla oksijen atomu daha fazla  $CO_2$  üretir ve  $CO_2$  gazının basıncı kutu içerisinde giderek artar. Kutu içindeki sıcak karbon sınırlı olduğundan, ilk reaksiyonda üretilen  $CO_2$  gazının tümü CO gazına dönüştürülemez. Dolayısıyla  $CO_2/CO$  oranı denge oranından daha fazla olur ve dekarbürizasyon meydana gelir. İlk oluşan  $CO_2$  karbon verici ortamın karbonu ile reaksiyona girerek aktif CO gazını meydana getirir. Karbürleme işlemi sırasında serbest kalmış  $CO_2$  gazı, baryum karbonatın düşük ayrışma basıncından dolayı tekrar  $BaCO_3$  oluşturmak için reaksiyona girer. Karbürleme işlemi sürdükçe bu üç reaksiyon arasında dinamik bir denge kurulur ve sürekli bir döngü gerçekleşir [1, 2].



## 2.6. KOS İşlemi Yapılabilen Malzemeler

Günümüzde düşük karbonlu çelikler, alaşımlı çelikler, takım çelikleri ve paslanmaz çelikler gibi malzemelere karbon emdirmek için çeşitli difüzyon işlemleri uygulanmaktadır (Şekil 2.9.).



Şekil 2.9. Çeşitli çelikler için kullanılan difüzyon işlemleri [2, 13].

KOS, yüzeyi sert ve aşınmaya karşı dayanıklı, çekirdek bölgesindeyse daha yumuşaklık ve tokluk özellikleri istendiğinde, darbeli ve değişken zorlamalara maruz kalan düşük karbonlu çeliklere sıkça kullanılan bir difüzyon işlemidir. Siyanürleme, ferritik nitrokarbürleme ve karbonitrasyon yöntemlerine kıyasla KOS oldukça temiz, çevre ve insan sağlığı dostu bir yöntemdir. KOS'da, %0,1-0,25 oranlarında karbon içeren çeliklerde tatmin edici sonuçlar elde edilebilmektedir. Piston pimleri, miller, dişliler, zincir baklaları, zincir dişliler ile makaraları, fren diskleri, rulmanlı yataklar, haddeleme merdaneleri, kılavuz yatakları, bazı kontrol ve ölçü aletleri, soğuk şekillendirilen veya ekstrüzyonla şekillendirilen parçalar, takım çelikleri gibi parçaların üretiminde KOS işlemi tercih edilmektedir [2, 13].

## 2.7. KOS İşleminin Avantajları

KOS işleminin olumlu özellikleri aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Çelik tamamen ya da kısmen en son şeklini aldıktan sonra KOS işlemi uygulandığından parçanın işlenmesi daha kolay olacaktır.
- Parça üzerinde sertleşmesi istenmeyen, sonradan işlenecek alanlar varsa, elektrolitik bakır ve özel pasta ile bu alanlar kapatılır. KOS işlemi bu alanlara etki etmeyeceğinden daha sonra bu bölgelerin kolayca işlenmesine olanak sağlar.

- KOS işleminde, çekirdek bölgesi yumuşaklığını koruyacağından sertleştirme esnasında oluşabilecek çarpılmalar oldukça azdır.
- Sementasyon çelikleri, yüzeyinde benzer sertlik değerleri verebilen takım çeliği durumundaki yüksek karbonlu çeliklerden ucuzdur. Bu sayede maliyet açısından KOS işleminin avantajları sağlanır.
- KOS işleminin sadece bölgesel olarak sertleştirilecek büyük parçalar için çok daha ekonomiktir.
- KOS işleminde büyük sementasyon derinlikleri ucuz ve kolay olarak elde edilir.
- KOS işleminin kendi kapalı ortamını sağladığı için çok çeşitli fırınlardan yararlanabilir.
- GOS işleminde karşılaştırıldığında, seçici karbürleme için daha geniş bir durdurma teknikleri seçeneği sunar.
- SOS işleminin (tuz banyosunda karbonlama) ile karşılaştırıldığında siyanürün bertaraf edilmesine gerek yoktur.
- Hem GOS hem de SOS ile karşılaştırıldığında sermaye yatırımı daha azdır. Bu nedenle, KOS özellikle düşük hacimli uygulamalar için daha ekonomiktir.
- KOS bileşiklerini depolamak için ayrı bir odaya gerek yoktur, fakat SOS işleminin için gerekli tuzların sıkı denetim altında saklanması gerekir.
- KOS kontrollü atmosfer fırınına ihtiyaç duymaz. Aynı fırın normalleştirme, tavlama ve gerilim giderme işlemleri için de kullanılabilir [2, 14].

## 2.8. KOS İşleminin Dezavantajları

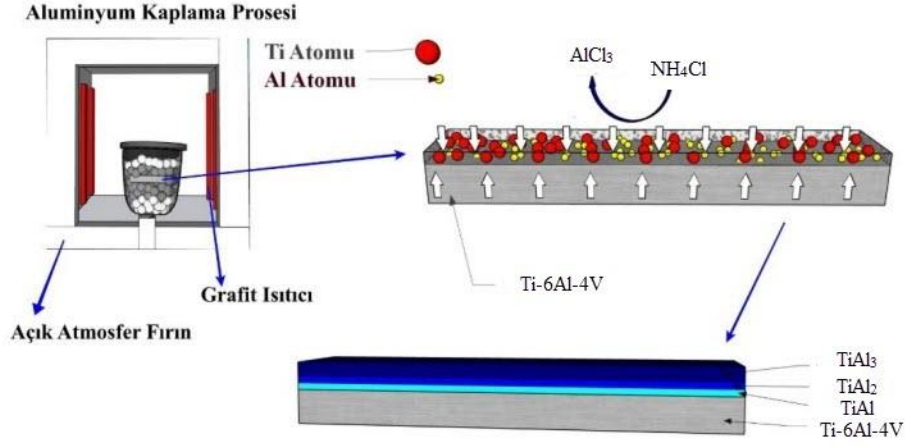
KOS işleminin olumsuz özellikleri aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- KOS işleminde parçaların toz ile kaplanması ve temizlenmesi için fazlaca iş gücü harcanır.
- Karbon verici toz iyi bir ısı iletici olmadığından sementasyon sıcaklığına ulaşılincaya kadar daha uzun süreli bir ısıtma gereklidir.
- Sementasyon işleminde kullanılan kutular alaşımlı çeliklerden imal edilmiş olmalıdır. Aksi durumda sürekli olarak değişen soğutma ve ısıtma işlemleri sonucunda üzerlerinde cüruf tabakası oluşacaktır.
- Soğutma için parçaları kutudan çıkarmak zordur.
- Çeliklere sementasyon sıcaklığından itibaren hemen su verilmemelidir. İlk önce yavaşça soğumaları, ardından tekrar ısıtılmaları gerekmektedir. Bu ise enerji kaybına neden olur.

- Sertleştirme hassas değildir ve yüzeye emdirilen karbon miktarı kontrolsüzdür. Katı sertlik derinliği toleranslarının gerekli olduğu sıg sertlik derinliklerinin üretimi için pek uygun değildir.
- Diğer sementasyon çeşitlerine göre daha kirli bir işlemdir ve aynı zamanda çok daha uzun süre gerektirir.
- Yöntem büyük hacimli üretim için uygun değildir.
- Patlamaların önlenmesi için kapsamlı güvenlik önlemleri alınması gerekmektedir [2, 14].

## 2.9. KOS İşleminin Uygulama Alanları

KOS yöntemiyle; metallerin yüzeyine karbon difüzyonu yoluyla yüzey sertleştirme yapılabildiği gibi, metal yüzeylere kaplama işlemleri de yapılabilmektedir. Difüzyon yoluyla kaplama işlemi, metalin iç mekanik özelliklerini değiştirmeden yüzey sertliği ve aşınma direnci özelliklerini iyileştirerek malzemenin çalışması imkansız olan koşullarda kullanılabilmesini sağlar. En çok bilinen kutu sementasyon kaplama prosesleri; alüminize etme, kromlama ve silikonlamadır. Tipik bir kutu; kaplanacak metal, kaplama malzemesi (Cr, Al, Si gibi parçaların yüzeyinde biriken element tozları) ve aktivatör ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  veya SiC) malzemedir oluşur. Makine parçalarında genel olarak kullanılan çeliklerin ömürleri aşınmaları ile sınırlıdır. Bu sebeple aşınmaların önlenerek parçaların ömürlerinin uzatılması, ekonomik açıdan önemli oranda avantaj sağlar. Yakın zamanlarda bu sorunları azaltmak ya da ortadan tamamen kaldırmak için çeliklerinin iyileştirilmesi üzerine yapılan çalışmalardan bir tanesi de kaplama yöntemidir. Şekil 2.10'da KOS yöntemiyle Ti6Al4V alaşımı üzerine alüminid esaslı kaplama prosesi görülmektedir [2, 15].



**Şekil 2.10.** KOS yöntemiyle kaplama işleminde gerçekleşen reaksiyonların şematik gösterimi [2, 15].

## 2.10. Sementasyon Konusunda Literatür Araştırması

Pekgöz ve arkadaşları, AISI1040 imalat çeliği, AISI4140 ıslah çeliği ve AISI8620 sementasyon çeliğini tuz banyosunda SOS işlemine tabi tuttuktan sonra temperleme işlemi yaparak çelik yüzeylerinin sertlik ölçümlerini gerçekleştirmişler ve sementasyon işleminin mikroyapıya olan etkilerini incelemiştir. Deneysel çalışmalarda, numunelere 200 °C sıcaklıkta 2 saat boyunca ön tavlama uygulanmıştır. AISI1040 çeliğine 845°C’de 2 saat, AISI 4140 çeliğine 845 °C’de 4 saat ve AISI8620 çeliğine ise düşük karbonlu çelik olduğundan; 900 °C’de 4 saat tuz banyosunda SOS işlemi uygulanmıştır. İşlemlerin ardından numuneler soğutma tuzunda bekletildikten sonra normal suya atılarak soğutma işlemi tamamlanmıştır. Sertleştirme işleminden sonra 250 °C’de 2 saat boyunca menevişleme işlemi uygulanmıştır. SOS işlemi sonucunda yüzey sertlik değerleri iki katı oranda artmıştır. Mikroyapı görüntülerine göre AISI1040 çeliğindeki mikroyapı perlit ve sementit ağırlıklıyken, düşük alaşımli çeliklerin yapısında karbür bileşenleri, beynit ve martenzit gözlemlenmiştir. Bu mikroyapısal değişikliklerin sertlik değerini etkileyen en önemli parametreler olduğu tespit edilmiştir [16].

Erkan ve arkadaşları AISI8620 çeliğine asetilen gazı kullanarak GOS işlemi gerçekleştirmişler ve işlem sonucunda AISI8620 çeliğinin sertlik derinliklerini ölçmüşlerdir. GOS işlemi sonucunda, 920°C’de sertlik derinliği 0,401 mm iken, 980°C’de sertlik derinliği değeri 0,798 mm ile yaklaşık iki katına ulaşmıştır. 980°C’de

parça yüzeyine daha çok karbonun emilmesi sayesinde sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir [17].

Coşar, 20MnCr5 ve 8622RH çeliklerine GOS işlemi uygulamıştır. İşlem uygulanmadan önce numunelerin sertlikleri yaklaşık 19-20 HRC iken, GOS işlemi sonunda 20MnCr5 çelik numunesinin yüzey sertliği 57,3 HRC ve 8622RH çeliğinin ise 60,5 HRC olarak tespit edilmiştir. Her iki numune arasında 8622RH çeliğinde daha yüksek ölçülen sertlik değerinin, içeriğindeki Mo ve Ni elementleri sebebiyle oluştuğu belirtilmiştir [18].

Afolalu ve arkadaşları, AISI 5130 çeliğine kutu sementasyon ile yüzey sertleştirme işlemi uygulamışlardır. KOS işleminde karbon verici olarak yumurta kabuğu, hurma çekirdeği ve hindistan cevizi kabuğu karışımı kullanılmıştır. Deneyler, 950 °C, 1000 °C, 1050 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda ve 60, 90, 120 ve 180 dakika sürelerde gerçekleştirilmiştir. En yüksek yüzey sertliği değerine (141,03 HV) 1050 °C sıcaklıkta ve 90 dakikada yapılan sementasyon işleminde ulaşılmıştır [19].

Aramid ve arkadaşları, düşük karbonlu (% 0,1999 C içeren) çeliğin KOS işleminde karbon verici olarak öğütülmüş sığır kemiği kullanmışlardır. 850°C, 900°C ve 950°C'de 15 ve 30 dakika yapılan KOS işlemi sonrasında yağda oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra numunelere 550 °C'de temperleme işlemi uygulanarak yüzey sertliği arttırılmıştır. En yüksek yüzey sertliği değerine (68,3 HRA) 850 °C sıcaklıkta ve 30 dakikada yapılan KOS işleminde ulaşılmıştır [20].

Baykara, 16MnCr5 çeliğine KOS işlemi uygulamış ve işlem sonrasında çeliğe aşınma deneyleri gerçekleştirmiştir. Deneysel çalışmalardan sementasyon derinliği ve sertlik ile aşınma dayanımı arasında doğrudan bir ilişki olmadığını tespit etmiştir. Tribolojik sisteme çok sayıda faktörün etki etmesi ve bu faktörlerden herhangi birinin değişmesiyle diğer faktörlerin aşınma dayanımını etkileyebileceği sonucuna varmıştır. 16MnCr5 çeliğine 930 °C sıcaklıkta, 3,5 saat KOS işlemi uygulandığında en yüksek aşınma dayanımı değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. İşlem sonrası 1,04 mm sementasyon derinliği ve 60 HRC yüzey sertliği elde edilmiştir [10].

Çoban ve arkadaşları, karbon verici ortama %10, %20 ve %30 oranlarında baryum karbonat (BaCO<sub>3</sub>) katarak CK10 ve 16MnCR5 çeliklerine sabit sıcaklık ve sürede (900 °C, 9 saat) KOS işlemi uygulamışlardır. Deneyler sonucunda, BaCO<sub>3</sub> miktarının %10'dan daha fazla olması çeliğin sertleşme derinliğinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Karbon verici ortamdaki %20 ve %30 oranlarındaki BaCO<sub>3</sub> ise çelikte hemen hemen aynı sertlik ve sertleşme derinliklerine olanak sağladığı

gözlemlenmiştir. CK10 çelikte %10 BaCO<sub>3</sub> katkısında, 0,65 mm'den sonra sertlikte ani düşüş gözlemlenirken, %20 ve %30 BaCO<sub>3</sub> katkılarında bu düşüş 1 mm'den sonra gerçekleştiği belirtilmiştir. 16MnCR5 çeliğin mikrosertlik ölçümlerinde ise BaCO<sub>3</sub> oranı artışı sertleşme derinliğini bariz olarak değiştirmedeği ve her üç oranda da birbirine yakın sertlik değerlerinin elde edildiği rapor edilmiştir [21].

Çölova, St37 genel yapı çeliği ile yaptığı karbürleme araştırmasında farklı sıcaklık ve sementasyon süreleri denemiştir. En yüksek sertlik değerlerine 930 °C'de ve 10 saat uygulanan KOS işlemi sonrasında ulaşılmıştır. Aşınma testleri sonucunda uygulanan sementasyon süresi ve sıcaklık değeri ile aşınma kaybının ters orantılı olduğu, fakat yük ile aşınma kaybının ise doğru orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır [8].

Forti ve arkadaşları, son yıllarda yüksek korozyon direnci yüzünden popüler hale gelen Fe-Al alaşımlarının, sertleştirilebilme mekanizmaları üzerine KOS çalışmaları yapmışlardır. Fe<sub>2</sub>AlX (X=Ti, V, Nb) yüzeylerinde karbon atomlarının difüzyonu üzerine yapılan deneylerde, alaşımda titanyum bulunan çeliklerde vanadyum (V) ve niyobyum'a (Nb) kıyasla karbon difüzyonunun daha iyi olduğu sonucuna varmışlardır [22].

Hassan, AISI 1020 çeliğine karbon verici olarak odun kömürü ve inek kemiği kullanarak bir dizi kutu sementasyon işlemi uyguladıktan sonra sertlik değişimi ve aşınma direnci artışı üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. KOS işleminde 925°C sıcaklık ve 2 saat bekleme süresi değerleri kullanılmıştır. KOS sonrası numuneler fırında yavaşça soğutulduktan sonra yarım saat süreyle 870°C'ye kadar tekrardan ısıtılıp daha sonra suda hızla soğutulmuştur. Son olarak 160°C'de 1 saat süreyle temperleme işlemi yapılarak oda ortamında havayla yavaşça soğutulmuştur. Deneyler sonucunda karbon kaynağı olarak inek kemiğinin kullanılabilmesi anlaşılmıştır. En iyi sonuçları %90 odun kömürü + %10 inek kemiğinden oluşan karbonlama bileşiği ve bu bileşikle yapılan KOS işleminde 2,32 mm sertlik derinliği değeri elde edildiği bildirilmiştir [23].

Ihom, %0,18 karbon içerikli çeliğe yaptığı KOS işleminde, karbon verici olarak sığır kemiğinin kullanılabilirliği üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. %60 odun kömürü + %40 sığır kemiği karışımından oluşan karbonlama bileşiğiyle 900 °C'de 8 saatte yapılan KOS işlemi ile 780 HV yüzey sertlik değerine ve 2,32 mm etkili sementasyon derinliğine ulaşılmıştır. Deney sonuçlarından sığır kemiğinde bulunan kalsiyum karbonatın aktivatör madde görevi gördüğü anlaşılmış olup sığır kemiğinin KOS işlemlerinde karbon kaynağı olarak kullanılabilmesi ispat edilmiştir [12].

Jacquet ve arkadaşları, çelik yüzeyindeki karbon kalınlığının sementasyon süresi boyunca izlenebilmesi adına bir metot geliştirmesi için çalışmalar yapmışlardır. Geliştirilen metodun çalışma prensibi: karbürleme ortamına yerleştirilen sensör ile karbürleme atmosferindeki CO, CO<sub>2</sub> ve CH<sub>4</sub> gazı miktarlarının ölçülerek, kütle akışı hızının hesaplanmasına dayanmaktadır. Denemeler sonucunda geliştirilen metotla çelik yüzeyindeki optimum karbon kalınlığı 70 µm olarak tespit edilmiştir [24].

Kaya yaptığı çalışmada, SAE5120 ve SAE8620 çeliklerini 930 °C’de, 60-120-180-240 dakika boyunca KOS işleme tabi tutmuştur. İşlem sonrası yapılan Charpy-Darbe testinde her iki çelik numunesi için de en uzun süre sementasyon uygulanan numunelerin en az tokluğa sahip oldukları görülmüştür. İşlem uygulanan çeliklerin mikroyapılarına bakıldığında yüzeyde ötektoid üstü, çekirdeğe doğru ötektoid ve çekirdeğe en yakın alanlarda ferritik ile beynitik yapılardan oluştuğu tespit edilmiştir. SAE5120 çeliğine KOS işlemi yapılmadan önceki yüzey sertliği 207 HV iken, en yüksek değer 240 dakikalık işlem süresinden sonra 871 HV olarak ölçülmüştür. SAE8620 çeliğinin KOS işlemi yapılmadan önceki sertlik değeri 250 HV iken, en yüksek değer 240 dakikalık sementasyon süresinden sonra 855 HV olarak ölçülmüştür. Karbürleme süresinde 4 saat ve üzerindeki sürelerle çıktığında, semente edilen numunelerin yüzey kısmındaki sertlik değerlerinde aşırı bir artış olduğu gözlemlenmiştir [25].

Kılıç çalışmasında, 14NiCr10 ve 14NiCr14 çeliklerine uygulanan KOS işleme bağlı olarak sertlik ve yorulma dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Sementasyon işlemi sonrasında numunelerin yüzey sertlikleri 14NiCr10’da 59 HRC ve 14NiCr14’te ise 53 HRC olarak ölçülmüştür. Numunelere uygulanan yorulma deneyleri ile, 240 N yük kapasitesinde ve buna karşılık gelen 563,43 MPa gerilmede numunelerin 1000120 devire kadar yorulmadan dayanabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, tezgâhın en çok uygulayabildiği kapasite olan 300 N yükte ve buna eşdeğer 704,3 MPa gerilmede 819710 devir daha yapılarak toplamda 1819830 devire kadar malzemelerin yorulmadığı tespit edilmiştir [26].

Kuswanto, endüstride kullanılan pahalı kesme bıçaklarının yerine KOS yöntemiyle sertleştirilen ve nispeten daha ucuz olan düşük karbonlu çeliklerin kullanılması konusunda çalışmalar yapmıştır. Bu amaçla karbürleme ortamı olarak %90 hindistan cevizi kabuğu (karbon verici) ve %10 BaCO<sub>3</sub> (aktivatör) karışımı tercih edilerek St37 çeliği ile 900 °C sementasyon sıcaklığında ve 2 saat bekleme süresinde KOS deneyleri yapılmıştır. Fırında ısıtma kademeli olarak gerçekleştirilmiş olup, ilk aşamada 200

°C'de 1 saat, ikinci aşamada 500 °C'de 1 saat ve 700 °C'de 1 saat, son olarak karbürleme sıcaklığında (900 °C) 2 saat olarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra fırının ısıtılması kapatılarak sıcaklık 350°C'ye düşene kadar yavaşça soğutulmuştur. Fırın 350°C'ye ulaştıktan sonra kapağı açılarak karbürleme kutusu dışarı çıkarılmıştır. Fırın dışında karbürleme kutusunun kapağı açılarak, tüm numuneler açık havada oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. İşlem sonrası elde edilen yüzey sertliği değeri 184,45 HV değerindedir. KOS yöntemiyle St37 çeliğinin sertliğinde %26 artış sağlandığı belirtilmiştir [27].

Oyetunji ve arkadaşları, karbon verici olarak öğütülmüş istiridye kabuğu, hurma çekirdeği ve sığır kemiği kullanarak %0,078 karbon içeren çeliğe KOS işlemi yapmışlardır. KOS işlemi, %20 oranında BaCO<sub>3</sub> aktivatör kullanılarak 700-1100 °C sıcaklıklarında ve 1-5 saat arasında yapılmıştır. En iyi yüzey sertliği değerine karbon verici olarak sığır kemiği kullanılan ve 900 °C karbürleme sıcaklığında yapılan deneyde ulaşılmıştır. Deniz kabuğunun karbon verici olarak kullanıldığı karbürleme işlemlerinde dekarbürizasyon yaşandığından bu materyalin karbürleme işlemlerinde kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna varılmıştır [28].

Özcan, silah namlularının sertleştirilmesi için borokarbürleme üzerine çalışmalar yapmıştır. Borokarbürleme işleminin etkinliğini kontrol amacıyla, aynı numunelere (32CrMoV), aynı sıcaklık ve sürelerde, borlama, KOS ve borokarbürleme işlemlerini uygulamıştır. Borokarbürleme işleminde eşit oranda bor ve karbon kaynağı olarak odun kömürü kullanmıştır. Borlama, KOS ve borokarbürleme işlemleri sonrasında numunedeki mikroyapı değişimleri araştırılmış ve uygulanan üç işlemde sonra malzemelerin sertliklerindeki artış karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda borlama yöntemi ile en yüksek 1800 HV yüzey sertliği değerine ulaşılmıştır. KOS ile ulaşılan sertlik değerleri, borlama işlemiyle ulaşılan değerlere göre daha düşük olarak tespit edilmiştir. Bunun nedeninin ise ortamdaki karbon oranının KOS yapılacak çelikteki karbon oranından daha düşük olması ve çelikten karbon çekilerek dekarbürizasyon gerçekleşmesi olarak belirtilmiştir. Borokarbürleme deneyi sonucundaki malzeme yüzey sertliği değerinin de borlama deneylerindeki sertlik değerleri kadar yüksek olmadığı görülmüştür. Yapılan borlama, KOS ve borokarbürleme işlemlerinden, 900 °C'de 5 saat süreyle yapılan toz borlama işleminin, gerçek namlu uygulamaları için daha uygun olabileceği bulunmuştur [29].

Özsaraç ve arkadaşlarının çalışmasında, SAE8620 çeliğinin KOS işlemiyle karbürlenmesi ve işlem sonunda sertleştirilmesi araştırılmıştır. Deneylerde

sementasyon sıcaklığı 930 °C olarak belirlenmiş ve sementasyon sonrası sertleştirme ise 870 °C'de 25 dakika bekletildikten sonra su içerisinde ani soğutma şeklinde yapılmıştır. KOS işlemi odun kömürüyle 0,5-1-5-10 saat sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda; çekirdek sertliği 439 VSD olan SAE8620 çeliğinin KOS işlemi sonrasında sertlik değeri 742 VSD olmuş ve kabuk sertliğinde %60 oranında sertlik artışı sağlandığı belirtilmiştir. Sementasyon süresi 5 saatten fazla olduğunda, semente edilen yüzey kısmının sertlik değerlerinde artış görülmüş fakat, 5 ve 10 saat sementasyon sürelerinde neredeyse aynı sertlik değerleri elde edildiği bildirilmiştir. Çelik parçaların mikroyapılarına bakıldığında yüzey ötektoid üstü, çekirdeğe doğru ötektoid ve çekirdek bölgesi beynitik ve ferritik yapılardan oluştuğu tespit edilmiştir [30].

Rowan ve arkadaşları, çelik alaşımdaki elementlerin KOS işlemine etkileri üzerine araştırmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmada, AISI1018, AISI4820, AISI5120 ve AISI8620 çelikleri kullanılmıştır. Bu çeliklerin seçilmesindeki amaç, hepsinin %0,2 oranında karbon içermesi ve diğer alaşım elementlerinin oranlarının farklı olmasıdır. Yüksek konsantrasyonda östenit stabilize edici elementlere (Si, Ni) sahip çelikler, östenit yapı içindeki karbon difüzyonunu arttırmasına rağmen, atmosferden çelik yüzeyine karbon transferinin kinetiğini önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. Karbon yayılımını düşürmesine rağmen, karbür oluşturu elementlerle (Cr, Mo) alaşımlanan çelikler, atmosferdeki kütle aktarım katsayısını önemli ölçüde arttırmış ve karbon profili oluşum hızını arttırmıştır. Deneysel çalışmanın sonucunda, yüksek Cr ve düşük Ni konsantrasyonlarına sahip orta ve yüksek alaşımlı çeliklerin, çelikteki karbon difüzyonunu önemli ölçüde azalttığı ve bu nedenle istenen sementasyon derinliğini elde etmek için daha uzun karbürleme sürelerinin gerektirdiği bildirilmiştir [31].

Sabri yaptığı çalışmasında, AISI1045 çeliğinin KOS işleminde yüzey sertliği ve sementasyon kalınlığı bakımından sementasyon süresinin etkisinin sementasyon sıcaklığının etkisinden daha düşük olduğunu tespit etmiştir. 4, 6 ve 10 saat sürelerle yaptığı KOS işlemlerinde en yüksek yüzey sertliği değerlerine (395,7 HV) 950 °C'de 16 saat süreyle yapılan sementasyonda ulaşmıştır [5].

Salawu ve arkadaşları, dişli imalatında kullanılmak üzere KOS işlemine tabi tutulan (900 °C'de 3 saat bekletme süresi ile) gri dökme demir malzemede karbüratör olarak organik karbon kaynaklarının kullanılması konusunda çalışmalar yapmışlardır. KOS deneyleri, toz haline getirilmiş palmye çekirdeği kabuğu, hindistan cevizi kabuğu ve odun kömürü içeren üç organik karbon vericiye aktivatör olarak yumurta kabuğunun

eklenmesiyle gerçekleştirilmiştir. KOS işleminde, her ortam ağırlıkça %70 oranında karbon verici + %30 oranında aktivatör olacak şekilde ayarlanmıştır. Eşit süre ve sıcaklıkta yapılan deneyler sonucunda, odun kömüründe karbürlenmiş gri dökme demirin 116,9 HV olan ilk sertlik değeri 282,5 HV'lik bir artış göstermiştir. Ayrıca, hindistan cevizi kabuğuyla karbürlenmiş gri dökme demirin sertliği odun kömürünün sertliğiyle eşit derecede artmıştır. Bununla birlikte, hurma çekirdeğiyle yapılan KOS işlemindeki çelik yüzeyin sertliği 355,8 HV değeriyle en iyi artışı göstermiştir [32].

Yılmaz yaptığı çalışmada, KOS işleminden yüksek etkili sementasyon derinliği değerini elde edebilmek adına karbürleme süresi, karbürleme sıcaklığı ve aktivatör oranını değiştirerek farklı şartlarda en yüksek etkili sementasyon derinliğine ulaşmıştır. Örneğin; 900 °C'de %3 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> ihtiva eden ortamda 6 saat karbürleme sonucunda 0,769 mm'lik bir sementasyon derinliğine ulaşılırken aynı derinlikten daha fazlası 0,815 mm olarak 1000 °C ve %10 Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> şartlarında 1 saat karbürleme ile elde edilebilmiştir [1].

Wu ve arkadaşları, uçak motorları, helikopterler ve türbin dişlilerinin imalatında yaygın olarak kullanılan düşük karbonlu alaşımlı çelik sınıfındaki AISI9310 çeliğinin KOS işleminin verimliliğini artırmak için ön bilyeli dövme süreci ve ardından gelen KOS işlemini birleştirme stratejisi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Dinamik yükler altında çalışan makine parçalarındaki yorulma arızalarının temel nedeninin KOS işlemiyle oluşturulan yetersiz sertleşme derinliği (YSD) ve yüzey sertliğinden (YS) kaynaklandığı literatürde yer almaktadır. Bu nedenle çalışmada, YSD ile mikroyapı, plastik deformasyon ile YS değerleri arasındaki ilişkinin keşfedilmesi amaçlanmıştır. Deneysel sonuçlar, KOS işleminden önce bilyeli dövme işleminin uygulanmasıyla önerilen stratejinin, KOS yapılmış dişli çeliğinin hem YSD'sini hem de YS'sini arttırmada çok etkili olduğunu göstermiştir. Geleneksel KOS işleminden sonra YSD ve YS'nin yaklaşık 750 mm ve 635 HV olduğu, fakat ön bilyeli dövme işleminin uygulanmasından sonra bu değerlerin sırasıyla 1250 mm ve 672 HV'ye yükseldiği belirtilmiştir [33].

Tang ve arkadaşları, doğrusal olmayan ultrasona dayalı yöntemle 2,5 MHz çalışma frekansına sahip özel bir sensör kullanarak sementasyon derinliğinin tespiti üzerine araştırmalar yapmışlardır. Özel sensörün yapısı, doğrusal olmayan ultrasona dayalı sementasyon derinliğinin tespitinde tasarlanmış, uygulanmış ve doğrulanmıştır. Sensör destek katmanı; ağırlıkça %1 tungsten tozu ve ağırlıkça %80 epoksi reçineden oluşmaktadır. Sensörün yüksek akustik empedans özelliğine sahip olduğu, 8 mm

kalınlığındaki destek katmanının yüksek hassasiyete ve artık titreşim bastırmaya sahip olduğu tespit edilmiştir. Özel sensör, tespit prosedürünü basitleştirmektedir ve tespitin etkinliğini ve kararlılığını artırdığı tespit edilmiştir [4].

Asrofi ve arkadaşları, zincir dişlisi imalatında yaygın olarak kullanılan SS400 çeliğinin KOS ile sertleştirilmesi işleminde, BaCO<sub>3</sub> aktivatörünü sırasıyla %40, %30 ve %20 oranında kullanmışlardır. Karbon kaynağı olarak; bileşiminde %82 karbon içeren mahoni odun kömürü kullanılmıştır. KOS işlemi 850 ve 900 °C'de 1 saat bekletme süresinde gerçekleştirilmiştir. 900 °C'de (tutma süresi 1 saat) %60 odun kömürü + %40 BaCO<sub>3</sub> karışım oranında en yüksek sertlik değeri (677,4 HV) elde edilmiştir [34].

Paul ve arkadaşları, katı atıkların tekrar değerlendirilebilmesi amacıyla yumurta kabuğunun KOS işleminde aktivatör olarak kullanılmasını araştırmışlardır. Karbon kaynağı olarak da kavun kabuğu, şeker kamışı atığı ve çiçek atıkları gibi organik malzemeler kullanılmıştır. %0,25 C içeren düşük karbonlu çeliğe 920 °C'de 5 saat süre ile KOS işlemi yapılmıştır. Şeker kamışı atığı kullanılan KOS işleminde 45,1 HRC'lik bir yüzey sertliği elde edilirken, aktivatör olarak yumurta kabuğu eklenmesi ile yüzey sertliği 45,5 HRC olmuştur. Kavun kabuğu atığı 47,8 HRC'lik bir yüzey sertliği sağlarken, yumurta kabuğu ilavesi ile yüzey sertliği 52,6 HRC olmuştur. Çiçek atıkları çelik üzerinde 56 HRC'lik bir yüzey sertliği sağlarken, yumurta kabuğu eklenmesi ile yüzey sertliği 56,6 HRC olmuştur [35].

Darmo ve arkadaşları, AISI1010 çeliğine 3 saat süreyle 800 °C ve 900°C sıcaklıklarında KOS işlemi yapmışlardır. Karbon verici olarak bambu kömürü ve aktivatör olarak da BaCO<sub>3</sub> kullanılmıştır. Bambu kömürü – BaCO<sub>3</sub> oranları: 90%-10%, 80%-20% ve 70%-30% sırası ile uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre en yüksek yüzey sertliği değeri (606,36 kgf/mm<sup>2</sup>) ve en iyi çekme mukavemeti değeri (496,3 MPa); 900°C sıcaklıktaki, %70-%30 bambu kömürü – BaCO<sub>3</sub> karışım oranında yapılan KOS işlemi ile elde edilmiştir [36].

Hosseini ve arkadaşları, 1.5920 çeliğine 925°C'de farklı sürelerle KOS işlemi yapmışlar ve aktivatör olarak Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kullanmışlardır. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> içeriğinin ağırlıkça %5'e kadar arttırılmasıyla, tüm karbürleme süreleri için sertlik derinliği büyük oranda değişmemiştir. Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> içeriğinin ağırlıkça %11'e kadar arttırılmasıyla sertlik derinliği önemli ölçüde artmıştır. Fakat bu değerden daha yüksek değerlerde dekarbürizasyon oluşması nedeniyle sertlik derinliğinde azalma olmuştur. Maksimum sertlik derinliği, 12 saatlik karbürleme süresi ve ağırlıkça %11 aktivatör kullanılarak elde edilmiştir [37].

Khosravi ve arkadaşları,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  tozunun KOS işleminde aktivatör olarak kullanılmasının işlem üzerine etkileri konusunda çalışmalar yapmışlardır. Bileşiminde %0,21 karbon içeren 1.5920 çeliğinden hazırlanan numuneler  $925^\circ\text{C}$ 'de 3, 5, 8 ve 12 saatlik farklı sürelerde karbürlenmiştir (Şekil 19). Deneyleerde kullanılan  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  karışım oranları ise ağırlıkça %0, %5, %10 ve %15 dir. Deneyleer sonunda optimum etkili sementasyon derinliği değerlerine %11,5 aktivatör ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) kullanımında erişilmiştir. En iyi yüzey sertlik değerine de 12 saat süreyle %10 aktivatör ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) oranı kullanılarak yapılan deneylede ulaşılmıştır (749 VHN) [38].

Negara ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, %0,17 karbon içeriğine sahip çeliğe KOS işlemleri uygulamış ve bu işlemlerde aktivatör olarak  $\text{BaCO}_3$  kullanmışlardır. Karbon kaynağı olarak kullanılan keçi kemiği külü ve bambu kömürünün karbon içeriği sırasıyla %18,95 ve %66,4 olarak daha önceki çalışmalardan belirlenmiştir. KOS işlemleri  $925^\circ\text{C}$ 'de 4 saat süreyle uygulanmış ve sonra yağda soğutma işlemleri yapılmıştır. Uygulamada; %80 keçi kemiği külü + %20  $\text{BaCO}_3$  ve %80 bambu kömürü + %20  $\text{BaCO}_3$  karışım oranları kullanılmıştır. 575,23 HV ile en yüksek yüzey sertliği, toplam sertlik derinliği yaklaşık 1,5 mm olan bambu kömürü karışımıyla karbürlenmiş çelikte elde edilmiştir. Keçi kemiği külü karışımıyla karbürlenmiş çelik, bambu kömürü karışımıyla karbürlenmiş çelikten daha düşük bir yüzey sertliğine (558,13 HV) sahip olduğu fakat, toplam sertlik derinliğinin (2 mm) daha yüksek olduğu belirlenmiştir [39, 40]

Ogo ve arkadaşları,  $\text{BaCO}_3$  ile  $\text{CaCO}_3$  içeren nehir istiridye kabuklarının KOS işlemleri sırasında aktivatör olarak kullanılmasını araştırmışlardır. %0,13 karbon içeren St37 çeliğine  $950^\circ\text{C}$ 'de yapılan KOS işlemlerde karbon verici olarak odun kömürü kullanılmıştır. Deneyleer sonucunda optimum sertlik değerinin %30 nehir istiridye kabuğu ve %70 odun kömürü karışım oranı kullanılarak yapılan karbürleme işlemlerde olduğu gözlenmiştir. % 30'un üzerinde nehir istiridye kabuğunun sertlik değerini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Aktivatör olarak %20  $\text{BaCO}_3$ 'e kıyasla %30 nehir istiridye kabuğu kullanımı daha iyi sonuçlar vermiştir. Nijerya'da nehir istiridye kabuğu bulunabilirliği ve maliyeti açısından  $\text{BaCO}_3$  göre aktivatör olarak kullanımının daha iyi bir alternatif olduğu belirtilmiştir [41].

Okongwu ve arkadaşları, KOS işlemlerde aktivatör malzeme olarak mermer, kireçtaşı ve dolomit kullanımını  $\text{BaCO}_3$  kullanımı ile karşılaştırarak sonuçları incelemişlerdir. Araştırmanın amacı Nijerya'da  $\text{BaCO}_3$  maliyetinin yüksek olması ve ülkede kireçtaşı ve mermer ocaklarının bolca bulunmasından ötürü alternatif malzemeler arayışıdır.

Deneyisel çalışmalar sonucunda en etkili bileşimin %80 odun kömürü, %15 mermer ve %5 baryum karbonattan oluştuğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda sonuçlardan, dolomitin aktivatör olarak kullanımının uygun olmadığı, hatta karbürleme işlemini geciktirdiği anlaşılmıştır [42].

Ramli ve arkadaşları, düşük karbonlu SCM420 çeliğinin KOS işleminde aktivatör olarak dog conch deniz kabuğunun (DCSP) kullanılabilirliği konusunda çalışmalar yapmışlardır. Deneyisel çalışmalarda karbon verici olarak hindistan cevizi kabuğu (CSP) kullanılmıştır. Sonuçlar, optimum karbonlama performansının 950 °C karbürizasyon sıcaklığı, 3 saat bekletme süresi ve %40 DCSP + %60 CSP konsantrasyonu kullanılarak elde edildiğini göstermiştir. %40'ın üzerindeki DCSP konsantrasyonları için karbürlenmiş numunenin karbon içeriğinin azaldığı ve dolayısıyla da sertlik değerlerinde azalma tespit edilmiştir. Bu sebeple, DCSP'nin KOS işlemi için etkili bir enerji sağlayıcı olarak görev yapabileceği fakat aktif karbon kaynağı olarak kullanılamayacağı sonucuna varılmıştır [43].

Thammacot ve arkadaşları, AISI1010 çeliğinden imal edilen bıçağa uyguladıkları KOS işleminde karbon kaynağı olarak okalipüt kömürü ve aktivatör olarak da yumurta kabuğu ve kalsiyum karbonat kullanmışlardır. Yumurta kabuğu bileşiminde %94,12 oranında kalsiyum karbonat bulunmaktadır. KOS işlemi: 900, 950 ve 1000 °C sıcaklıklarda 30-60-90 dakika sürelerinde uygulanmıştır. İlk grup ağırlıkça %10 kalsiyum karbonat ve ağırlıkça %90 okalipüt kömürü kullanılarak kutuya yerleştirilmiş, ikinci grup ise ağırlıkça %10 yumurta kabuğu ve ağırlıkça %90 okalipüt kömürü kullanılarak kutuya yerleştirilmiştir. Karbürlemenin ardından havada soğutma gerçekleştirilmiştir. Östenitleştirme için 780°C'de 20 dakika bekletilmiş ve soğutulmuştur. Son olarak bıçaklar 180°C'de 1 saat süreyle temperlenmiştir. Deney sonucunda bıçağın yüzey sertliği ile karbürleme sıcaklığı ve süresinin doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. 1000 °C'de 90 dakika KOS işlemi sonrasında, aktivatör olarak CaCO<sub>3</sub> kullanılan numunede 790 HV sertlik değerine ulaşılırken, aktivatör olarak yumurta kabuğu kullanılan numunede 780 HV sertlik değerine ulaşılmıştır [44].

Qin ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, KOS işleminin malzeme özellikleri, yüzey sertliği, artık gerilmeler, yüzeyi sertleştirilmiş 18CrNiMo7-6 çeliğinin kalan östeniti ve bunun sonucunda ortaya çıkan yorulma mukavemeti üzerindeki etkileri incelenmiştir. KOS işleminin 18CrNiMo7-6 çeliğinin yorulma dayanımını önemli ölçüde arttırdığı tespit edilmiştir. Karbürlenmemiş numuneler için yorulma sınırı 680

MPa iken KOS işlemi sonrasında 1108 MPa değerine yükselmiş ve bu sayede %62,9 oranında mukavemet artışı sağlanmıştır. Yüksek sertlik ve yorulma dayanımı değerleriyle, yorulma çatlaklarının başlamasının engellenebildiği tespit edilmiştir [45]. Karaca yaptığı çalışmada, 1,2344 sıcak iş takım çeliklerine KOS işlemi kullanarak değişik sıcaklıklarda 2 saat süreyle Vanadyum Karbür (VC) kaplama gerçekleştirmiştir. Vanadyum karbür kaplama ile korozyona karşı dayanımı ve aşınmaya karşı direnci artırma amaçlanmıştır. KOS işlemi; 900 °C, 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda ve 2 saat bekleme sürelerinde uygulanmıştır. Sementasyon kutusu içerisine 65 mikron altı Ferro Vanadyum, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve amonyum klorür (NH<sub>4</sub>Cl) ilave edilmiştir. Daha sonra numuneler kutuya yerleştirilmiş ve bir miktarda silisyum karbür ve dökme demir talaşı eklenerek numunelerin üzeri kapatılmıştır. Böylece numunelere oksijenin difüze olmasının önüne geçilmiştir. Deneyler sonucunda; sıcaklığın artmasıyla tane boyutlarında belirgin bir değişiklik olmadığı belirtilmiştir. Elde edilen VC kaplama tabakalarının yüzeylerde homojen olarak kaplandığı görülmüştür. Sıcaklığın artmasıyla kaplama kalınlığının da arttığı görülmüştür. Kaplama sonrası ana malzeme sertlik değerlerinin, sıcaklık değeri arttıkça arttığı tespit edilmiştir [46].

Tong ve arkadaşları, KOS işlemiyle Ni bazlı bir süper alaşım üzerinde düşük sıcaklıkta alüminid kaplamaların oluşumu üzerine çalışmalar yapmışlardır. Paket tozları (toplamda 20 g) saf Al tozu,  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dolgu maddesi ve NH<sub>4</sub>Cl aktivatöründen oluşmaktadır. Yüksek yoğunluk ve homojenlik özelliği taşıyan kaplamaların iki katmanlı bir yapıya sahip oldukları belirtilmiştir. Üst katman esas olarak Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub> ve Al<sub>3</sub>Ni'den oluşurken, alt katman Al<sub>3</sub>Ni<sub>2</sub>'den oluşmaktadır. Paket NH<sub>4</sub>Cl içeriğinin alüminizasyon işlemi üzerindeki etkisi, paket Al içeriği ağırlıkça %10'da sabit tutulurken paket NH<sub>4</sub>Cl içeriği ağırlıkça %5'ten ağırlıkça %30'a değiştirilerek araştırılmıştır. İşlem sıcaklığı ve kaplama süresi sırasıyla 700 °C ve 8 saattir. Deneysel sonuçlardan, paket aktivatör (NH<sub>4</sub>Cl) içeriği dışındaki tüm parametrelerin kaplama kalınlığı üzerinde etki yarattığı fakat mikroyapı ve bileşen dağılımı üzerinde etki yaratmadığı tespit edilmiştir. NH<sub>4</sub>Cl içeriğinin kaplama kalınlığını, yapısını ve bileşen dağılımını etkilemediği belirtilmiştir. Kaplama kalınlığı ile biriktirme süresi arasındaki parabolik ilişki, sürecin difüzyon kontrollü olduğunu göstermiştir. Ayrıca, kaplama kalınlığı ile karşılıklı biriktirme sıcaklığı arasında doğrusal bir ilişki olduğu sonucuna varılmıştır [47].

Yılmaz ve arkadaşları, KOS yöntemiyle Ti6Al4V alaşımı üzerine alüminid esaslı kaplama üretimi yapmışlardır. Ti6Al4V numunelerin kaplama işleminde; alüminyum

kaynağı olarak Al, aktivatör olarak da  $\text{NH}_4\text{Cl}$  tozları ve dolgu malzemesi olarak  $\text{Al}_2\text{O}_3$  tozu kullanılmıştır. Açık atmosferli bir fırında 4, 6 ve 8 saat sürelerinde,  $700^\circ\text{C}$  sıcaklıkta alüminyum kaplama işlemleri uygulanmıştır. Gerçekleştirilen X-ışını (XRD) analizlerinde kaplama tabakası üzerinde  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{TiAl}_2$ ,  $\text{TiAl}$  ve eser miktarda  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fazları görülmüştür. Bekleme sürelerine bağlı olarak kaplama tabakası kalınlığının 12-20  $\mu\text{m}$  arasındaki değerlerde olduğu tespit edilmiştir. Meydana gelen titanyum alüminid tabakasında 578-650 HV arasında sertlik değerleri elde edilmiştir [15].

Son zamanlarda magnezyum alaşımları havacılık sanayisinde geniş uygulama alanları bulmaktadır. Tercih edilmelerinin sebebi ise; yüksek mukavemet, büyük elastiklik modülü ve iyi ısı dağılımı göstermeleridir. Bunca iyi mekanik özelliğe karşın magnezyum alaşımlarının korozyon dirençleri oldukça düşüktür. Günümüzde korozyon dirençlerini arttırmak için çeşitli kaplama işlemleri yapılmaktadır. Hu ve arkadaşları, AZ31 magnezyum alaşımı üzerine KOS yöntemi ile Al içeren kaplamalar konusunda çalışmalar yapmışlardır. Çalışmada Al kaynağı olarak  $\text{AlCl}_3$ , aktivatör olarak %50 oranında sodyum klorür ( $\text{NaCl}$ ) kullanılmıştır. Numuneler  $400^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 8 saat ısıtıldıktan sonra fırında oda sıcaklığına kadar soğutulmuşlardır. Yapılan işlem alaşımın korozyon direncini ve yüzey sertliğini etkili bir şekilde arttırmıştır. Yüzey sertlik değeri ham malzemede 53 HV iken, kaplama işlemi sonrasında bu değer 167 HV'ye ulaşmıştır [48].

Kahrıman ve arkadaşları, AISI316L çeliğinin KOS yöntemiyle krom (Cr) kaplanmasını bir difüzyon problemi olarak ele almış ve kaplama biriktirme işleminin kinetiğini incelemişlerdir. Sıcaklık, zaman ve yüzeylerde oluşan kaplama katmanlarının bileşimleri gibi proses değişkenlerinin etkisi Thermo-Calc yazılımı ile termodinamik olarak ve DICTRA (Diffusion Controlled TRANSformations) modülü ile kinetik olarak incelenmiştir. Altlık yüzeyinde Cr birikmesi sırasında karbon difüzyonuna bağlı olarak yüzeyde hızla bir krom karbür ( $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ) oluştuğu görülmüştür. Krom karbür dışı doğru karbon difüzyonu ve kromun karbona karşı güçlü afinitesi reaksiyonu nedeniyle oluştuğu bildirilmiştir. Bu tür karbür tabakanın oluşumu, Cr'nin altlık yüzeyinden difüzyonunu bloke etmesi ve çelik içeriğindeki karbonu lokal olarak taşıyarak dekarbürizasyona neden olduğu sonucuna varılmıştır [49].

Lu ve arkadaşları, AZ91D magnezyum alaşımı (ağırlıkça %9,3 Al, ağırlıkça %0,63 Zn, ağırlıkça %0,32 Mn ve kalanı Mg içeren) üzerine KOS yöntemiyle kaplama

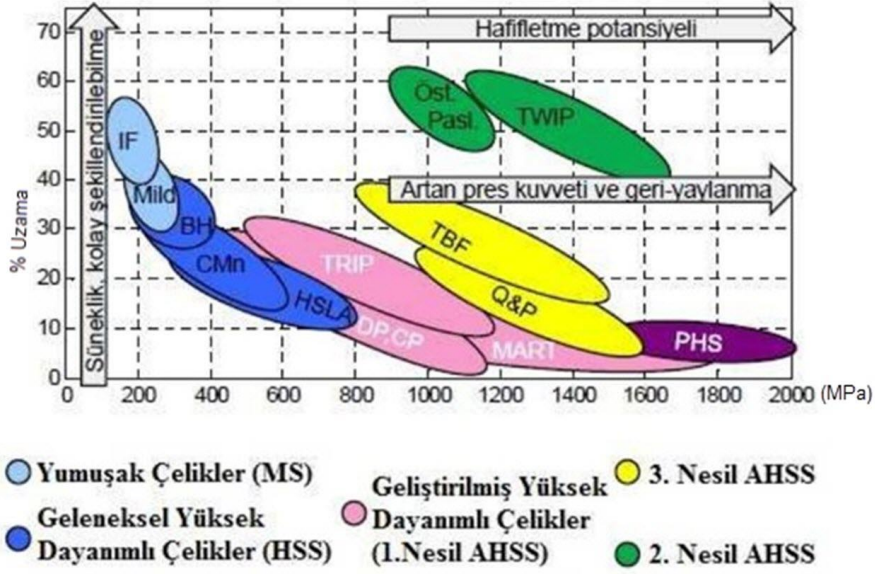
yapılmasında, difüzyon süresi ve difüzyon sıcaklığı üzerine deneysel çalışmalar yapmışlardır. Sonuçlara göre 10 g çinko oksit (ZnO) ve 1 g NH<sub>4</sub>Cl içeren difüzyon kaynağının etki süresi 400 °C’de 150 saat civarında olduğu tespit edilmiştir. Daha gevşek ve saf bir difüzyon kaynağının kutunun daha iyi hava sızdırmazlığı sağlanmasında yardımcı olarak KOS süresinin kısaltılmasına katkı sağlayabileceği sonucuna varılmıştır. Daha kalın Zn açısından zengin difüzyon alaşımlı kaplamanın imalatı için difüzyon kaynağının daha uzun bir ön ısıtmaya tabii tutulması gerektiği tespit edilmiştir. Aktif fazın yüksek sıcaklıklarda sürekli tüketimi, difüzyon kaynağının arızalanmasına yol açabileceği belirtilmiştir. Etkin olmayan bir difüzyon kaynağının ana bileşimi ZnO olduğundan böyle bir difüzyon kaynağı yeni NH<sub>4</sub>Cl tozu eklenerek yeniden etkinleştirilebileceği sonucuna varılmıştır [50].

Yamanel ve arkadaşları, Baybora-2 tozu kullanarak AISI1020 çeliği üzerinde KOS ile kaplama işlemi deneyleri yapmışlardır. İşlem sonrası numunelerdeki kinetik ve mekanik özellikler üzerindeki değişimler incelenmiştir. KOS işlemini 2, 4 ve 6 saat sürelerde 950 °C ve 1050 °C sıcaklıklarda uygulamışlardır. İşlem süresi ve sıcaklığının artmasıyla yüzeyde oluşan borür tabakası kalınlığının arttığı tespit edilmiştir. 950 °C sıcaklıkta uygulanan KOS işlemi ile kaplamada en çok 196,3 µm kaplama kalınlığına ve 1050 °C sıcaklıkta uygulanan KOS işlemi ile kaplamada ise en çok 304,7 µm kaplama kalınlığına ulaşılmıştır. Numune olarak kullanılan AISI1020 çeliğinin herhangi bir işlem yapılmaksızın sertlik değeri 168 HV iken, yapılan kaplama işleminden sonra yüzey sertlik değeri, sementasyon ve nitrüleme gibi sıklıkla kullanılan yüzey sertleştirme işlemlerinde elde edilen sertlik değerlerinin yaklaşık 5 katı (2224 HV) olarak elde edilmiştir [51].

### 3. IF ÇELİKLERİ

Ara yer atomsuz çelikler (IF çelikleri), yüksek süneklik elde etmek için matrislerinde minimum miktarda ara yer elemanı içerecek şekilde tasarlanmış bir çelik sınıfıdır. Endüstriyel üretimlerine, derin çekme uygulamaları için maliyetlerden ödün vermeden daha fazla şekillendirilebilirliğe sahip çelikler üretmek amacıyla başlanmıştır. Japonya'da 1970'lerde vakumla gaz giderme teknolojisinin kullanılmaya başlanmasının ardından ticari olarak geliştirilen geleneksel IF çelikleri, 40 - 70 ppm aralığında karbon ve 30 -50 ppm aralığında nitrojen içermekteydi. Daha sonra ara yer C ve N atomlarını stabilize etmek için bu çeliklere niyobyum (Nb) ve/veya titanyum (Ti) eklenmiştir. Bugün beyaz eşya üretimi ve otomotiv gövde sacı imalatına yönelik talep nedeniyle dünyanın birçok yerinde IF çelikler üretilmektedir. IF çelikleri, vücut merkezli kübik (BCC) kristal yapıya ve ultra düşük karbon ve nitrojen içeriğine (ağırlıkça %0,003'ten az) sahiptir. Aynı zamanda ferritik bir matrise sahiptir. Çok düşük seviyelerde ara yer atomu elde etmek amacıyla imalat süreci esnasında modern vakumlu gaz giderme teknikleri kullanılır. Ti ve/veya Nb gibi mikroalaşım elementlerinin eklenmesi, çökeltilerin (karbürler ve nitrürler) oluşmasına yol açar ve böylece IF çeliğinin ferritik matrisi pratik olarak karbon ve nitrojen ara atomlarından arınmış olur. Bununla birlikte, elde edilen yapıya daha derin çekilebilirlik kabiliyeti kazandırılmış olur. Bu çeliklerin geliştirilmesinde en büyük zorluk mekanik dayanım kaybı olarak ortaya çıkmıştır. IF çeliklerinde katı çözültü sertleşmesini sağlamak ve mukavemet özelliklerini iyileştirmek için fosfor, Mn ve Si ile alaşımlandırılması (IF-HS çelikleri) gerekir. IF çeliklerine titanyum eklenmesi konusunda birçok çalışma yapılmıştır. Fakat sadece Ti, Ti+Nb ve sadece Nb eklenmesini içeren karşılaştırmalı çalışmalar daha azdır. IF-Nb çeliği kırılma dayanımına karşı IF-Ti'den daha iyi bir direnç sağlamaktadır. Böylece her iki unsurun birleşimi geliştirilmiş özelliklere sahip bir IF çeliği üretilmesine olanak sağlar. Fakat Ti, Nb ve P kombinasyonunun çeliğin özelliklerine etkisi mevcut uygulamalarda kolaylıkla bulunamamaktadır. IF çeliklerinde C ve/veya N gibi çözünen maddeler bulunmadığından bu çelikler

yaşlanmazlar [52, 53, 54]. Şekil 3.1’de farklı çelik gruplarının % uzama – dayanım eğrisi görülmektedir.

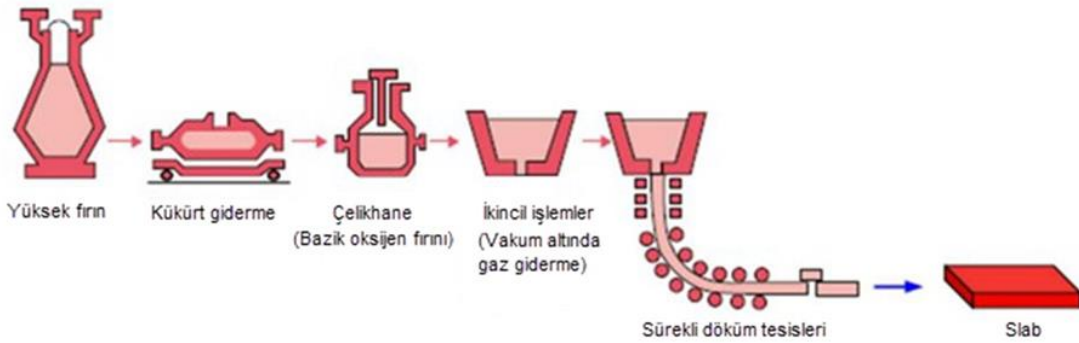


Şekil 3.1. Farklı çelik guruplarının % uzamaya karşılık dayanım grafiği [54, 55]

### 3.1. IF Çeliklerinin Üretim Süreçleri

Çeliğin vakum altında gaz giderimi (İng; Vacuum Degassing) prosesiyle teknolojik anlamda çeliğin geliştirilmesi adına girişimler başlamıştır. Dortmund Hoerde 1950 yılında sirkülasyon tipi gaz giderme prosesini geliştirmiştir. Bu süreçle aynı zamanda Ruhrstahl-Heraeus firması resirkülasyon tipi gaz giderme sistemini ortaya çıkarmıştır. Sonraki yıllarda vakum altında ark yoluyla gaz giderme sistemi üzerinde çalışmalar yapılarak 1960’lı yılların sonuna doğru paslanmaz çeliklerin ve IF çeliklerin üretilmesini sağlayan pota veya konvertörde vakumlu oksijen dekarburizasyonu (İng; Vacuum Oxygen Decarburization in Laddle or Convertor) sistemleri ortaya çıkmıştır. Son yıllarda geliştirilen devridaim gaz giderme (İng; Recirculation Degassing) ve Kawasaki üst üfleme (İng; Kawasaki Top Blowing) prosesleri sayesinde çok daha düşük miktarda nitrojen ve karbon seviyelerine inmek mümkün hale gelmiştir. Şekil 3.2.’de görüldüğü üzere IF çeliklerinin üretimi, ilk olarak yüksek fırınlarda kimyasal bileşimi sürekli istikrarlı haldeki pik demirin elde edilmesi ile başlamaktadır. Bileşimde olmaması istenen elementler, yüksek fırına malzemelerin eklenmesinin ardından başlangıçta düşük seviyelerde tutulur. Süreç, yüksek fırında pik demirin üretilmesinin ardından ilk olarak desülfürizasyon ve sonrasında konvertör tipi fırınlarda rafinasyon, pota karıştırma, vakum altında gaz giderme ve en sonunda da

sürekli dökümü içermektedir. Ergimiş metal, torpidolar ile desülfürizasyon ünitesine gelerek işleme tabi tutulmaktadır. Bu ünite de Co-enjeksiyon yöntemiyle sülfür (S) miktarı %0,01' den daha düşük seviyelere indirilir. Kısacası bu ünite de desülfürizasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Burada karpit (Kalsiyum ve magnezyum içeren karışım) eklenir ve kimyasal bileşim homojen hale getirilir. Desülfürizasyondan geçen ergimiş haldeki metal 25-35 dakika süreyle konvertör fırınlarında rafine edilmektedir. Üstten üfleme bazik oksijen fırın (BOF)'larında  $O_2$  fırın içerisine su soğutmalı bir lans vasıtasıyla üstten üflenmektedir. Dekarbürizasyon, oksijenin sıvı metal ile tepkime göstermesiyle çelik üretim fırınlarında meydana gelmektedir. Ergimiş çelik içerisinde C erir ve  $CO+CO_2$  gazları oluşur. Karbon giderme oranı, lans ile üflenen  $O_2$  miktarı ile belirlenmektedir. Bu oran, sıvıdan karbonun kütle transferinin kontrol altına alınması ile %0,3 C oranına kadar üfleme zamanıyla lineer olarak azalır. Dekarbürizasyona ek olarak,  $O_2$  üfleme esnasında süreçlerin tamamında önemli veya daha az miktarda demir oksitler oluşmaktadır.  $O_2$  üflenmesi ardından karbonun ara yüzeyde geçiş oranı daha sınırlayıcı bir orana ulaşılmaktadır. Konvertör fırınlarının, üfleme sonrasında karbon uzaklaştırabilme yeteneği, alttan karıştırma gücüne bağlı olmaktadır. BOF alttan karıştırma özelliğine sahip değilse, %0,03'e yakın miktarlarda karbon elde edilebilmektedir [54, 55].



**Şekil 3.2.** Sürekli döküm yöntemiyle IF çeliği üretim diyagramı [54, 55]

IF çeliklerin üretilmesinde, amaçlanan karbon miktarına ulaşmak önemlidir. Hedeflenen karbon miktarını elde edebilmek, gaz giderme süresini direkt kontrol edebilmek sayesinde mümkün olmaktadır. Nippon Steels şirketinde yapılan çalışmalar, fırınlarda azot uzaklaştırılmasını hızlandırmak için alttan karıştırma gazı olarak argon (Ar) gibi  $CO_2$ 'inde kullanılabileceğini göstermiştir.  $CO_2$  ile karıştırma sebebiyle 4 ppm oranında N miktarında bir azalma belirlenmiştir. İkincil çelik üretimi için potada gaz giderme çok yönlü kullanımı olan bir süreçtir. İşlem esnasında vakum

ortamının olduğu bir üniteye konulan potada ya da vakum kapağı ile kapatılan bir potada, alttan karıştırma ile gaz giderme ve karbon giderme işlemleri yapılmasını sağlar. İnert gaz karıştırma ünitesinin yardımı ile çalkalanarak sıcaklıkta homojenizasyon sağlanmaktadır. Aynı esnada reaktif yüzey alanı arttığından H<sub>2</sub>O ve N miktarları da azalmaktadır ve hidrojenin uzaklaştırılması anında sentetik cüruf ilave edilirse kükürt miktarında da azalma görülür. Bu süreçle, vakum altında karbon giderme nedeniyle 300 ppm başlangıç karbon değerinden, 20 ppm karbon değerine inilmektedir. Hidrojen miktarı ise 2-3 ppm'in daha altındaki değerlere indirilebilmektedir. Metal olmayan inklüzyonların uzaklaştırılması haricinde çeliğin temizlik durumu mükemmel yakın olmaktadır. Vakum altında gaz giderme sebebiyle daha yüksek alaşım verimi sayesinde alaşımda tasarruf sağlanmaktadır [53, 54, 55, 56, 57].

### **3.2. IF Çeliklerinin Sınıflandırılması**

IF çelikleri Türkiye'de sadece Ereğli Demir ve Çelik Fabrikaları A.Ş. firması tarafından üretilmektedir. Çizelge 3.1.'de firmanın ürettiği IF çeliklerinin kimyasal içeriği ve kalite numaraları, Çizelge 3.2.'de ise mekanik özellikleri verilmiştir. IF çelikleri endüstride kullanımına göre 5 sınıfa ayrılabilir. Bunlar; ultra düşük karbonlu (ULC), ekstra derin çekilebilen kalitede (EDDQ), yüksek mukavemetli (HSS), fosforlu IF çelikleri (P-IF) ve fırında sertleştirilebilen (BH) IF çelikleridir. Yine içeriğindeki Nb ve Ti elementlerine göre de IF-Nb, IF-Ti ve IF-Ti-Nb çelikleri olarak da sınıflandırmak mümkündür. IF çeliklerinin imalat sanayisinde hammadde olarak kullanımı genellikle sac ve levha formundadır. Farklı kalınlıklarda ve farklı ebatlarda sac formları stok malzeme olarak tedarik edilmektedir.

**Çizelge 3.1.** Erdemir A.Ş. tarafından üretilen IF çeliklerin kalite numaraları ve kimyasal bileşimleri [58]

Standart	Kalite	Erdemir Kalite No	C % max	P % max	S % max	Mn % max	Ti %
EN10130	DC01	7122	0.12	0.045	0.045	0.60	0.050-0,060
EN10130	DC03	7123	0,1	0,035	0,035	0,45	0,065-0,070
EN10130	DC04	7114	0,08	0,030	0,030	0,40	0,065-0,075
EN10130	DC04	145	0,07	0,030	0,025	0,35	0,085-0,095
EN10130	DC05	7115	0,06	0,025	0,025	0,35	0,085-0,095
EN10130	DC06	7116	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3

**Çizelge 3.2.** Erdemir A.Ş. tarafından üretilen IF çeliklerin bazı mekanik özellikleri [58]

Standart	Kalite	Erdemir Kalite No	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (Mpa)	Uzama (%)
EN10130	DC01	7122	280	270-410	28
EN10130	DC03	7123	240	270-370	34
EN10130	DC04	7114	210	270-350	38
EN10130	DC04	145	190	270-330	40
EN10130	DC05	7115	180	270-330	40
EN10130	DC06	7116	170	270-330	41

### 3.2.1. Ultra Düşük Karbonlu IF Çelikleri

Otomotiv endüstrisinde kullanılan çelik sacların yüksek şekillendirilebilme kabiliyetlerine sahip olması gerekmektedir. IF çeliğinin alaşım tipine bağlı kalarak şekillendirme ve derin çekme kabiliyetinde olan ULC yüksek mukavemetli çelikler günümüzde üretilmektedir. Bu çelikler diğer IF çelik tiplerine göre daha düşük karbon oranına sahiptirler. Aynı zamanda Nb ve Ti elementleri de içermektedirler. Nb ve Ti'nin çabuk çözülmesini engellemek için düşük tavlama sıcaklıkları kullanılmaktadır. Yavaş soğutma süreci ise yüksek kristalleşmeye sebep olmaktadır. Bu sayede çeliğin elastik özelliği azalırken çekme ve akma mukavemeti artmaktadır [53, 54, 57, 59].

### **3.2.2 Ekstra Derin Çekilebilen Kalitede IF Çelikleri**

Yeniden kristalleşmiş malzemelere yani karbonitrürlerin kabalaşmasıyla çelik saclar iyi soğuk şekil verilebilme özelliği kazanmaktadır. Katı eriyik sertleşmesi EDDQ IF çeliklerinde mukavemeti arttırmak için kullanılmaktadır. Mn ve Si bu şartlara en uygun elementlerdir. %0,1 Si alaşımlaması çekme mukavemetini yaklaşık 10 MPa, %0,1 Mn alaşımlaması ise çekme mukavemetini 4 MPa kadar arttırmaktadır. Mukavemete etkisi en yüksek element ise fosfordur. Çelik sacın düşük kuvvetlerle preslenebilmesi fırında sertleşebilirlik özelliği sayesinde ve otomotiv sanayisinde talep edilen bir özelliktir. Bu sayede yüksek mukavemetli son ürün garanti edilir. Dislokasyonları ara yer atomları tarafından kilitleyen bir Cottrell etkisi fırın sertleştirilmesi sayesinde gerçekleşir. Bu yüzden 5 ppm'nin altında olmayan bir miktardaki karbon çelikte bulunmalıdır [53, 54, 57, 59].

### **3.2.3. Yüksek Mukavemetli IF Çelikleri**

HSS çeliklerde, akma noktasının düşük, r (incelmeye karşı gösterilen direnç ölçüsü) değerinin yüksek olması istenir. Çünkü sacın preslenmesi esnasında yüzeyde eğilme, kopma ve kulaklanma olması istenmez. DP (Çift fazlı çelikler) ve çökeltme ile sertleştirilmiş olan sacların r değeri 1-1,3 aralığında olmasına rağmen mukavemet olarak uygundur. Otomobillerin dış saclarında bu çeliklerin kullanılmamasının sebebi de tam olarak budur. Eğilme olmaması için çekme dayanımı değeri 240 MPa olmalıdır. Otomotiv endüstrisinde "r" değeri 2 olan HSS IF çelikleri yoğun olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte HSS IF çelikleri, Ti+Nb veya Ti içeren IF çeliklerine Mn, P ve Si eklenerek sertleştirilmektedir. Çekme mukavemeti bu şekildeki sertleştirme sayesinde 400 MPa değerlerine ulaşabilmektedir [53, 54, 57, 59].

### **3.2.4. Fosforlu IF Çelikleri**

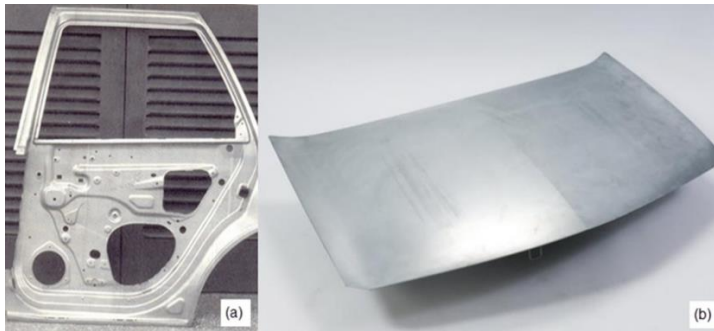
P-IF çelikleri katı-eriyik sertleştirilmesi sayesinde daha iyi mukavemet özelliklerine sahiptir. Son zamanlarda katı eriyik sertleştirilmesi için kullanılan en iyi alaşım elementi fosfordur. Soğuk işlem gevrekliğine sebebiyet vermesi P elementinin olumsuz yanıdır. Bu nedenle P ile çeliğe katı-eriyik sertleşmesi kazandırılırken, tane sınırlarında da fosforun hareketinin engellenmesi gerekmektedir. Bu sayede mekanik özellikleri daha iyi, alaşım elementi oranı daha az olan P-IF çelikleri üretilebilmektedir. Önceki yıllarda 220 MPa bir akma mukavemeti için kullanılan IF bileşimi son zamanlarda 260 MPa'lık bir akma mukavemeti elde etmek için kullanılmaktadır [53, 54, 57, 59].

### 3.2.5. Fırında Sertleştirilebilen IF Çelikleri

BH-IF çelikleri, düşük mukavemetli ve kolay işlenebilen bir çeliktir. Bu çelikler %2 çekme deformasyonu ve 270 MPa akma mukavemeti sağlayacak şekilde üretilmişlerdir. Otomotiv endüstrisinde son halini almadan önce depolama sırasında yaşlanmaya karşı daha dayanımlı olacak şekilde üretilmişlerdir. BH-IF çelikleri, şekil verme sırasında yaşlanmaya başlamaktadır. Boya kurutma fırınlarında ısıtıldıktan sonra çelik tamamen yaşlanmış olmaktadır. BH-IF çelikleri otomotiv endüstrisinin şekil verilebilirlikten ödün verilmeden, artan ezilme durumuna dayanımlı parçaların üretimini sağlamaktadır [53, 54, 57, 59].

### 3.3. IF Çeliklerinin Kullanım Alanları

IF çelikleri kaynaklanabilirliği, çok iyi yüzey özellikleri ve derin çekilebilir özellikleri sayesinde çelik sac kullanan çoğu endüstride kullanılabilir. Günümüzde IF çeliği, derin çekme operasyonları için en uygun maliyetli malzeme olarak bilinmektedir. Otomotiv gövdesinden elektronik bileşenlere, emaye eşyalardan ev aletlerine kadar geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Üretilen IF çeliklerin %50 oranındaki miktarı otomotiv endüstrisinde, %16 oranındaki miktarı elektronik eşya üretiminde, %7 oranındaki miktarı beyaz eşya sanayisinde ve %27 oranındaki miktarı da çeşitli üretim sektörlerinde parça üretiminde kullanılmaktadır. Yüksek dayanımlı ve soğuk haddelenmiş IF çelikleri; otomobillerin ön çamurluk, kapı içi güvenlik barları, kapı dış sacları, ön kaput (Şekil 3.3.) gibi yüksek dayanım istenen kısımların üretilmesinde kullanılmaktadır. Beyaz eşya endüstrisindeyse çamaşır ve bulaşık makinelerinin gövde bölümünün imalinde ve motorla gövde arasındaki bağlantı parçalarının imalinde sıklıkla kullanılmaktadır [54, 59, 60].



Şekil 3.3. IF 210 Çeliğinden üretilmiş otomobil parçaları: a) kapı ve b) ön kaputu

[61]

### 3.4. IF Çelikleri Konusunda Literatür Araştırması

Cantergiani ve arkadaşlarının çalışmasında, hızlı bir şekilde yüksek mukavemetli ara yer atomsuz çelik elde etmek için yeni bir süreç araştırılmıştır. İnce IF çeliği levhalarının bir veya her iki tarafı amorf bir FeC filmi ile kaplanmış ve iki aşamalı bir indüksiyonlu ısıtma döngüsüne (1100 °C, ardından 780 °C'de 2 veya 4 dakika izotermal tutma) ve daha sonra suda hızlı bir soğutmaya tabi tutulmuştur. Çekme dayanımı özelliklerinde, 2 dakikalık indüksiyonlu ısıtmadan sonra 374 MPa'lık bir akma gerilimi ve 448 MPa'lık bir nihai çekme gerilmesi değeri elde edilmiştir. 4 dakikalık indüksiyonlu ısıtmadan sonra, akma gerilimi ve nihai çekme gerilimi sırasıyla 206 ve 320 MPa'a düşmüştür. Yüzeyden merkeze Vickers mikrosertlik ölçümleri, 2 dakikalık indüksiyonlu ısıtmadan sonra daha yüksek sertlik değeri (193-232 VHN) elde edildiği doğrulanmıştır. Taramalı elektron mikroskobu (TEM) vasıtasıyla, güçlendirmenin dislokasyonlardan ziyade katı çözültideki karbondan ve nano boyutlu titanyum karbür (TiC) parçacıklarının çökmesinden kaynaklandığı ortaya konmuştur [62].

Kim ve arkadaşlarının çalışmasında, oda sıcaklığında birçok eksenli diyagonal dövme işlemi kullanılarak, dövme kusurları oluşmadan 4 çevrime kadar gerçekleştirilmek suretiyle IF çeliğinden yapılmış sağlam iş parçaları üretilmiştir. Deforme olmuş numunelerde oluşan mikroyapılar optik mikroskopta analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Döngü sayısı arttıkça, ortalama tane boyutu kademeli olarak azalmış ve hem ortalama yanlış yönelim açısı hem de yüksek açılı tane sınırlarının oranı artmaya devam etmiştir. Döngü sayısı arttıkça, dinamik toparlanmanın meydana gelmesi nedeniyle gerekli dislokasyon yoğunluğundaki değişikliğin önemsiz olduğu tespit edilmiştir. Çok eksenli diyagonal dövmenin oluşturduğu ultra ince taneli yapı, döngü sayısındaki artışlarla sertliği ve akma dayanımını sürekli olarak arttırdığı tespit edilmiştir [63].

Bayraktar ve arkadaşları, IF çeliklerinin farklı kaynak işlemleri esnasında tane büyümesi mekanizması üzerine araştırmalar yapmışlardır. Yapılan deneylerde numunelere; 10 V gerilim ile tungsten inert gaz (TIG) kaynağı, 1 V gerilim ile nokta direnç kaynağı ve 1,5 ile 4 kW lazer kaynağı uygulanmıştır. Kaynaklı bağlantılardaki görsel muayeneler, füzyon hattının yakınında çok büyük taneciklerin bulunduğunu ve bunların ısı akışının yönleri boyunca uzandığını göstermektedir. Bu olayın bazı IF

çeliklerinde füzyon hattından belirli bir mesafede meydana geldiği ve elde edilen maksimum sıcaklığın Ac3'ün (faz dönüşüm sıcaklığı) biraz üzerinde olduğu bölgelere karşılık geldiği tespit edilmiştir. Aşırı tane büyümesi büyük ölçüde dönüşüm sıcaklığı ve ara yüzey hareketliliği civarındaki yerel termal gradyan değerine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Yüksek bir termal gradyan durumunda, tanecik büyümesi termal gradyan boyunca füzyon bölgesi yönünde meydana geldiği görülmüştür. Çok düşük bir dönüşüm sıcaklığının tercih edildiği küçük bir termal gradyan durumunda, çekirdeklenmenin hızla baskın bir hale geldiği ve büyük tanelerin oluşumunu engellediği görülmüştür. Pratik açıdan, ya kaynak koşulları IF çelikler için 1000 °C/mm'nin altında yerel termal eğimlere yol açacak şekilde seçilmeli ya da bor (B) içeren IF çelikleri (B içeriği %5 x10<sup>-3</sup> ila %10 x10<sup>-3</sup> arasında değişen) tercih edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [64].

Koizumi ve arkadaşlarının çalışmasında, yüksek plastik deformasyon ve peşi sıra tavlama işlemiyle farklı tane boyutları ve dislokasyon yoğunluklarına sahip IF çeliklerin kalıcı deformasyonları araştırılmıştır. Kalıcı güç, plastik deformasyonun tekrarlanmasıyla artmış ve ardından gelen düşük sıcaklıktaki tavlama işlemi, kalıcı gücü daha da arttırdığı gözlemlenmiştir. Plastik deformasyon süreçleri esnasında, dislokasyona bağlı güçlendirme baskınken, tane boyutuna bağlı güçlendirmenin zayıf olduğu tespit edilmiştir. Öte yandan, düşük sıcaklıktaki tavlamadan sonra, tane boyutuna bağlı güçlendirme baskın hale gelerek dislokasyonla ilgili güçlendirmenin yerini hızla aldığı belirtilmiştir. İri taneli bir bölgede, tane boyutuna bağlı mukavemet, klasik Hall-Petch ilişkisi ile tutarlı olduğu saptanmıştır. Orijinal Hall-Petch ilişkisinin sadece iri taneli bölgede geçerli olduğu ve plastik şekil değiştirmeye bağlı olarak "tane küçültmeyle güçlendirmeyi" değil, "tavlama nedeniyle tane irileşmesi yoluyla yumuşamayı" gösterdiği doğrulanmıştır [65].

Li ve arkadaşlarının çalışmasında, ekstra sertleşme davranışının (Hall Petch ilişkisi) ve eksenel çekme testlerinden belirlenmesi amaçlanmıştır. Süreksiz akma davranışının altında yatan mekanizmaları netleştirmek için çekme testlerinde ultra ince taneli IF çeliği kullanılmıştır. Farklı çekme koşullarında, IF çeliğinin çekme numunesi için TEM mikrograflarının, makro-verim vermeden önce %1'lik bir mikro gerilme gerilimi yaşadıkdan sonra tane iç kısmında dislokasyon yoğunluğunda bir azalma gösterdiği bulunmuştur. Buna ek olarak, makro-verimden sonra boyun verme bölgesinde %15'lik bir mikro çekme gerilimi ile tane iç kısmında dislokasyon yoğunluğunda bir artış

olduğu TEM vasıtasıyla tespit edilmiştir. Makro verimden önce, tane iç kısmında önceden var olan dislokasyonlar tane sınırına doğru hareket ettiği gözlemlenmiştir. Makro-verimden sonra, tane sınırından patlama benzeri dislokasyon emisyonu ortaya çıkmış ve bu da verim düşüşüne ve süreksiz bir akma davranışına yol açtığı saptanmıştır [66].

Ogawa ve arkadaşlarının çalışmasında, yerinde elektriksel özdirenç ölçümleriyle IF çeliğinin çekme testi sırasında mikroyapısal değişiminin dinamik analizi yapılmıştır. Çekme numuneleri bir güç kaynağına seri olarak bağlanmış ve çekme testi sırasında çekme numunesindeki gösterge bölgesinin elektriksel direnci ölçülmüştür. Elektriksel özdirenç, düzgün uzama aşamasında kademeli olarak artmıştır. Bu artışın sebebinin dislokasyon yoğunluğundaki artışın olduğu tespit edilmiştir [67].

Sıvı çelikteki nitrojen kontrolü, özellikle sıcak metal veya diğer yüklü malzemelerdeki nitrojen içeriğinin yüksek olduğu durumlarda önemli bir konudur. Konvertörde kombine üfleme sırasında nitrifikasyonun giderilmesi, ekstra düşük n içeriğine sahip IF çeliklerinin üretimi için temel bir gerekliliktir. Uygun işletme uygulamalarıyla, sıvı çelikteki nitrojen dökümden önce ortalama 11,1 ppm değerinde kontrol edilebilir. Zhao ve arkadaşları, ara yer atomu içermeyen çelik üretimi sırasında nitrojen kontrolü stratejileri üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu bağlamda, araştırmacılar WISCO'nun (Wuhan Demir ve Çelik Şirketi) çelik üretim tesisinde, taşıyıcı gaz olarak nitrojen ile sıcak metal kükürt giderme işleminden dolayı yüksek nitrojen içeren sıcak metal kullanılarak IF çelik üretimi uygulaması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Kombine bir üfleme konvertör ve bir Ruhrstahl Heraeus tankında nitrojenin uzaklaştırılması için yeni teknolojinin uyarlanması ve transfer işlemleri sırasında nitrojen alımının kontrol edilmesiyle, yaklaşık 18 ppm ortalama nitrojen içeriğine sahip olan nihai ürün üretilebileceği tespit edilmiştir [68].

Yadav ve arkadaşları, ticari sınıf ara yer atomu içermeyen çelikte yeniden kristalleştirme, martenzit ve masif ferrit çekirdeklenmesinin kritikliği üzerine çalışmalar yapmışlardır. Ticari sınıf IF çeliği, östenitik bölgede 925°C'de 5 dakika süreyle ısıtılıp ardından suda soğutulduktan sonra deforme olmuş ve deforme olmamış koşullarda yeniden kristalleşme fazı çekirdeklenmesi açısından araştırılmıştır. Isıl işlemde sonra deforme olmayan numune 385 MPa'lık nihai gerilme mukavemetine sahip, martensit ve masif ferritin çift fazlı bir karışımını sergilediği görülmüştür. Masif ferritin çekirdeklenmesi için üç temel nedenin olduğu sonucuna varılmıştır. Birincisi,

masif ferritin yapı boyutunun çok büyük olması ve bunun ince yeniden kristalize taneler halinde çekirdeklenmesinin zor olmasıdır. İkincisi, yeniden kristalleşmeden sonra geride kalan yok edilemeyen dislokasyonlar, boru difüzyonunu katalize ederek kitlesel dönüşümü devre dışı bırakmasıdır. Üçüncüsü ise, devasa bir yapı boyutuna sahip olan masif ferritin, kusur bölgelerini tercih etmeden homojen bir şekilde çekirdeklenmesi gerektiğidir. Ortadan kaybolmayan dislokasyonların mekanik özellikleri önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Zayıf tane sınırları nedeniyle mukavemetin daha da arttırılmasının zor olduğu görülmüştür [69].

Raj ve arkadaşlarının çalışmasında, düşük yoğunluklu çeliklerin (LDS) IF çeliği ile katı halde birleştirilmesinin araştırılması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, Ni ara katmanı uygulanmış ve uygulanmamış IF-LDS bağlantılarını üretmek için difüzyon bağlama denenmiştir. Difüzyon bağlama; yüksek vakum koşullarında, 10, 20 ve 30 MPa bağlama basınçlarında 850 °C ve 950 °C olmak üzere iki farklı sıcaklıkta 30 dakika süreyle gerçekleştirilmiştir. Ni ara tabakasının 950 °C'de 30 MPa bağlama basıncı altında uygulanmasıyla üretilen bağlantının, maksimum 340 MPa'lık bir kayma mukavemeti ile üstün kayma özellikleri sergilediği tespit edilmiştir. Östenit içinde LDS'den IF'e gelişmiş difüzyon aktiviteleriyle daha yüksek bağlanma basıncı ve Ni ara katmanının uygulanmasının faz içerisinde sağlam bir eklem elde etmede etkili olduğu tespit edilmiştir [70].

Soğuk haddeme ve sıcak haddeme süreçleri çeliklerin mekanik özellikleri üzerinde etkili olmaktadır. Yaşacan ve arkadaşları, endüstriyel ölçekte gerçekleştirdikleri çalışmada, çeliğin kimyasal bileşiminde bulunan Nb ve Ti elementleriyle soğuk haddeme ve sürekli tavlama parametrelerinin optimizasyonu sonrasında IF çeliğinin mekanik özelliklerinde oluşan değişimleri incelemişlerdir. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda Ti+Nb elementleri içeren alaşımlarda, yüksek ezme oranı (%80) ve tavlama sıcaklığında (870°C), yüksek r (anizotropi katsayısı) değeri (3,02) elde edilmiştir [71].

Zaitsev ve arkadaşları, sünekliği arttırmaya yönelik yöntemlerin incelenmesi ve soğuk haddelenmiş Ti-stabilize IF çeliklerin şekillendirilebilirliği konusunda araştırmalar yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmalar, CHGU rejimine göre tavlanan soğuk haddelenmiş IF çeliklerinin, safsızlıklara ve ara elemanlara uygun bir varlık formu vererek süneklik ve şekillendirilebilirliğinde önemli bir artış olasılığını açıkça göstermiştir. Bunun için kükürt içeriğinin, haddeme için çeliğin ısıtılması sırasında

TiS çökeltilerinin stabilitesini ve sıcak haddeleme aşamasında  $Ti_4C_2S_2$ 'de tam karbon bağlanması olasılığını sağlamak için yeterince yüksek (en az ağırlıkça %0,006) olması gerektiği sonucuna varılmıştır. TiS'nin dönüşümü nedeniyle önemli oranda  $Ti_4C_2S_2$  çökeltilerinin olduğu 910-950 °C'lik yüksek haddeleme sıcaklıklarının kullanılmasıyla kolaylaştığı düşünülmüştür. Aksi takdirde, baskın karbon bağlanması  $Ti_4C_2S_2$ 'de değil, TiC'de meydana gelebileceği kanaatine varılmıştır [72].

Klejch ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, otomotiv endüstrisinde kullanılan IF çeliklerinin pres işlemi sonrası mikroyapı değişimleri araştırılmıştır. Deforme olmuş elektronların, elektron geri saçınım kırınım analizleri yapılmıştır. Gerinim oranının etkisi, yüksek hızlı çekme testleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Düşük açılı tane sınırlarının artan oranı, plastisitenin tükenmesini ölçmek için iyi bir parametre olduğu sonucuna varılmıştır [73].

Deardo ve arkadaşlarının çalışmasında, alternatif güçlendirme mekanizmaları kullanılarak IF çeliklerinin dayanımını arttırmanın uygulanabilirliği araştırılmıştır. Daha yüksek karbon, manganez veya krom ilaveleri veya yüksek soğutma hızları kullanmadan tipik düşük sıcaklıkta yapıda ferrit dönüşümleri elde etmenin mümkün olduğu gösterilmiştir. Daha güçlü IF çeliklerine ulaşmanın yolu olarak, yüksek değerli beynitik ferrit yapı üretmek ve bunun için alaşımlamanın kullanılması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. B+Nb+Mo'nun üçlü alaşımı, beynitik bir ferrit yapısı ile en büyük artış gücünü sergilediği tespit edilmiştir [74].

Santos ve arkadaşları, belirli bir alaşım bileşimine Ti, Nb ve P elementleri eklendiğinde IF çeliğinde meydana gelebilecek mikroyapısal ve mekanik özelliklerdeki değişimleri incelemek amacıyla çalışmalar yapmışlardır. Yapılan çalışmalardaki amaç, bu tür elementlerin eklenmesinin, çeliğin mekanik mukavemetinden ödün vermeden mükemmel derin çekme uygulamalarını nasıl sağlayabileceğini ele almaktır. IF çeliğinin yapısına fosfor ilavesinin, diğer IF-Ti ve IF-TiNb çelikleriyle karşılaştırıldığında çeliğin mukavemetini arttırdığını göstermiştir. IF-TiNbP çeliği, yarı kalınlığında ölçülen alfa ve gama fiber yoğunluklarıyla ilgili olarak daha iyi kristalografik doku sonuçları sunduğu tespit edilmiştir. Fakat kristalografik doku analizi yüzeyden ve yarı kalınlıktan alınan ölçümler arasında açık farklılıklar olduğunu ortaya çıkarmıştır. IF-TiNbP çeliğindeki süreksiz akma dayanımı, FeTiP çökeltilerinin oluşumu nedeniyle karbonun katı çözeltide kaldığını göstermektedir. Bu nedenle, fosfor ilavesinden kaynaklanan alaşım güçlendirme ve

tatmin edici kristalografik doku potansiyelinin tamamını kullanmak amacıyla, IF çeliklerinin katı çözümlü karbonunun ve özelliklerini tehlikeye atabilecek aşırı sertleşmenin etkilerini azaltmak için haddeleme işlemlerinin yakından kontrol edilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [52].

Majumdar ve arkadaşları, IF ile IF-HS sacları yorulma çatlak oluşması bakımından incelemiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan IF ve IF-HS çelik saclardaki yorulma hasarının mikromekanizmalarının karakteristik olarak farklı olduğu gözlemlenmiştir. IF çeliğinde yıkıcı yorulma çatlakları, tane sınırlarındaki mikro çatlakların büyümesi ve birleşmesi yoluyla oluşurken, IF-HS çeliğinde kayma bandı çatlaklarının başlaması yorulma arızasının birincil mekanizması olduğu sonucuna varılmıştır. IF çeliğinde tane sınırı çatlaklarının baskınlığı, ara yer çözünen maddelerin tükenmesinden kaynaklanan tane sınırlarının düşük yapışma mukavemetinden kaynaklandığı bildirilmiştir. IFHS çeliğinde B ve Nb'nin tane sınırlarında ayrılması tane sınırı çatlama eğilimini azalttığı tespit edilmiştir [75].

Kancharla ve arkadaşlarının çalışmasında, tavlama süresinin kaplama mikroyapısına, galvaniz tavlı IF çeliğin sürtünme ve elektrokimyasal davranışı üzerine etkileri araştırılmıştır. Sabit bir tavlama izotermal tutma süresinin (10, 20 ve 30 s) etkisi ele alınmıştır. Galvaniz tavlama hazırlanan GA kaplamanın korozyon direnci 30 s'lik tutma süresinde, 10 ve 20 s tutma sürelerine kıyasla önemli ölçüde daha yüksek olduğu bulunmuştur [76].

Kaya ve arkadaşlarının çalışmasında, 1,2 mm kalınlıktaki AISI316L (Yüksek korozyon dayanımlı paslanmaz çelik) ile ekstra derin çekmeye uygun ve yaşlanmaya dayanıklı IF7114 çelikleri farklı parametrelerde nokta direnç kaynağı yöntemiyle birleştirilmiş ve uygulanan parametrelerin kaynaklı birleştirmeye etkisi yapılan deneylerle araştırılmıştır. Birbirine kaynaklı AISI316L ve IF7114 çelikleri ile yapılan çekme-makaslama testleri sonucunda, çekme-makaslama dayanımlarının kaynak süresi artışı, kaynak akımı ve elektrot kuvvetine bağlı olarak arttığı anlaşılmıştır. Yapılan sertlik testlerinde, AISI316L - IF7114 kaynak çekirdeğinde en yüksek sertlik değeri ( $359 \pm 5$  HV) ölçülmüştür. Diğer bölgelerdeki sertlik sırası yüksekten düşüğe doğru; Isı Tesiri Altındaki Bölge (ITAB)'ler (AISI316L ITAB > IF7114 ITAB) ve ana malzemeler (AISI316L > IF7114) olduğu tespit edilmiştir. Yapılan mikroyapı incelemelerinde ise, kaynak süresi, kaynak akımı ve artan elektrot kuvveti ile artan ısı

girdisi nedeniyle IF7114 ITAB'ında belirgin bir tane irileşmesi meydana geldiği ve kaynak çekirdeği kesitinin genişlediği gözlemlenmiştir [77].



## 5. MATERYAL VE METOT

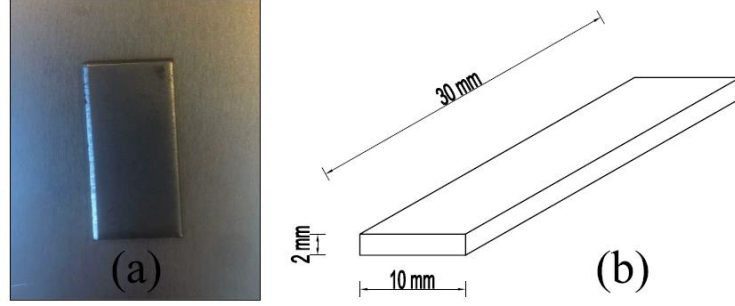
### 5.1. Numune Temini ve Hazırlanması

IF çelikleri ülkemizde sadece Zonguldak ilinde bulunan Ereğli Demir ve Çelik Fab. T.A.Ş. tarafından üretilmektedir. Üretim sac formunda ve en fazla 2 mm et kalınlığına kadar yapılmaktadır. Sementasyon deneylerinde kullanılacak olan Şekil 5.1.'de görülen IF 7114 çeliği Ereğli Demir ve Çelik Fab. T.A.Ş. firmasından 2 mm et kalınlığında ve 50 cm x 50 cm ölçülerinde temin edilmiştir.



**Şekil 5.1.** IF 7114 çeliği

Numunelerin sementasyon işleminde kullanılabilmesi için 30 mm uzunluk, 10 mm genişlik ve 2mm kalınlık ölçülerinde Kırıkkale Organize Sanayi Bölgesi'nde bulunan Yıldırım Metal Ltd.Şti.'de hidrolik giyotin ile kesim işlemi yapılmıştır. İşlem sonucunda deneylerde ihtiyaç duyulan 27 numune ve yedek 27 numune elde edilmiştir. Kesilen numunelerin resmi ölçüleri Şekil 5.2.' de verilmiştir.



**Şekil 5.2.** IF 7114 çeliği numunesi a) Resmi b) Ölçüleri

Numuneler sementasyon işlemi öncesinde aseton içerisinde bir süre tutularak tüm yağ ve kirlerinden arındırılmıştır. IF 7114 çeliğinin kimyasal bileşimi konusunda kesin bir bilgiye sahip olmak amacıyla; spektral analizi Makine ve Kimya Endüstrisi A.Ş. Ağır Silah ve Çelik Fabrikası kimya laboratuvarında yapılmıştır. Analizde kullanılan spektrometre cihazı Şekil 5.3.'de görüldüğü gibidir.



**Şekil 5.3.** Thermo Scientific ARL OES marka spektrometre

Yapılan spektral analiz sonucu numunenin kimyasal bileşimi Çizelge 5.1.'de verilmiştir.

**Çizelge 5.1.** IF 7114 çeliğinin spektral analiz sonucu

	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Ti</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>Fe</b>
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
IF 7114	0,003	0,079	0,009	0,008	0,059	0,002	0,029	0,004	0,003	99,72

## 5.2. Aktivatör Seçimi ve Temini

KOS işlemlerinde en çok kullanılan aktivatörler,  $BaCO_3$ ,  $CaCO_3$ ,  $KCO_3$  ve  $Na_2CO_3$  gibi alkali metal karbonatlardır. Literatürde yumurta kabuğu ve istiridye kabuğu gibi alternatif ürünlerin aktivatör olarak kullanıldığı çalışmalar vardır. Bu çalışmada KOS işleminde kullanılmak üzere aktivatör olarak  $Na_2CO_3$  seçilmiştir.  $Na_2CO_3$  Eti Soda A.Ş.'den Şekil 5.4.'de gösterildiği gibi 25 kg'lık torba olarak temin edilmiştir.



Şekil 5.4. Eti Soda A.Ş. üretimi  $Na_2CO_3$

$Na_2CO_3$  aynı zamanda cam, kağıt, sabun ve deterjan gibi ürünlerin üretiminde kullanılabildiği gibi, su arıtma, baca gazı arıtma işlemlerinde de kullanılmaktadır. Orijini doğal trona cevheridir.  $Na_2CO_3$  kimyasal özellikleri Çizelge 5.2.'de, fiziksel özellikleri ise Çizelge 5.3.'de verilmiştir.

**Çizelge 5.2.** Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> kimyasal özellikleri [78]

	Birim	Özellikler
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	%	99,5 min
Na <sub>2</sub> O	%	58,2 min
NaCl	%	0,1 max
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	%	0,1 max
Fe	µg/g	10 max
As	ppm	1 max
Pb	ppm	1 max
Hg	ppm	1 max
pH		11,4

**Çizelge 5.3.** Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> fiziksel özellikleri [78]

	Birim	Özellikler
Yığın yoğunluğu	g/cm <sup>3</sup>	0,95-1,15
Beyazlık	%	L= 95 min
Görünüm	Görsel	Renksiz kristal ya da beyaz, granül ya da kristal toz
Çözünürlük		Suda çözünür, etanol içerisinde çözünmez
<b>Tane boyutu</b>		
+600 mikron	%	5 max
+150 mikron	%	90 min
-75 mikron	%	5 max

KOS işleminde aktivatör kullanımındaki ana amaç daha kısa sürelerde sementasyon işleminin gerçekleştirilmesidir. Bu durumu araştırmak için hiç aktivatör kullanılmayan deneylerle, %5 ve %10 oranında aktivatör kullanılan deney sonuçları karşılaştırılmıştır.

### 5.3. KOS İşleminde Karbon Verici Ortam Seçimi ve Temini

KOS işleminde karbon verici olarak literatürde meşe kömürü, hurma çekirdeği, yumurta kabuğu, sığır kemiği, Hindistan cevizi kabuğu, bambu kömürü, grafit, okalıptüs kömürü gibi çok değişik materyallerin kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmada karbon verici olarak meşe kömürü tozu kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 5.5.' de görülen meşe kömürü tozu Çıraklar Kömür Ltd.Şti. firmasından temin edilmiştir. Tozun tane boyutu 0,5 mm – 1 mm aralığındadır.



Şekil 5.5. Meşe kömürü tozu

### 5.4. KOS İşleminde Kullanılan Ekipmanlar

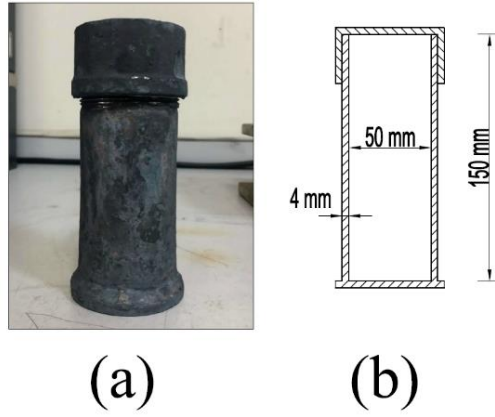
Hazırlanan numunelerin sementasyonu ve sonrasında östenitleme işlemi yapılmasında, Kırıkkale Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan Magma Therm marka ısıtma fırını kullanılmıştır (Şekil 5.6.).



Şekil 5.6. Magma Therm marka ısıtma fırını

Kullanılan fırın 4,3 kW gücündedir ve 1300 °C sıcaklığa kadar ayarlanabilir özelliktedir. Bekleme süresi, zamana göre sıcaklığın artış hızı gibi programlama özellikleri vardır. Bu çalışmada KOS işlemi için 900 °C, 950 °C ve 1000 °C sıcaklıklar kullanılmıştır. Fırının 900 °C sıcaklığa ulaşması yaklaşık 1 saat sürmektedir.

Deneylerde kullanılan sementasyon kutusu numune boyutları göz önünde tutularak boyutlandırılmıştır. Kırıkkale organize sanayi bölgesinde, 3,9 mm et kalınlığında 50 mm iç çapında, 150 mm boyunda St-52 çeliğinden imal borudan üretilmiştir (Şekil 5.7.).



Şekil 5.7. Sementasyon kutusu a) Görseli b) Boyut ölçüleri

## 5.5. Deney Parametreleri ve Metodu

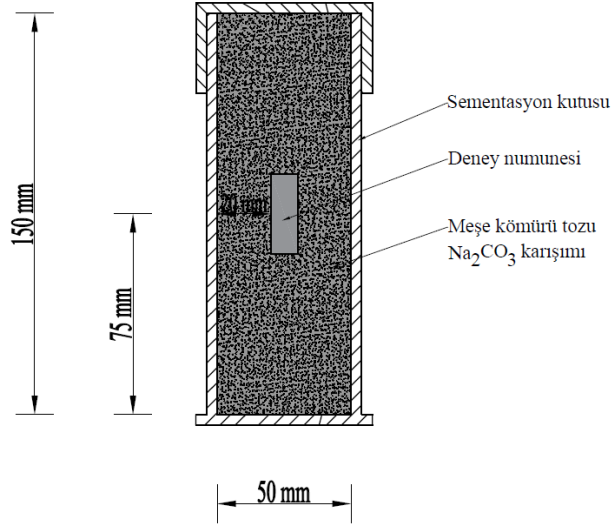
Sementasyon deneyleri 900 °C, 950 °C ve 1000 °C sıcaklıklarda ve 1,2,4 saat bekleme sürelerinde yapılmıştır. Sementasyona aktivatör etkisinin araştırılması amacıyla, karbon verici meşe kömürü tozuna ağırlıkça %5 ve %10 oranında Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> karıştırılmıştır. Deneyler Çizelge 5.4.' de gösterilen gruplar halinde yapılmıştır.

**Çizelge 5.4.** Deney Grupları

Grup No	Bekleme süresi (Saat)	Sıcaklık (°C)	Aktivatör oranı (%)
1	1	900	0
			5
			10
2	2	900	0
			5
			10
3	4	900	0
			5
			10
4	1	950	0
			5
			10
5	2	950	0
			5
			10
6	4	950	0
			5
			10
7	1	1000	0
			5
			10
8	2	1000	0
			5
			10
9	4	1000	0
			5
			10

Aynı anda daha çok deney yapılabilmesi amacıyla üç adet sementasyon kutusu hazırlanmış ve aynı bekleme süresindeki 3 deney aynı anda yapılabilmiştir. Kutuların içine yerleştirilmek üzere hazırlanan karbon verici ve aktivatör ayrı bir kaptaki homojen karışım sağlanana kadar karıştırıldıktan sonra kutu tabanına 75 mm serilmiştir. Numune dik bir şekilde dikkatlice tam ortaya yerleştirildikten sonra kalan karışım 75 mm kalınlığında doldurulmuştur. Dekarbürizasyon olmaması için kutu içerisinde

boşluk kalmamasına dikkat edilmiştir. Kutudaki numunenin yerleşimi Şekil 5.8.'de gösterildiği gibidir.



**Şekil 5.8.** Deney numunesinin sementasyon kutusu içerisinde şematik gösterimi

Yine dekarbürizasyona neden olmaması için kutunun ağzı sıkıca kapatılmıştır. Fırına hazırlanan 3 kutu yerleştirildikten sonra deney sıcaklığı fırından ayarlanmıştır. Fırın ayarlanan sıcaklığa geldikten sonra süre tutularak deney gerçekleştirilmiştir. Kutular deney süresi sonunda dikkatlice fırının dışına çıkarılarak oda sıcaklığında soğumaları beklenmiştir (Şekil 5.9.).



**Şekil 5.9.** Isıl işlem fırınından çıkan sementasyon kutuları

Oda sıcaklığına ulaşan kutular açılarak içindeki numuneler çıkarılmıştır. Numuneler ısıl işlem fırınında 900 °C sıcaklıkta 10 dakika bekletilerek östenitleme işlemi gerçekleştirilmiş ve fırından çıkarılarak yağda su verilmiştir.

## 5.6. Optik Mikroskop İle Metalografik İnceleme

Farklı sıcaklık, karışım oranı ve bekleme sürelerinde sementasyon işlemi uygulanan 27 adet numune, optik mikroskopla incelenmek amacıyla ilk olarak orta noktasından kesilmiştir. Kesim sonrası numune boyutu 10 mm x 15 mm şeklindedir. Bu işlem Şekil 5.10.'da gösterilen Mikrotest marka hassas numune kesme cihazı ile yapılmıştır.



**Şekil 5.10.** Mikrotest marka hassas kesim cihazı

Kesilen numuneler temizlendikten sonra 220 °C sıcaklık ve 8 dakika parametreleri kullanılarak Mikrotest marka cihaz ile bakalite alma işlemi yapılmıştır (Şekil 5.11.).



**Şekil 5.11.** Mikrotest marka bakalite alma cihazı

Bu işlemin yapılmasındaki amaç numunelerin et kalınlığı boyunca metalografik inceleme yapabilmek ve sertlik ölçümlerini yapabilmektir. Her bakalitteki numuneler karışmaması için bakalit arka yüzlerine numaralandırma işlemi gravür cihazıyla yapılmıştır. Bakalite alınan numunelerin görünümü Şekil 5.12.'de gösterilmiştir.



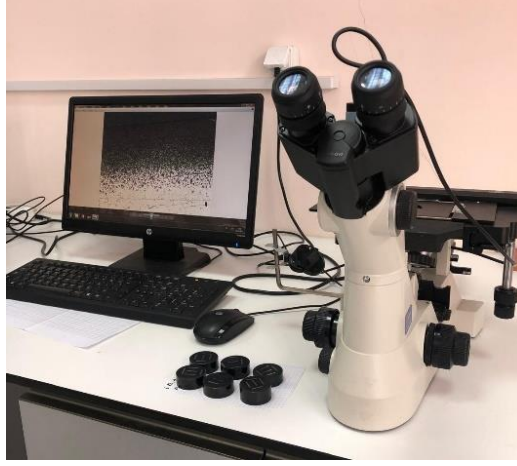
**Şekil 5.12.** Bakalite alınan numuneler

Sementasyon ve kesme işlemleri ile numune yüzeyleri deformasyona uğramaktadır. Orijinal iç yapıyı ortaya çıkarmak gerekmektedir. Bu nedenle numuneler sırasıyla 120, 240, 400, 800 ve 1200 numaralı zımpara kağıtları ile Şekil 5.13.'de görülen Mikrotest marka cihaz ile zımparalanmıştır. Bu işlem her numaralı zımpara kağıdı için 1 dakika süre ile ve her seferinde 90° numune döndürülerek 300 d/dak hızda yapılmıştır. Buradaki amaç zımpara izlerinin aynı yönde olmamasını sağlamaktır. Zımparalama işleminden sonra 6 µm ve 3 µm elmas solüsyonlar kullanılarak 4'er dakika sürelerle parlatma işlemi uygulanmıştır.



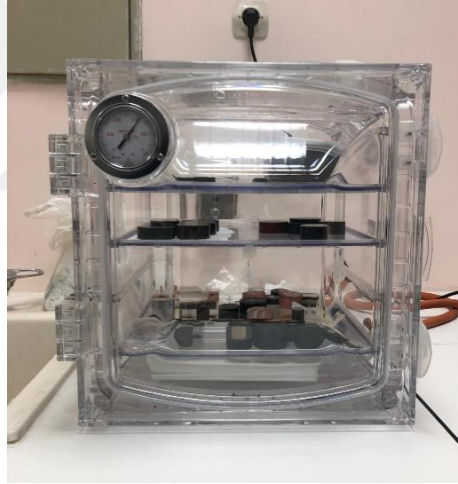
**Şekil 5.13.** Mikrotest marka zımparalama ve parlatma cihazı

Zımparalanan ve parlatılan numuneler %3'lük Nital çözeltisi ile 2 s sürede dağlanmıştır. Dağlama sonrası numuneler hemen su ile yıkanıp etil alkol ile temizlenerek kurutulmuştur. Bu sayede optik mikroskop ile inceleme öncesi işlemler tamamlanmıştır. 100x büyütme oranıyla metalografik inceleme amacıyla Şekil 5.14.'de görülen Nikon Eclipse MA100 marka optik mikroskop kullanılmıştır.



**Şekil 5.14.** Nikon Eclipse MA100 marka optik mikroskop

Sertlik ölçümüne kadar geçen sürede numunelerin açık havada korozyona uğramasını engellemek amacıyla tüm numuneler Şekil 5.15.'de görülen vakum cihazında saklanmıştır.

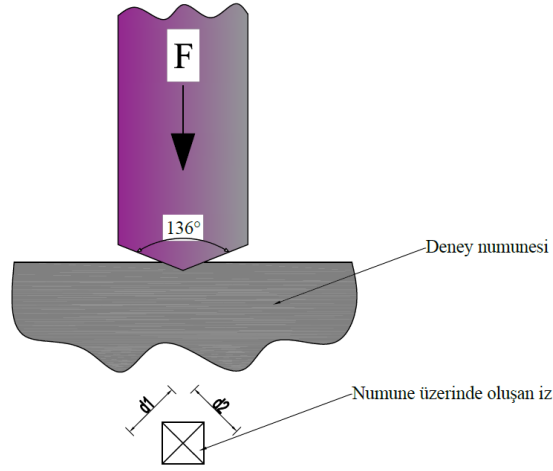


**Şekil 5.15.** Vakum cihazı

## **5.7. Mikrosertlik ölçümleri**

Vickers sertlik ölçme yöntemi test malzemesine kare tabanlı ve karşıt yüzleri arasında  $136^\circ$  bir açığa sahip olan dik piramit şeklinde bir elmas uç ile girinti uygulanmasından oluşmaktadır (Şekil 5.16.). Tam yük genellikle 10 ila 15 saniye süreyle uygulanır. Yükün kaldırılmasının ardından numune yüzeyinde kalan izin iki karşıt köşegeni mikroskop ile ölçülür ve ortalaması hesaplanır. Vickers sertlik değeri; uygulanan kg cinsinden deney yükünün, oluşan izin alanına bölünmesiyle bulunur. Birbiri ardına

yapılan sertlik ölçümlerinde izlerin birbirine olan uzaklıkları en az izin köşegen uzunluğunun 2,5 katı kadar olmalıdır.



**Şekil 5.16.** Vickers sertlik ölçme yöntemi

Numuneler sementasyon ve östenitleme işlemlerinden sonra yağda su verilmiştir. Metalografik inceleme ve sertlik ölçmeye hazırlamak amacıyla numuneler zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Hiç işlem uygulanmamış numuneye ve sementasyon ardından östenitleme uygulanmış 27 adet numuneye metalografi laboratuvarında bulunan cihaz ile sertlik ölçme işlemi yapılmıştır. Sertlik ölçme uygulaması Şekil 5.17.'da görülen Galileo marka cihaz ile yapılmıştır.



**Şekil 5.17.** Galileo marka sertlik ölçme cihazı

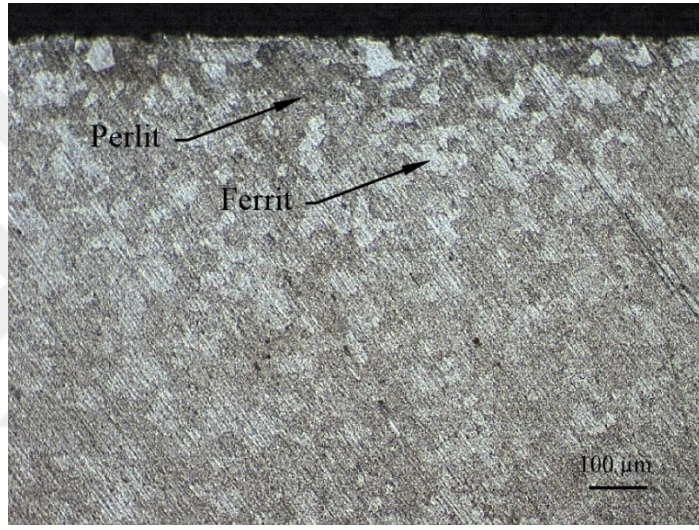
Numunelere sertlik ölçme işlemi HV0,5 yük altında yapılmıştır. Yüzeyden itibaren et kalınlığı ortasına yani orjine kadar her 50 µm'da bir sertlik değişimi incelenmiştir. Böylelikle her bir numune için 20 ölçüm, 27 numune için toplam 540 adet ölçüm yapılmıştır.



## 6. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

### 6.1. Optik Mikroskop Görüntüleri

IF 7114 çeliğine yapılan spektrometrik analizde, içeriğinde %0,003 karbon bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 6.1.'de görüldüğü gibi homojen bir iç yapıya sahiptir.



Şekil 6.1. IF7114 iç yapısı (100x büyütme ile)

Optik mikroskop altında açık renkli görülen bölgelerde ferritik yapı, koyu bölgelerde ise perlit kümeleri görülebilmektedir. Genel görünüm ince taneli ferritik yapıdır. Karbon miktarı arttıkça perlitik yapı görüntüsü artmaktadır. Ferrit tane sınırlarının görülebilmelerini sağlayan nital çözeltisi ile dağlama işlemidir. Bu işlem yapılmadan ferritik yapıyı ayırt etmek mümkün olmamaktadır.

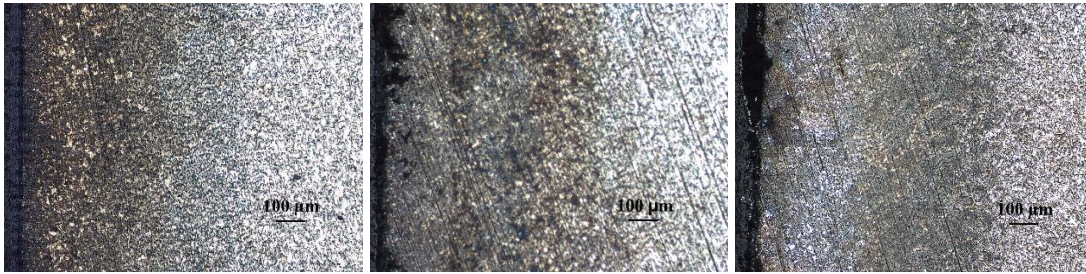
900 °C, 950 °C, 1000 °C sıcaklıklarda ve 1,2,4 saat bekleme sürelerinde yapılan sementasyon işlemleri sonrasındaki numunelerin mikroyapısı Şekil 6.2.-6.10.'da görüldüğü gibidir. Karbon difüzyonu ile yüzeyden itibaren ferritik yapılar kaybolmuş, perlit ve martenzit görüntüsü artmıştır. Aktivatör oranının mikroyapıya etkisi de şekillerde görülmektedir. Sementasyon süresinin uzaması karbon difüzyon derinliğini arttırmıştır. Bu nedenle sertlik derinliğinin artması da olağan olarak beklenmektedir.



(a) (b) (c)  
**Şekil 6.2.** 900 °C’de 1 saat işlem görmüş numuneler (100x)  
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile



(a) (b) (c)  
**Şekil 6.3.** 900 °C’de 2 saat işlem görmüş numuneler (100x)  
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile



(a) (b) (c)  
**Şekil 6.4.** 900 °C’de 4 saat işlem görmüş numuneler (100x)  
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile



(a) (b) (c)  
**Şekil 6.5.** 950 °C'de 1 saat işlem görmüş numuneler (100x)  
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile



(a) (b) (c)  
**Şekil 6.6.** 950 °C'de 2 saat işlem görmüş numuneler (100x)  
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile



(a) (b) (c)  
**Şekil 6.7.** 950 °C'de 4 saat işlem görmüş numuneler (100x)  
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile



(a) (b) (c)  
**Şekil 6.8.** 1000 °C’de 1 saat işlem görmüş numuneler (100x)  
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile



(a) (b) (c)  
**Şekil 6.9.** 1000 °C’de 2 saat işlem görmüş numuneler (100x)  
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile

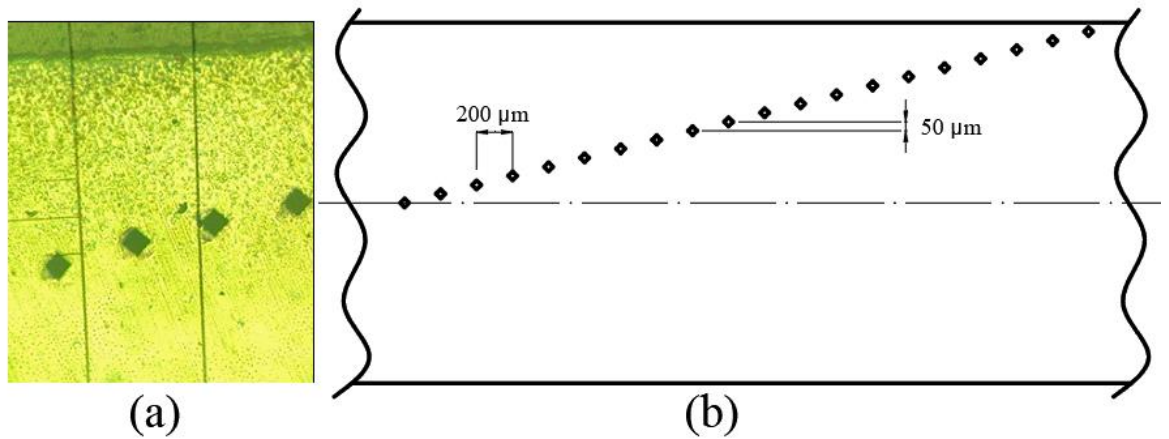


(a) (b) (c)  
**Şekil 6.10.** 1000 °C’de 4 saat işlem görmüş numuneler (100x)  
a) %0 aktivatör ile b) %5 aktivatör ile c) %10 aktivatör ile

Uygulanan işlemler sonrasında numunelerde ötektoid üstü, ötektoid ve ötektoid altı bölgeler oluşmuştur. Başlangıçta IF 7114 çelik mikroyapısında görülen açık renkli ferritik yapı karbon miktarının artırılmasıyla kaybolmuş, onun yerini perlitik ve martenzitik yapılar almıştır. Sementasyon süresinin artmasıyla karbon nüfuz eden yüzeyin derinliğinin arttığı optik mikroskop görüntülerinden açıkça görülmektedir. Özellikle 1000 °C’de yapılan 4 saatlik sementasyon işlemi sonunda numune tüm derinlik boyunca martenzitik yapıya kavuşmuştur. Buradan en çok karbon nüfuz etmiş numunenin de 1000 °C’de yapılan 4 saatlik sementasyon işlemi uygulanan numune olduğu görülmektedir. Aktivatör oranının artışı daha kısa sürelerde aynı mikroyapıya ulaşmayı sağlamaktadır. Sementasyonda difüzyona neden olan atomik karbonun sağlayıcısı olan CO miktarının artışı aktivatör sağlamaktadır. Aktivatör kullanımı sanayide çok iyi bir enerji tasarrufu sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Aktivatör fiyatı enerji maliyeti ile karşılaştırıldığında çok küçük değerlerdedir. Literatürde aktivatör maliyetini daha da düşürmek için atık malzemeler ile denemeler yapılmıştır.

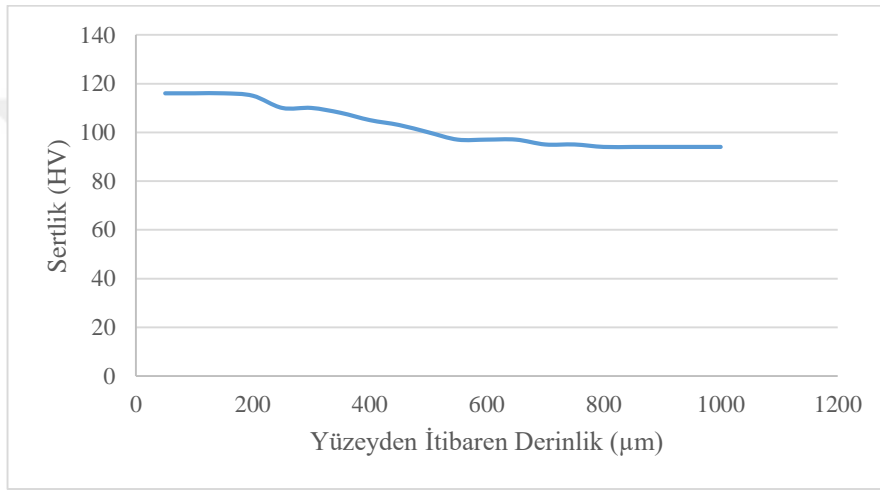
## 6.2. Mikrosertlik Ölçüm Sonuçları

Mikrosertlik ölçümleri 500 gf yük altında, yüzeyden itibaren derinlik boyunca 50 µm aralıklarla orijin noktasına diğer bir deyişle numune çekirdeğine kadar yapılmıştır. İzlerin birbirine en az köşegen uzunluğunun 2,5 katı kadar uzaklıkta olmaları gerektiğinden Şekil 6.11’de görüldüğü gibi X ekseninde 200 µm yana kayılarak derinlik boyunca ilerleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 6.11. Numune üzerinde Vickers sertlik izlerinin konumu a) Resmi b) Ölçüleri

900 °C, 950 °C, 1000 °C sıcaklıklarda, 1 saat, 2 saat ve 4 saat bekleme sürelerinde yapılan sementasyon işlemleri ve 900 °C’de 10 dakika östenitleme sonrasında yapılan tüm sertlik ölçümü sonuçları; aktivatörsüz, %5 aktivatörlü ve %10 aktivatörlü işlemler şeklinde gruplandırılarak Çizelge 6.1., Çizelge 6.2. ve Çizelge 6.3.’de verilmiştir. Hiç işlem yapılmamış durumda olan IF 7114 çeliğine derinlik boyunca yapılan sertlik ölçümlerinde, homojen mikroyapı nedeniyle sertlik değerlerinde fazla bir fark görülmemiştir (Şekil 6.12.). Yüzeyde 116 HV ölçülen sertlik değeri, orijinde 94 HV ölçülmüştür. Sertliğin bu derece düşük olması karbon oranının aşırı düşük olmasını göstermektedir.



**Şekil 6.12.** İşlem görmemiş IF 7114 çeliği, yüzeyden itibaren derinlik - sertlik grafiği

Sertlik ölçüm işlemi öncesi kalibrasyon malzemeleri ile cihazın doğru ölçüm yapıp yapmadığı test edilmiştir. Doğru ve tutarlı ölçümler yapabilmek amacıyla, numunelerin bir yüzeyinden orijine kadar yapılan sertlik ölçümleri aynı şekilde diğer yüzeyden de orijin noktasına kadar tekrarlanmıştır.

**Çizelge 6.1.** 900 °C’de yapılan işlemde elde edilen HV<sub>(0,5)</sub> sertlik değerleri

Derinlik (µm)	1 saat			2 saat			4 saat		
	%0 Aktivatör	%5 Aktivatör	%10 Aktivatör	%0 Aktivatör	%5 Aktivatör	%10 Aktivatör	%0 Aktivatör	%5 Aktivatör	%10 Aktivatör
50	311	326	340	322	351	386	362	374	420
100	302	323	335	288	335	356	346	368	408
150	265	314	325	285	327	338	330	344	364
200	247	295	318	278	303	322	313	331	357
250	243	266	308	256	269	316	276	284	324
300	215	246	266	236	249	312	250	276	318
350	191	218	234	212	224	281	225	251	300
400	158	198	213	191	201	245	206	228	297
450	139	172	183	186	198	240	189	221	273
500	126	156	172	174	178	215	183	206	223
550	118	146	154	159	174	192	180	197	215
600	116	133	143	144	153	177	168	181	192
650	115	116	120	143	143	171	164	172	182
700	115	115	118	135	138	165	161	170	172
750	114	114	116	124	122	151	155	166	169
800	114	113	113	118	120	132	152	165	166
850	114	114	113	116	118	128	150	158	160
900	113	113	112	115	118	125	148	157	160
950	113	112	114	113	115	118	147	151	157
1000 (orjin)	113	114	113	113	115	118	145	151	154

**Çizelge 6.2.** 950 °C’de yapılan işlemden elde edilen HV<sub>(0,5)</sub> sertlik değerleri

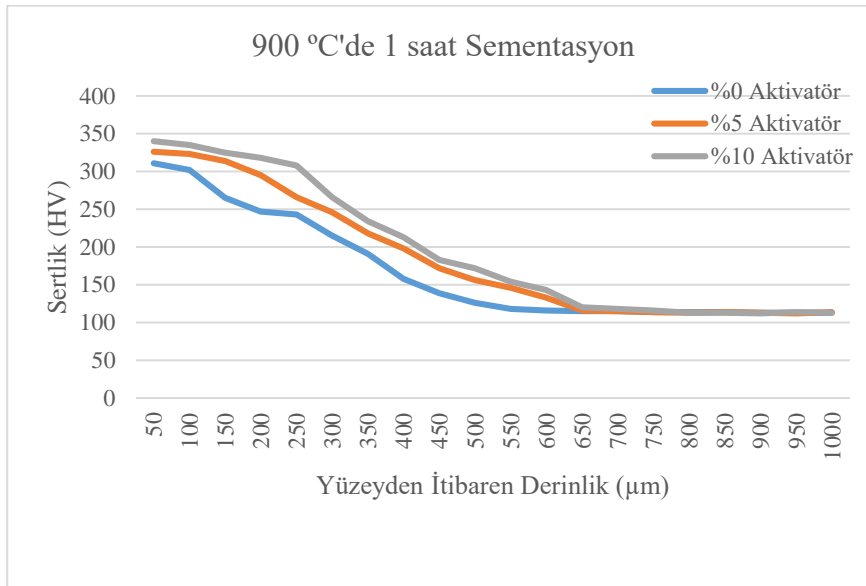
Derinlik (µm)	1 saat			2 saat			4 saat		
	%0 Aktivatör	%5 Aktivatör	%10 Aktivatör	%0 Aktivatör	%5 Aktivatör	%10 Aktivatör	%0 Aktivatör	%5 Aktivatör	%10 Aktivatör
50	329	337	407	356	364	433	412	426	457
100	322	329	374	344	359	421	408	419	441
150	293	318	354	336	342	413	402	408	435
200	282	297	346	322	331	385	393	406	421
250	268	278	343	300	324	362	393	402	420
300	243	267	320	281	313	360	384	397	415
350	218	221	290	268	276	355	330	376	403
400	194	202	281	256	267	342	293	340	376
450	182	195	277	242	255	315	251	288	316
500	182	203	266	237	244	291	235	278	296
550	174	179	263	221	235	263	220	257	280
600	162	166	254	209	230	258	218	255	271
650	153	162	243	198	218	246	216	247	267
700	151	158	232	191	209	227	216	242	253
750	149	155	210	188	199	210	214	235	244
800	149	151	195	184	191	198	214	230	242
850	144	151	190	182	186	193	212	228	239
900	141	147	188	182	184	190	212	228	238
950	140	143	174	178	183	188	211	220	230
1000 (orjin)	140	143	174	173	183	188	211	218	230

**Çizelge 6.3.** 1000 °C’de yapılan işlemde elde edilen HV<sub>(0,5)</sub> sertlik değerleri

Derinlik (µm)	1 saat			2 saat			4 saat		
	%0 Aktivatör	%5 Aktivatör	%10 Aktivatör	%0 Aktivatör	%5 Aktivatör	%10 Aktivatör	%0 Aktivatör	%5 Aktivatör	%10 Aktivatör
50	364	400	474	502	511	533	504	527	553
100	348	388	466	494	505	527	498	513	529
150	340	370	452	441	466	519	476	500	517
200	320	355	439	412	447	510	454	466	499
250	298	319	417	408	426	456	423	451	475
300	282	290	402	400	413	444	412	441	469
350	251	267	366	395	406	425	401	433	451
400	247	251	305	380	402	421	395	412	440
450	226	242	292	364	382	400	382	397	419
500	202	214	276	354	377	391	367	385	411
550	177	186	270	349	366	384	356	371	410
600	174	182	265	340	358	377	352	369	404
650	174	179	254	330	350	366	344	361	397
700	170	174	250	322	341	364	338	360	393
750	163	170	236	316	335	357	330	344	388
800	161	167	220	312	328	341	321	341	386
850	157	166	213	301	316	330	318	332	384
900	156	158	204	290	303	319	309	329	382
950	155	158	185	278	295	310	298	313	382
1000 (orjin)	155	156	185	264	291	302	297	311	379

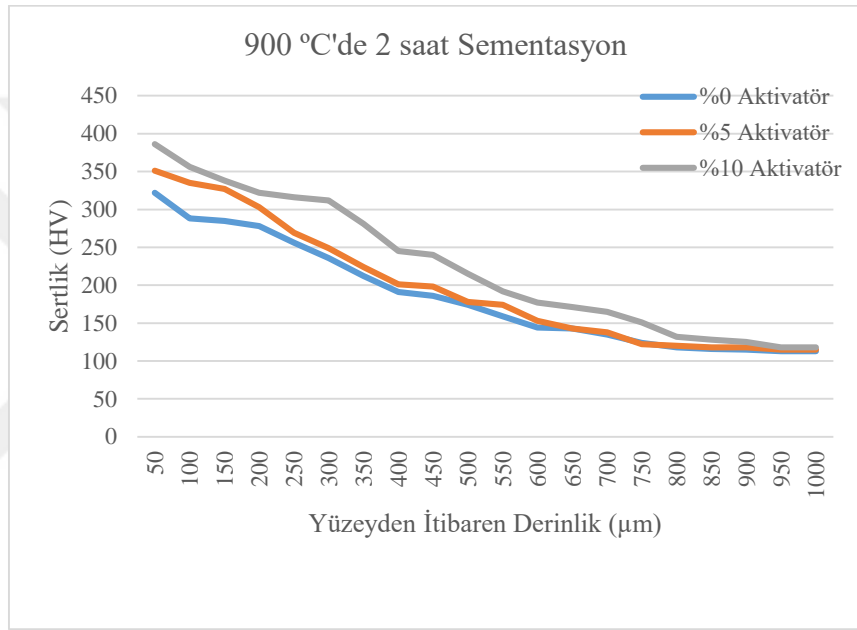
Sementasyon yapılan tüm numunelerde ölçülen sertlik değerlerinde, işlemsiz numuneye göre 5 kat yüksek değerlere ulaşıldığı görülmektedir. En yüksek sertlik değerine 1000 °C’de, 4 saat bekleme süresinde ve %10 aktivatör oranında yapılan işlemde 50 µm derinlikte 553 HV olarak ulaşılmıştır. Ölçülen en düşük sertlik değerleri ise aktivatör katkısız 900 °C’de 1 ve 2 saat süre ile yapılan işlemlerdeki numune orijininde yani çekirdek noktasında ölçülen 113 HV değeridir. Yüzeyde karbon oranının %0,8’in üzerinde olması istenmez. Bunun sebebi bu oranın üzerindeki değerlerde numunede zararlı karbon çökeltilerinin oluşmaya başlamasıdır. Alaşımız çeliklerde ötektoid nokta %0,8 karbon oranı civarındadır. 4 saatlik sementasyon sürelerinde bu oranı aşmak mümkün olmamaktadır. Sementasyon sıcaklığı ve süresi arttırıldıkça doğru orantılı olarak sertlik derinliği de artmaktadır. Sadece yüzey sertliğinin arttırılması istenen, çekirdekte sünek ve tokluk beklenen ürünler talep edildiğinde daha düşük sıcaklık ve sürelerin seçilmesi gerektiği tablolardan anlaşılmaktadır. Sementasyon ile son üründe istenen yüzey ve çekirdek sertliği değerleri için gerekli parametreler bu çalışmadaki bilgiler sayesinde sementasyon öncesinde yol gösterici olabileceği düşünülmektedir.

Şekil 6.13.-6.21.’ de verilen grafikler sayesinde sıcaklık, süre ve aktivatör oranı parametrelerinin sementasyon sonrası sertlik değerlerinde nasıl etkide bulunduğu rahatlıkla görülmektedir.



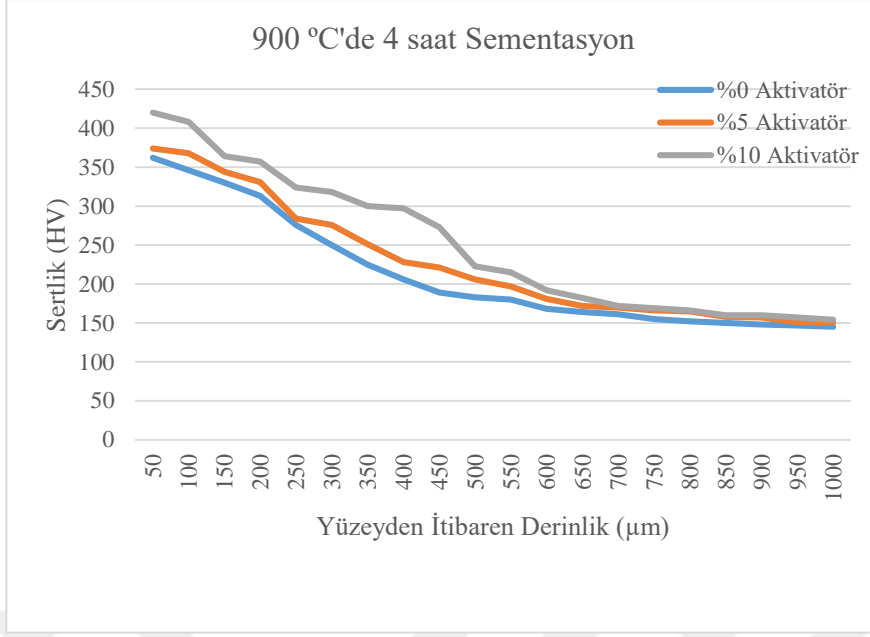
Şekil 6.13. 900 °C’de 1 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği

900 °C’de 1 saat sementasyon işlemi ile yüzeye yakın bölgelerde aktivatör oranına göre değişmekle birlikte, işlemsiz numuneye göre yaklaşık 3 kat daha yüksek sertlik değerlerine ulaşılmıştır. 650 µm derinliğe kadar olan bölgede aktivatör kullanımının sertliğe olumlu etkisi açık bir şekilde görülürken, bu derinliğin altındaki bölgelerde çekirdeğe kadar birbirine yakın değerler ölçülmüştür. 650 µm derinlikten orjine kadar olan bölgede sertlik değerleri fazla değişmemiştir. Bunun nedeni sementasyon süresinin kısalığıdır. Yüzeyi sert fakat çekirdekte orijinal numuneye yakın sertlik değerleri istenildiğinde bu parametrelerin kullanılması mantıklı olacağı düşünülmektedir.



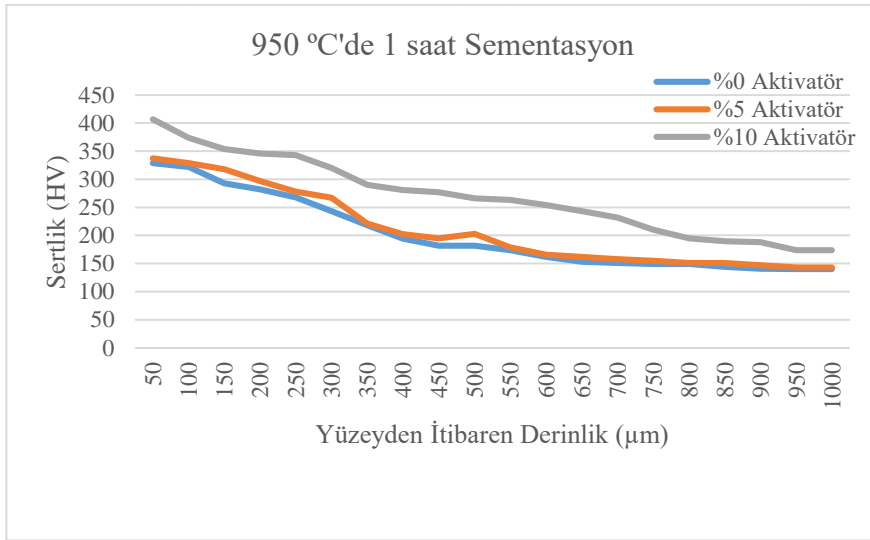
**Şekil 6.14.** 900 °C’de 2 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği

900 °C’de 1 saat yapılan işlemde olduğu gibi aynı sıcaklıkta 2 saat yapılan sementasyon işlemi sonrasında da çekirdek sertliği işlem görmemiş numuneye yakın değerlerdedir. Yüzeye yakın bölgelerde ise 1 saat yapılan işleme kıyasla yaklaşık %10 daha yüksek sertlik değerleri ölçülmüştür. %10 aktivatör oranı, %5 aktivatör oranı ile yapılan işleme kıyasla aktivatörsüz işleme göre sertlik değerlerinde daha olumlu artışlar göstermiştir.



**Şekil 6.15.** 900 °C'de 4 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği

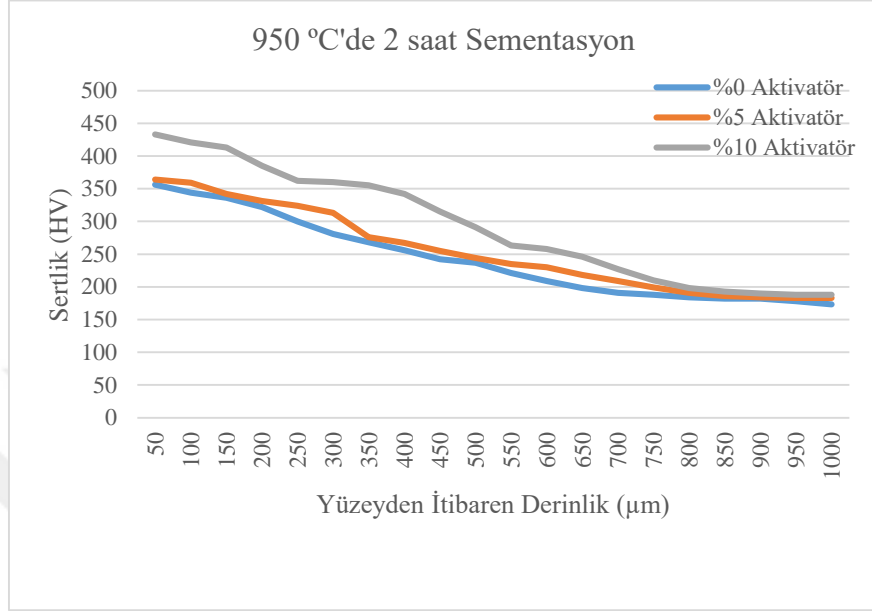
900 °C'de 4 saat süre ile yapılan işlemde orjinde 145-154 HV sertliklerine ulaşılmıştır. Sürenin sementasyon derinliğine etkisi burada daha net görülmektedir. Yüzeğe yakın bölgelerde 400 HV sertlik değeri eşiği aşılmıştır. Buda işlemsiz numuneye kıyasla yaklaşık 4 kat sertlik değeri artışı demektir.



**Şekil 6.16.** 950 °C'de 1 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği

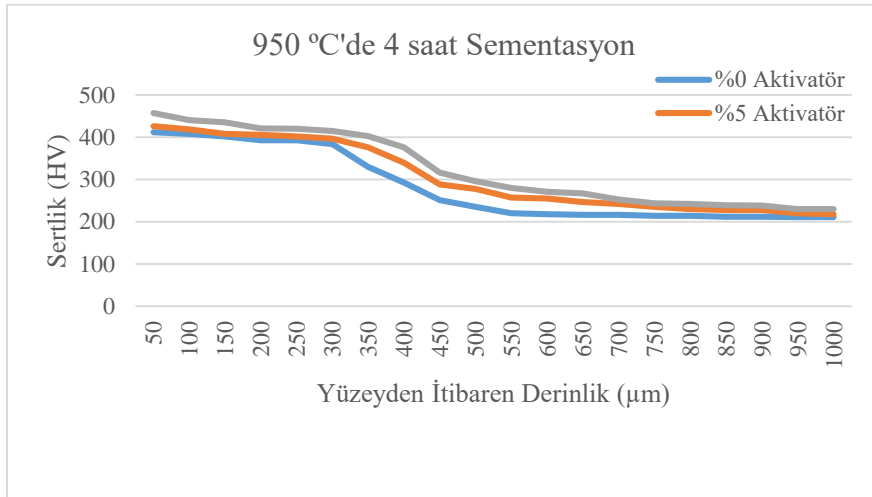
950 °C'de 1 saat yapılan işlemde, aynı sürede fakat 900 °C'de yapılan işleme kıyasla çekirdek sertliği değeri 174 HV değerlerine ulaşmıştır. Buradan sürenin yanında işlem sıcaklığının da sementasyon derinliğini etkileyen faktörlerden biri olduğu görülmektedir. Bu sıcaklıkta yapılan deneyde %10 aktivatör oranı %5 aktivatör

oranına kıyasla, işlemsiz numuneye göre çok daha fazla sertlik farkları oluşturmuştur. 600 µm derinlikte ölçülen sertlik değerlerinde; aktivatörsüz işlemde 162 HV değeri ölçülürken, %5 aktivatör oranı ile yapılan işlemde 166 HV, %10 aktivatör oranı ile yapılan işlemde 254 HV değeri ölçülmüştür.



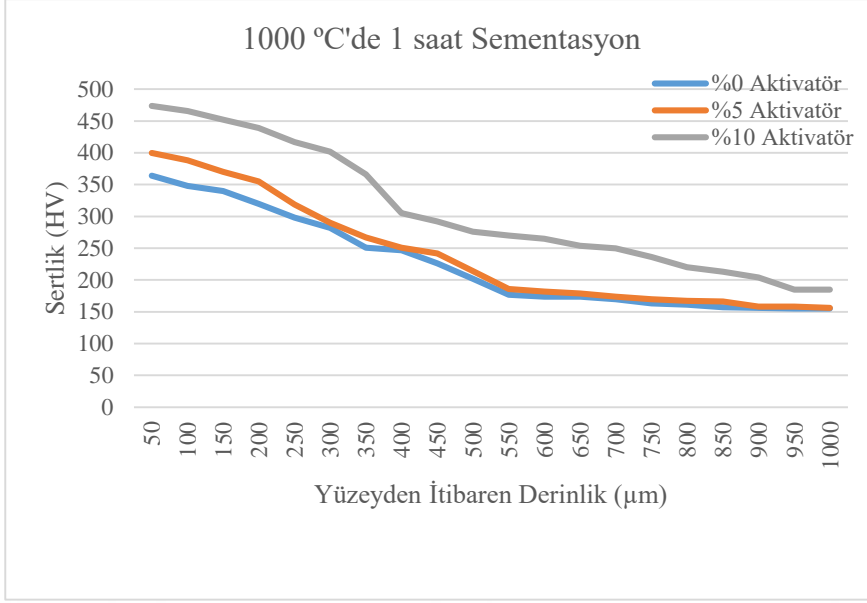
Şekil 6.17. 950 °C'de 2 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği

Şekil 6.17.'de görüldüğü gibi bu sıcaklık ve sürede yapılan işlemde yüzeiden 650 µm derinlikten sonraki ölçümlerde birbirine çok yakın değerlere ulaşılmıştır.



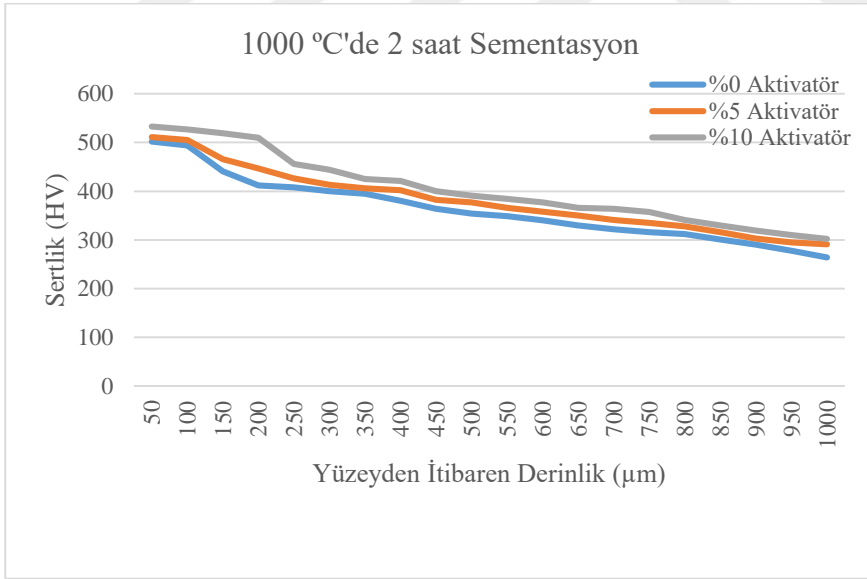
Şekil 6.18. 950 °C'de 4 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği

950 °C'de 4 saat yapılan sementasyon işlemi sonucunda orjin noktasında 200 HV sertlik değeri eşiği aşılmıştır. Her üç aktivatör oranında yapılan işlemlerde birbirine yakın sertlik değerleri ölçülmüştür.



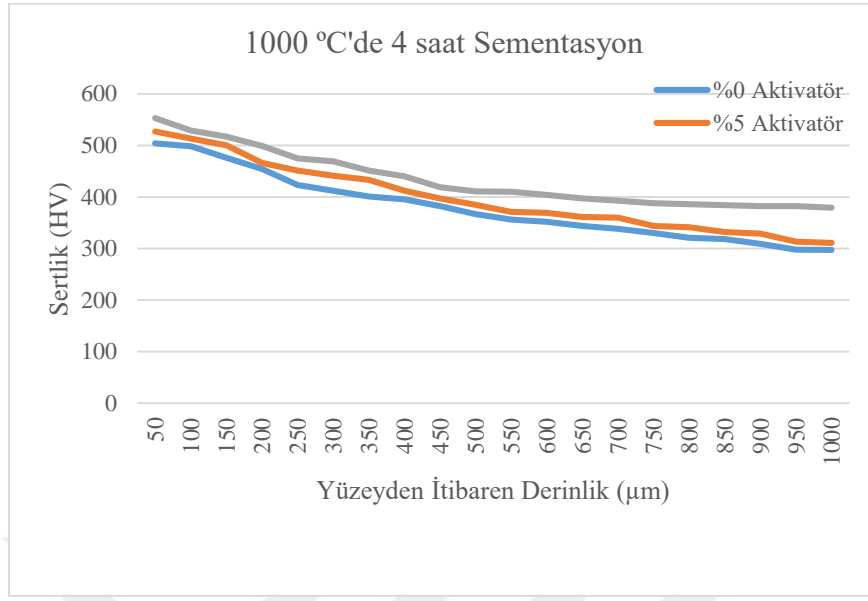
**Şekil 6.19.** 1000 °C'de 1 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği

Aktivatör oranının sementasyon işleminde sertlik değerlerine etkisi yine 1 saat bekleme süresinde yapılan bu deneyde de ortaya çıkmıştır. 2 ve 4 saat yapılan işlemlerde aktivatör oranlarına göre sertlik değerlerinde daha az farklar oluşmaktadır.



**Şekil 6.20.** 1000 °C'de 2 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği

İlk kez 500 HV sertlik değerlerine bu deney ile ulaşılmıştır. Bu işlem yapılmamış numuneye kıyasla yaklaşık 5 kat yüksek bir değerdir. Fakat sıcaklık artışı aynı zamanda çekirdek sertliğinde de önemli artışa sebep olmuştur. Bu da istenen bir durum değildir.



**Şekil 6.21.** 1000 °C’de 4 saat sementasyon işlemi sonrası derinlik - sertlik grafiği

Bu deneyde yüzeye yakın bölgelerde sertlik 600 HV değerine yaklaşmıştır. Ancak çekirdek sertliği de önemli derecede artmıştır. Bu çekirdek bölgesindeki sünek yapının kaybedildiği anlamına gelmektedir. Eğer yüzeyde sert ve aşınma direnci yüksek, çekirdekte ise sünek ve tok özellikler isteniyorsa bu sıcaklık ve süreler çıkmamak gerekir. Fakat numune kalınlığı arttığında bu sıcaklık ve süreler değerlendirilebilir.

## 7. SONUÇ

Düşük alaşımlı çelikler; alüminyum, magnezyum gibi diğer elementlerle yada yüksek alaşımlı çeliklerle kıyaslandığında daha ucuz olduğu için endüstride daha çok tercih edilmektedir. Bu çalışma ile amaç, hem ekonomik hemde aynı zamanda kolay şekillendirilebilen ve kaynaklanabilen IF çeliğine ekstra özellikler kazandırabilmektir. Bu özellikler aşınmaya karşı direnç ve daha yüksek yüzey sertliğidir. Aynı üstün özelliklere sahip yüksek alaşımlı çeliklere alternatif olabilecektir ve daha yaygın kullanım alanları bulunabilecektir. IF çeliklerinin mükemmel şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik özelliklerini büyük ölçüde kaybedeceğinden, parçanın sementasyon işlemi öncesi şekillendirme ve kaynaklama işlemleri gerçekleştirilmiş olmalıdır. İşlem sonrası karbon oranının artacağından artık şekil vermek zorlaşacaktır. Yüzeyde oluşan martenzitik yapı nedeniyle kolay kaynak edilebilir çelik sınıfından da çıkacaktır. İç yapısı sünek ve tok, yüzeyi sert ve aşınmaya dayanıklı IF çeliğinin üretilmesinde sementasyon işlemi ekonomik açıdan avantajlıdır. Nitrürleme ve borlama gibi termokimyasal işlemlerden de daha ekonomiktir.

Sementasyon sıcaklığı olarak 900 °C, 950 °C, 1000 °C, sementasyon süresi olarak 1 saat, 2 saat, 4 saat ve aktivatör oranı olarak % 0, % 5, % 10 ile yapılan deneyler sonucunda numune yüzeyindeki karbon oranı değişik değerler almıştır. En yüksek sertlik değerine 1000 °C sıcaklıkta, 4 saat sürede ve % 10 aktivatör oranı kullanılan sementasyon işleminde ulaşılmıştır. Sementasyon süresinin ve sıcaklığının artması sertlik değerlerinde artışa sebep olmuştur. Ancak 1000 °C ve 4 saat süre ile yapılan deneyde çekirdek sertliği işlemsiz numuneye göre yaklaşık 4 kat artarak 379 HV'ye ulaşmıştır. Bu çekirdek bölgesinde sünekliğin kaybedilmesi anlamına gelmektedir. Yüzeti sert aynı zamanda çekirdek bölgesi sünek ve tok bir malzeme istenildiğinde 2 mm kalınlığındaki numunelerde bu sıcaklık ve sürelerle çıkmanın uygun olmayacağı sonucuna varılmıştır. Daha kalın malzemelerde bu sıcaklık ve süreler denenebileceği düşünülmektedir. Aktivatör oranının artmasıyla daha düşük sıcaklık ve sürelerde daha yüksek sertlik değerlerine ulaşmak mümkündür. Aynı sıcaklık ya da sementasyon

sürelerindeki aktivatörsüz ve %10 aktivatörlü deneyler karşılaştırıldığında; %10 aktivatör kullanılan deneylerde sertlik değerleri yaklaşık %20 kadar yükselmiştir.

Sementasyondan önce belirli bir yüzey sertliği ve sementasyon derinliği hedefleniyorsa süre, sıcaklık ve aktivatör oranı değiştirilerek bu değere ulaşmanın mümkün olabileceği sonucuna varılmıştır.



## KAYNAKLAR

- [1] Yılmaz, A.N. (1985). Kutu Sementasyonunda Karbürleme Süresi, Karbürleme Sıcaklığı ve Aktivatör Oranının Etkili Sementasyon Derinliğine Etkileri. Yüksek Lisans Tezi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- [2] Canbuldu, A., Erdem, O. (2024). Katı ortam sementasyonunun parametreleri ve uygulama alanları. *International Journal of Engineering Research and Development*, 16(1), 320-339.
- [3] Karagöz, İ. (2007). Sementasyon Çeliklerinde Difüzyon Ve Sertlik Derinliğini Arttıracak Isıl İşlem Koşullarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- [4] Tang, Y., Zhang, G., Mao, H., Ren, J., Huang, Z., Li, X., Li, Q. (2022). Research on the sensor for detection of carburized case depth based on nonlinear ultrasound. *Results in Physics*, 42, 105984.
- [5] Sabri, H.A.B.A. (2010). Experimental Study Of Pack Carburizing Of Carbon Steel. Yüksek Lisans Tezi. *Universiti Malaysia Pahang*.
- [6] Yegen, İ. (2009). Sıcak Haddelenmiş Ve Soğuk Çekilmiş SAE 8620 Ve 16MnCr5 Çeliklerinde Tuz Banyosunda Gerçekleştirilen Sementasyon İşleminin Aşınma Direncine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, Gebze.
- [7] Topbaş, M.A. (1998). *Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı*. İstanbul: Prestij Yayıncılık.
- [8] Çölova Ö. (2021). Karbürleme Yapılan Genel Yapı Çeliğinin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Karabük Üniversitesi*, Karabük.
- [9] Karagöz, İ. (2019). SAE 8620 (21NiCrMo2) plakaların ısıl işleminde karbürizasyon süresi ve malzeme kalınlığına bağlı olarak oluşan sertlik değişimi. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3, 748-754.

- [10] Baykara, C. (1998). Sementasyon Çeliklerinde Yüzey Pürüzlülüğü ve Sementasyon Derinliğinin Aşınma Dayanımına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa.
- [11] Boniardi, M., D'Errico, F., Tagliabue, C. (2006). Influence of carburizing and nitriding on failure of gears – a case study. *Engineering Failure Analysis*, 13, 312-339.
- [12] Ihom, P.A. (2013). Case Hardening Of Mild Steel Using Cowbone As Energiser. *African Journal of Engineering Research*, 1(4), 97-101.
- [13] Schneider, M.J., Chatterjee, M.S. (2013) Introduction To Surface Haredening Of Steels. Dossett, J., ve Totten, G.E. (edt.), *ASM Handbook*, 4A, (ss, 259-267). ASM International.
- [14] Hosseini, S.R.E., Li, Z. (2016). Pack Carburizing: characteristics, microstructure, and modeling. *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*, 13 Apr 2016, 1-24.
- [15] Yılmaz, F., Efe, G.C., Yener, T. (2022). Kutu sementasyon yöntemi ile Ti6Al4V alaşımı üzerine aluminid esaslı kaplama üretimi. *Journal of Smart Systems Research (JOINSSR)*, 3(2), 49-60.
- [16] Pekköz, B., Sarıdemir, S., Uygur, İ., Aslan, Y. (2013). Sementasyon işleminin farklı çeliklerin mikroyapı ve sertlik değerlerine etkileri. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10(1), 19-24.
- [17] Erkan, A., Yılmaz Ü., Helvacıoğlu, Ş., Günay, H., Aydoğan, R., Ersoy, Ç. (2020). Düşük basınçlı sementasyon yöntemi ile malzemelerin mekanik ve metalografik özelliklerinin geliştirilmesi. *Mühendis ve Makine*, Ağustos 2020, 36-44.
- [18] Coşar, D. (2014). 8622RH ve 20MnCr5 Çeliklerinin Aşınma ve Mekanik Özelliklerine Gaz Karbürleme İşleminin Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir.
- [19] Afolalu, S.A., Asonaminasom, E.H., Ongbali, S.O., Abioye, A.A., Udo, M.O., Salawu, E.Y. (2018). Dataset on experimental investigation of optimum carburizing temperature and holding time of bi- nano additives treatment of AISI 5130 steel. *Data in Brief*, 19, 2279-2283.

- [20] Aramide, F.O., Ibitoye, S.A., Oladele, I.O., Borode, J.O. (2010). Pack carburization of mild steel, using pulverized bone as carburizer: optimizing process parameters. *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, 16, 1-12.
- [21] Çoban, C., Taktak, Ş., Başpınar, S., Said, G. (2004). Kutu sementasyonla çelikleri karbürleme işleminde BaCO<sub>3</sub> aktivatörün sertleşme derinliğine etkisi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1-2(4), 1-6.
- [22] Forti, M., Alonso, P., Balbuena, P. (2012). Ab-İnitio studies on carburization of Fe<sub>3</sub>Al based alloys. *Procedia Materials Science*, 1, 191-198.
- [23] Hassan, K., S. (2015). Comparative of wear resistance of low carbon steel pack carburizing using different media. *International Journal of Engineering & Technology*, 4 (1), 71-77.
- [24] Jacquet, P., Rouse, D.R., Bernard, G., Lambertin, M. (2002). A novel technique to monitor carburizing processes. *Département de génie mécanique, Université Laval, Sainte-Foy, Canada*.
- [25] Kaya, M. (2015). SAE 5120 Ve 8620 Çeliklere Uygulanan Sementasyon İşleminin Mikroyapı Ve Sertlik Değişimlerine Etkisinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon.
- [26] Kılıç, E. (2008). 14NiCr10 – 14NiCr14 Çeliklerinin Uygulanacak Sementasyon İşlemine Bağlı Olarak Yorulma Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kırıkkale.
- [27] Kuswanto, B. (1999). Perlakuan pack carburizing pada baja karbon rendah sebagai material alternatif untuk pisau potong pada penerapan teknologi tepat guna. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi 2010*, Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim Semarang.
- [28] Oyetunji, A., Adeosun, S.O. (2012). Effects of carburizing process variables on mechanical and chemical properties of carburized mild steel. *Journal of Basic & Applied Sciences*, 8, 319-324.
- [29] Özcan, H. (2012). 32CrMoV Çeliğinin Aşınma Direncini Arttırmak İçin Yeni Bir Isıl İşlem Metodunun Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

- [30] Öz Saraç, U., Yılmaz, R., Ekerer, A. ve Uzun, H. (2021). Sementasyon işlemi yapılan çeliklerde mikro sertlik ve mikroyapı değişimlerinin incelenmesi, Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Dergisi.
- [31] Rowan, O.K. (2009). Effect of alloy composition on carburizing performance of steel. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 30, 235-241.
- [32] Salawu, E.Y., Ajayi, O.O., Inegbenebor, A.O., Akinlabi, S., Akinlabi, E., Popoola, A.P.I., Uyo, U.O. (2020). Investigation of the effects of selected bio-based carburising agents on mechanical and microstructural characteristics of gray cast iron. *Heliyon*, 6, e03418.
- [33] Wu, J., Wei, P., Liu, H., Zhang, X., He, Z., Deng, G. (2022). Evaluation of pre-shot peening on improvement of carburizing heat treatment of aisi 9310 gear steel. *Journal Of Materials Research and Technology*, 18, 2784-2796.
- [34] Asrofi, M., Hidayatulloh, A.V., Jatisukamto, G., Sutjahjono, H., Sakura, R.R. (2020). The effect of temperature and volume fraction of mahoni (Swietenia Mahogani) wood charcoal on SS400 steel using pack carburizing method: study of hardness and microstructure characteristics. *AIMS Materials Science*, 7(3), 354-363.
- [35] Paul, I.A., Bem, N.G., Justine, N.I., Joy, O.N. (2013). Investigation of egg shell waste as an enhancer in the carburization of mild steel. *American Journal of Materials Science and Engineering*, 1(2), 29-33.
- [36] Darmo, S., Sutanto, R. (2021). Study of the effect carburizing agent gigantochloa verticillata munro charcoal-barium carbonat on pack carburizing low carbon steel. *International Journal of Engineering And Science*, 11(9), 45-50.
- [37] Hosseini, S.R.E., Khosravi, H., Sohrabi, R., Hosseini, Z., Karimi, E.Z., Makarem, M. (2013). Correlation between hardenability curves and microstructure of a cementation steel carburized in the presence of Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> as an energizer material. *ISIJ International*, 53(12), 2213-2217.
- [38] Khosravi, H., Hosseini, S.R.E., Sisan, M.M., Paykani, M.A. (2014). Modeling of pack-carburizing route by general factorial design of experiment. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(9), 947-951.

- [39] Negara, D.N.K.P., Muku, D.M.K., Sugita, K.G., Astika, M., Mustika, W., Prasetya, D.G.R. (2015). Hardness distribution and effective case depth of low carbon steel after pack carburizing process under different carburizer. *Applied Mechanics and Materials*, 776, 201-207.
- [40] Negara, D.N.K.P., Widiyarta, I.M. (2019). The study on mechanical properties of pack carburized low carbon steel using baco<sub>3</sub> as energizer. *Materials Science and Engineering*, 673, 012125.
- [41] Ogo, D.U.I., Ause, T., Ibanga, E.J. (2004). The use of river clam shells (*aspatharia sinuata*) as an energizer in case carburization of mild steels. *ISIJ International*, 44(5), 865-868.
- [42] Okongwu, D.A., Paranthaman, V. (1987). Assessment of the efficacy of some carbonate minerals as energizers in pack carburisation of mild steel. *Nijotech*, 11(1), 28-43.
- [43] Ramli, Wu, C.C. (2021). Novel study on mechanical properties of pack carburizing scm 420 steel with energizer dog conch. *International Journal of Modern Physics B*, 35(5), 2150065-1-12.
- [44] Thammachot, N., Nachaisit, P., Homjabok, W., Peeratatsuwan, C., Mayai, A., Nithikarnjanatharn, J. (2016). The effects of energizer, carburizing temperature and time on the mechanical properties of hardened big knives in a pack carburizing process. *KKU Engineering Journal*, 43(4), 172-177.
- [45] Qin, S., Zhang, C., Zhang, B., Ma, H., Zhao, Z. (2022). Effect of carburizing process on high cycle fatigue behavior of 18CrNiMo7-6 steel. *Journal Of Materials Research and Technology*, 16, 1136-1149.
- [46] Karaca, Y. (2019). 1.2344 Sıcak iş takım çeliğinin kutu sementasyon yöntemi ile vc kaplanabilirliğinin incelenmesi. *Neşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9 (IMSTEC Özel Sayı), 106-110.
- [47] Tong, L., Dengzun, Y., Chungeng, Z. (2010). Low-temperature formation of aluminide coatings on Ni-base superalloys by pack cementation process. *Chinese Journal of Aeronautics*, 23, 381-385.

- [48] Hu, J., Liao, J., Yang, X., Zeng, J., Li, H., Song, B., Xu, H., Guo, N., Jin, Y. (2022). Microstructure and properties of al-coating on AZ31 magnesium alloy prepared by pack-cementation. *Nonferrous Met. Soc. China*, 32, 493-502.
- [49] Kahrıman, F., Tzini, M., Haidemenopoulos, G.N. (2023). Modeling of surface modification of stainless steel by halide activated pack cementation method. *AKÜ FEMÜBİD*, 23, (1001-1009).
- [50] Lu, D., Jiang, Q., Ma, X., Fan, L., Huang, Y., Hou, B. (2023). Effective time of a diffusion source in a pack cementation process on the AZ91D magnesium alloy. *Journal Of Materials Research And Technology*, 24, 5552-5562.
- [51] Yamanel, B., Erdem, O., Bican, O. (2023). Baybora-2 Tozu İle Borlanmış AISI 1020 Çeliğın Kinetik Ve Mekanik Özellikleri. *Metallurgical Research Technology*, 120, 602.
- [52] Santos, A.P.R., Mota, T.C., Segunbo, H.V.G., Almeida, L.H., Araujo, L.S., Rocha, A.C. (2018). Texture, microstructure and anisotropic properties of IF-steels with different additions of titanium, niobium and phosphorus. *Journal of Materials Research and Technology*, 7(3), 331-336.
- [53] Sarkar, B., Deva, A., Mukhopadhyay, S., Jha, B.K., Mukerjee, D., Mathur, A.S. (2010). Processing and application of interstitial free (IF) grade steel. *Conference. International Conference on Interstitial Free Steels*. Jamshedpur, India, 2010.
- [54] Canbuldu, A., Erdem, O. (2024). Metal sac şekillendirmede kullanılan IF çelikleri. *Ankara International Congress on Scientific Research-X*, June 25-27, 2024, Ankara/Türkiye (Tam metin bildiri-Sözlü sunum)
- [55] Doğan, T. (2018). IF Ve Bh Çeliklerinde Oluşturulan Farklı Tane Boyutlarının Statik Deformasyon Yaşlanma Davranışlarına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi. *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük.
- [56] Uslular Hadde, <https://www.uslularhadde.com/vakum-metalurjisi-ile-uretilen-celik-tipleri>, Erişim Tarihi:18.03.2023.
- [57] Rana, R., Singh, S.B. (Edt.) (2017). Automotive steels-design, metallurgy, processing and applications. Woodhead Publishing. ISBN: 978-0-08-100638.

- [58] Ereğli Demir ve elik Fab.T.A.Ş., <https://erdemir.com.tr/urunler-ve-hizmetler/yassi-urunler/soguk-haddelenmis-yassi-celik-urunler>, Erişim tarihi: 18.03.2023.
- [59] Kaya, K. (2022). Östenitik Paslanmaz elik Ve IF eliğinin Nokta Direnç Kaynak Yöntemi İle Birleştirilebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük.
- [60] Bakkaloğlu, A. (2001). IF eliklerinin üretim prosesi, özellikleri ve uygulamaları. *Makine & Metal Teknolojisi*, 115, 76-82.
- [61] Arcelor Mittal, <https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/HYTSS/IF>, Erişim Tarihi:18.03.2023
- [62] Cantergiani E., Sauvage X., Scott C.P., Weck A. (2022). Rapid strengthening of interstitial free steel using amorphous FeC thin films and induction heating. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(11), 9303-9317.
- [63] Kim, M.S., Kim, J.G., Kwon, S.C., Jeong, D.H., Lee, S., Jeong, H.T., Choi, S.H. (2022). Evolution of the microstructure and mechanical properties of interstitial-free steel during multi-axial diagonal forging. *Materials Science & Engineering*, 846, 143242.
- [64] Bayraktar, E., Kaplan, D., Devillers, L., Chevalier, J.P. (2007). Grain growth mechanism during the welding of interstitial free (IF) steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 189, 114-125.
- [65] Koizumi, T., Takahashi, T., Kuroda, M. (2022). Permanent strength of interstitial-free steel processed by severe plastic deformation and subsequent annealing. *ISIJ International*, 63, 179-189.
- [66] Li, H., Gao, S., Tomotaa, Y., Li, S., Tsuji, N., Ohmuraa, T. (2021). Mechanical response of dislocation interaction with grain boundary in ultrafine-grained interstitial-free steel. *Acta Materialia*, 206, 116621.
- [67] Ogawa, T., Namizaki, S., Adachi, Y., Takata, K. (2022). Dynamic analysis of microstructural evolution during tensile deformation of interstitial-free steel by in-situ electrical resistivity measurements. *Materials Letters*, 328, 133113.

- [68] Zhao, Y., Yang, Y., Barati, M., McLean, A. (2017). Strategies for nitrogen control during the production of interstitial-free steel. *Ironmaking & Steelmaking*. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/03019233.2017.128830>
- [69] Yadav, S., Kamal, A., Sinha, M., Ghosh, S. (2021). Recrystallization in commercial grade interstitial-free steel, discussing criticality of martensite and massive ferrite nucleation along with mechanical property. *Journal of Materials Research and Technology*, 15, 4750-4757.
- [70] Raj, M., Bidyapati, M., Umesh, M.A., Haripria, T.P., Prasad, V., Narasimhan, K. (2022). Microstructure and mechanical response of dissimilar joint of ferritic interstitial-free steel to austenitic low-density steel produced by diffusion bonding. *Materials Science & Engineering*, 856, 144020.
- [71] Yaşacan, D.A., Kayalı, E.S. (2007). Soğuk haddelenmiş IF çeliklerinde anizotropi katsayısının (r) geliştirilmesi. *İTÜ Dergisi / d Mühendislik*. 1(6), 47-52.
- [72] Zaitsev, A.I., Rodionova, I.G., Koldaev, A.V. (2020). Study of methods for increasing ductility and formability of cold-rolled ti-stabilized IF steels. *Materials Science and Engineering*, 969, 012018.
- [73] Klejch, F., Schmidova, E., Mejtsky, T. (2022). Anisotropy and hardenability of interstitial free steels under the influence of localized deformation. *Applied Engineering Letters*, 7(3), 125-131.
- [74] Deardo A.J., Mezzetti M., Garcia C.I. (2001). Alternative strengthening mechanisms for interstitial free (IF) steels. 43 MWSP Conference Proc., ISS, Vol. XXXIX, Pittsburgh, January-2001.
- [75] Majumdar, S., Bhattacharjee, D., Ray, K.K. (2011). Mechanism of fatigue failure in interstitial-free and interstitial-free high-strength steel sheets. *Scripta Materialia*, 64, 288-291.
- [76] Kancharla H., Mandal G.K., Kumar R. R., Chakraborty A., Singh S.S., Mondal K. (2022). Effect of annealing time on coating microstructure, frictional and electrochemical behavior of galvanized interstitial-free steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32, 5932-5945.

- [77] Kaya, K., Kaya, Y. (2022). Östenitik paslanmaz çelik ve IF çeliğinin nokta direnç kaynak yöntemi ile birleştirilmesine kaynak parametrelerinin etkisi. *Türk Müh. Araştırma ve Eğitim Dergisi*, 1(2), 38-51.
- [78] Eti Soda A.Ş., <https://etisoda.com/sodyum-karbonat-2/>, Erişim tarihi: 10.11.2024.



## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Arif CANBULDU

**İletişim** :

### Eğitim

- Lise Mezuniyet : 1993, Ankara Kurtuluş Lisesi
- Lisans Mezuniyet : 1998, Cumhuriyet Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü
- Yüksek Lisans Mezuniyet : 2025, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı