

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**

**HESAPLAMALI MALZEME MÜHENDİSLİĞİ TEKNOLOJİSİ  
İLE HADDE MERDANESİ KİMYASAL BİLEŞİM  
OPTİMİZASYONU UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MURAT KUTLUAY**

**DENİZLİ, MAYIS - 2025**

**T.C.  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI**



**HESAPLAMALI MALZEME MÜHENDİSLİĞİ TEKNOLOJİSİ  
İLE HADDE MERDANESİ KİMYASAL BİLEŞİM  
OPTİMİZASYONU UYGULAMALARI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MURAT KUTLUAY**

**DENİZLİ, MAYIS - 2025**

**Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.**

**MURAT KUTLUAY**

# ÖZET

**HESAPLAMALI MALZEME MÜHENDİSLİĞİ TEKNOLOJİSİ İLE  
HADDE MERDANESİ KİMYASAL BİLEŞİM OPTİMİZASYONU  
UYGULAMALARI  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
MURAT KUTLUAY  
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. ENGİN TAN)**

**DENİZLİ, MAYIS - 2025**

Haddehaneler için en kritik ekipmanlardan biri olan hadde merdaneleri, üretimin güvenliği ve maliyetlerin optimize edilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Haddehaneler, uygun fiyat ve yüksek performans sunan merdaneleri tercih ederken, merdane üreticiler artan maliyetlerle mücadele etmekte ve yenilikçi çözümler aramaktadır. Merdane maliyetlerini düşürmek amacıyla alaşım elementlerinin optimum miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Ancak, bu kimyasal bileşimlerin deneme-yanılma yöntemiyle üretilip, test edilmesi hem zaman hem de maliyet açısından dezavantaj oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, hesaplamalı malzeme mühendisliği çerçevesinde CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) tekniği kullanılarak, istenilen mikroyapı özelliklerine göre uygun kimyasal bileşimler tasarlanarak uygunluğu test edilmek istenilmiştir. Bu yöntemle, karbür, sementit ve grafit gibi fazların miktar ve dağılımları optimize edilmiştir. Hesaplanan bileşimler üzerinden gerçekleştirilen merdane dökümleri sonrası, mikroyapı incelemeleri, karbür tayinleri, aşınma testleri, yüzey pürüzlülüğü ölçüm çalışmaları yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar, hem haddehanelerin taleplerini karşılayacak hem de maliyet ve üretim süreçlerini iyileştirecek bir yaklaşım sunmaktadır. Bu çalışma, CALPHAD tekniğinin hadde merdanesi tasarımında sağladığı avantajları göstermekte ve malzeme mühendisliğinde yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

**ANAHTAR KELİMELER: Hadde merdanesi, Calphad, Thermo-Calc, Kimyasal bileşim analizi, Aşınma**

# **ABSTRACT**

## **ROLL MILLS CHEMICAL COMPOSITION OPTIMIZATION APPLICATIONS WITH COMPUTATIONAL MATERIALS ENGINEERING TECHNOLOGY**

**MSC THESIS**

**MURAT KUTLUAY**

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE  
DEPARMENT OF METALLURGICAL AND MATERIALS  
ENGINEERING  
(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. ENGIN TAN)**

**DENİZLİ, MAY 2025**

Rolls are among the most critical equipment for rolling mills, playing a vital role in ensuring production safety and cost optimization. While rolling mills prefer rolls that offer both cost-effectiveness and high performance, roll manufacturers face increasing production costs and are in search of innovative solutions. Reducing roll costs requires the optimization of alloying element quantities. However, producing and testing these chemical compositions through trial-and-error methods poses significant disadvantages in terms of both time and cost.

This study aimed to test the suitability of suitable chemical compositions by designing them according to the desired microstructure features using the CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) technique within the framework of computational materials engineering. This method optimizes the amount and distribution of carbide, cementite, and graphite phases. After the roll castings were performed on the calculated compositions, microstructure examinations, carbide determinations, wear tests, and surface roughness measurement studies were carried out.

The obtained results provide an approach that will both meet rolling mills' demands and improve cost and production processes. This study shows the advantages of the CALPHAD technique in rolling roll design and offers an innovative solution in materials engineering.

**KEYWORDS: Roll Mills, Calphad, Thermo-Calc, Chemical analysis**

# İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
TABLO LİSTESİ.....	viii
SEMBOL LİSTESİ.....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Sıcak Haddeleme.....	3
1.2 Soğuk Haddeleme.....	4
1.3 Hadde Merdaneleri.....	5
1.3.1 Kaba Haddeleme Merdaneleri.....	8
1.3.2 Kesin Çil Merdaneleri.....	8
1.3.3 Kompozit veya Dupleks Merdaneler.....	9
1.3.4 Belirsiz Çil Merdaneleri.....	9
1.3.5 Küresel Grafitli Dökme Demir Merdaneler.....	9
1.3.6 Çelik Döküm Merdaneler.....	10
1.3.7 Adamit Çelik Merdaneler.....	10
1.3.8 Grafitik Çelik Merdaneler.....	10
1.4 Hadde Merdanesi Üretim Yöntemleri.....	11
1.4.1 Statik Merdane Dökümü.....	11
1.4.2 Savurma Merdane Dökümü.....	14
1.4.3 Dövme Merdanelerin üretimi.....	15
<b>2. KÜRESEL GRAFITLİ DÖKME DEMİR HADDE MERDANELERİ 18</b>	<b>18</b>
2.1 Alaşım elementlerinin Küresel Grafitli Dökme Demire etkisi.....	19
2.1.1 Karbon.....	19
2.1.2 Silisyum.....	19
2.1.3 Mangan.....	20
2.1.4 Krom.....	20
2.1.5 Nikel.....	20
2.1.6 Molibden.....	21
2.1.7 Bakır.....	21
<b>3. HESAPLAMALI MALZEME MÜHENDİSLİĞİ.....</b>	<b>22</b>
3.1 CALPHAD Metodolojisi.....	22
3.2 Literatür araştırması.....	24
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....</b>	<b>29</b>
4.1 Calphad Hesaplamaları.....	29
4.2 Kullanılan Alaşım Elementleri.....	29
4.3 Ergitme ve Döküm.....	30
4.4 Numunelerin Hazırlanması.....	32
4.5 Karakterizasyon.....	33
4.5.1 Metalografi.....	34
4.5.1 SEM ve EDS Analizi.....	34
4.5.1 XRD Analizi.....	34

4.6	Mekanik Testler.....	36
4.6.1	Aşınma Testi.....	36
4.6.2	Sertlik Testi.....	37
4.6.3	Yüzey Pürüzlülüğü.....	38
<b>5.</b>	<b>BULGULAR.....</b>	<b>40</b>
5.1	CALPHAD Hesaplama Sonuçları.....	40
5.2	Mikroyapı Görüntüleri.....	47
5.3	Aşınma Test Sonuçları.....	49
5.4	Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları.....	54
5.5	SEM ve EDX Sonuçları.....	54
5.6	XRD Sonuçları.....	60
<b>6.</b>	<b>SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>62</b>
<b>7.</b>	<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>64</b>
<b>8.</b>	<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>70</b>



# ŞEKİL LİSTESİ

## Sayfa

Şekil 1.1: Hadde tezgahı şeması (Jiang ve diğ. 2017).....	1
Şekil 1.2: Hadde tezgah tipleri a) 2-Hi b) 3-Hi c) 4-Hi d) 6-Hi e) 6 Roll f) Universal g)Sendzimir h) Z-Hi ı) Dikişli boru i) Dikişsiz boru.....	2
Şekil 1.3: Haddelenen metalin tane yönlenmesi (Ye ve diğ. 2018).....	3
Şekil 1.4: Statik merdane döküm yöntemi.....	12
Şekil 1.5: Taşırma merdane döküm yöntemi.....	13
Şekil 1.6: Boşaltma merdane döküm yöntemi.....	13
Şekil 1.7: Savurma merdane üretim yöntemi, a)gövde çekirdek ve muylu malzemesi b) savurma ile dökülen malzeme c) kokil kalıp .....	14
Şekil 1.8: 3 farklı malzemeye sahip savurma döküm yöntemi ile üretilmiş hadde merdanesi (Kubota, 2024).....	15
Şekil 1.9: Dövme çelik merdanesi üretim proses akış şeması (PT-Sumitech 2024).....	17
Şekil 3.1: Sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları a) İkili sistem b) Üçlü sistem.....	23
Şekil 4.1: Kimyasal bileşim kontrolü için kullanılan spektrometre cihazı.....	31
Şekil 4.2: Açık pota küreselleştirme işlemi .....	31
Şekil 4.3: Hazırlanan kalıp .....	32
Şekil 4.4: Merdane çalışma yüzeyinden alınan aşınma numune parçası.....	33
Şekil 4.5: ASTM G99 Standardına göre aşınma test numune ölçüleri.....	33
Şekil 4.6: Tel erezyon ile kesilen numuneler.....	33
Şekil 4.7: Numunelerin incelendiği optik mikroskop.....	34
Şekil 4.8: SEM ve EDS Analiz cihazı .....	35
Şekil 4.9: XRD Analiz Cihazı .....	35
Şekil 4.10: Hazırlanan numuneler .....	36
Şekil 4.11: Pin on disk aşınma test cihazı .....	37
Şekil 4.12: Ağırlık ölçümünde kullanılan tartı .....	37
Şekil 4.13: Merdane sertlik ölçümü ve sertlik cihazı .....	38
Şekil 4.14: Yüzey pürüzlülük cihazı.....	39
Şekil 5.1: DH-1 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları.....	41
Şekil 5.2: DH-2 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları.....	42
Şekil 5.3: DH-3 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları.....	43
Şekil 5.4: DH-4 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları.....	44
Şekil 5.5: DH-5 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları.....	45
Şekil 5.6: DH-1 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x.....	47
Şekil 5.7: DH-2 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x.....	48
Şekil 5.8: DH-8 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x.....	48
Şekil 5.9: DH-4 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x.....	48
Şekil 5.10: DH-5 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x.....	49
Şekil 5.11: Aşınma testi uygulanan numunelerin kayma mesafesine göre hacim kayıpları, a) DH-1 b) DH-2 c) DH-3 d) DH-4 e) DH-5 .....	51
Şekil 5.12: Kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayıları .....	53
Şekil 5.13: Yüzey pürüzlülük sonuçları a)DH-1 b)DH-2 c)DH-3 d)DH-4 e)DH-5 .....	55
Şekil 5.14: DH-1 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları.....	57
Şekil 5.15: DH-2 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları.....	57
Şekil 5.16: DH-3 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları.....	58
Şekil 5.17: DH-4 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları.....	58

<b>Şekil 5.18:</b> DH-5 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları.....	59
<b>Şekil 5.19:</b> XRD Analiz sonuçları .....	60



# TABLO LİSTESİ

## Sayfa

<b>Tablo 1.1:</b> Hadde merdanelerinde bulunan karbürler.....	6
<b>Tablo 4.1:</b> Küreselleştirici kimyasal analizi.....	29
<b>Tablo 4.2:</b> Aşılmalı kimyasal analizi.....	29
<b>Tablo 4.3:</b> Perlitik Merdane kimyasal bileşimi .....	30
<b>Tablo 4.4:</b> Hesaplamaları yapılan merdane kimyasal bileşimleri .....	30
<b>Tablo 5.1:</b> En yüksek yük ve kayma mesafesindeki hacim kayıpları .....	51
<b>Tablo 5.2:</b> Kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayılar.....	53
<b>Tablo 5.3:</b> 60 N – 1800 m aşınma test sonucu yüzey pürüzlülüğü değerleri ...	54



## SEMBOL LİSTESİ

<b>CALPHAD</b>	:CALculation of PHAse Diagrams (Faz Diyagramlarının Hesaplanması)
<b>DSC</b>	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre
<b>EDS</b>	: Enerji Dağılımlı Spektrometre
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>SHc</b>	: Shore C sertlik
<b>XRD</b>	: X-Işını Kırınım Analizi



## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının konusunu belirleyen, gerçekleştirilmesi ve her aşamasında bana destek olan, yüksek lisans dönemimde bana bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Engin TAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda yardımlarını aldığım ve tezimin hazırlanmasında beni destekleyen Yük. Met. ve Malz. Müh. Sayın Rüçhan YILDIZ'a teşekkür ederim.

Hesaplamalı Malzeme Mühendisliği yazılımı ile gerçekleştirilen analizlerde yardımlarını aldığım Alpomet firmasından Sayın Yağız AKYILDIZ'a teşekkür ederim.

Karakterizasyon analizlerinin yorumlanmasında katkılarını aldığım Foseco Nederland B.V. Demir Dışı Metal Global Ar-Ge Direktörü Sayın Dr. Derya DIŞPINAR'a teşekkür ederim.

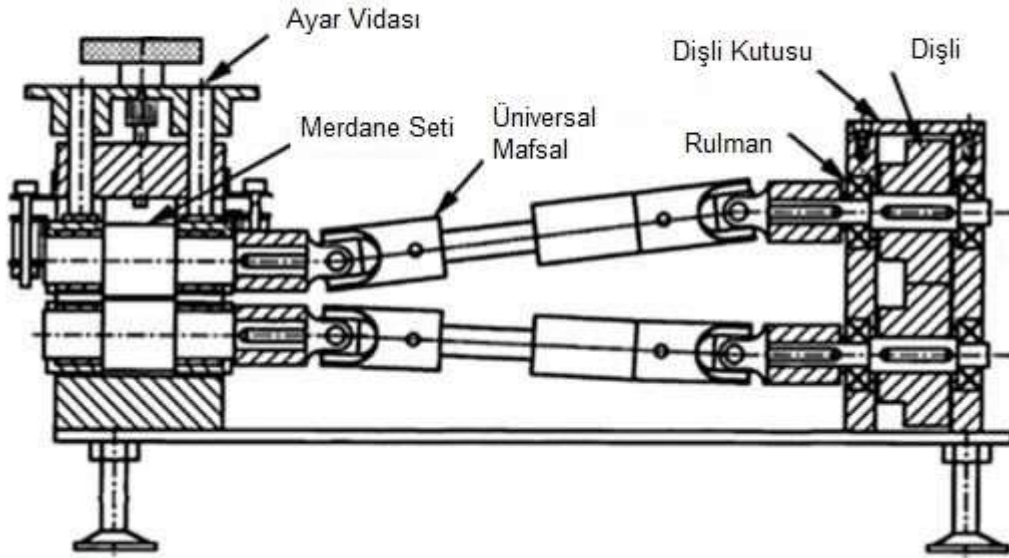
Yüksek lisans boyunca ve tez dönemimde desteğini esirgemeyen Ersoy Döküm Makine firmasına ve Sayın Ahmet ERSOY'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca desteğini hiç esirgemeyen sevgili eşime ve kızıma, eğitim hayatım boyunca beni destekleyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

## 1. GİRİŞ

Haddeleme, demirli veya demir dışı malzemelerin yeniden kristalleşme sıcaklığı üzerinde veya altında, takım olarak hadde merdanelerin arasından geçerek plastik şekil verme işlemidir (Gupta, 2021).

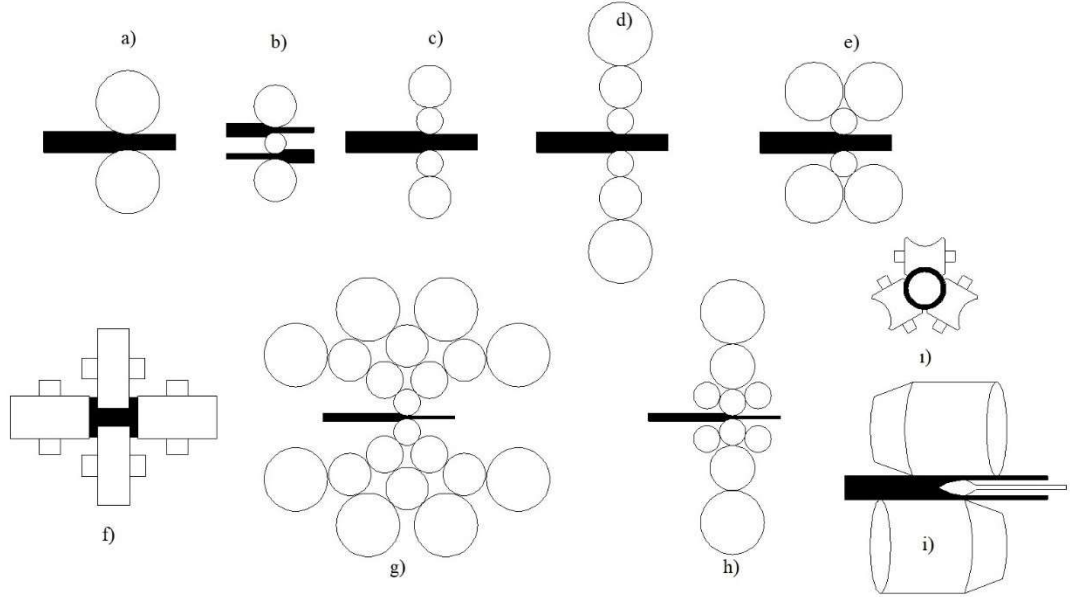
Haddeleme işleminde malzeme döner hadde merdanelerin üzerindeki kalibre boşluklarından geçmesine izin verilerek yüksek basınç gerilimine maruz bırakılarak kalıcı deformasyon ile şekil verilmektedir. Bu işlemler hadde merdanelerinin zıt yönde döndüren tahrik sistemi ile gerçekleşir. Tahrik sisteminde elektrik motoruna bağlı redüktör bulunmaktadır. Redüktör ile merdane arasında miller kaplinler ile bağlantı oluşturularak tahrik sistemini oluşturur. Merdane ve Tahrik sisteminin bütüne hadde standı, tezgah veya hadde ayağı olarak adlandırılmaktadır (Ray, 2016). Şekil 1.1’de Hadde Tezgahı gösterilmiştir.



Şekil 1.1: Hadde tezgahı şeması (Jiang ve diğ., 2017)

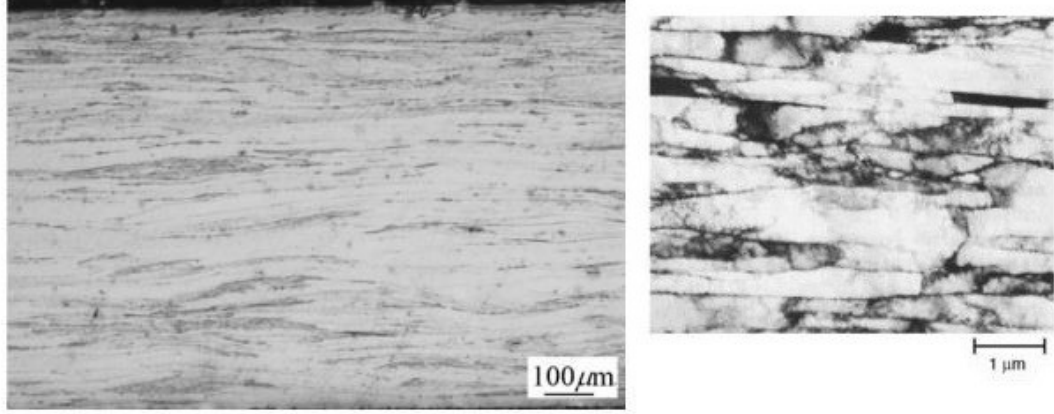
Geleneksel haddeleme tezgahlarında tek geçişteki ezme oranları yalnızca merdane kapasitesi ile değil aynı zamanda tezgah sistemiyle sınırlıdır. Tezgahların ezme oranlarını arttırmanın en belirgin yolu merdanenin çapını azaltmaktır. Ancak merdaneler arasında daha yüksek yüzey temas gerilimlerine maruz

kaldığından merdanenin aşınmasına yol açmaktadır. Özellikle soğuk haddeleme gibi yüksek ezme oranlarına sahip haddelemelerde düşük çaplı merdaneler kullanılsa da bunlara ek olarak yedek merdaneler ile desteklenmektedir. Yüksek ezme oranlarının oluşması ve daha küçük kesitlerde ürünlerin haddelenmesi zaman içerisinde gelişerek haddelenecek ürünün geometrisine göre farklı tezgahlar geliştirilerek hem merdane ömrünü uzatmak hem de ince kesitli ürünlerin haddelenmesine olanak sağlamıştır(Wusatowski, 1968). Bir kısmı laboratuvar şartlarında tasarım olarak kalsa da bir kısmı ticari olarak kabul görmüştür(Roberts, 1978). Bu gelişmeler sonucu merdane pozisyonlarına göre yatay ve dikey olarak çalışan hadde tezgahları kendi içerisinde ikili, üçlü, dördü, demet haddesi olarak tezgah tipine göre de kategorize edilmeye başlanmıştır(Küçükakarsu, 2022). Geliştirilen 2-Hi, 3-Hi, 4-Hi, vb. hadde tezgahları Şekil 1.2’de verilmiştir.



**Şekil 1.2:** Hadde tezgah tipleri a) 2-Hi b) 3-Hi c) 4-Hi d) 6-Hi e) 6 Roll f) Universal g)Sendzimir h) Z-Hi i) Dikişli boru j) Dikişsiz boru

Üretilen tüm dövme çelik, alüminyum ve bakırın %90'ından fazlası en az bir haddeleme işleminden geçer. Sıcak haddeleme, döküm halindeki yapının ezilerek yönlenmesine yardımcı olur bu sayede daha düzgün bir tane boyutu ve bileşen parçacıkların daha iyi bir dağılımı ve boyutu sağlanır. Sıcak haddeleme sırasında tane yapısı Şekil 1.3’de gösterildiği gibi, haddeleme yönünde uzayarak, uzama yönüne doğru özellikle kırılma tokluğu ve korozyon direnci olmak üzere mekanik özellikler üzerinde önemli etkiye sahiptir (Jiang diğ. 2017).



**Şekil 1.3:** Haddelenen metalin tane yönlenmesi (Ye ve diğ. 2018) (Campbell 2008)

Haddeleme işleminin temel hedefleri, gelen malzemenin kesitini azaltırken özelliklerini iyileştirmek ve istenen şekli elde etmektir. İşlem, uygulamaya ve ilgili malzemeye bağlı olarak sıcak veya ılık, soğuk olarak gerçekleştirilebilir. Haddeleme sırasında, iki iş silindiri kullanılarak sıkıştırma deformasyonu gerçekleştirilir. Merdaneler, gelen metalin hızını aşan bir yüzey hızıyla döndüğünden, temas arayüzü boyunca sürtünme metali yakalar ve ileri doğru iter. Belirli bir çift silindir arasında tek bir geçişte elde edilebilecek deformasyon miktarı, arayüz boyunca sürtünme koşullarına bağlıdır. Çok fazla deformasyon denirse, silindirler sabit metal üzerinde kayar, geçiş başına çok az deformasyon ise aşırı maliyete neden olur. Haddelemenin temel avantajı, nispeten büyük metal parçalarından çok yüksek hızlarda ve biraz sürekli bir şekilde istenen şekilleri üretme yeteneğinde yatmaktadır (Campbell 2008).

## 1.1 Sıcak Haddeleme

Sıcak haddeleme, metallerin yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda şekillendirilmesi işlemidir. Bu proseste, 1050-1300 °C arasındaki sıcaklıklarda şekil, boyut ve metalürjik özellikler üzerinde değişiklikler, merdaneler arasında uygulanan mekanik basma kuvveti ile sağlanır. Genellikle döküm yapısı bozularak daha küçük ve eş taneli bir yapı elde edilmesi amaçlanır

Haddeleme girdisi olarak döküm ingotlar, kütükler, profiller, çelik çubuklar veya slab gibi yarı mamuller kullanılabilir. İşlem sırasında malzeme, büyük oranlardaki basma kuvvetiyle ezilerek boyut ve şekil değişikliğine uğrar. Sıcak haddeleme, çelik döküm yapısından haddelenmiş yapıya geçişi sağlar; bu esnada tane

boyutu küçülür ve mekanik özellikler iyileştirilir. Sıcak haddeleme sonucu çeliğin ortalama tane boyutu 20 µm civarındadır. Haddeleme sonrası soğuma ile bu boyut 5-10 µm arasına kadar düşebilmektedir. Daha küçük tane boyutları dayanım artışına katkı sağlar. Mekanik özellikler, malzeme kimyası, ısıtma sıcaklığı, deformasyon sırasında sıcaklığın azalma oranı, deformasyon oranı, yeniden kristalleşme süreci ve deformasyon sonrası soğutma gibi parametrelere bağlıdır.

Sonuç olarak sıcak haddelemede, kare, yuvarlak, yassı, çokgen kesit, şerit, köşebent, profil ve ray gibi çeşitli mamüllerin üretiminde kullanılan kritik bir şekillendirme yöntemidir. Malzemenin şekillendirme kabiliyeti artar. Yeniden kristalleşme mekanizması sayesinde mikroyapıda sağlanan iyileşmeler, malzemenin dayanım ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde geliştirir (Toptaş, 2015) (Başkaya, 2020) (Küçükakarsu, 2022).

## **1.2 Soğuk Haddeleme**

Soğuk haddeleme, sıcak haddelenmiş ve yüzeyi asitle temizlenmiş mamullerin yüzey özelliklerini iyileştirmek ve hassas ölçülerde üretim yapmak için kullanılan bir işlemdir. Bu süreçte malzeme, pekleşme etkisiyle ilave mukavemet kazanır. Soğuk haddelemeler genellikle 4 veya 5 standlı olarak tasarlanır; kapasitenin düşük olduğu durumlarda ise tek standlı tersinir haddeler kullanılabilir. Bu işlemde %50 ile %90 arasında ezme gerçekleştirilebilir ve en iyi yüzey özellikleri ile kalınlık düzgünlüğü genellikle son standta elde edilir.

Soğuk haddeleme, genellikle sıcak haddeleme ile üretilmiş malzemelerde daha ince kesit kalınlıklarının ve yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesi amacıyla uygulanır. İşlem, yeniden kristalleşme sıcaklığının altında gerçekleşir. Bu nedenle tane yapısı, haddeleme yönünde uzamış tanelerden oluşur. Soğuk haddeleme ile üretilen ürünler düzgün yüzeye, yüksek mukavemete ve hatasız boyutlara sahip olur. Bu mukavemet artışı, kesit daralması sonucu oluşan pekleşme ile sağlanır. Ancak bu durum, haddeleme kuvveti ve gücünü de artırır. Bu işlem sırasında malzeme, yüksek miktarda enerji absorbe eder. Enerjinin büyük bir kısmı plastik deformasyon için harcanırken, geri kalanı ısı olarak açığa çıkar. Soğuk haddeleme işlemi, malzemeye düzgün yüzey, hatasız boyutlar ve yüksek mukavemet sağlarken sünekliği azaltır. Bu

nedenle işlem sonrası malzeme, sünekliği geri kazanmak amacıyla tavlama işlemine tabi tutulur. Tavlama, azalan metal sünekliğini ve iç gerilmeleri gidermek amacıyla 600 °C sıcaklıkta yaklaşık 30 saat süreyle gerçekleştirilir.

Soğuk haddeleme, sıcak haddelemeye kıyasla daha küçük tane yapısı elde edilmesini sağlar. Bu, malzemenin daha yüksek mukavemet ve yüzey düzgünlüğüne sahip olmasına olanak tanır. Ancak, işlem sırasında yüksek haddeleme kuvveti ve enerji gereksinimi doğar. Soğuk haddeleme, sac, tel, levha gibi nihai ürünlerin üretiminde kullanılan kritik bir yöntemdir (Toptaş, 2015) (Başkaya, 2020) (Küçükakarsu, 2022).

Haddeleme işlemi, metal şekillendirme endüstrisinde yaygın kullanılan bir yöntemdir. Sıcak haddeleme, yüksek üretim kapasitesine uygunken, soğuk haddeleme daha hassas yüzey özellikleri ve mekanik özelliklerin elde edilmesinde tercih edilir. Her iki yöntem, nihai ürünlerin şekli ve kullanım amacına göre birbirini tamamlayıcı bir rol oynar (Ray, 2016).






### **1.3 Hadde Merdaneleri**

Haddeleme bileşenleri arasında en kritik ekipman hadde merdaneleridir. Haddelenen mamulü deforme etmek için yüksek basınç, kesme gerilmelerine dayanması, eğilme ve burulma altındaki mukavemetlerin yanı sıra merdanelenin sertliği en önemli mekanik özellikler arasında yer alır (Roberts, 2017).

Hadde merdaneleri, sıcak çelik haddeleme işlemlerinde, yoğun mekanik, termal ve kimyasal etkilere maruz kalarak aşınır. Bu aşınma, yalnızca merdane yüzeyindeki deformasyonlarla sınırlı kalmaz; aynı zamanda üretim verimliliğini düşürerek ve ürün kalitesini olumsuz etkileyerek bakım ve değiştirme maliyetlerini artırır. Haddeleme sırasında merdane yüzeyi, haddelenen şeritle veya destek merdanesiyle temas sonucunda aşınırken, değişken mekanik gerilmeler yüzey katmanlarında yorulmaya ve zamanla çatlak oluşumuna neden olur. Ayrıca, sıcaklık değişimleri, termal çatlaklar ve yorulma etkileri yaratarak malzemenin kullanım ömrünü kısaltır (Saha ve diğ. 2005).

Hadde merdanelerinde aşınma direncini genellikle karbürlerden oluşan matrisle ekstra bir fazın dahil edilmesiyle iyileştirilebilir (Laino ve diğ. 2008). Karbürler, hadde merdanelerinin aşınma direncini artırmada kritik bir rol oynar. MC, M<sub>2</sub>C, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> ve M<sub>6</sub>C gibi karbürler, yüksek sertlikleri ve aşındırıcı aşınmaya karşı dirençleri ile bilinir. Bu karbürler, malzemenin mikro yapısında homojen şekilde dağılmış durumda bulunur ve karbon, krom, molibden ile vanadyum gibi alaşım elementleri sayesinde stabiliteyi korur. Özellikle sertlik başta olmak üzere yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştirmek için kobalt eklenir. Alaşım elementlerinin oranı, karbürlerin oluşum sürecini ve dağılımını doğrudan etkileyerek merdanenin aşınmaya karşı dayanımını belirler. Örneğin, MC tipi karbürler, yüksek sertlik seviyeleri ile dikkat çekerken, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> tipi karbürler termal çatlaklara karşı direnç sağlar. Ayrıca, ince dağılmış ikincil karbürler, mekanik ve termal dayanımın dengelenmesine katkıda bulunur (Kamimiyada ve diğ. 2021) (Kamimiyada ve diğ. 2020) (Sano ve diğ. 1992) (Opapaiboon ve diğ. 2015). Hadde merdanesinde istenen karbür tipleri Tablo 1.1’de verilmiştir.

**Tablo 1.1:** Hadde merdanelerinde bulunan karbürler (Opapaiboon ve diğ. 2015).

Karbür Tipi	Oluşturduğu Şekil	Morfoloji	Kimyasal Bileşim (Birincil / İkincil)		Yapıda Oluşturduğu Bölgeler
MC		Yumru sık ve kalın	V	Mo,W,Cr	Tane merkezi, Tane sınırları
M <sub>2</sub> C		Asiküler veya Lamel	Mo, W	Cr,Fe,V	İnterdendritik alanlar
M <sub>6</sub> C		İnce lamel (Balık kılçığı gibi)	Mo, W	Cr,Fe,V	Yüksek soğutma ile yüzeyde
M <sub>7</sub> C <sub>3</sub>		Kalın Lamel	Fe, Cr	Mo,W,V	İnterdendritik alanlar
M <sub>23</sub> C <sub>6</sub>		Birbirinden ayrı küçük yumru	Cr, Fe	Mo,W,V	Matrisle homojen dağılmış

Hadde merdanelerindeki aşınma mekanizmaları arasında üç temel faktör öne çıkar: aşındırıcı aşınma, termal yorulma ve kimyasal reaksiyonlar. Aşındırıcı aşınma, sert karbürlerin yüzey aşındırıcılarına karşı direnç gösterdiği bir süreçtir. Ancak, merdane yüzeyinin sıcaklık döngüleri nedeniyle maruz kaldığı termal yorulma, mikro çatlakların oluşumuna ve bu çatlakların zamanla derinleşmesine yol açar. Termal

döngüler sırasında, merdane yüzeyindeki her bir nokta, yüksek sıcaklıklar ve ardından ani soğumalar ile gerilmeye maruz kalır. Bu sıcaklık değişimleri, yüzeydeki metal yapıyı zayıflatarak çatlak oluşumunu hızlandırır. Kimyasal reaksiyonlar ise haddeleme yağında bulunan serbest yağ asitleri ile metal yüzey arasında gerçekleşir. Bu reaksiyonlar, yüzey performansını olumsuz etkileyerek hem aşınmayı hızlandırabilir hem de merdane ömrünü kısaltabilir (Iwandoh ve Mori, 1992).

Hadde merdanelerinin geliştirilmesi, yalnızca üretim süreçlerini iyileştirmekle kalmaz, aynı zamanda maliyetleri düşürerek uzun vadeli ekonomik faydalar sağlar. Daha dayanıklı ve uzun ömürlü merdane malzemeleri kullanmak, işleme duraklamalarını ve değiştirme sıklığını azaltır. Günümüzde yüksek sertlikte karbürler içeren çok alaşımlı beyaz dökme demirler gibi yenilikçi malzemeler, haddeleme süreçlerinde büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu tür malzemeler, birincil ve ikincil karbürlerin dengeli dağılımını sağlayarak, hem mekanik hem de termal dirençlerini artırır. Örneğin, yüksek alaşımlı dökme demirlerin içerdiği MC tipi karbürler, aşınmaya karşı oldukça dirençli olup, termal yorulma etkilerini de önemli ölçüde azaltır. Termal yorulmayı en aza indirmek için soğutma teknolojilerinin optimize edilmesi büyük önem taşır. Merdane soğutma sistemlerinin iyileştirilmesi, sıcaklık değişimlerinin oluşturduğu gerilmeleri azaltarak termal çatlak oluşumunu engeller. Bunun yanı sıra, döküm ve ısıl işlem süreçlerinin optimize edilmesi, karbürlerin mikro yapıdaki dağılımını iyileştirerek merdane performansını artırabilir. Örneğin, termal şok dayanımını artırmak için yüzey sertliği ve iç yapının dengeli olması sağlanmalıdır. Ayrıca, grafit içeren dökme demirler, termal çatlakların oluşumunu azaltma potansiyeline sahiptir. Grafitin yağlama etkisi, yüzeydeki gerilmelerin homojen dağılımını destekleyerek çatlak oluşumunu önler (Kubo ve diğ. 2005) (Kamimiyada ve diğ. 2021).

Sonuç olarak, hadde merdanelerinin aşınmaya karşı direncini artırmak, üretim verimliliği ve ürün kalitesinde önemli kazanımlar sağlar. Bunun için malzeme geliştirme, soğutma sistemlerinin optimize edilmesi ve mikro yapının kontrol edilmesi gibi çok yönlü yaklaşımlar benimsenmelidir. Aşınma direncini artıran bu tür stratejiler, hem kısa vadede operasyonel etkinliği yükseltir hem de uzun vadede maliyet tasarrufu sağlayarak sürdürülebilir bir üretim süreci sunar. Ayrıca, inovasyon odaklı malzeme

tasarımları ve modern üretim teknikleri, hadde merdanelerinin performansını artırarak sektördeki rekabet gücünü de desteklemektedir (Kamimiyada ve diğ. 2021).

Merdanelerde sertlik geleneksel olarak kategorize etmek için de kullanır. Bunlar; (Ray, 2016)

Yumuşak merdaneler: 150-250 HB sertliğinde olup, Hazırlama grupları, ağır kesit haddeleme kaba tezgahları, ara gruplar ve dikişsiz boru üretiminde kullanılan delme tezgahları olarak sıralanabilir.

Yarı-Yumuşak Merdaneler: 250-400 HB sertliğinde olup, ray ve profil haddehanelerin kaba işleme tezgahlarında, ağır profil finiş tezgahlarında kullanılırlar.

Sert Merdaneler: 400-600 HB sertliğinde olup, şerit, sac, ray ve tüm profil gruplarının finiş tezgahlarında kullanılır. Ayrıca 4'lü soğuk haddeleme tezgahların yedek merdaneleri olarak kullanılırlar.

Aşırı Sert Merdaneler: 600-800 HB sertliğinde olan bu merdaneler soğuk haddelemede kullanılırlar.

### **1.3.1 Kaba haddeleme merdaneleri**

Bu merdaneler gri dökme demir olarak kum kalıba döküm ile üretilir. Kum kalıpta soğumayla birlikte karbon serbest grafit olarak çökeler. Homojen şekilde çökelen grafitler sayesinde yapıda farklılıklar yoktur. Bu sayede ateş çatlaklarına karşı dirençlidir. Bir dereceye kadar kendi kendini yağlayan ve özellikle derin kalibreli merdanelerde tercih edilir. Kaliteyi arttırmak için Nikel, Krom ve Molibden alaşım elementleri ilave edilebilir (Schweitzer, 2024) (Gupta, 2021).

### **1.3.2 Kesin çil merdaneleri**

Bu merdaneler serbest grafit oluşumu kısıtlamak için gövdeler kokil kalıplara, muylular ise kum kalıplara dökülür. Gövde yüzeyinde hızlı soğumayla birlikte beyaz dökme demire benzer sert bir tabaka oluşturulur. Çekirdek ise gri dökme demir olarak

kalır. Gövde ile çekirdek arası kalan bölge beyaz ve gri dökme demir karışımı olan benekli dökme demir oluşmaktadır. Bu merdenelerin yüzey sertlikleri 55-65 Shc sertliklere çıkabilir. Alaşım elementleri ile 65-90 Shore C sertliklere ulaşılmaktadır (Jai Bharat Casting, 2024) (LMM Rolls, 2024) (Lenard, 2014).

### **1.3.3 Kompozit (dubleks) merdaneler**

Yüzey sertliği yüksek olan bu merdaneler çift döküm yöntemiyle üretilir. İlk döküm hızlı soğumayla gövde yüzeyinde sert bir kabuk tabakası oluşturur. İkinci dökümde ise gri dökme demir dökümü yapılır. Bu sayede gövdeden merkeze doğru azalan bir sertlik eğrisi görülür. Bu merdaneler genellikle soğuk haddeleme finiş tezgahlarında kullanılabilir (Schweitzer, 2024) (Shimizu ve diğ. 1992).

### **1.3.4 Belirsiz çil merdaneleri**

Bu merdanelerde, gövdeden çekirdeğe doğru eşit şekilde dağılmış ince interdrititik grafit içeren dökme demirden oluşmaktadır. Grafitin boyutu, şekli ve dağılımı, karbür içeriğiyle birlikte soğutma etkisi ve alaşım miktarı ile kontrol edilir. Nikel, Krom ve Molibden gibi alaşım elementleri ile matris yapısını perlitik, beynitik, martenzit yapıları oluşturulabilir. Belirsiz soğumuş merdanelerde tamamen grafit oluşturularak 38-48 Shore C sertlik elde edilirken Alaşımli Belirsiz soğumuş merdanelerde 55-75 Shore C sertliklere ulaşılabilir. Bu merdanelerin en önemli özellikleri interdrititik grafitler sayesinde termal şoka karşı dirençlerinin yüksek olmasıdır (Singhal, 1994) (Andersson ve diğ. 2004).

### **1.3.5 Küresel grafitli dökme demir merdaneler**

Küresel grafitli dökme demir merdanelerin en önemli avantajları kolay dökülebilir ve işlenebilir olmaları aynı zamanda iyi yüzey kaliteleri, sertlik ve korozyon dirençleri yüksektir. Genellikle gri dökme demir merdanelerin dayanımların yeterli olmadığı ve çelik merdanelerin aşınma direncinin yetersiz olduğu yerlerde

tercih edilirler. Nikel, Krom, Molibden ve Mangan alaşım elementleri ilavesiyle 75 Shore C'ye kadar sertlikleri yükseltilebilir (Kiss, 2019).

### **1.3.6 elik döküm merdaneler**

Dökme demir merdanelere göre mekanik mukavemetleri yüksektir. Dökme demir merdanelerin dayanımları düşük olduğu yerlerde ve derin kalibre merdanelerinde tercih edilirler. Ancak elik merdaneler, dökme demir merdanelere göre sertlik değerleri düşük olduğundan aşınma direnci düşük olduğundan daha hızlı aşınırlar. Dökme elik merdaneler %C oranı 0,5-0,8 aralığında değişmektedir. Hipotektoid elik rulolar Krom ve Molibden ile alaşımlandırılarak mekanik mukavemeti arttırılır. Basit üretim süreçleri ve düşük üretim maliyetleri sayesinde birçok işletmede dövme elik merdanelerin yerini almıştır (Jin ve diğ. 2013).

### **1.3.7 Adamit elik merdaneler**

Adamit merdaneler içeriğinde %1,2-2,4 Karbon değerine sahip düşük alaşımlı hiperotektoid çeliktir. Adamit merdanenin en önemli özelliği yapıda karbür bulunmasıdır. Bu özellik sayesinde aşınma direnci yüksektir. Alaşım tasarımı ve Isıl işlem ile karbürlerin sürekli bir aę oluşturmamasını sağlar. Mevcut karbür miktarı dolayısıyla aşınma direnci karbon içeriğiyle doğru orantılıdır. Karbon miktarı arttıkça aşınma direnci artar ancak mukavemet değerleri düşer. Matriste lameller ile küreselleştirilmiş perlit oluşabilir. Matris kontrolü ısıl işlem ile mümkündür. Adamit merdanelerin bir diğer özelliği ise kesit boyunca sertlik ve aşınma direncinin değişmemesidir (Ilca ve diğ. 2016).

### **1.3.8 Grafitik elik merdaneler**

Grafitik elik Merdaneleri %1,2-%2,4 arasında karbon içeriği ile Adamit merdanelere benzermektedir. Ancak bu yapıda tüm karbon karbür olarak çökmez. Alaşım içeriği ve Isıl işlem ile modifikasyonları ile bir miktar karbon ince grafit olarak çökeler. Grafitin varlığı merdanede yağlayıcı görevi görerek aşınmayı azaltır ayrıca

grafit ve çatlama direncini arttırarak merdanelerde yaygın görünen ateş çatlakları hatalarını azaltır (Union Electric Akes, 2024) (Aigner ve diğ. 2023).

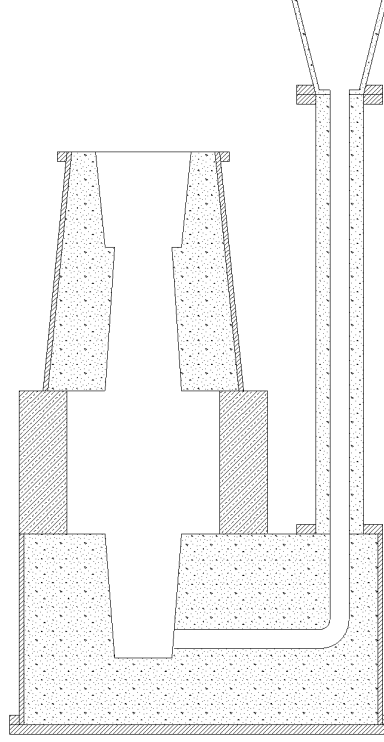
## **1.4 Hadde Merdanesi Üretim Yöntemleri**

Hadde merdaneleri dökülebilirliği ve geniş alaşımlama sayesinde hadde merdaneleri ilk olarak dökme demirlerden imal edilmiştir. Merdanelerde istenilen özellikler arttıkça önce kokil kalıplarda hızlı soğutulmuş ve zamanla farklı alaşım tasarımları ve ısıl işlemler ile yüksek sertlik, aşınma, yorulma gibi problemleri güvenilir bir şekilde ortadan kaldırarak üretimleri sağlanmaktadır (Tan 2005).

Günümüzde her ne kadar yenilikçi üretim yöntemleri ile kokil kalıplarda kalibreli döküm, toz metalürjisi yöntemi ile karbür ringler, CPC (Continuous Pouring Cladding) (Yamamoto 2019) hadde merdane/ring üretimleri de ortaya çıkmış olsa da genel olarak Statik döküm, Savurma Döküm ve Dövme Merdaneler fiyat performans açısından sıkça tercih edilmektedir.

### **1.4.1 Statik merdane dökümü**

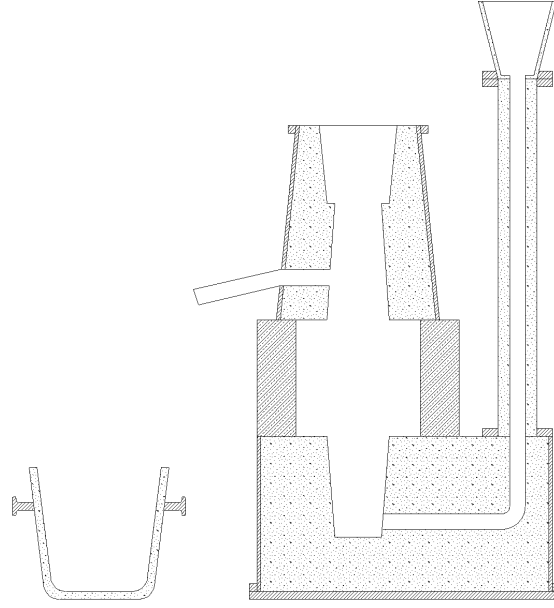
Statik döküm yönteminde hadde merdanelerinde istenen özellikler arasında muyluların yumuşak gövdelerin sert olması istenir. Bu sebeple kalıplama muylular kum kalıplarda yavaş soğutulur, gövdeler ise kokil kalıplarda hızlı soğutma gerçekleştirilerek çil oluşması sağlanır. Üretim prosesi kolay olmasından dolayı genellikle bu yöntem ile üretimi hem hızlı hem de ucuzdur. Şekil 1.4'de statik döküm yöntemi ile üretimi yapılan hadde merdane kalıplama sistemi verilmiştir.



**Şekil 1.4:** Statik merdane döküm yöntemi

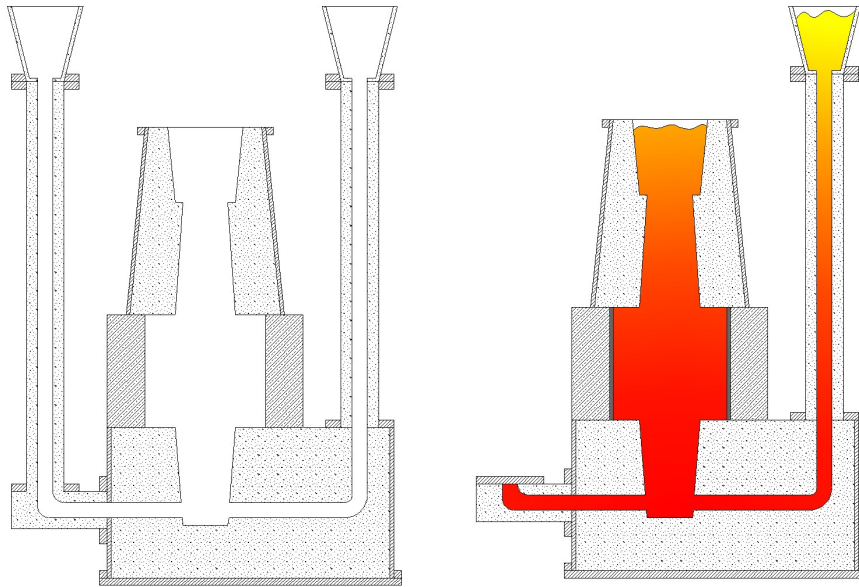
Statik döküm yönteminde gövde sertlik ve aşınma direncini artırmak için sıvı metale alaşımlama yapılmaktadır. İstenilen mukavemet değerlerini karşılamak için alaşım oranlarını artırmak gerekir. Gövde de istenen özellikleri karşılamak için artırılan alaşım elementleri muylularda sertlik artışına sebep olup kırılmalar yaşanabilir.

Bu hataları minimize etmek için statik döküme yöntemine benzer şekilde, Şekil 1.5'de gösterilen Taşıma Döküm prosesi geliştirilmiştir (Tan, 2005). Bu proseste gövde de sert kabuk yapısı oluşturulup muylu ve gövde çekirdeği yumuşak metal ile dökümü gerçekleştirilir. Bu sayede gövde de istenen yüksek aşınma direnci sağlanırken muylular ve gövde çekirdeği statik döküme göre daha düşük sertlik değerleri sağlanır. Bu şekilde kırılmaları minimize edilir ayrıca üretim maliyeti düşürülür.



**Şekil 1.5:** Taşırma merdane döküm yöntemi

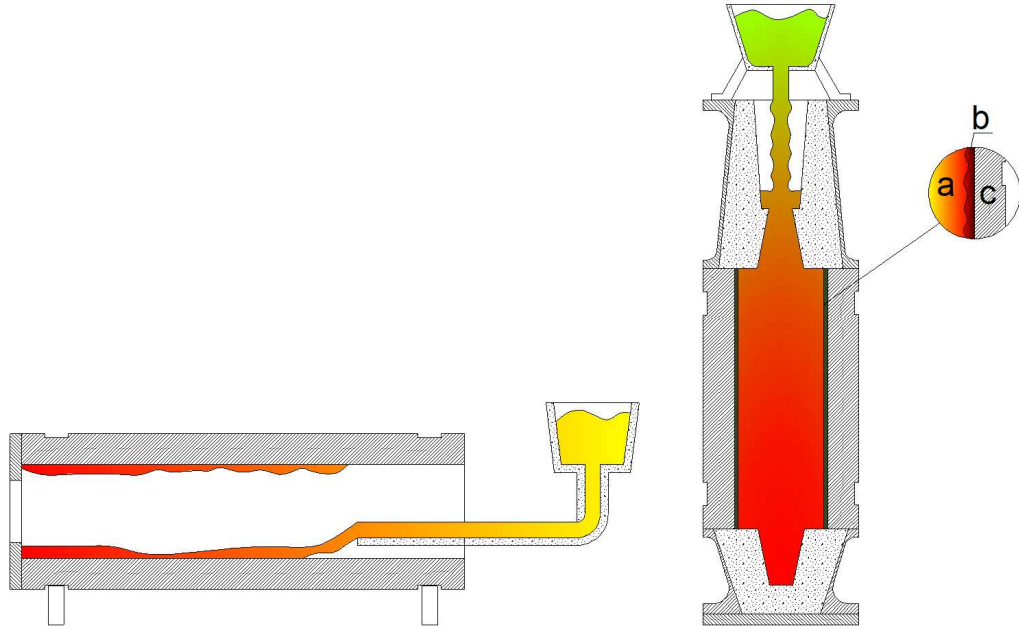
Taşırma merdane döküm yöntemi alternatif olarak Şekil 1.6'da gösterilen boşaltma merdane döküm yöntemi ile geliştirilerek kabuk oluşturma işlemini daha kolay hale getirmek amaçlanmıştır. Double Döküm yöntemi olarak adlandırılan bu yöntem günümüzde santrifüj döküm yönteminin gelişmesi ise tercih edilmemektedir.



**Şekil 1.6:** Boşaltma merdane döküm yöntemi

### 1.4.2 Savurma merdane dökümü

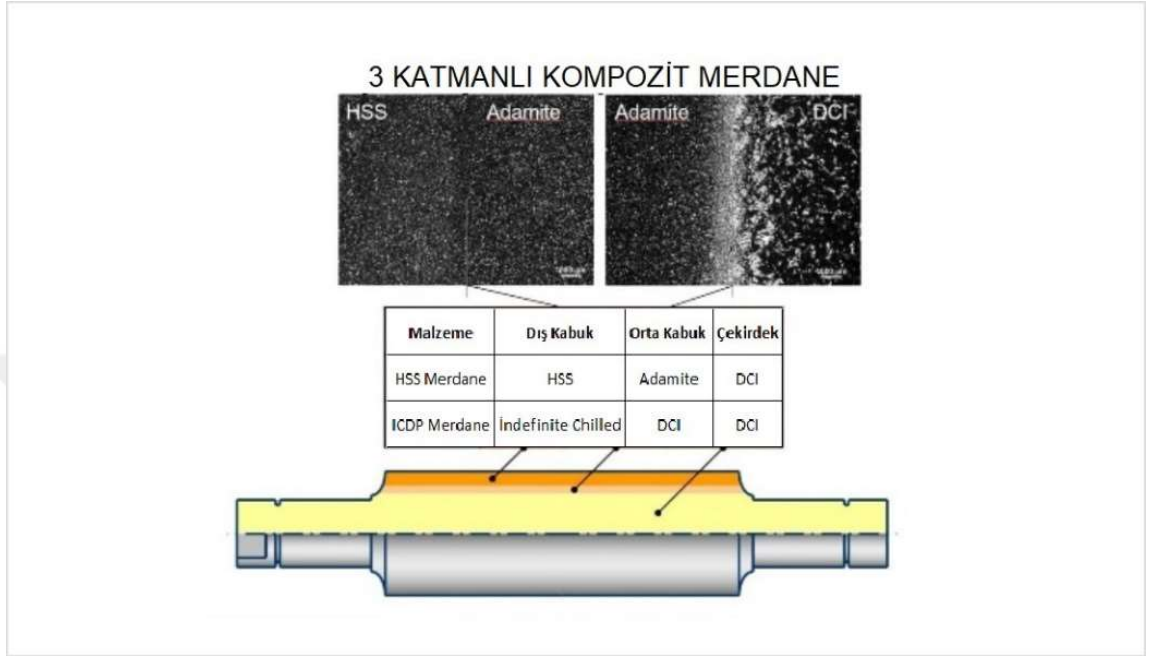
Bu yöntemde istenilen özellikteki sıvı metal dönen kokil kalıba yapılır. Kalıbın merkezinden çevresine doğru yönlendirilen metal, santrifüj etkisiyle katlaşır. Katılaşmada yönlendirilmesi dışarıdan içeriye doğru hızlı bir şekilde gerçekleşir. Genellikle statik dökümde karşılaşılan süreksizlikleri ve boşlukları ortadan kaldırır (Xu ve diğ. 2012). Şekil 1.7’de santrifüj yöntemi ile hadde merdane dökümü verilmiştir. Gövde kısmı santrifüj ile dökülen merdane sonrasında muylu kısımları kum kalıplama olacak şekilde statik olarak dökümü yapılır.



Şekil 1.7: Savurma merdane üretim yöntemi, a)gövde çekirdek ve muylu malzemesi b) savurma ile dökülen malzeme c) kokil kalıp

Haddeleme sistemlerin gelişmesiyle hadde merdanelerinde muylu ve gövde çekirdekleri çekme dayanımları 400 MPa kadar çıkmalıdır (Bai ve diğ. 2012). Statik dökümü yöntemi ile 400 MPa çekme değerine ulaşmak için yüksek alaşımlama yapmak gerekir. Her ne kadar gövde çalışma yüzeyinde bu değerler karşılanırsa da gövde çekirdeği ve muylularda sertlik artacağından dolayı gevrek bir malzeme üretilmiş olunacaktır. Savurma merdane döküm yöntemi ile gövde çalışma yüzeyi sert

ve gövde çekirdeği ve muyluyu sünek olarak üretmemiz mümkündür. Farklı geometrik ürünlerin haddelemesiyle merdane kalitelerinin ihtiyaçları karşılamak amacıyla 3 farklı katmana sahip malzemeler savurma döküm yöntemiyle hadde merdaneleri üretilmeye başlamıştır (Kubota 2024).



**Şekil 1.8:** 3 farklı malzemeye sahip savurma döküm yöntemi ile üretilmiş hadde merdanesi (Kubota, 2024)

Şekil 1.8’de çalışma yüzeyi Yüksek Hız Çeliği, gövde çekirdeği ve muylular Küresel Grafitli Dökme Demir, çelik ve dökme demir malzeme farkından dolayı yüksek karbon oranına sahip ara yüzey kaynaşması için Adamit kalite çelik malzeme kullanılmıştır.

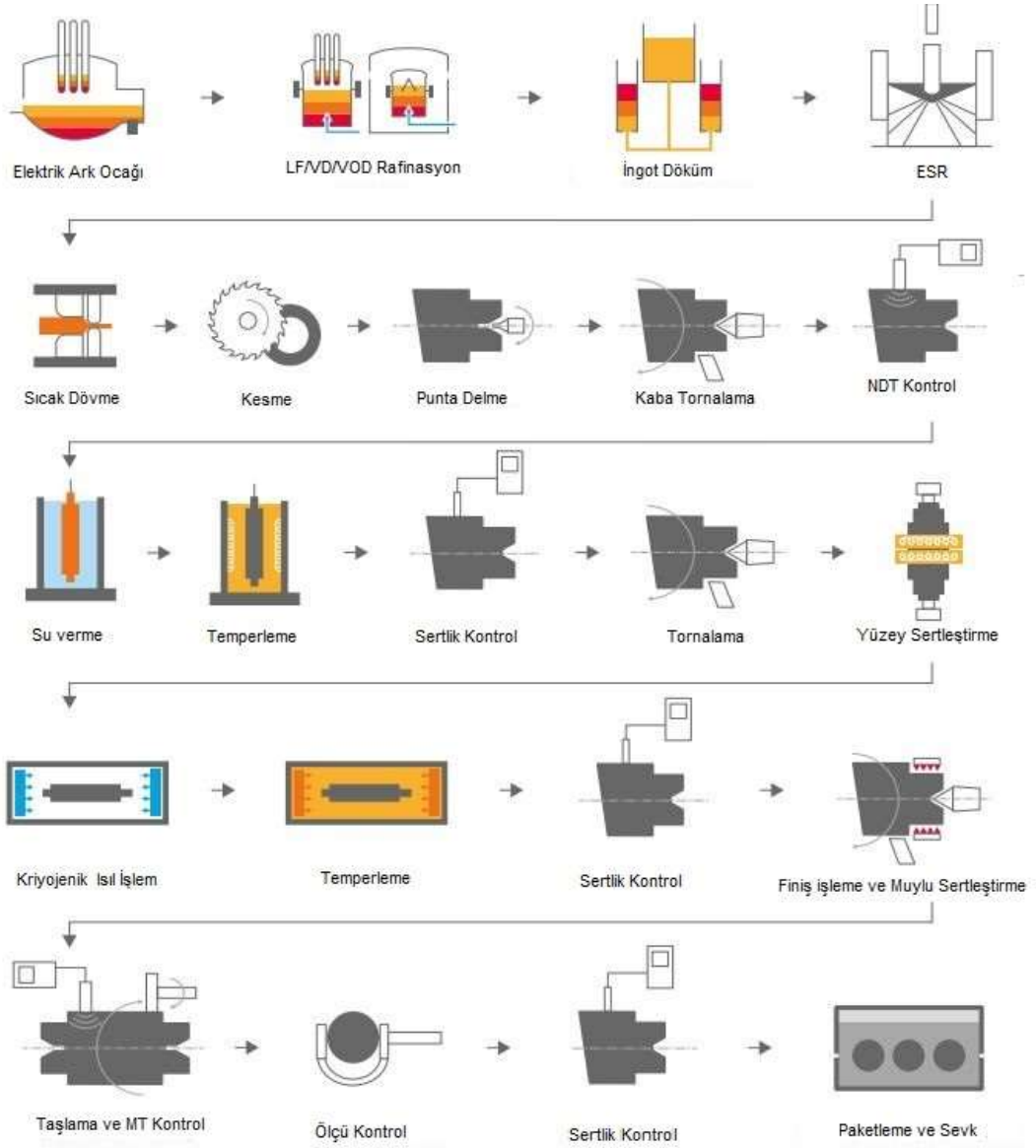
### 1.4.3 Dövme merdanelerin üretimi

Dövme çelik merdaneler Sıcak haddelemede profil haddeleme ve Kesme/Ebatlama tezgahlarında tercih edilse de çoğunlukla soğuk haddelemede kullanılır.

Günümüzde kullanılan şerit, levha sacların ve alüminyum folyoların neredeyse tamamı soğuk haddeleme ile şekillendirilir. Soğuk haddelenmiş şerit veya çelik levhanın boyutsal doğruluğunu ve iyi yüzey kalitesini sağlamak için merdanenin rolü

çok önemlidir. Bu merdanelerin ezme değerleri yüksek olduğundan aşınmaları fazladır, bu nedenle yüksek sertlik değerlerine (60-70 HRC) sahip olmalı ve sertlik derinliği, karbür dağılımı homojen olmalıdır. Karbür boyutları mümkün olduğunca küçük (0,5-2 mikron) olmalıdır. 20-50 mm martenzitik yapı olmalıdır. Termal şoklara karşı direnci yüksek, iyi yüzey kalitesi elde etmek için merdane minimum inklüzyon ile yüzeyinin kusursuz olması gerekir. İstenen bu özellikleri karşılamak için yüksek saflıkta çelik ile mümkündür (Lucas, 1964) (Kobayashi, 1971) (Ghosh ve diğ. 2014).

Bu işlemler elektrik ark ocaklarında çeliğin ergitilmesi ile başlar. Sırasıyla LF, VD, VOD rafınasyon fırınları ile cüruf rafınasyonu, alaşım bileşimin kontrolü, kükürt giderme gibi işlemlerden geçerek yüksek saflıkta alaşımli çelik üretimi yapılır. İngötlara dökülen bu metal daha homojen hale getirilmek için ESR prosesinden geçer. Dövme işlemi yapılır merdane formuna getirilen metal talaşlı imalat işlemine geçer. Kaba toleranslarda işlenen merdane öncelikle su verme ardından temperleme, yüzey sertleştirme, Kriyojenik işlem tekrar temperleme ısı işlemlerinden geçerek finiş işleme ve muylu sertleştirme yapılarak üretim tamamlanır. Tüm bu aşamalarda sertlik ve NDT kontrolleri yapılarak devam edilir. Şekil 1.9'da dövme çelik proses akış şeması verilmiştir.



Şekil 1.9: Dövme çelik merdanesi üretim proses akış şeması (PT-Sumitech 2024)

## 2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR HADDE MERDANELERİ

Küresel Grafitli Merdaneler kolay dökülebilirlik, işlenebilirlik, yüzey kalitesi, Darbe direnci, Yüksek aşınma direnci gibi özelliklerinden dolayı çok yönlü merdaneler olarak kabul edilir. Diğer merdane türleri göre en büyük avantajı dökümleri, gövdeler kokil kalıba, muylular ise kum kalıba döküldüğünden gövdeler sert, muylular gövdeye göre yumuşaktır. Gövdede oluşan ani soğuma ile çökelen karbürler sayesinde aşınma dirençleri yüksektir. Karbür miktarı gövde yüzeyinden çekirdeğe doğru azalarak merdane iç kısımların yumuşaktır. Bu sayede Haddelene işlemlerinde ani darbelere absorbe ederek merdane hasar riskini azaltarak ürün hizmet ömrünü uzatır.

Haddelenede değişken sıcaklıklardan dolayı merdaneler termal şoklara maruz kalmaktadır. Termal şok zamanla termal yorgunluğa yol açar böylece merdane üzerinde çatlamlar meydana gelir. SGP merdaneleri içerisinde bulunan grafit yağlayıcı görevi görerek özellikle derin kalibreli merdanelerde aşınmaya karşı yüksek direnç gösterir.

Dökme demir merdaneler performans faktörü nispeten düşüktür. Bunun nedeni merdaneden istenen gereksinimlerin farklı ve çelişkili olmasıdır. Dökme demir merdaneler yüksek mekanik direnci ve yüksek sıcaklık kararlılığına sahip olmalıdır. Bu özelliklerin sağlanmasını gövde çekirdeğinde oluşan grafit ve gövde yüzeyinde oluşan sementit ve karbürlerin miktarıyla belirlenir (Kiss, 2008).

Hadde merdaneleri sertlik, yüksek aşınma direnci, termal direnç ve yüksek sıcaklıklarda kararlılık gibi servis gereksinimlerini karşılamalı ve ayrıca haddelenen çeliğe yüksek yüzey kalitesi sağlamalıdır. İstenen özellikleri elde etmek için alaşımlama, grafitin modifikasyonu, kalıplama sistemi, döküm parametreleri, soğuma hızı gibi parametrelerin dikkate alınması gerekir (Kiss ve diğ. 2010).

## 2.1 Alaşım Elementlerinin Küresel Grafitli Dökme Demire Etkisi

Termodinamik bakımdan dökme demirler Kararlı (stabil) ya da Kararsız (metastabil) olarak katılaşırlar. Katılma da kimyasal bileşim, soğutma hızı ve ergitme işlemleri önemli rol oynar. Yapıda bulunan P, Cu, Ni, Si, gibi elementler katılmayı yavaşlatıp kararlı yapı oluştururken, Cr, Mn, Mo, V, W, Ti, Nb gibi elementler ince kesitlerde katılmayı hızlandırarak kararsız yapı oluştururlar (Tan 2005).

Standart KGDD'lerde bileşiminde Fe, C, Si ve Mn bulunur. Ancak hadde merdanelerinde amaç gövde yüzeyinde çil oluşturarak sertliği arttırmaktır. Bu sağlayabilmek için merdanenin kullanım alanına göre yapıda karbür hacimleri arttırılır.

### 2.1.1 Karbon

Dökme demirlerde %2,5-4,5 arasında ihtiva eder. Karbon yapıda Serbest Karbon (grafit) ve Bileşik olarak bulunmaktadır. Yüksek oranda kullanılan karbon metalin akışkanlığını artırır bu sayede dökülebilirliği olumlu yönde etkiler. KGDD'lerde yüksek karbon oranı doğru aşılama ile yapıdaki küre sayısını arttırır, karbür oluşumu engellenir. Ayrıca perlit miktarı azalarak, ferrit oranı artmaktadır.

### 2.1.2 Silisyum

Dökme demirlerde Silisyum güçlü bir grafitleştiricidir, bu nedenle düşük silisyum içeriğinde, soğutulmuş kenarlar, hücreler arası karbürler ve merkez karbürleri olarak karşılaşılan karbür oluşumu eğilimi artar. KGDD'lerde etkili aşılama ile nodül sayısını arttırır. Ferrit'in kararlı hale gelmesini sağlayarak östenitteki karbon miktarını düşürür (Kılıçlı, 2004).

### 2.1.3 Mangan

Ferrit'in sertliğini ve mukavemetini artırır. Perliti stabilize eder. KGDD'lerde sertleşebilme yeteneğini artırır . Karbür oluşumu teşvik ettiğinden yüksek oranda mangan, kırılabilirliği artırır. Östenit dengeleyici bir elementtir (Yalçın, 2019). Östemperlenebilirliği arttırmak için kullanılır, ancak katılaşma esnasında tane sınırlarında karbür oluşturarak östemperleme reaksiyonlarını yavaşlatır. Böylece ösferrit oluşumunu engelleyerek ve düşük karbonlu östenitin varlığıyla martenzit oluşumuna neden olabilir (Yalçın, 2023).

### 2.1.4 Krom

Dökme Demirlerde krom kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıklar arasındaki farkı azaltarak karbür oluşumunu teşvik eder (Ovalı 2012), darbe korozyon direncini arttırmak ve yüksek sıcaklık uygulamalarında yapıyı stabilize ederek, ısının yumuşatıcı etkisine karşı direnç geliştirerek ve oksidasyona karşı koruma sağlamak için krom en etkili elementtir. Ötektik karbürlerin sertliğini ve miktarını artırır. Düşük miktarlarda kullanımı gri dökme demirlerde perliti stabilize eder. Çil uygulaması yapılan dökme demirlerde çil derinliğini kontrol etmek için ilave edilir (NIAMT 2024).

### 2.1.5 Nikel

Grafitleşmeyi teşvik eden bir diğer elementtir. Karbonun sıvı ve katı demirdeki çözünürlüğünü azaltır ve her %1 nikel için ötektik karbon içeriğini %0,06 düşürür. Nikel, perlit dönüşümü geciktirmede etkilidir ve döküm halinde yüksek dayanımlı asiküler yapı üretmek ve ısıl işlemlerde martenzitik yapılar üretmek için kullanılır. Nikelin sertleştirilebilirliğe katkısı molibden ilavesiyle önemli ölçüde artar ve döküm halinde iğnemsiz demirler genellikle nikel ve molibden kombinasyonlarıyla alaşımlanır. Perlit dönüşümünü engellemek için yüksek oranda nikel kullanımı (yaklaşık %4,5 ve üzeri) sağlansa da küçük döküm parçaları için %2,7 oranlarında döküm parçanın erken kalıptan sökülmesi ve kokil kalıplarda düşük miktarlarda martenzitik yapı oluşur (NIAMT 2024) Çekme mukavemetini ve aşınma direncini

arttırır. Ancak çil uygulaması yapılan dökümlerde çil derinliğini azaltır (Henning 1993)

### **2.1.6 Molibden**

Yüksek sıcaklık uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda, çekme mukavemeti, gerilme kopması, sürünme mukavemeti ve termal yorulma direncini artırmak için ilave edilir. %0,2 ve daha fazla ilavelerde tane sınırlarında karbür oluşturur (Voigt, 1989). Çil uygulamalarında, çil derinliğini artırarak sertlik derinliğini kazandırır. Ferritik demirlerdeki sertlik ve akma dayanımı, katı çözelti güçlendirmesiyle molibden içeriğiyle artar. Dayanım yaklaşık 6000 psi ve sertlik her 1% Mo için yaklaşık 15 HB birim artar. Aynı zamanda, çekme uzaması yaklaşık %8 azalır. Molibden hem ferritik hem de ostenitli demirlerin yüksek sıcaklık dayanımını artırır. Bu sayede yüksek sıcaklıkta sıkça karşılaşılan yangın çatlaklarına karşı direnci artar (Henning 1993). Yüksek Molibden ilavesi martenzit oluşumunu sağlar (Yazdani ve Elliott, 1999).

### **2.1.7 Bakır**

Bakır bir grafitleştirici ve perlit destekleyicisidir. En yaygın olarak perlitik mikro yapıları geliştirmek için kullanılır. Güçlü perlit oluşturma eğilimleri nedeniyle, ferritik sınıflarda normalde maksimum %0,03 seviyeleriyle sınırlıdır. Tek bir alaşım ilavesi olarak bakır, KGDD'e bir miktar sertleştirilebilirlik kazandırır; ancak, molibdenle birlikte bakır önemli ölçüde daha etkilidir. Molibden ve bakır kombinasyonları genellikle asiküler yapıli dökümlerinin üretiminde kullanılır. Ayrıca, östemperleme veya martensitik yapıların istendiği ısıl işlem için demirlerin sertleştirilebilirliğini artırmak için de kullanılırlar (Henning 1993).

### 3. HESAPLAMALI MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

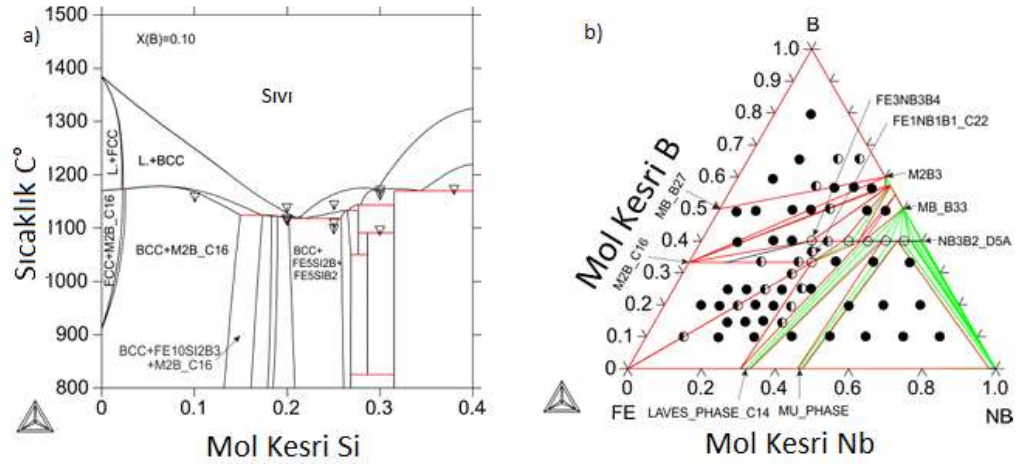
Hesaplama malzeme mühendisliği, malzeme biliminde ve mühendisliğinde bilgisayar tabanlı simülasyon, modelleme ve analiz teknikleri kullanarak malzemelerin özellikleri ve davranışlarını inceleyen ve malzemelerin atomik düzeyden, makroskopik düzeye kadar malzeme hakkında tahmin etmeyi amaçlayan bir disiplindir. Hesaplama malzeme mühendisliği, yeni malzemeler tasarlamak, mevcut malzemelerin performansını optimize etmek, çeşitlik şartlar altında malzemeleri analiz etmemize olanak sağlar. Havacılık, Elektronik, biyomedikal, enerji, otomotiv endüstrilerinde geniş uygulamalara alanına sahip olan bu disiplin dalı özellikle kompozit malzemeler, yüksek performanslı seramikler, hafif metaller ve yarı iletken malzemelerin geliştirilmesinde kritik önem arz eder. Özellikle yeni malzeme geliştirmede gerek üretim maliyetleri, gerekse üretim süreçlerinde avantaj sağlamaktadır (Luo ve diğ. 2022).

#### 3.1 CALPHAD Metodolojisi

Hesaplama malzeme mühendisliğinin temeli CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) metodolojisine dayanmaktadır. CALPHAD ile malzemelerin kimyasal bileşimlerinden sıcaklık, süre ve basınca bağlı olarak malzeme hakkında termodinamik, termokinetik ve termomekanik özellikleri öngörebilmek için aşamalı bir yaklaşım kullanır. Bu yaklaşımların ilki; faz dengeleri, kristal yapı, termokimyasal özellikler deneysel veriler ile toplanır. İkinci aşamada toplanmış olan bu veriler güvenilirlik ve tutarlık açısından değerlendirilir. Son aşama da ise sistemde bulunan her fazın termodinamik özellerini tanımlamak için Gibbs enerjilerini kullanarak matematiksel modeller üretir (Yalçiner, 2023) Bu sayede malzemelerin kimyasal bileşimlerinden sıcaklığa bağlı olarak stabil ve metastabil denge diyagramları, katılaşma, mekanik özellikler, faz dönüşümleri, difüzyon analizleri, termofiziksel ve fiziksel özellikler hakkında öngörüler yapılabilmektedir. CALPHAD metodolojisi ile birlikte gelişen Bütünleşik Hesaplama Malzeme Mühendisliği (Integrated Computational Materials Engineering-ICME) kavramı ile döküm simülasyonları, haddeleme, kaynak, ısı işleme gibi üretim programlarına veriler aktararak sanal ortamda simülasyonlar yapılarak gerçek üretim koşullarında malzemede olası

problemlerin öngörülerek, hammadde, sarf malzeme, test/deney ve yüksek enerji ihtiyaçlarını minimuma indirerek optimum kimyasal bileşim ve proses parametrelerini belirlenir (Akyıldız ve diğ. 2022).

Metal döküm yöntemlerinde en önemli unsurlardan birisi proses parametrelerinin belirlenmesidir. Döküm sıcaklığı, döküm hızı, katılma hızı ve kimyasal bileşim başlıca etmenlerdir. Her ne kadar metal dökümler denge koşulları altında nadiren katılma da faz diyagramları, katılma ve sonrasında meydana gelen mikroyapı değişimlerini tahmin etmede önemli etmendir. Genellikle deneysel olarak belirlenen faz diyagramları ikili ve üçlü alaşım sistemleri olarak oluşturulmuşlardır. Şekil 3.1’de ikili ve üçlü alaşım sistemlerinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları verilmiştir (Yoshitomi ve diğ. 2008) (Poletti ve Battezzati, 2013).



**Şekil 3.1:** Sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları a) İkili sistem b) Üçlü sistem

Son yıllarda 10 ve daha fazla element içeren malzemeler üretilmektedir (Lukas ve diğ. 2007). Çok bileşenli alaşımlar için faz diyagramlarının tahmini için temelinde CALPHAD metodolojisi olan termodinamik tabanlı bilgisayar modelleri geliştirildi. Ancak bugüne kadar bu modeller demir esaslı malzemelerde çelikler için sınırlıydı. Mevcut modelleme çalışmaları ile dökme demirlere uygun hale getirilerek Fe, C, Si, Mn, P, Cr, Ni, Mo, Nb, V, Ti, M, Cu, Mg elementleri ile çok bileşenli sistemlere uygun hale getirilmiştir. Bu sayede dökme demirlerde çökelme sertleşmesi, grafit oluşumu, karbür oluşumu, grafit-karbür reaksiyonları, denge dışı katılma öngörebilmek mümkün hale gelmiştir. Özellikle döküm sektöründe hurdalardan gelen eser

elementlerin malzeme üzerindeki etkilerini tahmin etmek kolay hale gelmiştir (Harding ve Saunders 1997).

### 3.2 Literatür Araştırması

Aktaş ve arkadaşları (Aktaş ve diğ. 2024) yaptığı çalışmada egzoz manifoldların da kullanılan Paslanmaz çelikler pahalı olmasıyla geliştirilen SiMo sünek dökme demirlerin yüksek Mo içeriğinin oluşturduğu karbürlerden dolayı malzemedeki zararlı etkileri kaldırmak amacıyla yeni bir dökme tasarlamışlardır. Bu yeni alaşım Mo yerine yüksek A1 sıcaklığında çalışabilen Nb elementi değiştirilmiştir. Çalışma kimyasal bileşimi CALPHAD tabanlı Thermo-Calc programı ile hesaplanmıştır. Kimyasal bileşim değerleri aşağıda verilmiştir. Kimyasal bileşim hesaplamalarında farklı Si içeriğine sahip SiNb dökme demirler için C-İzopletleri ve A1 sıcaklığı grafikleri aşağıda verilmiştir. Döküm işlemi laboratuvar ölçekli indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. Döküm şarjında kullanılan Pik demir (%4,3 C %0,7 Si), Ferrosilikon (%72 Si), Ferronyobyum (% 70 Nb), ve bir miktar hurda olarak 1020 Çeliği kullanılmıştır. 1560°C kadar ergitme işlemi yapılmıştır. ASTM A536-84 standartına göre hazırlanan Y blok kum kalıplarına döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Döküm esnasında Aşılmalı (%75 Si, %0,94 Ca, %1,68 C, %0,89 Al) ve FeSiMg (%45 Si, %7 Mg) kullanılarak küreselleştirme işlemi yapılmıştır. Termodinamik hesaplamaları doğrulamak için mikroyapı ve termal analizler yapılmıştır. Böylece katılaşma sırasında oluşan fazlar ve geçiş sıcaklıkları (A1 sıcaklığı) çıkartılmıştır. Çalışma sonucunda SiMo dökme demirlerine alternatif olarak tasarlanmış xSiNb alaşımlı dökme demirlerin katılaşma davranışları CALPHAD tabanlı modelleme ile ferrit matrisindeki grafit ve MC miktarının, Si artışı ile katılaşma yapısında azaldığını gösterdi. Hem deneysel hem de Termodinamik tabanlı modelleme çalışmayla; Silisyumun negatif bir ayrışma eğilimine sahip olduğunu ve böyle bir etkinin hücre sınırlarında perlik fazının oluşmasını baskıladığı, Si içeriğinin A1 sıcaklığı üzerinde artan bir etkiye sahip olup, yüksek sıcaklarda kullanım sağladığı En yüksek A1 sıcaklığın %70 Si içeriğinde 1013°C elde edilebildiğini gösterdiler.

Akyıldız ve arkadaşları (Akyıldız ve diğ. 2018) yapmış olduğu çalışmada, farklı Mo içerikli Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin kimyasal bileşimleri

CALPHAD tabanlı MatCalc programı ile faz diyagramlarını hesaplamışlardır. Kimyasal bileşimler tabloda verilmiştir. Hesaplanan faz diyagramları doğrulama amaçlı aynı kimyasal bileşime sahip olarak dökümü kum kalıpta yavaşça soğutularak gerçekleştirilmiştir. Kimyasal bileşim kontrolü Optik Emisyon Spektrometresi ile yapılmıştır. DSC analizleri için 10-40 mg arasında hazırlanan numuneler oda sıcaklığından 5°C/Dakika hızında 1400°C'ye ısıtılıp soğutularak faz dönüşümleri tespit edilmiştir. Sertlik ölçümü, SEM – EDS, XRD analizleri ve %3 Nital ile dağlama yapılarak metalografik incelemeler yapılmıştır. Yapılan hesaplama ve deneyler sonucunda 9640 Alaşımı için ötektik nokta sıcaklığının 1281°C ve %3,21 C oranında, 9645 alaşımı için 1275°C ve %3,2 C oranında olduğu bulunmuştur. Hesaplamalar, DSC analizlerine göre yakın değerler olarak bulunmuştur. MatCalc ile karbür tahmini hesaplamaları (tabloda) sonucunda  $M_3C_2$ ,  $M_7C_3$  ve  $M_{23}C_6$  karbürlerin Cr açısından zengin  $(Cr, Fe, Mn, Mo)_3C_2$ ,  $(Cr, Fe, Mn, Mo)_7C_3$  ve  $(Cr, Fe, Mn, Mo)_{23}C_6$  tipi karbürlerin varlığı hesaplanmış. Doğrulama için XRD analizleri gösterilmiştir(şekil). Hesaplama ve XRD sonucunda her iki numunede de Kromca zengin karbürlerin varlığı anlaşılmaktadır. Yapılan bu çalışma ile yüksek kromlu beyaz dökme demir alaşım tasarımında CALPHAD tabanlı MatCALC programı ile hesaplamalar yapılmıştır. Kimyasal bileşim olarak farklı Mo ilavesi ile hesaplanan ve deneyleri yapılan malzeme hakkında, Mo artışı ile  $M_{23}C_6$  karbürlerin miktarında artışların olduğu, Metalografik çalışmalar sonucunda yüksek Mo içerikli numunenin östenitik matris fazında ince dağılmış ikincil  $M_{23}C_6$  karbürlerin oluştuğu doğrulanmış ve bununla birlikte sertliğin 44,9 HRC'den 51,05 HRC'ye çıkmıştır. SEM ve EDS analizleri ile teorik öngörülere uygun olarak Fe açısından zengin karbür fazların olduğu ortaya konmuştur.

Qua ve arkadaşları (Qu ve diğ. 2011) HSS kalite santrifüj üretim yöntemiyle üretilmiş hadde merdanesinden Ø3mmx10mm numuneler hazırlamışlardır. Faz geçişlerini incelemek için otomatik faz geçiş dilatometresi kullanılmıştır. Numuneler hızla 500 °C'ye, ardından 0,05°C/sn rampa hızıyla 1000°C dereceye kadar ısıtılmıştır. Malzemenin Ac1 ve Ac3 kritik sıcaklığı belirlemek için 5 dakika boyunca aynı sıcaklıkta bekletmişlerdir. Tamamen östenik sıcaklığında olan malzemeler sırasıyla 0,02, 0,031, 0,044, 0,06, 0,1, 0,2, 0,5, 2, 10 ve 30°C/sn hızlar ile soğutulmuş, mikroyapı incelemeleri SEM ile incelenmiş ve farklı faz yapıları XRD ile belirlenmiştir. Üretimi yapılmış merdane kimyasalı üzerinden CALPHAD tabanlı Thermo-Calc programı ile farklı W içeriğine sahip Fe-C izopleit diyagramları, fazlar,

kütle kesirleri ve sıcaklık eğrileri hesaplanmışlardır. Deneysel ve Teorik hesaplamalar sonucunda  $A_{c1}$  sıcaklığının 770-830°C,  $A_{cm}$  sıcaklığının °C ve martenzit dönüşüm sıcaklık başlangıcı 190°C, perlit dönüşüm kritik soğutma hızının ise yaklaşık 0,08°C/sn ve beynit dönüşüm kritik soğutma hızının yaklaşık olarak 0,025 °C/sn olduğu görülmüştür. Thermo-Calc tarafından hesaplanan MC,  $M_6C$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_{23}C_6$  ve  $MC_2$  karbürleri deneysel çalışma ile uyum göstermiş ve malzeme bileşiminin CALPHAD ile optimize edilebileceği ortaya koymuşlardır.

Tanaka ve arkadaşları (Tanaka ve diğ. 2006), yapmış olduğu çalışmada Ni bazlı süper alaşımdan yapılan hassas döküm malzemelerinin, başlangıç olarak Fe bazlı alaşımla düşük sıcaklıkta değiştirmeyi amaçlamışlardır. Bu doğrultuda tasarlanan sistemde 1980'lerde egzoz valfleri için kullanılan VE28 malzemesi baz alınarak Fe, Ni, Cr, Ti, Al, Nb elementleri ile optimize edilmiştir. İlk olarak izotermal diyagramlar hesaplanmış aynı zamanda Scheil tipi simülasyon ile mikro gözenekleri değerlendirmişlerdir.

Tasarlanan alaşım bileşimi, vakum indüksiyon ocağında AISI430 paslanmaz çelik çubuklar, Elektrolitik Nikel, Sünger Ti, Fe-Mo eklenerek ergitilmiştir. Dökümler Ø11mm ısıtılmış kokil kalıplara dökülerek döküm çubukları elde edilmiştir. Faz çökelmelerini incelemek için argon atmosferli fırında ısıtılarak incelemeler yapılmıştır. Küçük çökelti ise XRD analizi ile doğrulamışlardır. Yapılan çalışmada CALPHAD hesaplamaları ile mol kesri ve çökelti tespiti yapılarak endüstriyel kullanımlar için kabul edilebilirliğin uygun olduğu görülmüştür.

Yapılan çalışmada stabil ve metastabil fazlardan oluşan yüksek alaşımlı benekli dökme demir tabanlı Cr, V, Nb, W alaşım kompozisyonlarını termodinamik olarak CALPHAD tabanlı Thermo-CALC, TCFE7 veritabanıyla hesaplanması araştırılmıştır. Elde edilen termodinamik hesaplamalar kendi ürettikleri numune ve literatürden alınmış (Bravo ve diğ. 2012) numune verileri kıyaslama yapılmıştır. Hesaplamalara Östenit, Sementit, Grafit, Ferrit fazları ve MC,  $M_7C_3$ ,  $M_6C$ ,  $M_2C$ ,  $M_{23}C_6$  karbürleri dahil edilmiştir ve sıvı fazdan başlayarak 1726 ve 500°C arasında gerçekleştirilmiştir. Üretilen numuneye Optik mikroskop, SEM, BSE+EDX, XRD ve DSC analizleri yapılmıştır (Paar ve diğ. 2016).

Faz oluşumlarını incelendiğinde üretilen numunenin 800°C’de sementit miktarının %31,4 olduğu ve optik mikroskop ile ölçülen toplam karbür miktarıyla aynı olduğu ortaya konmuştur. Literatür araştırmasından alınan kimyasal bileşim hesaplamalarının bir miktar sapma ile karbür miktarlarının uyum içinde olduğu tespit etmişlerdir. Faz çökelmeleri incelendiğinde hesaplamada östenit fazı 1120°C oluşmuş, DSC ölçümlerine göre alaşım 1121,4°C katılaşmıştır. Araştırmacılar çalışma sonucunda sistemde grafit fazından kaynaklı sapmalar olabileceğini, MC karbür tiplerinin çökeltme sıcaklarının araştırılmasını tavsiye etmişlerdir. Üretilen numune ve ölçülen değerler karşılaştırıldığında uyum içinde olduğunu savunmuşlardır.

Belirsiz soğutulmuş dökme demire aşınma direncini geliştirmek için Vanadyum ve Tungsten ilave ederek CALPHAD metoduyla Thermo-Calc yazılımı TCFE7 veri tabanı ile hesaplamalar ve aynı zamanda belirlenen kompozisyonda dökümü gerçekleştirerek incelemeler yapmışlardır. Çalışmada iki farklı malzeme kullanılmıştır. İlk malzeme belirsiz soğutulmuş dökme demir, kısaltması A olarak verilmiştir. 2. Malzeme ise toplam %0.17 Vanadyum ve %0.08 Tungsten ilavesi edilmiş, kısaltması M olarak verilmiştir (Klancnik ve ark., 2012).

İlk olarak indüksiyon ocağın belirsiz soğutulmuş dökme demir bir kompozisyon ayarlanmış, ergitme işleminin ardından 1470°C’de başa bir potaya sıcak metal alınırken aşılmalı, Ferro Vanadyum ve Ferro-Tungsten ilave edilerek ergiyik boyunca hacimde maksimum dağılım yapmışlardır. Toplamda 2400kg hazırlanan metal, ısıtılmış ve 1100 rpm dönüş hızına sahip çelik kokil kalıba santrifüj döküm yöntemi ile dökmüşler. Kokil çapı 2000mm ve boyu 690 mm kokil döküm sonrasında kalıp içerisinde havada soğutulmuştur. Döküm esnasında hazırlanmış ergiyik metalden numune alınarak katılaşma verileri kayıt altına almışlardır. Dökümden sonra malzeme yüzeyinden numune keserek metalografik çalışmalar yapmışlardır. İlk olarak %2 Nital ile dağlama yaparak optik mikroskop görüntüleri incelenerek JMicroVision programı ile faz oranlarını hesaplamışlardır. Bileşenlerin mikro kimyasal analizi için SEM ve EDS analizleri yapmışlardır. 10°C hızla ısıtma/soğutma ile olası element kaybı ve ağır karbürlerin yerçekiminden dolayı ayrışmasını önlemek için 1500°C’nin üzerinde bir sıcaklık ile S tipi termokupl yardımıyla DSC analizleri yapmışlardır.

Yapılan çalışma sonucunda alaşım elementleri ilavesinin, Ergime sıcaklığını düşürdüğü, grafitlerin azaldığını tespit etmişlerdir. Az miktarda alaşımlama yapıldığı

için mikroyapıda belirgin farklar görülmemiştir. SEM ve EDS görüntülerinde hesaplanan ve deney numunesinden çıkan verilerde karbür yapıların yakın değerler olduğu saptanmıştır.

Çakır (Çakır, 2021) yaptığı çalışmada küresel grafitli dökme demire farklı oranlarda nikel ekleyip, numunelere östemperleme ısıl işlemi uygulayarak mekanik özelliklerini araştırmıştır. Bu çalışmada belirlenen kimyasal bileşimleri CALPHAD hesaplamaları yaparak Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramları oluşturmuştur. Teorik bilgilerden yola çıkarak, CALPHAD hesaplamaları sonucu 900°C’de 2 saatlik tutma süresiyle 300°C’de tuz banyosunda su verme işlemi belirlemiştir. Her numune döküm halinde, östemperlenmiş ve kriyojenik işlemlerini uygulamıştır. Sertlik, Aşınma ve Darbe testleri uygulanan numunelere ayrıca optik mikroskop, SEM ve XRD incelemeleri yapılmıştır.

Yapılan deney sonucunda yüksek nikel oranının tokluğu düşürüp, sertliği arttırdığı. Kriyojenik işlemin sertlik etkisinde sınırlı kaldığı, düşük ve orta nikelli alaşımlamanın östemperlemede tokluğu iyileştirdiğini, Östemperlemenin mikroyapıyı değiştirdiğini ve ayrıca kriyojenik işlemin östenitin bir kısmının martenzite dönüşümünü kolaylaştırdığını ve bunun sonucunda sertlik ve tokluğu etkilemeden aşınma direncini iyileştirdiğini gözlemlemiştir. Teorik hesaplamalardan faydalanarak farklı nikel alaşımlı küresel grafitli dökme demirlerde, östemperleme ısıl işlemi parametrelerini CALPHAD hesaplamasıyla yapılan Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramının proses tasarımında yararlı bir araç olduğunu ortaya koymuştur.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1 Calphad Hesaplamaları

Hesaplamalar CALPHAD tabanlı ticari ismi Thermo-Calc programı ile Sıcaklık bağlı faz fraksiyonları yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu kritik sıcaklıklar ve kimyasal bileşimde oluşan fazlar ve karbürlerin tayini yapılmıştır. Kimyasal bileşim standart üretilen kalitede optimizasyonlar yapılarak Farklı oranlarda Krom, Nikel, Molibden, Mangan ve Silisyum değerleri üzerinden hesaplanmıştır.

### 4.2 Kullanılan Alaşım Elementleri

Hesaplanan kimyasal bileşiminde Çelik hurdası, merdane hurdası, Karbon, Nikel, Fe-Mn, Fe-Si, Fe-Cr, Fe-Mo ve Küreselleştirme işlemi için Elkem firmasının ELMAG 9520 NODULARISER marka Fe-Si-Mg ve Barinoc 75 İNOCLANT aşılama kullanılmıştır. Kullanılan alaşım elementleri Karbon ve Nikel %99 saflıktadır. Fe-Mn %60Mn, Fe-Si %75Si, Fe-Cr %60Cr, Fe-Mo %60Mo, Küreselleştirici kimyasal bileşimi Tablo 4.1’de, Aşılama kimyasal bileşimi Tablo 4.2’de verilmiştir.

**Tablo 4.1:** Küreselleştirici kimyasal analizi

	Si	Mg	RE	Ca	Al
Fe-Si-Mg	45	9,5	1,05	1	0,65

**Tablo 4.2:** Aşılama kimyasal analizi

	Si	Ba	Ca	Al
Aşılama	75	2,5	1,5	1,2

Hesaplamalar Ersoy Döküm Makine firmasının ticari olarak geliştirdiği standart olarak ürettiği Tablo 4.3’de kimyasal bileşimi verilen perlitik kalite merdaneinin 5 farklı kimyasal bileşimi hesaplamalı malzeme mühendisliği ile CALPHAD hesaplamaları yapılarak optimum kimyasal bileşimi belirlenmeye çalışılmıştır. Hesaplanan kimyasal bileşimler ticari bilgi olduğu için Tablo 4.4’de

Merdanelerin döküm sertlik değerleri Shore C olarak ve her bir numune için farklı oranlarda Krom, Nikel, Molibden değerleri toplam değer olarak verilmiştir.

**Tablo 4.3:** Perlitik Merdane kimyasal bileşimi

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo
3,3	1,4	0,5	0,6	2,2	0,4
3,6	1,7	0,7	1,4	2,9	0,65

**Tablo 4.4:** Hesaplamaları yapılan merdane kimyasal bileşimleri

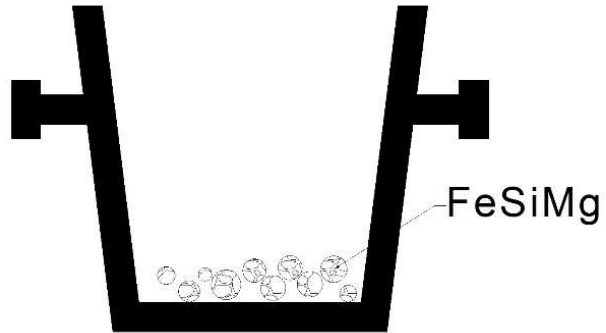
Numune Adı	C	Si	Mn	Cr + Ni + Mo	Sertlik Shore C
DH-1	3,45	1,60	0,55	3,48	55,4
DH-2	3,55	1,60	0,65	4,10	62,1
DH-3	3,50	1,50	0,65	3,95	61,4
DH-4	3,59	1,60	0,62	4,59	63,6
DH-5	3,50	1,65	0,53	4,12	62,3

### 4.3 Ergitme ve Döküm

Döküm işlemi 8 ton kapasiteli EGES marka orta frekanslı indüksiyon ocağında çelik hurda, merdane hurdası ve merdane talaşını ergetmek ile başlamıştır. Metal ergitme işleminden sonra alaşımlama işlemi yapılarak kimyasal bileşim hazırlanmıştır. Hazırlanan kimyasal bileşimler Şekil 4.1’de gösterilen OBLF marka GS1000 serisi spektrometre cihazıyla kontrol edilmiştir. Döküm sıcaklığına uygun hale gelen metal (~1500°C) açık potaya Şekil 4.2’de dökülerek küreselleştirme yapılmıştır. Küreselleşen metal döküm potasına alınırken aşılama işlemi yapılarak Şekil 4.3’de hazırlanan kalıplara dökümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1: Kimyasal bileşim kontrolü için kullanılan spektrometre cihazı



Şekil 4.2: Açık pota küreselleştirme işlemi

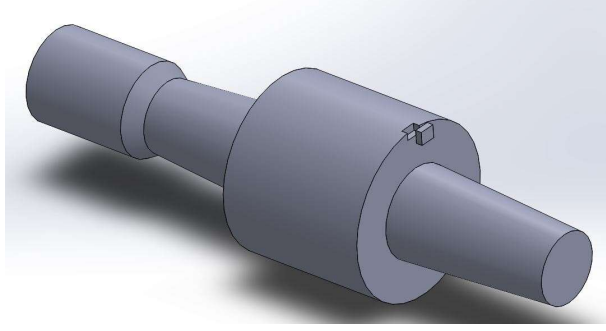


**Şekil 4.3:** Hazırlanan kalıp

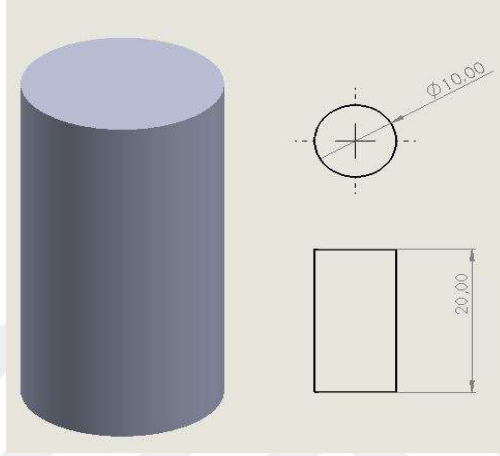
Çalışması yapılan merdaneler 655 çapında, gövdeler kokil kalıplara ve üst ve alt muylular reçineli kum kalıplama ile gerçekleştirilmiştir.

#### **4.4 Numunelerin Hazırlanması**

Numunelere her bir merdaneden çil oluşmuş çalışma bölgesinden Şekil 4.4’de gösterildiği gibi önce torna makinası ile kesilmiştir. Merdaneden alınan parçalar Şekil 4.5’de verilen ASTM G99 Standardı numune ölçülerine göre düşük ısı girdisi olması için Tel Erezyon makinesi ile kesimi yapılmıştır. Kesimi yapılan numuneler istenilen ölçü ve toleranslarda olduğu için başka işlem yapılmamıştır. Şekil 4.6’da tel erezyon ile kesilmiş numuneler gösterilmektedir.



Şekil 4.4: Mordane çalışma yüzeyinden alınan aşınma numune parçası



Şekil 4.5: ASTM G99 Standardına göre aşınma test numune ölçüleri

Çapları ayarlanarak kesilen numuneler daha sonra tekrar tel erazyon makinası ile boydan kesilerek istenilen ölçülere getirilmiştir.



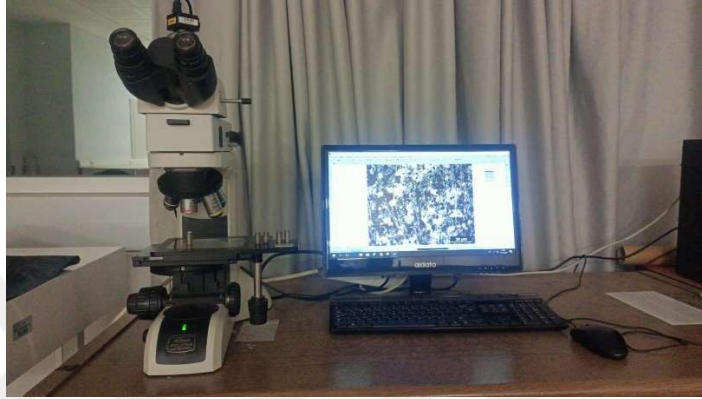
Şekil 4.6: Tel erazyon ile kesilen numuneler

#### 4.5 Karakterizasyon

Kimyasal bileşim farklılıklar ve mekanik özellikler ile mikroyapı arasındaki ilişkiyi anlamak için Optik Mikroskop ve SEM incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

#### 4.5.1 Metalografi

Numuneler sırasıyla 400, 600, 800, 1200 mesh SiC zımpara kağıdı ile zımparalanmıştır. 1 $\mu$  keçe ve 1 $\mu$  elmas solüsyon kullanılarak parlatılmıştır. % 2 Nital çözeltisi ile dağlama yapılarak Nikon Eclipse LV150NL marka Şekil 4.7’de gösterilen optik mikroskopta 50x ve 100x büyütme yapılarak mikroyapı görüntüleri incelenmiştir.



Şekil 4.7: Numunelerin incelendiği optik mikroskop

#### 4.5.2 SEM ve EDS Analizi

Çalışma kapsamında aşınma testleri yapılan numunelerin çizik yüzeylerinden SEM ve EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler AKÜ TUAM’da Şekil 4.8’de gösterilen LEO marka 1430 VP modeli ile yapılmıştır.



**Şekil 4.8:** SEM ve EDS Analiz cihazı

#### **4.5.3 XRD Analizi**

Çalışmada AKÜ TUAM’da mikroyapı görüntüleri alınan numunelerden Şekil 4.9’da gösterilen Bruker marka D8 Advance model cihaz ile XRD analizleri yapılmıştır.



**Şekil 4.9:** XRD Analiz Cihazı

## 4.6 Mekanik Testler

Mekanik testler, malzemeye uygulanan statik veya dinamik yükler altında oluşan deformasyon ve hasar davranışlarını anlayarak, malzeme mikro ve makro yapısıyla ilişkilendirerek malzemenin özelliklerini anlamamızı sağlar. Bu çalışmada üretilen numuneler aşınma testi, sertlik, yüzey pürüzlülüğü testleri yapılarak, malzemenin sertlik ve mikroyapısına bağlı olarak farklı yükler ve kayma mesafelerinde aşınma durumları incelenmiş, oluşan aşınma çizgilerinin yüzey pürüzlülüğü incelenmiştir.

### 4.6.1 Aşınma Testi

Aşınma testleri için hazırlanan numunelerin çapları ASTM G99'a göre tel erezyon ile kesildiği için herhangi başka işlem yapılmamıştır. Numunelerin alt ve üst yüzeyleri önce torna makinası ile yüzeylerinden alın tornalama yapılarak iki yüzeyinde paralel hale gelmesi sağlanmış, daha sonra 400 mesh ve 1000 mesh SiC zımpara kağıdı ile zımparalanıp parlatılmıştır. Hazırlanan numuneler Şekil 4.10'de verilmiştir.



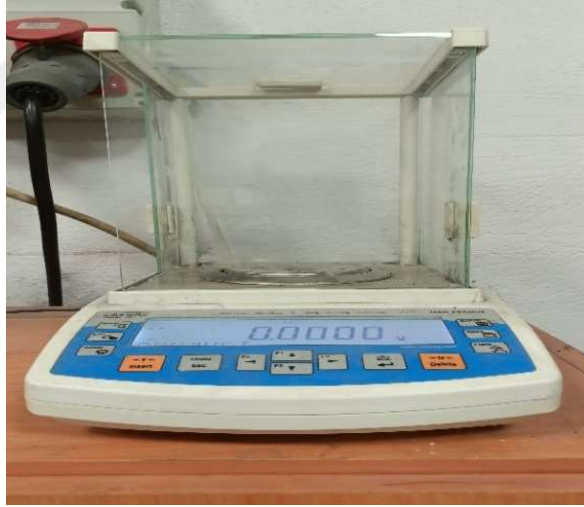
Şekil 4.10: Hazırlanan numuneler

Aşınma test numuneleri Şekil 4.11'de gösterilen pin on disk test cihazında 4m/s hız altında 600m, 1200m, 1800m kayma mesafelerinde 20N, 40N, 60N yük altında testler yapılmıştır. Aşındırıcı malzeme olarak ısıtılmış sertleştirilmiş C55 çeliği kullanılmıştır.



Şekil 4.11: Pin on disk aşınma test cihazı

Her parametre önce ve sonrasında numunelerin ağırlıkları Şekil 4.12’de gösterilen 0,0001 g hassasiyetle ölçüm yapılarak ağırlık kayıpları hesaplanmıştır. Test süresince Sürtünme grafiği için loadcell ölçümleriyle verileri kayıt edilmiştir.



Şekil 4.12: Ağırlık ölçümünde kullanılan tartı

#### 4.6.2 Sertlik Testi

Hadde merdanelerinde sertlik ölçümü için Shore (SHc) sertlik ölçüm metodu tercih edilir. Bu yöntemde, küçük bir çekicin yüzeye vurup geri sıçrama yüksekliği ölçülerek sertlik belirlenir. Test, temiz bir yüzeyden yapılabilir ve aynı bölgeden birden fazla ölçüm alınarak ortalaması hesaplanır.

Sertlikler döküm halindeki merdanelerin 3 farklı yüzeyinden, her yüzeyde 5 farklı ölçümlerin ortalaması alınarak firma bünyesinde bulunan Equotip 550 Proceeq marka portatif sertlik cihazı ile shore cinsinden ölçülmüştür. Sertlik cihazı ve ölçüme ait görüntüler Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13: Merdane sertlik ölçümü ve sertlik cihazı

#### 4.6.3 Yüzey Pürüzlülüğü

Aşınma deneylerin sonunda Şekil 4.14’da gösterilen TMTECK-462 Marka yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda yüzey profili ( $\mu$ ) – Ölçüm uzunluğu (mm) ve Ra pürüzlülük değeri grafikleri çıkartılmıştır.



Şekil 4.14: Yüzey pürüzlülük cihazı

## 5. BULGULAR

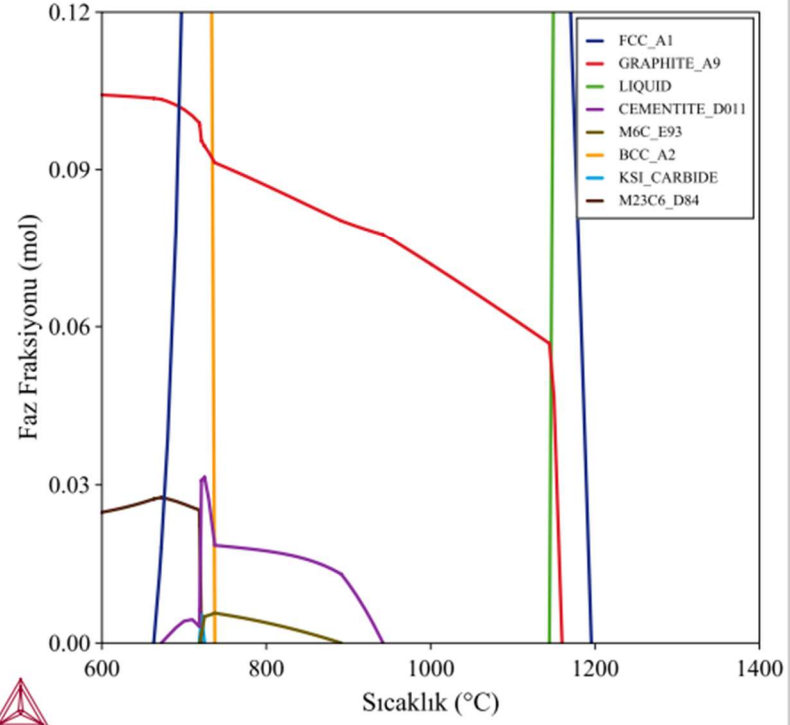
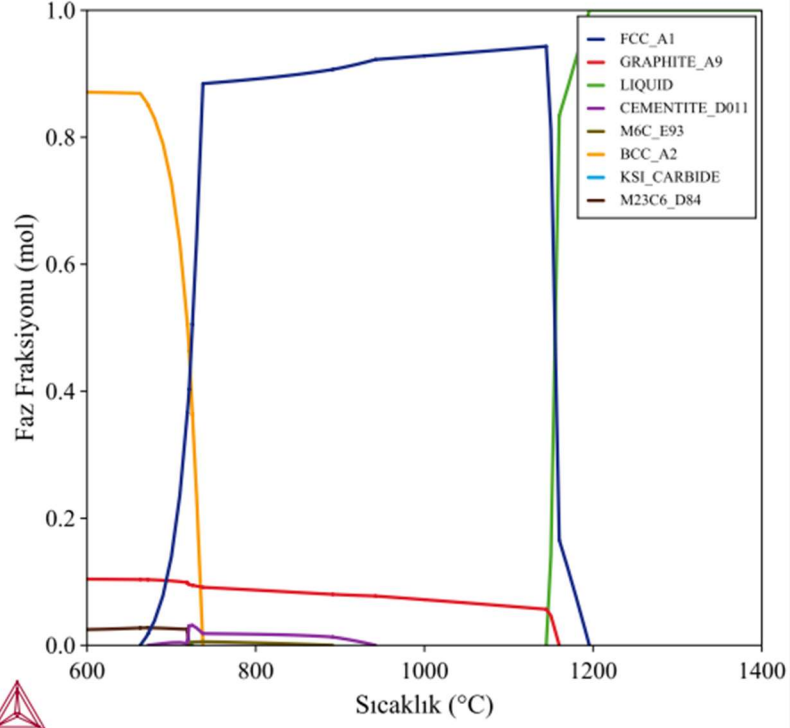
Yapılan Calphad hesaplamalarında kritik sıcaklıklar, sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları ile oluşan sementit, karbür tipleri ve hacimlerini ortaya konmuştur.

Hesaplanan kimyasal bileşimlerin dökümleri gerçekleştirilmiştir. Dökümü yapılan merdanelerin kimyasal analizleri, döküm halinde sertlik ölçümleri, çalışma yüzeylerinden alınan numunelerden Mikroyapı görüntüleri, SEM ve EDS analizleri, XRD analizleri yapılarak hesaplamalar desteklenmiştir.

### 5.1 CALPHAD Hesaplama sonuçları

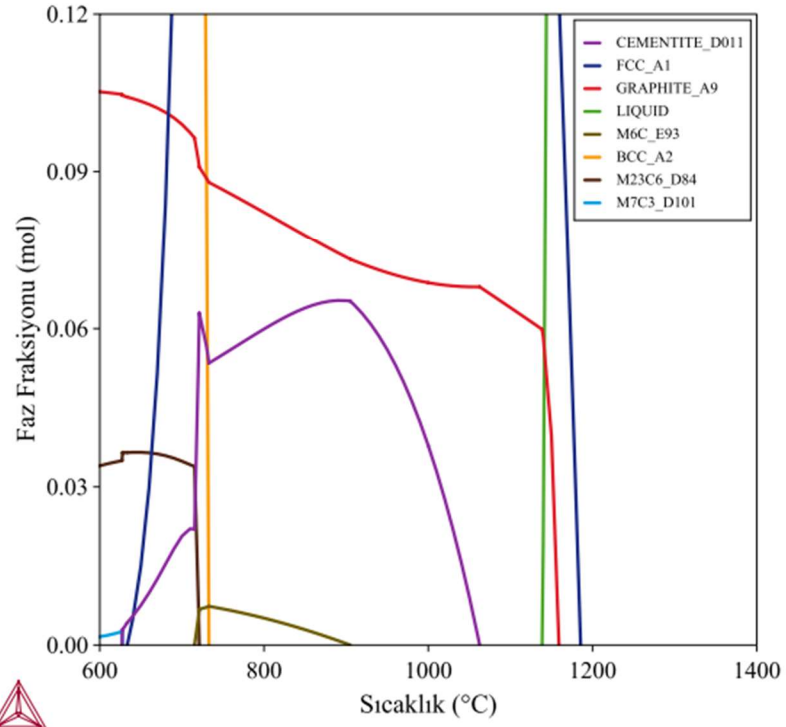
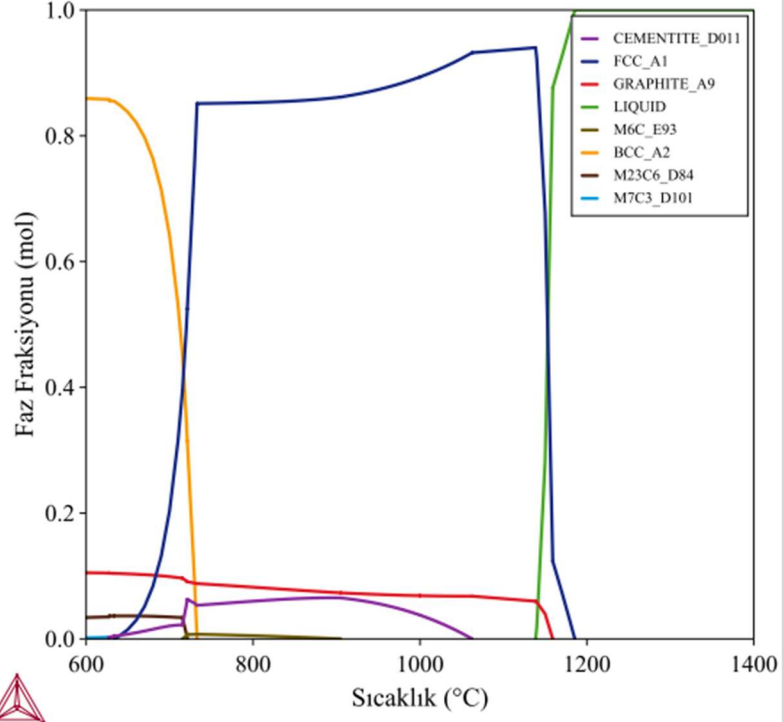
Hesaplamalar Thermo-Calc yazılımı ile yapılmıştır. Hesaplamalar sonucu faz fraksiyonları tüm hacim ve karbür hacimlerini kapsayan şekilde grafikler halinde sunulmuştur.

şekil 5.1’de DH-1 numunesinin sıcaklığa bağlı olarak faz fraksiyonları verilmiştir.



Şekil 5.1: DH-1 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları

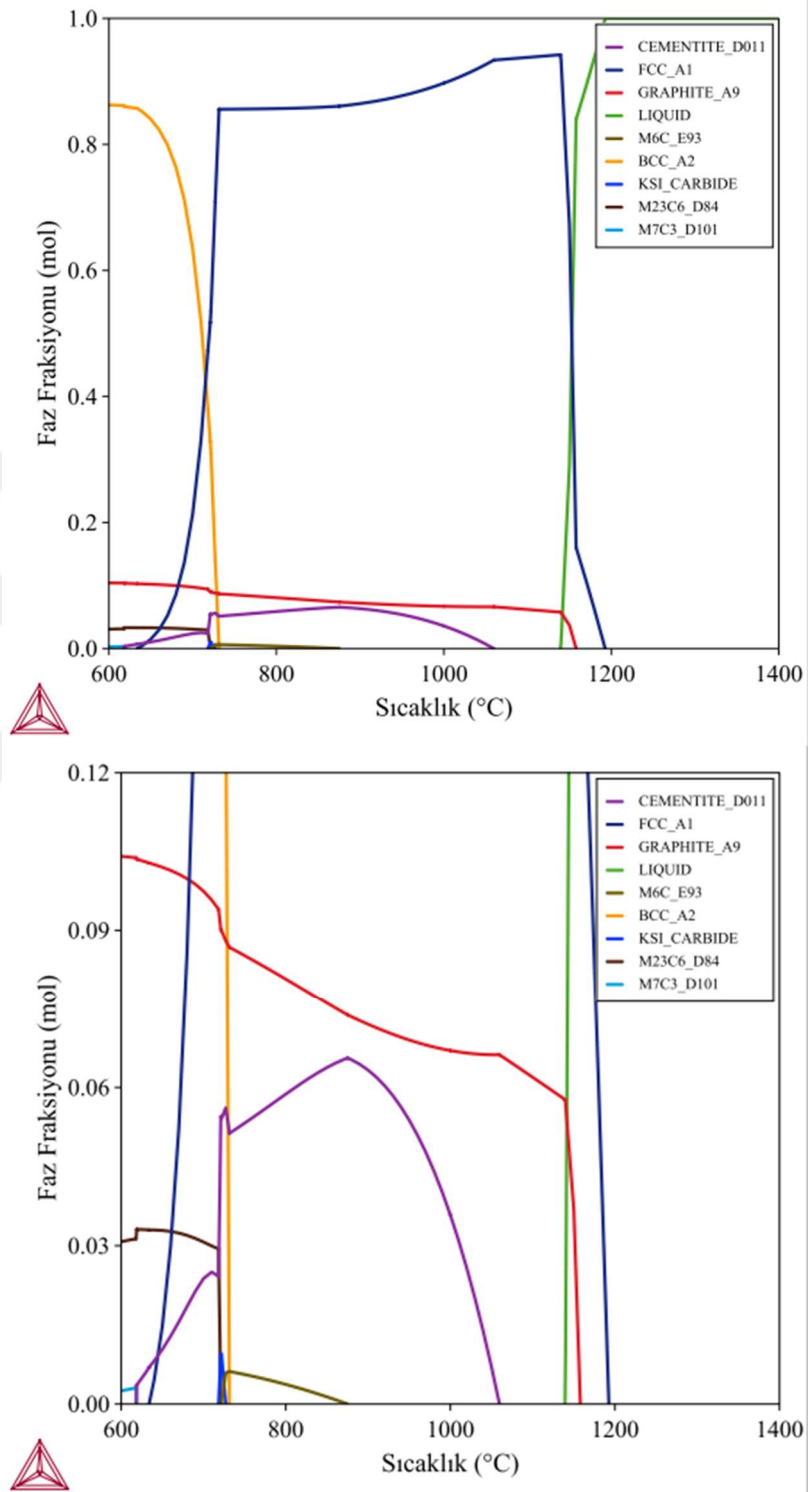
Hesaplanan DH-1 numunesinin grafiğinde gösterildiği üzere, 0,104 mol oranında grafit, 0,024 mol oranında M23C6 karbür ve 0,87 mol BCC\_A2 fazı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.2’de DH-2 numunesinin sıcaklığa bağlı olarak faz fraksiyonları verilmiştir.



Şekil 5.2: DH-2 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları

Hesaplanan DH-2 numunesinin grafiğinde gösterildiği üzere, 0,105 mol oranında grafit, 0,024 mol oranında M23C6 karbür ve 0,87 mol oranında BCC\_A2 fazı olduğu gözlemlenmiştir.

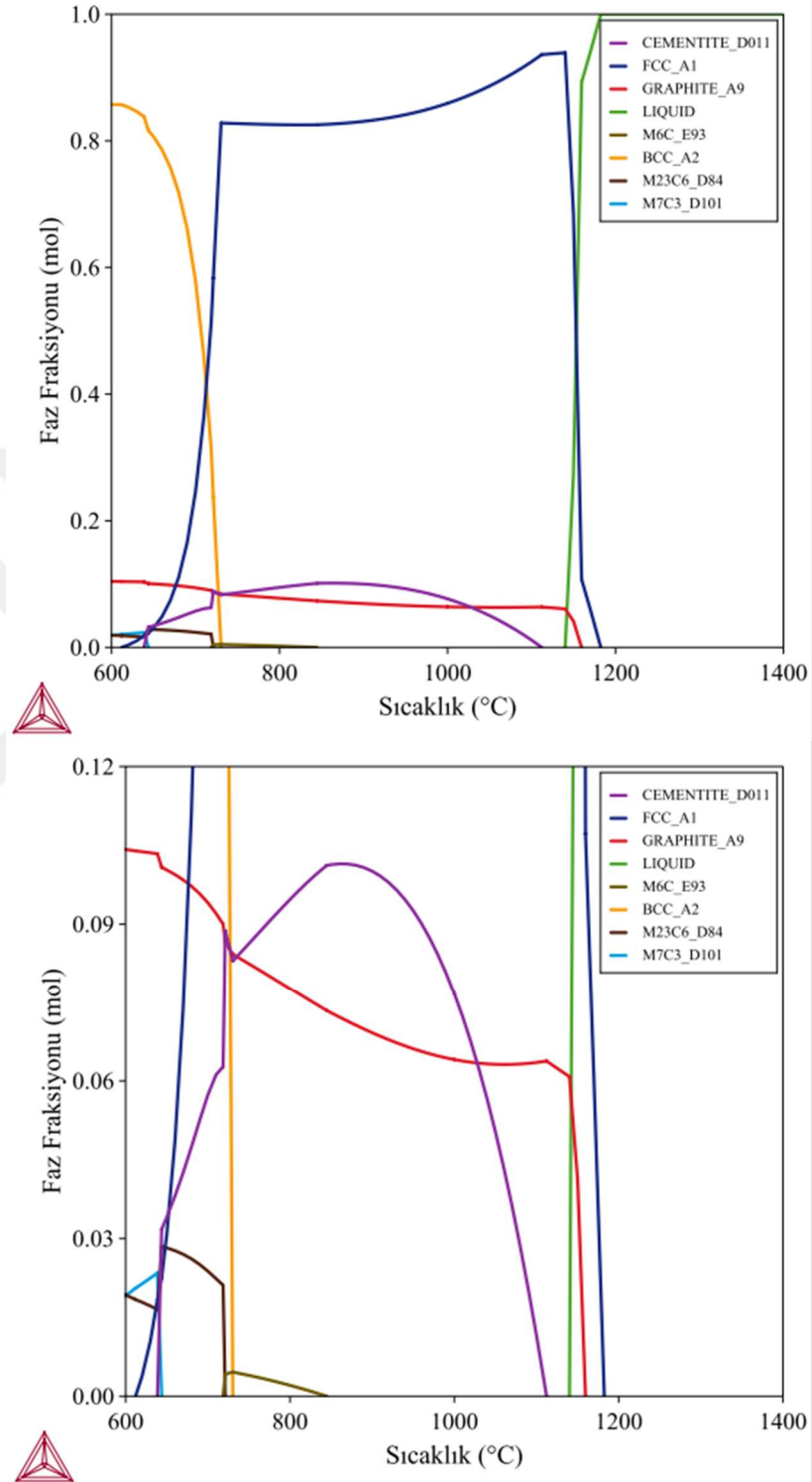
Şekil 5.3’de DH-3 numunesinin sıcaklığa bağlı olarak faz fraksiyonları verilmiştir.



Şekil 5.3: DH-3 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları

Hesaplanan DH-3 numunesinin grafiğinde gösterildiği üzere, 0,104 mol oranında grafit, 0,03 mol oranında M23C6, 0,002 mol oranında M7C3 karbürleri

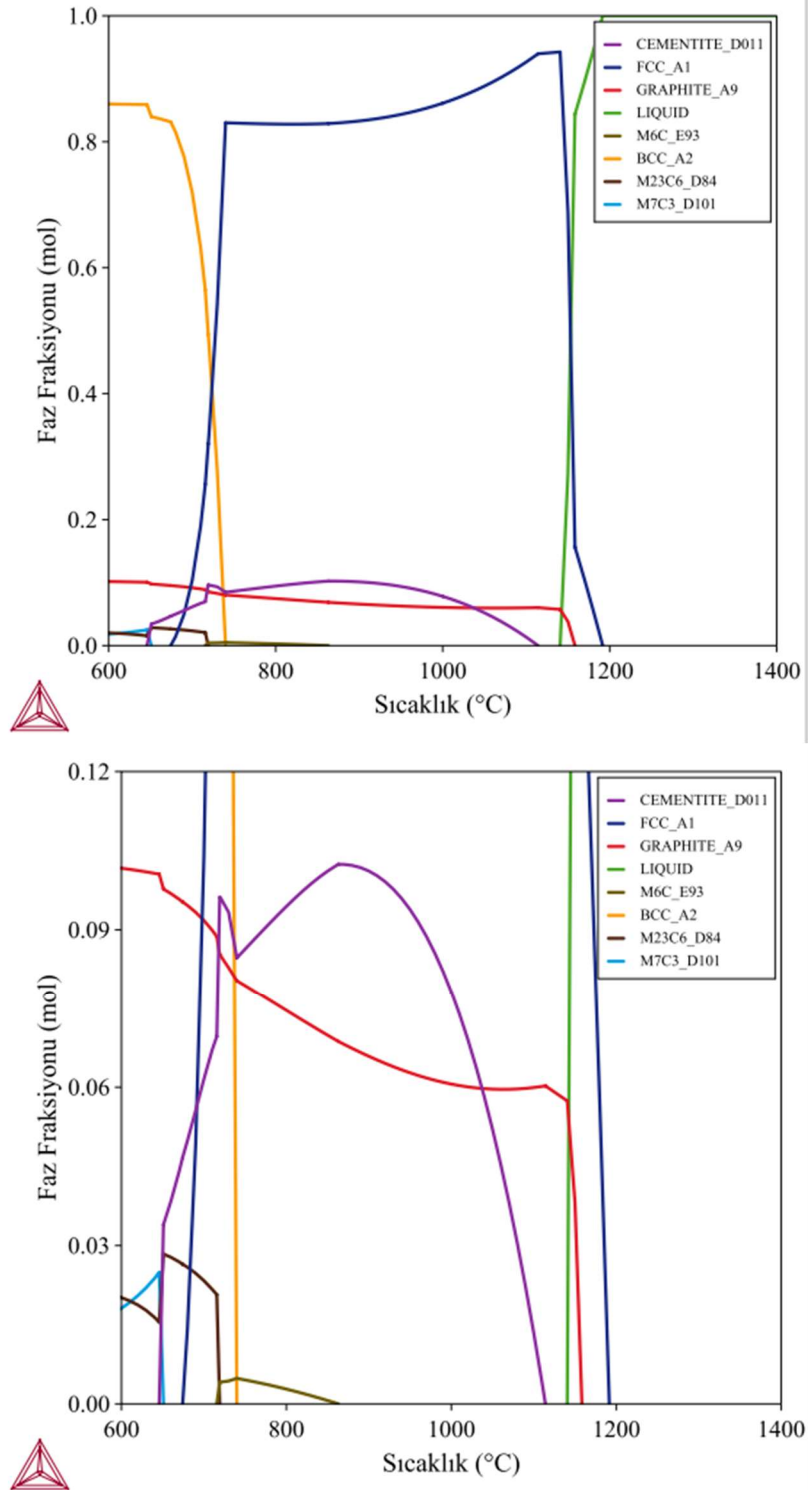
ve 0,86 mol oranında BCC\_A2 fazı oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.4’de DH-4 numunesinin sıcaklığa bağlı olarak faz fraksiyonları verilmiştir.



Şekil 5.4: DH-4 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları

Hesaplanan DH-4 numunesinin grafiğinde gösterildiği üzere, 0,104 mol oranında grafit, 0,019 mol oranında M23C6, 0,019 mol oranında M7C3 karbürleri

ve 0,857 mol oranında BCC\_A2 fazı oluştuğu gözlemlenmiştir. Şekil 5.5’de DH-5 numunesinin sıcaklığa bağlı olarak faz fraksiyonları verilmiştir.



Şekil 5.5: DH-5 Numunesinin sıcaklığa bağlı faz fraksiyonları

Hesaplanan DH-5 numunesinin grafiğinde gösterildiği üzere, 0,101 mol oranında grafit, 0,020 mol oranında M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, 0,018 mol oranında M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> karbürleri ve 0,86 mol oranında BCC\_A2 fazı oluştuğu gözlemlenmiştir.

Hesaplanan kritik sıcaklıklar sonucunda DH-1, DH-3 ve DH-5 ilk katılacak fazları 1190°C'de FCC\_A1 (östenit) fazıdır. Toplam hacimce Nikel oranı yüksek olan DH-2 ve DH-4 kimyasal bileşimlerinde ise 1180°C katılacak FCC\_A1 fazı olmuştur. Katılmanın devam etmesiyle birlikte dökme demirlerde meydana gelen ötektik reaksiyon ile grafit fazı katılmaktadır. Tüm numunelerde 1150°C'de grafitler oluşmaya başlamıştır. Katılma sonrasında östenit ve ötektik yapıda katı-katı reaksiyonlar sonucunda oluşan, sementit, M<sub>6</sub>C, M<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> karbürleri çökelmiştir.

Yapıda oluşan sementit DH-1 numunesinde 940-680°C çökelmiş, 724°C'de maksimum 0,0314 mol seviyesindedir. DH-2 numunesinde 1060-627°C çökelmiş, 905°C'de maksimum 0,0655 mol seviyesindedir. DH-3 numunesinde 1050-619°C çökelmiş, 875°C'de maksimum 0,0655 mol seviyesindedir. DH-4 numunesinde 1110-640°C çökelmiş, 870°C'de maksimum 0,1014 mol seviyesindedir. DH-5 numunesinde 1110-650°C çökelmiş, 863°C'de maksimum 0,1024 mol seviyesindedir.

M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> karbürleri tüm numunelerde yaklaşık 720°C'de çökelmeye başlamıştır; DH-1 numunesinde 627°C'de maksimum 0,0276 mol, DH-2 numunesinde 633°C'de maksimum 0,036 mol, DH-3 numunesinde 620°C'de maksimum 0,0330 mol, DH-4 numunesinde 643°C'de maksimum 0,0284 mol, DH-5 numunesinde 650°C'de maksimum 0,0283 mol seviyesinde hesaplanmıştır.

M<sub>6</sub>C karbürleri tüm numunelerde yaklaşık 900°C'de çökelmeye başlamıştır. DH-1 numunesinde 737°C'de maksimum 0,0056 mol, DH-2 numunesinde 732°C'de maksimum 0,0071 mol, DH-3 numunesinde 732°C'de maksimum 0,0061 mol, DH-4 numunesinde 730°C'de maksimum 0,0045 mol, DH-5 numunesinde 740°C'de maksimum 0,0048 mol seviyesinde hesaplanmıştır.

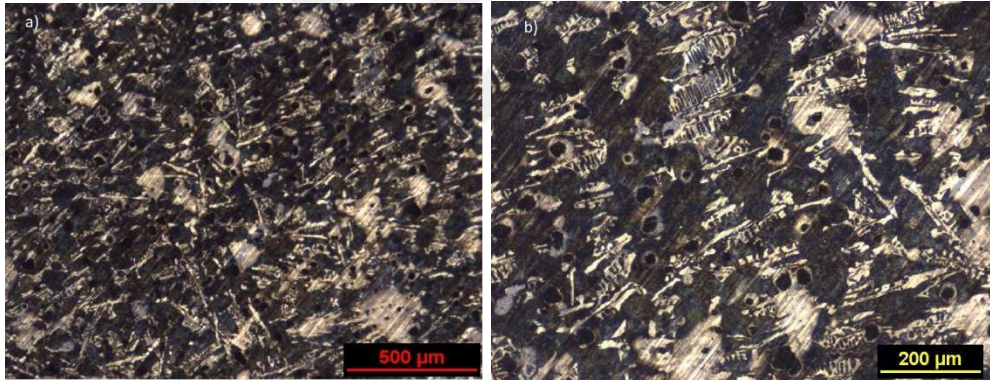
M<sub>7</sub>C<sub>3</sub> karbürleri DH-1 numunesinde görülmemektedir. Diğer numunelerde yaklaşık 645°C'de çökelmeye başlamıştır. DH-2 numunesinde 627°C'de maksimum 0,025 mol, DH-3 numunesinde 618°C'de maksimum 0,030 mol, DH-4 numunesinde

638°C’de maksimum 0,023 mol, DH-5 numunesinde 645°C’de maksimum 0,0249 mol seviyesinde hesaplanmıştır.

Sonuçlar incelendiğinde genel olarak alaşım elementi artmasıyla birlikte karbür hacimleri artmaktadır. Krom ve molibden artışları karbür artışlarında etkili olmuştur. Mo ve Mn değeri yüksek analizde maksimum karbür oranı görülmektedir. Krom artışıyla birlikte m7c3 karbürü oranı artmıştır. M7C3 karbürü oluşturmak için minimum %1 oranında krom gereklidir. Karbon ve Silis artışıyla birlikte sementit artışı olmuştur.

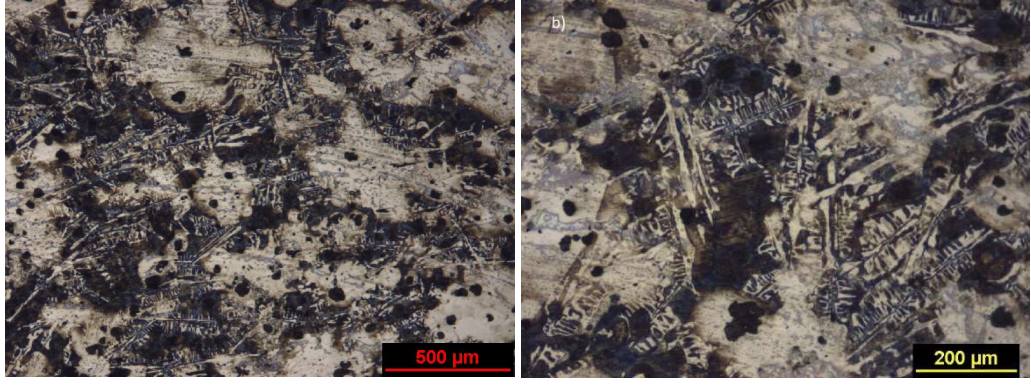
## 5.2 Mikroyapı Görüntüleri

Şekil 5.6’da DH-1 numunesinin 50x ve 100x büyütmede mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



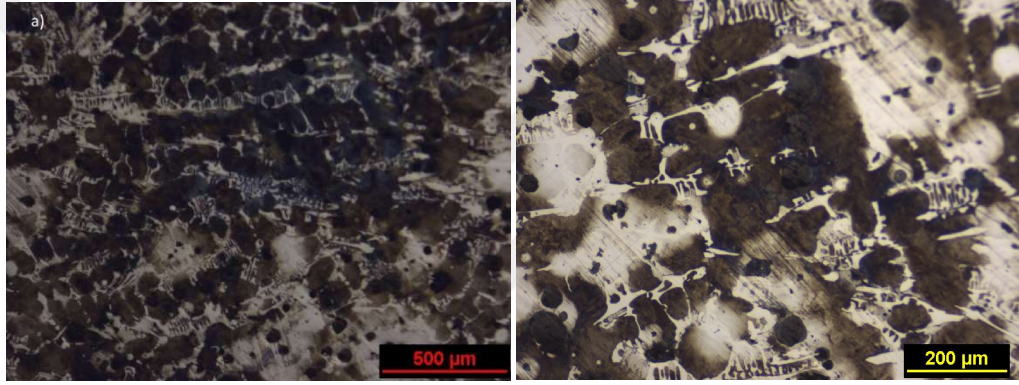
Şekil 5.6: DH-1 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x

Şekil 5.7’de DH-2 numunesinin 50x ve 100x büyütmede mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



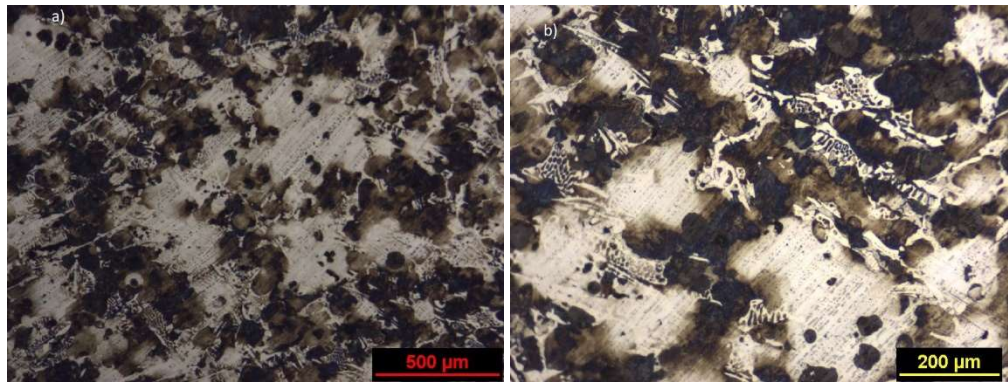
Şekil 5.7: DH-2 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x

Şekil 5.8’de DH-3 numunesinin 50x ve 100x büyütmede mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



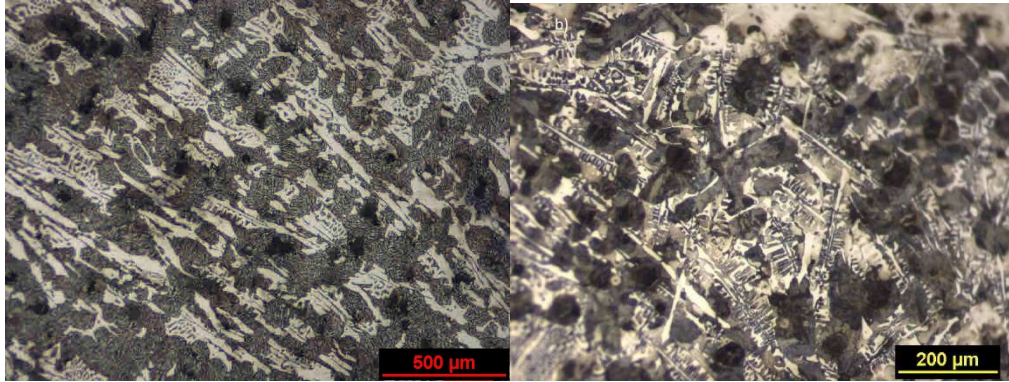
Şekil 5.8: DH-3 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x

Şekil 5.9’da DH-4 numunesinin 50x ve 100x büyütmede mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.9: DH-4 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x

Şekil 5.10'da DH-5 numunesinin 50x ve 100x büyütmede mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.10: DH-5 numunesinin mikroyapı görüntüleri a)50x b)100x

Ötektik karbürlerin çökmesi, alaşım elementlerinin hacmi ve soğutma hızının atmasıyla artar. Krom ilavesi ferrit hacmini azaltırken, perlit oranını artırır. Ayrıca yapıdaki karbür hacminin artması grafit sayısını azaltmaktadır Genel olarak mikroyapılar incelendiğinde, eser miktarda artış olmasından dolayı yapılarda belirgin farklar görünmemektedir. Nikel oranı en yüksek olan DH-4 Numunesinde en yüksek ledeburit görülmektedir. Grafitlerin etrafını çevreleyen perlitler mevcuttur. Alaşım elementlerini artışına göre grafitlerde azalmalar mevcuttur (Ovalı ve diğ. 2015) (Guterres ve diğ. 2021).

### 5.3 Aşınma Test Sonuçları

Üretimi yapılmış merdanelerden alınan numuneler kuru kayma sisteminde sırasıyla 20 N, 40 N, 60 N yükler altında 600m, 1200m ve 1800m kayma mesafesinde aşınma testleri uygulanmıştır. Testler sonucunda elde edilen veriler grafikler ve tablo halinde verilmiştir.

Şekil 5.11'de aşınma testi uygulanan numunelerin kayma mesafesine bağlı hacim kaybı grafikleri verilmiştir. Tablo 5.3'de 60 N yükte 1800 m mesafede hacim kayıpları verilmiştir.

Testler sonucu çıkan ağırlık kayıpları verilerinden aşağıda yer alan formüllerden yola çıkarak hacim kaybı – kayma mesafesi ve sürtünme katsayıları hesaplanmıştır(Ovalı, 2017).

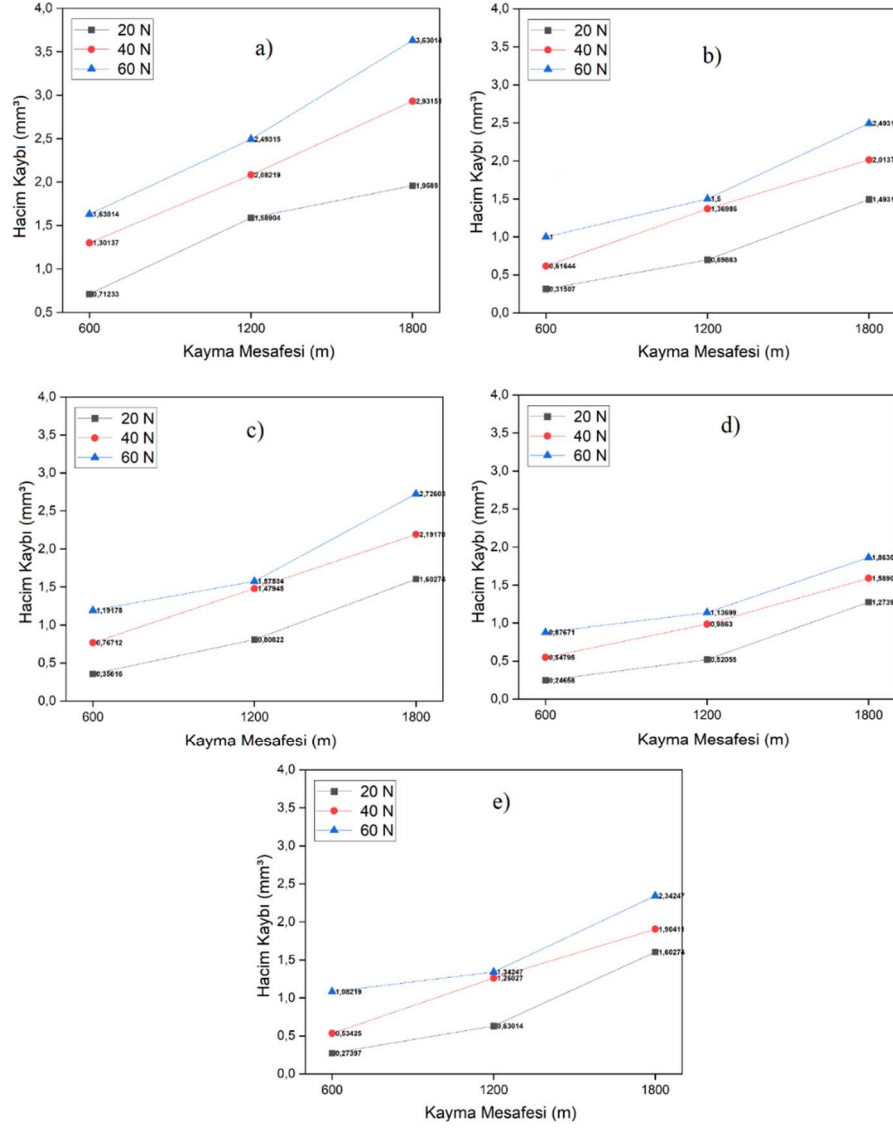
Hacim kaybı hesabı;

$$[\text{Ağırlık kaybı (g)/ yoğunluk(g/cm}^3\text{)}] \times 1000 \quad (4.1)$$

Sürtünme katsayısı hesabı;

$$\text{Sürtünme katsayısı } (\mu) = F/P \quad (4.2)$$

Sürtünme katsayısı hesabında F, Load Cell ile ölçülen ortalama değer ile ve P ise numuneye uygulanan yükür.



Şekil 5.11: Aşınma testi uygulanan numunelerin kayma mesafesine göre hacim kayıpları, a) DH-1 b) DH-2 c) DH-3 d) DH-4 e) DH-5

Tablo 5.1: En yüksek yük ve kayma mesafesindeki hacim kayıpları

60 N - 1800 m					
Numune	DH-1	DH-2	DH-3	DH-4	DH-5
Hacim Kaybı (mm <sup>3</sup> )	3,630	2,493	2,726	1,589	2,342

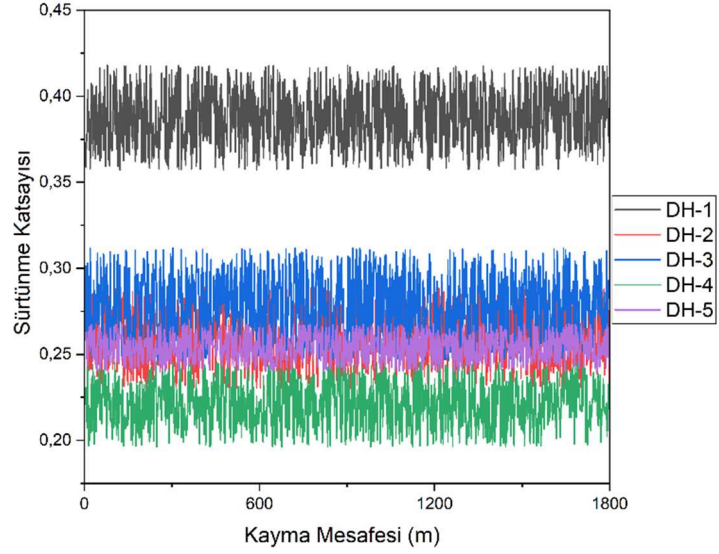
Farklı yükler (20 N, 40 N, 60 N) ve kayma mesafeleri (600 m, 1200 m, 1800 m) altında numunelerin hacim kayıplarının değiştiği gözlemlenmiştir. Grafiklerden elde edilen verilere göre, artan yük ve kayma mesafesiyle birlikte tüm numunelerde hacim kayıplarının önemli ölçüde arttığı görülmüştür. Bu sonuçlar, literatürde belirtilen sürtünme ve aşınma davranışlarıyla paralellik göstermektedir (Ersöz ve

Ovalı, 2018). Numuneler arası karşılaştırma yapıldığında, belirli yük ve mesafelerde bazı numunelerin diğerlerine kıyasla daha düşük hacim kaybına sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, bu numunelerin daha yüksek sertliğe, düşük sürtünme katsayısına veya daha iyi mekanik dayanıklılığa sahip olduğunu işaret etmektedir.

Numuneler arasında en yüksek sertlik değerine sahip olan DH-4 numunesinin 60 N yükte 1800 m kayma mesafesinde en düşük 1,589 mm<sup>3</sup> kaybına uğrayan malzemedir. Sertlik değeri en düşük olan DH-1 numunesinin 3,630 mm<sup>3</sup> hacim kaybıyla en fazla hacim kaybına uğrayan malzeme olduğu yapılan test sonuçlarıyla ortaya konulmuştur. Standart kalite üretilen DH-5 malzemesine kıyasla Nikel oranı %20 fazla olan DH-4 Malzemesi en yüksek yük ve kayma mesafesinde %43 daha az hacim kaybı yaşamıştır. Sertlik değerleri birbirine yakın olan malzemelerden yola çıkarak Nikel ilavesinin aşınma direncini arttırdığı söylenebilir. Standart kalite üretilen DH-5 numunesine en yakın değerlerde hacim kaybına uğrayan DH-2 numunesi ağırlıkça %20 Krom oranının düşük, %8 oranında yüksek Nikel ve %30 oranında Molibden artışı sonucunda aynı sertlik değerlerine sahip olmaları rağmen DH-5 Numunesi, DH-2 numunesine göre %7 daha az aşınma kaybı yaşamıştır. İlave edilen ve azaltılan element miktarları göz önüne alındığında DH-5 numunesi DH-2 numunesine göre optimum şartları sağlamıştır.

Tüm sonuçlar incelendiğinde, artan kayma mesafesi ve yük ile birlikte aşınma miktarının arttığı ve bu durumun malzeme yapısına, yüzey özelliklerine ve uygulanan koşullara bağlı olarak değiştiği belirlenmiştir. Bu bulgular, aşınma davranışlarının kontrol edilmesi ve optimize edilmesi için malzeme seçiminde dikkatli olunması gerektiğini göstermektedir.

Aşınma test süresi boyunca loadcell ölçümleriyle çıkartılan kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayıları Şekil 5.12’de grafik olarak, Tablo 5.2’de ise ortalama sürtünme katsayıları verilmiştir.



**Şekil 5.12:** Kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayıları

**Tablo 5.2:** Kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayılar

<b>Kayma Mesafesine Bağlı Sürtünme Katsayıları</b>					
<b>Numune</b>	<b>DH-1</b>	<b>DH-2</b>	<b>DH-3</b>	<b>DH-4</b>	<b>DH-5</b>
	0,418-0,479	0,289-0,348	0,312-0,378	0,246-0,296	0,268-0,316

Grafikte yer alan sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde, her numunenin farklı yüzey özelliklerine ve aşınma davranışına sahip olduğu görülmektedir. DH-1 numunesi, 0,418-0,479 aralığında en yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Bu durum, malzemenin yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek veya malzemenin sürtünme temasına karşı daha az dirençli olduğunu göstermektedir. Yüksek sürtünme katsayısı, bu numunenin aşındırıcı ortamlarda daha fazla mekanik deformasyona uğrayabileceğini işaret eder. DH-4 ve DH-5 numuneleri, sırasıyla 0,246-0,296 ve 0,268-0,316 aralıklarında düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Bu numuneler, daha düzgün yüzeylere veya sürtünme sırasında daha dayanıklı bir malzeme yapısına sahip olabilir. Düşük sürtünme katsayısı, malzemenin yüzey temasını daha kontrollü bir şekilde sağladığını ve aşınma direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu numuneler, sürtünme ve aşınma performansı açısından öne çıkmaktadır. DH-2 ve DH-3 numuneleri, orta seviyede sürtünme katsayısına sahiptir (0,289-0,348 ve 0,312-0,378). Bu numuneler, yüzey özellikleri ve malzeme yapısı açısından dengeli bir performans sunmaktadır. Özellikle çok yönlü kullanım alanlarında, hem düşük hem de yüksek

sürtünme katsayısına sahip malzemelere kıyasla daha esnek bir seçenek olabilir.

Kayma mesafesi boyunca (600 m, 1200 m, 1800 m) sürtünme katsayısı değerlerinde büyük değişiklikler olmaması, numunelerin sürtünme koşullarına karşı stabil bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu durum, malzemelerin yüzey özelliklerinin sürtünme temasında değişim göstermediğini ve mekanik dayanımını koruduğunu işaret eder.

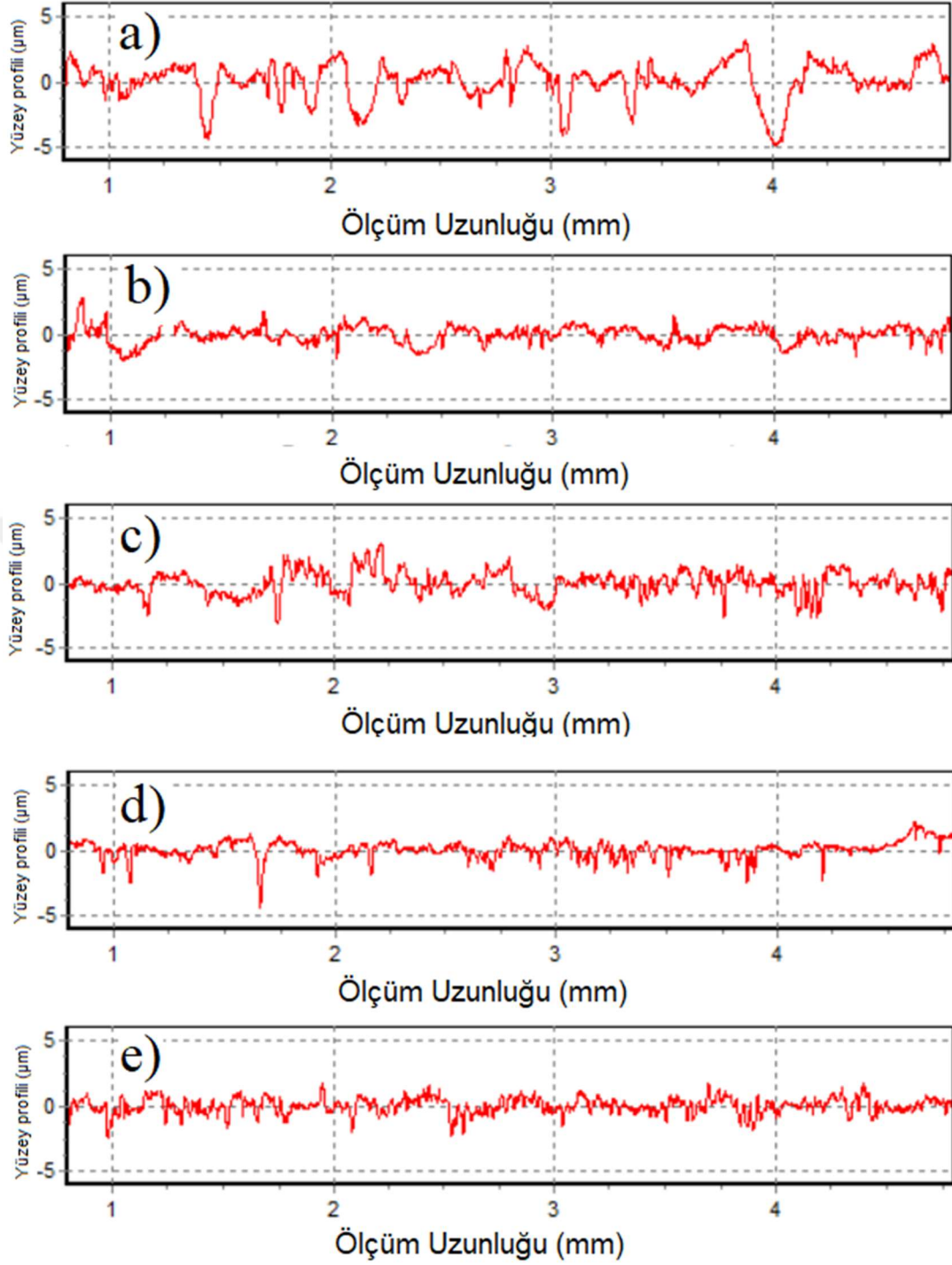
Sonuç olarak, düşük sürtünme katsayısına sahip DH-4 ve DH-5 numuneleri, daha yüksek aşınma direnci sunmakta ve sürtünme sırasında daha kontrollü bir davranış sergilemektedir. Orta seviyede performans gösteren DH-2 ve DH-3 numuneleri, çok yönlü uygulamalar için uygunken, DH-1 gibi yüksek sürtünme katsayısına sahip malzemeler, daha agresif sürtünme koşulları için değerlendirilebilir. Bu sonuçlar, malzemelerin yüzey özellikleri ve aşınma davranışları arasındaki ilişkinin önemini vurgulamaktadır (Çetin ve Gül, 2007)(Jang ve diğ., 2004).

#### 5.4 Yüzey Pürüzlüğü Sonuçları

Aşınma testi sonucu en yüksek yük olan 60 N ve en uzun kayma mesafesi olan 1800 m testleri sonucunda aşınma izlerinden yüzey pürüzlülüğü grafikleri çıkartılmıştır. Grafikler Şekil 5.13’de verilmiştir. Ölçüm uzunluğu boyunca hesaplanan yüzey profili ortalama değerleri Tablo 5.5’de verilmiştir.

**Tablo** Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı...3: 60 N – 1800 m aşınma test sonucu yüzey pürüzlülüğü değerleri

<b>60 N - 1800 m Aşınma Test Sonucu Yüzey Pürüzlülüğü Değerleri</b>					
	<b>DH-1</b>	<b>DH-2</b>	<b>DH-3</b>	<b>DH-4</b>	<b>DH-5</b>
<b>Ra (µm)</b>	1,064	0,521	0,592	0,469	0,482



Şekil 5.13: Yüzey pürüzlülük sonuçları a)DH-1 b)DH-2 c)DH-3 d)DH-4 e)DH-5

Grafikte yer alan sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde, her numunenin farklı yüzey özelliklerine ve aşınma davranışına sahip olduğu görülmektedir. DH-1 numunesi, 0,418-0,479 aralığında en yüksek sürtünme katsayısına sahiptir. Bu durum, malzemenin yüzey pürüzlülüğünün daha yüksek veya malzemenin sürtünme temasına karşı daha az dirençli olduğunu göstermektedir. Yüksek sürtünme katsayısı, bu

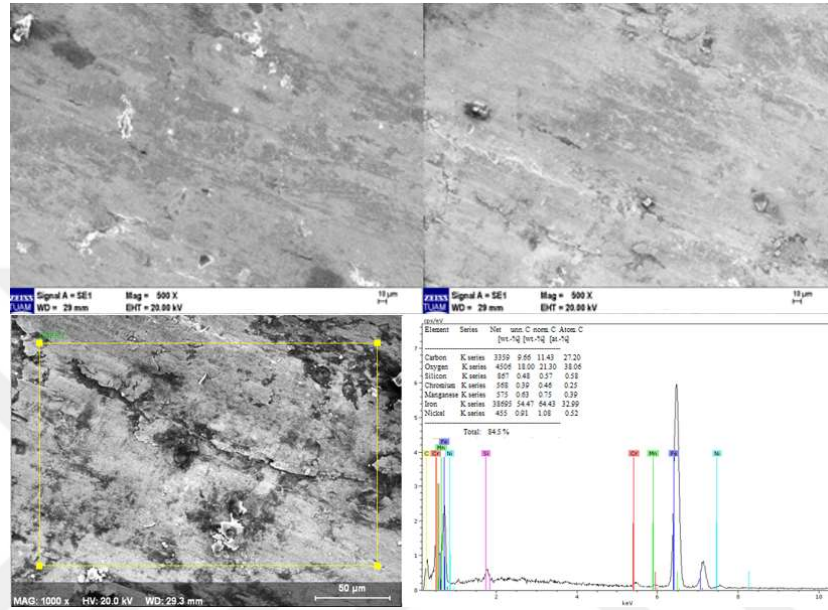
numunenin aşındırıcı ortamlarda daha fazla mekanik deformasyona uğrayabileceğini işaret eder.

DH-4 ve DH-5 numuneleri, sırasıyla 0,246-0,296 ve 0,268-0,316 aralıklarında düşük sürtünme katsayısına sahiptir. Bu numuneler, daha düzgün yüzeylere veya sürtünme sırasında daha dayanıklı bir malzeme yapısına sahip olabilir. Düşük sürtünme katsayısı, malzemenin yüzey temasını daha kontrollü bir şekilde sağladığını ve aşınma direncinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu numuneler, sürtünme ve aşınma performansı açısından öne çıkmaktadır. DH-2 ve DH-3 numuneleri, orta seviyede sürtünme katsayısına sahiptir (0,289-0,348 ve 0,312-0,378). Bu numuneler, yüzey özellikleri ve malzeme yapısı açısından dengeli bir performans sunmaktadır. Özellikle çok yönlü kullanım alanlarında, hem düşük hem de yüksek sürtünme katsayısına sahip malzemelere kıyasla daha esnek bir seçenek olabilir. Kayma mesafesi boyunca (600 m, 1200 m, 1800 m) sürtünme katsayısı değerlerinde büyük değişiklikler olmaması, numunelerin sürtünme koşullarına karşı stabil bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu durum, malzemelerin yüzey özelliklerinin sürtünme temasında değişim göstermediğini ve mekanik dayanımını koruduğunu işaret eder. Sonuç olarak, düşük sürtünme katsayısına sahip DH-4 ve DH-5 numuneleri, daha yüksek aşınma direnci sunmakta ve sürtünme sırasında daha kontrollü bir davranış sergilemektedir. Orta seviyede performans gösteren DH-2 ve DH-3 numuneleri, çok yönlü uygulamalar için uygunken, DH-1 gibi yüksek sürtünme katsayısına sahip malzemeler, daha agresif sürtünme koşulları için değerlendirilebilir. Bu sonuçlar, malzemelerin yüzey özellikleri ve aşınma davranışları arasındaki ilişkinin önemini vurgulamaktadır. Haddelme işlemi sırasında merdanenin yüzey pürüzlülüğünün artması haddelme yüklerinin artışına yol açar. Ne kadar haddelme hızlarıyla telafi edilmeye çalışılsa da ısıtma ve soğutma parametrelerin değişkenliğinden dolayı merdane ve mamul üzerindeki oksitlerin süreksizliklerinden merdane aşınarak kırılmalara, aşınmadan dolayı her kampanada performans düşüklüğüne sebebiyet vermektedir(Dick ve Lenard, 2005).

## 5.5 SEM ve EDS Analiz Sonuçları

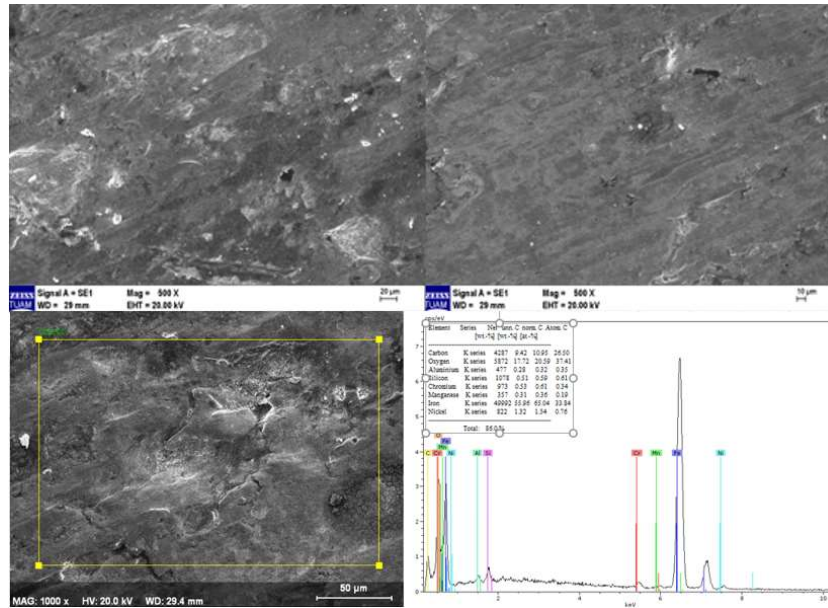
Aşınma testi sonucunda numunelerin çizik yüzeylerinden, aşınmanın yüzey morfolojisini anlamak için SEM ve EDS analizleri yapılmıştır.

Şekil 5.14’de DH-1 Numunesinin SEM ve EDS analizleri verilmiştir.



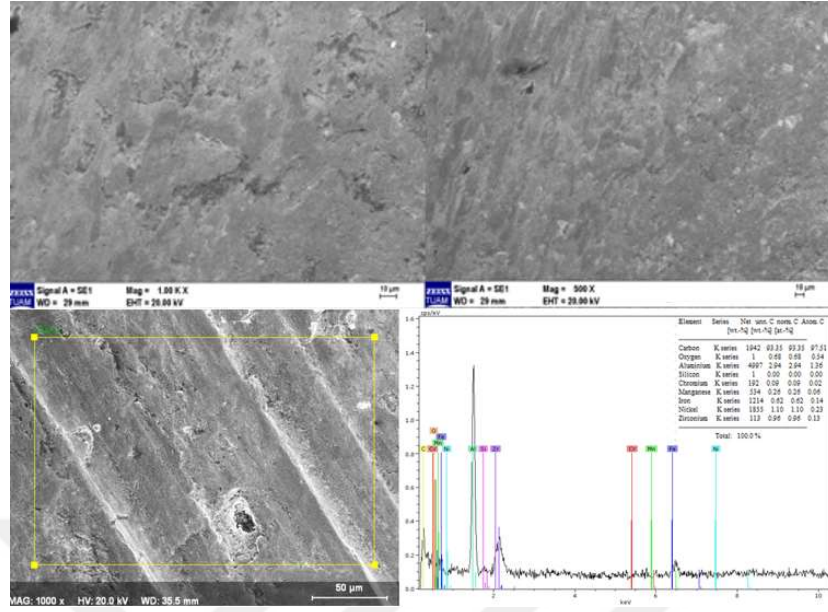
Şekil 5.14: DH-1 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları

Şekil 5.15’de DH-2 Numunesinin SEM ve EDS analizleri verilmiştir.



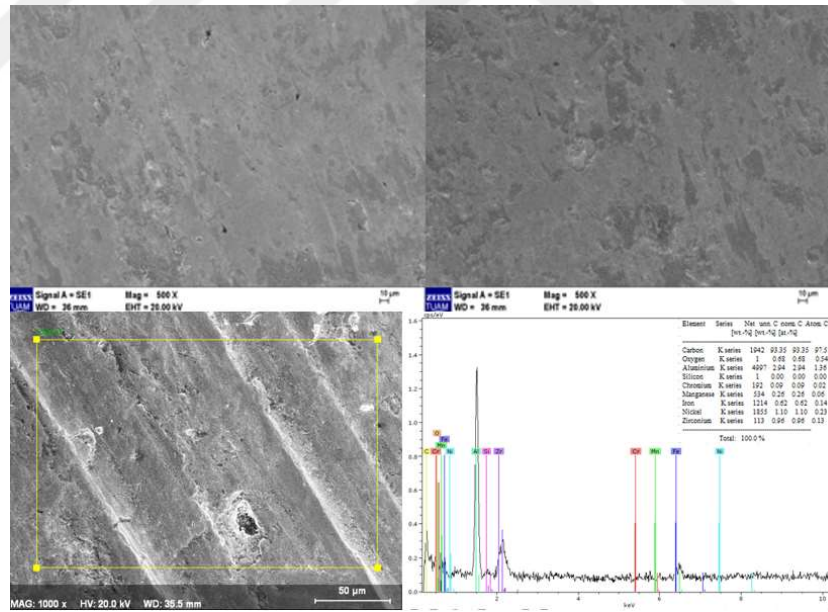
Şekil 5.15: DH-2 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları

Şekil 5.16’da DH-3 Numunesinin SEM ve EDS analizleri verilmiştir.



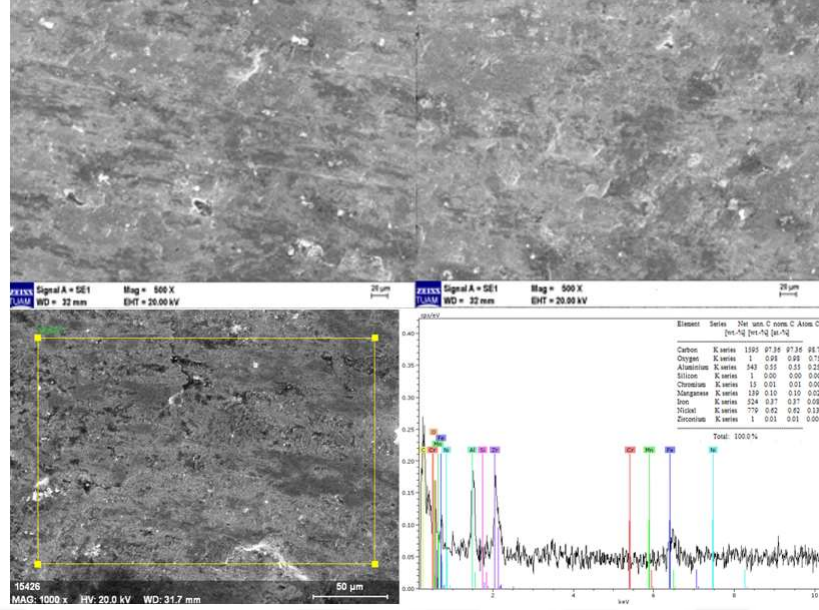
Şekil 5.16: DH-3 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları

Şekil 5.17’de DH-4 Numunesinin SEM ve EDS analizleri verilmiştir.



Şekil 5.17: DH-4 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları

Şekil 5.18’de DH-5 Numunesinin SEM ve EDS analizleri verilmiştir.

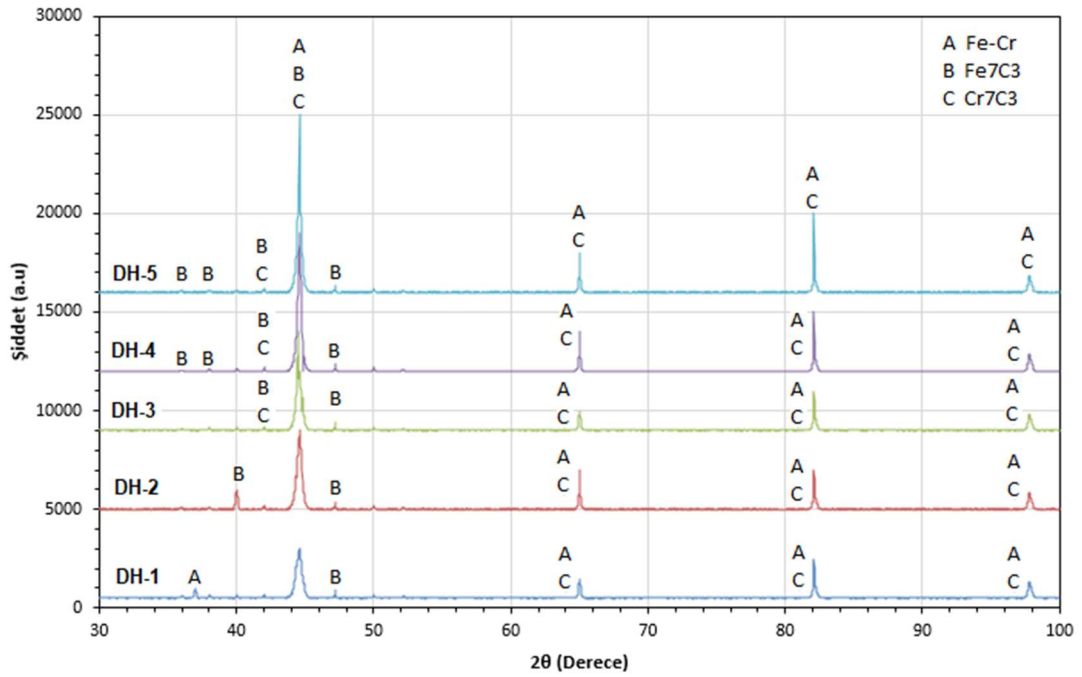


Şekil 5.18: DH-5 Numunesinin SEM ve EDS analiz sonuçları

Aşınma testine tabi tutulan DH-1, DH-2, DH-3, DH-4 ve DH-5 numunelerinin SEM analizleri, sertlik değerlerinin aşınma davranışları üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymuştur. En düşük sertliğe sahip DH-1 numunesinde, geniş ve derin aşınma çizgileri ile yoğun plastik deformasyon izleri gözlemlenmiş; bu, malzemenin aşındırıcı kuvvetlere karşı zayıf direncini ve plastisiteye yatkınlığını göstermektedir. Sertlik sıralamasında bir adım yukarıda yer alan DH-3, DH-1'e kıyasla daha sık çizgiler sergilemiş, ancak plastik deformasyon hâlâ belirgin olmuştur; bu durum, aşınma direncinde sınırlı bir iyileşme olduğunu düşündürmektedir. DH-2 ise DH-3'ten daha yüksek sertliğiyle, aşınma izlerinin derinliğini bir miktar azaltmış, fakat mikro çatlaklar yerine plastik deformasyonun hâlâ baskın olduğu bir yüzey yapısı sunmuştur; bence bu, malzemenin orta sertlik seviyesinde bir geçiş aşamasında olduğunu göstermektedir. Sertlik skalasında üst sıralarda yer alan DH-5, sık aşınma çizgileri ve azalmış plastik deformasyon ile dikkat çekerken, yüzeyde mikro çatlakların ortaya çıkmaya başlaması, kırılma davranışının ilk işaretlerini vermiştir; bu, sertlik arttıkça malzemenin aşınmaya karşı direncinin güçlendiğini, ancak kırılma eğilimine kaydığını düşündürmektedir. En yüksek sertliğe sahip DH-4 ise minimal aşınma izleri ve neredeyse tamamen ortadan kalkmış plastik deformasyon ile testin en dayanıklı numunesi olmuş; ancak yüzeydeki belirgin mikro çatlaklar, sertliğin bu seviyelere ulaşmasıyla malzemenin kırılma bir karaktere büründüğünü kanıtlamaktadır. Genel

olarak, sertlikteki artışın aşınma çizgilerini sığlaştırdığı ve plastik deformasyondan mikro çatlaklara doğru bir davranış değişimi sağladığı söylenebilir; buna göre bu, malzeme tasarımında sertlik ve tokluk arasında bir denge kurulmasının önemini vurgulamaktadır.

## 5.6 XRD Analiz Sonuçları



Şekil 5.19: XRD Analiz sonuçları

XRD analizleri sonucunda tüm numunelerde 42°-46°, 63°-67°, 80°-84° ve 97°-98° açılarında en belirgin tepe noktaları görülmektedir. Fe-Cr bileşimi olan bu yapı (JCPDS kartı 00-034-0396) küresel grafitli dökme demirlerde Demir ve Kromun belirli oranlarda çözünmesi sonucu HMK yapıda bulunan bir fazdır. Ferritik Fe-Cr matrisi yüksek sıcaklıkta ve mekanik aşınmanın yoğun olduğu uygulamalarda üstün performans gösterir. Krom Fe-Cr fazında eklenerek oksidasyon ve korozyon direncini artırır.(Holtzer ve diğ. 2015). Bu sayede hadde merdanesi gibi yüksek sıcaklıkta aşınmaya maruz kalan malzemelerde uzun ömür ve güvenilir performans sağlar.

Yapıda bulunan diğer bir faz Fe7C3 fazı (JCPDS kartı 01-089-7273) dökme demirlerde tanımlanan demir karbür bileşiğidir. Sementit tipi karbürlerle ilişkilidir. Yapıda bulunan sementit, sertlik ve aşınma direncini yükseltir. Dökme demirlerde

darbe tokluğunu azaltarak kırılma hızına yol açabilir. Küresel grafitli dökme demirlerde, kontrollü miktarda  $Fe_7C_3$ , matrisin rafine edilmesine yardımcı olur. Dağılımı ve morfolojisi, mukavemet ve sünekliğin dengelenmesinde kritik öneme sahiptir (Stefanescu, 2017). Hadde merdanelerinde Fe-Cr ve  $Fe_7Cr_3$  bileşikleri yapıda ferritik-perlitik yapı oluşturur.

Yapıda bulunan diğer bileşik ise  $Cr_7C_3$  (Krom Karbür JCPDS kartı 00-006-0687). Krom karbür yapıda genellikle sertlik ve aşınma direncini arttırmak için istenir. Yüksek krom sayesinde korozyon direncini artırır. Özellikle aşınma ve oksidasyona karşı yüksek direnç istenen ortamlarda kullanılır. Aşırı krom karbür tokluğun azalanmasına yol açarak kırılma hızına yol açabilir (Marquez ve diğ. 2018).



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma, hesaplamalı malzeme mühendisliği kapsamında CALPHAD metodolojisi kullanılarak hadde merdanelerinin kimyasal bileşim optimizasyonuna yönelik deneysel ve teorik araştırmalar ve sertlik, aşınma ve optik görüntü incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Araştırma sonuçları aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- CALPHAD tabanlı simülasyonlar, malzeme bileşenlerinin mikroyapı üzerindeki etkilerini öngörmede etkili bir yöntem olarak kullanılmıştır.

- Karbon, krom, molibden gibi alaşım elementlerinin miktarları optimize edilerek, karbürlerin miktar ve dağılımları kontrol edilmiştir. Özellikle, MC ve M7C3 gibi yüksek sertlikteki karbürlerin homojen dağılımı sağlanmıştır.

- Optimizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen kimyasal bileşimler sayesinde, mikroyapıda karbür fazlarının homojen dağılımı gözlenmiştir.

- Mikroyapı analizleri, aşınma ve termal yorulmaya karşı direnç sağlayan yüksek sertlikte karbürlerin üretildiğini göstermiştir.

- Yapılan aşınma testleri, optimize edilen kimyasal bileşimlerin, hadde merdanelerinin yüzey performansını ve aşınma direncini artırdığını ortaya koymuştur.

- Mekanik testler, optimize edilmiş bileşimlerin daha yüksek sertlik ve dayanım sağladığını göstermiştir. Özellikle, sertlik değerlerinde %10'un üzerinde artış sağlanmıştır.

- Kimyasal bileşim optimizasyonu ile üretim sırasında daha düşük alaşım maliyetleri sağlanmış, zamandan ve maliyetten önemli ölçüde tasarruf edilmiştir.

- Deneme-yanılma yöntemleri yerine simülasyon tabanlı tasarımlar, deneysel süreçlerin verimliliğini artırmıştır.

- Çalışmada tasarlanan kimyasal bileşimler, haddehanelerin talep ettiği yüksek sertlik, aşınma direnci ve uzun ömür gibi özellikleri başarıyla karşılamıştır.

- Üretilen hadde merdaneleri, hem kullanım ömrü açısından hem de mekanik dayanım açısından literatürdeki mevcut yöntemlere kıyasla daha üstün performans sergilemiştir.

- Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, diğer alıştırım sistemlerine uyarlanabilir. Özellikle, farklı sıcaklık koşullarında çalışan hadde merdaneleri için bu yöntemin uygulanabilirliği araştırılabilir.

- İleri düzey malzeme tasarımları için, yapay zeka destekli modelleme teknikleri ve hesaplamalı simülasyon araçları kullanılabilir.



## 7. KAYNAKLAR

Aigner, M., Pellizzari, M., Domitner, J., Elizondo, L., Fischbacher, M., Laubichler, I., Paar, A., Reiter, M., Trickl, T., Sommitsch, C., “Influence of microstructure on degradation of cast graphitic high-speed steel”, *Wear*, 522, 204702), (2023)

Aktaş Çelik, G., Atapek, Ş. H., Polat, Ş., Haidemenopoulos, G. N., “CALPHAD-Based Modeling and Experimental Validation of Silicon Effect on the Solidification Behavior of Novel SiNb Cast Irons” *Metallurgical and Materials Transactions A*, 55(7), 2445-2458, (2024).

Akyıldız Y., Akman A., Horasan B., Ymanoğlu R., Aydın H. “Investigating The Effect Of Quenching Media And Agitation Conditions On The Microstructure, Hardness, And Stress Distribution Of Aisi 4140 Steel By Using Fem”, 16. Mas International European Conference On Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences, Mardin, Turkey, 156-163, (2022).

Akyıldız, Ö., Candemir, D., & Yıldırım, H., “Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerde Faz Dengesinin Benzetimi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23(3), 179-190, (2018)

Andersson, M., Finnström, R., & Nylén, T., “Introduction of enhanced indefinite chill and high speed steel rolls in European hot strip mills”, *Ironmaking and Steelmaking*, 31(5), 383-388, (2004).

Bai, Y., Luan, Y., Song, N., Kang, X., Li, D., Li, Y., “Chemical Compositions, Microstructure and Mechanical Properties of Roll Core used Ductile Iron in Centrifugal Casting Composite Rolls”, *Journal of Materials Science & Technology*, 28(9), 853-858, (2012).

Başkaya, A., “Soğuk Haddelme İşleminin Proses Amaçlı Eniyilenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2020).

Campbell, F. C., “Elements of Metallurgy and Engineering Alloys”, *ASM International*, (2008).

Çakir, F. H., “The Effect of Cryogenic Treatment on Hardness, Toughness, and Tribological Properties of Austempered Ductile Iron with Different Nickel Contents”, *International Journal of Metalcasting*, 16(3), 1442-1454. (2021).

Çetin, M., Gül, F., "Kuru kayma şartlarında matris yapısının küresel grafitli dökme demirin sürtünme katsayısına ve pim sıcaklığına etkisi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3), 273-280, (2007).

Dick, K., & Lenard, J. G., “The effect of roll roughness and lubricant viscosity on the loads on the mill during cold rolling of steel strips”, *Journal of Materials Processing Technology*, 168 (1), 16–24. (2005).

Ghosh, S., Sinha, P., Indimath, S., Mukhopadhyay, G., Bhattacharya, S. Ribbon, "Fatigue Spalling of a Forged Work Roll Used at a Cold Rolling Mill", *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 14(6),707-714, (2014).

Gupta, N. K., Steel Rolling, London, England: CRC Press. (2021).

Harding, R.A., Saunders, N.J., "Theory and Practice of Computer Modelling of Phase Diagrams for Cast Irons", *American Foundrymen's Society*, 105, 451-457, (1997).

Henning W.A., Mercer J., Ductile Iron Handbook, Illinois, *AFS*, (1993).

Holtzer, M., Gorny, M., Danko, R., "Microstructure and properties of ductile iron and compacted graphite iron castings", (2015).

Ilea, I., Kiss, I., Alexa, V., & Ratiu, S. A., "Optimisation of the thermal treatment technologies for the cast hypereutectoid steel rolls", *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 14(3), 201, (2016).

Iwadoh, S., & Mori, T., "Effect of Work Roll Materials and Progress of Manufacturing Technology on Cold Rolling and Future Developments in Japan", *ISIJ International*, 32(11), 1131-1140, (1992).

Jai Bharat Casting., "Definite Chill Iron Rolls (Clear Chill Iron Rolls)", (18.11.2024), <https://chilledrolls.com/definate.html>, (2024).

Jang, H., Ko, K. H., Kim, S. J., Basch, R. H., & Fash, J. W., "The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials". *Wear*, 256(3-4), 406-414. (2004).

Jiang, Z., Zhao, J., Xie, H., "Practice of Micro Ultrathin Strip Rolling" *Microforming Technology*, 347-368, (2017).

Jin, H., Wu, S., & Peng, Y., "Prediction of contact fatigue life of alloy cast steel rolls using back-propagation neural network", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22(12), 3631-3638, (2013).

K. Yoshitomi, Y. Nakama, H. Ohtani, M. Hasebe, "Thermodynamic Analysis of the Fe-Nb-B Ternary System," *ISIJ Int.* 48, 835-844 (2008).

Kamimiyada, K., Ishikawa, S., Miyahara, H., Konno, Y., "Effect of MC Type Carbides on Wear Resistance of High Wear Resistant Cast Iron Rolls Developed for Work Rolls of Hot Strip Mills", *ISIJ International*, 61(10),2597-2604, (2021).

Kamimiyada, K., Konno, Y., Yanagitsuru, A., "Effect of Heating Conditions before Quenching on Residual Stress in High-Speed Steel Type Cast Iron Rolls by Centrifugal Cast", *Materials Transactions*, 61(10), 1987-1993, (2020).

Kılıçlı, V., “Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kısmi Östenitleme ve Östemperleme Isıl İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2004).

Kiss, I., “Cast iron rolls”, *Tehnički glasnik*, 13(2), 92-99, (2019).

Kiss, I., “Research upon the quality assurance of the rolling-mill rolls and the variation boundaries of the chemical composition”, *Revista de Metalurgia*, 44(4), (2008).

Kiss, I., Cioata, V. G., Alexa, V., “Increasing the rolling-mill rolls quality in some multidisciplinary research”, *Acta Technica Corviniensis – Bulletin of Engineering*, III(2), (2010).

Klančnik, U., Habjan, J., Klančnik, G., Medved, J., “Thermal analysis of indefinite chill cast iron modified with ferrovanadium and ferrotungsten”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 127(1), 71-78, (2016).

Kobayashi, K., “Technical View on Forged Steel Rolls in Japan”, *Tetsu-to-Hagane*, 57(5),725-737, (1971).

Kubo, O., Koie, T., Fujiie, S., Ido, T., Kishitake, K., Matsubara,, “Y. Effects of Boron and Aluminum on Graphite Structure in Ni-hard Cast Iron for Rolling Mill Roll”, *Journal of Japan Foundry Engineering Society*, 3(77), 179-184, (2005).

Kubota, Santrifüj Döküm [online], (01.12.2024), Web adresi: [https://www.kubota.com/products/materials/technology/centrifugal\\_casting/](https://www.kubota.com/products/materials/technology/centrifugal_casting/), (2024).

Küçükakarsu, F. Y., “Laboratuvar Ölçekli Haddelene Ünitelerinde Haddelenen Alaşımli Çeliklerin Mikroyapı ve Mekanik Özellik İlişkisinin Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük, (2022).

Laino, S., Sikora, J. A., & Dommarco, R. C., “Development of wear resistant carbidic austempered ductile iron (CADI)”, *Wear*, 265(1-2), 1-7, (2008).

Lenard, J. G., *Primer on Flat Rolling*, (2014).

LMM Rolls., What is Definite Chilled Rolls [online], 10.09.2024, <https://lmmrolls.com/what-is-definite-chilled-rolls>, (2024),

Lucas, G., “Surface Damage to Forged-Steel Rolls and Its Prevention”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Conference Proceedings*, 179(4), 271-286, (1964).

Lukas, H. L., Fries, S. G., Sundman, B., *Computational Thermodynamics The Calphad Method*, Newyork, *Cambridge University Press*, (2007).

Luo, A. A., Sachdev, A. K., Apelian, D., “Alloy development and process innovations for light metals casting”. *Journal of Materials Processing Technology*, 306(117606), (2022).

M. G. Poletti, L. Battezzati, Assessment of the ternary Fe–Si–B phase diagram, *Calphad*, 43, 40–47 (2013)

Marquez, A. M., Li, Z., Braithwaite, C. H., Weihs, T. P., Krywopusk, N. M., Gibbins, D. J., & Meyers, M. A. “Fragmentation and mechanical performance of tailored nickel-aluminum laminate compacts.” *Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, (2018).

NIAMT, Ders Notları [online], (01.12.2024), Web adresi: <https://niamt.ac.in/WriteReadData/Topic%209.pdf>, (2024).

Opapaiboon, J., Sricharoenchai, P., Inthidech, S., Matsubara, Y., “Effect of Carbon Content on Heat Treatment Behavior of Multi-Alloyed White Cast Iron for Abrasive Wear Resistance”, *Materials Transactions*, 56( 5). 720-725). (2015).

Ortakaya, R., “Direksiyon Dişli Kutusu Gövdelerinde Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demirlere Zirkonyum Diborur (ZrB<sub>2</sub>) İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksel Lisans Tezi, *Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Batman, (2023).

Ovalı, İ. “Abrasive wear behavior of various reinforced AA6061 matrix composites produced with hot pressing process: A comparative study” *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 48(6), 589–599, (2017).

Ovalı, İ. ve Kızılkaya, E., “AISI 4140 çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisi”, *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6 (1) , 137-148, (2018).

Ovalı, İ., “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüzeyinde Çil Oluşumu ve Östemperleme Isıl İşleminin Mikroyapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2012).

Paar, A., Elizondo, L., Brandner, M., Trickl, T., Sonderegger, B., Beal, C., Sommitsch, C., “Application of Thermo-Calc TCFE7 to High-Alloyed Mottled Cast Iron”, *Materials Science Forum*, 879,1431-1436, (2016).

PT-Sumitech, Dövme Merdane Kataloğu [online], (2024), Web adresi: <https://pt-sumitech.com/wp-content/uploads/2018/08/work-rolls.pdf>, (2024).

Qu, H., Liao, B., Liu, L., Li, D., Guo, J., Ren, X., Yang, Q. “Precipitation rule of carbides in a new high speed steel for rollers”, *Calphad*, 36, 144–150, (2011).

Ray, S., Principles and Applications of Metal Rolling, *Cambridge University Press*, (2016).

Roberts, W. L., Cold Rolling of Steel, *Routledge*, (2017).

Roberts, W. L., Manufacturing Engineer And Materials Processing 2; Cold rolling of steel. Boca Raton, FL: *CRC Press*, (1978).

Saha, J. K., Kundu, S., Chandra, S., Sinha, S. K., Singhal, U., Das, A. K., “Mathematical Modelling of Roll Cooling and Roll Surface Stress”, *ISIJ International*, 45(11)1641-1650, (2005).

Sano, Y., Hattori, T., & Haga, M., “Characteristics of High-carbon High Speed Steel Rolls for Hot Strip Mill” *ISIJ International*, 32(11). 1194-1201). (1992).

Schweitzer, “Operation of Rolling Mills”, 18.11.2024, <http://www.schweitzereng.com/Course/Chapter14.pdf>, (2024).

Shimizu, M., Shitamura, O., Matsuo, S., Kamata, T., Kondo, Y., “Development of High Performance New Composite Roll”, *ISIJ International*, 32(11), 1244-1249, (1992).

Singhal, U., “Roll Qualities and Economic Utilisation of Rolls”, *Tailoring of Properties through Mechanical Processing*, 23-24, (1994).

Stefanescu, D. M., ASM handbook, volume 1A. Materials Park, ASM International. (2017).

Tan, E., “Dökme Demirden İmal Edilen Hadde Merdanelerinin Aşınma Davranışına Bakır Katkı Oranının Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2005).

Union Electric Akers, “Graphitic Steel Base”, Erişim: 18.11.2024 [http://www.uniones.com/globalassets/union-electric-akers/products/product-data-sheets/copyright-2020/steel-grades---cast-rolls/graphitic-steel-base\\_001.pdf](http://www.uniones.com/globalassets/union-electric-akers/products/product-data-sheets/copyright-2020/steel-grades---cast-rolls/graphitic-steel-base_001.pdf), (2024).

Villanueva Bravo, S., Yamamoto, K., Miyahara, H., & Ogi, K., “Control of Carbides and Graphite in Cast Irons Type Alloy’s Microstructures for Hot Strip Mills”, *Journal of Metallurgy*, 2012, 1-6, (2012).

Voigt, R. C., “Austempered Ductile Iron—Processing and Properties”, *Cast Metals*, 2(2), 71-93, (1989).

Wusatowski, Z., *Fundamentals of Rolling*, Pergamon Press. (1969).

Xu, Z., Song, N., Tol, R. V., Luan, Y., & Li, D. “Modelling of horizontal centrifugal casting of work roll”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 33(012030), (2012).

Yalçın, M. A., “Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde alaşımlama ve Isıl İşlem Parametrelerinin Optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Atılım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2019).

Yalçın, C., “Hesaplamalı tasarım yaklaşımı kullanılarak tasarlanmış üstün mekanik özelliklere sahip östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirler”, Yüksek Lisans Tezi, *Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2023).

Yamamoto, A., Ishii, Y., Kang, H.-G., Sakata, F., Sonoda, A., & Hashimoto, M., “Reproduction of Hot Rolling Mill Roll with High-Speed Tool Steel Type Shell Material Manufactured by Continuous Pouring Process for Cladding”, *Materials Transactions*, 60(5), 770-776, (2019).

Yazdani S, Elliott R., “Influence of molybdenum on austempering behaviour of ductile iron Part 4 – Austempering behaviour of ductile iron containing 0.45%Mo”, *Materials Science and Technology*, 15(8), 896-902. (1999).

Ye, T., Lu, Z., & Ma, C., “Research of Rolling Process with Warm for Cold-Rolled Non-Oriented Electrical Steel”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170(042085), (2018).

