KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BOR KATKILI YÜKSEK ALAŞIMLI (Nİ-HARD 4) BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE TUNGSTEN İLAVESİNİN MİKROYAPI, AŞINMA VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ

GÜLBEN KARAYEL

KOCAELİ 2019

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BOR KATKILI YÜKSEK ALAŞIMLI (Nİ-HARD 4) BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE TUNGSTEN İLAVESİNİN MİKROYAPI, AŞINMA VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ

GÜLBEN KARAYEL

Doç. Dr. Ersoy Erişir
Danışman, Kocaeli Üniversitesi .....

Doç. Dr. Enbiya Türedi
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi .....

Dr. Öğr. Üyesi Ekrem Altuncu
Jüri Üyesi, Sakarya Üniversitesi .....

Tezin Savunulduğu Tarih: 12.07.2019

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Aşınma, önemli oranda malzeme kaybına neden olan ve yüksek maliyetlerle sonuçlanan bir malzeme sorunudur. Bu sorun özellikle madencilik, maden işletme endüstrisi, çimento ve beton sanayisinde önemli bir hal almaktadır. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler, yüksek aşınma dayanımı ve sertliklerinden dolayı bu sektörlerde yaygın kullanım alanı bulmaktadır. Beyaz dökme demir malzemelerde, mekanik özelliklerin geliştirilmesi ve aşınma dayanımı gibi çalışmalar genellikle alaşım elementi ilavesi ve ısıl işlem ile gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada da literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak alaşım elementi kombinasyonu ile denemeler yapılmıştır. Alaşım elementleri ile yapılan denemelere mekanik testler gerçekleştirilmiş ve mikroyapı karakterizasyonları yapılmıştır. Yapılan bu çalışma ve sonuçların bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Yüksek lisans tez çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ancak son zamanlarımızda aramızdan ayrılan danışmanım sayın Prof. Dr. Mustafa ÇÖL'e sonsuz rahmet dilerim.

Çalışmalarımın planlanması, yönetimi, yönlendirilmesi ile ilgili konularda yardımlarını esirgemeyen ve bir hocadan daha fazlası olan sayın Yük. Müh. Funda Gül KOÇ'a, tezim ile ilgili gerekli termodinamik hesaplamaların yapılması ve yorumlanmasında yardımcı olan ayrıca tez çalışmamın son zamanlarında danışmanlığımı üstlenen sayın hocam Doç. Dr. Ersoy ERİŞİR'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımda her türlü laboratuvar imkanları ve manevi desteğinden dolayı ONAT Alüminyum San. A.Ş. ve sayın Dr. Tanju ÇELİKER'e teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında her konuda destek olan ve yardım eden arkadaşlarım, Ayşe KAVRUK, Burak BARUTÇUOĞLU ve Onur MURATAL'a teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi manevi her konuda desteği esirgemeyen annem ve babama sonsuz teşekkür ederim.

Tez dönemimde sabırla yanımda olan ve desteğini esirgemeyen Emre KARAASLAN'a teşekkür ederim.

Bu çalışma, Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından 2018/74 nolu proje ile desteklenmiştir. Çalışmaya olan katkılarından dolayı Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Haziran-2019 Gülben KARAYEL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR i
İÇİNDEKİLER ii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
TABLOLAR DİZİNİ vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ viii
ÖZET ix
ABSTRACT x
GİRİŞ 1
1. DÖKME DEMİRLER 2
1.1. Demir-Karbon Sistemi 4
1.2. Karbon Eşdeğeri 7
1.3. Solidus (Ergime) Noktası 8
1.4. Likidus Noktası 8
1.5. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması 8
1.5.1. Beyaz dökme demir 10
1.5.2. Gri dökme demir 10
1.5.3. Küresel grafitli dökme demir 11
1.5.4. Temper dökme demir 12
1.6. Dökme Demirlerde Alaşım Elementleri 13
1.6.1. Karbon 13
1.6.2. Silisyum 14
1.6.3. Krom 15
1.6.4. Nikel 16
1.6.5. Molibden 17
1.6.6. Mangan 18
1.6.7. Kükürt 18
1.6.8. Fosfor 18
2. YÜKSEK ALAŞIMLI DÖKME DEMİRLER 19
2.1. Perlitik Beyaz Dökme Demirlerler 20
2.2. Martenzitik Beyaz Dökme Demirler 21
2.2.1. Ni-Hard dökme demirler 22
2.2.2. Ni-Hard 4 dökme demirler 23
2.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirler 24
2.4. Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirlerde Mikroyapı 24
2.4.1. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde matris yapısı 25
2.4.2. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde karbürler 26
2.5. Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirlerde Kullanılan Alaşım Elementleri 27
2.5.1. Bor 27
2.5.2. Tungsten 29
2.6. Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi 30
2.6.1. Östenitleme ısıl işlemi 31
2.6.2. Su verme (Quenching) 32
2.6.3. Temperleme ısıl işlemi 32
2.6.4. Gerilim giderme ısıl işlemi 32
2.7. Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirlerin Kullanım Alanları 32

3. AŞINMA MEKANİZMASI 33
3.1. Aşınma Mekanizmaları 35
3.1.1. Adhezif aşınma 35
3.1.2. Abrazif aşınma 35
3.1.3. Yorulma aşınması 36
3.1.4. Korozif aşınma 36
3.2. Aşınma Ölçümü 36
3.3. Aşınma Hacmi ve Aşınma Oranının Hesaplanması 38
4. MALZEME VE YÖNTEM 39
4.1. Malzeme 39
4.2. Ergitme ve Döküm 40
4.3. Kimyasal Bileşim Analizi 41
4.4. Diferansiyel Termal Analiz (DTA) ve ThermoCalc Simülasyonu 41
4.5. Isıl İşlem Uygulamaları 42
4.6. Malzeme Karakterizasyonu 42
4.7. X-ışını Radyografisi (XRD) 43
4.8. Sertlik Ölçümü 43
4.9. Üç Nokta Eğme Testi 44
4.10. Aşınma Testi 45
5. BULGULAR VE TARTIŞMA 46
5.1. DTA Analizi 46
5.2. Mikroyapı Karakterizasyonu 47
5.3. Sertlik Ölçümü Sonuçları 55
5.4. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları 56
5.5. Aşınma Testi Sonuçları 59
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 63
KAYNAKLAR 66
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER 69
ÖZGEÇMİŞ 70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Fe-Fe_3C diyagramı 5
Şekil 1.2. %2 silisyum katkılı Fe-C-Si denge diyagramı..... 6
Şekil 1.3. Likidüs yüzeyinin projeksiyonu alında oluşan kompozisyon düzlemini gösteren bir kararlı Fe-C-Si diyagramı 6
Şekil 1.4. Çelik ve dökme demirler için karbon ve silisyum eşdeğerleri 7
Şekil 1.5. Dökme demir malzemelerin sınıflandırılması ve ..... mikroyapıları……..…9
Şekil 1.6. ASTM A247 standardına göre 100X büyütmede alınmış tipik gri dökme demir görüntüleri 11
Şekil 1.7. Küresel dökme demir mikroyapısı.-Dağlamalar %2'lik nital ile yapılmış, görüntüler 100X alınmıştır. (a) döküm konumunda ferritik, (b) döküm konumunda perlitik, (c) 700 ºC / 3 saat tavlanmış ferritik yapı, (d) Perlitik demirin yağda soğutulmuş- temperlenmiş.....11
Şekil 1.8. Mn/S oranının temper grafit şekli üzerine etkisi 12
Şekil 1.9. Karbür oluşturucu elementlerin çil derinliğine etkisi 13
Şekil 1.10. Düşük alaşımlı beyaz dökme demirde karbon oranının sertlik üzerine etkisi 14
Şekil 1.11. Farklı silisyum oranlarına sahip döküm durumundaki Ni-Hard 1 beyaz dökme demir malzemelerde karbon oranının sertlik üzerine etkisi 15
Şekil 1.12. Kütlece-% farklı oranlardaki molibdenin yüksek-kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğine olan etkisi.....17
Şekil 1.13. Kütlece-% farklı oranlarda molibdenin mekanik özellikler üzerine etkisi.....18
Şekil 2.1. Yüksek alaşımlı dökme demirlerin sınıflandırılması……19
Şekil 2.2. Karbon içeriğine ve mikroyapıya bağlı olarak çeşitli dökme demirler ve çelikler için aşınma direncinin karşılaştırılması 21
Şekil 2.3. Demir esaslı alaşımların sertlik ve aşınma direnci ile ilişkisinin karşılaştırılması 22
Şekil 2.4. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde matris yapıları. (a) Östenitik matris-500X, (b) Östenitik-martenzitik matris-500X, (c) Isıl işlem görmüş martenzitik matris-500X.....25
Şekil 2.5. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde karbür yapıları (a) Hipo-ötektik karbürler, (b) Ötektik karbürler, (c) Hiper-ötektik karbürler-75X.....26
Şekil 2.6. Yüksek kromlu dökme demirlerde karbon ve krom miktarının ötektik kompozisyona etkisi 26
Şekil 2.7. Demir-Bor Faz Diyagramı.....27
Şekil 2.8. Beyaz dökme demirde bor katkısının mikroyapıdaki değişimini gösteren ışık mikroskobu görüntüleri.....28
Şekil 2.9. W ve Mo bakımından zengin karbürlerin SEM de EDS mapping ile tanımlanması 29
Şekil 2.10. Yüksek kromlu demirlerde sertlik kazandırmak için uygulanan ısıl işlem sıcaklık-zaman grafiği.....30

Şekil 2.11. Yüksek kromlu demir malzemelerde östenitleme sıcaklığının sertliğe (H) ve kalıntı östenite (γ) etkisi 31
Şekil 3.1. Aşınma mekanizmaları ve birbiriyle olan ilişkileri …….. 33
Şekil 3.2. Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi.....34
Şekil 3.3. Abrazif aşınma türünün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri 36
Şekil 3.4. Tekrarlanan aşınma kaymasının plastik akışın büyümesi üzerine etkisi 36
Şekil 3.5. Pin-on-disk test düzeneği 37
Şekil 4.1. Ni-Hard 4 beyaz dökme demir alaşımlarının dökümünde kullanılan Inductotherm 35 KW indüksiyon fırını ……..39
Şekil 4.2. Ni-hard 4 beyaz dökme demir malzemelere ait kum kalıp modeli 40
Şekil 4.3. Ni-hard 4 beyaz dökme demir malzemelerin döküm geometrisi.....41
Şekil 4.4. Numunelere uygulanan ısıl işlem çevrimi grafiği.....42
Şekil 4.5. Karbür ölçümünde kullanılan yazılıma ait ekran görüntüsü.....43
Şekil 4.6. Sertlik ölçümü için kullanılan; (a) Future-Tech Vickers ölçüm cihazı, (b) Sertlik izi şematik görüntüsü 44
Şekil 4.7. Üç nokta eğme testine ait şematik görüntü 44
Şekil 4.8. Numunelere ait gevrek kırılma görüntüsü 45
Şekil 4.9. (a) Aşınma test düzeneği ve (b) test sırasında alınan görüntü 45
Şekil 5.1. Kütlece farklı oranlarda tungsten içeren beyaz dökme demir alaşımlarına ait DTA analiz sonuçları……..……46
Şekil 5.2. Kütlece-% tungsten oranı ve sıcaklığa bağlı beyaz dökme demir faz diyagramı.....47
Şekil 5.3. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında tungsten içeren döküm konumundaki numunelerin ışık mikroskobu görüntüleri 48
Şekil 5.4. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında tungsten içeren döküm konumundaki numunelerin SEM görüntüleri.....49
Şekil 5.5. Kütlece-%3,06 tungsten oranına sahip döküm konumundaki numunenin a) SEM görüntüsü ve b) EDS analizi.....50
Şekil 5.6. Kütlece farklı tungsten oranlarına sahip döküm konumundaki numunelerin karbür ölçümü sonuçları.....51
Şekil 5.7. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında tungsten içeren temperlenmiş konumdaki numunelerin ışık mikroskobu görüntüleri 52
Şekil 5.8. Kütlece-%3,71 tungsten içeren temperlenmiş konumdaki numuneye ait XRD analizi 52
Şekil 5.9. Kütlece-a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında tungsten içeren temperlenmiş konumdaki numunelerin SEM görüntüleri.....53
Şekil 5.10. Kütlece-%1,15 tungsten oranına sahip temperlenmiş konumundaki numunenin a) SEM görüntüsü ve b) EDS analizi 54
Şekil 5.11. Kütlece-%3,06 tungsten oranına sahip temperlenmiş konumdaki numunenin a) SEM görüntüsü ve b) EDS analizi 55
Şekil 5.12. Farklı tungsten oranlarına ait beyaz dökme demir malzemelerde döküm ve ısıl işlem sonrası sertlik değişimi 56
Şekil 5.13. Farklı tungsten oranlarına ait beyaz dökme demir malzemelerde döküm ve ısıl işlem sonrası eğme mukavemeti değişimi.....57
Şekil 5.14. Kütlece-a) %1,15, b) %2.,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında W içeren döküm konumundaki numunelerin kırılma yüzeyi

SEM görüntüleri.....58
Şekil 5.15. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında W içeren temper konumundaki numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri……...58
Şekil 5.16. Farklı tungsten oranlarına ait beyaz dökme demir malzemelerde döküm ve ısıl işlem sonrası aşınma oranı değişimi.....60
Şekil 5.17. Kütlece-a) % 1,15, b) % 2,21, c) % 3,06, d) % 3,71 oranlarında W içeren döküm konumundaki numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....61
Şekil 5.18. Kütlece- a) % 1,15, b) % 2,21, c) % 3,06, d) % 3,71 oranlarında W içeren temper konumundaki numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri……...62

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1.1. Dökme demirlerin ticari tanımı, mikroyapı ve kırılma ile ilgili sınıflandırılması 3
Tablo 2.1. Ni-Hard dökme demir kompozisyonları kütle-% 23
Tablo 2.2. Döküm malzemeler için tipik sertlik değerleri 24
Tablo 4.1. Nihard 4 dökme demir malzeme kompozisyonu, kütle -% 39
Tablo 4.2. Literatürde yer alan Ni-Hard 4 malzeme kompozisyonları, kütle-% 39
Tablo 4.3. Tungsten ve bor serisi dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu 41
Tablo 5.1. Numunelere ait karbon eşdeğerleri 47
Tablo 6.1. Literatürde yer alan sertlik değerleri 63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

α-Fe : Ferrit
γ-Fe : Östenit
δ-Fe : Delta Ferrit
C : Karbon
CE : Karbon Eşdeğeri
Fe : Demir
FeS : Demir Sülfür
Gr : Grafit
HB : Brinell Sertlik Birimi
HV : Vickers Sertlik Birimi
Mn : Mangan
MnS : Mangan Sülfür
Mo : Molibden
Ms : Martenzit Start
Ni : Nikel
S : Kükürt
Si : Silisyum
SiC : Silisyum Karbür

Kısaltmalar

ASTM : American Society for Testing and Materials
DTA : Differential Thermal Analysis (Diferensal Termal Analiz)
EDS : Energy Dispersive Spectometry (Enerji Dağılım Spektometresi)
SEM : Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskobu)
XRD : X-Ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)

BOR KATKILI YÜKSEK ALAŞIMLI (Nİ-HARD 4) BEYAZ DÖKME DEMİRLERDE TUNGSTEN İLAVESİNİN MİKROYAPI, AŞINMA VE MEKANİK ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ

ÖZET

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demir malzemeler (Ni-Hard 4 ASTM A532), yüksek aşınma dayanımlarından dolayı çimento, beton ve madencilik sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada bor katkılı yüksek alaşımlı beyaz dökme demir (Ni-Hard 4) malzemede tungsten ilavesinin mikroyapı, aşınma direnci, tokluk ve sertlik özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Numuneler indüksiyon fırınında ergitilerek alaşımlanmış ve kum kalıba dökülerek şekillendirilmiştir. Her bir grup numuneye 850 °C'de 5 saat süreyle tavlama yapılarak havada sertleştirmeye bırakılmış ve devamında 250 °C'de 4 saat süreyle temperleme işlemleri uygulanmıştır. Döküm konumundaki numunelere Diferansiyel Termal Analiz (DTA) incelemeleri yapılmıştır. Döküm ve ısıl işlem konumundaki mikroyapı incelemeleri ışık mikroskobu ve Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirilmiştir. Alaşımların aşınma özelliklerini incelemek amacıyla kuru ortamda pin-on-disk testi uygulanmıştır. Numunelerin tokluk özelliklerini belirlemek amacıyla üç nokta eğme testi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar tungstenin %2 oranına kadar alaşımın sertlik, mekanik özellik ve aşınma dayanımı özelliğinde pozitif yönde bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Aşınma, Beyaz Dökme Demir, Isıl İşlem, Ni-Hard 4, Tokluk.

THE EFFECT OF TUNGSTEN ON MICROSTRUCTURE, WEAR AND MECHANICAL PROPERTIES IN BORON ADDED HIGH-ALLOY (NI-HARD 4) WHITE CAST IRON

ABSTRACT

High alloy white cast iron materials (Ni-Hard 4 ASTM A532) are widely used in cement, concrete and mining industries due to high wear resistance. In this study, the effect of tungsten on microstructure, wear resistance, toughness and hardness of boron added high-alloy (Ni-Hard 4) white cast iron was investigated.

Specimens were alloyed by melting induction furnace and were formed into the sand mould. Every group of specimens was applied hardening on air after heat treatment at 850 ˚C for 5 hours and than tempered at 250 ˚C for 4 hours. Differential Thermal Analysis (DTA) analyzes were performed to the cast samples. Microstructure of cast and heat treated specimens were investigated by using light microscopy and Scanning Electron Microscope (SEM). Wear tests were carried out using a pin-on-disc tribometer under dry sliding conditions. Three-point bending tests were performed to determine the toughness properties of the specimens. The results showed that tungsten provides positive contribution up to 2 wt. % on materials hardness, mechanical properties and wear resistance.

Keywords: Wear, White Cast Iron, Heat Treatment, Ni-Hard 4, Toughness.

GİRİŞ

Dökme demirler, çelik alaşımları gibi geniş bir demir alaşımı ailesini tanımlamaktadırlar. Yapılarında yüksek karbon içerikleri nedeniyle çelik malzemelerden farklılık göstermektedirler. Dökme demir yapıları; kimyasal bileşim, ısıl işlem ve soğuma hızı gibi faktörler ile değişiklik göstermektedir [1].

Demir-karbon alaşımlarında ~%2 C değerini geçtiğinde içerisinde serbest demir-karbür ya da birleşmemiş karbon (=grafit) bulundurmaktadır. Yapıda serbest bulunan bu bileşen ile alaşımlar sıcak şekillendirilebilme özelliğini yitirmektedir. Bu yüzden de bu alaşımlar dövülemez ve haddelenemezler yalnızca döküm işlemiyle şekillendirilebilirler. Dökme demir adı da buradan gelmektedir [2].

Tarihsel olarak dökme demirlerdeki ilk sınıflandırma, kırılma yüzeyine göre yapılmıştır. Kırılma yüzeyine göre beyaz ve gri dökme demir olarak yapılan bu temel ayrım karbon fazının demir karbür veya grafit şeklinde bulunması temeline dayanmaktadır. Bu iki faz dışında sıcaklık, kimyasal bileşim, alaşım elementi gibi etkiler de dökme demir türünde değişim meydana getirmektedir. Beyaz dökme demirler, özellikle aşınma direnci ve sertlik gibi özelliklerin istendiği durumlarda kullanılmaktadır [1,2].

Ni-Hard beyaz dökme demirler, temel olarak aşınmaya karşı üstün özellik gösteren nikel-krom alaşımlı beyaz dökme demirlerdir. Aşınmanın yüksek olduğu ve aşınma ile birlikte sertlik özelliğinin de istendiği çalışmalarda kullanılmaktadırlar. Alaşımın özellikleri kimyasal kompozisyon ve ısıl işlem ile ayarlanabilmektedir [1].

Bu çalışmada Ni-Hard 4 beyaz dökme demir malzemeye belirli oranlarda bor ve tungsten alaşım elementi ilave edilerek sertlik, tokluk, aşınma gibi mekanik özellikleri ile birlikte mikroyapı değişimi incelenmiştir. Alaşımların ergime ve katılaşma özelliklerini belirlemek için Diferansiyel termal analiz (DTA) uygulaması yapılmıştır. Alaşımın mekanik özelliklerini belirlemek için sertlik ölçümü, pin-on-disk aşınma testi ve üç nokta eğme testleri yapılmıştır. Mikroyapı özelliklerini belirlemek amacıyla ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Karbür tiplerinin belirlenmesi amacıyla X-ışını kırınımı (XRD) analizi yapılmıştır.

1. DÖKME DEMİRLER

Dökme demirler, ötektik noktadan katılaşma sonucu oluşan çok bileşenli demir alaşımlarıdır. Bu bileşenler majör (demir, karbon, silisyum), minör (< 0,1 %) ve alaşım (> 0,1%) elementleridir. Dökme demirler çelik alaşımlarına göre daha yüksek karbon ve silisyum oranına sahip alaşımlardır. Yüksek karbon oranı nedeniyle, çelikten farklı bir karbür yapısı gözlemlenmektedir. Kimyasal kompozisyon ve soğuma hızına bağlı olarak, metastabil Fe-Fe_3C veya kararlı demir-grafit oluşumu meydana gelmektedir. Metastabil denge izlendiğinde, ötektikte oluşan zengin karbon fazı demir karbür, stabil dengeye göre katılaşma yolu izlendiğinde ise oluşan zengin karbon fazı grafittir. Sıvı içerisindeki çekirdeklenme potansiyeli, kimyasal kompozisyon ve soğutma oranı gibi birçok faktör, stabil veya metastabil ötektik oluşumunu etkileyen faktörlerdir. Yüksek grafitizasyon potansiyeli ve zengin karbon fazı dökme demirlerde grafit oluştururken, düşük grafitizasyon potansiyeli de demir karbür oluşumunu meydana getirir [1].

Dökme demir yapısında, iki temel tip ötektik bileşen bulunmaktadır. Bunlardan östenit-grafit stabil ve östenit-demir karbür (Fe_3C) metastabildir. Bu bileşenler, mukavemet, tokluk, sertlik ve süneklik gibi mekanik özelliklerde büyük farklılıklar meydana getirmektedir [1].

Dökme demirlerin kimyasal bileşiminde demir dışında beş alaşım elementinin mutlaka bulunması gerekmektedir. Bunlar karbon, silisyum, mangan, kükürt ve fosfordur. Alaşımsız dökme demirlere bunlar dışında element eklenmezken, alaşımlı dökme demirlerde silisyum ve mangan oranı çok yüksektir. Ayrıca alaşımlı dökme demirler nikel, krom, molibden, volfram, vanadyum, titanyum, bakır, alüminyum vb. alaşım elementi de içerebilmektedir [2].

Döküm durumunda kullanılan dökme demirlere birincil dökme demir denir [2]. Birincil dökme demirlerde yapılan ilk sınıflandırma kırılma yüzeyi görüntülerine dayanmaktadır. Bu sınıflandırmaya göre iki tip dökme demir bulunmaktadır [1]. Bu sınıflandırma,

1. Beyaz dökme demir
2. Gri dökme demir olarak yapılmaktadır.

Beyaz dökme demirlerde karbonun çoğu veya tümü demir karbür olarak bulunmaktadır. Kırılmalar, demir karbür (Fe_3C) plakalar boyunca meydana gelmekte ve kırılma yüzeyinde beyaz bir görünüm oluşturmaktadır. Bu nedenle de bu dökme demirler beyaz dökme demir olarak adlandırılmaktadır [1,2].

Gri dökme demirlerde ise karbonun çoğu grafit olarak bulunmaktadır. Kırılma grafit plakalar boyunca gerçekleşerek, kırılma yüzeyinde gri bir görüntü oluşturmaktadır. Kırılma yüzeylerindeki bu gri görünümden dolayı da gri dökme demir olarak adlandırılmaktadır [1,2].

Bu tip dökme demir alaşımları dışında tanımlanan alaşımların, ticari isimleri ve sınıflandırılması Tablo 1.1'de verilmiştir.

Tablo 1.1. Dökme demirlerin ticari tanımı, mikroyapı ve kırılma ile ilgili sınıflandırılması [1].

Ticari Tanımlama	**Karbon-Zengin Faz**	**Matriks (a)**	**Kırılma Yüzeyi**	**Son Yapı**
Gri Demir	Lameler Grafit	P	Gri	Katılaşma
Küresel Grafitli Dökme Demir	Küresel Grafit	F,P,A	Gümüş-Gri	Katılaşma veya Isıl İşlem
Vermiküler Grafitli Demir	Vermiküler Grafit	F,P	Gri	Katılaşma
Beyaz Demir	Fe_3C	P,M	Beyaz	Katılaşma ve Isıl İşlem (b)
Benekli Demir	Lameler Gr+ Fe_3C	P	Benekli	Katılaşma
Temper Demir	Temper Grafit	F,P	Gümüş-Gri	Isıl İşlem
Östemperlenmiş Dökme Demir	Küresel Grafit	At	Gümüş-Gri	Isıl İşlem

(a) F, ferrit; P, perlit; A, östenit; M, martenzit; At, östemperlenmiş beynit.
(b) Beyaz dökme demirler, gerilim giderme ve östenit dönüşümü dışında ısıl işlem görmezler.

1.1. Demir-Karbon Sistemi

Saf demir, yüzde %4,2-4,3 oranlarında karbon içeriğine sahiptir ve 1535 ºC'de ergimektedir. Dökme demirin içerisine alaşım elementi eklendiğinde ergime sıcaklığı ve karbon oranında değişim meydana gelmektedir. Örneğin %1'lik silisyum ilavesi ile dökme demirlerin ötektik sıcaklığı 1135 ºC'ye kadar düşmektedir. %1 silisyum içeren dökme demir malzemede karbon oranı %3,97 oranına gerilemektedir [3].

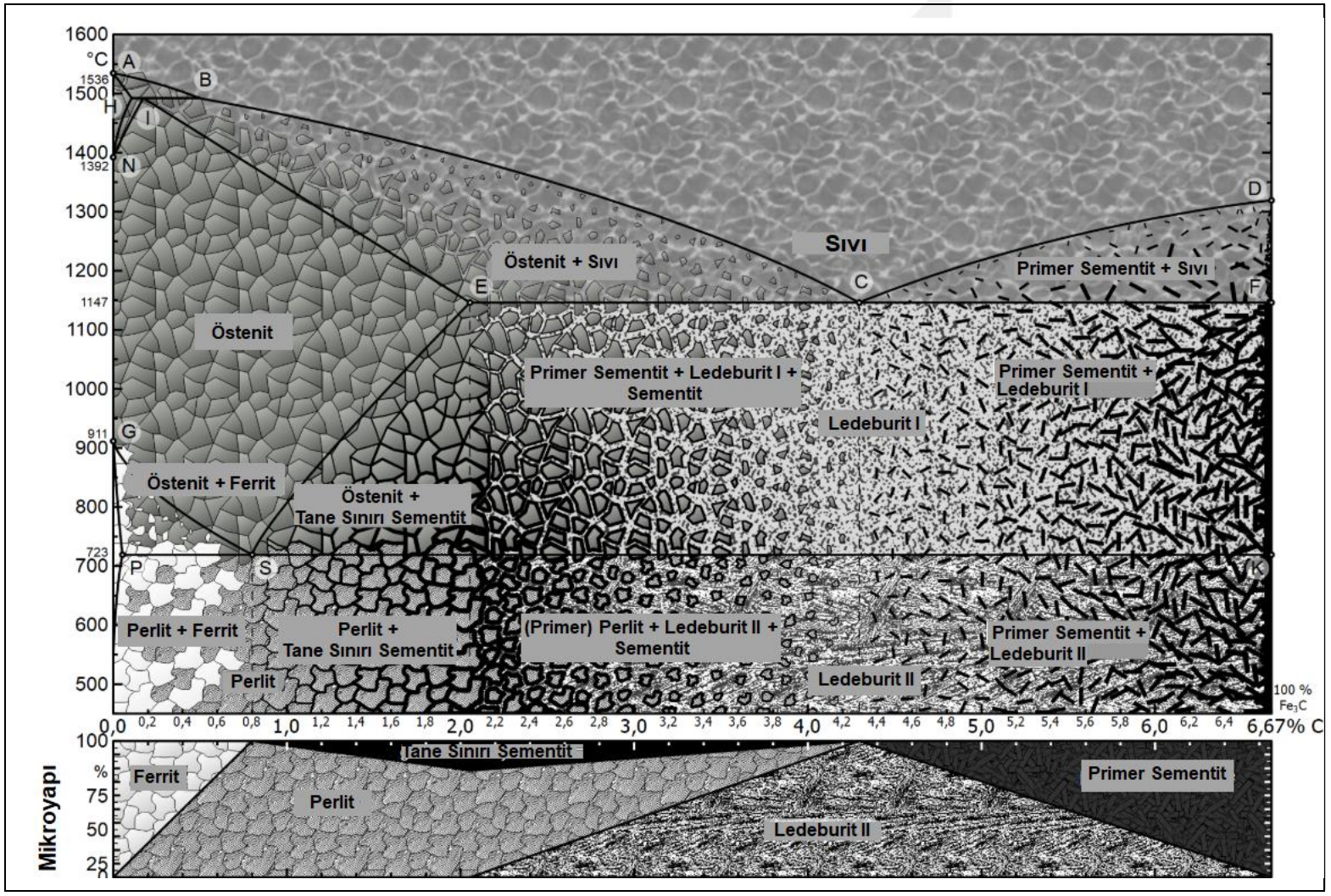
Dökme demir kompozisyonu, hipo-ötektik veya hiper-ötektik bileşime sahip olmasında önemli rol oynamaktadır. Çoğu ticari demir alaşımı %2,5-4,0 aralığında karbon içeriğine sahiptir. Şekil 1.1'de demir-karbon diyagramı verilmiştir. Demir-karbon sisteminde yüksek karbon bölgesinde demir bir karbür/östenit karışımı (ledeburit) göstermektedir. Bu tip dökme demir alaşımları beyaz veya temper dökme demir olarak adlandırılır ve özellik olarak sert ve kırılgan yapıya sahiptirler. Yüksek katılaşma hızı ile oluşan gri dökme demirler ise sert yapılarına rağmen işlenebilir özellik göstermektedir [3].

Dökme demirlerin metalurjisi, çeliklerin metalurjisine benzerlik göstermektedir. Ancak dökme demirlerde çeliklerden farklı olarak yüksek karbon içeriğinin yanında yüksek oranda silisyum elementi de bulunmaktadır. Silisyum, dövme ya da döküm ile üretiminde önemli bir alaşım elementidir. Bu yüzden dökme demirlerde Şekil 1.2'deki Fe-C-Si diyagramının da dikkate alınması gerekmektedir [1].

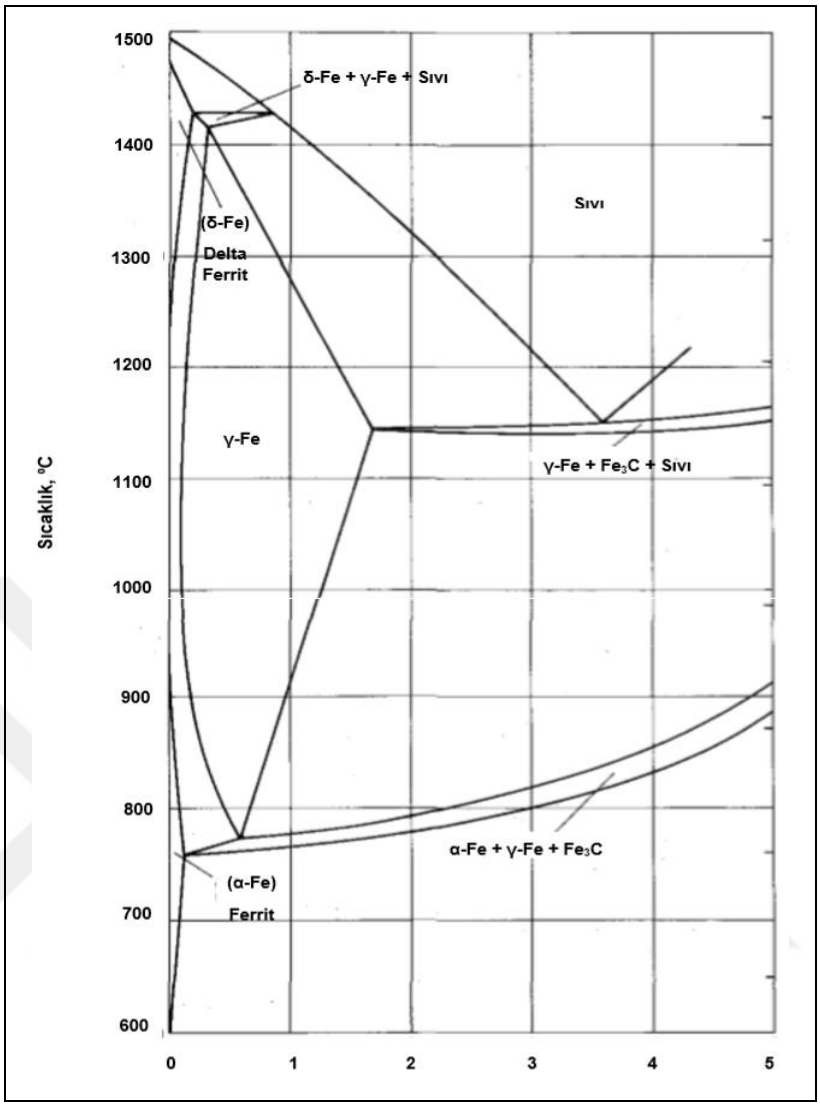
Silisyum, demir-karbon denge diyagramında değişime neden olan bir alaşım elementidir. Şekil 1.2'deki silisyum miktarı arttığında ötektik ve ötektoid denge sıcaklık aralıkları düşük karbon oranlarına doğru değişim göstermektedir. Üçlü Fe-Fe_3C-Si'de oluşacak olan denge ve denge dışı fazlar da silisyum içeriğine bağlı olarak farklılık göstermektedir [1].

Şekil 1.3'teki demir-karbon-silisyum sistemi incelendiğinde sabit silisyum oranında karbon oranı arttıkça likidüs çizgisinin sürekli olarak azaldığı görülmektedir. Sıvı faz yüksek silisyum içeriğinde SiC, FeSi veya Fe_2Si fazlarıyla dengede kalabilmektedir [4].

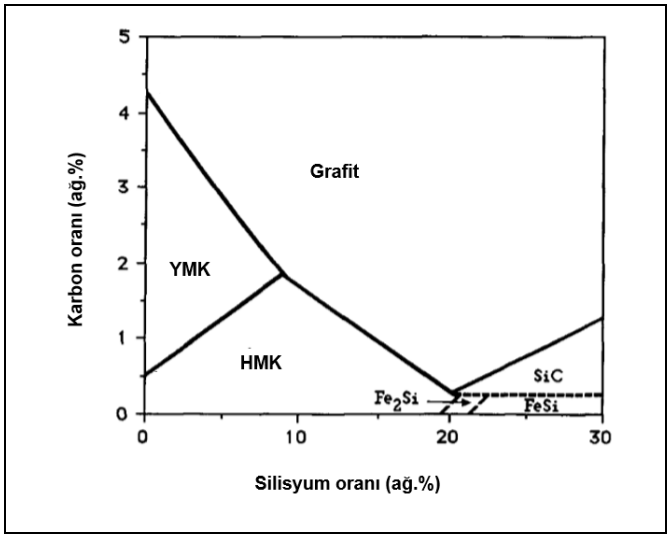
Özetle bir ikili demir-karbon alaşımına silisyum eklenmesi, metastabil olan Fe_3C fazının stabilitesini azaltır ve ferritin stabilitesini artırır. Fe-C-Si sistemindeki silisyum içeriği arttıkça, ötektik ve ötektoid noktadaki karbon oranı azalırken, ötektik ve ötektoid nokta sıcaklığında artış gözlemlenmektedir [1].



Şekil 1.1. Fe-Fe_3C diyagramı [5]



Şekil 1.2. %2 silisyum katkılı Fe-C-Si denge diyagramı [1]



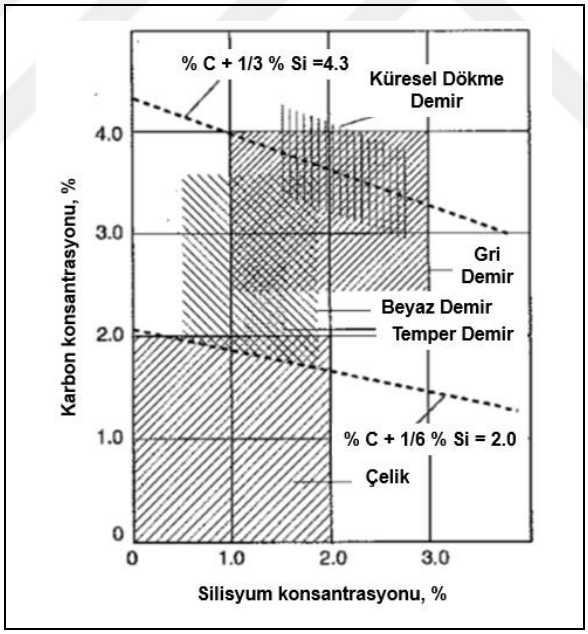
Şekil 1.3. Likidüs yüzeyinin projeksiyonu alında oluşan kompozisyon düzlemini gösteren bir kararlı Fe-C-Si diyagramı [4]

1.2. Karbon Eşdeğeri

Bir demir alaşımı ötektik değere ve soğuma hızına bağlı olarak beyaz, gri veya mottled dökme demir olarak katılaşabilmektedir. Soğutma hızının etkisinin değerlendirilmeye başlanmadan önce bileşim etkisinin basitleştirilmesi gerekmektedir. En yaygın basitleştirme, karbon eşdeğeri (CE) ile yapılmaktadır. Karbon eşdeğerinde silisyum etkisi göz önüne alındığında, karbon eşdeğeri Denklem 1.1 ile hesaplanabilir. Şekil 1.4'te çelik ve dökme demir malzemeler için karbon eşdeğerleri verilmiştir [1,3].

$$\text{CE} = \text{Toplam Karbon \%} + \frac{\text{Silisyum \%+Fosfor \%}}{3} \qquad (1.1)$$

Demir karbon diyagramındaki tanımlamada, karbon içeriği yerine karbon eşdeğerinden yararlanılmaktadır. CE= %4,3 olan bir ötektik demir %100 ötektik yapıya sahiptir. Eşdeğer değer, demirin hipo-ötektik veya hiper-ötektik olduğun belirlemede kullanılmaktadır [1].



Şekil 1.4. Çelik ve dökme demirler için karbon ve silisyum eşdeğerleri [1]

Ergimiş demir içerisindeki alaşım elementi miktarı ve karbon çözünürlüğü karbon eşdeğeri oranını ve soğutma hızı ile birlikte de dökme demirin türünü etkilemektedir. Bir dökme demirin karbon eşdeğeri verilen bir analizdeki ötektik kompozisyonun analizine ne kadar yakın olduğunu açıklamaktadır. Demirin karbon eşdeğerine bağlı olarak dökme demir türü de değişim göstermektedir. Örneğin, karbon eşdeğeri düşük ise beyaz veya mottled dökme demir olma eğilimi artmaktadır [1,3].

1.3. Solidus (Ergime) Noktası

Birçok çalışma silisyumun demir-karbon-silisyum alaşımlarında ötektik sıcaklıkta bir artışa neden olduğunu göstermektedir. Silisyum oranının %0'dan %3'e artmasıyla ergime noktasında 1150 °C'den 1165 °C'ye yükselme meydana gelmektedir. Ticari dökme demirlerde ise ergime 1135 °C ile 1150 °C arasında gerçekleşmektedir [3].

1.4. Likidus Noktası

Silisyum ve fosforun sıvı sıcaklığı üzerindeki etkisi, ötektik karbon içeriği üzerindeki etkilerinden biraz farklıdır, gri ve beyaz dökme demir aralığında, hipo-ötektik demirlerin sıvı faza geçiş sıcaklığını belirlemek amacıyla aşağıdaki formüller Denklem 1.2 ve Denklem 1.3 kullanılmaktadır.

$$1669\ ^{o}\text{C} - 124\left(\text{Karbon \%} + \frac{\text{Fosfor \%}}{2} + \frac{\text{Silisyum \%}}{4}\right) \quad (1.2)$$

Karbon eşdeğeri 3,2 den düşük olduğunda ise;

$$1570\ ^{o}\text{C} - 95\left(\text{Karbon \%} + \frac{\text{Fosfor \%}}{2} + \frac{\text{Silisyum \%}}{4}\right) \quad (1.3)$$

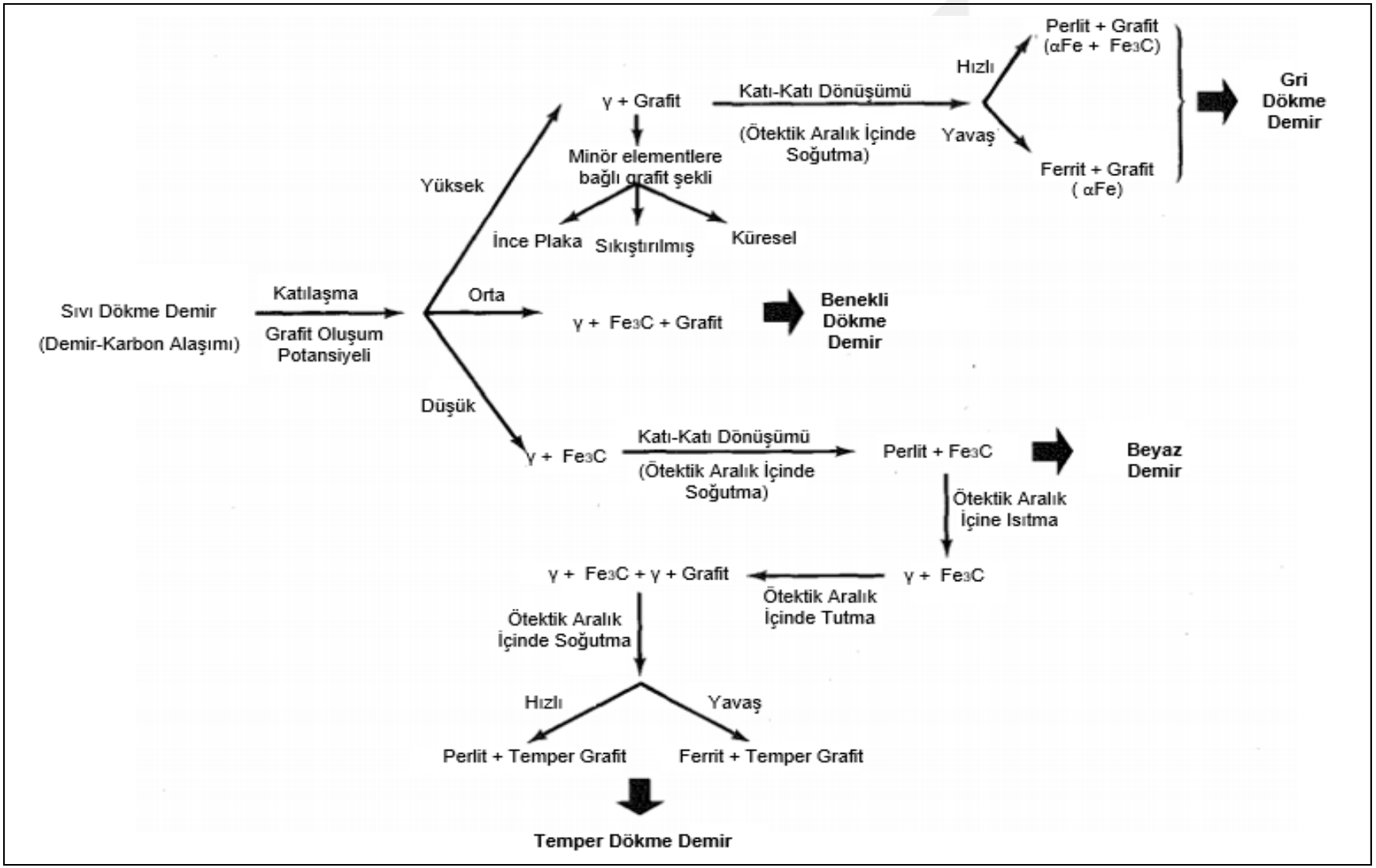
Ayrıca %2'ye kadar bakır ve %4-5'e kadar kromun sıvı sıcaklığı üzerinde etkisi düşüktür. Nikel katkısında ise her bir yüzde artış ile sıcaklık değeri 5°C düşüş göstermektedir [3].

1.5. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Metalurjik olarak, mekanik özelliklerin sağlandığı malzeme yapısının oluşumunu etkileyecek bazı faktörler vardır. Bunlar:

- Kimyasal bileşim
- Soğuma Hızı
- Ergime Noktası
- Isıl İşlem

gibi özelliklerdir. Bunlara ek olarak dökme demirin içerdiği karbon ve silisyum miktarı ile birlikte soğutma hızlarına bağlı olarak yapıda oluşacak olan mikroyapı, malzeme özelliklerini ve dökme demir türünü etkilemektedir. Şekil 1.5'te dökme demir malzemeler ile ilgili sınıflandırma görülmektedir [1]. Dökme demirler mikroyapılarına göre beyaz dökme demir, gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir ve temper dökme demir olarak sınıflandırılırlar.



Şekil 1.5. Dökme demir malzemelerin sınıflandırılması ve mikroyapıları [1]

1.5.1. Beyaz dökme demir

Dökme demir malzemelerde, düşük silisyum içeriği ve stabilize edici elementlerin varlığı ile yüksek soğutma hızında grafit oluşumu engellenmektedir. Karbon yapıda genellikle $(Fe,Cr)_3$ ve $(Cr,Fe)_7C_3$ tipi karbürler meydana getirmekte ve kırılma yüzeylerinde karbürlerden kaynaklı olarak beyaz bir görüntü oluşmaktadır. Bu kırılma yüzeyi görüntüsü nedeniyle de bu dökme demirlere 'beyaz dökme demirler' denilmektedir.

Karbonun grafit formu beyaz dökme demir malzemelerde neredeyse hiç bulunmamaktadır. Dökme demir malzemenin kompozisyonu kontrol edilerek ve kontrollü ısıl işlem uygulanarak istenen mikroyapı ve sertlik değerleri elde edilebilmektedir.

Sert ve aşınmaya dayanımlı beyaz dökme demir malzemeler, genellikle aşınmanın yüksek olduğu ve yüksek sertlik istenen uygulamalarda kullanılmaktadır [1, 2, 3]. Bölüm 2'de beyaz dökme demirler detaylı olarak anlatılmaktadır.

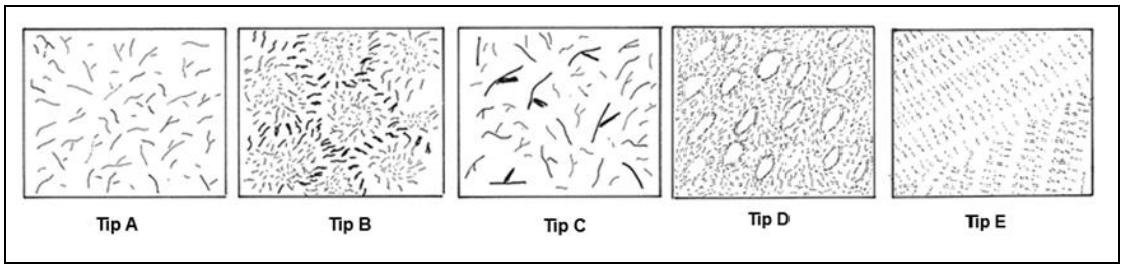
1.5.2. Gri dökme demir

Gri dökme demir; ötektik sıcaklıkta katı çözelti içerisinde çözebileceğinden fazla karbon içeren demir, karbon, silisyum alaşımıdır. Gri dökme demirler, genelde %2,5-4 oranında karbon içerirler. Ayrıca yapılarında kompozisyona bağlı olarak mangan, kükürt ve fosfor bulunmaktadır. Kırılma yüzeylerindeki gri görüntüden dolayı "gri dökme demir" olarak adlandırılmaktadırlar.

Gri dökme demirin mikroyapısı perlit matris içerisine dağılmış grafit lamellerinden oluşmaktadır. Grafit lamellerinin miktarı ve mikroyapı içerisindeki düzeni malzeme özelliklerini etkilemektedir. Grafitin miktarı, boyutu ve dağılımı malzeme özelliklerini belirlemede önem taşımaktadır. Grafitin mikroyapı içerisindeki şekli ve dağılımına göre farklı tipte gri dökme demirler bulunmaktadır. Şekil 1.6'da ASTM A247 standardına göre tipik gri dökme demir türleri verilmiştir [6].

A tipi gri dökme demirlerde, grafit lamelleri rastgele biçimde yönlenmiştir. Bu tip dökme demirler aşınma özelliği açısından diğer dökme demirlerden üstün oldukları için motor silindirlerinde kullanılmaktadır. B tipi dökme demirlerde hızlı soğumanın tipik bir görüntüsü olarak farklı yönde çekirdeklenme sonucu rozet biçiminde birleşmeler meydana gelmektedir. C tipi dökme demirler, hiper-ötektik dökümlerde oluşan ve

büyük grafit lamelleri içeren bir yapıya sahiptir. Bu büyük lameller, termal şok dayanımı ve termal direnç sağlarken, elastik modül ve darbe direnci özeliklerini olumsuz etkilemektedir. D tipi dökme demir malzemelerde, hızlı soğutulan bölgelere yakın yörelerde grafit lamelleri perlitik matris içerisinde oluşmaktadır. E tipi gri dökme demirde ise interdentritik bir formda yönlenen lameller gözlemlenmektedir [6].

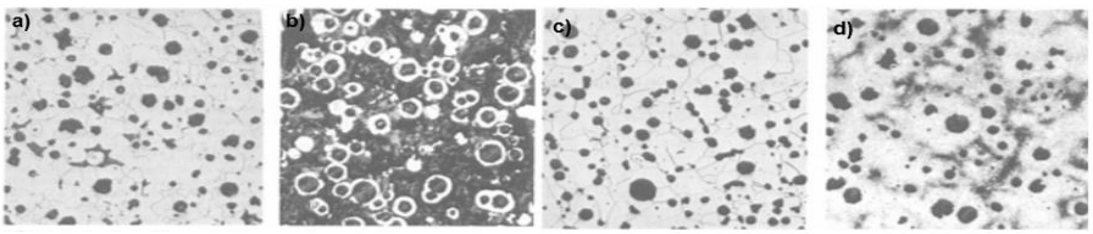


Şekil 1.6. ASTM A247 standardına göre 100X büyütmede alınmış tipik gri dökme demir görüntüleri [6]

1.5.3. Küresel grafitli dökme demir

Grafitin, küresel (nodüler) olarak yapıda bulunduğu dökme demirlerdir. Ötektik sıvı demir içerisinde bulunan grafit, küresel olarak yapı içerisinde dağılmaktadır. Sıvı fazdaki demir alaşımına eklenen minör alaşım elementleri ile grafit tipik lameler yapı yerine küresel form almaktadır. Küresel form, yüksek akışkanlık, işlenebilirlik, tokluk ve mukavemet özellikleri kazandırmaktadır. Küresel form gri dökme demire göre daha yüksek mekanik özellikler elde edilmesini sağlamaktadır. Küresel dökme demirlerin tipik mikroyapısı Şekil 1.7'de gösterilmiştir.

Küresel grafitli dökme demirlerde küresel form elde edilebilmek ve hızlı soğumayı sağlamak amacıyla yapıya alaşım elementleri ilave edilmektedir. Eklenen minör alaşım elementleri ile grafitin lameler yapı oluşturması engellenerek küresel olarak yapıda kalması sağlanmaktadır [6].



Şekil 1.7. Küresel dökme demir mikroyapısı.-Dağlamalar %2'lik nital ile yapılmış ve görüntüler 100X büyütmede alınmıştır. (a) döküm konumunda ferritik, (b) döküm konumunda perlitik, (c) 700 ºC / 3 saat tavlanmış ferritik yapı, (d) Perlitik demirin yağda soğutulmuş- temperlenmiş [6]

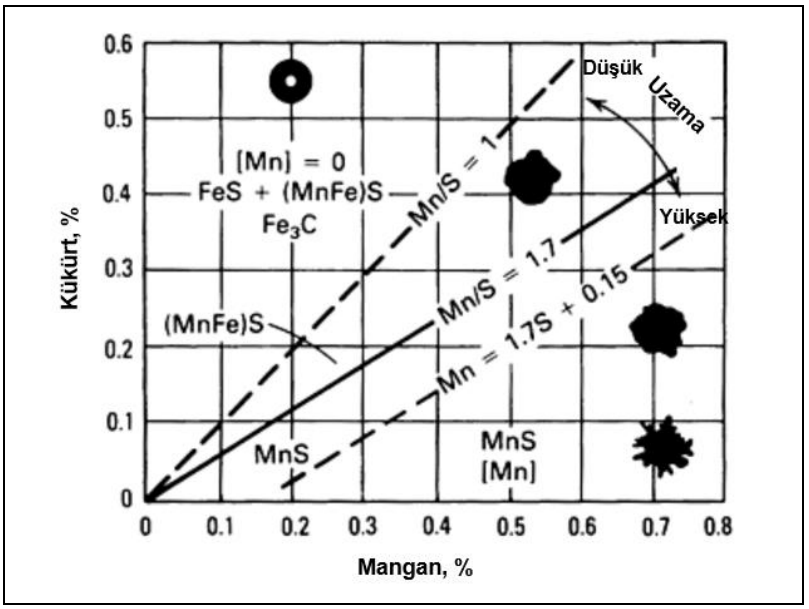
1.5.4. Temper dökme demir

Temper dökme demirler, başlangıçta beyaz dökme demir yapısına sahip olmaları (perlitik matris içerisinde demir karbürler) nedeniyle diğer dökme demirlerden farklıdır. Beyaz dökme demir yapısına benzeyen alaşım ardından ısıl işleme tabi olur (800 – 970 ºC' de tavlama) ve Denklem 1.4'te verildiği gibi Fe_3C'nin yapıdan ayrılmasıyla temper dökme demir yapısına dönüşür. Final yapısı; grafit-perlit, perlit-ferrit, veya ferritten oluşur. Matris yapısı tavlama sonrası soğutma oranının bir fonksiyonudur. Tavlama ve soğutma sürelerinin yanı sıra karbon eşdeğeri ve Mn/S oranı da temper dökme demirdeki grafit oranı üzerinde etki etmektedir. Düşük bir C/Si oranı yüksek grafit sayısı ile sonuçlanmaktadır. Yapının ferritik ya da perlitik olarak istenmesine göre farklı oranlarda mangan kullanılmaktadır.

$$Fe_3C \rightarrow \gamma + Gr \qquad (1.4)$$

$$\%Mn = 1{,}7\ (\%Si) + 0{,}15 \qquad (1.5)$$

Denklem 1.5'e göre belirlenen çizginin altında mangan, ferrit içerisinde çözünmektedir. Mn/S oranı 1'den küçük olduğunda yapıda saf FeS oluşmaktadır. FeS baskın olduğunda yapıda küresel grafit formları oluşturarak uzama değerlerinde düşüş meydana getirmektedir. MnS bileşiği yapıda baskın olduğunda ise serbest grafit formları ve Fe_3C içermeyen mikroyapı sayesinde yüksek uzama değerleri elde edilebilmektedir. Şekil 1.8'de Mn/S oranının grafit şekline üzerindeki etkisi verilmiştir [1].

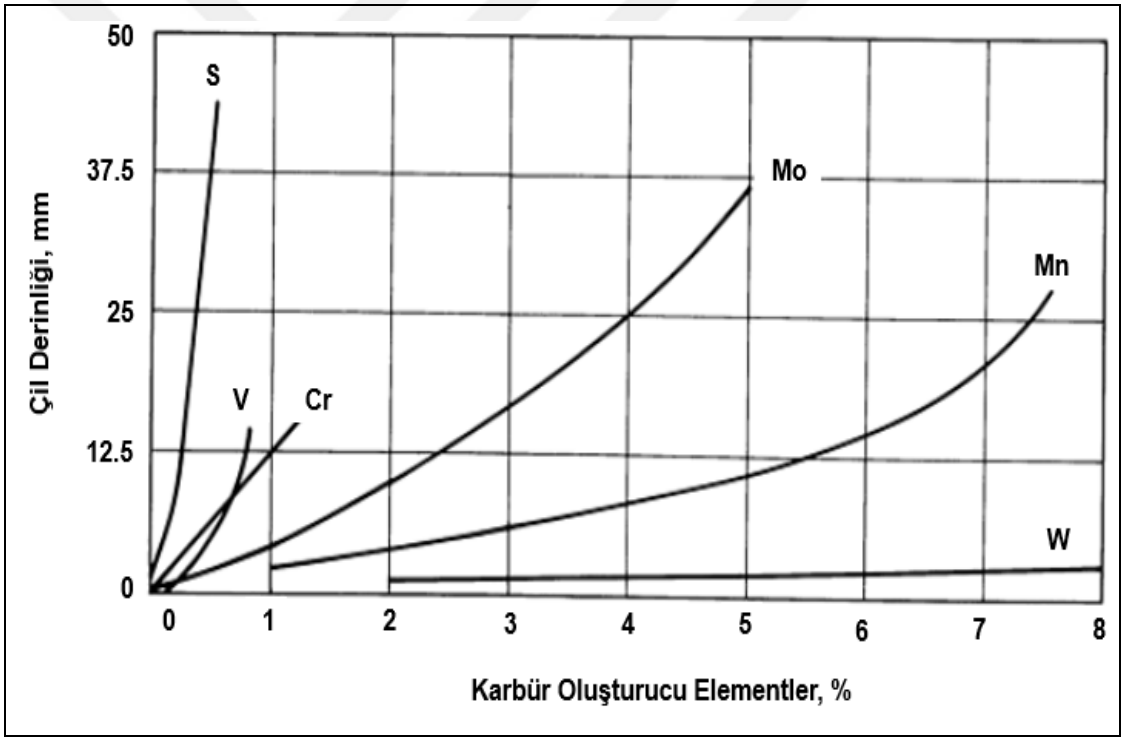


Şekil 1.8. Mn/S oranının temper grafit şekli üzerine etkisi [1]

1.6. Dökme Demirlerde Alaşım Elementleri

Dökme demirlerde alaşım elementleri (karbon ve silisyum dahil) malzeme özelliklerinde büyük etkiye sahiptir. Korozyon direnci, yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci gibi özellikler alaşım elementleri ile kazandırılmaktadır. Örneğin, aşınma direnci yüksek beyaz dökme demirlerde karbür oluşturma amacıyla yüksek krom kullanılmaktadır. Krom, karbonun grafit olarak katılaşmasını engelleyerek, karbür oluşturma eğilimini arttırmaktadır. Krom ve diğer karbür oluşturucuların elementlerin çil derinliği üzerine etkileri Şekil 1.9'da gösterilmiştir.

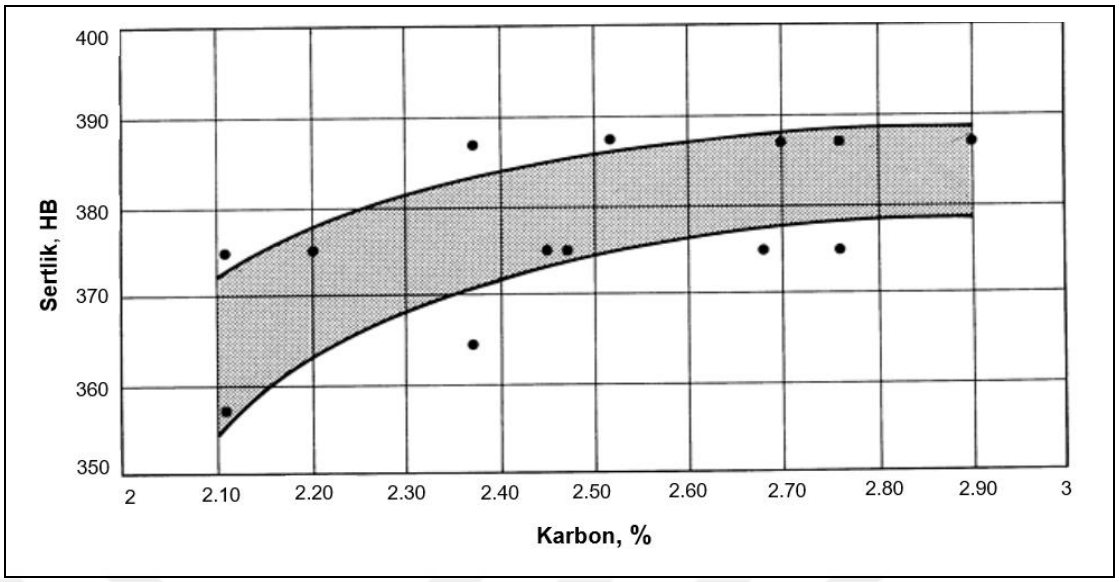
Nikel, krom, molibden gibi alaşım elementleri malzemeye istenen özellikleri kazandırmak amacıyla tek başına veya birlikte kullanılabilmektedir. Özelliklerin kontrolü alaşım elementleri ile belirlenebilmektedir [7].



Şekil 1.9. Karbür oluşturucu elementlerin çil derinliğine etkisi [7]

1.6.1. Karbon

Karbon, dökme demirlerde %2-4 oranlarına bulunur ve dökme demirin ergime sıcaklığını düşürerek akıcılığını arttırır. Ayrıca dökme demirlerde malzeme sertliğini arttırmaktadır. Düşük karbonlu dökme demirlerin (%2,5 C) sertliği yaklaşık 375 HB iken, yüksek karbonlu beyaz dökme demirlerin (> % 3,5 C) sertliği 600 HB ye çıkmaktadır. Karbon oranının sertlik üzerindeki etkisi Şekil 1.10'da grafikte gösterilmiştir [7].



Şekil 1.10. Düşük alaşımlı beyaz dökme demirde karbon oranının sertlik üzerine etkisi [7]

Karbon içeriği, matris yapısındaki karbürlerin, matrisin nispi miktarların ve sertliğinin belirlenmesinde etkili bir alaşım elementidir. Beyaz demirlerde yüksek sertlik ve aşınma direnci özelliklerinin elde edilmesi için yüksek karbon oranına sahip olması gerekmektedir. Toleranslar içerisinde dahi karbon içeriğinde meydana gelen değişim aşınma ve kırılma direnci özelliklerinde fark meydana getirmektedir [7].

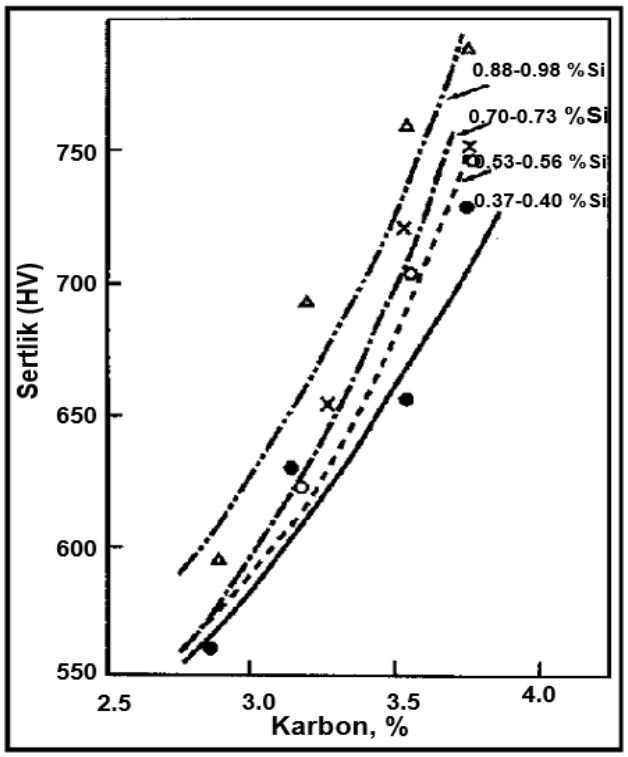
1.6.2. Silisyum

Silisyum tüm dökme demirlerde bulunan ve ötektik noktanın karbon içeriğini belirleyen ana alaşım elementidir. Dökme demir içerisinde silisyumdaki artış ile ötektik noktada bulunan karbon oranı azalmakta ve grafit oluşumu tetiklenmektedir. Bu nedenle silisyum oranı beyaz dökme demirler ve çil dökme demirlerde soğutma kontrolünde önem taşımaktadır.

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde, martenzitik yapıdaki demirlerde, perlit oluşumunu destekleyerek sertlik oluşumu üzerinde negatif etki etmektedir. Bununla birlikte molibden, nikel, mangan ve krom gibi perlit oluşumunu bastırıcı elementlerin varlığında silisyumun oranının artması martenzit oluşumu başlama sıcaklığı (M_s) ve final sertliğini yükseltmektedir.

Çil ve beyaz dökme demirlerde silisyum oranı genellikle %0,3-2,2 aralığında bulunurken martenzitik nikel-kromlu beyaz dökme demirlerde %0,4-0,9 oranında bulunmaktadır. Yüksek silisyum katkısı (%3,5–7) aşınma direncini arttırarak asitlere karşı direnç sağlamaktadır. %14-17 oranlarda silisyum katkısı dökme demirlerde

işleme özelliğini olumsuz etkileyerek mekanik ve termal şoklara direnci azaltmaktadır. Farklı silisyum oranlarına sahip döküm durumundaki Ni-Hard 1 beyaz dökme demir malzemelerde karbon oranının sertlik üzerine etkisi Şekil 1.11'de gösterilmiştir [8]. Yüksek silisyum içeriğinde, katılaşma sırasında grafitin oluşma eğilimini artmaktadır. Bu nedenle yüksek karbonlu beyaz demirlerdeki silisyum içeriğinin düşük tutulması çok önemlidir. Silisyum miktarının özellikle kalın kesitli parçalarda yaklaşık olarak %1 civarında tutulması gerekmektedir [7].



Şekil 1.11. Farklı silisyum oranlarına sahip döküm durumundaki Ni-Hard 1 beyaz dökme demir malzemelerde karbon oranının sertlik üzerine etkisi [8]

1.6.3. Krom

Krom, dökme demirlerde üç temel amaç için kullanılmaktadır:

- Karbür oluşturmak
- Korozyon direncini iyileştirmek
- Yüksek sıcaklık uygulamaları için yapıyı kararlı hale getirmek.

Düşük yüzdelerde krom ilavesinin (%2-3) sertleşebilirlik üzerine çok az etkisi vardır. Nedeni ise kromun büyük bölümünün karbür oluşturucu olarak yapıda bulunmasıdır. Dökme demir içerisinde bulunan krom oranı oluşan karbür tipleri üzerinde etkili

olmaktadır. %10'dan yüksek krom oranlarında M_3C tipi karbür matrisi oluşurken, yüksek krom içeriklerinde M_7C_3 tipinde ötektik karbürler oluşmaktadır. M_7C_3 tipi karbürler, M_3C tipi karbürlerden daha sert ve tok yapıdadırlar.

Martenzitik veya östenitik yapıya sahip yüksek kromlu (%12-28) beyaz dökme demirlerde nispeten yüksek tokluk, aşınma ve korozyon direnci elde edilmektedir. Bu demirlerde kromun çoğu karbür olarak bulunmaktadır. Krom ötektoidin perlite dönüşmesini engellemede molibden, nikel, mangan veya bakırdan daha az etkilidir. Martenzitik demirlerde gereken sertliğin sağlanması için genellikle molibden, nikel, mangan ve bakır elementlerinden birini veya daha fazlasını içermektedir.

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler döküm olarak kullanılabileceği gibi, genellikle optimum özelliklerin elde edilmesi için ısıl işlem çevriminden geçmektedir. Isı ile yumuşama ve sıcaklık nedenli gerçekleşen oksidasyona karşı korunmak için en etkili element kromdur. Krom, demir karbürü stabilize ederek yüksek sıcaklıklarda çözünmesini engellemektedir. Ayrıca dökme demir içerisinde grafit oluşumunu engelleyerek karbür oluşumunu desteklemektedir [7].

1.6.4. Nikel

Nikel, östenitik veya dönüşmüş fazda neredeyse tamamen çözünebilmektedir. Ayrıca beyaz dökme demirlerde, silisyum gibi, grafit oluşumunu teşvik etmektedir. Grafit etkisi yapıya krom ilavesi ile dengelenmektedir.

Yüksek kromlu demirlerde, östenit fazı kararlı hale getirmek için yüksek oranda (%15) nikel ilavesi gerekirken, düşük alaşımlı dökme demirlerde yaklaşık olarak %2,5 oranında nikel ilavesiyle bile sert ve ince yapıda perlit üretilerek aşınma direnci arttırabilmektedir. Perlitik yapının bastırılması ve martenzitik yapı elde edilmesi için yapıya yüksek miktarlarda ~%4,5 nikel ilavesi yapılabilmektedir. Bu uygulama, Ni-Hard dökme demirlerin üretim temelini oluşturmaktadır.

Ni-Hard dökme demirler, ticari bir beyaz dökme demir alaşımı olup, %1,0-2,2 Si, %5-7 Ni ve %7-11 Cr içermektedir. Döküm mikroyapısında östenitik matris içerisinde M_7C_3 ötektik karbürlerden oluşmaktadır. Isıl işlem ile matris kontrollü olarak değiştirilerek mekanik özellikler iyileştirilebilmektedir.

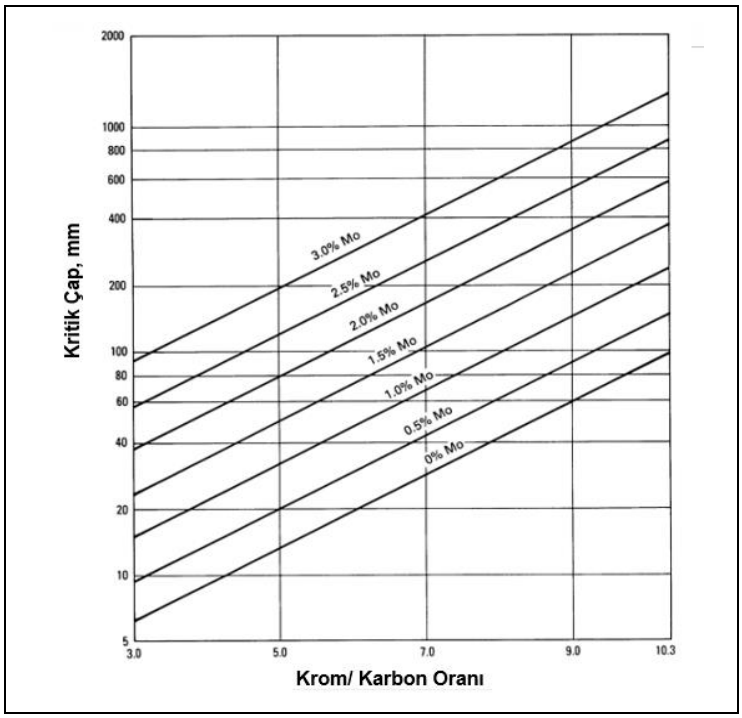
Yüksek nikel alaşımlı gri ve sfero dökme demirlerde yüksek termal direnç ve korozyon direnci amacıyla %12 oranı üzerinde kullanılmaktadır. %18 değerinin üzerinde ise bu tip dökme demirler tamamen östenitik yapıya dönüşmektedir [7].

1.6.5. Molibden

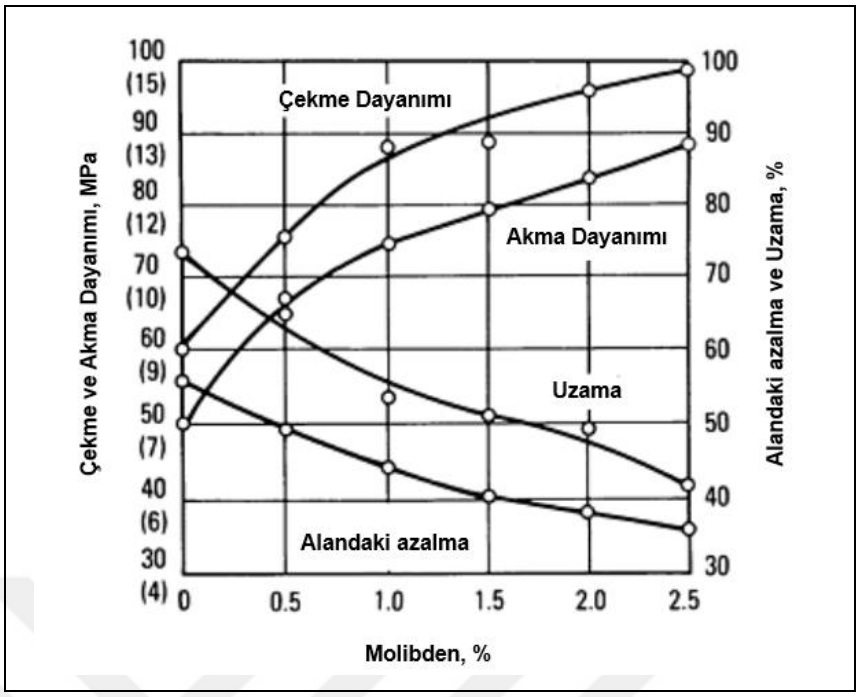
Molibden, gri dökme demirlerde yüksek sıcaklık dayanımı ve korozyon direncini arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Çil ve beyaz dökme demir alaşımlarında molibden çil derinliğini arttırmaktadır.

Yüksek aşınma direnci elde etmek istenildiğinde martenzitik beyaz dökme demir alaşımına %0,5-3,0 aralığında molibden ilave edilmektedir. Molibden; bakır, krom, nikel ile birlikte kullanıldığında ise daha etkili hale gelmektedir. Nikel, bakır ve mangan ile kullanıldığında kalıntı östenit oluşumuna neden olmadan sertleşme derinliğini arttırmaktadır. Şekil 1.12'de farklı miktarlarda molibdenin yüksek-kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğine olan etkisi görülmektedir. Bu sertleşebilirlik havada sertleştirme için kritik çap olarak ölçülmüştür.

Molibden, perlit oluşumunu bastırıcı özelliği ile yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde avantaj sağlamaktadır. Aşınmaya dayanımlı dökme demirlerde %12-18 krom içeren alaşıma %1-4 aralığında molibden ilavesi ile perlit oluşumu engellemektedir. Şekil 1.13'te molibdenin çekme özelliklerine etkisi verilmiştir. %1-2 miktarındaki molibden, ferritik veya östenitik matrislere sahip gri ve sfero demirlerde yüksek sıcaklık mukavemetini ve sürünme direncini arttırmaktadır [7].



Şekil 1.12. Kütlece-% farklı oranlardaki molibdenin yüksek-kromlu beyaz dökme demirlerin sertleşebilirliğine olan etkisi [7]



Şekil 1.13. Kütlece-% farklı oranlarda molibdenin mekanik özellikler üzerine etkisi [7]

1.6.6. Mangan

Mangan ilavesi, gri ve beyaz dökme demirlerde çil derinliğini arttırmaktadır. Ayrıca yapıda kükürtün bağlanmasını sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Kükürtü bağlayacak miktarın üzerinde eklenmesi ile perlit oluşumunu engellemektedir. Mangan içeriği beyaz dökme demirlerde %0,7 değerinin altında olmalıdır. %1,5 üzerine çıktığında tokluk, mukavemet ve aşınma direnci özelliklerini olumsuz etkilemektedir [7].

1.6.7. Kükürt

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde optimum aşınma direnci istendiği durumlarda kükürt miktarı maksimum %0,03 olmalıdır. Bu değerin üzerinde mikroyapıda yer alan kükürt aşınma direncini olumsuz etkilemektedir [7].

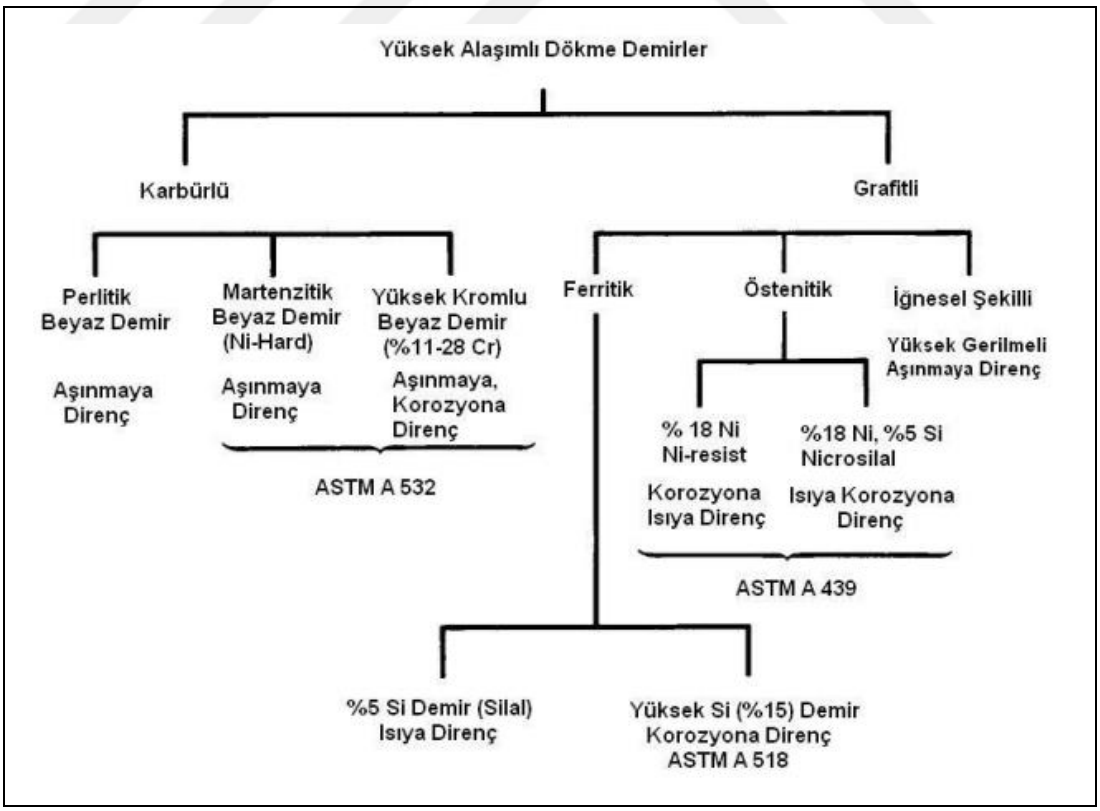
1.6.8. Fosfor

Fosfor, alaşımsız demirlerde grafit oluşturucu ve çil derinliğini arttırıcı bir alaşım elementidir. Ayrıca fosfor özellikle kalın kesitli dökümlerde molibdenin sertleştirici etkisini elimine edebilmektedir. Bu sebeple özellikle yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde fosfor içeriği %0,3'ün altında olmalıdır [7]

2. YÜKSEK ALAŞIMLI DÖKME DEMİRLER

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler genellikle kırma, taşlama, aşındırma, öğütme gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mikroyapılar, diğer malzemeyi aşındıracak ve hasar verecek şekilde içerisinde büyük ötektik karbür hacmi barındırmaktadır. Bu karbürleri destekleyen matris fazı tekrarlanan darbe dayanımı, aşınmaya karşı direnç elde etmek ve tokluk kazandırmak amacıyla uygun alaşım elementi ve ısıl işlem ile ayarlanabilmektedir [9].

Şekil 2.1'de yüksek alaşımlı dökme demirlere ait sınıflandırma görülmektedir. Bu sınıflandırmada beyaz dökme demirler, kullanım amaçlarına ve mikroyapı özelliklerine göre farklı standartlarda değerlendirilmektedir. ASTM A532 sınıflandırması, aşınma direnci yüksek martenzitik beyaz dökme demirleri içermektedir. Yüksek alaşım elementi ilavesi ve ısıl işlem ile aşınma direnci iyileştirilebilmektedir [1].



Şekil 2.1. Yüksek alaşımlı dökme demirlerin sınıflandırılması [1]

Yüksek alaşımlı dökme demirler, diğer dökme demirlerden farklı olarak %3'ten fazla alaşım elementi içermektedir. Yüksek sıcaklık uygulamaları, korozyon direnci ve aşınma dayanımı gibi özellikler yüksek alaşım ilaveleri ile sağlanabilmektedir [1].

Tüm yüksek alaşımlı demirler, grafit oluşumunu engellemek ve karbür fazın stabilitesini sağlamak amacıyla krom içermektedir. Ayrıca perlit oluşumunun engellenmesi için yapıya nikel, molibden, bakır veya kombinasyonları ilave edilmektedir [9].

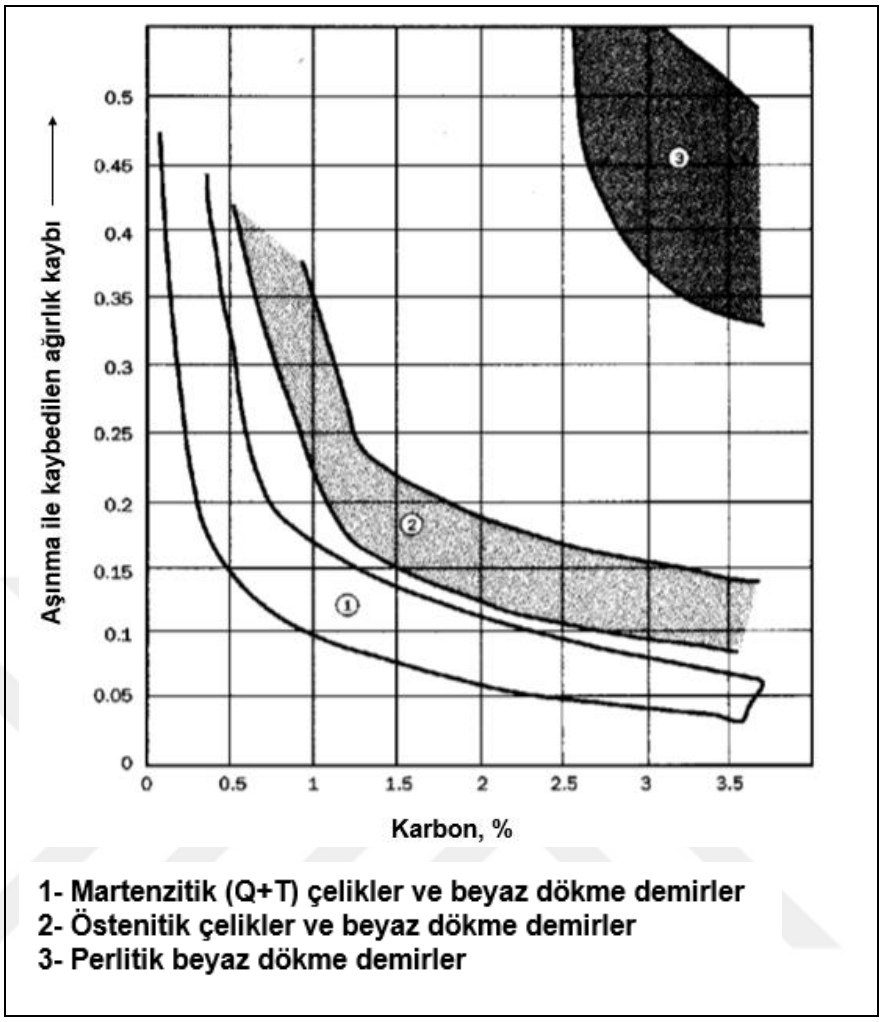
Martenzitik beyaz dökme demirler (Ni-Hard) yüksek nikel ve krom içeriğine sahip aşınma ve öğütme sanayinde yaygın kullanılan dökme demir alaşımlarıdır. Ana alaşım elementi olan nikel %3-5 oranlarında yapıya katılmakta ve perlit oluşumu alaşım ilavesi ile engellenebilmektedir [1,8].

2.1. Perlitik Beyaz Dökme Demirlerler

Demir ve çelik malzemelerde aşınma direnci karbon içeriği ve mikroyapı ile doğrudan ilişkilidir. Yapıda serbest grafit olmaması koşuluyla artan karbon içeriğiyle aşınma direnci artmaktadır. Şekil 2.2'de görüldüğü gibi düşük karbonlu çeliklerde ve beyaz dökme demirlerde aşınma direncinde artış olduğu ve martenzitik matrise sahip malzemelerde en yüksek aşınma direncinin elde edildiği görülmektedir. İkinci eğri östenitik çelikler ve dökme demirleri açıklamaktadır. Malzemelerin sertleşebilirliği, içerdiği karbon oranı ile değişim göstermektedir. Sertleştirilmiş östenitik matrise sahip bir malzemede yüksek tokluk ve aşınma direnci özellikleri elde edilmektedir.

Perlitik beyaz dökme demirlerde yüksek karbon içeriğine rağmen, düşük mekanik özellikler elde edilmektedir. Bunun nedeni zayıf matris yapısının karbür fazını destekleyici özellik gösterememesidir. Düşük gerilmeli aşınmalarda Şekil 2.2'nin aksine perlitik beyaz dökme demirlerde daha da düşük aşınma direnci elde edilmektedir [8].

Martenzitik yapıdaki beyaz dökme demirler, perlitik beyaz dökme demirlere kıyasla daha pahalı olsalar bile, aşınma dayanımı açısından perlitik dökme demirlere oranla daha fazla tercih edilmektedirler. Perlitik matrisli beyaz dökme demirlerin, aşınma direnci ve sertliğini arttırmak için düşük oranlarda krom kullanılması gerekmektedir [7].



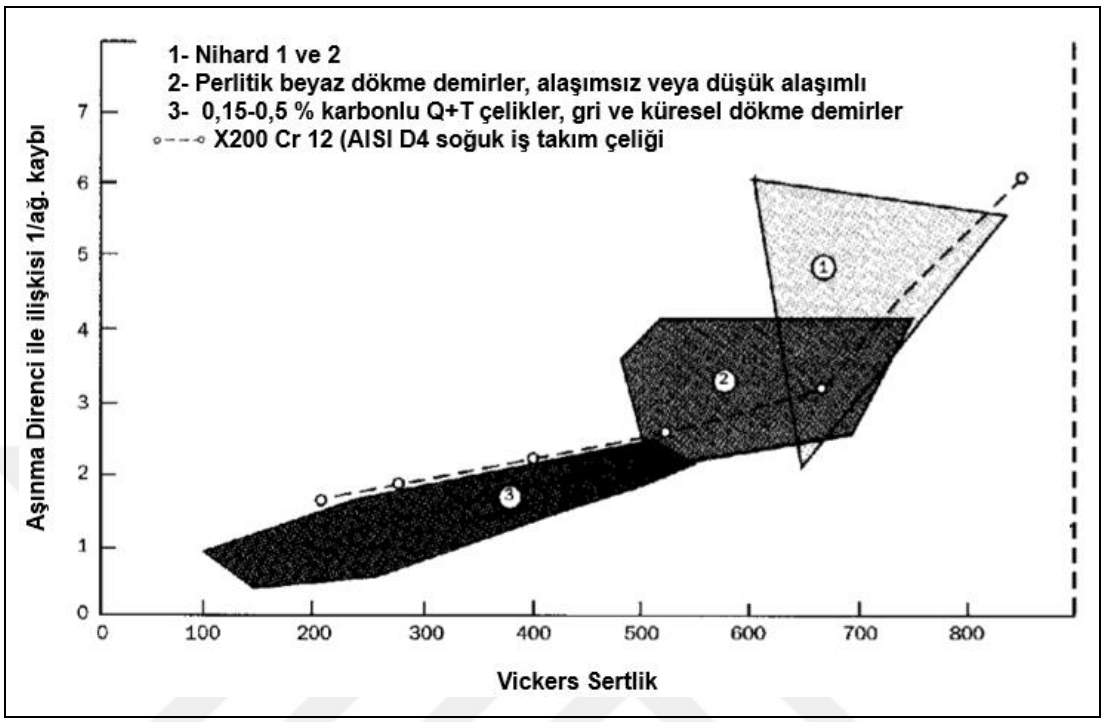
Şekil 2.2. Karbon içeriğine ve mikroyapıya bağlı olarak çeşitli dökme demirler ve çelikler için aşınma direncinin karşılaştırılması [8]

2.2. Martenzitik Beyaz Dökme Demirler

Ergiyik beyaz dökme demir malzemenin yaklaşık 540 ºC' nin altına soğutulmasıyla matris fazı östenit, beynit veya martenzite dönüşmektedir. Martenzitik dökme demirler aşınmaya dayanıklı beyaz dökme demir türüdür ve içerisinde düşük miktarda (%15 altında) kalıntı östenit içerebilmektedir. Bu kalıntı östenit metastabildir ve döküm malzemenin aşınma yüzeyi plastik deforme olduğunda deformasyon etkisiyle martenzite dönüşebilmektedir.

Beyaz dökme demirlerde karbon miktarı, mikroyapı ve alaşım elementi miktarı etkisi ile sertlik ve aşınma direnci özellikleri değişebilmektedir. Bu dökme demirler genellikle aşınma direnci ile birlikte sertliğin de istendiği aşındırma ve öğütme gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Demir esaslı malzemeler üzerinde yapılan karşılaştırmalı grafik Şekil 2.3 incelendiğinde en yüksek sertlik ve aşınma direncinin

martenzitik yapıya sahip Nihard 1 ve 2 beyaz dökme demirlerde elde edildiği görülmektedir [8].



Şekil 2.3. Demir esaslı alaşımların sertlik ve aşınma direnci ile ilişkisinin karşılaştırılması [8]

2.2.1. Ni-Hard dökme demirler

Ni-Hard dökme demirler, temel olarak aşınmaya karşı üstün direnç gösteren nikel-krom alaşımlı dökme demirlerdir. Ana alaşım elementi %3-5 oranındaki nikeldir. Ni-Hard dökme demirlerin aşınma direnci martenzitik mikroyapı ve yapıda bulunan karbürlerden kaynaklanmaktadır [1,10].

Ni-Hard dökme demirler, ASTM A532 standardına göre dört gruptan oluşmaktadır. Ni-Hard 1 ve 2 dökme demirler diğer tip Ni-Hard dökme demirlerden nispeten düşük nikel ve krom oranına sahip, yüksek sertlik ve aşınma direnci özelliği gösteren dökme demirlerdir. Bu tip dökme demirlerin mikroyapısında beynit, temperlenmiş martenzit ve karbürler bulunmaktadır. Bu özelliklerinin yanında Ni-Hard 1 tipi beyaz dökme demirler içerdiği ötektik karbür yapısı nedeniyle düşük şok direncine sahiptir. Bu tip beyaz dökme demir malzemeler, karbon oranı düşürülerek Ni-Hard 3 tipi beyaz dökme demir alaşımları elde edilmiştir. Bu tip beyaz dökme demirlerde yüksek darbe dayanımı özellikleri elde edilirken sertlik özelliğinde düşüş yaşanmaktadır. Beyaz dökme demir alaşımlarına ait kimyasal bileşimler Tablo 2.1'de verilmiştir. [10].

Ni-Hard tipi dökme demirler Nickel Company Inc. (INCO) tarafından geliştirilmiş ticari alaşımlardır. Aşınma direnci, tokluk gibi mekanik özelliklerdeki iyileştirme alaşım elementi miktarı ve yapılacak olan ısıl işlem ile ayarlanabilmektedir [10].

Tablo 2.1**.** Ni-Hard dökme demir kompozisyonları, kütle-% [10]

Element	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
Karbon	3,0-3,6	2,9 maks.	2,9-3,7	2,5-3,6
Silisyum	0,8 maks.	0,8 maks.	0,8 maks.	1,0-2,2
Mangan	1,3 maks.	1,3 maks.	1,3 maks.	1,3 maks.
Nikel	3,3-5,0	3,3-5,0	2,7-4,0	5,0-7,0
Krom	1,4-4,0	1,4-4,0	1,1-1,5	7,0-11,0
Kükürt	0,15 maks.	0,15 maks.	0,15 maks.	0,15 maks.
Fosfor	0,30 maks.	0,30 maks.	0,30 maks.	0,10 maks.

2.2.2. Ni-Hard 4 dökme demirler

Ni-Hard 4 beyaz dökme demir malzemeler, yüksek oranda krom (%7-11) ve nikel (%5-7) içeren alaşımlardır. Dökülmüş halde martenzitik matris ve ötektik karbür içeren bir yapıya sahiptirler. Düşük alaşımlı nikel-krom dökme demirlerde mikroyapı ötektik faz içerisinde M_3C karbürlerinden oluşurken, yüksek kromlu dökme demirlerde karbür tipi sürekli ağ şeklinde M_7C_3 karbürlerinden oluşmaktadır. Isıl işlem uygulanarak matris yapısı değiştirilebilir ve maksimum sertlik ve aşınma direnci elde edilebilir [1,11].

Ni-Hard 4 beyaz dökme demir malzemelerin sertliği döküm konumunda 550-600 HV aralığında gelmektedir. Yapılacak olan östenitleme (820-860 ºC) ve temperleme (200-270 ºC) işlemi ile sertliği arttırılabilmektedir [8].

Aşınma dirençleri beyaz dökme demirler ve manganlı çeliklere göre yüksektir ancak darbe mukavemetleri beyaz dökme demirler ve manganlı çelikler kadar yüksek değildir. Bu nedenle sürtünme ve aşınmanın yoğun olduğu kullanım yerlerinde tercih edilmektedirler [11].

2.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirler

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler ticari olarak üretilen en eski yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerdir. Bu malzemeler yüksek aşınma direnci özelliğiyle çimento sanayisi, öğütme değirmenleri, hadde merdaneleri, madencilik sektörü gibi birçok alanda kullanıma sahiptirler. Ancak bazı uygulamalarda aşınma direncinin yanında malzeme tokluğu da önem kazanmaktadır. Aşınma direnci ve tokluk arasındaki denge, malzeme bileşimi ve ısıl işlem ile ayarlanabilmektedir. Ek olarak, istenen mikroyapı ve karbür tipleri alaşım elementi ilavesi ile ayarlanabilmektedir [1,9].

Aşınma direnci ve aşındırıcı etkisi yüksek karbon içeriğinden kaynaklı olarak yüksek oranda M_7C_3 tipi karbür içermesinin bir sonucudur. Yapıda bulunan bu karbürler tokluk özelliklerini iyileştirici etkiye sahiptir. Aşınma, sertlik ve tokluk gibi özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapıya farklı tipte karbür oluşturucu alaşım elementleri ilave edilmektedir [12].

Yüksek kromlu beyaz dökme demirler, düşük alaşımlı Ni-Cr beyaz dökme demirlere kıyasla, daha sert ötektik karbürler bulundurmaktadır. Bu tip alaşımlarda sertlik kazanımı ısıl işlem ile gerçekleştirilebilmektedir. Isıl işlem ile malzemenin sertliğinde neredeyse iki katı oranında bir artış meydana gelmektedir. Bu artış Tablo 2.2'de gösterilmiştir. [9].

Tablo 2.2. Döküm malzemeler için tipik sertlik değerleri [8]

Matris Yapısı	**Sertlik, HB**
Perlit	320-500
Östenit	420-500
Martenzit (döküm)	550-650
Martenzit (ısıl işlem)	650-850

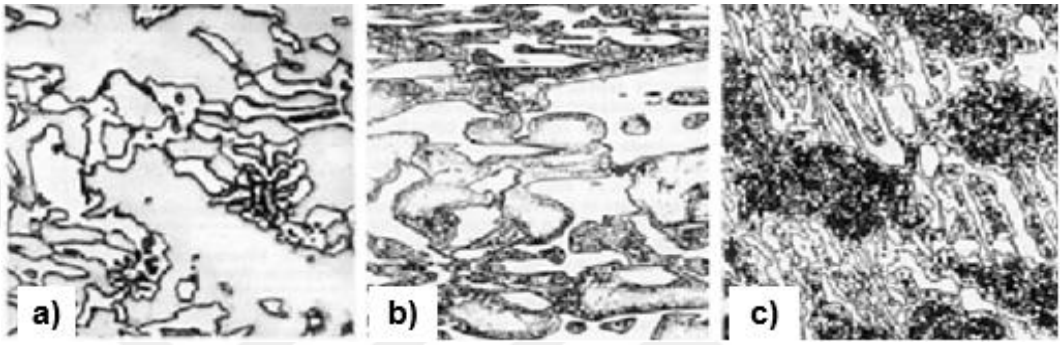
2.4. Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirlerde Mikroyapı

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demir alaşımları karakteristik mikroyapılarında kimyasal kompozisyon ve ısıl işlem durumuna bağlı olarak östenit, perlit, ferrit veya

martenzit matris içerisinde M_3C ve M_7C_3 tipi karbürlerden oluşmaktadır [13]. Malzeme özelliklerinin belirlenmesinde de matris yapısı ve karbür tipleri önem kazanmaktadır.

2.4.1. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde matris yapısı

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde matris yapısı perlit, östenit, martenzit veya bu yapıların kombinasyonu şeklinde olabilmektedir. Şekil 2.4'te örnek matris yapıları verilmiştir [1]



Şekil 2.4. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde matris yapıları. (a) Östenitik matris-500X, (b) Östenitik-martenzitik matris-500X, (c) Isıl işlem görmüş martenzitik matris-500X [1]

Perlitik matris, düşük aşınma direnci ve tokluk özelliklerine sahip olduğundan genellikle tercih edilmemektedir ve perlitik matris oluşumunun kontrol altına alınabilmesi için alaşım ilavesi yapılmaktadır [1,9].

Çoğu ticari dökümde denge dışı durumlar altında soğutma yapıldığında östenit, karbon ve krom içerisinde doygun hale gelmektedir. Perlitik dökme demir oluşumu engellendiğinde yapı, metastabil bir östenitik matris içermektedir [1,9].

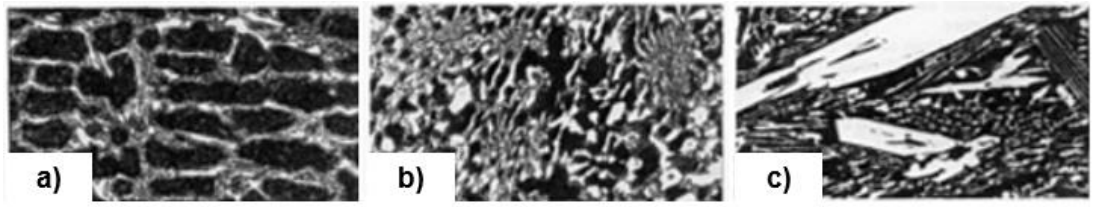
Döküm sırasında meydana gelen martenzitik matris yapısı, kalıp içerisinde hızlı soğutulan geniş kesitli dökümlerde meydana gelirken yavaş soğuma sırasında östenit matris kısmi olarak dönüşüm gerçekleştirmektedir. Bu dökümlerde genellikle martenzit matris östenitle karıştırılır. Sertlik değerleri martenzitik matristen düşüktür ve yapılacak olan ısıl işlem ile yapı martenzitik matrise dönüştürülebilmektedir [1,9].

Martenzitik matris yapısı, sertlik ve aşınma direnci özelliklerini kazandırmak amacıyla ısıl işlem ile oluşturulmaktadır. Döküm, ısıl işlem sıcaklığından soğutulurken perlit oluşumunu engelleyecek miktarda ve türde alaşım elementi içermelidir [1,9].

En yüksek aşınma direnci martenzitik matriste elde edilirken en yüksek tokluk özellikleri ise östenitik matriste elde edilmektedir [1,9].

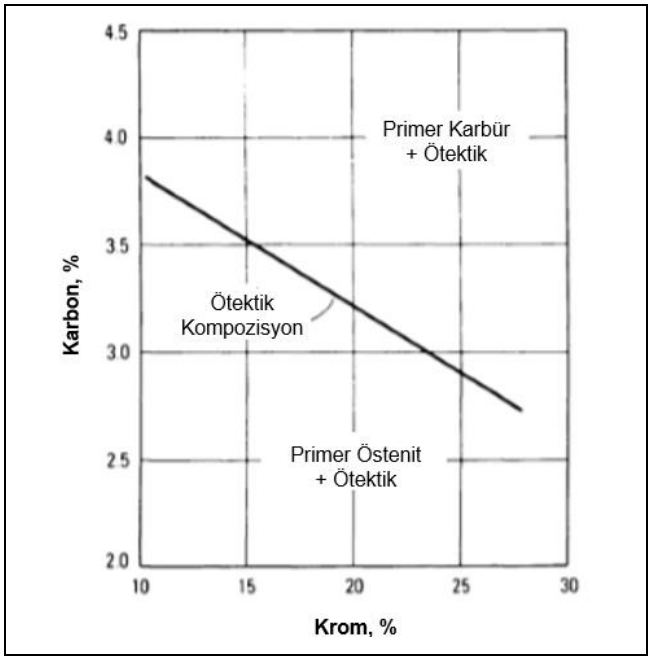
2.4.2. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde karbürler

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde bulunan karbürler sert, aşınmaya dirençli ve gevrek yapıya sahiptir. Aşınma direnci özelliğinin iyileştirilmesi karbür miktarı artışı ile gerçekleştirilmektedir. Tokluk özelliği ise metalik matriste bulunan karbon oranı ile doğrudan ilişkilidir. Karbon içeriğinin karbür fazı ve şekli üzerindeki etkisi Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5. Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde karbür yapıları (a) Hipo-ötektik karbürler, (b) Ötektik karbürler, (c) Hiper-ötektik karbürler-75X [9]

Hipo-ötektik alaşımlarda katılaşma, östenit dendritlerinin oluşumu ardından ötektik östenit matris ve M_7C_3 karbürlerinin oluşumu ile meydana gelmektedir. Şekil 2.5.c'deki gibi büyük altıgen karbürler, ötektik karbon içeriği aşıldığında meydana gelmektedir. Ergiyikten çökelen primer krom karbürler, tokluk özelliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Ötektik karbon içeriği, bu alaşımlardaki krom içeriği ile ters orantılı olarak değişim göstermektedir. Ötektik karbon içeriği ve krom içeriği arasındaki ilişki Şekil 2.6'da gösterilmektedir [1,9].



Şekil 2.6. Yüksek kromlu dökme demirlerde karbon ve krom miktarının ötektik kompozisyona etkisi [9]

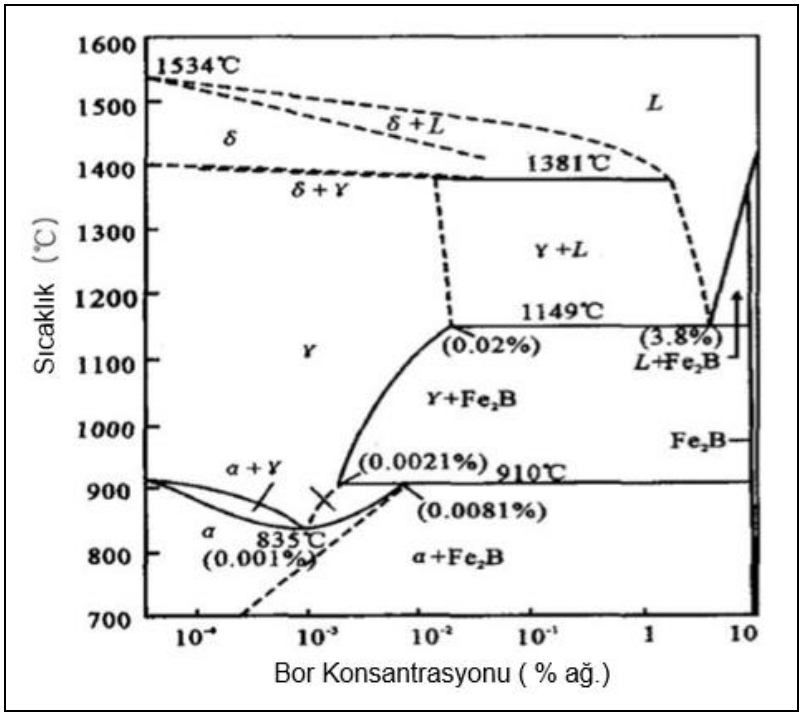
2.5. Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirlerde Kullanılan Alaşım Elementleri

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demir malzemelerde istenen özellikler kompozisyona eklenen alaşım elementleri ve bu elementlerin etkisi ile değişen karbür tipi ve matris yapısına ilave ısıl işlem ile ayarlanabilmektedir. Bor ve tungsten alaşım elementleri veya kombinasyonları ile istenen karbür ve matris yapısı elde edilebilmektedir.

2.5.1. Bor

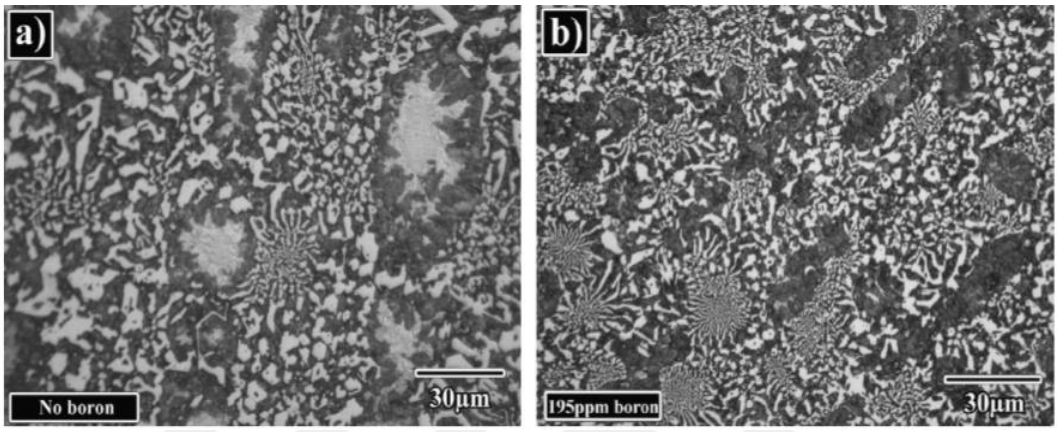
Bor, grafitleşmeyi önleyici etkisi sebebiyle yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde kullanılmaktadır. Genel olarak karbürleri inceltici ve aşınma direncini arttırıcı etkiye sahiptir [1].

Bor elementinin çözünürlüğü Şekil 2.7'deki demir-bor denge diyagramında gösterilmektedir. Diyagramda bor elementi çözünürlüğünün östenitte ve ferrite çok düşük olduğu görülmektedir. Yapıya fazla bor eklemek, mikroyapıda bor çökeltisi oluşumunu etkilemektedir. Borlu çökeltilerle aynı element ile kombinasyonundan oluşan karbürlerden daha yüksek sertlik değerine ulaşılabilmektedir. Bor bu yüzden beyaz dökme demirlerde çözünerek tokluğu arttırmak amacıyla kullanılmaktadır [14, 15, 16]. Karbürlerle karşılaştırıldığında bor çökeltileri daha yüksek sertliğe ve termal stabiliteye sahiptirler bu da fazın aşınmaya dirençli olması için potansiyel sağlamaktadır [17].



Şekil 2.7. Demir-Bor Faz Diyagramı [17]

Yüksek borlu beyaz dökme demirlerin en büyük özelliklerinden biri, matris ve bor çökeltisi miktarının alaşımdaki karbon ve bor oranı ile kontrol edilebilmesidir. Yüksek borlu beyaz dökme demirlerin döküm yapısı bir dentritik matris içerisinde, sürekli ağ şeklinde dağılmış interdentritik bileşimden oluşmaktadır. Şekil 2.8'de beyaz dökme demir yapısına bor katkısının mikroyapıdaki etkisi gösterilmiştir. Yüksek borlu beyaz dökme demirde bor çökeltisinin morfolojisi, yüksek kromlu beyaz dökme demirlerdeki karbürün morfolojisine benzemektedir [19,20].



Şekil 2.8. Beyaz dökme demirde bor katkısının mikroyapıdaki değişimini gösteren ışık mikroskobu görüntüleri [21]

Beyaz dökme demir malzemelerin yapısında, ikincil çökeltiler yüksek sıcaklıkta temperleme sırasında ortaya çıkmaktadır. Bor bir segregasyon elemanı olarak, matriste aşırı doygun olduğunda tane veya alt tane sınırlarında birikmektedir. Yüksek sıcaklıklarda temperleme yapıldığında ikincil çökelti meydana getirmektedir. İkincil çökeltilerin miktarı ve boyutu tavlama sıcaklığının artmasıyla birlikte artmaktadır [19]. Temperleme sıcaklığının artmasıyla mekanik özelliklerde değişim meydana gelmektedir. Temperleme sıcaklığı arttıkça sertlik ve tokluk özelliğinde de artış gözlemlenmektedir.

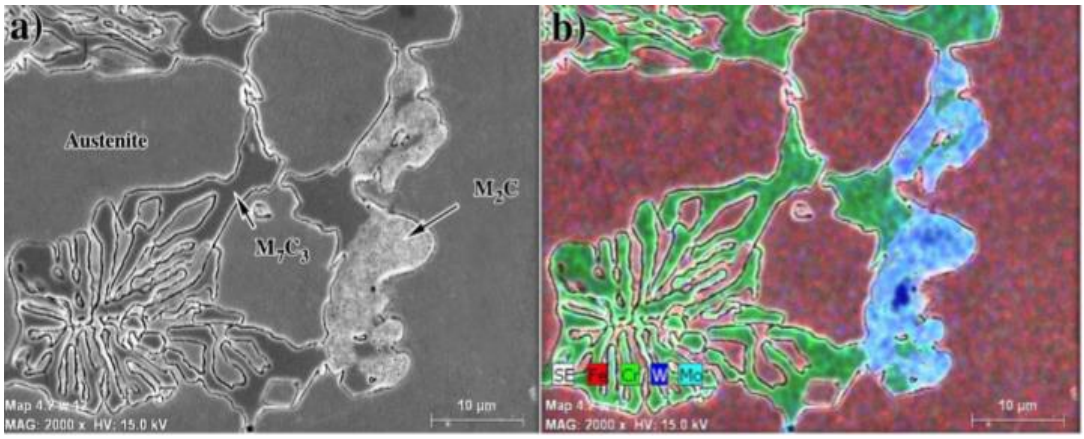
Ni-Hard 4 beyaz dökme demirlerde aşınma direncinde önemli bir değişiklik, artan bor konsantrasyonu ile gözlemlenebilmektedir. Özellikle yüksek bor katkılı beyaz dökme demirler çok yüksek bir aşınma direnci sergilemektedir [21, 22]. Bor katkısının beyaz dökme demirler üzerinde matris tokluğunu arttırıcı etkisi olduğu söylenebilmektedir [20]. Ni-Hard 4 beyaz dökme demir malzemenin tokluğu döküm konumunda, bor katkısı ile azalırken [22]; temper konumunda döküm konumuna göre önemli ölçüde arttığı sonuçları elde edilmiştir [22].

Bor oranının beyaz dökme demirlerde artışıyla karbür hacminde ve karbür oranıyla paralel bir doğrultuda sertlik özelliğinde artış meydana gelmektedir. Aşınma ve tokluk özellikleri ile birlikte sertlik özelliği de incelendiğinde 0,55 % ağ. bor oranında çalışıldığında optimum özelliklerin elde edildiği görülmüştür [22].

2.5.2. Tungsten

Tungsten içeren beyaz dökme demir döküm mikroyapıları, martenzit matris içerisinde hegzagonal yapıda M_7C_3 karbürlerinden oluşan tipik ötektik yapı şeklindedir. Karbür boyutları, miktarı ve dağılımları tungsten oranına bağlı olarak artış göstermektedir [23].

Tungsten ağırlıkça %4'e kadar eklendiğinde matris veya M_7C_3 karbürlerin sertliğinde artışa katkıda bulunmaktadır [23]. Tungsten ilavesi kütlece-%4'ü aştığında W ve Mo bakımından zengin olan mikroyapıda sert M_2C ve M_6C tipi karbürlerin oluştuğu ve alaşımların sertliğinin arttığı görülmüştür [23, 24]. Şekil 2.9'da tungsten ve molibden içeren beyaz dökme demir yapısında oluşan karbür tiplerinin EDS mapping ile tanımlandığı mikroyapı görüntüsü verilmiştir. Özellikle tungsten içeriği %10'un üzerinde olduğunda M_6C karbürler meydana gelmektedir. Ayrıca M. Anijdan ve arkadaşları, tungsten ve kromun birleşmesi ile erozyon ve korozyon direncinin arttığını bildirmişlerdir. Beyaz dökme demirlerde tungsten ile birlikte %2,5-28 krom ilavesi matris ve ötektik karbürün sertliğini arttırmada etkili olmaktadır [25].



Şekil 2.9. W ve Mo bakımından zengin karbürlerin SEM de EDS mapping ile tanımlanması [24]

Tungsten ilavesi aşınma direnci özelliği üzerinde etkili olmaktadır. İkincil karbür ve çökelti oluşumunda etkili olmayan tungsten, aşınma direncini farklı yollarla geliştirmektedir. Katı çökelti ile matris sertliğini arttırarak veya ısıl işlem ile birlikte

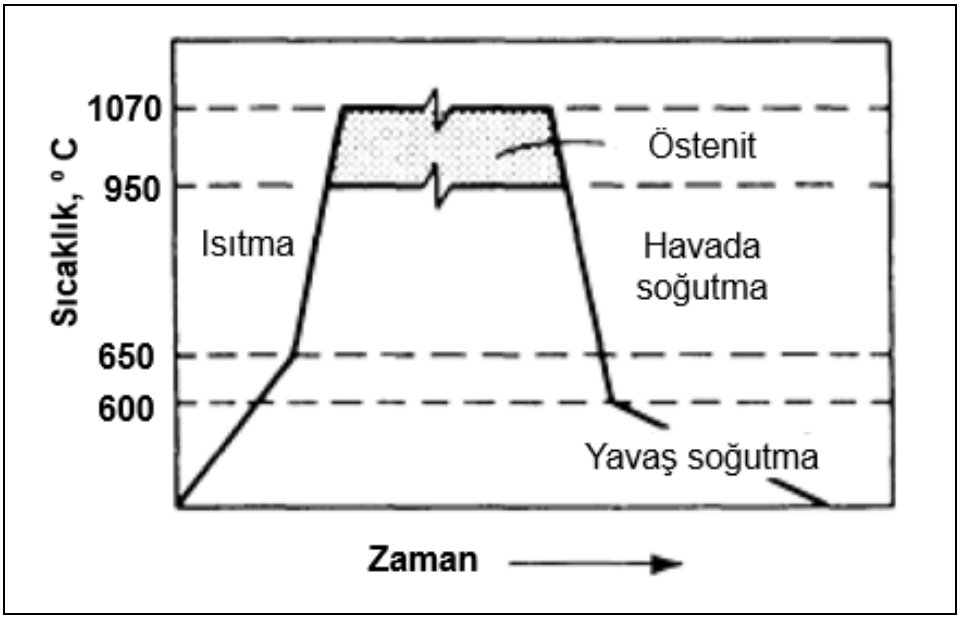
yüksek oranda martenzit matris içerisinde ötektik M_7C_3, MC, M_2C veya M_6C karbürleri oluşturarak özelliklerin gelişimine katkı sağlamaktadır [24].

Isıl işlem sonrasında matristeki karbon ve krom yüksek sıcaklıklarda çözünerek ikincil karbür olarak çökelti oluşturmaktadır. Soğutma sırasında da krom ve karbon bakımından fakirleşen matris martenzite dönüşmektedir [26]. Bunun sonucunda mikroyapı, birincil karbürlerden ve büyük miktarda ikincil çökelti takviye edilmiş martenzit ve östenitten oluşmaktadır [27]. Isıl işlem parametreleri sabit tutulduğunda ve farklı sıcaklıklarda temperleme yapıldığında aşınma direncinde değişim meydana geldiği görülmüştür [24].

2.6. Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirlerin Isıl İşlemi

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde, optimum özellikler genellikle ısıl işlem görmüş martenzitik matris ile elde edilmektedir. Alaşımlama, perlitik mikroyapının oluşmasını engelleyecek şekilde ve yeterli miktarda alaşım elementi ile sağlanmaktadır. Genel olarak aşınma dayanımı ve sertlik özellikleri martenzitik mikroyapı ile iyileştirilebilmektedir [9].

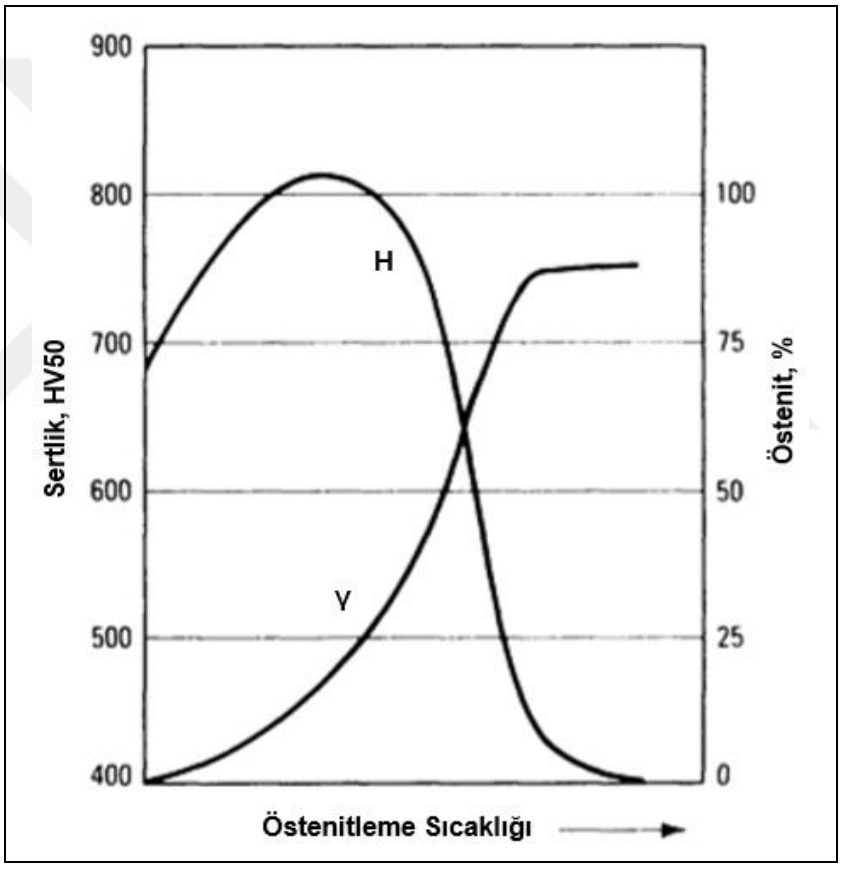
Isıl işlem sırasında çalışılacak sıcaklık ve soğutma türünün doğru belirlenmesi elde edilecek özellikler açısından doğru belirlenmelidir. Yüksek termal etki ve dönüşüm gerilmeleri yapıda çatlak oluşumuna neden olabilmektedir. Isıl işlem sürecini gösteren Şekil 2.10'da fırında ısıtma hızı ve havada soğutmanın önemini vurgulamaktadır [9].



Şekil 2.10. Yüksek kromlu demirlerde sertlik kazandırmak için uygulanan ısıl işlem sıcaklık-zaman grafiği [9]

2.6.1. Östenitleme ısıl işlemi

Östenitleme işlemi her alaşım ve istenen mekanik özellikler için farklılık göstermektedir. Isıl işlem sıcaklığı, östenit matris içerisinde kalan karbon miktarı ile belirlenmektedir. Şekil 2.11'de östenitleme sıcaklığının kalıntı östenit miktarı ve sertlik üzerindeki etkisi verilmiştir. Yüksek östenitleme sıcaklığı yapıdaki östeniti stabilize etmekte ve yüksek orandaki östenitte sertliğin düşmesine sebep olmaktadır. Düşük sıcaklıklar, düşük karbonlu martenzitin sertliğini ve aşınma direncini olumsuz yönde etkilemektedir. Sıcaklığa yüksek duyarlılık nedeniyle ısıl işlem için doğru ve homojen sıcaklıkların üretilebildiği fırınlar kullanılmalıdır [9].



Şekil 2.11. Yüksek kromlu demir malzemelerde östenitleme sıcaklığının sertliğe (H) ve kalıntı östenite (γ) etkisi [9]

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerin içerdiği krom elementi miktarı östenitleme sıcaklığında farklılık meydana getirmektedir. Yapıdaki krom karbürlerin dağılımının dengeli olması ve uygun sertlik değerlerinin sağlanması için alaşımlar yeterli sıcaklıkta ve karbürlerin denge dağılımının sağlanabileceği sürede bekletilmelidir. Isıl işlem süresi için her 25 mm (1 inch) kalınlık için 1 saat kuralı ısıl işlem için yeterli olmaktadır. Farklı tipte bir matris yapısı istendiğinde sıcaklık ve süre parametreleri değişebilmektedir [9].

2.6.2. Su verme (Quenching)

Hava ile su verme döküm malzemenin östenitleme sıcaklığından perlit sıcaklık aralığı altına (550-600 ºC) soğutulması şeklinde gerçekleştirilmektedir. Sabit bir ortam ve soğutma hızı ile döküm malzeme soğutularak istenen mikroyapı elde edilebilmektedir [9].

2.6.3. Temperleme ısıl işlemi

Sertleştirilmiş haldeki dökme demir malzemeler, temperleme veya subkritik ısıl işlem uygulanmadan kullanılabilmektedir. Ancak martenzitik matristeki tokluğun iyileştirilmesi ve gerilmelerin giderilmesi amacıyla bu malzemelere 200-230 ºC aralığında 2-4 saat süre ile temperleme işlemi yapılması gerekmektedir. Sertleştirme sonrası mikroyapıda %10-30 aralığında kalıntı östenit bulunmaktadır. Kalıntı östenit miktarı temperleme ile dönüştürülebilmektedir [9].

2.6.4. Gerilim giderme ısıl işlemi

Isıl işlem görmüş olan malzemelerde, östenitten martenzite dönüşüm sırasında hacimsel değişimin sonucu olarak malzemede gerilimler meydana gelmektedir. Düşük sıcaklıkta temperleme işleminde, temperlenen martenzit fazının tokluğunda %20 oranında bir iyileşme meydana getirmektedir. Malzemedeki gerilimler, 540 ºC'de temperleme ve ardından kontrollü soğutma yapılarak en aza indirilebilmektedir [9].

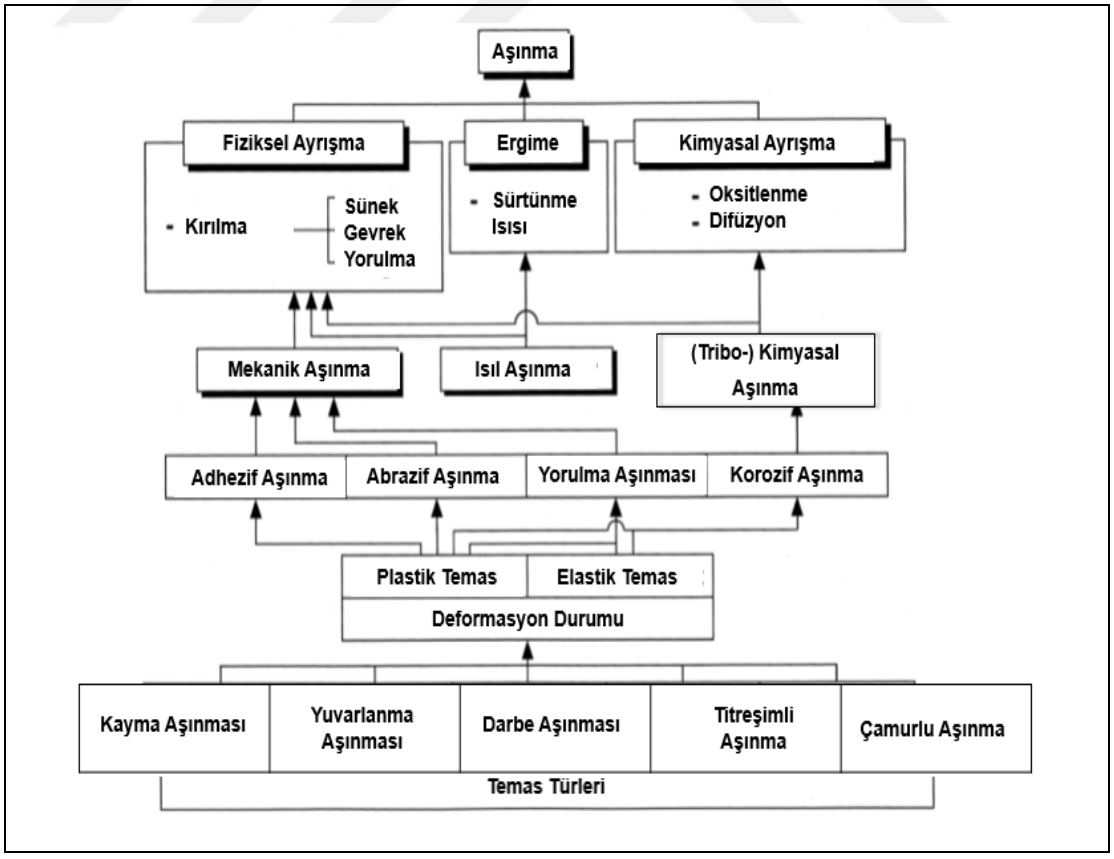
2.7. Yüksek Alaşımlı Beyaz Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirler çimento, seramik, boya, kömür, çelik, döküm ve madencilikte geniş kullanım alanına sahiptir. Bu alanlarda genellikle yüksek aşınma direnci, sertlik ve tokluk özelliği ile tercih edilmektedir. Hadde merdaneleri, öğütücü bilyalar, pompa parçaları, öğütücü gömlekleri ve karıştırıcı bıçaklar yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerin kullanıldığı bazı tipik uygulamalardır [8,10].

3. AŞINMA MEKANİZMASI

Aşınma, birbiri ile etkileşen yüzeylerin sonucu meydana gelen ve bir yüzeyden malzeme kaybına neden olan mekanizmadır. Makine ve ekipmanlar gibi mühendislik malzemelerinin kullanımı sırasında çok büyük ekonomik kayıplara sebep olabilmektedir. Bu nedenle aşınma özelliği alaşım elementi ilavesi veya ısıl işlemler ile iyileştirilmeye çalışılmaktadır [28].

Bir aşınma sisteminde; ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük ve hareket aşınmanın temel unsurlarını oluşturmaktadır. Bütün bu bileşenlerin oluşturduğu sistem, teknikte "Tribolojik Sistem" olarak adlandırılmaktadır. Aşınma özelliği, dinamik parametrelerden, çevresel parametrelerden ve malzeme parametrelerinden oluşan bir tribosistemdir. Şekil 3.1'de aşınmanın oluşum mekanizmaları ve aşınma mekanizmalarının birbiri ile olan ilişkilerini göstermektedir [28].



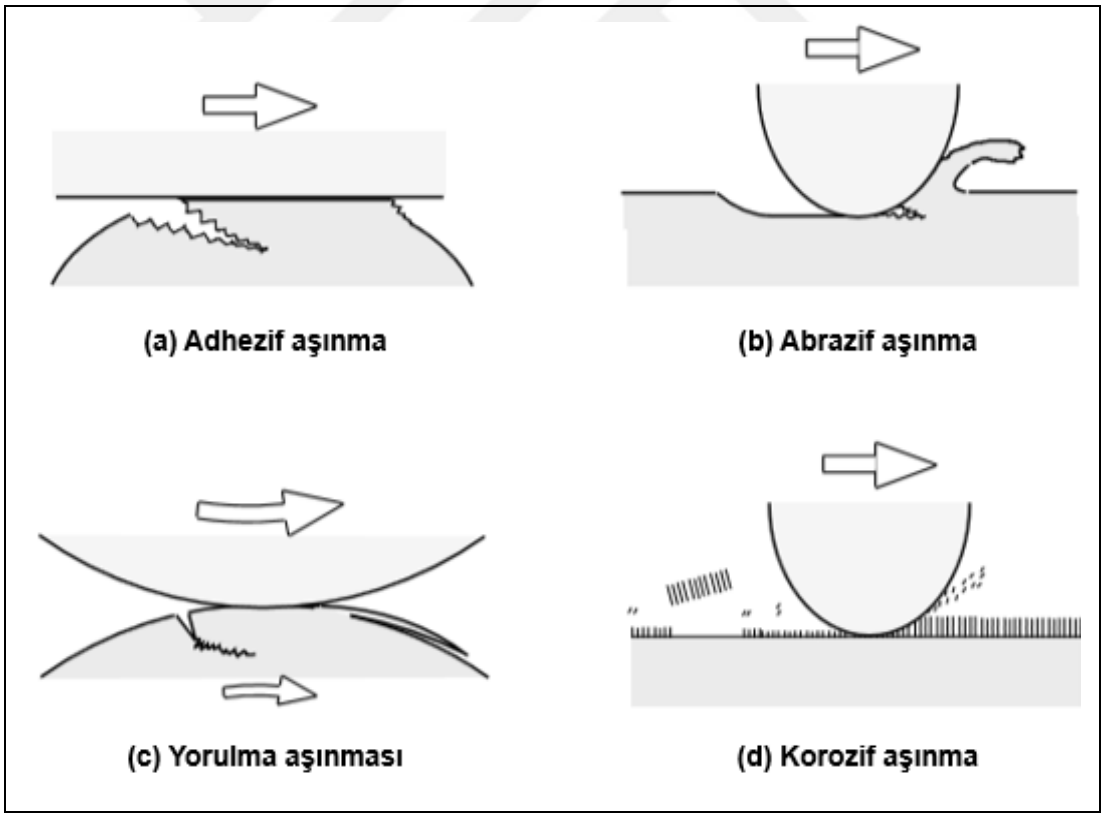
Şekil 3.1. Aşınma mekanizmaları ve birbiriyle olan ilişkileri [1]

Aşınma, kaybedilen hacim miktarı ve aşınma yüzeyinin durumu ile değerlendirilmektedir. Aşınma; aşınma derecesi, aşınma oranı, spesifik aşınma oranı veya aşınma katsayısı ile tanımlanmaktadır. Özgül aşınma oranı birim mesafe ve birim yük başına aşınma hacmi olarak tanımlanmaktadır [28].

Malzemenin çalışma koşullarının tasarımı ve malzeme seçimi aşınmayı kontrol etmede önem taşımaktadır. Bu nedenle aşınma modlarının bilinmesi gerekmektedir [28].

Aşınma modları temel olarak dört başlık altında toplanmaktadır Aşınma türleri ile ilgili şematik gösterim Şekil 3.2'de verilmiştir [28]:

1. Adhezif Aşınma
2. Abrazif Aşınma
3. Yorulma Aşınması
4. Korozif Aşınma



Şekil 3.2. Aşınma mekanizmalarının şematik gösterimi [28]

Adhezif ve abrazif aşınma plastik temas altında oluşan aşınma modlarıdır. Birbiri ile temas halindeki malzemelerin ara yüzlerinde plastik temas durumunda adhezif yapışma mukavemeti mevcuttur. Bu kuvvet sonucunda yüzeyden ayrılma meydana

gelerek oluşan aşınma modu, adhezif aşınma olarak adlandırılmaktadır. Abrazif aşınma yumuşak bir malzeme ve malzemeye göre daha yüksek sertliğe sahip malzeme arasında meydana gelen ve yumuşak malzemede kazıma şeklinde oluşan aşınma türüdür [28].

Akma durumundaki temas halinde tekrarlanan sürtünme döngüleri sonucunda yüzeyde yorulmadan kaynaklı aşınma meydana gelmektedir. Bu aşınma türü yorulma aşınması olarak adlandırılmaktadır. Korozif aşınma, aşındırıcı ortamda yüzey ile temas halinde bulunan kimyasal etki sorucu yüzeyde meydana gelen tribokimyasal reaksiyon ile oluşmaktadır [28].

Malzemenin maruz kaldığı çalışma koşulu, çalışma ortamı ve yük gibi parametreler aşınma modunun belirlenmesinde etkili olmaktadır [28].

3.1. Aşınma Mekanizmaları

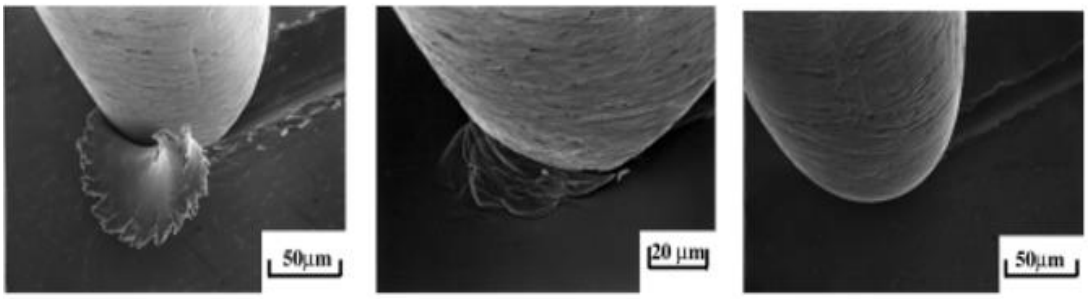
Aşınma modları, geleneksel olarak dört türde ele alınmaktadır. Bu aşınma modları adhezif aşınma, abrazif aşınma, yorulma aşınması ve korozif aşınmadır [28].

3.1.1. Adhezif aşınma

Plastik temas altındaki iki yüzey arasında kaymaya dayanacak yeterli adhezif (yapışma) kuvveti mevcut değilse, bu bölgede meydana gelecek bir sürtünme sonucunda deformasyon meydana gelmektedir. Bu deformasyon sonucu yüzeyde gerilme ve kaymaya bağlı olarak çatlaklar oluşmaktadır. Çatlak, temas ara yüzeyine ulaştığında ise malzemeden aşındıran yüzeye malzeme yapışması meydana gelmektedir. Temas yüzeyinde yeterli seviyede adhezif kuvvet olmadığında bu aşınma modu ortaya çıkmaktadır [28].

3.1.2. Abrazif aşınma

Birbiri ile temas halinde olan iki yüzeyde sert ve yumuşak yüzey arasında meydana gelen aşınma türüdür. Temas halinde olan sert ve eğimli yüzey yumuşak malzeme üzerinde kayarken belirli bir hacimde malzemeyi yüzeyden uzaklaştırmakta ve yumuşak malzeme üzerinde izler meydana gelmektedir. Bu aşınma türüne abrazif aşınma denilmektedir. Malzemelerin sünek veya gevrek olmasına göre de aşınma şekilleri farklılık göstermektedir. Şekil 3.3'te abrazif aşınmaya ait elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir [28].



Şekil 3.3. Abrazif aşınma türünün taramalı elektron mikroskobu görüntüleri [28]

3.1.3. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, tekrarlanan adhezif veya abrazif aşınma döngülerinde temas sırasında meydana gelmektedir. Aşınmanın meydana gelmesi için tekrarlanan temas gerekli koşulu oluşturmaktadır. Temas döngüsü sayısına göre yüksek çevrimli yorulma veya düşük çevrimli yorulma olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.4'te tekrarlı aşınma sürtünmesinin plastik akış üzerindeki etkisi verilmiştir [28].



Şekil 3.4. Tekrarlanan aşınma kaymasının plastik akışın büyümesi üzerine etkisi [28]

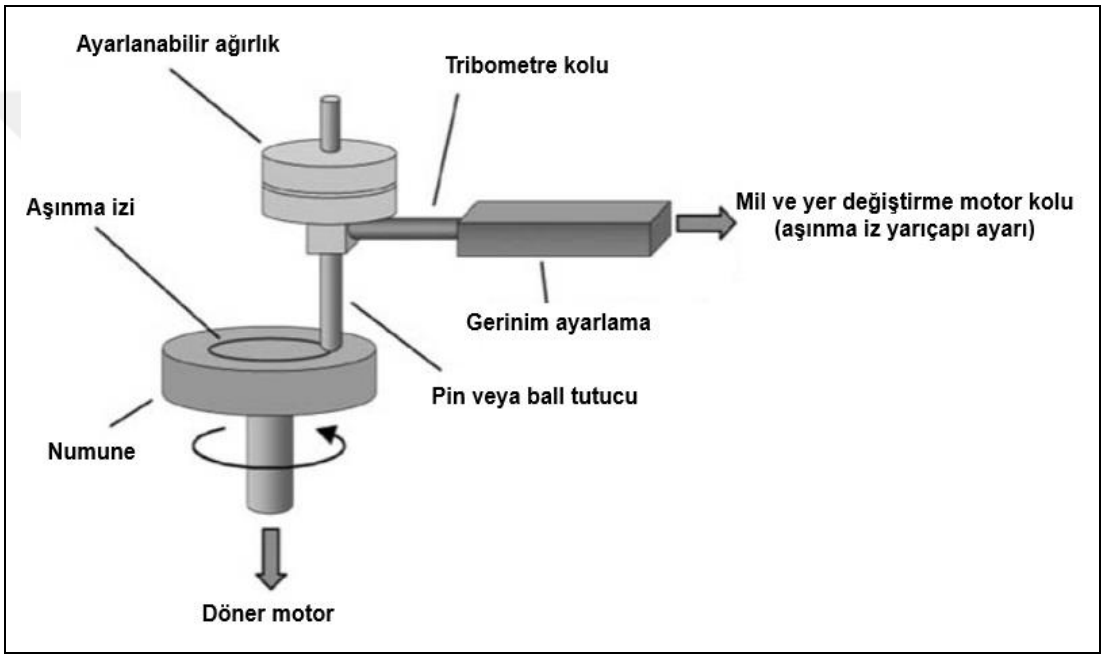
3.1.4. Korozif aşınma

Aşınma, aşındırıcı gaz ve sıvı varlığında gerçekleştiğinde yüzey ile kimyasal veya elektrokimyasal etkileşimler meydana gelmektedir. Aşındırıcı ortam tarafından hızlandırılan bu tür aşınmaya korozif aşınma denilmektedir. Korozif aşınma sırasında yüzeyde tribokimyasal bir reaksiyon tabakası meydana gelmektedir. Bu tabakanın bir kısmı aşınma sürtünmesi ile yüzeyden uzaklaştırılsa da aşınma ve reaksiyon katmanları oluşmaya devam etmektedir. Bunun sonucunda yüzeyden malzeme ayrılması meydana gelmektedir [28].

3.2. Aşınma Ölçümü

Aşınma testleri, farklı deney düzenekleri ile gerçekleştirilebilmektedir. Aşınma deneylerinde en yaygın kullanılan deney düzeneği, bir disk ve üzerine bastırılan pim şeklindedir. Bu yönteme "Pin-on-disk" metodu denilmektedir. Deney düzeneği Şekil

3.5'te gösterilmiştir. Sabit bir pim, örneğin üzerine bağlanır ve diskin üzerine bağlı olan örnek pim yardımıyla aşındırılır. Aşındırıcı pimin uygulayacağı kuvvet üzerine yüklenen ağırlıklarla ayarlanabilmektedir. Aşınma sonuçları bu ağırlıklara göre farklılıklar gösterebilmektedir. Ağırlığı ayarlanan aşındırıcı pim, sabit olarak düzeneğe bağlanarak belirlenen hızda ve mesafede numune yüzeyini aşındırmaktadır. Bu test yönteminde dikkat edilmesi gereken konu incelenecek olan numunenin yüzeyinin metalografik olarak doğru hazırlanması ve yüzeyinde pürüzlülük olmamasıdır. Numunenin sertliği ve malzeme türüne göre pim malzemesi de farklılık göstermektedir [29].



Şekil 3.5. Pin-on-disk test düzeneği [30]

Pin-on-disk test metodu için test parametreleri,

- Yük
- Hız
- Mesafe
- Sıcaklık
- Atmosfer

şeklinde sıralanabilir. Bu parametrelerin test sırasında kontrol edilmesi ve malzeme cinsine göre ayarlanması gerekmektedir [29].

3.3. Aşınma Hacmi ve Aşınma Oranının Hesaplanması

Aşınma oranları, ağırlık veya hacim kaybı olarak hesaplanabilmektedir. Ağırlık kaybı hesaplaması malzemenin aşınma testi öncesi ve sonrasında temizlenmiş ve kurutulmuş konumdaki ağırlıkları üzerinden yapılmaktadır. Hacim kaybı ile ölçümünde ise malzemenin aşınma sonrasında bilye veya numune yüzeyinde oluşan aşınma izi ölçüleri ile hesaplama yapılmaktadır.

Aşınma ölçümleri, pim veya disk için milimetre cinsinden hesaplanabilmektedir. Eğer, aşınma bilyede gerçekleşiyorsa Denklem 4.1 aşınma numune yüzeyinde gerçekleşiyorsa Denklem 4.2 kullanılmaktadır. Hem pim hem de numunede aşınma gerçekleşir ise, bu durumda her iki hacmin de ölçülmesi gerekmektedir. Numune yüzeyinde hesaplanan değer ardından özgül aşınma oranı formülünde yerine koyularak özgül aşınma oranı hesaplanmaktadır. Özgül aşınma oranı hesaplamasına ait eşitlik, Denklem 4.3'te verilmiştir [29].

Bilye için;

$$\text{Bilye Kayıp Hacmi } (mm^3) = \left(\frac{\pi h}{6}\right).\left[\frac{3d^2}{4}+h^2\right] \;;\quad h=r-\sqrt{r^2-\frac{d^2}{2}} \qquad (4.1)$$

d:aşınma izi çapı, r:bilye yarıçapı

Numune için;

$$\text{Numune Kayıp Hacmi } (mm^3) = 2\pi R\left[\, r^2.\sin^{-1}\left(\frac{w}{2r}\right)-\left(\frac{w}{4}\right)\sqrt{4r^2-w^2}\,\right] \qquad (4.2)$$

R:aşınma izi yarıçapı, w=aşınma izi genişliği, r:bilye yarıçapı

Özgül Aşınma Oranı;

$$\text{Özgül aşınma oranı, } \frac{mm^3}{N.m} = \frac{\text{numune kayıp hacmi } (mm^3)}{\text{normal yük (N) x toplam sürtünme mesafesi (m)}} \qquad (4.3)$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

4. MALZEME VE YÖNTEM

4.1. Malzeme

Bu çalışmada Ni-Hard 4 dökme demir malzeme kompozisyonu referans alınarak farklı alaşım elementleri ve oranları ile denemeler yapılmıştır. Tablo 4.1'de ASTM A532 standardına göre Ni-Hard 4 alaşım kompozisyonu verilmiştir. Tablo 4.2'de de literatürde yer alan Ni-Hard 4 alaşımı ile yapılan çalışmalara ait kompozisyonlar verilmiştir.

Tablo 4.1. Nihard 4 dökme demir malzeme kompozisyonu, kütle-% [31]

Numune	**C**	**Si**	**Cr**	**Mn**	**Ni**	**Mo**	**P**	**S**
Ni-HiCr	2,5-3,6	≤ 2	7-11	≤ 2	4,5-7	≤ 1,5	≤ 0,1	≤ 0,15

Tablo 4.2. Literatürde yer alan Ni-Hard 4 malzeme kompozisyonları, kütle-%

Referans	**C**	**Si**	**Cr**	**Mn**	**Ni**	**Mo**	**P**	**S**	**Diğer**
M.Çöl, 2016 [22]	2,89	1,43	9,22	0,90	6,15	1,03	0,25	0,16	0,13
K.S. Al-Rubaie, 2014 [32]	2,90	1,68	9,02	0,58	5,24	0,14	0,047	0,026	-

Çalışmada optimum malzeme özelliklerin elde edildiği %0,50 sabit bor oranına sahip alaşıma ilave kütlece farklı oranlarda tungsten alaşım elementi eklenerek alaşım kombinasyonu oluşturulmuştur. Yapılan bu kombinasyon ile amaçlanan kullanım alanlarına en uygun malzeme özelliklerini elde etmektir. Özellikle yüksek sertlik, aşınma dayanımı ve tokluk özelliklerinin istendiği koşullarda kullanım alanı bulan bu malzemeler için çalışma kapsamında kullanılan bor alaşım elementi ile tokluk ve aşınma dayanımı, tungsten katkısı ile de sertlik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Tungsten veya bor ilavesi yapılmış beyaz dökme demir alaşımları ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Ancak bor ve tungsten alaşım elementlerinin kombinasyonu şeklinde bir çalışmaya literatür tarama sırasında rastlanmamıştır.

4.2. Ergitme ve Döküm

Beyaz dökme demir malzemelerin dökümü Şekil 4.1'de gösterilen Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Döküm Laboratuvarında bulunan INDUCTOTHERM 35 KW indüksiyon fırınında gerçekleştirilmiştir.

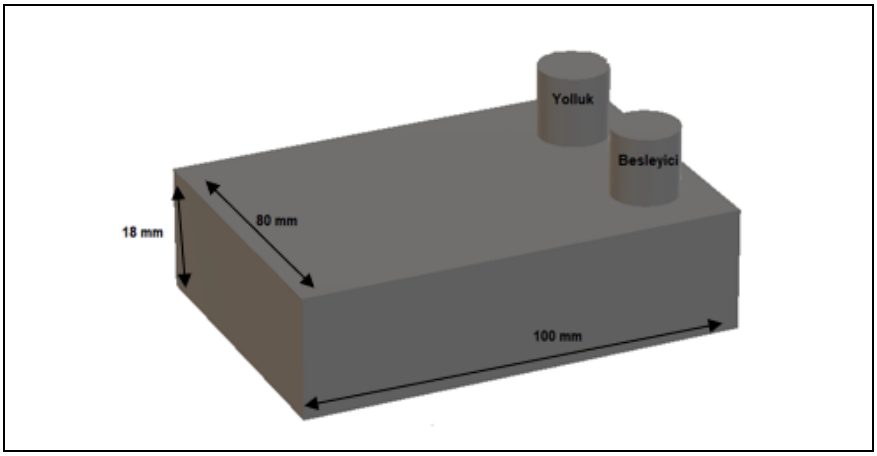


Şekil 4.1. Ni-Hard 4 beyaz dökme demir alaşımlarının dökümünde kullanılan Inductotherm 35 KW indüksiyon fırını

Alaşımlar ergitildikten sonra 100 x 80 x 18 mm boyutlarında kum kalıpta şekillendirilmiştir. Dökümde kullanılan kum kalıplar, Şekil 4.2'de ve döküm sonrasında oluşan geometrinin şematik gösterimi de Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Ni-hard 4 beyaz dökme demir malzemelere ait kum kalıp modeli



Şekil 4.3. Ni-hard 4 beyaz dökme demir malzemelerin döküm geometrisi

4.3. Kimyasal Bileşim Analizi

Dökümü yapılan beyaz dökme demir alaşımlarının kimyasal analizleri, Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünde bulunan Foundry-Master marka optik emisyon spektrometresinde belirlenmiştir.

Tungsten-bor serisi için 0,50 sabit bor oranına ek alaşımlara %1, 2, 3 ve 4 oranlarında tungsten alaşım elementi ilave edilmiştir. Alaşımlara ait döküm sonrası oluşan kimyasal bileşimler Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. Tungsten ve bor serisi dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu

Numune	C	Si	Cr	Mn	Ni	Mo	Cu	P	S	B	W
1	3,38	0,75	8,00	0,82	6,28	1,47	0,006	0,09	0,09	0,5	1,15
2	3,33	0,57	9,32	0,72	6,71	1,43	0,01	0,07	0,07	0,5	2,21
3	3,20	0,68	9,13	0,82	6,99	1,34	0,02	0,05	0,05	0,5	3,06
4	3,30	0,45	8,85	0,81	6,76	1,29	0,01	0,09	0,13	0,5	3,71

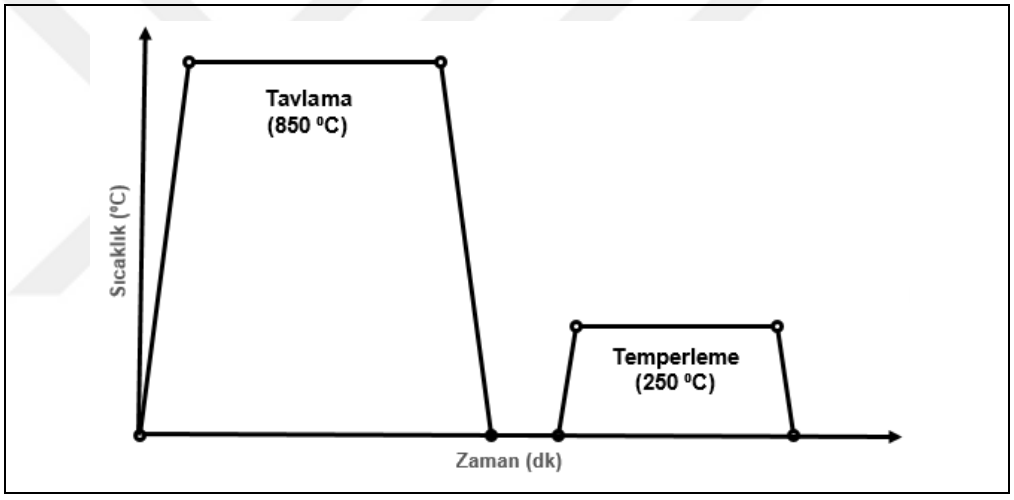
4.4. Diferansiyel Termal Analiz (DTA)

Numunelerin solidüs ve likidüs sıcaklıklarının ve tungsten etkisinin belirlenmesi amacıyla döküm numunelere Diferansiyel Termal Analiz (DTA) yapılmıştır. Numuneler 500 ºC'den 1350 ºC'ye 20 K/dk hızla ısıtılmış ve ardından aynı hızla oda

sıcaklığına soğutulmuştur. Analizde Kocaeli Üniversitesi Termal Analiz Laboratuvarında bulunan NETZSCH marka STA 409 PG model DTA analiz cihazı kullanılmıştır.

4.5. Isıl İşlem Uygulamaları

Isıl işlem uygulamaları, Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Isıl İşlem Laboratuvarlarında bulunan LINN HIGH TERM-VMK 1600 model ısıl işlem fırınında gerçekleştirilmiştir. Döküm alaşımlardan alınan numunelere literatürden belirlenen süre ve sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanmıştır. 850 ºC'de 5 saat süre ile tavlama yapılarak havada sertleşme uygulanmış ve ardından 250 ºC'de 4 saat süre ile temperleme yapılmıştır. Alaşımlara uygulanan ısıl işlem çevrimi ile ilgili grafik Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4. Numunelere uygulanan ısıl işlem çevrimi grafiği

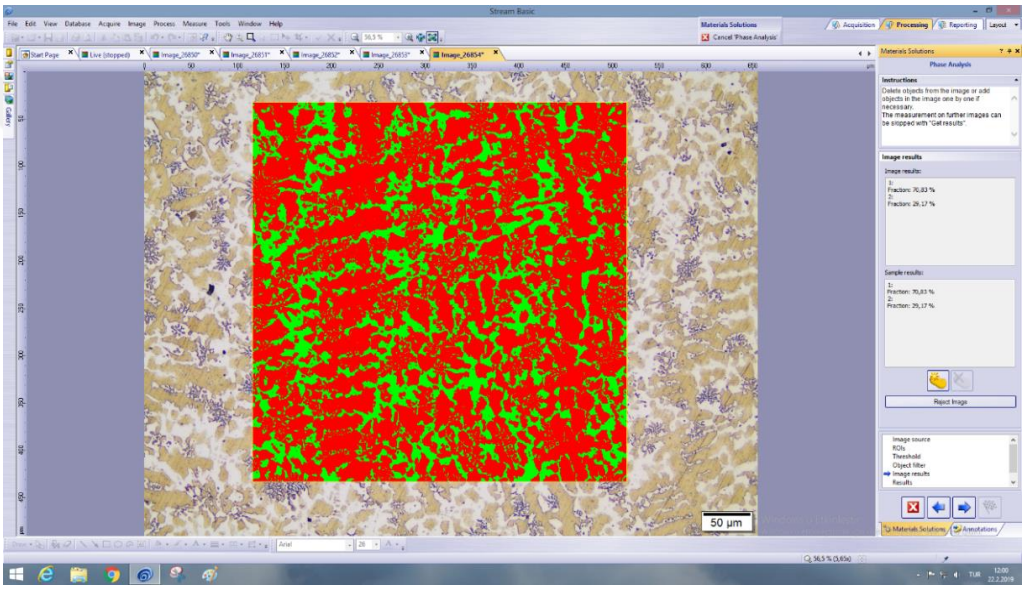
4.6. Malzeme Karakterizasyonu

Mikroyapı incelemeleri ve mekanik testler için döküm ve temperlenmiş konumundaki numuneler metalografik olarak klasik numune hazırlama yöntemleri ile hazırlanmıştır. Tüm numuneler sırasıyla 60, 120, 320, 600, 1000 mesh zımparalama ile zımparalanmış ve ardından 3 µm elmas solüsyon ile parlatılmıştır. Mikroyapı incelemeleri için numuneler Beraha II (800 mL H_2O, 400 mL HCl, 48 g NH_4HF_2, 1 g $K_2O_7S_2$) çözeltisiyle 30 saniye süre ile dağlanmıştır.

Mikroyapı incelemeleri ve karbür ölçümleri için Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Işık Mikroskobu ve SEM Laboratuvarında bulunan Olympus marka BX41M-LED model Işık Mikroskobu ve IXRF marka EDX ataçmanlı Jeol JSM 6060 Scanning Electron Microscope (SEM) kullanılmıştır. Numune incelemeleri ve

elementel analiz için 15 kV voltaj değerinde çalışılmış ve farklı büyütmelerde topografik kontrast modunda görüntüler alınmıştır. Matris ve karbür bileşenler için bu alanlarda alansal ve noktasal Energy Dispersive X-ray (EDX) analizleri yapılmıştır.

Karbür ölçümleri, ışık mikroskobunda gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için 10 farklı alandan ve parça genelini temsil eden bölgelerden görüntüler alınmıştır. Alınan ölçümlerde 20X büyütmedeki mikroyapı görüntüsü üzerinde 0,4 x 0,4 mm'lik bir alan belirlenmiş ve bu alanda karbür fazı ve matris fazı arasında dağlama ile oluşan renk farkı üzerinden yüzdesel olarak martiks ve karbür fazı oranı elde edilmiştir. Kullanılan yazılıma ait görüntü Şekil 4.5'te verilmiştir.



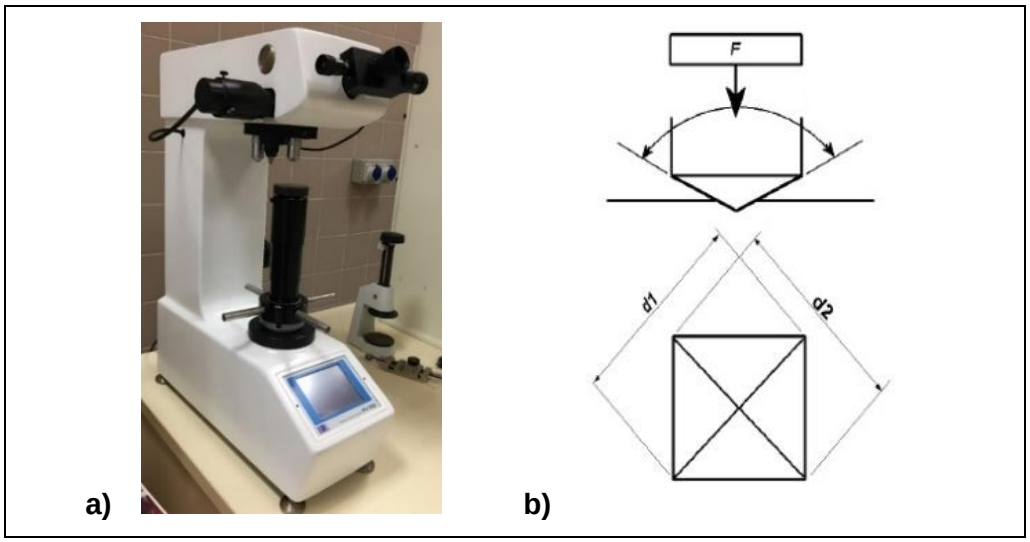
Şekil 4.5. Karbür ölçümünde kullanılan yazılıma ait ekran görüntüsü

4.7. X-ışını Radyografisi (XRD)

XRD analizleri, Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan Rigaku marka difraktometre ile 2θ= 10-90º arasında, 1 der/dk hız ile gerçekleştirilmiştir. Temperlenmiş konumdaki en yüksek tungsten oranına sahip numune kullanılmış, karbür ve ikincil çökeltiler belirlenmiştir.

4.8. Sertlik Ölçümü

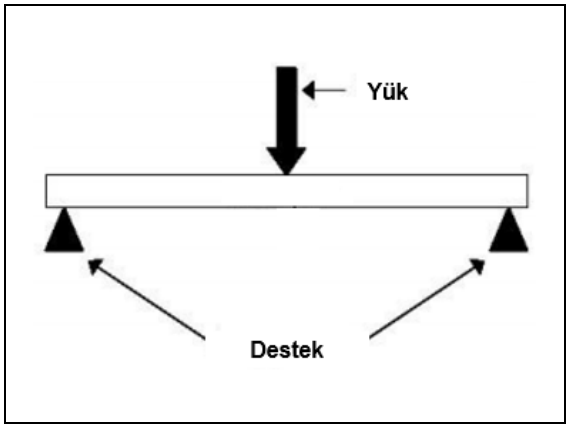
Sertlik ölçümleri, Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Mekanik laboratuvarında bulunan, FUTURE-TECH marka Vickers sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Ölçümlerde kullanılan sertlik ölçüm cihazı ve sertlik ölçümüne ait şematik görüntü Şekil 4.6'da verilmiştir. Ölçümler, 30 N/10 s boyunca oluşan iz üzerinden yapılmıştır.



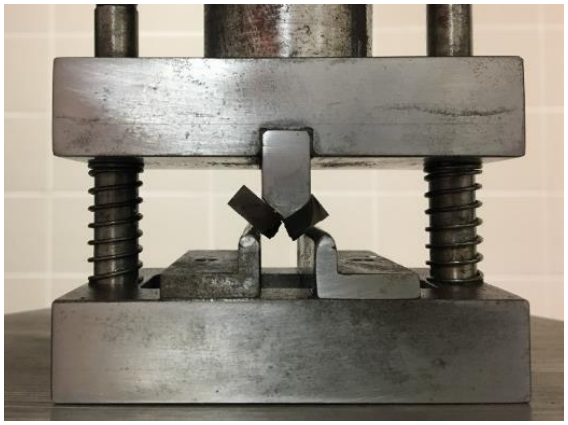
Şekil 4.6. Sertlik ölçümü için kullanılan; (a) Future-Tech Vickers ölçüm cihazı, (b) Sertlik izi şematik görüntüsü

4.8. Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testleri, Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Mekanik laboratuvarında bulunan INSTRON marka, 300 kN yük kapasiteli çekme-basma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Döküm ve temper konumundaki malzemelerin tokluğunun ölçülmesi için seçilen bu yönteme ait şematik görüntü Şekil 4.7'de verilmiştir. ASTM E399 standardına uygun deney düzeneğinde iki destek arasında ters yönde kuvvet uygulanarak numuneler gevrek kırılmaya zorlanmıştır. 7 mm genişlik ve 6 mm kalınlığa sahip numuneler test sırasında iki destek arası mesafe 14 mm üzerine koyularak belirli hızda yüke maruz bırakılmıştır. Numunelerin kırılmadan dayanabildiği maksimum yükler ölçülmüştür. Numunelere ait kırılma sonrası görüntüsü Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Üç nokta eğme testine ait şematik görüntü



Şekil 4.8. Numunelere ait gevrek kırılma görüntüsü

4.10. Aşınma Testi

Aşınma testleri, Kocaeli Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği laboratuvarında bulunan pin-on-disk aşınma testi cihazı ile yapılmıştır. Cihazın genel görünümü Şekil 4.9'da verilmiştir.

Testler ASTM G99 standardına uygun şekilde yapılmış ve deney parametreleri malzemeye ve literatüre uygun seçilmiştir. Beyaz dökme demir numuneler, 50 N yük ve 120 rpm dönme hızı ile 10 mm çapında iz oluşacak şekilde 250 metre boyunca aşınmaya maruz bırakılmıştır. Testler, ortalama ve standart sapma alabilmek adına beş kez tekrarlanmıştır. Özgül aşınma oranları Denklem 3.2 ve Denklem 3.3 kullanılarak hesaplanmıştır.



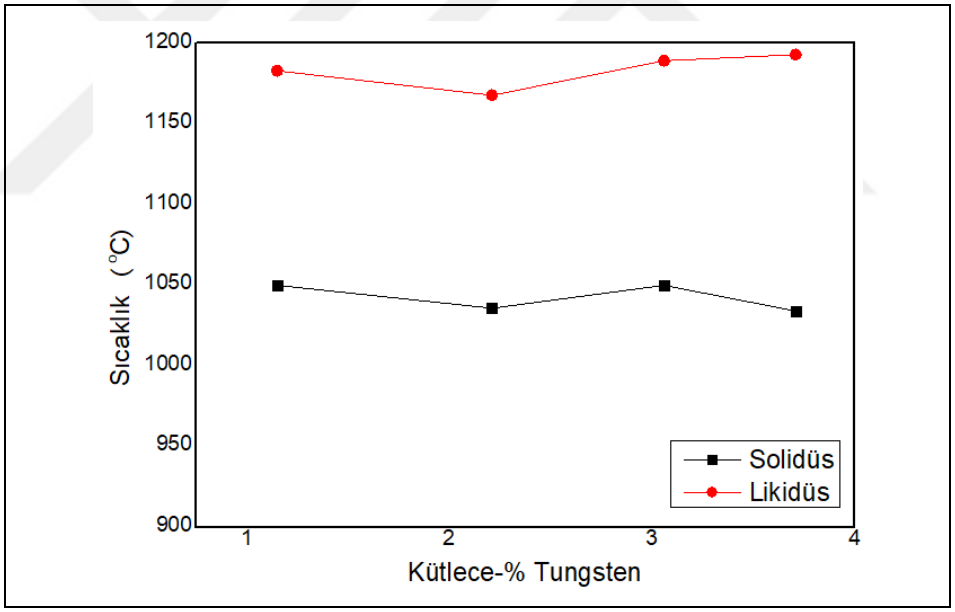
(a) **(b)**

Şekil 4.9. (a) Aşınma test düzeneği ve (b) test sırasında alınan görüntü

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

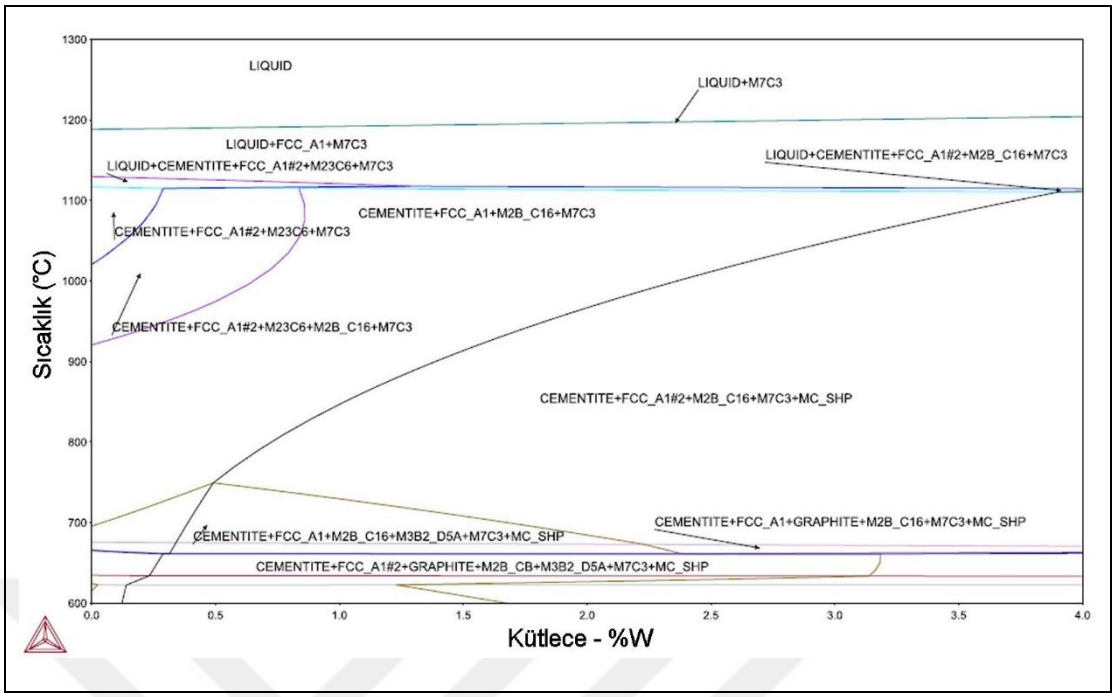
5.1. DTA Analizi

Bor ve tungsten katkılı Ni-Hard 4 beyaz dökme demir malzemelerin katılaşma davranışının sabit bor oranında artan tungsten miktarı ile değişimi bu katkının dönüşüm sıcaklıklarına etkisi incelenmiştir. Şekil 5.1 incelendiğinde dönüşüm sıcaklıklarının artan tungsten oranı ile birlikte arttığı görülmektedir. Mikroyapıda tamamen çözünmeyen tungsten oranının artması dönüşüm sıcaklıklarının yükselmesine neden olmuştur. Mikroyapıda oluşan farklı tipte ve yüksek ergime derecesine sahip olan çökelti ve karbürler solidüs ve likidüs eğrilerinde artışa neden olmuştur.



Şekil 5.1. Kütlece farklı oranlarda tungsten içeren beyaz dökme demir alaşımlarına ait DTA analiz sonuçları

Şekil 5.2'de ThermoCalc termodinamik hesaplama programı ile oluşturulan faz diyagramı incelendiğinde tungsten oranına bağlı ergime ve katılaşma noktalarına ait sıcaklık değerleri görülmektedir. DTA verileri ve hesaplanan grafikteki sıcaklık değerlerinin doğruluğu karşılaştırılmıştır. Artan tungsten oranı ile birlikte dönüşüm sıcaklığında da artış meydana gelmiştir. Ayrıca eklenen tungsten miktarı ile birlikte yapıda denge durumunda oluşan sementit, östenit, grafit, M_2B, M_3B_2, M_7C_3 ve MC tipi karbür ve fazlar yine bu grafikte görülebilmektedir.



Şekil 5.2. Kütlece-% tungsten oranı ve sıcaklığa bağlı beyaz dökme demir faz diyagramı

5.2. Mikroyapı Karakterizasyonu

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerde ötektik kimyasal kompozisyon alttaki Denklem 5.1 ile açıklanmaktadır [23].

$$[\%CE]+0,0474x[\%Cr] = 4,3 \quad (5.1)$$

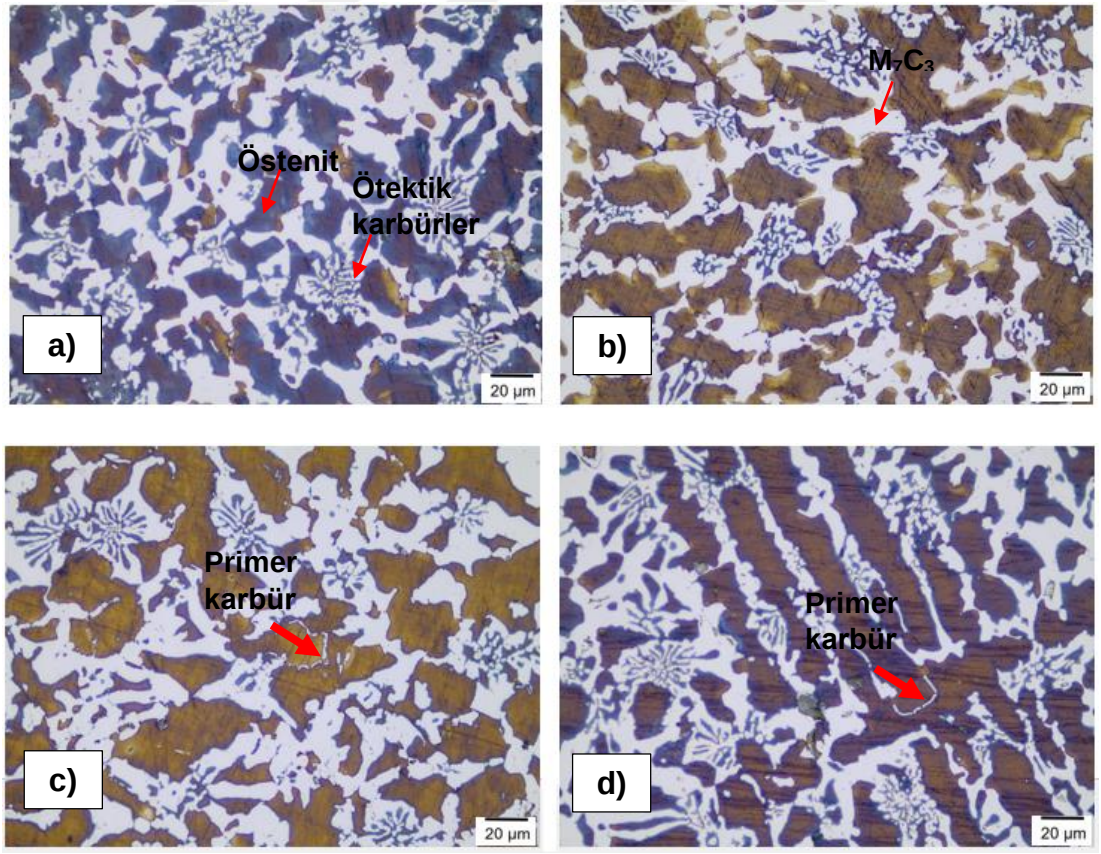
Denkleme göre çalışmada kullanılan alaşımların karbon eşdeğeri hesaplandığında ötektik altı bileşime sahip oldukları görülmektedir. Beyaz dökme demir alaşımlarına ait karbon eşdeğerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Bu değerler beyaz dökme demir alaşımlarının hipo-ötektik alaşımlar olduğunu göstermektedir. Mikroyapı östenit matris, primer M_7C_3 karbürleri ve ötektik fazdan oluşmaktadır.

Tablo 5.1. Numunelere ait karbon eşdeğerleri

Numune	C	Si	Cr	CE	[%CE]+0,0474x[%Cr]
1	3,38	0,75	8	3,66	4,04
2	3,33	0,57	9,32	3,54	3,99
3	3,2	0,68	9,13	3,44	3,88
4	3,3	0,45	8,85	3,51	3,93

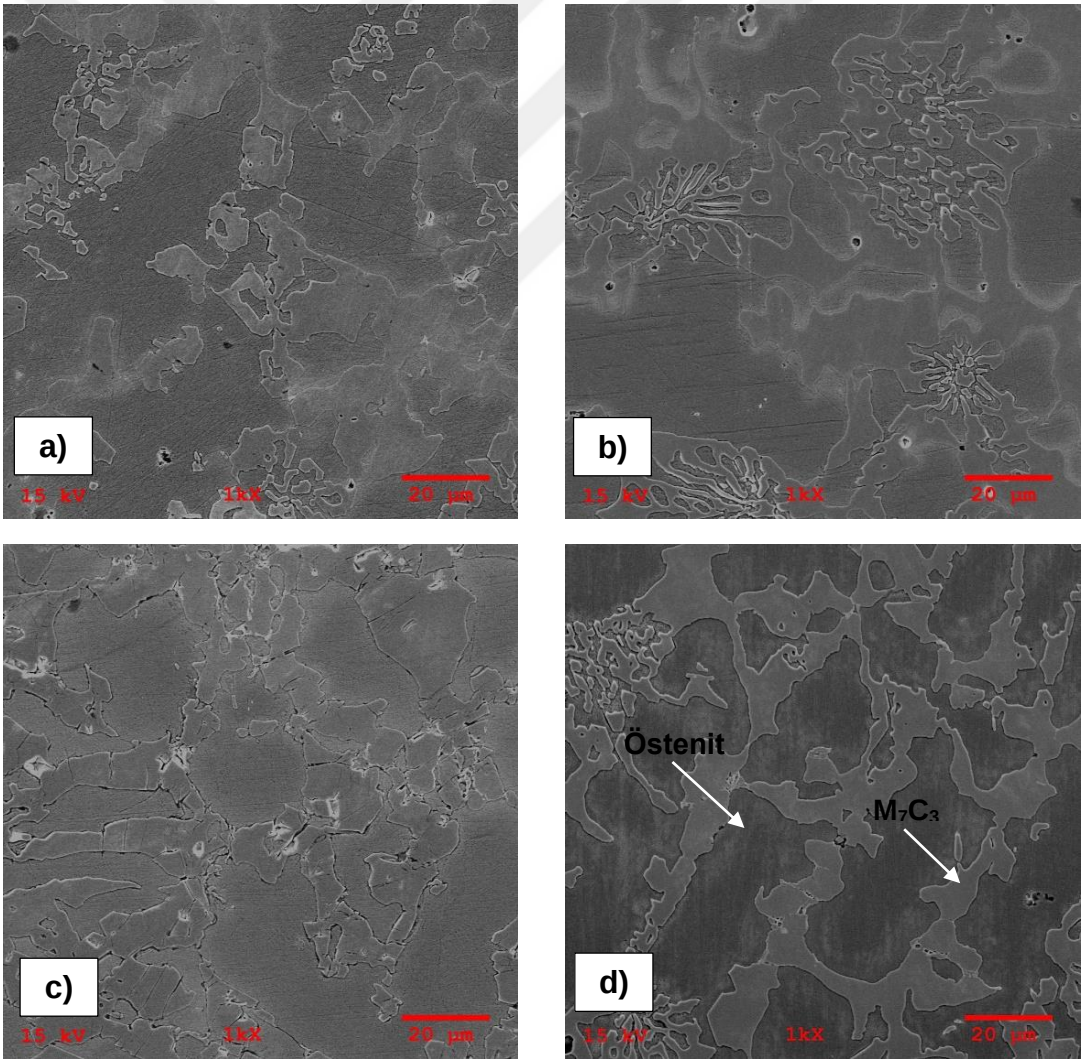
Kütlece farklı oranlarda tungsten içeriğine sahip döküm konumunda dağlanmış numunelerin ışık mikroskobu görüntüleri Şekil 5.3'te ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ise Şekil 5.4'te verilmiştir. Numune mikroyapıları incelendiğinde yapıda östenit matris, ötektik ve $(Fe,Cr)_7C_3$ tipi sert karbürlerin bulunduğu gözlemlenmiştir. İncelemelerde %0,5 bor katkısından dolayı beklenildiği gibi dentritik katılaşmış östenit matris ve içerisinde sürekli ağ şeklinde dağılmış interdentritik yapının meydana geldiği görülmüştür [19,24,33,34]. Şekil 5.3.d'de diğer mikroyapılara göre daha belirgin bir dentritik katılaşma oluştuğu görülmektedir.

Tungsten, güçlü karbür oluşturucu bir alaşım elementidir ve matris içerisinde M_7C_3 karbür ağları meydana getirmektedir. Bu karbürler ötektik katılaşma sırasında östenit-karbür bölgesi aralığından karbon alarak büyüme göstermektedirler [23,24,25]. Tungsten oranındaki artış ile karbür hacminde genellikle bir artış meydana gelmektedir. Bununla birlikte yapıda farklı türde karbürler de ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu karbürler ısıl işlem etkisi ile ve yüksek oranda alaşım elementi ilavesinin bir sonucu olarak oluşmaktadır [24].

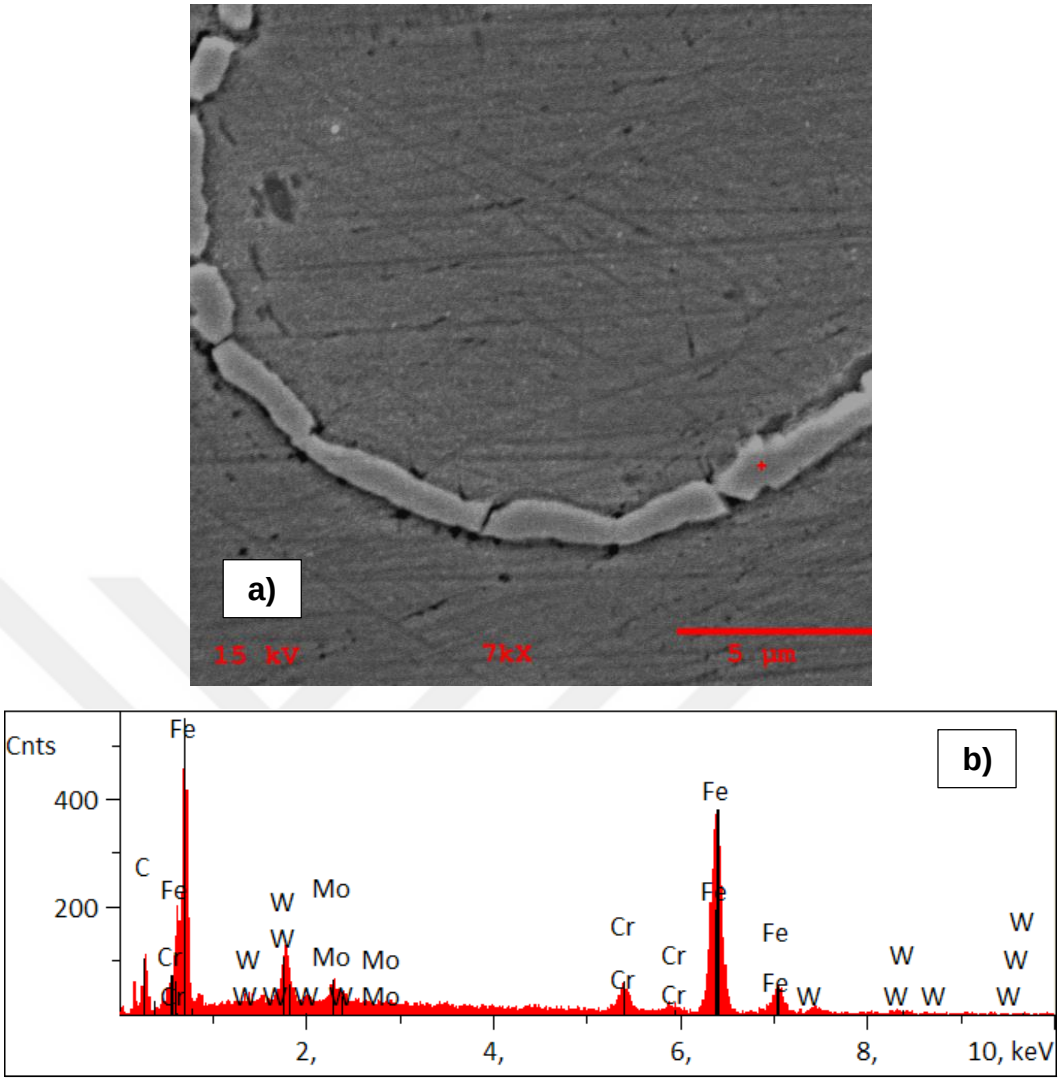


Şekil 5.3. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında tungsten içeren döküm konumundaki numunelerin ışık mikroskobu görüntüleri

Şekil 5.3.d incelendiğinde kütlece-%4 tungsten içeren mikroyapıda yüksek oranda alaşım elementi ilavesine bağlı olarak östenit primer dendrit kollarının diğer alaşımlardan daha uzun olduğu ve bunların arasındaki interdendritik yörelerde ötektik karbürlerin miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.3.c ve Şekil 5.3.d'de verilen mikroyapılar incelendiğinde diğer yapılardan farklı olarak östenit matris ve M_7C_3 karbürler dışındaki yapıda okla işaretli bölgelerde farklı morfolojide primer karbürler gözlemlenmektedir. Bu primer karbürler morfolojik olarak incelendiğinde yüksek tungsten varlığında ortaya çıkan tungsten ve molibdence zengin primer MC tipi karbür fazı olduğu değerlendirilmektedir [24]. Şekil 5.5'te kütlece %3,06 tungsten içeren döküm konumundaki primer karbür yapısına ait mikroyapı ve EDS analizi verilmiştir. EDS analizi incelendiğinde bileşiminde demir ve krom elementi dışında yüksek oranda molibden ve tungsten piklerine rastlanmıştır.



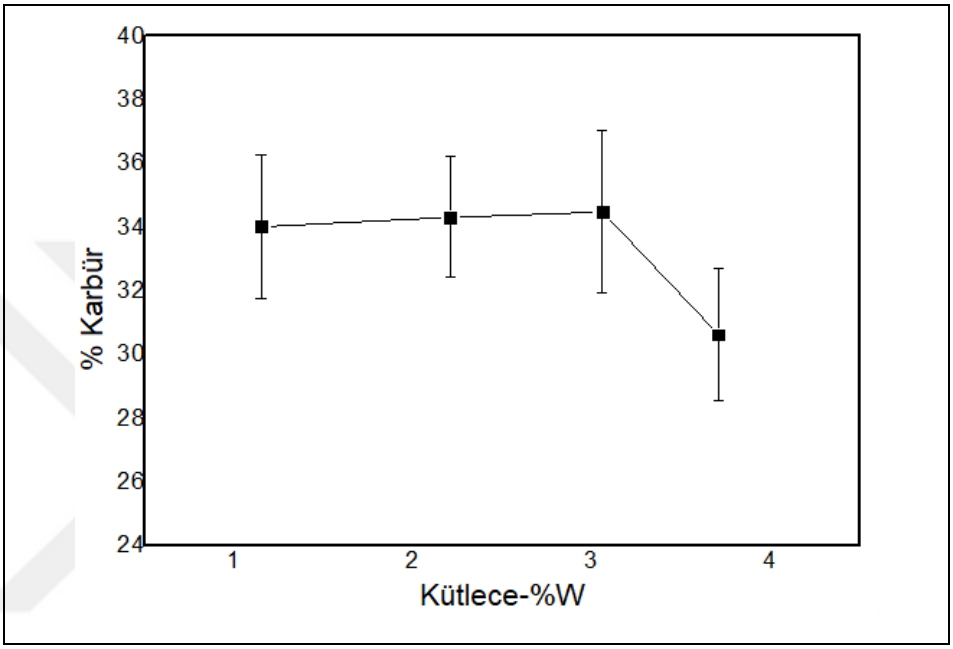
Şekil 5.4. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında tungsten içeren döküm konumundaki numunelerin SEM görüntüleri



Şekil 5.5. Kütlece-%3,06 tungsten oranına sahip döküm konumundaki numunenin a) SEM görüntüsü ve b) EDS analizi

Şekil 5.6'da döküm konumundaki malzemelere ait M_7C_3 karbür hacim oranı ölçümü sunucu verilmiştir. Kütlece-%1,15 tungsten içeriğine sahip dökme demir alaşımında ~%33 oranında karbür bulunmaktadır. Bu oranın kütlece-%3,06 tungsten içeren beyaz dökme demir alaşımına kadar değişim göstermediği ancak %3,71 tungsten oranında karbür miktarının %30'luk bir alan kapladığı görülmüştür. Yukarıda gösterildiği gibi tungsten oranı alaşım içerisinde yüksek olduğunda östenitik alanların içerisinde primer karbür oluşumu gözlenmektedir. M_7C_3 miktarında azalmanın sebebi primer karbür oluşumu olabilmektedir. Tungsten literatürde de belirtildiği gibi karbür artışına sebep olan bir alaşım elementidir. Yüksek alaşımlı dökme demirlere ilave edildiğinde kısmen matriks ve ötektik karbür içerisinde çözünmektedir. Yüksek oranlarda tungsten içeriği yapıdaki karbür morfolojilerinde değişim meydana getirmektedir [24,25]. Buna bağlı olarak Şekil 5.3.d'de benzer bir katılaşma

gerçekleşmiştir. Meydana gelen dentritik östenit yapısı karbür ölçümünde kullanılan renk farkı üzerinden alansal ölçüm metodunda belirlenen alan içerisinde geniş yer kaplamakta ve beklenenin aksine M_7C_3 tipi karbür miktarında azalmaya neden olduğu sonucu elde edilmektedir. Sonuç olarak tungsten, karbür miktarında azalma değil karbür morfolojisinde değişim ve M_7C_3 tipi karbür oranında azalma meydana getirmiştir.

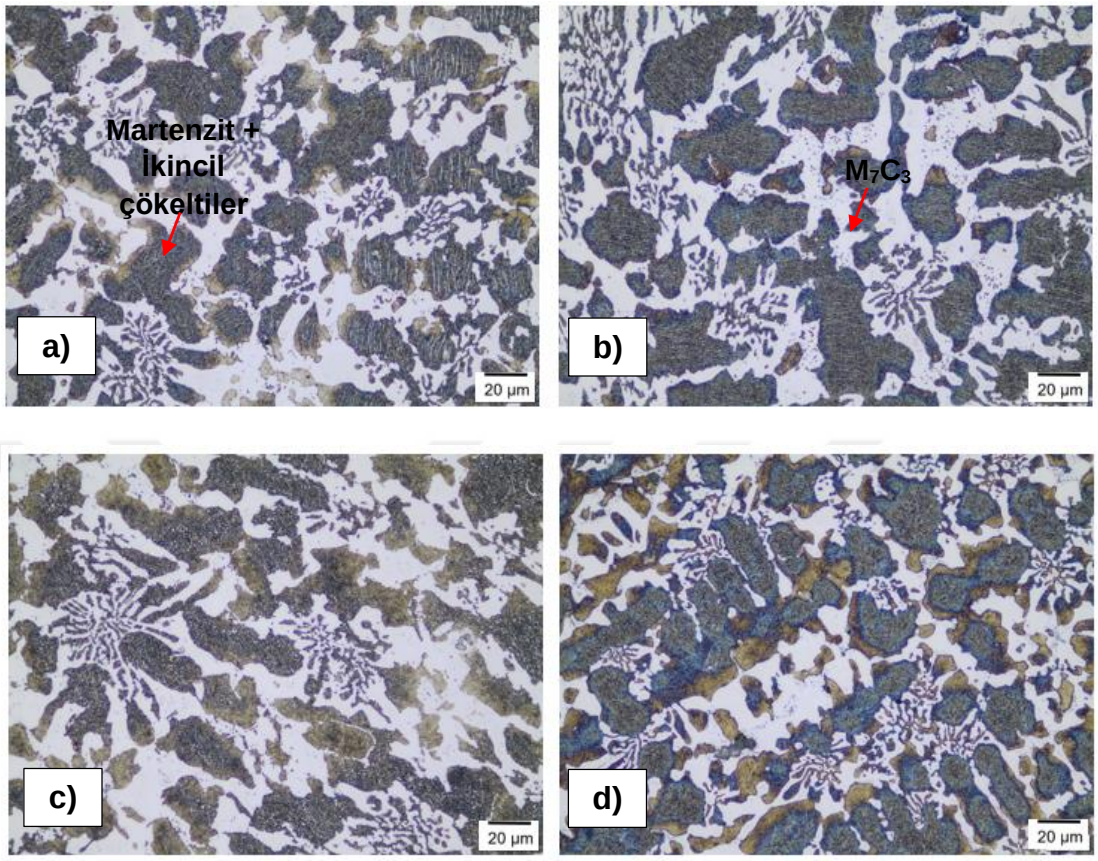


Şekil 5.6. Kütlece farklı tungsten oranlarına sahip döküm konumundaki numunelerin karbür ölçümü sonuçları

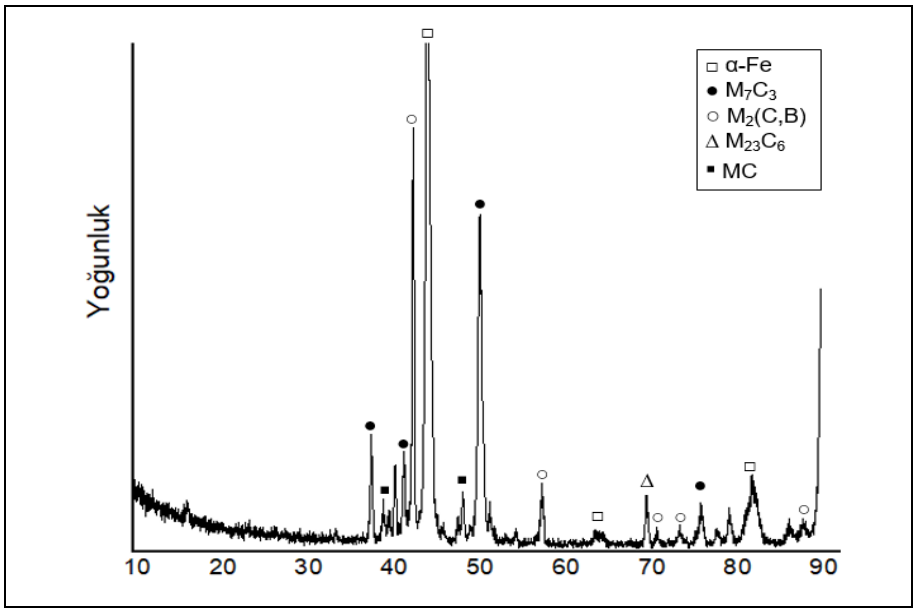
Şekil 5.7'de temperlenmiş konumdaki numunelerin ışık mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Mikroyapılarda temperleme ısıl işlemi sonrasında matriks yapısının östenitten martenzite dönüştüğü yapıda ötektik karbürlerin var olduğu ve martenzit faz içerisinde ikincil çökelti oluşumunun meydana geldiği görülmektedir. Bor alaşım elementi katkısı ve ısıl işlem ikincil çökelti oluşumunda etkili olmuştur [19,20]. Genellikle döküm konumundayken tane sınırlarında segrege olan bor elementi ısıl etki ile martenzit faz içerisinde çökelti oluşumuna etki etmiştir [20].

Mikroyapıda bulunan krom ve tungsten alaşım elementleri östenit içerisinde çözünen elementlerin dağılımında önemli bir etkiye sahiptir. Bu alaşım elementleri, ısıl işlem ile birlikte doymuş ikincil çökeltilerin oluşumunu sağlamaktadır [25]. İkincil çökelti oluşumunda krom ve tungsten etkisi ile birlikte bor katkısı da itici güç olabilmektedir. Kütlece farklı oranlarda tungsten içeriğine sahip temperlenmiş numunelerin ışık mikroskobu ve SEM görüntülerinde ikincil çökeltiler gözlemlenmiştir. Şekil 5.8'de

verilen XRD analizinde alaşım içerisinde meydana gelen fazların ve ikincil çökeltilerin kristal yapıları belirlenmiştir.



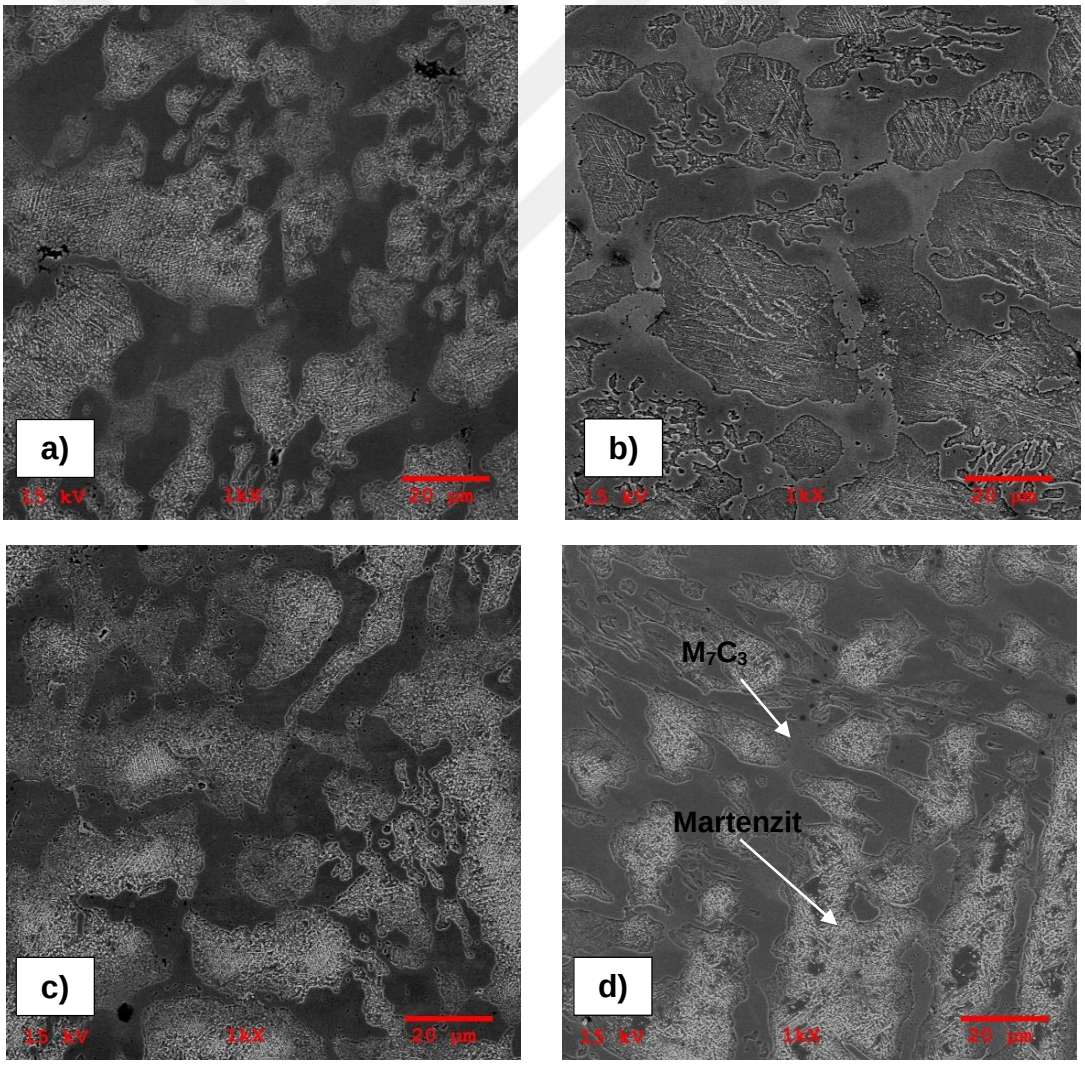
Şekil 5.7. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında tungsten içeren temperlenmiş konumdaki numunelerin ışık mikroskobu görüntüleri



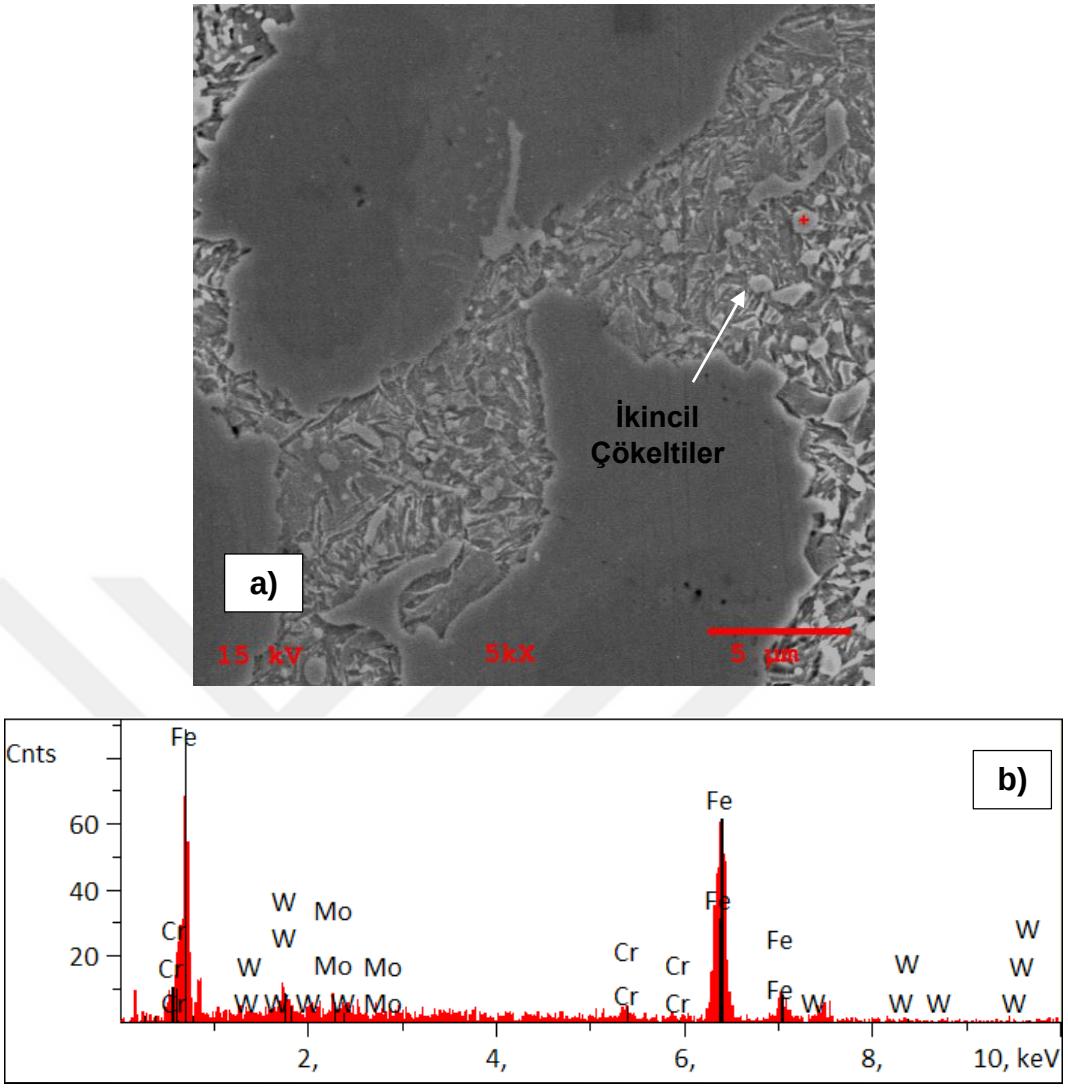
Şekil 5.8. Kütlece-%3,71 tungsten içeren temperlenmiş konumdaki numuneye ait XRD analizi

Şekil 5.8'de verilen XRD analizi incelendiğinde ısıl işlem sonrası yapıda α-Fe, M_7C_3, $M_{23}C_6$, M_2(C,B) ve MC tipi karbürlerin bulunduğu gözlemlenmiştir. Isıl işlem etkisi ile yapının martenzite dönüştüğü ve alaşım elementi ilavesi ile farklı tipte karbürlerin meydana geldiği analiz sonucunda görülmektedir. Yapıda primer MC tipi karbürler ile birlikte önceden var olan M_7C_3 tipi karbürlerin yanı sıra temperleme ile ortaya çıkan $M_{23}C_6$ karbürler de meydana gelmiştir [19,25].

Şekil 5.9'da temperlenmiş konumdaki numunelere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüleri verilmiştir. Isıl işlem ile matris içerisinde çökeltilerin oluştuğu görülmektedir. Bu çökeltiler literatürde de yer alan $M_{23}C_6$ çökeltileridir [19,25]. Şekil 5.10'da bu çökeltilere ait mikroyapı ve EDS analizi verilmiştir. Yapılan analizde bu yapıların demir ve kromca zengin oldukları görülmüştür. Oluşan ikincil karbür ve çökeltilerin sertlik ve tokluk özelliğini iyileştirdiği bilinmektedir [20,23].

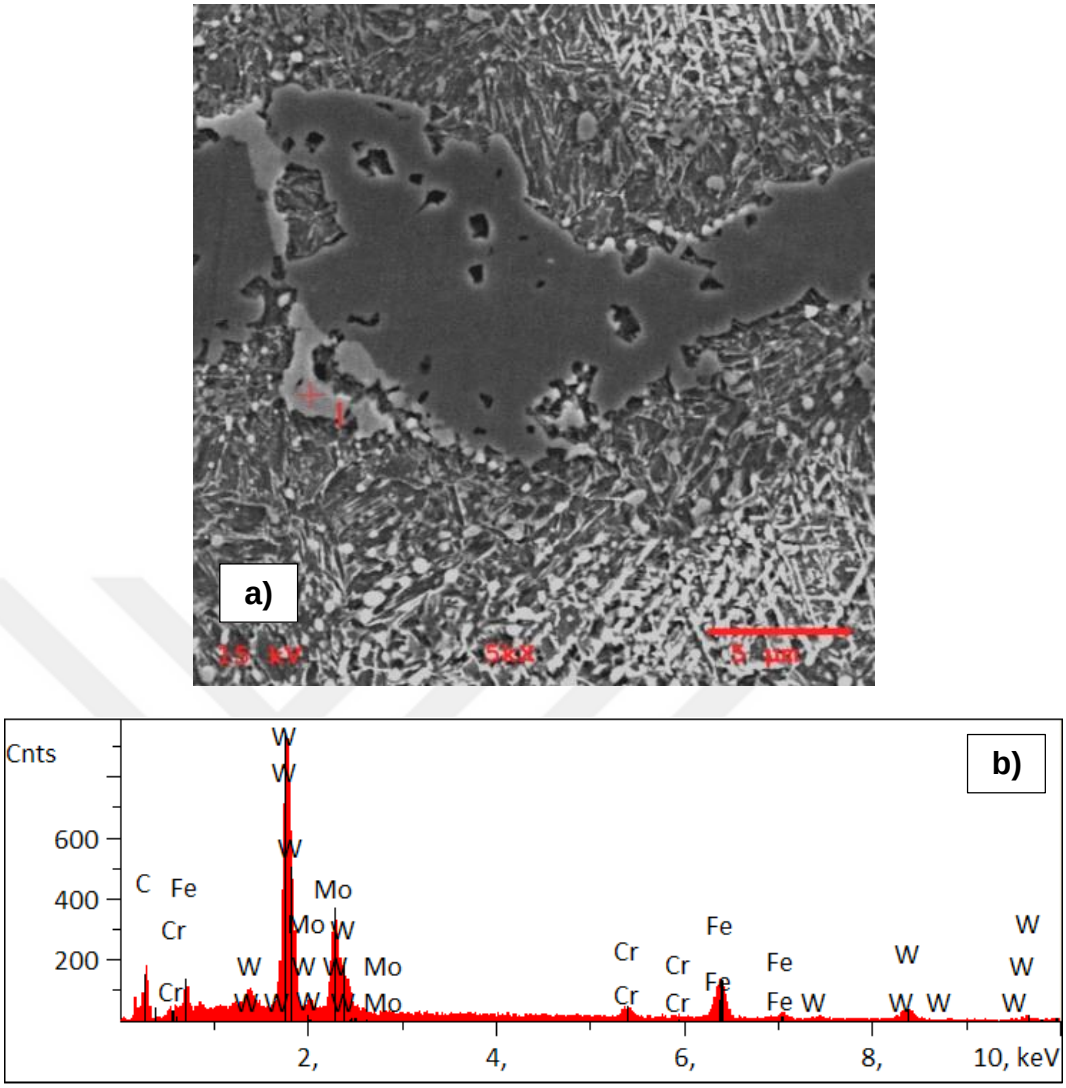


Şekil 5.9. Kütlece-a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında tungsten içeren temperlenmiş konumdaki numunelerin SEM görüntüleri



Şekil 5.10. Kütlece-%1,15 tungsten oranına sahip temperlenmiş konumundaki numunenin a) SEM görüntüsü ve b) EDS analizi

Şekil 5.11'de verilen kütlece- %3,06'lık tungsten içeriğine sahip mikroyapının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve EDS analizi incelendiğinde genel malzeme ve karbür yapısından farklı olarak oluşmuş, yapıda açık gri kontrastta görülen fazlara rastlanmıştır. Bu fazların elementel analizinde literatüre benzer olarak yüksek piklerde molibden ve tungsten bulunmuştur. Bu karbür fazının M_2C karbür tipi olduğu yapılan XRD analizinden ve alaşım faz diyagramından belirlenmiştir. M_2C tipi karbürler, genellikle matris ile karbür fazı arasında oluşmaktadır ve diğer fazlara göre açık kontrasttaki gri renkleri ile fark edilebilmektedirler.



Şekil 5.11. Kütlece-%3,06 tungsten oranına sahip temperlenmiş konumdaki numunenin a) SEM görüntüsü ve b) EDS analizi

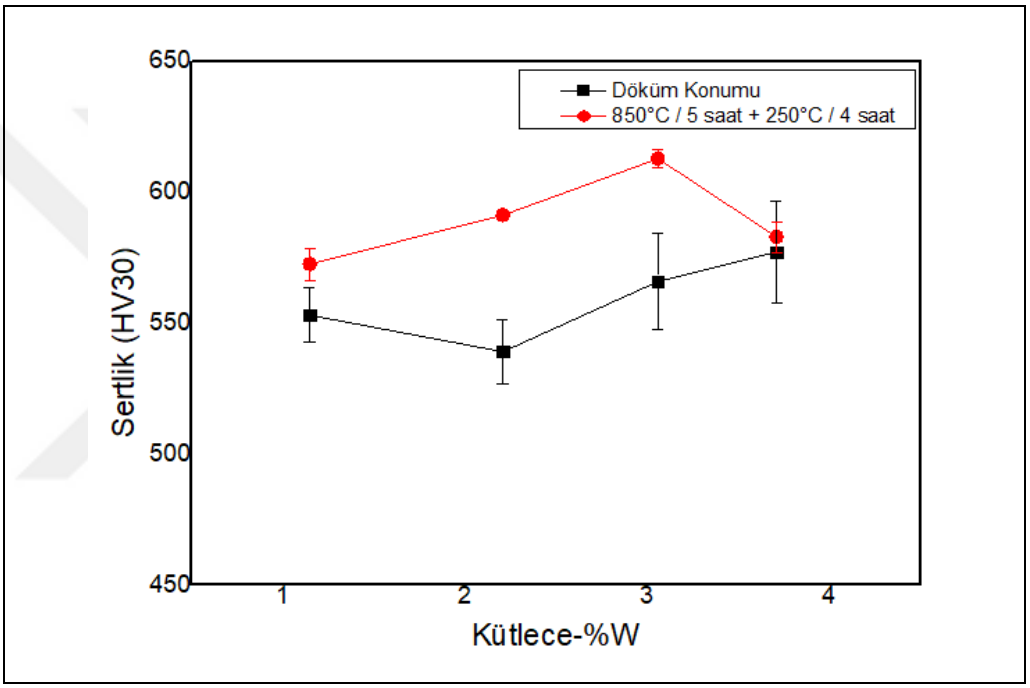
5.3. Sertlik Ölçümü Sonuçları

Şekil 5.12'de farklı oranlarda tungsten içeriğine sahip döküm ve 250 ˚C de 4 saat temperlenmiş konumdaki numunelerin sertlik ölçümleri verilmiştir. Numunelerin döküm konumundaki sertlik değerlerinin artan tungsten oranı ile birlikte arttığı görülmektedir. Bunun sebebi yapıda bulunan primer karbürlerin tungsten oranı ile birlikte artış göstermesidir [23,24,25].

Temper konumundaki sertlik değerleri incelendiğinde ısıl işlem ile birlikte tüm numunelerin sertliğinde döküm konumuna göre belirgin bir artış olduğu görülmektedir. Temperlenmiş konumda meydana gelen bu artışın sebebi ısıl işlem ve alaşım elementi ilavesi ile ortaya çıkan ikincil karbür ve çökeltilerdir. Bu çökeltiler yüksek krom oranına, bor katkısına ve tungsten ilavesine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır.

Martenzit matris içerisinde çökelen bu karbür ve çökeltiler sertlik artışı meydana getirmektedir [19,20,33,35].

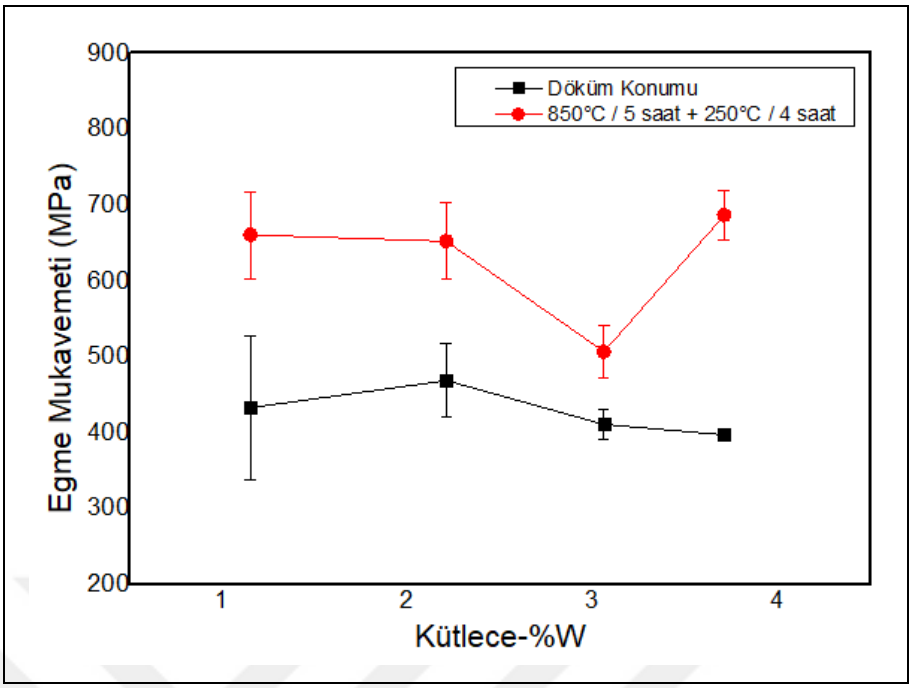
Kütlece- %3,71 tungsten içeriğine sahip numunelerde döküm ve temperlenmiş konumda malzeme sertliğinde bir düşüş meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebebi yapıda kütlece-%3,06 tungstenden sonra katılaşma sırasında karbonun tungstence harcanması sonucu matriste daha az karbon kalması ile birlikte temperlemede oluşturulan karbürlerin miktarının azalması ve buna bağlı olarak sertliğin düşmesi olabilir [24].



Şekil 5.12. Farklı tungsten oranlarına ait beyaz dökme demir malzemelerde döküm ve ısıl işlem sonrası sertlik değişimi

5.4. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

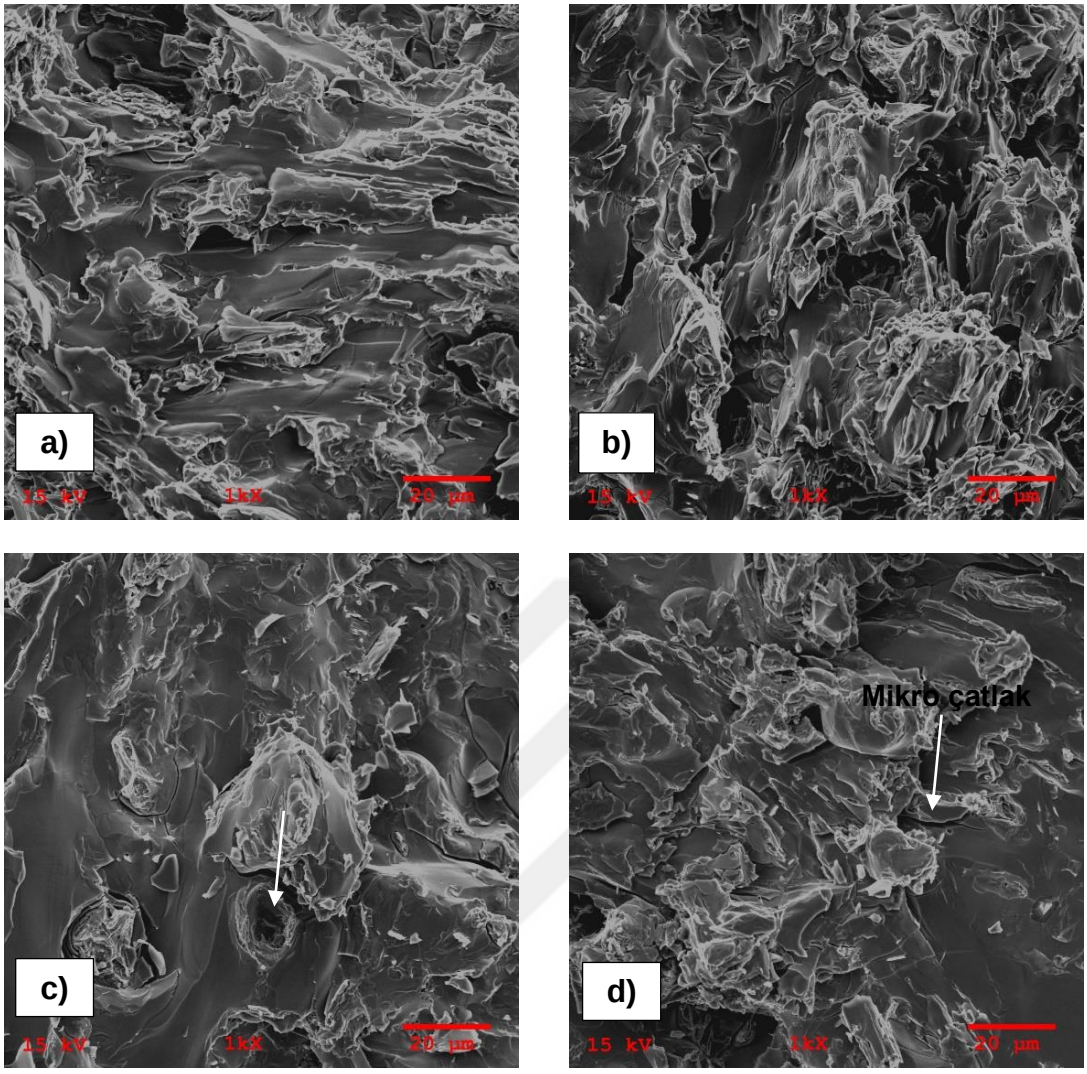
Şekil 5.13'te kütlece farklı oranlarda tungsten içeriğine sahip döküm ve 250 ˚C de 4 saat temperlenmiş konumdaki numunelerin eğme mukavemet değerleri verilmiştir. Eğme mukavemeti değerleri incelendiğinde ısıl işlem konumunda, döküm konumuna göre mukavemet değerlerinin arttığı görülmektedir. Mukavemet değerleri döküm konumunda ~400 MPa ve temperlenmiş konumda ~650 MPa aralığına ölçülmüştür. Burada meydana gelen mukavemet değerindeki artışın temel sebebi, ısıl işlem sırasında çözünerek çökelen ikincil çökelti ve karbürlerdir. Bu çökeltiler matris fazı içerisinde oluşarak eğme mukavemetini arttırmış ve genel malzeme özelliklerini iyileştirici yönde katkı sağlamış olabilmektedir [20,23,24,36].



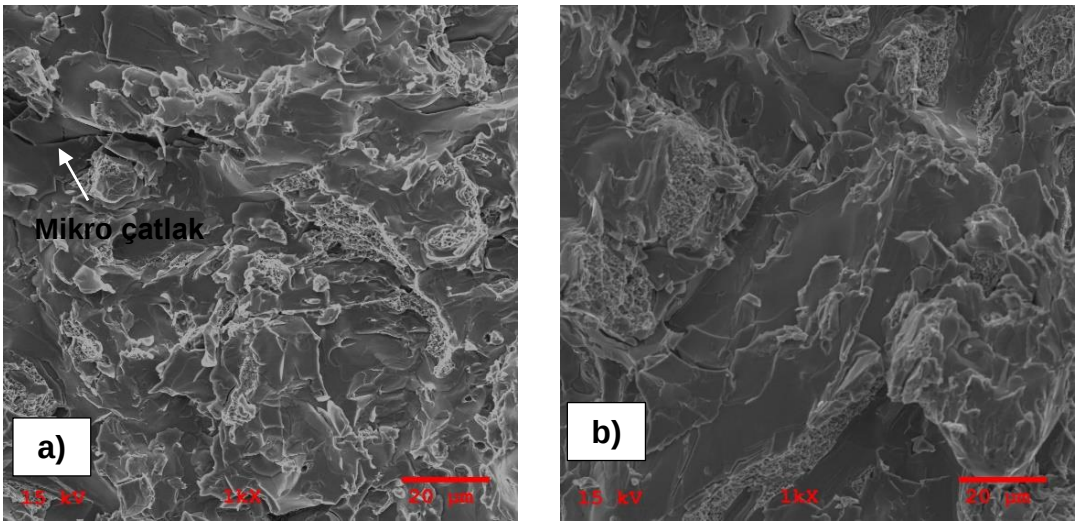
Şekil 5.13. Farklı tungsten oranlarına ait beyaz dökme demir malzemelerde döküm ve ısıl işlem sonrası eğme mukavemeti değişimi

Kırılma yüzeyi incelemelerinde taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Şekil 5.14'teki döküm konumunda eğme testi numunelerinden alınan kırılma yüzeyleri incelemesinde kırılmaların yüksek oranda gevrek ikincil faz içeren metalik malzemelerden beklenildiği şekilde tipik gevrek kırılma şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Yüzeyde görülen boşluklar, fasetli yüzeyler ve mikro çatlaklar kırılma hakkında bilgi vermektedir. Kırılma sonucu oluşan kırılma yüzeyi incelemelerinde Şekil 5.14.c'de görüldüğü gibi yapıdaki gevrek karbür fazlarının ayrılması söz konusu olabilmektedir. Ayrıca Şekil 5.14'teki mikroyapılar incelendiğinde yapıda kırılma öncesi veya kırılma sırasında meydana gelmiş olan mikro çatlakların varlığı söz konusudur.

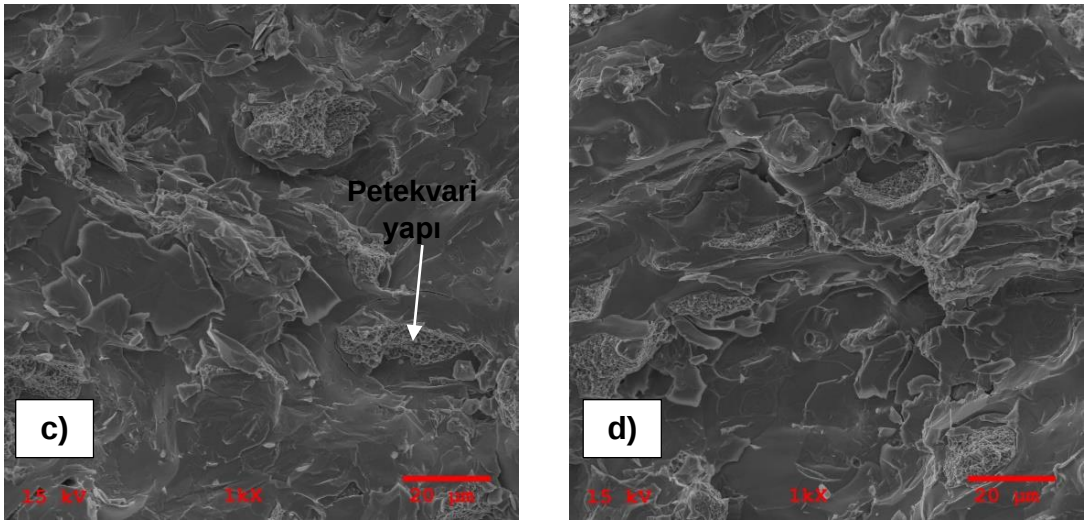
Temperleme sonrası eğme testi numunelerine ait kırılma yüzeyi görüntüleri verilen Şekil 5.15 incelendiğinde, döküm konumundaki mikroyapılardan farklı olarak fasetli yüzeylerin yanında petekvari ve görece ince yapılı bölgeler bulunmaktadır. Petekvari yapı kısmen sünek kırılma oluştuğuna işaret etmektedir. Bu bölgeler ısıl işlem etkisi ile meydana gelmiş ve tokluk özelliğinin artışına sebep olmuş ikincil çökeltilerin bir sonucu olabilir ve genel eğme mukavemeti artışı da bunu desteklemektedir. Genel anlamda gevrek kırılma karakteristiği gösteren mikroyapıda döküm yapısına benzer olarak mikro çatlakların varlığı söz konusudur. Bu çatlakların karbür fazlarının sınırında ve tane sınırlarında yer aldığı söylenebilmektedir.



Şekil 5.14. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında W içeren döküm konumundaki numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 5.15.Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında W içeren temper konumundaki numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 5.15. (Devam) Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında W içeren temper konumundaki numunelerin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri

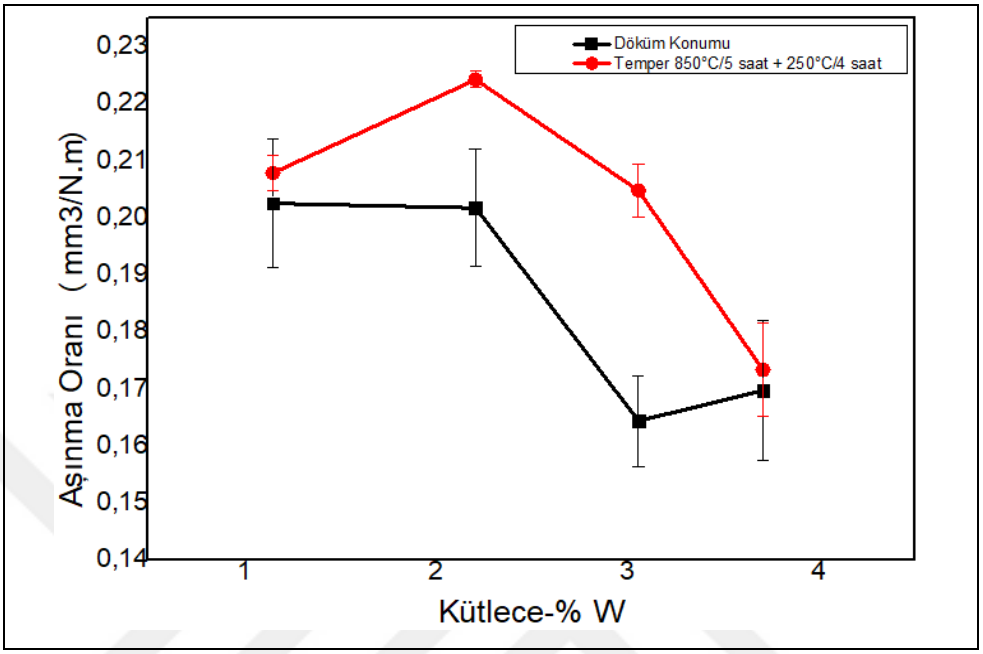
5.5. Aşınma Testi Sonuçları

Şekil 5.16'da kütlece farklı oranlarda tungsten içeriğine sahip döküm ve 250 ˚C de 4 saat temperlenmiş konumdaki numunelerin aşınma oranı değerleri verilmiştir. Grafik incelendiğinde genel olarak tungsten artışı ile birlikte aşınma oranının da azaldığı görülmektedir. Temperlenmiş konumda ise aşınma direncinin döküm konumuna göre daha da arttığı gözlemlenmektedir. Aşınma oranındaki farklılığın sebebi, mikroyapıda meydana gelen değişimlerdir [22].

Isıl işlem sonrası matris yapısının martenzite dönüşümü ile yapı içerisinde sert ötektik karbürler ve ikincil çökeltilerin bulunması aşınma davranışını etkilemektedir. Tungsten artışı ile yapıda meydana gelen karbür artışı sonucu aşınma oranında bir azalma meydana gelmektedir. Isıl işlem ile birlikte oluşan martenzit matris ve içerisinde bulunan ikincil çökeltilerin varlığı ile mukavemet ve aşınma direnci özelliği iyileşmektedir [22]. Tungsten artışı ile genel anlamda aşınma oranında bir azalma meydana gelmektedir [23,24,35]

Test numunelerinin aşınma modları incelemeleri ve yüzey hasar sonuçlarının karakterizasyonu için taramalı elektron mikroskobunda inceleme yapılmıştır. Şekil 5.17'de döküm konumuna ait görüntüler incelendiğinde genel aşınma modunun abrazif aşınma şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Tungsten oranındaki artış ile birlikte mikroyapıda meydana gelen iri karbürler sürtünme sırasında koparak yüzeyden ayrılmıştır. Bu durumda aşınma yüzeyinde adhezif aşınma miktarında artış meydana gelmiştir. Kütlece- %3,06 ve %3,71 tungsten oranlarındaki aşınma mekanizmasının genel anlamda abrazif aşınma ile birlikte adhezif aşınma olduğu ve

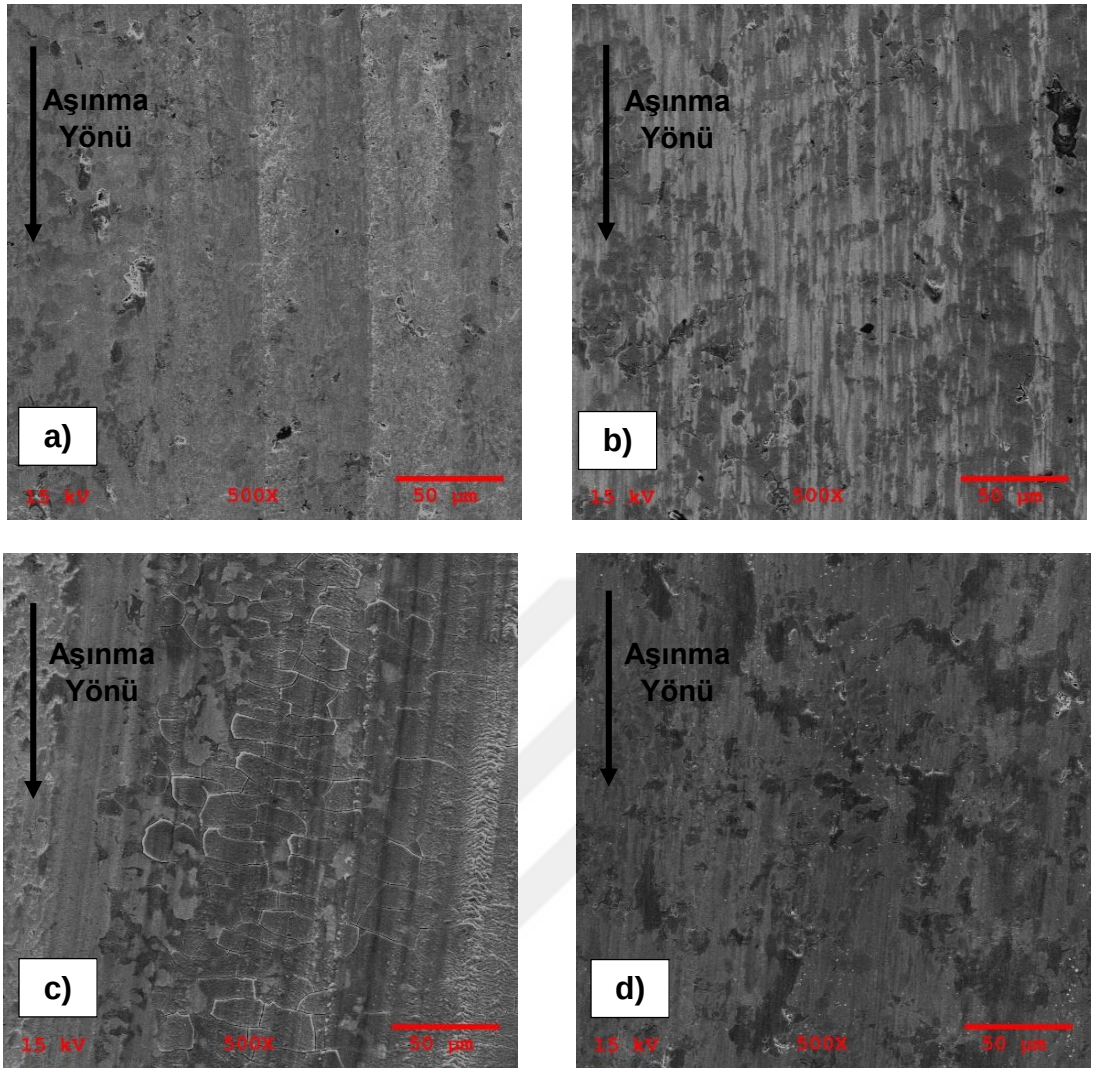
yüzeyden koparak ayrılan malzemelerin artan tungsten oranı ile birlikte artış gösterdiği görülmektedir. Yüzeyden ayrılan bu malzemeler büyük hacimli karbür fazı olabilmektedir.



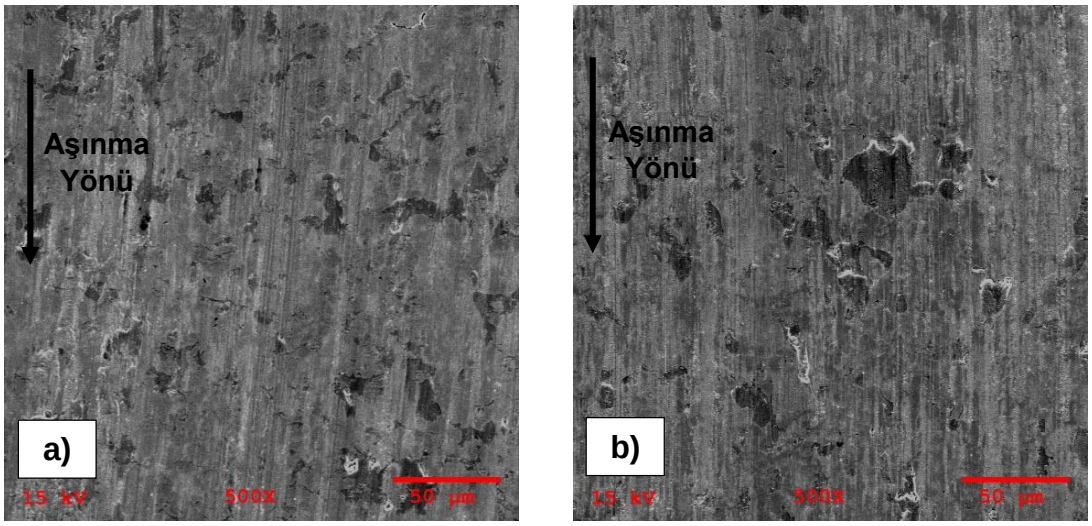
Şekil 5.16. Farklı tungsten oranlarına ait beyaz dökme demir malzemelerde döküm ve ısıl işlem sonrası aşınma oranı değişimi

Şekil 5.18 incelendiğinde aşınma modunun temperlenmiş konumdaki numunelerde de abrazif aşınma şeklinde meydana geldiği görülmüştür. Abrazif aşınma sırasında yüzeyden kopma şeklinde ayrılmalar meydana gelmiştir. Kopan yüzeyler incelendiğinde, örneğin Şekil 5.18.c'de kopma yüzeyinde, petekvari bölgeler mevcuttur. Bu bölgeler tokluk özelliklerini arttırıcı etkide bulunan ikincil çökeltilerin var olduğu matris yörelerinden kopmanın gerçekleştiğini göstermektedir. Martenzit fazının aşınma direnci özelliği östenit fazına göre daha yüksektir. İkincil çökeltiler ile güçlendirilmiş martenzit fazının yüzeyinde gerçekleşen bu ayrılmalar özellikle yüksek tungsten oranlarında meydana gelmiştir.

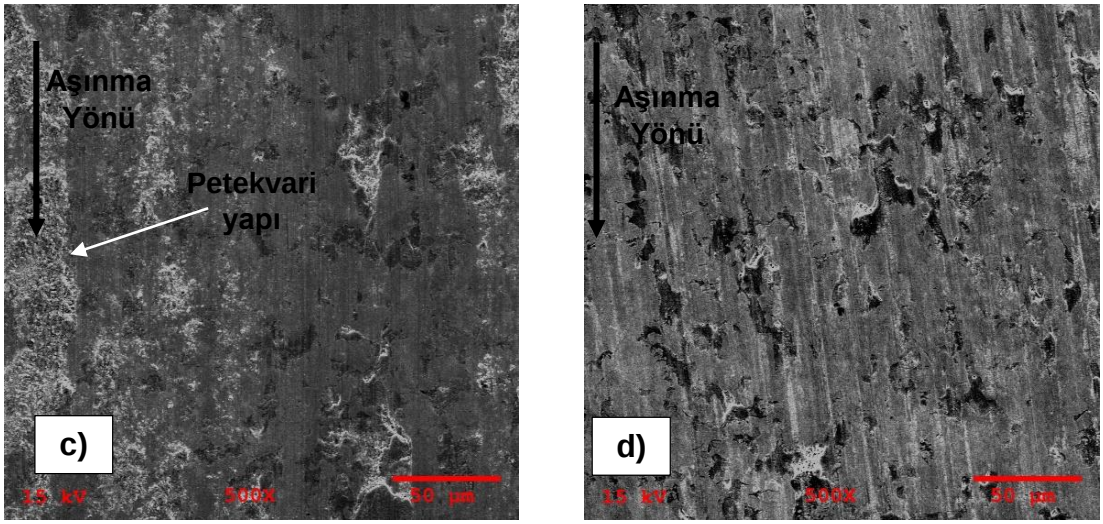
Grafik ve mikroyapı görüntüleri göz önüne alındığında en yüksek aşınma direnci özelliklerinin kütlece-%3,06 ve %3,71 tungsten oranlarında elde edildiği görülmektedir. Ancak mikroyapı ve oluşan fazlar göz önüne alındığında kütlece-%3.06 tungsten oranından sonra oluşmaya başlayan sert ve kırılan karbürlerin yoğunluğunun artması ile yüzeyden ayrılmaların arttığı görülmektedir. Bu nedenle özellikle yüksek tungsten ilavesinin aşınma özelliğini iyileştirdiği görülse de bu oranlarda yapıya ilave edilmesi farklı modlarda aşınma miktarında artışa neden olmaktadır.



Şekil 5.17. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında W içeren döküm konumundaki numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 5.18. Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında W içeren temper konumundaki numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 5.18.(Devam) Kütlece- a) %1,15, b) %2,21, c) %3,06, d) %3,71 oranlarında W içeren temper konumundaki numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demir malzemelerde tungsten ilavesi malzemenin ergime ve katılaşma sıcaklıklarını arttırıcı etkiye sahiptir. Kompozisyona eklenen kütlece-% tungsten ilavesi arttığında solidüs ve likidüs sıcaklıklarında artış meydana gelmiştir.

Yüksek alaşımlı beyaz dökme demirlerde, tungsten katkısının karbür oluşumu ve karbür morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Artan tungsten içeriğine bağlı olarak primer karbür miktarının arttığı ayrıca mikroyapıda literatürde de verilen M_2C tipinde karbürlerin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Tungsten katkısının döküm konumunda malzemelerin sertliğini önemli ölçüde arttırdığı belirlenmiştir. Tungsten oranının artması primer karbür oluşumunda etkili olması nedeniyle, döküm konumundaki sertlik artışında belirgin bir şekilde kendini göstermiştir. Isıl işlem sonrasında ortaya çıkan ikincil çökeltilerin malzemenin genel sertliğini arttırdığı görülmüştür. Bor katkısı ile ilgili yapılan çalışmada da M. Çöl ve arkadaşları $M_x(C.B)_y$ tipi karbürlerin ısıl işlem ile birlikte çökeldiğini ve sertlik artışında etkili olduğunu bildirmiştir [22].

Sertlik özelliği ile ilgili temperlenmiş konumdaki Ni-Hard 4 ve yüksek kromlu beyaz dökme demir malzemelerin benzer ısıl işlem ve kompozisyonlarına bağlı olarak bu çalışmada literatüre benzer sonuçlar elde edilmiştir (Tablo 6.1).

Tablo 6.1. Literatürde yer alan sertlik değerleri

Kaynak	**Sertlik Değeri (HV)-Temperlenmiş**
M.Çöl, 2016 [22]	580
Y.Lv,2007 [23]	675
E. Cortes-Carillo,2017 [24]	600
Bor katkılı beyaz dökme demir alaşımları (kütlece- %1- 4 tungsten ilavesi)	580-620

Döküm ve temperlenmiş konumda en yüksek malzeme sertliğinin kütlece-%3,06 oranında tungsten içeren numunelerde elde edildiği görülmüştür. Kütlece-%3,71 oranında tungsten içeren numunelerde literatürde de verilenlere benzer şekilde farklı morfolojide ve kırılgan yapıdaki karbür yoğunluğunun artması nedeniyle malzeme sertliğinde düşüş meydana geldiği görülmüştür.

Malzemenin sertlik ve eğme grafiği karşılaştırdığında en yüksek malzeme sertliğe sahip tungsten oranındaki eğme mukavemet değerinin en düşük değer olduğu görülmektedir. Sertlik ve eğme mukavemeti değerlerinin ters orantılı olarak değiştiği ve artan sertlik değerlerinde mukavemet değerlerinde düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Tungsten katkısı döküm konumundaki eğme mukavemetinde belirgin bir değişime neden olmamaktadır. Tungsten-bor katkısı ve ısıl işlem ile birlikte malzemenin eğme mukavemetinde genel bir artış meydana gelmektedir. Bu artışın sebebi ısıl işlem ile çökelerek tokluğun artmasını sağlayan ikincil çökeltiler ve karbürlerin varlığıdır. M. Çöl ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da bor ilavesi ve ısıl işlem ile birlikte malzemenin genel mukavemet değerinde benzer oranda artış meydana gelmiştir [22]. Bu çalışmada en yüksek eğme mukavemeti değeri sabit bor oranında kütlece-%3,71 tungsten ilavesi ile elde edilmiştir.

Literatürdeki eğme testi sonuçları ile çalışma sonuçları karşılaştırıldığında, benzer şekilde ısıl işlem ve alaşım elementi ilavesi ile eğme mukavemetinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Bununla birlikte artan tungsten oranına bağlı incelemelerde kütlece %1,03 oranında tungsten ilavesiyle en yüksek eğme mukavemeti değerine ulaşıldığı görülmüştür [23].

Döküm ve temperlenmiş konumdaki aşınma testi sonuçları karşılaştırıldığında ısıl işlem ile birlikte aşınma oranında artış meydana geldiği görülmektedir. Tungsten oranındaki artış ile birlikte aşınma oranında düşüş meydana gelmiştir. Aşınma mekanizması daha önce yapılan çalışma ile benzer olarak [22] genel anlamda abrazif şekilde gerçekleşmiştir. Kütlece artan tungsten ilavesi ile adhezif aşınmanın da oluşmaya başladığı ve yüzeyden ayrılmalara neden olduğu görülmüştür. Bu ayrılmalar koparak yüzeyden uzaklaşan karbür hacimleri olabilmektedir.

Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında yüksek sertlik, aşınma dayanımı ve tokluk özelliklerinin istendiği uygulamalarda yüksek oranda (kütlece-%3,06, %3,71) tungsten ilavesinin özellikleri geliştirdiği görülmektedir. Ancak mikroyapı özellikleri göz önüne alındığında yüksek oranlarda tungsten ilavesinin yapıda oluşturduğu sert ve kırılgan

karbür fazına ve karbür türünde değişimine bağlı olarak mekanik özellikler olumsuz etkilenmektedir. Bor ilavesi ve ısıl işlem ile birlikte toklaşan matriks fazının kütlece-%2 oranında tungsten katkısını ve oluşacak karbürlerin olumsuz etkisini en aza indirdiği görülmüştür. Bu toleranslar içerisinde hazırlanan alaşıma uygulanan temperleme ısıl işlemi ile optimum özellikler elde edilecektir. Çalışma sonucunda elde edilen kompozisyona sahip malzeme özellikle yüksek sertlik, tokluk ve aşınma dayanımı uygulamalarında kullanım alanı bulabilecektir.

KAYNAKLAR

[1] Davis J. R., *Classification and Basic Metallurgy of Cast Irons*, American Society of Metals. ASM specialty handbook cast iron. Illinois: ASTM, 1996.

[2] Tekin E., *Çelikler ve Dökme Demirler için Kuramsal Uygulamalı Metalografi*, Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği, İstanbul, Aralık 2013.

[3] Angus H., *Cast Iron: Physical and Engineering Properties,* Elsevier, **2**nd ed., London, 1-8, 1976.

[4] Lacaze J., & Sundman B., An Assessment of the Fe-C-Si System, *Metallurgical Transactions A,* 1991, **22** (10), 2211-2223.

[5] Cast Iron, https://www.tec-science.com/material-science/iron-carbon-phase-diagram/cast-iron/ (Ziyaret Tarihi: 23.05.2019)

[6] Elliott R., *Cast Iron Technology*, Butterworth-Heinemann, 1988.

[7] Gundlach R. B., Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, ASM *Handbook*, **1**, 1990.

[8] Rohling K., *Ni-Hard Material Data and Application*, Nickel Development Instute, 1996.

[9] *ASM Handbook*, Heat Treating, ASM International, **4**, 1512-1530, 1991.

[10] Sharma C. P., *Engineering Materials: Properties and Applications of Metals and Alloys,* PHI Learning Pvt. Ltd., 2003.

[11] Yılmaz O., Güler Ö., Ni-Hard Dökme Demirlerde Vanadyumun Aşınma Direncine Etkisinin Araştırılması, *12. Uluslararası Metalurji-Malzeme Kongresi*, İstanbul, 2005.

[12] Alamdaro M.B., Amini K. Najabafadi V. N., Mohammednezhad M., Investigating the Effect of Titanium Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Ni-Hard 4 Cast Iron, *Journal of Modern Process in Manufacturing and Production,* 2016, **5** (1), 17-27.

[13] Radzikovwska J.M., Effect of Specimen Preparation on Evaluation of Cast Iron Microstructure*, Material Characterization*, 2005, **54**, 287-304.

[14] Li G., Lei T., Chu W., Effect of Grain Boundary Property of High Strenght Low Alloy Steel on Behavior of Steel on Behavior Stress Corossion Fracture [J], *Journal of Astronautics,* 1996, **16** (3).

[15] Wang M., Dong H., Weng Y., Effect of Heat Treatment on Delayed Fracture Resistance of Structural Steel 42CrMo [J], *Acta Metalla Sin.,* 2002, **38** (7), 715

[16] Stevens M.F., Bernstein I. M., Microstructural Trapping Effects on Hydrogen Induced Cracking of a Microalloyed Steel [J], *Metall Trans., 1*989, **20A** (5), 909.

[17] Zhong S.H., *Alloyed Steel, Metallurgical Industry Press*, Beijing, 1980

[18] Baker H., *Alloy Phase Diagrams*, *ASM Handbook*, **3**, ASM International, 1992.

[19] Xiang C., Yanxiang L., Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of High Boron White Cast Iron, *Material Science and Engineering A,* 2010, **528**, 770-775.

[20] Liu Z., Li Y., Chen X., Hu K., Microstructure and Mechanical Properties of High Boron White Cast Iron*, Mat.Sci& Eng. A, 2008,* **486**,112-116.

[21] Correa R., Bedolla-Jacuinde A., Zuno-Silva J., Cardosa E., Mejia I., Effect of Boron on Sliding Wear of Directionally Solidified High-Chromium White Irons, *Wear,* 2009, **267**,495-504.

[22] Çöl M., Koç F.G., Öktem H., Kır D., The Role of Boron Content in High Alloy White Cast Iron (Ni-Hard 4) on Microstructure, Mechanical Properties and Wear Resistance, *Wear*, 2016, **348-349**,158-165.

[23] Lv Y., Sun Y., Zhao J., Yu G., Shen J., Hu S., Effect of Tungsten on Microstructure and Properties of High Chromium Cast Iron*, Materials & Design* 2007, **39**, 303-308.

[24] Cortes-Carillo E., Bedolla-Jacuinde A., Mejla L., Zepeda C.M., Zuno-Silva J., Effect of Tungsten on the Microstructure and on the Abrasive Wear Behavior of a High-Chromium White Iron, *Wear*, 2017, **376-377**, 77-85.

[25] Mousavi Anijdan S.H., Bahrami A., Varahram N., Davami P., Effects of Tungsten on Erossion-Corrosion Behavior of High Chromium White Cast İron, *Mater. Sci. Eng A*, 2007, **454-455**, 623-628.

[26] Tabrett C.P., Sare I.R., Gomashchi M.R., Microstructure-Property Relationships in High Chromium White Iron Alloys*, Int. Mater*., 1996, 41, 59-82.

[27] Gasan H., Ertürk F., Effect Of A Destabilization Heat Treatment on Microstructure and Abrasive Wear Behavior of High-Chromium White Cast Iron Investigated Using Different Characterization Techniques, *Metall. Mater. Trans. A*, 2013, **44**(11), 4993-5005.

[28] Kato K., Adachi K., Wear Mechanism, *Modern Tribology Handbook*, ed.: B. Bhushan, CRC Press, Florida, 2001.

[29] ASTM G99-95a, *Standart Test Method for Wear Testing with Pin-on-disk Apparatus*, 2000.

[30] Murray C., *ASTM G99 Tips Perspective Continious Wear Contact*, Nanovea, 2013.

[31] ASTM A532, *Standart Spesification for Abrasion-Resistant Cast Irons*, 1999.

[32] Al-Rubaie K.S., Pohl M., Heat treatment and two-body abrasion of Ni-Hard 4, *Wear*, 2014, **312**, 21-28.

[33] Ma S., Zhang J., Wear Resistant High Boron Cast Alloy-A Review, Rev. Adv. *Mater. Sci.,* 2016, **44**, 54-62.

[34] Zhong-li L., Xiang C., Yan-xiang L., Kai-hua H., High Boron Iron-Based Alloy and Its Modification, *Journal of Iron and Steel Research Int.*, 2009, **16**(3), 37-42.

[35] Heydari D., Skandani A., Al Haik M., Effect of Carbon Content on Carbide Morphology and Mechanical Properties of A.R White Cast Iron with 10-12% Tunsten, *Mat.Sci A*, 2012, **542**,113-126.

[36] Jia X., Hao Q., Zuo X., Chen N., Rong Y., High Hardness and Toughness of White Cast Iron: The Proposal of a Novel Process, *Mat. Sci. Eng. A*, 2014 **618**, 96-103.

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

[1] Çöl M., Koç F.G., **Karayel G.,** Yüksek Alaşımlı (Ni-Hard 4) Beyaz Dökme Demirlerde Tungsten İlavesinin Mikroyapı ve Sertlik Üzerine Etkisi, *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018),* Ankara, Türkiye, 22-23 Kasım 2018.

ÖZGEÇMİŞ

1994 yılında Kırklareli' de doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Tekirdağ' da tamamladı. 2012 yılında Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 2016 yılında lisans eğitimini tamamladıktan sonra aynı yıl Kocaeli Üniversitesi'nde Metalurji ve Malzeme Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. 2018 yılından itibaren ONAT Alüminyum San. Tic. A.Ş şirketinde Ar-Ge Mühendisi olarak görevine devam etmektedir.