



**T.C.**  
**KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MOLİBDEN VE NİKEL İÇEREN KÜRESEL  
GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERDE  
ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİ İLE  
MEKANİK ÖZELLİKLERDEKİ DEĞİŞİMİN  
ARAŞTIRILMASI**

**Furkan İLÇİN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Eylül-2022**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan İLÇİN tarafından hazırlanan “Molibden ve Nikel İçeren Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Östemperleme Isıl İşlemi ile Mekanik Özelliklerdeki Değişimin Araştırılması” adlı tez çalışması 30/09/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

### İmza

#### Başkan

Doç. Dr. Mürsel EKREM

.....

#### Danışman

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

.....

#### Üye

Doç. Dr. Gürol ÖNAL

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN  
Enstitü Müdürü

\*Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi BAP tarafından 221010014 nolu proje ile desteklenmiştir.

\*\*Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

## **TEZ BİLDİRİMİ**

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## **DECLARATION PAGE**

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Furkan İLÇİN

Tarih: 30/09/2022

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### MOLİBDEN VE NİKEL İÇEREN KÜRESEL GRAFITLİ DÖKME DEMİRLERDE ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİ İLE MEKANİK ÖZELLİKLERDEKİ DEĞİŞİMİN ARAŞTIRILMASI

Furkan İLÇİN

Konya Teknik Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN

2022, 61

Jüri

Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN  
Doç. Dr. Gürol ÖNAL  
Doç. Dr. Mürsel EKREM

Bu çalışmada, molibden ve nikel içeren küresel grafitli dökme demirlerde (KGDD) östemperleme ısıl işleminin optimizasyonu yapılmıştır. GGG-70 küresel grafitli dökme demir malzemenin kompozisyonuna ek olarak molibden ve nikel elementlerinin ilavesiyle küresel grafitli dökme demir üretilmiştir. KGDD'in üretim işlemlerinden sonra 930°C sıcaklıkta 2 saat süre ile östenitleme işlemi yapılmıştır. Östenitlenen numuneler zaman-sıcaklık dönüşümü grafiği dikkate alınarak perlitik bölgeyi kesmeyen bir soğutma hızında 320°C ve 350°C sıcaklık değerlerine kadar numunelere tuz banyosu içerisinde su verme işlemi yapılmıştır. Daha sonra numuneler 320°C ve 350°C sıcaklık değerlerinde 90 dakika süreyle bekletilerek östemperleme işlemi yapılmıştır. Östemperleme işleminin tamamlanmasından sonra malzemelerin mekanik ve metalürjik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla spektral analiz, metalografi, çekme testi, sertlik testleri, optik mikroskop yardımıyla mikroyapı analizi yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD), Mekanik özellikler, Mikroyapı, Molibden (Mo), Nikel (Ni), Östemperleme, Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir

## **ABSTRACT**

### **MS THESIS**

# **INVESTIGATION OF THE CHANGE IN MECHANICAL PROPERTIES BY AUSTEMPERING HEAT TREATMENT OF DUCTILE IRONS CONTAINING MOLYBDENUM AND NICKEL**

**Furkan İLÇİN**

**Konya Technical University  
Institute of Graduate Studies  
Department of Mechanical Engineering**

**Advisor: Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN**

**2022, 61**

**Jury**

**Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN  
Assoc. Prof. Dr. Gürol ÖNAL  
Assoc. Prof. Dr. Mürsel EKREM**

In this study, austempering heat treatment has been optimized for ductile irons (DI) containing molybdenum and nickel. In addition to the composition of GGG-70 ductile iron material, ductile iron was produced by adding molybdenum and nickel elements. Heat treatment was applied to the samples whose production processes were completed. Austenitization was carried out for 2 hours in the temperature range of 930°C. The austenitized samples were quenched in a salt bath up to temperatures of 320 °C and 350 °C at a cooling rate that did not cut the pearlitic zone, taking into account the time-temperature conversion graph. Then, the samples were kept at 320 C or 350 C for 90 minutes. After the heat treatment process has been completed, spectral analysis, metallography, tensile tests, hardness tests, microstructure analysis with the help of optical microscope in order to determine the mechanical and metallurgical properties of the materials.

**Keywords:** Austempering, Austempered Ductile Iron (ADI), Ductile Iron, Mechanical Properties, Microstructure, Molybdenum (Mo), Nickel (Ni),

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam sürecinde çok değerli bilgileri ve deneyimleri ile birlikte bana yol göstererek her türlü desteği sağlayan, çalışmamın bilimsel değerler ışığında en doğru şekilde tamamlanmasında yardımcı olan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Ömer Sinan ŞAHİN ve Sayın Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca malzemelerin üretilmesinde destek olan Sayın Alper Melih ATAÇ ve Koçak Metalurji Sanayi firmasına, östemperleme ısıl işleminin yapılmasını sağlayan Döksan Isıl İşlem firmasına teşekkür ederim.

Son olarak bugünlere gelmemde yardımlarını esirgmeden maddi ve manevi olarak her zaman beni destekleyerek yanımda olan çok sevgili aileme ve tüm sevdiklerime teşekkürlerimi sunarım.

Furkan İLÇİN  
KONYA-2022

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>2</b>
2.1. Östemperlenmiş KGDD malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi.....	2
2.2. Alaşım elementi ilavesinin östemperlenmiş KGDD üzerine etkileri.....	3
2.3. Isıl işlem parametrelerinin östemperlenmiş KGDD üzerine etkileri .....	4
2.4. Alaşım elementi ilavesi ve ısıl işlem parametrelerinin östemperlenmiş KGDD üzerine etkileri .....	7
<b>3. DÖKME DEMİRLER</b> .....	<b>11</b>
3.1. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması .....	12
3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirler .....	16
3.2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi .....	18
3.2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementlerinin Etkisi.....	19
3.2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler .....	22
3.3. Östemperleme Isıl İşlemi .....	25
3.4. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler.....	27
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	<b>29</b>
4.1. Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimi .....	29
4.2. Östemperleme Isıl İşlemi .....	33
4.3. Malzemelerin Karakterizasyonu .....	35
<b>5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA</b> .....	<b>36</b>
5.1. Mikroyapı Analizleri.....	36
5.2. Brinell Sertlik Deneyi Sonuçları .....	42
5.3. Küreselleşme Oranları ve Grafit-Ferrit-Perlit Yüzdeleri .....	43
5.4. Çekme Deneyi Sonuçları .....	45
<b>6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b> .....	<b>48</b>
6.1 Sonuçlar ve Öneriler .....	48
<b>KAYNAKLAR</b> .....	<b>50</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

C	:	Karbon
Ca	:	Kalsiyum
CaO	:	Kalsiyum Oksit
CE	:	Karbon Eşleniği
Cr	:	Krom
Fe <sub>3</sub> C	:	Sementit
Fe-Fe <sub>3</sub> C	:	Demir-Sementit
Fe-Gr	:	Demir-Grafit
HB	:	Brinell Sertliği
HRC	:	Rockwell Sertliği
HV	:	Vickers Sertliği
KNO <sub>3</sub>	:	Potasyum Nitrat
Mg	:	Magnezyum
Mn	:	Mangan
Mo	:	Molibden
NaNO <sub>3</sub>	:	Sodyum Nitrat
Nb	:	Niyobyum
NbC	:	Niyobyum Karbür
Ni	:	Nikel
O	:	Oksijen
P	:	Fosfor
S	:	Kükürt
Si	:	Silisyum
Y	:	İtriyum
γ	:	Östenit
α	:	Ferrit

### Kısaltmalar

AISI	:	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)
ASTM	:	Uluslararası Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu (American Society for Testing and Materials)
CTOD	:	Çatlak Ucu Açıklığı Yer Değiştirme (Crack Tip Opening Displacement)
EDS	:	Enerji Dağılım Spektrometresi (Energy Dispersive Spectrometry)
ISO	:	Uluslararası Standardizasyon Organizasyonu (International Organization for Standardization)
KGDD	:	Küresel Grafitli Dökme Demir
SEM	:	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
XRD	:	X Işını Kırınımı (X-Ray Diffraction)



## 1. GİRİŞ

AISI 4140 çeliği, mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanına sahip olan bir çelik türüdür. Ancak geniş kullanım alanına sahip olmasına rağmen üretimi sırasında yaşanan birtakım zorluklar sebebiyle bazı dezavantajlara sahiptir. Örneğin üretimi sırasında haddeleme yöntemi kullanılması sebebiyle üretilen malzemenin tane oryantasyonu, hadde doğrultusunda olmaktadır. Bunun sonucunda malzemenin mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Ayrıca istenilen boyut ve geometride bulunamaması ve karmaşık biçimlerde üretilmemesi de bir başka dezavantajdır.

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD) veya bir diğer adıyla sfero dökme demirler olarak adlandırılan tıpkı çelikler gibi yüksek mekanik özelliklere sahip olan bir dökme demir türüdür. KGDD'ler isimlerini, üretim süreçleri sırasında kompozisyonlarına belirli oranlarda ilave edilen ve aşılacağı olarak adlandırılan başta magnezyum (Mg) olmak üzere çeşitli alaşım elementlerinin etkisiyle KGDD malzemelerin yapılarında bulunan karbon (C) atomlarının küre formunda katılaştırması sonucunda bu isimle anılmaktadırlar. Metal esaslı malzemelerin birçoğunda olduğu gibi çeşitli ısıl işlem türleri kullanılarak KGDD malzemelerin de mekanik özellikleri çok daha iyi seviyelere getirilebilmektedir. Bu ısıl işlemlerden bir tanesi olan östemperleme ısıl işlemi, KGDD malzemelerin mekanik özelliklerinin daha iyi seviyelere getirilmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmada molibden (Mo) ve nikel (Ni) ilave edilmiş GGG-70 KGDD malzemenin östemperleme ısıl işlemi yardımıyla mekanik özellikleri iyileştirilerek AISI 4140 çeliği gibi yaygın olarak kullanılan bir malzemenin özelliklerine ne kadar yakınsadığı birtakım testler aracılığıyla ortaya konulmuştur.

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Bu çalışmada, Mo ve Ni ilave edilen KGDD malzemeye yapılan östemperleme ısı işlem parametrelerinin optimizasyonu ile mühendislik uygulamalarında yaygın kullanım alanına sahip AISI 4140 çeliğine alternatif bir malzeme üretimi amaçlanmıştır. Yapılan kaynak araştırmaları doğrultusunda Mo ve Ni başta olmak üzere element ilavesinin malzeme kompozisyonuna ve ısı işlem parametrelerinin mekanik özellikler üzerine ne gibi etkileri olduğu araştırılmıştır.

### 2.1. Östemperlenmiş KGDD malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi

Artola ve arkadaşları (2017) çalışmalarında, östemperlenmiş KGDD malzemelerin belirli standartlara sahip olduklarını ancak bu standartların östemperlenmiş KGDD malzemelerin gerçek potansiyellerini yansıtmadığını belirtmişlerdir. Çalışmalarında, östemperlenmiş KGDD'lerin diğer malzemelerin yerine kullanımı arttırmak için GJS-900-8 ve GJS-1200-3 kalite standartları arasında, gerilim yoğunluğu ve kritik çatlak ilerlemesine (CTOD) göre karşılaştırmaları yapılmıştır. Daha sonra yorulma testi yaparak östemperlenmiş KGDD malzemelerin çalışma ömrünü hesaplayarak diğer malzemelere göre karşılaştırmasını yapmışlardır.

Benam (2016) çalışmasında, KGDD'lerin yüksek dayanım ve sertlik özellikleriyle birlikte mükemmel esneklik ve düşük maliyete sahip olmasını, KGDD'lere östemperleme ısı işlemi sonucunda mikro yapısında oluşan ösferrit ile doğrudan bağlantılı olduğu ile ilişkilendirmiştir. Alaşım elementi ilavesinin östemperlenebilirliği ve östemperleme reaksiyonunun hızını arttırdığından bahsetmiştir. Bunun sonucunda mikro yapı ve mekanik özelliklerin değiştiğini de vurgulamıştır. Çalışmasında KGDD'lere alaşım elementi ilavesinin mekanik özelliklere, mikro yapısal değişimlere, iki aşamalı östemperleme reaksiyonlarına, işlem penceresine ve östemperlenebilirliğe etkilerini ortaya çıkarmıştır.

Çetin ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada, mühendislik uygulamalarında yaygın kullanım alanına sahip KGDD malzemelerin düşük maliyet, yüksek mukavemet ve sertliğinin yanında süneklik göstermesi sebebiyle diğer dökme demir türlerinden daha çok tercih edildiğini vurgulamışlardır. Yerli olarak üretilen ISO 17804 standartlarını sağlamayan KGDD malzeme ile standartlara uygun orijinal numunenin karşılaştırmasını yapmışlardır. İki numunenin de mekanik ve mikro yapısal özellikleri incelenerek yerli olarak üretilen malzemenin hangi geliştirmelere ihtiyacı olduğu belirlenmiştir.

## 2.2. Alaşım elementi ilavesinin östemperlenmiş KGDD üzerine etkileri

Duwe ve arkadaşları (2021) çalışmalarında, çelik çubuklar, borular ve profillerin sıcak haddeleme gibi zorlu şartlar sonrasında elde edilmektedir. Perlitik ve iğnemsî yapıya sahip geleneksel dökme demirler ise sünekliklerinin düşük olması sebebiyle bu zorlu süreçlerde iyi sonuç vermemektedir. Bu sebeple iyi bir alaşım elementi seçimi yapılarak beynit, östenit ve martenziti birleştiren bir yapıya sahip yüksek sertlik ve mukavemete sahip olan uzamayan yeni bir malzeme ortaya çıkaracaktır. Bu amaçla çalışmalarında üç alaşım elementini de içeren her iki konsantrasyonda da tam faktöriyel deney tasarımı yapmışlardır. Alaşımın dökülmüş, ısı işleme tabi tutulmuş ve mekanik özellikleri ve mikro yapısı detaylıca incelenmiştir. Sonuçlar, uygun mekanik özelliklerin belirlenmesini sağlayarak uygun alaşımın matematiksel modelinin bulunmasını sağlamıştır.

Čatipović ve arkadaşları (2018) çalışmalarında, Mo ve mangan (Mn) elementlerinin östemperlenmiş KGDD'lerin mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemişlerdir. Geleneksel KGDD'lerin mukavemet ve sünekliğini arttırmak için belirli alaşım elementlerinin ilave edilmesi gerekmektedir. Bu alaşım elementleri perlit oluşumu engellerken östemperleme işlemi sırasında östenitin stabilitesini sağlamalıdır. Bunu sağlamak için genellikle Ni, Cu, Mn ve Mo elementleri ilave edilmektedir. Sertleşebilirliği arttırmak için Mo ilave edilirken, Mn ilavesi hem sertleşebilirliği hem de çekme mukavemetini etkilemektedir. Ayrıca yapıda küresel olmayan grafitlerin oluşumunu ve inklüzyon gibi oluşması istenmeyen yapıların oluşumunu tetikleyecek alaşım elementlerinin kullanılmaması gerektiğini vurgulamışlardır.

Bartosiewicz ve arkadaşları (1995) çalışmalarında, Cr ilavesinin östemperlenmiş KGDD'in çekme özellikleri ve kırılma tokluğu gibi mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Ayrıca araştırmalarında Cr ilavesinin ferritin büyüme kinetiğine de etkisini incelemişlerdir. Kompakt ve silindirik çekme test numuneleri Cr ilave edilmiş ve edilmemiş numuneler için hazırlanmıştır. Bu numuneler dört farklı mikroyapı elde edilmesi amacıyla dört farklı sıcaklıkta ısı işleme tabi tutulmuştur. Çekme testi ve kırılma tokluğu testleri ASTM E-8 ve E-399 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çatlak ilerleme mekanizması kırılma tokluğu testi sırasında belirlenmiştir. Sonuç olarak, östemperlenmiş KGDD'in akma mukavemeti, çekme testi ve kırılma tokluğu değerleri ferritin hacimce fraksiyonuna bağlı olarak artmıştır. Kırılma tokluğunun en yüksek değeri ferritin hacimce fraksiyonu yaklaşık olarak %60 arttığında gözlemlenmiştir. Östemperlenmiş KGDD'in kırılma tokluğu, 40 HRC sertliğinde veya alaşım içeriğinin

matris içerisinde %60 ferrit ve %25 östenit bulundurduğu durumlarda en yüksektir. Bu nedenle kırılma tokluğunu optimize etmek için malzemeler 280°C sıcaklıkta 3.5 saat östemperlenmelidir. Cr ilavesinin sertliğin 40 HRC değerinden az olduğu durumlarda östemperlenmiş KGDD'in kırılma tokluğunu azalttığı tespit edilirken sertliğin 40 HRC değerinden büyük olduğu durumlarda ise kırılma tokluğunda önemli değişiklikler meydana gelmediğini bulmuşlardır. Çatlak ilerleme mekanizmasının klivaj benzeri düzlemler ve mikro boşluklardan ilerlediği tespit edilmiş ve çatlakların grafitler üzerinden yol alarak birbirine bağlandığı tespit edilmiştir.

### 2.3. Isıl işlem parametrelerinin östemperlenmiş KGDD üzerine etkileri

Bendikiene ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada, östemperleme sıcaklığının östemperlenmiş KGDD'in mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini incelemiştir. Östemperlenmiş KGDD'ler yapılarında yüksek mukavemet ve uzamaya sahip grafit nodüllerine sahiptir, bu da mekanik özelliklerinin diğer geleneksel KGDD'lerden üstün olduğu anlamına gelmektedir. Bu özelliklerin kombinasyonu için östenitleme ve ardından farklı sıcaklıklarda östemperleme yapılmalıdır. Östenitleme şartları tüm numunelerde 30 dakika boyunca 890°C sıcaklıkta yapıldıktan sonra, tuz banyosunda su verme işlemi yapılmaktadır. Çalışmanın üzerinde durduğu ana konu, belirli oranlarda Ni, Cu ve Mo ilavesiyle KGDD'in değiştirilmesi ile beraber östemperleme sıcaklığının (270°C, 300°C ve 330°C) mikroyapıdaki değişim, uzama, sertlik ve kırılma direnci üzerine etkileridir. Östemperleme sıcaklığının artmasıyla Vickers (HV) ve Rockwell (HRC) sertlikleri 535,7'den 405,3 HV/1 (55,7'den 44,5 HRC) değerlerine inmiştir. Optik görüntüleme grafit nodüllerinin formasyonları ve ösferrit matrislerinin oluşumu gözlenmiştir. XRD ile de bu sonuçlar doğrulanmıştır. Kırılma yüzeyi analizi sonuçlarında sünek kırılma, taneler arası kırılma ve sünek çukur kırığı gibi birkaç kırılma mekanizması görülmüştür. Gerilme kontrollü mekanik yorulma testi deneylerinde, 330°C östemperleme sıcaklığının yüksek yorulma ömrü sağladığı sonucuna ulaşmışlardır.

Gorny ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmalarında, döküm parçaların ısıtma işlemi sırasında katı hal dönüşümünün son mikroyapı, özellik ve termal denge açısından pratikte önemli bir yeri vardır. Yaptıkları çalışmada yapısal formasyonların ve KGDD'in demirin termal dengesinin üzerinde durmuşlardır. Çalışmada 25 mm et kalınlığına sahip numuneler üzerinde ve çeşitli sıcaklık değerleri altında (850°C ile 950°C aralığında östenitleme ve 250°C ile 380°C aralığında östemperleme) deneysel çalışmalar

yapılmıştır. XRD analizi ile yapısal parametreler ve bununla ilişkili olarak faz dağılımları, latis parametresi ve mikroyapı içerisindeki gerilmelerin analizi yapılmıştır. Sonuç olarak KGDD malzemenin termal kararlılığı üzerine yapının ve homojenliğin etkilerinin bulunması sağlanmıştır. Ayrıca çalışmada KGDD yapısının homojen ve yüksek ısıl kararlılığa sahip olması için blok şekilli östenit elde etmek için strateji geliştirmeyi amaçlanmıştır.

Pereira ve arkadaşları (2021) çalışmalarında, (%3,2 C – %2,8 Si – %1,8 Ni – %1,4 Cu – %0,4 Mn – %0,2 Mo – %0,1 Cr) içeriğine sahip östemperlenmiş KGDD’lerde östemperleme yolunun beynitik reaksiyon kinetiği üzerine etkilerini incelemişlerdir. İkinci adımda, geleneksel ve hızlı östemperleme ısıl işlemiyle farklı östenit boyutları (94, 39 ve 15  $\mu\text{m}$ ) ve ikincil grafit çökmesini elde etmeye çalışmışlardır. 350°C sıcaklıktaki beynitik dönüşüm kinetiğini Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov denklemlerini kullanarak tanımlamaya ve Avrami değerlerinin uyarlanması için çalışmışlardır. Kaba östenit mikroyapısının östemperleme reaksiyonu ikincil grafit çökmesiyle daha hızlı gerçekleşirken, orta östenit tanesinde bu durum en yavaş şekilde gerçekleşmiştir. Grafit/östenit arayüzey alanındaki artış, yarılanma süresini östenit tane sınırı artışına kıyasla bir miktar azaltmıştır. Hızlı östenizasyon yolu ile işlenen östemperlemiş numuneler en iyi çekme özelliklerine sahiptir ve tane sınırında önemli oranda allotopik yapıda ferrite sahip olmasına rağmen ISO ve ASTM standart dereceleri yüksektir.

Öztürk ve Yıldırım (2019) yaptıkları çalışmada, östemperleme sıcaklık ve süresinin östemperlenmiş sünek dökme demirlerin mikro yapı ve sertliğine etkisi detaylı bir biçimde incelenmiştir. GGG-50 KGDD malzemelere 950 °C’ de 2 saat östenitleme ısıl işlemi uygulandıktan sonra 350 ve 320 °C sıcaklıklarda 90 ve 120 dakika süre ile östemperleme yapılmıştır. Östemperleme işleminden sonra numunelerin mekanik ve metalürjik özellikleri çeşitli karakterizasyon yöntemleri ile incelenmiştir. Her iki sıcaklık ve sürede östemperleme işleminden sonra karakteristik ösferrit ve yüksek karbonlu östenitten oluşan östemperlenmiş sünek dökme demir mikro yapısı elde edilmiştir. Sonuç olarak, Östemperleme sıcaklığı azaldıkça ve süresi arttıkça numunelerin sertliği artmıştır. Ayrıca, östemperleme süresinin artmasıyla yüksek karbonlu östenitin karbon yüzdesinin arttığı sonuçlarına varmışlardır.

Gençsoy (2016) yaptığı çalışmada, GGG-40 KGDD’lere östemperleme ve indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemlerinin malzemenin mikroyapı, sertlik, aşınma davranışı ve çekme dayanımına etkilerini araştırmışlardır. GGG-40 KGDD numuneleri 900°C sıcaklıkta ve 90 dakika süreyle östenitleme yapılmıştır. Östenitlemeden sonra

320°C ve 380°C sıcaklıklarda 120 dakika süreyle %50 KNO<sub>3</sub> + %50 NaNO<sub>3</sub> tuzlarında östemperlenmiştir. Sonuç olarak yapıda alt ve üst beynit/ösferrit morfoloji oluşumu gözlemlenmiştir. Daha sonra indüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi yaparak prosesi tamamlamışlardır. Östemperlenmiş KGDD numunelerin hazırlık aşamalarını tamamlayarak optik mikroskopi SEM, EDS ve XRD analizlerini yapmışlardır. Ayrıca malzeme yüzeyinden Vickers mikro sertlik ölçümleri alınmıştır. Numunelerin çekme testleri TS 287 EN 895 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Aşınma deneyleri; 10, 20, 30 N yük uygulanarak, 8 m ve 15 m yol mesafesi kullanılarak 320 ve 800 mesh zımparayla düşey dönel hareket sergileyen aşınma deney makinasında yapılmıştır. Aşınma yüzeyleri SEM’de incelenmiştir ve inceleme sırasında aşınma kaybı değerleri ölçülmüştür. Deneylerin sonucunda KGDD malzemenin yapısında bulunan küresel grafitlerin yağlayıcı etkisinden ve yüzey sertleştirme işleminden kaynaklı aşınma dayanımının arttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Kılıçlı (2004) yaptığı çalışmada, östemperlemenin alaşımsız KGDD mikroyapı ve çekme özellikleri üzerine etkisini incelemiştir. Bu amaçla ferritik KGDD numunelerin 795°C, 805°C ve 815°C sıcaklıklarında 20 dakika tavlamanın ardından 365°C’de 30, 60, 90, 120, 150 ve 180 dakika süre ile östemperleme işlemi yapılmıştır. İnce ösferritik morfolojiye sahip numuneler elde etmek amacıyla bazı numuneler 900°C’den su verilmiş ve daha sonra kritik tavlama sıcaklıklarından östemperlenmiştir. Mekanik özellikleri karşılaştırmak amacıyla bir grup numuneler geleneksel olarak östemperlenmiştir. Sonuç olarak artan kritik tavlama sıcaklığı ile birlikte ösferrit hacim oranının arttığı gözlemlenmiştir. Ösferrit hacim artışı ile akma ve çekme dayanımı artmış, % uzama ve kesit alanı daralması azalmıştır. Ancak kaba ösferritik yapıya sahip numunelerde, çekme özelliklerindeki değişim ince ösferritik yapıya sahip numunelere göre daha az olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Kaba ösferrit yapıya sahip numunelerde yeni ferrit fazı (epitaksiyel ferrit) oluşumunu tespit etmişlerdir. Kaba ösferrit morfolojisine sahip numunelerde 90-150 dakika, ince ösferrit morfolojisine sahip numunelerde ise 60-120 dakika aralıklarında optimum çekme dayanımı-% uzama kombinasyonlarına ulaşmışlardır. Sonuç olarak kritik sıcaklıklarda tavllanmış ve östemperlenmiş KGDD’in (çift fazlı matris yapıya sahip KGDD’ler) çekme özellikleri, ASTM standartlarına uygun olan KGDD’in çekme özellikleri ile karşılaştırıldığında, % uzama olarak geleneksel olarak östemperlenmiş ferritik ve perlitik KGDD sınıflarına göre daha fazladır. Bununla birlikte dayanımları geleneksel olarak östemperlenmiş KGDD’lerden daha düşük ancak ferritik ve perlitik KGDD’lerden daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

## 2.4. Alaşım elementi ilavesi ve ısıl işlem parametrelerinin östemperlenmiş KGDD üzerine etkileri

Ahmed ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada, KGDD ve östemperlenmiş KGDD malzemeleri geliştirmek için nikel (Ni), bakır (Cu) alaşımlarını ve mikro alaşımlama için niyobyum (Nb) elementini kullanmışlardır. Ayrıca KGDD'in çekirdeklenme hızını arttırmak ve Nb elementinin olumsuz etkilerini azaltmak için nano karbon tozu ilave etmişlerdir. Yaptıkları metalografik analiz sonucunda, alaşımdaki Nb içeriğinin ağırlıkça %0,1'e çıkarılmasının grafit ötektik hücrelerinin sayısını arttırdığını ve grafitin son yapısını iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Ayrıca Nb'nin ağırlıkça %0,1'e çıkarılmasıyla grafitin nodularitesi azalmıştır. SEM sonuçlarında niyobyum karbür (NbC) partiküllerinin KGDD yapısının içinde dağıldığını gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak Ni, Cu ve Nb ilavesinin perlit yapısının olumu üzerinde önemli etkileri olduğu ve incelenen tüm yapılarda kaba, ince, kırık ve küreselleşmiş perlit yapıları olduğunu açıklamışlardır. Ayrıca NbC partiküllerinin grafit ve ferrit için çekirdeklenme bölgeleri oluşumuna sebep olduğunu ve Nb ilavesinin östemperleme aşamasında ösferrit oluşumunu hızlandırdığını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak Cu, Ni ve mikro alaşımlama için ilave edilen Nb elementinin mukavemet ve süneklik kombinasyonunu olumlu olarak etkilediği sonucuna varmışlardır.

Čatipović ve arkadaşları (2021) çalışmalarında, bakır (Cu) ilavesinin ve ısıl işlemin östemperlenmiş KGDD'in mikroyapısı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Cu içeriğinin değiştirilerek kalıntı östenitin KGDD içerisindeki hacimsel fraksiyonunun değiştirilmesini amaçlamışlardır. İlave edilen her Cu miktarının ve ısıl işlem parametrelerinin KGDD malzemenin mikroyapısına etkisini içeren eşsiz bir matematiksel model oluşturmayı planlamışlardır. Böylece geliştirilen matematiksel modeller ile ısıl işlemin giriş parametrelerinin ve Cu içeriğinin etkilerinin nihai mekanik özelliklere etkilerinin geliştirilmesini amaçlamışlardır.

Hedge ve arkadaşları (2021) çalışmasında, östemperleme sıcaklığının ve Mn içeriğinin östemperlenmiş KGDD'in darbe enerjisi üzerine etkilerini incelemişlerdir. Mn elementinin önemli bir sertlik geliştirici olduğunu ancak belirli bir oranın üzerinde Mn ilavesinin mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiler oluşturabileceğini vurgulamışlardır. Çalışmasında östemperleme sıcaklıkları ve Mn içeriği (%0,268-%1,01 aralığı) için darbe enerjisi ve çekme özellikleri belirlemişlerdir. Bir faktörün sonuçlara olan etkisini görmek için istatistiksel analiz yapmıştır. 420°C gibi yüksek östemperleme sıcaklığında darbe enerjisinin yüksek olduğunu gözlemlemişlerdir. %1 oranından fazla

Mn ilavesinin darbe enerjisi üzerinde olumsuz bir etkisinin olmadığını gözlemlemişlerdir. Nihai çekme mukavemeti ve darbe enerjisinin mükemmel kombinasyonu elde ederek parametreleri optimize etmek için tepki yüzey metodolojisini kullanmışlardır. Regresyon denklemler Mn ilave edilen KGDD'in sünekliği ve darbe enerjisini tahmin etmek için uygun olduğunu ifade etmişlerdir.

Bedolla-Jacuinde (2020) yaptığı çalışmada, az miktarda Cr ilavelerinin östemperleme işlemi sırasında KGDD üzerindeki rolünü incelemiştir. Çalışmasında 'işleme penceresinin' üzerinde durmuştur. Elde ettiği sonuçlarda Cr ilavesinin, östenitin stabilitesini azaltan, sertliği arttıran ve sünekliği azaltan martenzitik dönüşüme neden olduğuna ulaşmıştır. Benzer şekilde artan Cr ilavesinin 1. aşamada ösferrit dönüşümünü geciktirdiği ve optimal işleme penceresini daraltarak beynit oluşumunu teşvik eden 2. Aşamayı hızlandırdığını görmüştür. Fakat östemperleme işlemi öncesinde hazırlık için yapılan uzun süreli homojenizasyon sürecinde bu etkinin önemli oranda azaldığını söylemektedir. Çalışmanın sonucunda katılaşma sırasında Cr elementinin ayrışma derecesi de tartışılmıştır.

Konca ve arkadaşları (2017) yaptıkları çalışmada, östemperlenmiş KGDD'lerin geleneksel dökme demirler ve çeliklere göre çeşitli avantajları olduğunu vurgulamışlardır. Çalışmada Ni, Cu ve Mo alaşım elementlerinin GGG-60 KGDD malzemesinin östemperlenebilirliği üzerine etkilerini incelemişlerdir. GGG-60 KGDD'in alaşımlanmasında, ilk olarak Ni ve Cu kullanılarak numune üretilmiş, ikinci tür de ise Mo, Ni ve Cu kullanılarak alaşımlama yapılmıştır. Daha sonra 290 °C, 320 °C ve 350 °C sıcaklıklarında östemperleme işlemi yapılmıştır. Isıl işlem sürecinde NaNO<sub>2</sub>-KNO<sub>3</sub> tuzları ile tavlama yapılmıştır. 290 °C sıcaklığında GGG-60 malzemesine Cu ve Ni alaşımlanarak yapılan östemperleme işleminde, malzemenin sünekliğinde herhangi bir kayıp olmadan sertliğinin %44 arttığı gözlemlenmiştir. Aynı sıcaklık değerinde Mo, Ni ve Cu ilave edilmiş olan GGG-60 malzemesinin sertliğindeki artış %80 olurken sünekliğinde bir miktar azalma görülmüştür.

Gider (2015) çalışmasında, farklı silisyum (Si) oranlarına sahip ferritik-perlitik ve ferritik mikroyapılı KGDD'lere uygulanan tek ve iki kademeli östemperleme ısıl işlemlerinin, malzemenin mikroyapıları, sertlik ve aşınma dirençleri gibi mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Ferritik-perlitik numuneler 900°C bir saat, ferritik numuneler ise 975°C'de 90 dakika östenitleme işlemine tabi tutulmuştur. Tek kademeli östemperleme işlemi, tüm numunelerin 250°C ve 400°C'de 20 dakika bekletilmesiyle yapılmıştır. İki kademeli östemperleme işlemi düşük sıcaklıktan yüksek sıcaklığa



(250°C'den 400°C'ye) ve yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa (400°C'den 250°C'ye) geçilerek yapılmış, numuneler her iki sıcaklıkta 20'şer dakika bekletilmiştir. Numuneler tüm östemperleme işlemlerinden sonra havada soğumaya bırakılmıştır. Östemperleme işlemlerinin sonucunda, numunelerin mikroyapılarında östemperleme türüne bağlı olarak değişen oranlarda ferrit ve kalıntı östenit olduğu belirlenmiştir. Östemperlenmiş numuneler ve ısı işlem yapılmamış numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için sertlik ve aşınma deneyleri yapmışlardır. İncelemeler sonucunda ısı işlemi sertlik değerini arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Ayrıca aşınma direncindeki artış östemperlenmiş numunelerde 2 ile 3 kat arasında olmuştur. Bunların yanında ferritik numuneler ile ferritik-perlitik numuneler arasındaki farklılıkları da incelemişlerdir.

Yazman ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada, KGDD'lere alaşım elementlerinin (Cu, Ni ve Mo) ve östemperleme ısı işlemi mikroyapıya olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmalarında %2,87-3.56 C ve %2.31-2.5 Si içeren ferritik matris sahip (alaşımız) numune üretmişlerdir. Cu, Ni ve Mo elementi miktarlarının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini araştırmak amacıyla temel alaşıma değişik miktarlarda Cu (%0.669-1.27), Ni (%0.337-0.637) ve Mo (%0.0014-0.276) ilavesi yapılarak 10 farklı numune üretmişlerdir. Daha sonra bu numuneleri 900 °C'de 90 dakika östenitleme sıcaklığında bekletildikten sonra 380 °C'de 90 dakika östemperlenmişlerdir. Östemperleme ısı işlemi sonucunda genel olarak ösferrit adı verilen a + g (yüksek karbonlu östenit) matris yapısı elde etmişlerdir. Elde ettikleri yapıya bağlı olarak mekanik özellikler, dökülmüş şartlardaki özelliklere göre büyük ilerleme sağladıklarını belirtmişlerdir.

Tun ve Lwin (2008) çalışmalarında, otomobil diferansiyel dişlisi için düşük alaşımlı Ni-Mo-Cu içeren KGDD'lere östemperleme sıcaklık ve süresinin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Numuneler 850 °C, 900°C ve 950°C sıcaklıklarda 1,5 saat östenitlendikten sonra 350°C sıcaklıkta 30, 60, 90 ve 120 dakika sürelerde östemperlenmiştir. Dijital polarize mikroskop ile mikroyapıyı ve beynitik dönüşümü incelediler. Ayrıca sertlik, çekme ve yorulma gibi mekanik özellikleri belirlemek için çeşitli testler yapmışlardır.

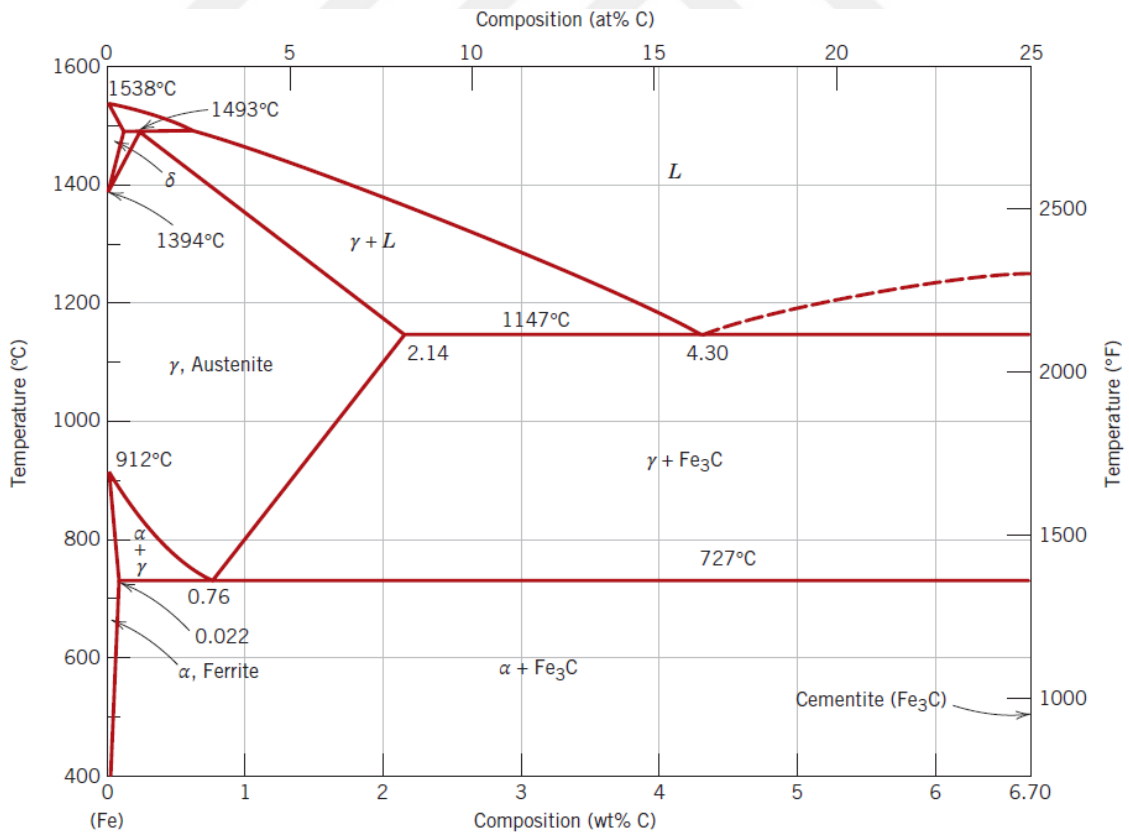
Özcan (2003) çalışmasında, kalay (Sn) miktarı ve izotermal dönüşüm sıcaklığının östemperlenmiş KGDD'lerin mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Kalay miktarındaki değişimin olası etkilerini belirlemek için standart GGG-30, GGG-40 ve GGG-50 malzemelerini referans almıştır. Bu malzemelerin yapısındaki kalay miktarı %0,016-0,050 aralığında iken yürütülen çalışmada kalay miktarı %0,26'ya kadar

çıkarılmış ve bu artışın mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Test numuneleri 925 °C sıcaklıkta 1 saat östenitlendikten sonra 350°C, 375°C, 400°C ve 420°C sıcaklıklarda tuz banyolarında 1 saat östemperlenmiştir. Kalıntı östenit miktarı XRD yöntemiyle belirlenmiştir. Sonuç olarak çekme mukavemetinin %0,1 Sn değerine kadar arttığı gözlemlenirken bu değer üzerinde çekme mukavemeti değerinin sabit kaldığı görülmüştür. Sertlik değeri de %0,1 Sn değerinde minimum olurken bu değerden sonra çok düşük miktarda yükselmiştir. Ayrıca izotermal dönüşüm sıcaklığındaki artışın çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinde azalışa sebep olurken uzama değerinde artışa sebep olduğu sonucuna varmışlardır.

Hasırcı (2000) yaptığı çalışmada, KGDD'lere alaşım elementleri Cu ve Ni ilavesi ile birlikte östemperleme süresinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkilerini incelemiştir. Bu amaçla %3,5-3,7 C, %2,6-2,8 Si içeren ferritik matrikse sahip numune üretilmiştir. Çalışma kapsamında ilave edilecek olan alaşım elementleri ise %0,6, 0,65 ve 0,7 oranlarında Cu, %0,5, 0,7 ve 1 oranlarında da Ni ilavesi yapılarak 5 farklı numune üretilmiştir. Numuneler 900°C sıcaklıkta 90 dakika östenitlendikten sonra 370°C sıcaklıkta 60, 90, 120, 150, 180 ve 200 dakika sürelerde östemperlenmiştir. Sonuç olarak tüm numunelerde östemperleme süresinin artışıyla grafit oluşumunda artış gözlenmiş, darbe dayanımı ve uzama değerlerinde azalma olurken çekme ve akma dayanımları ile birlikte sertlikte artış olduğu sonucuna varmışlardır.

### 3. DÖKME DEMİRLER

Dökme demirler, çelikler gibi demir alaşımları ailesindedir. Dökme demirler ötektik katılaşma gösteren çok bileşenli demir alaşımlarıdır. Dökme demirler çeliklere göre daha fazla C ve Si içeriğine sahiptir. Dökme demirlerin karbon içeriğinin fazla olmasından dolayı çeliklerin aksine mikro yapıda görünen karbon fazı içeriği daha fazladır. Dökme demirlerin başta bileşime bağlı olmak üzere soğutma hızı ve ergime işlemleri, termodinamik olarak yarı kararlı Fe-Fe<sub>3</sub>C sistemi veya kararlı Fe-Gr sistemine göre katılaşabilmektedir. Dökme demirler yarı kararlı Fe-Fe<sub>3</sub>C sistemine göre elde edilirse ötektik içerisindeki zengin karbür fazı demir karbürdür. Ancak kararlı olan katılaşma yolu izlendiğinde zengin karbon fazının yapısı karbürdür. İki sisteme göre de dökme demir alaşımların tanımlanabilmesi için %2'den fazla C içermesi gerekmektedir. Si ve diğer alaşım elementlerinin oranlarındaki önemli değişimler karbonun östenit ( $\gamma$ ) içerisindeki maksimum çözünübilirliği etkilemektedir. Bu nedenle %2 C oranına sahip olan dökme demirlerde mevcuttur (Stefanescu, 1990). Çelik ve dökme demir bölgeleriyle birlikte Fe-C denge diyagramı Şekil 3.1'de belirtilmiştir.



Şekil 3.1. Fe-Fe<sub>3</sub>C Faz Diyagramı (Callister ve Rethwisch, 2018)

Dökme demirlerin sahip olduğu karbon konsantrasyonu sayesinde ergime sıcaklığı, ötektik noktadaki sıcaklık değeri olan 1150°C-1300°C aralığına düşürülmesini sağlamaktadır. Bu nedenle dökme demirlerin ergime sıcaklığı çeliklerin ergime sıcaklığından daha düşük değerlere sahiptir. Düşük ergime sıcaklığı ile dökme demirler yüksek akışkanlık ve kolay dökülebilirliğe sahip olmaktadır (Okunnu, 2015). Bu özelliklere ek olarak dökme demirlerin sahip olduğu bilinen başlıca özellikler şunlardır;

- Düşük ergime sıcaklıkları (1150°C-1300°C)
- Ötektik bileşimin sağladığı iyi akışkanlık özellikleri
- Kalıp şeklini alabilme kabiliyetinin yüksek olması
- Kolay ergitilebilme ve döküm özelliğine sahip olması
- Kimyasal kompozisyonunun ayarlanabilirliğinin kolay olması
- Karmaşık parçaların tek bir işlem sonucunda elde edilebilirliği
- Yüksek işlenebilirlik kabiliyeti
- Titreşim sönümleme kabiliyeti
- Yüksek aşınma ve korozyon dirençleri
- Yüksek basma mukavemetine sahip olmaları

Dökme demirlerde bulunan bu mekanik özelliklerin yanı sıra düşük süneklik ve kopma mukavemetlerinin olması ise sahip oldukları dezavantajlardandır (Bilici, 2004).

### 3.1. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

İlk olarak dökme demirlerin sınıflandırılması kırılma türlerine göre yapılmıştır. Başlangıçta iki tür tanımlanmıştır. Beyaz dökme demirlerde kırılma, demir karbür plakalar boyunca olduğundan dolayı kırılma yüzeyi beyaz renktedir. Bu durum yarı kararlı katılaşmanın sonucudur. Gri dökme demirlerde ise bu durum kararlı katılaşma ile birlikte grafit yüzeyler boyunca meydana gelen ve gri renge sahip yüzey kırığına göre belirlenmiştir. Daha sonra metalografi tekniklerinin geliştirilmesi ile birlikte mikro yapı özellikleri kullanılarak diğer sınıflandırma türleri ortaya çıkmıştır. Grafit şekline göre yapılan sınıflandırmaya göre lamel grafitli, küresel grafitli, kompakt (vermiküler) grafitli ve temper grafitli olmak üzere çeşitli türlerde sınıflandırma yapılmıştır. Matriks yapısına göre yapılan sınıflandırmada ise ferritik, perlitik, östenitik, martenzitik ve beynitik (östemperlenmiş) olmak üzere çeşitli sınıflandırmalar yapılmıştır. Dökme demirlerin ticari isimleri, mikro yapıları ve kırılma tiplerine göre sınıflandırılmış hali Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Dökme demirlerin sınıflandırılması (Stefanescu, 1990)

Ticari Adı	Karbon Zengini Faz	Matrix (a)	Kırılma	Son İşlem
<b>Gri dökme demir</b>	Lamel grafit	P	Gri	Katılaşma
<b>Küresel grafitli dökme demir</b>	Küresel grafit	F, P, A	Gümüş	Katılaşma veya ısıtma işlemi
<b>Kompakt grafitli dökme demir</b>	Kompakt vermiküler grafit	F, P	Gri	Katılaşma
<b>Beyaz dökme demir</b>	Fe <sub>3</sub> C	P, M	Beyaz	Katılaşma ve ısıtma işlemi (b)
<b>Benekli dökme demir</b>	Lamel grafitli + Fe <sub>3</sub> C	P	Benekli	Katılaşma
<b>Temper dökme demir</b>	Temper grafit	F, P	Gümüş	Isıtma işlemi
<b>Östemperlenmiş KGDD</b>	Küresel grafit	At	Gümüş	Isıtma işlemi

(a) F, ferrit; P, perlit; A, östenit; M, martenzit; A, östemperlenmiş (beynit). (b) Beyaz dökme demirlere gerilim giderme ve östenit dönüşümünün devam ettirilmesi dışında ısıtma işlemi yapılmaz

Gri dökme demirler en yaygın kullanım alanına sahip dökme demir sınıfıdır. Kimyasal kompozisyonunda bulunan karbonun büyük çoğunluğu serbest grafit lamelleri halinde yapı içerisinde bulunmaktadır. Kırılma yüzeylerinin gri kristalin yapıda olmasından dolayı gri dökme demirler olarak adlandırılmaktadır. Genellikle ötektik üstü yapıya sahip olan dökme demir türüdür. Yapıda bulunan karbon miktarının artmasına bağlı olarak mekanik özelliklerinde iyileşmeler meydana gelmekte olup titreşim sönümlenme kabiliyetleri oldukça yüksek olan bir dökme demir sınıfıdır.

Beyaz dökme demirlerde karbonun tamamı sementit (Fe<sub>3</sub>C) halinde bulunmakta olup mikro yapıları Fe<sub>3</sub>C ve perlitten oluşmaktadır. Yüksek hızlı soğutma sonucunda oluşan ötektik altı alaşım türüne sahip bir dökme demir yapısıdır. Kırılma yüzeylerinin beyaz kristalin yapıda olmasından dolayı beyaz dökme demirler olarak adlandırılmaktadır. Yapılarında bulunan Fe<sub>3</sub>C'den dolayı yüksek sertlik ve aşınma direncine sahiptir. Gevrek yapıda olan beyaz dökme demirler, aşınma direncinin istendiği fakat sünekliliğin istenmediği yerlerde kullanılmaktadır.

Temper dökme demirler, beyaz dökme demirlere temperleme ısıtma işlemi yapılarak karbürlerin parçalanması sonucunda yüksek mukavemet ve sünekliliğe sahip olan dökme demir türüdür. Mikro yapısında ferrit ve temperleme sonrası elde edilen karbür yapıları bulunmaktadır.

KGDD'ler yapılarında bulunan küresel formdaki grafit yapılarından dolayı bu isimle anılan dökme demir türüdür. Döküm işlemi sırasında aşılacağı ilavesi yapılarak grafitlerin küreselleşmesi sonucunda KGDD'ler elde edilmektedirler. KGDD'ler ile lamel grafitli dökme demirler arasında bileşim olarak herhangi bir fark bulunmamaktadır. Ancak özellikleri ve kullanım amaçları olarak çok büyük farklılıklar vardır. KGDD'ler, dökme demirlerin genel özelliklerinden olan kolay ergitilebilme ve işlenebilirlik gibi özelliklerine ek olarak çeliklerin sahip olduğu yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk gibi özelliklere sahip olmalarından dolayı dökme demirler içerisinde en çok tercih edilen dökme demir sınıfı olma özelliğine sahiptir (Sağlam, 2009).

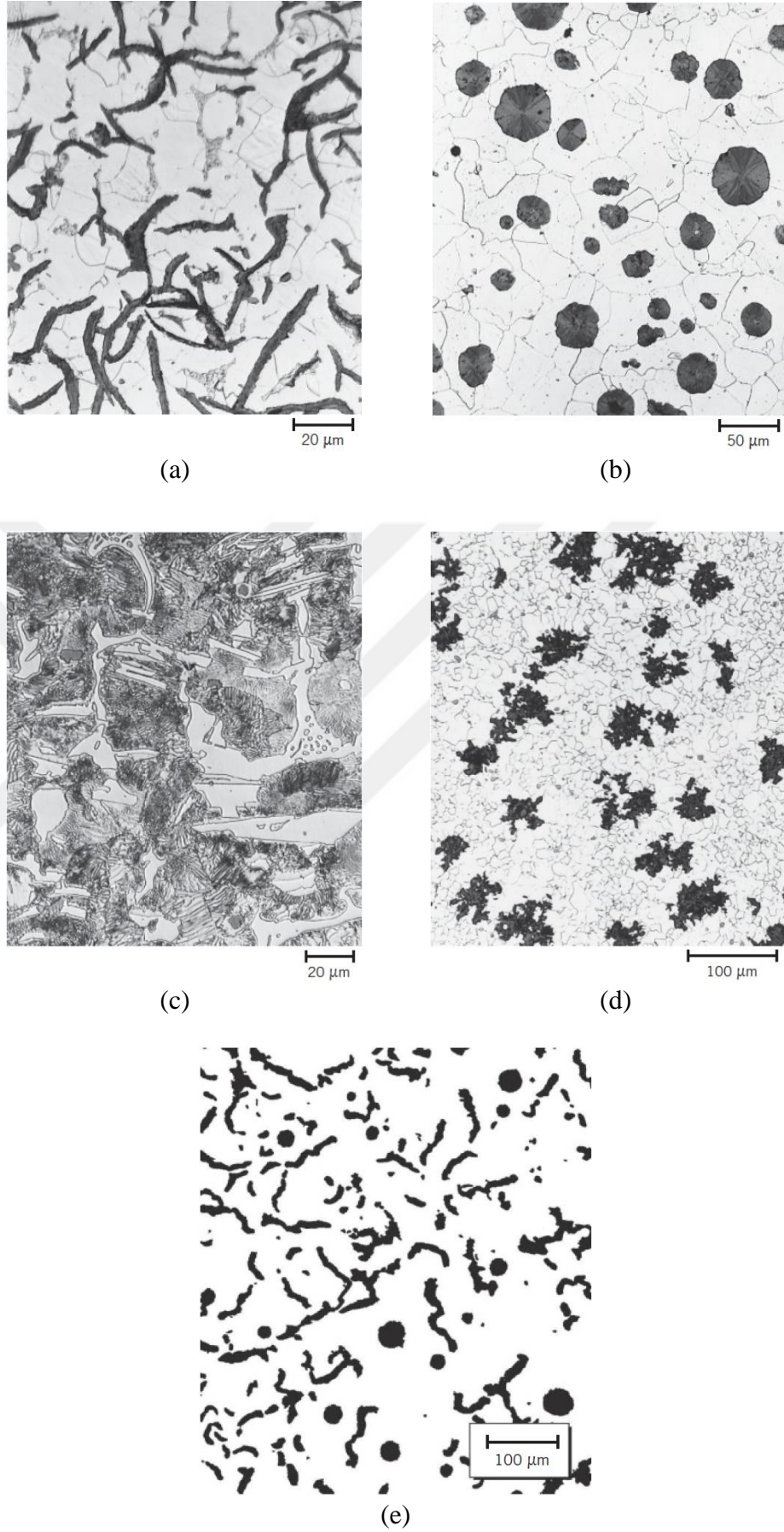
Kompakt grafitli dökme demirler veya vermiküler grafitli dökme demirler, küresel ve lamel grafit yapılarının bir arada bulunduğu dökme demir türüdür. Grafit yapılarından dolayı özellikleri bakımından küresel grafitli ve lamel grafitli dökme demirlerin arasında olarak tanımlanmaktadır. Kompakt grafitli dökme demirlerin kompozisyonları KGDD'lerin kompozisyonlarına benzer oranlardadır (Stefanescu, 1990).

Dökme demir türlerinin sahip olduğu kompozisyon aralıklarına ait özellikler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Dökme demirlere ait kompozisyonlar (Stefanescu, 1990)

Dökme Demir Türü	%C	%Si	%Mn	%P	%S
<b>Gri dökme demir</b>	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.002-1.0	0.02-0.25
<b>Kompakt grafitli dökme demir</b>	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.01-0.1	0.01-0.03
<b>Küresel grafitli dökme demir</b>	3.0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-1.0	0.01-0.03
<b>Beyaz dökme demir</b>	1.8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06-0.2
<b>Temper dökme demir</b>	2.2-2.9	0.9-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.02-0.2

Dökme demir türlerinin her birinin sahip oldukları mikroyapılar birbirinden farklı olduğu bilinmektedir. Bu sebeple mikroyapılarında bulunan belirgin farklılıkların daha açık görülmesi amacıyla Şekil 3.2'de dökme demir türlerine ait mikroyapı resimleri gösterilmektedir.

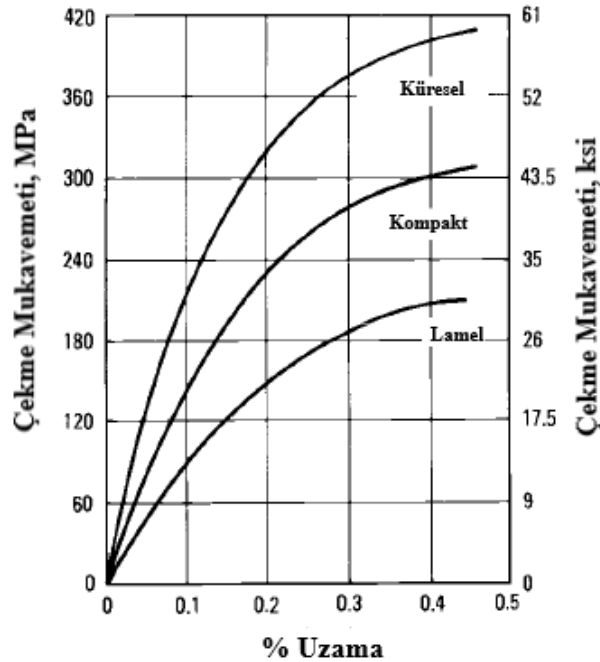


**Şekil 3.2.** Dökme demir türlerine ait mikroyapı resimleri a) Gri dökme demir, b) Küresel grafitli dökme demir, c) Beyaz dökme demir, d) Temper dökme demir, e) Kompakt grafitli dökme demir

### 3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirler

KGDD'lerin 1948'de keşfedilmesiyle birlikte döküm endüstrisine yeni büyüme pazarları sağlamıştır. Grafit fazlarının küresel formda matriks içerisinde oluşumunun sağlanması ile birlikte gri dökme demirlerin sahip olmadığı mukavemet ve darbe tokluğu özelliklerine sahip olan bir dökme demir türü ortaya çıkmıştır. Bu yeni mühendislik malzemesi sınıfı, sağladığı özellikler ile çelik dökümlerin yerini almaya uygun malzemelerdir. 1995 yılında Kuzey Amerika'da dört milyon tonu aşan bir üretim kapasitesine ulaşarak endüstriyel birçok alanda uygulamalarda kullanılmıştır (Trudel ve Gagne, 1997).

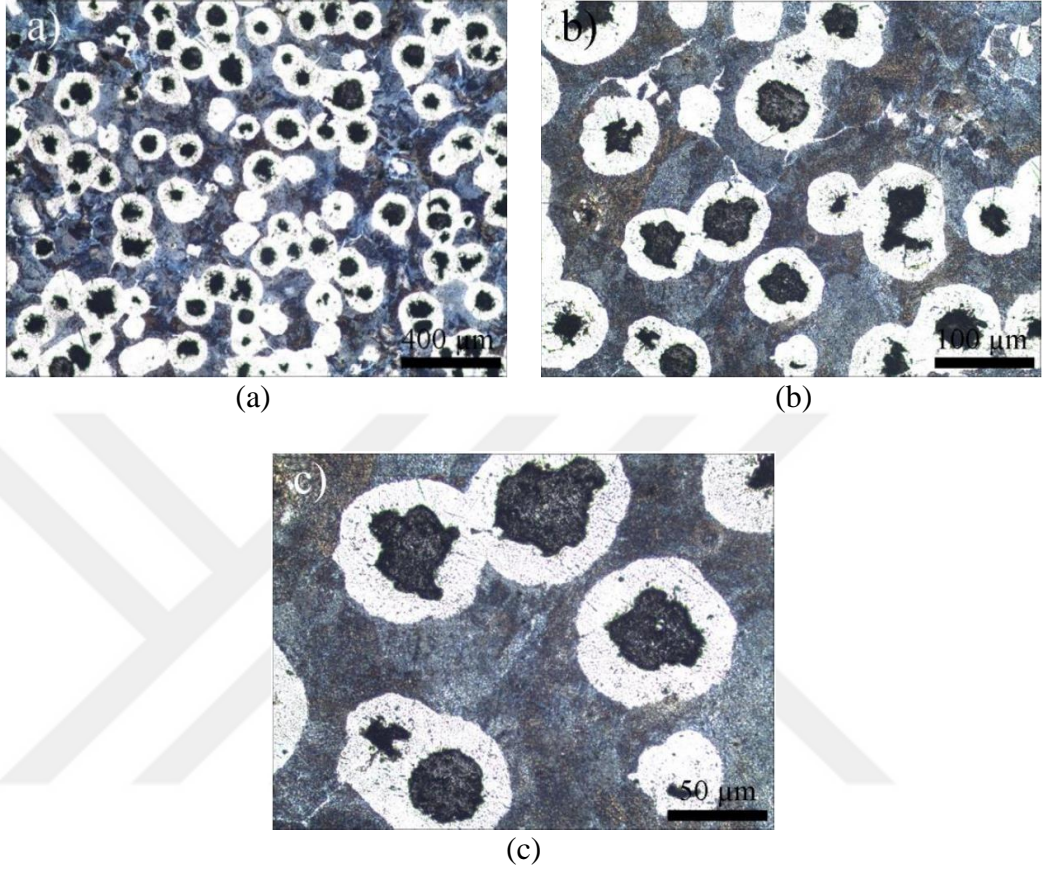
KGDD'ler veya sünek demirler, küresel formda grafitlere sahip olan dökme demir türüdür. Küresel formdaki grafit kürelerinin sağladığı süneklikten dolayı sünek dökme demirler olarak adlandırılmaktadır. Diğer dökme demir türlerine göre süneklikleri daha yüksektir. Yapılarında bulunan matriks yapılarına göre ferritik, perlitik, martenzitik ve östenitik olarak adlandırılmaktadırlar. Soğutma hızlarına göre yumuşak ve sünek ferritik yapıdan yüksek mukavemetli perlitik ve östenitik yapıya kadar değişebilmektedir. Diğer dökme demir türlerine göre %17 daha fazla uzama değerlerine sahiptirler (Behera ve Sohala, 2012). Sahip oldukları grafit morfolojisine göre dökme demirlerin çekme mukavemetlerinin kıyaslandığı grafik Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Buradan KGDD malzemelerin çekme mukavemetlerinin diğer türlere göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3.3. Dökme demirlerde grafit morfolojisini çekme mukavemetine etkisi (Stefanescu, 1990)



İdeal formda kürelere sahip GGG-50 KGDD malzemenin farklı büyütmelerdeki mikroyapısı Şekil 3.4’de gösterilmektedir.



Şekil 3.4. GGG-50 KGDD malzemeye ait mikroyapı fotoğrafları  
(a) 50x büyütme (b) 100x büyütme (c) 200x büyütme (Öztürk ve Yıldırım, 2019)

KGDD malzemelerin çeşitli standartlar dahilinde üretilen türlerine ait mekanik özelliklerinin verildiği bilgiler Çizelge 3.3’de gösterilmektedir. Bu özelliklerin yanında KGDD türlerinin sahip olduğu matris mikroyapıları, malzemelerin mukavemet ve süneklik ölçütlerine büyük oranda etki etmektedir. Örneğin GGG-40 KGDD sınıfının sahip olduğu mikroyapı ferritik olması sebebiyle malzeme daha sünek davranış gösterirken, GGG-70 KGDD sınıfının sahip olduğu mikroyapı perlitik olduğundan dolayı malzeme daha yüksek mukavemet özelliği göstermekte ve bunun sonucunda daha az sünek davranış göstermektedir.

**Çizelge 3.3.** KGDD türlerinin sahip olduğu mekanik özellikler (Ayday, 2013)

Tür	Mikroyapı	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Sınırı (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Brinell Sertliği (kgf/mm <sup>2</sup> )
<b>GGG-40</b>	Ferritik	411,8	274,4	12	140-201
<b>GGG-50</b>	Ferritik/Perlitik	490,3	352,8	7	170-241
<b>GGG-60</b>	Ferritik/Perlitik	588,3	392	3	192-269
<b>GGG-70</b>	Perlitik	686,4	441	2	229-302
<b>GGG-80</b>	Perlitik	784,5	490	2	248-352

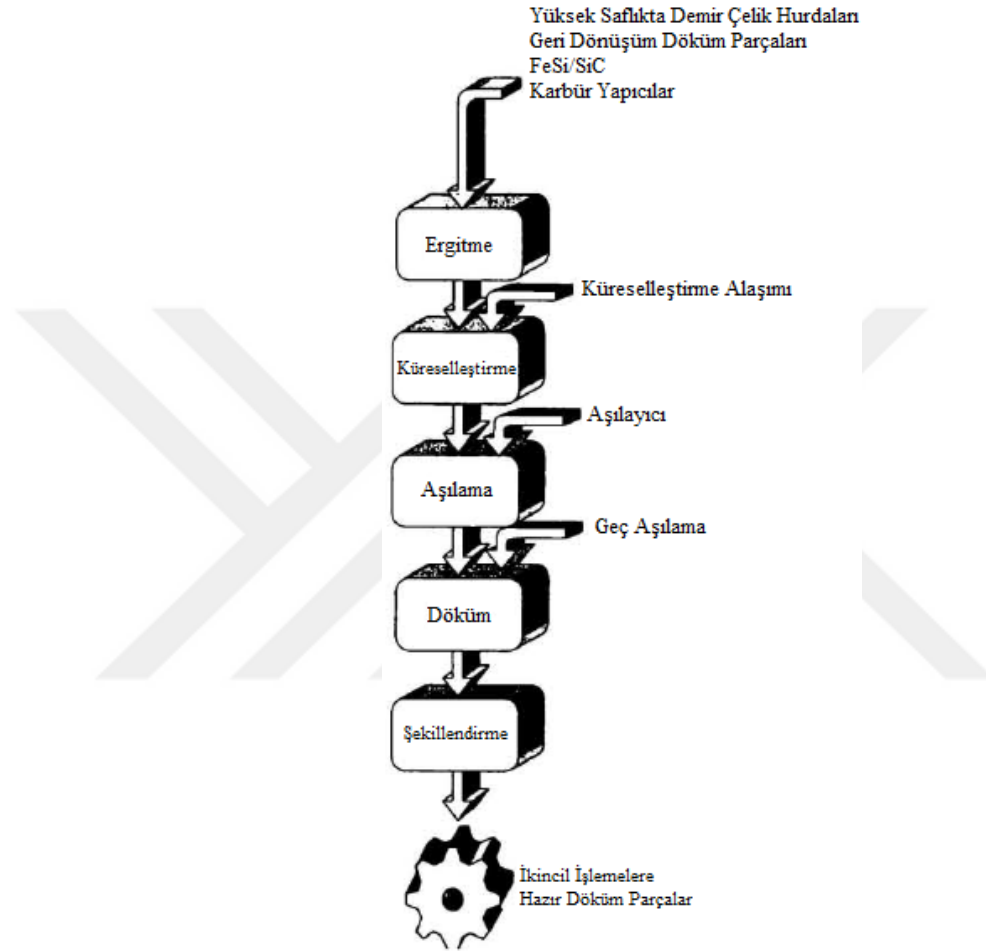
### 3.2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi

KGDD'lerin üretim aşamaları Şekil 3.5'te belirtilen şematik akış diyagramında gösterilmektedir. KGDD malzemelerin üretimindeki ilk adım kullanılacak olan şarj malzemelerinin dikkatli bir şekilde seçilmesidir. Geri dönüşümden elde edilen çelik hurdaları, diğer alaşım elementlerini içeren malzemeler (çelikte bulunan Mn vb.) veya kalıntı elementler (karbür yapıcılarda bulunan S vb.) yarı kararlı ötektik katılaşma, grafitlerin küresel olarak katılaşmaması veya mikro yapıda istenmeyen formların oluşmasına sebep olabilmektedir.

Küresel grafit formları, küreselleştirici elementlerin ergime sırasında ergimiş metale ilave edilmesi sonucunda elde edilmektedir. Mg elementi küreselleştirme işleminde en yaygın olarak kullanılan elementtir. Belirli küreselleştirme metotlarına özgü olarak kullanılmakta olan çeşitli Mg alaşımları mevcuttur.

Aşılama, Şekil 3.5'te gösterildiği şekilde bir proses adımı içinde veya ayrı olarak yapılabilen ve KGDD üretimi için gerekli olan bir adımdır (Labrecque ve Gagné, 1998). Aşılama ile nodül sayısı arttırılmaktadır. Daha az soğuma eğilimi ve dökümde yüksek miktarda ferrit/perlit oranının yüksek nodül sayısı ile ilişki olmasından dolayı nodül sayısının arttırılması önemli bir hedefdir (Stefanescu, 1990). Ayrıca aşılama ile yapısal bütünlük sağlanmakta ve taneler arası segregasyon azaltılmaktadır. Seçilen aşılama prosesinin de küreselleşme adımı kadar kritik önemi bulunmaktadır. Aşılama parametreleri yani kompozisyon, ilave miktarı, partikül boyutu ve sıcaklık, yapısal bütünlük ve tutarlılığın elde edilmesi için sıkı kontrol ile yapılmalıdır (Labrecque ve Gagné, 1998).

Hatasız olarak dökümün yapılabilmesi için küresel grafit parçacıklarının kristalleşmesini kontrol eden özellikle küreselleştirme ve aşılama işlemlerinin dikkatli bir şekilde yapılması sağlanmalıdır. Yüksek kaliteli KGDD bileşenleri elde etmek için Şekil 3.5'te belirtilen adımların en yüksek doğrulukta yapılması gerekmektedir (Trudel ve Gagne, 1997).



Şekil 3.5. KGDD üretiminin şematik akış diyagramı (Labrecque ve Gagné, 1998)

### 3.2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementlerinin Etkisi

C ve Si dökme demirlerde başlıca kullanılan elementlerdendir. Grafit veya  $Fe_3C$  miktarı bileşimde bulunan karbon miktarının artışı ile doğru orantılıdır. Ayrıca grafit oluşturma kabiliyeti ve dökülebilirlik C ve Si miktarına bağlıdır. Sülfür ve fosfor kompozisyonda bulunabilen diğer elementlerdendir (Behera ve Sohala, 2012). Bu elementlerin grafit formu üzerine olan etkileri karbon eşleniği  $CE = \%C + 1/3 (\%Si + \%P)$  denklemi ile ilişkilendirilerek demirin yapısının (ötektik altı, ötektik üstü veya ötektik) belirlenmesi sağlanmaktadır. Dökme demirlerde ötektik nokta kompozisyonunun karbon eşleniği (CE) değeri 4.26'ya eşittir.

Si elementinin yapıdaki varlığı östenit içindeki karbon çözünürlüğünü azaltır, kararlı ötektik sıcaklığı artırır, grafit oluşumunu artırır ve kararlı-yarı kararlı ötektik sıcaklıkları arasındaki aralığı arttırmaktadır. Özellikle bu son etki önemlidir çünkü yapıda karbür yerine grafit ötektik oluşumunu sağlamaktadır. Ancak Si elementinin ferrit içerisinde katı çözeltili oluşturması ile sertlik artmakta bunun sonucunda süneklik ve tokluk azalmaktadır. Ayrıca Si elementinin aşılacağı (FeSi) olarak ilavesiyle çekirdeklenme yerlerinin sayısı ve nodül miktarı artmaktadır.

Kükürt (S) elementi çekirdeklenme ve grafit partiküllerinin büyümesinde önemli role sahiptir. Ancak grafit kristalleri tarafından absorbe edilebilen yüzey aktif bir element olduğundan grafit formlarının küreselden lamel forma dönüşmesine sebep olmaktadır. Bu sebeple S miktarı KGDD üretiminde en aza indirilerek yapı içerisindeki varlığı %0.010-0.015 aralığında tutulmalıdır.

KGDD üretiminde karbonun grafit küreleri olarak oluşmasını sağlamak için Mg, Ca, itriyum (Y) veya nadir toprak elementleri kullanılmaktadır. Ayrıca küreselleştirici elementler oksijen (O) veya S ile bileşik oluşturur ve cüruf içeriğine katılmaktadırlar. Bu reaksiyonlarla ergimiş metal oksit ve sülfürlerden arındırılmış olmaktadır.

Mg elementi düşük maliyeti ve geniş aralıkta karbon eşdeğerliğine sahip dökme demirlere uygulanabilirliğinden dolayı küreselleştirme işleminde kullanılan en yaygın elementtir. KGDD genellikle %0.02-0.08 aralığında bulunmaktadır ancak küreselleştirme verimleri yapıda demirin S ve O içeriğine bağlı olarak değişmektedir. Optimum oranda Mg ilavesi ile mükemmel yapıda küreselleşme ve nodularite sağlanmaktadır. Ancak Mg aşırı oranda ilave edilirse karbür yapıya sebep olmaktadır.

Kalsiyum (Ca) elementi ise tek başına küreselleştirme için kullanılsa da Mg elementinin reaksiyondaki istikrarsızlığını azaltmada ve geri kazanımı sağlamaktadır. Ayrıca O elementi ile reaksiyona girerek kalsiyum oksit (CaO) oluşturur ve aşılacağı verimini arttırmaktadır.

**Çizelge 3.4.** İkincil elementlerin grafit şekillerine etkileri (Stefanescu, 1990)

Element Kategorisi	Element
<b>Küreselleştirici</b>	Magnezyum, kalsiyum, nadir toprak elementleri (seryum, lantan vb.), itriyum
<b>Nötr</b>	Demir, karbon, alaşım elementleri
<b>Küreselleşme önleyici (Dejenere şekil)</b>	Alüminyum, arsenik, bizmut, tellür, kurşun, sülfür, antimon

Bakır (Cu) elementi KGDD üretiminde en yaygın olarak kullanılan alaşım elementidir. Bakır orta derece grafit yapma özelliğine sahiptir ve yapıda bulunan serbest ferriti teşvik etmeden soğuma eğilimini en aza indirmek için Si elementini kullanabilmektedir. Ayrıca bakır elementi östenit içinde karbon difüzyonunu geciktirerek perlit oluşumunu desteklemektedir.

Ni, ergimiş metalde ve katı küresel demirde çözülebilmektedir. Ni, C elementinin sıvı veya katı demir içerisindeki çözünürlüğünü azalttığından dolayı grafit yapıcı olarak sınıflandırılmaktadır. KGDD üretiminde Ni veya Cu içeriği artırılarak sertleşme kabiliyeti artırılabilir. Ni, ferritin içinde çökeltme sertleşmesi elementi olarak da kullanılabilir.

Mo, demirin sertleşebilirlik kabiliyetini artırır ve tavlama ferritik cinsteki malzemelerde yüksek sıcaklıklarda çekme mukavemetini, sürünme mukavemetini (~400°C) ve termal yorulma direncini arttırmaktadır. Östempelenmiş demirlerde Mo içeriği %0,2-0,3 oranlarını geçmemelidir. Yüksek oranda ilave edilmesi durumunda tane sınırlarında segregasyona sebep olacağından martenzit oluşumuna sebep olacak ve bu durumun sonunda mukavemet ve süneklikte azalma meydana gelecektir. Ayrıca östempelenmiş KGDD malzemelerin yaşlanmasını geciktirir ve bu türdeki döküm malzemelerin 200°C'ye kadar olan sıcaklıklarda kullanılmasına izin vermektedir.

Mn, ötektik üstü kritik sıcaklığının artmasını sağlar, grafit ara yüzeyleri arasında ferritin çekirdeklenmesini geciktirir ve ferrit içerisindeki karbonun difüzyonunu azaltmaktadır. Cu ve Ni gibi tavlama geciktirir ve sertleşebilirliği arttırmaktadır (Labrecque ve Gagné, 1998).

Cr elementinin ilavesi ise beynit dönüşüm sıcaklığını düşürmektedir. Ayrıca perlit ile beynit dönüşüm bölgesi arasında bir atalet bölgesi oluşturarak bu dönüşümün gecikmesini sağlayan bir etkiye sahiptir. Bu atalet bölgesinin oluşması sonucunda ise perlit ve ferrit oluşumunu engellediği için yapıda beynit oluşumu görülecektir. Dolayısıyla perlit ve ferrite göre daha sert bir yapıda olan beynitin mikroyapı içerisinde oluşmasıyla malzeme daha sert bir yapıya sahip olacaktır (Lünenbürger, 1991; Bahmani ve ark., 1997; Ahmadabadi, 1997; Bayati ve Elliot, 1997; Kovacs, 1990; Bosnjak ve Radulovic, 2004; Aranzabal ve ark., 1997; Benam, 2015; Hayrynen ve ark., 2002).

Alaşım elementi ilavesi ile mekanik özelliklerde sağlanabilecek olan iyileştirmelerin neler olabileceği araştırmalar doğrultusunda belirlenmiştir. Buradan yola çıkılarak yapılan tez çalışmasında Mo ve Ni elementlerinin ilave edilmesi ile mekanik

özelliklerinin iyileştirilmesi ve östemperlenebilirlik kabiliyetinin artırılması amaçlanmıştır.

Dökme demirlerde bulunan Si, P ve C elementlerinin oranlarındaki değişim, ergime ve katılma sıcaklıklarını değiştireceğinden mekanik özellikler etkilenecektir. Bu durumun belirlenmesi karbon eşdeğeri (CE) parametresinin belirlenmesi ile mümkün olmaktadır.

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (3.1)$$

Karbon eşdeğeri, denklem (3.1) yardımıyla hesaplanmaktadır. Bu denklem kullanılarak bileşimin ötektik noktaya göre hangi konumda olduğunun bulunması amaçlanmaktadır (Demirbilek, 2013).

### 3.2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler

Dökme demirlerde ısıl işlem, ham döküm özelliklerine sahip malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla yapılmaktadır.

Gerilim giderme işlemi artık gerilmeleri azaltmak için yapılmaktadır. Böylece çarpılma ve kırılma riski azaltılmaktadır. Döküm işlemi sonrasında malzeme yüzeylerinin, iç kısımlara göre daha hızlı soğuması sonucunda yapıda artık gerilmeler oluşmaktadır. Bu sebeple dökme demirlerde artık gerilmelerin olmadığı durumlar çok nadir olarak görülmektedir.

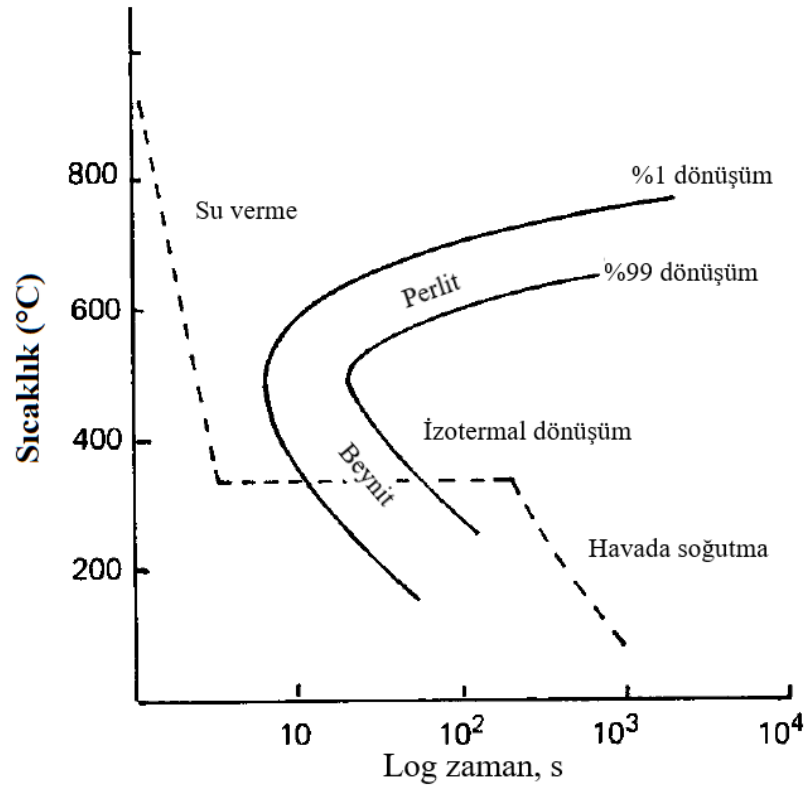
Tavlama işlemi ham dökümün yapısından karbür ve perlit yapılarını kaldırmak için yapılmaktadır. Böylece ferritik matris içerisinde grafit yapıların oluşması sağlanmaktadır. Gri ve KGDD'lerin yumuşaklık, süneklik ve işlenebilirliği artarken beyaz dökme demirler temper dökme demirlere dönüşmektedir.

Normalizasyon ısıl işlemiyle ham döküm malzemeye göre daha yüksek sertlik ve mukavemet sağlamak amacıyla yapılmaktadır. Normalizasyon sonucunda iyi aşınma direnci ile ideal işlenebilirliğin birleşmesiyle olan ince perlitik matris yapısı oluşmaktadır.

Su verme ve temperleme ısıl işlemleriyle mukavemet sağlanmaktadır ve bu mukavemet değeri normalizasyon işlemindeki çok daha yüksektir. Ayrıca iyi aşınma direnci sağlamaktadır. Genellikle su verme ve temperleme ısıl işlemi ile elde edilen işlenebilirlik perlitik yapıda elde edilenden daha iyidir.

Sıcak su verme teknikleri ile dökümde oluşan sıcaklık farklılıklarını azaltmak için su vermede ve östenit dönüşümünden önce sahip olunan süreyi kullanarak çarpılma ve su verme sırasında olan çatlamaı azaltmak amacıyla tasarlanmıştır. Bu işlem, östenitleme sıcaklığındaki malzemenin sıcak sıvı içerisinde genellikle 200-425°C sıcaklık aralığına sahip erimiş tuz banyosunda veya sıcaklık kontrollü bir yağ banyosunda önceden belirlenmiş süre boyunca bekletilmesi ile yapılmaktadır.

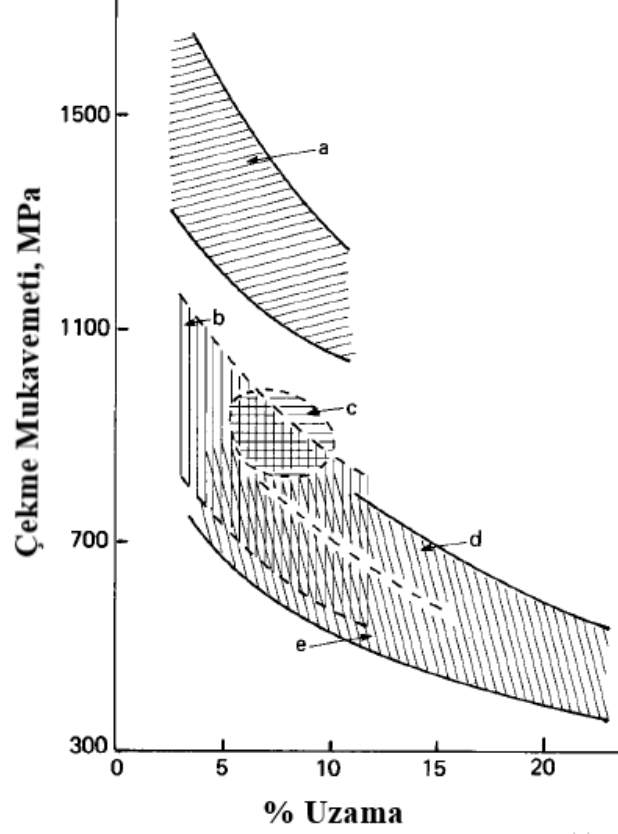
Martemperleme ve östemperleme olarak iki türü bulunmaktadır (Elliott, 1988). Şekil 3.6'da alaşımsız KGDD malzemeye ait östemperleme ısıl işleminin şematik olarak gösterimi verilmektedir.



Şekil 3.6. Alaşımsız KGDD'ler için östemperleme ısıl işleminde izotermal dönüşümün şematik gösterimi (Elliott, 1988)

Yüzey sertleştirme işlemleri ise dökme demirlerin ısıl işlemleri için önemli bir diğer konudur. İstenilen bölgeye aşınma direnci sağlamak için yapılan ekonomik sertleştirme yöntemidir. Beyaz ve yüksek alaşımlı dökme demirler hariç dökme demirlerin birçoğu alevle, indüksiyonla, elektron demetiyle, plazma veya lazer ısıtma ile sertleştirilebilmektedir.

Şekil 3.7’de görülmekte olan grafikte olduğu gibi KGDD malzemelere uygulanan birçok ısıtım işlem sonucunda çok geniş özellik aralığına sahip KGDD malzemeler elde edilebilmektedir. Bu nedenler ısıtım işlemler maliyeti arttırsa da bazı dökümhaneler sabit bileşime sahip dökme demirlerden çok çeşitli özellikler elde etmek için ısıtım işlemleri kullanmaktadırlar (Elliott, 1988).



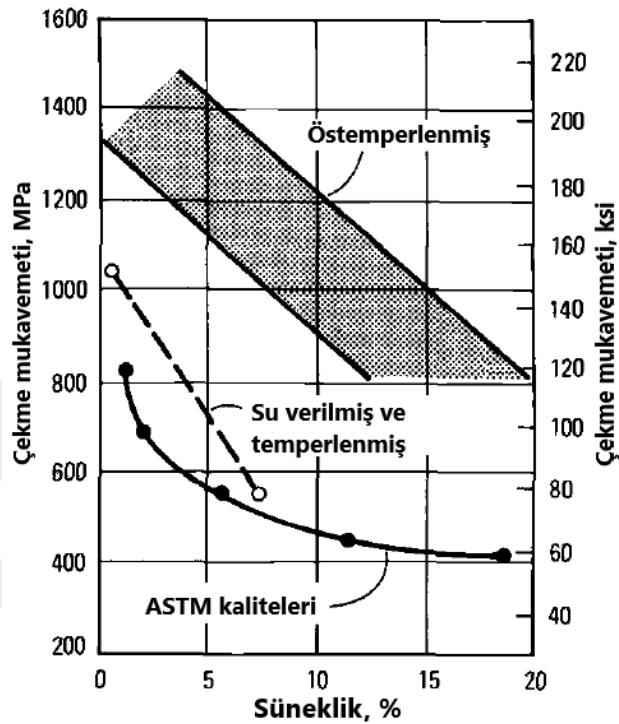
**Şekil 3.7.** KGDD'lere uygulanan ısıtım işlemlerinin sağladığı mukavemet ve süneklik a) Östemperlenmiş, b) Su verilmiş ve temperlenmiş, c) Normalizasyon yapılmış, d) Dana gözü ferritik mikroyapılı ham döküm e) ham döküm veya tavlanmış (Elliott, 1988)

KGDD malzemelerin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için yukarıda belirtilen ısıtım işlemler uygulanmaktadır. Belirtilen ısıtım işlemlerden en yüksek tokluk ve dayanım sağlayan ısıtım işlemi ise östemperleme ısıtım işlemidir (Öztürk ve Yıldırım, 2019).



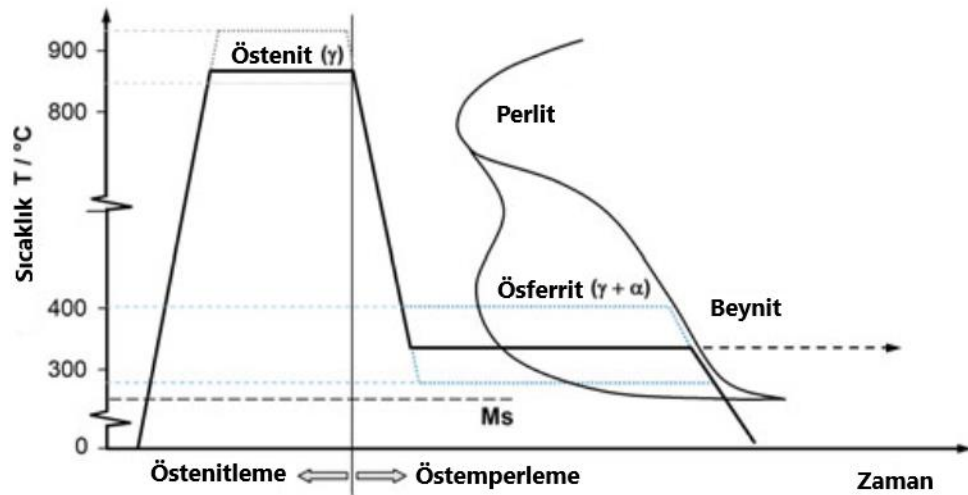
### 3.3. Östemperleme Isıl İşlemi

Östemperleme ısıl işlemi KGDD malzemelere çekme mukavemetiyle birlikte aynı zamanda sertlik sağlamasından dolayı iki türlü avantaj sağlamaktadır. Östemperlenmiş KGDD malzeme ile standart KGDD malzemelerin bazı mekanik özelliklerinin kıyaslanması Şekil 3.8’de gösterilmektedir (Stefanescu, 1990).



Şekil 3.8. Standart ve östemperlenmiş KGDD'lerin özelliklerinin karşılaştırılması (Stefanescu, 1990)

Östemperleme ısıl işlemi, ham döküm malzemenin 850-950°C sıcaklık aralığında östenitlenmesinden sonra tuz veya yağ banyosu içerisinde su verilerek 250-450°C sıcaklık aralığındaki bir değerde genellikle en fazla 4 saate kadar tutularak östemperlenmesi ile yapılmaktadır. Bu sıcak su verme yöntemi sayesinde yüksek mukavemet ve sünekliliğe sahip eşsiz malzeme özellikleri elde edilmektedir (Elliott, 1988). %2'nin üzerinde bir oranında Si içeren KGDD malzemeye ait östemperleme ısıl işlemini izotermal dönüşüm diyagramı şematik olarak Şekil 3.9'da gösterilmektedir (Keough, Hayrynen K.L. ve Pioszak, 2010).



Şekil 3.9. KGDD'lerde östempereleme ısıl işleminin aşamaları (Klocke, Arft ve Lung, 2010)

KGDD malzemelerde izotermal dönüşüm sonucunda ösferrit (yüksek karbonlu östenit ve ferrit) yapısı elde edilmektedir (Benam, 2015). Östemperelemiş KGDD'lerin mekanik özellikleri ösferrit mikroyapısına bağlıdır. Ösferrit matrisi diğer KGDD sınıflarından daha yüksek çekme mukavemeti süneklik oranı sağlamaktadır. Isıl işlem parametrelerinin ve alaşım elementlerinin etkisi ile birlikte ösferrit matrisi KGDD malzemelerde farklı özellik kombinasyonları sağlamaktadır (Čatipović, Živković ve Dadić, 2018).

KGDD malzemelerin östempereleme ısıl işlemi iki aşamalı bir reaksiyondur.

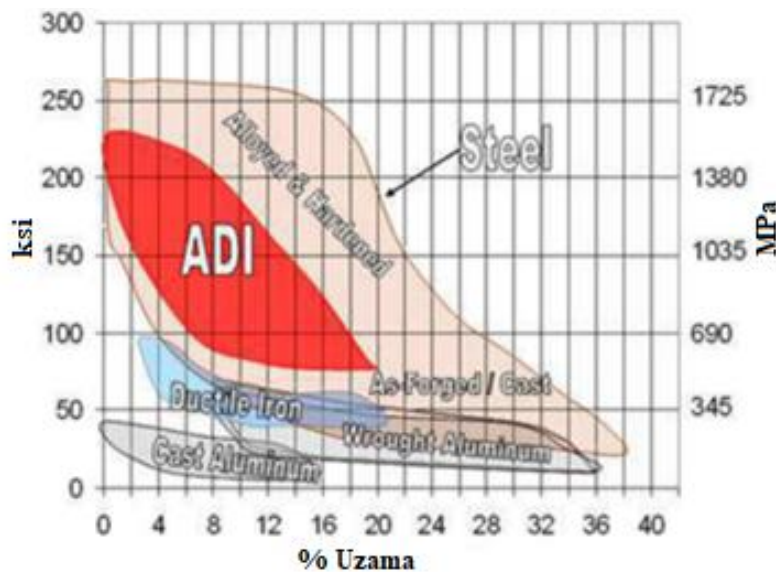
1. Aşama:  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma_{hc}$
2. Aşama:  $\gamma_{hc} \rightarrow \alpha + \text{Karbür}$

İlk aşamada östenit ( $\gamma$ ), ferrit ( $\alpha$ ) ve yüksek karbon içeren östenit ( $\gamma_{hc}$ ) olmak üzere ösferrit oluşturan fazlara ayrılmaktadır. Bu aşamada mukavemet ve tokluk en yüksek değerine ulaşmaktadır. İkinci aşamada ise malzeme östempereleme sıcaklığında uzun süre tutulması sonucunda karbon zengini östenit ( $\gamma_{hc}$ ), ferrit ( $\alpha$ ) ve karbür olarak ayrılmaktadır. Mikroyapıda karbürlerin oluşması malzemeyi kırılgan yapacağından bu reaksiyondan kaçınılmalıdır. Bu nedenle KGDD'lerin optimum mekanik özelliklerine ilk reaksiyonun tamamlanmasından sonra ancak ikinci reaksiyonun başlamasından hemen önce elde edilen yapıyla ulaşılmaktadır (Benam, 2015; Čatipović ve diğerleri, 2018).

### 3.4. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler

Östemperlenmiş KGDD'ler perlitik yapıdaki KGDD'lerin mukavemetinin neredeyse iki katından fazla mukavemete sahip olmakla birlikte yüksek süneklik ve tokluğa sahip olan dökme demir türüdür. 1930'ların başında Baint ve arkadaşları tarafından çelikler malzemeler için östemperleme ısıl işlemi geliştirilmiştir. Flinn ise östemperleme prosesini özellikle gri dökme demirlere uygulamıştır. 1950'lerde ise hem KGDD'ler geliştirildi hem de KGDD malzemelere östemperleme ısıl işlemi prosesinin uygulanması geliştirilmiştir (Çatipović, Živković ve Dadić, 2018; Alabi ve Aluko, 2013; Keough ve diğerleri, 2010; Chandler, 1994; Tun ve Lwin, 2009).

Mühendislik malzemesi olarak yaygın kullanımı olan gri dökme demirlerin içerdiği grafitlerin lamel formunda olmasından ve bu lamellerin çentik etkisi oluşturması ile sünekliğin azalmasında dolayı çekme mukavemeti değeri en fazla 400 MPa olabilmektedir. Ancak grafit formlarının küresel olarak şekillendirilmesi sonucunda çekme mukavemeti 800 MPa değerine sahip olabilmektedir. Östemperleme işlemi gibi matriks mikroyapısını değiştiren ısıl işlem yöntemleri kullanılarak mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Östemperlenmiş KGDD'lerin mükemmel mekanik özellikleri, özellikle yüksek çekme mukavemeti, aşınma direnci ve sünekliğin kombinasyonu bu malzemelerin dövme çelik veya sertleştirilmiş malzemeler ve KGDD'lerin yerine kullanılabileceğini göstermektedir (Çetin, Meco, Davut, Arslan ve Uzun, 2016). Östemperlenmiş KGDD'lerin akma mukavemeti değerlerinin farklı malzemelere göre kıyaslandığı grafik Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Östemperlenmiş KGDD malzemelerin akma mukavemetini diğer tür malzemeler ile kıyaslanması (Keough ve diğerleri, 2010)

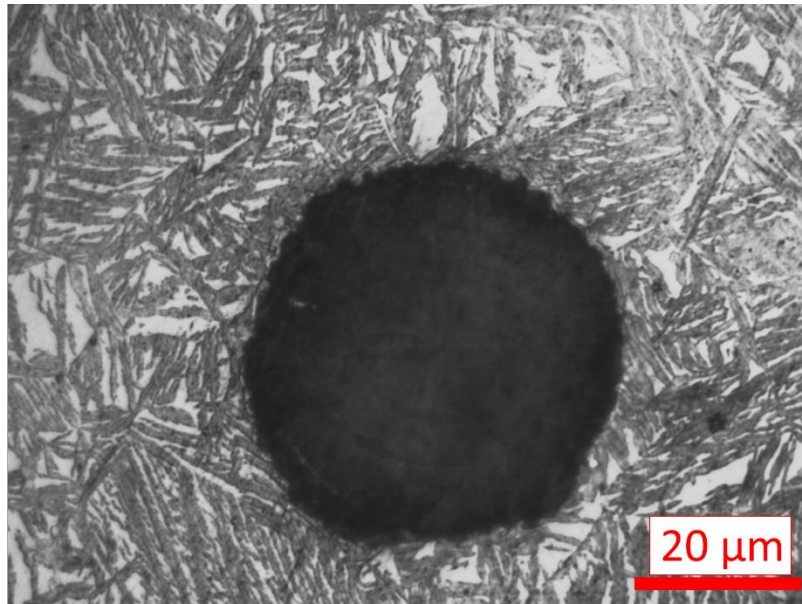
Östemperlenmiş KGDD malzemeler bazı teknik özelliklerinin yanında hafiflik ve titreşim sönümlenme gibi özelliklere de sahiptir. Özellikle son yıllarda otomotiv endüstrisinde, hafriyat makinelerinde ve savunma sanayisinde kullanımı artmıştır. Otomotiv endüstrisinde krank mili, bağlantı çubuğu, kam mili, dişli takımları, piston ve süspansiyon gibi önemli bileşenlerin üretiminde kullanılmaktadır (Çetin ve diğerleri, 2016).

Östemperlenmiş KGDD malzemelerin kullanım alanları çok geniş ölçüde özelliklere, maliyete ve esnekliğe dayanmaktadır.

- 1) Tarım; toprakta mükemmel aşınma direnci
- 2) Kazıcı/tutucu dişler; yüksek mukavemet ve aşınma direnci
- 3) Endüstriyel; aşınma ekipmanları, pompa vb.
- 4) Dişliler; aşınma direnci ve titreşim sönümlenme
- 5) İnşaat; kırma, öğütme ve aşınmaya dayanıklı bileşenler vb.
- 6) Yiyecek üretimi; öğütme, karıştırma, paletleme vb.

Ancak östemperlenmiş KGDD malzemelerin en büyük dezavantajı zayıf kaynaklanabilirliğe sahip olmasıdır (Čatipović, Živković ve Dadić, 2018).

Tez çalışması kapsamında üretilerek östemperlenmiş KGDD malzemeye ait mikroyapı örneği Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Östemperlenmiş KGDD malzemeye ait mikroyapı resmi (1000x)

#### 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada belirli oranlarda Mo, Ni ve Si elementlerinin ilavesi yapılarak döküm yöntemiyle üretilen GGG-70 KGDD malzemelerin östemperleme ısıl işlemi sonrasında kazandığı mekanik özelliklerin araştırılması amaçlanmıştır.

##### 4.1. Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimi

Yapılan tez çalışmasında GGG-70 KGDD malzemeler dört farklı kimyasal kompozisyonda imal edilmiştir. İmal edilen malzemelerde alaşımsız olarak üretilen malzemeler Mo ve Ni elementi ilave edilmeyerek malzeme imalatı gerçekleştirilmiştir. İkinci tür malzemede ise Mo elementi ilavesi yapılmadan sadece %0,74 oranında Ni ilavesi yapılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü ve dördüncü sırada üretimi yapılan malzemelerde ise %0,22 Mo ve %0,74 Ni elementlerinin oranları sabit tutulurken Si elementinin oranları %2,22 (düşük) ve %2,49 (yüksek) olacak şekilde malzeme imalatı gerçekleştirilmiştir. Dökülen malzemelere ait kimyasal kompozisyonlar Çizelge 4.1’de detaylı olarak gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. GGG-70 KGDD numunelere ait kompozisyonlar

Alaşım Oranları	Fe (%)	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Mg (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Cu (%)
<b>Alaşımsız</b>	Denge	3,54	2,24	0,108	0,032	0,012	0,036	0,032	0,0039	0,001	0,845
<b>0,74 Ni</b>	Denge	3,70	2,35	0,171	0,033	0,011	0,047	0,031	0,744	0,026	0,863
<b>0,22 Mo-2,22 Si</b>	Denge	3,68	2,22	0,130	0,031	0,011	0,042	0,03	0,74	0,22	0,85
<b>0,22 Mo-2,49 Si</b>	Denge	3,57	2,49	0,120	0,030	0,010	0,041	0,03	0,73	0,22	0,84

Alaşımsız kompozisyona sahip malzemelerin imalatı Konya Organize Sanayi Bölgesinde bulunan Motus Otomotiv A.Ş. firmasında, belirli oranlarda alaşım elementlerine sahip malzemelerin imalat işlemleri de Koçak Metalurji ve Makine Ltd. Şti. firmasında yapılmıştır.

%0,22 oranında Mo içeren malzemeler kam mili olarak imal edilmiştir. Alaşımsız ve %0,74 Ni içeren numuneler ise ASTM A536 standartlarına göre hazırlanan kalıplara dökülerek imal edilmiştir.

KGDD üretimi için kullanılan hammaddeler 1,5 ton kapasiteye sahip ocaklarda ergitilmiştir. Kullanılan hammaddeler Şekil 4.1’de gösterilmektedir. Ocak içerisinde bulunan ergimiş metalin sıcaklığı yaklaşık olarak 1540-1550°C sıcaklık değerine sahiptir.



Şekil 4.1. Ergitme işleminde kullanılan KGDD hammaddeleri

Ergitme işlemi sırasında belirli oranlarda alaşım ilaveleri yapılmıştır. Ergimiş metal potaya alınarak küreselleştirici ilavesi yapılmıştır. Küreselleştirme işlemi için FeSiMg küreselleştirici kullanılmıştır. Bu işlemlerin ardından aşılaiıcı ilavesi yapılmıştır. Küreselleştirici ve aşılaiıcılara ait kimyasal analizler Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’te verilmektedir. Kam millerinde kullanılan aşılaiıcı türü A tipi olup, alaşimsız ve belirli oranlarda alaşım ilavesi yapılan numunelerde ise B tipi aşılaiıcı kullanılmıştır.

Çizelge 4.2. FeSiMg küreselleştiricisine ait kimyasal analiz

Küreselleştirici	Si (%)	Ca (%)	Mg (%)	Al (%)	Tr (%)	FeSiMg Boyutu (mm)
FeSiMg	44,4	1,03	6,3	0,62	0,96	2-20

Çizelge 4.3. Aşılaiıcılara ait kimyasal analizler

Aşılaiıcı	Si (%)	Al (%)	Ca (%)	Ce (%)	Bi (%)	Aşılaiıcı Boyutu (mm)
A	72.18	0,77	1,26	-	0,87	0,2-0,5
B	74.3	0.96	1,05	1,77	-	0,2-0,7

Küreselleştirme ve aşılama işlemlerinin ardından ergimiş metal kalıplara dökülerek soğumaya bırakılmıştır. Yapılan imalatlara ait aşamalar Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Şekil 4.2.** KGDD malzemelere ait üretim aşamaları a-) Ocaktan ergimiş madenin transfer potasına aktarılması, b-) Küreselleştirme işlemi, c-) Döküm potasına transfer ve aşılama işlemi, d-) Kalıplara döküm işlemi

Soğuma işlemleri tamamlanan numunelere ısıl işlem öncesinde numune yüzeylerinde oluşan kalıntıların giderilmesi amacıyla kumlama işlemi yapılarak

numuneler bir sonraki adım olan ısıtılma işlemine hazır hale getirilmiştir. Kumlama öncesine ve sonrasına ait resimler Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. Kumlama öncesi KGDD numuneler



Şekil 4.4. Kumlama işlemi sonrası KGDD numuneler

Dökülen numunelerin CE değerleri denklem (3.1)'de gösterilmekte olan denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

Alaşım oranlarına göre hesaplanmış olan karbon eşleniği değerleri Çizelge 4.4'de gösterilmektedir.



Çizelge 4.4. Alaşım oranlarına göre karbon eşleniği değerleri

Alaşım oranları	CE (%)
Alaşımsız	4,30
0,74 Ni	4,49
0,22 Mo-2,22 Si	4,43
0,22 Mo-2,49 Si	4,41

## 4.2. Östempereleme Isıl İşlemi

GGG-70 KGDD malzemelerin mekanik özelliklerinin artırılması amacıyla östempereleme ısıl işlemi, Konya Büsan Organize Sanayi Sitesinde bulunan Döksan Isıl İşlem A.Ş. firmasında yapılmıştır.

Numunelerin östempereleme ısıl işlemleri 320°C ve 350°C olmak üzere iki farklı sıcaklık değerinde yapılmıştır. Numunelere ilk olarak 930°C sıcaklıkta 120 dakika süreyle Şekil 4.5’de gösterilmekte olan ısıl işlem fırınında östenitleme işlemi yapılmıştır.



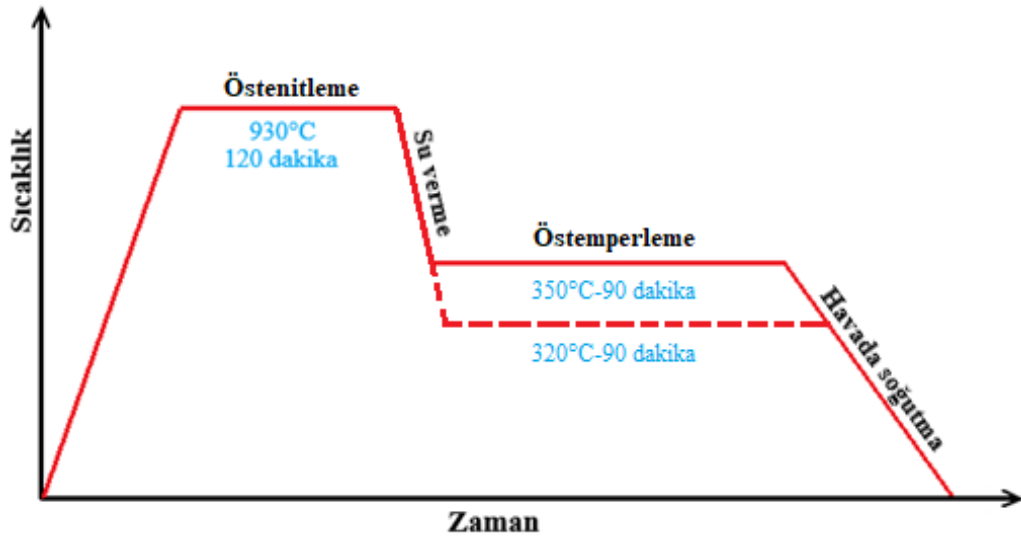
Şekil 4.5. Isıl işlem fırını

Östenitleme işlemi tamamlanan numuneler daha sonra 320°C ve 350°C sıcaklıklarda olan tuz banyosu içerisinde 90 dakika süreyle östemperelemiştir. Östempereleme işlemi için Petrofer AS 135 (%50 NaNO<sub>3</sub> + %50 KNO<sub>3</sub>) türünde tuz banyosu kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Tuz banyosundan çıkan KGDD numuneler

Şekil 4.6'da gösterilmekte olduğu gibi tuz banyosundan çıkarılan numuneler havada soğumaya bırakılarak tamamen soğumaları beklenmiştir. Ardından numunelerin yüzeyinde bulunan tuzların giderilmesi amacıyla yıkama işlemi yapılarak ısıl işlem süreci tamamlanmıştır. Şekil 4.7'de GGG-70 KGDD malzemelere uygulanan östemperleme ısıl işlemine ait sıcaklık-zaman grafiği şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Östemperleme ısıl işlemine ait sıcaklık-zaman grafiği

### 4.3. Malzemelerin Karakterizasyonu

Belirli oranlarda alaşım elementi ilave edilerek imalat işlemleri tamamlanan GGG-70 KGDD malzemelerin ısıtılma işlemi yapılmadan ham döküm halindeki numunelerinin ve östemperleme ısıtılma işlemi yapıldıktan sonraki numunelerin mekanik ve metalurjik özellikleri çeşitli karakterizasyon yöntemleriyle incelenmiştir.

Numunelerin mikroyapısal özelliklerinin incelenmesi için numune hazırlama işlemleri Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan Metalografi Laboratuvarında yapılmıştır. Laboratuvar testeresi yardımıyla küçük parçalara ayrılan malzemelere 120 ve 1200 aralığındaki derecelere sahip zımpara kağıtları kullanılarak zımparalama işlemi yapılmıştır. Zımpara işleminin ardından 1 µm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> solüsyon kullanılarak numune parlatma işlemi yapılarak numune hazırlama işlemi tamamlanmıştır. Hazırlık işlemi tamamlanan numunelerin dağlama işlemi %2 Nital çözeltisinde 1-2 saniye süre aralığında tutularak yapılmıştır. Çözelti içerisinden çıkartılan numunelerin dağlama işlemini sonlandırmak için su ile yıkama işlemi yapılmıştır. Su ile yıkanan numunelerin yüzeylerinde su lekesi oluşmadan kurutulması amacıyla numune yüzeylerine etil alkol damlatılarak kurutma işlemi yapılmıştır. Tüm bu işlemlerin ardından numuneler mikroyapı incelemesi için hazır hale gelmiştir.

Zımpara, parlatma ve dağlama işlemi tamamlanan numunelerin mikroyapılarına ait fotoğraflar Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan Nikon Eclipse MA100 mikroskobu ve Clemex Vision Lite yazılımı kullanılarak görüntülenmiştir.

KGDD malzemelerin küreselleşme oranları, ferrit, perlit ve grafit yüzdeleri gibi değerlerin belirlenmesi yine Clemex Vision Lite programı kullanılarak belirlenmiştir.

Numunelerin ısıtılma işlemi öncesinde ve ısıtılma işlemi sonrasında sahip olduğu Brinell sertlik değerleri EMCO Test DuraVision 300 cihazı kullanılarak 2,5 mm çapında bilye ve 187,5 kg yük uygulaması sonucunda ölçülmüştür.

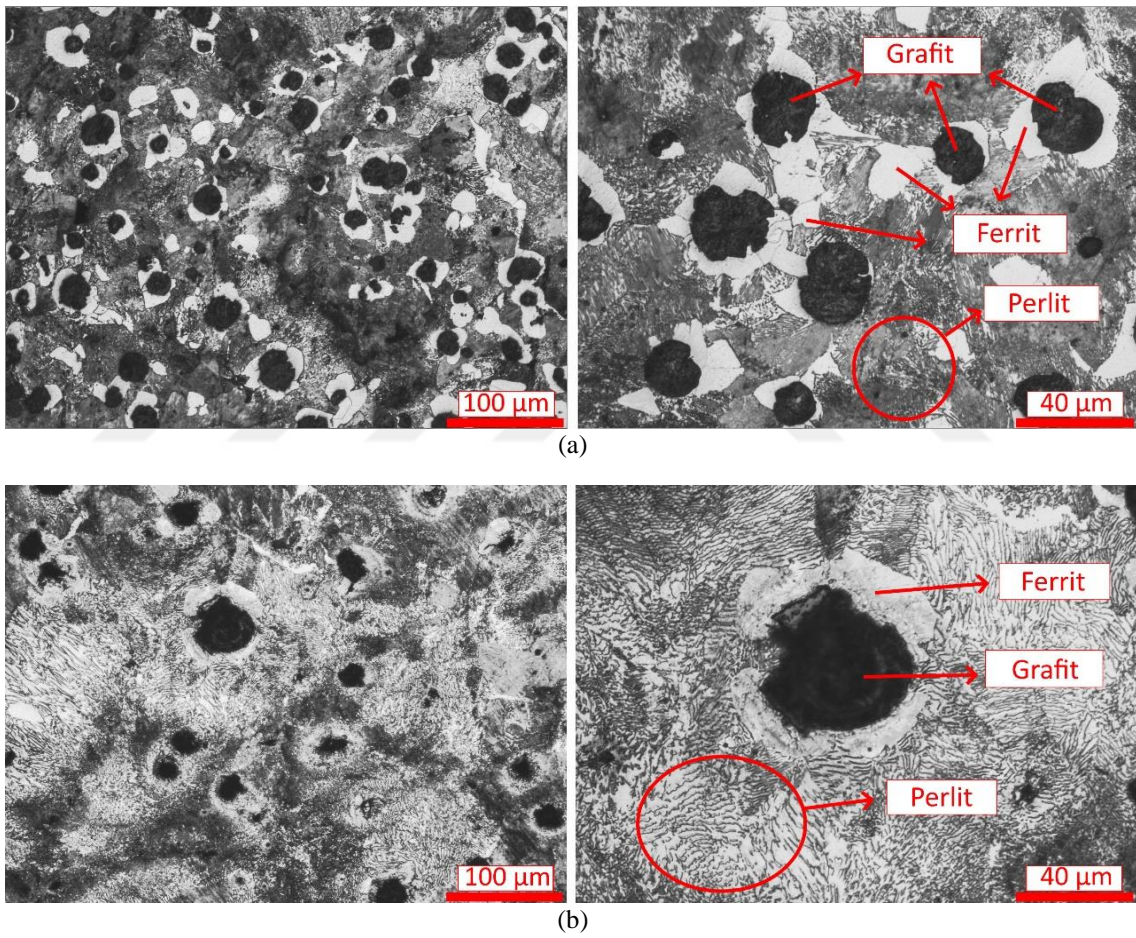
Malzemelerin çekme test numuneleri ASTM E8/E8M standartları dahilinde üretilerek, çekme testi ise Motus Krankmili (Konya, Türkiye) firmasına ait 100 ton kapasiteli çekme test cihazında yapılmıştır.

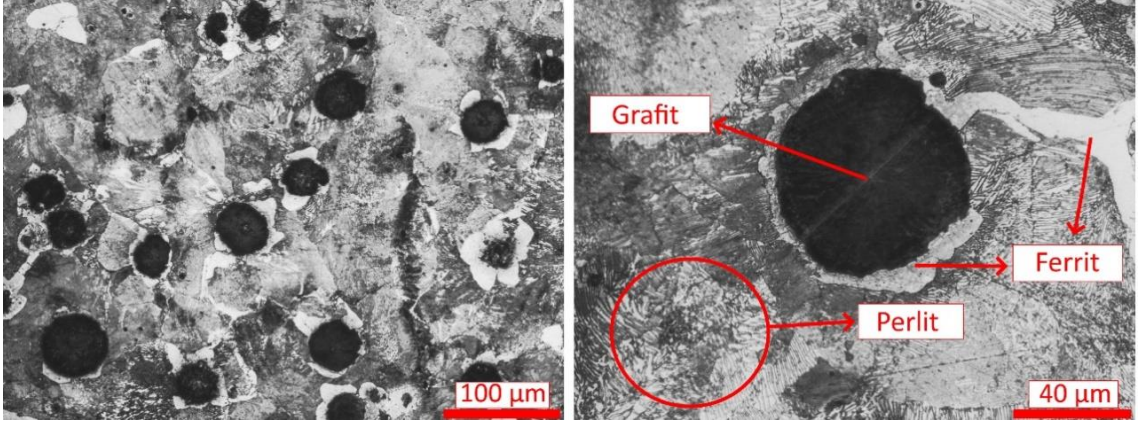
## 5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Yapılan tez çalışmasında imalatı yapılan GGG-70 türündeki KGDD malzemelere 320°C ve 350°C sıcaklık değerlerinde östemperleme ısıl işleminin uygulanması sonucunda malzemelerin kazanmış olduğu mekanik ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir.

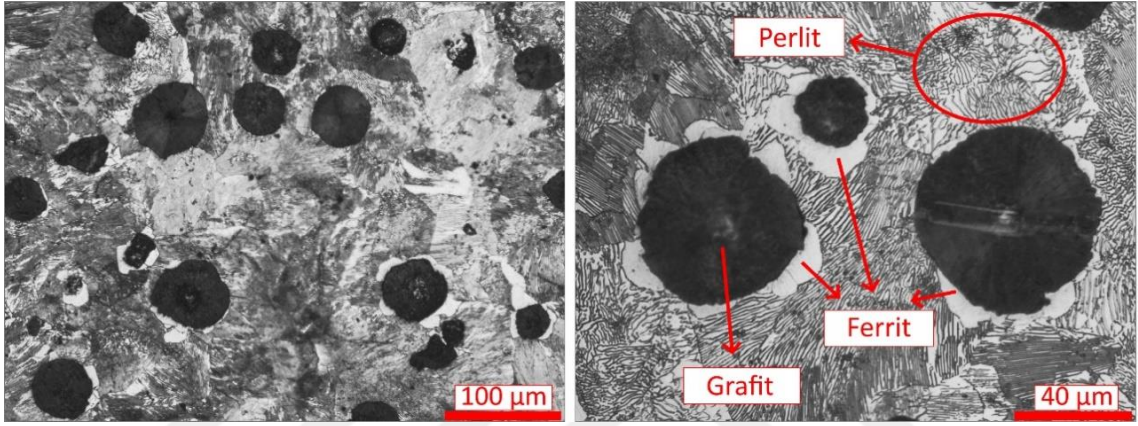
### 5.1. Mikroyapı Analizleri

Östemperleme ısıl işlemi uygulanmamış ham döküm malzemelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 5.1’de gösterilmektedir.





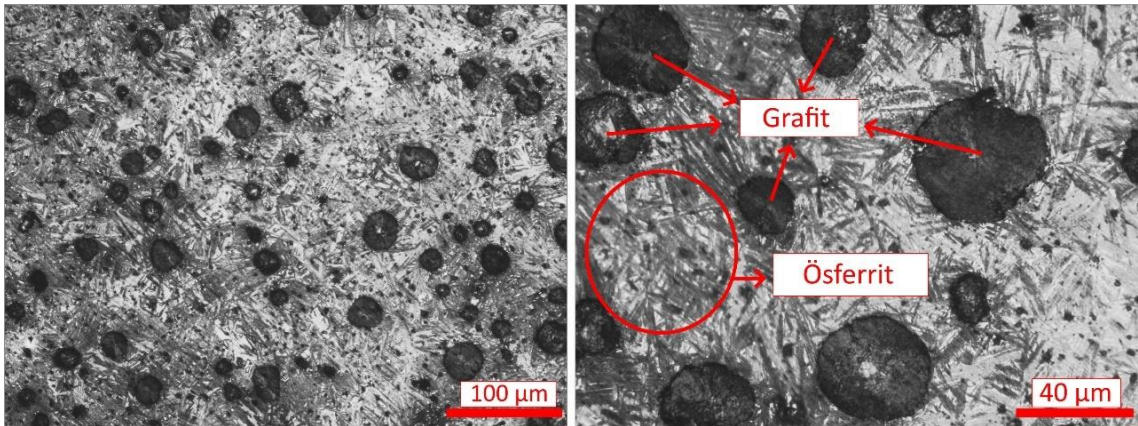
(c)



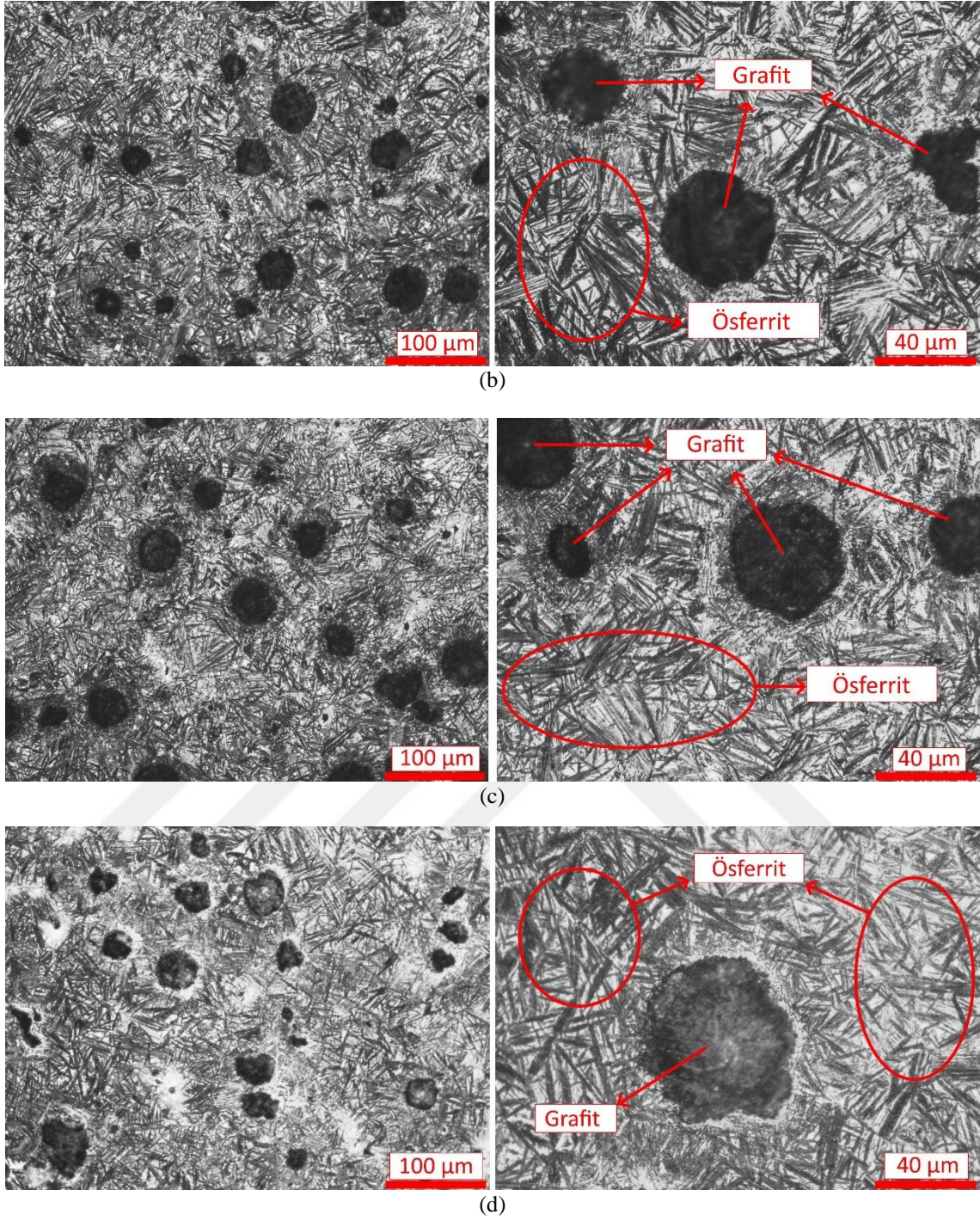
(d)

**Şekil 5.1.** Ham döküm malzemelerin optik mikroskop görüntüleri (200x (sol) ve 500x (sağ));  
 (a) alaşımsız, (b) 0,74 Ni, (c) 0,22 Mo-2,22 Si, (d) 0,22 Mo-2,49 Si

320°C sıcaklık değerinde 90 dakika süre tuz banyosunda östemperlenen GGG-70 KGDD numunelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 5.2’de gösterilmektedir.

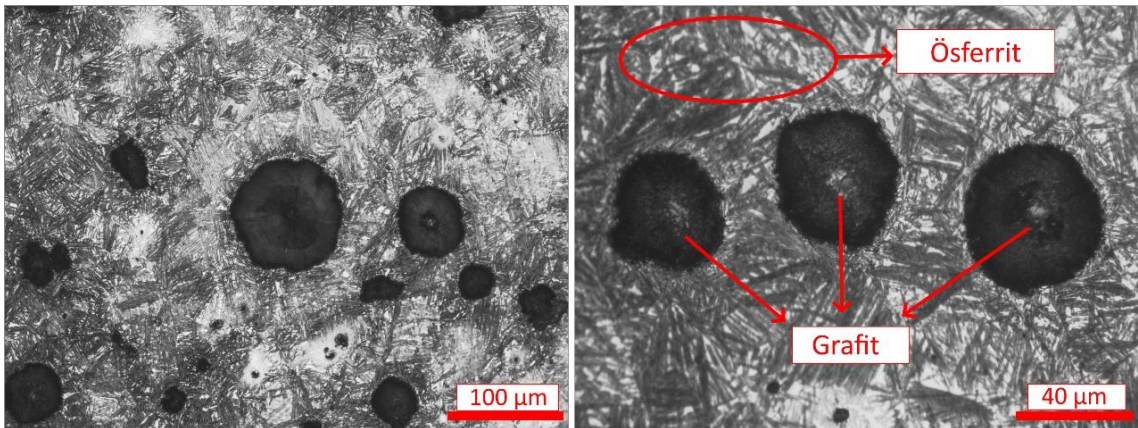
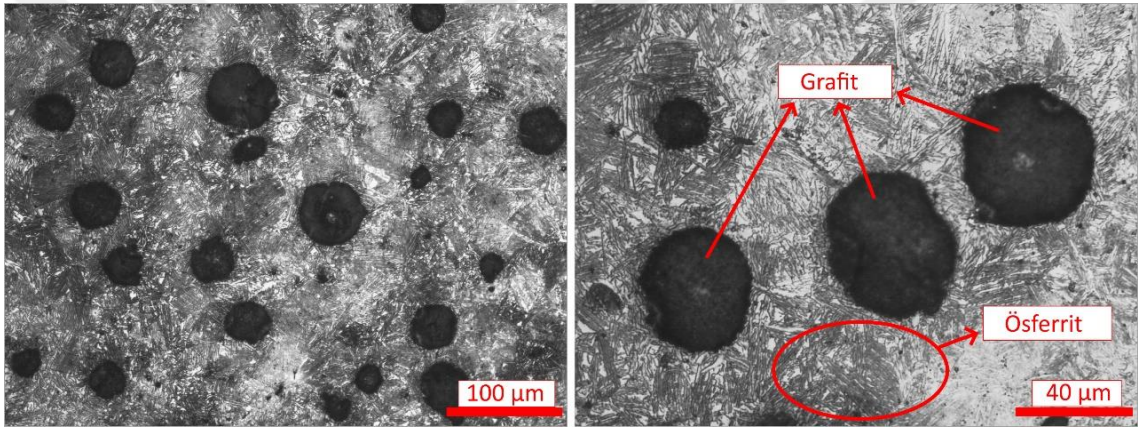
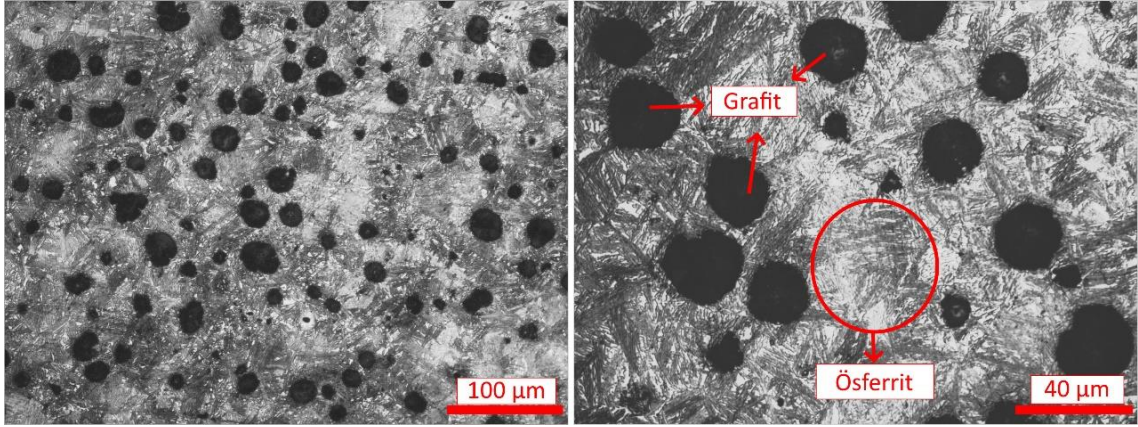


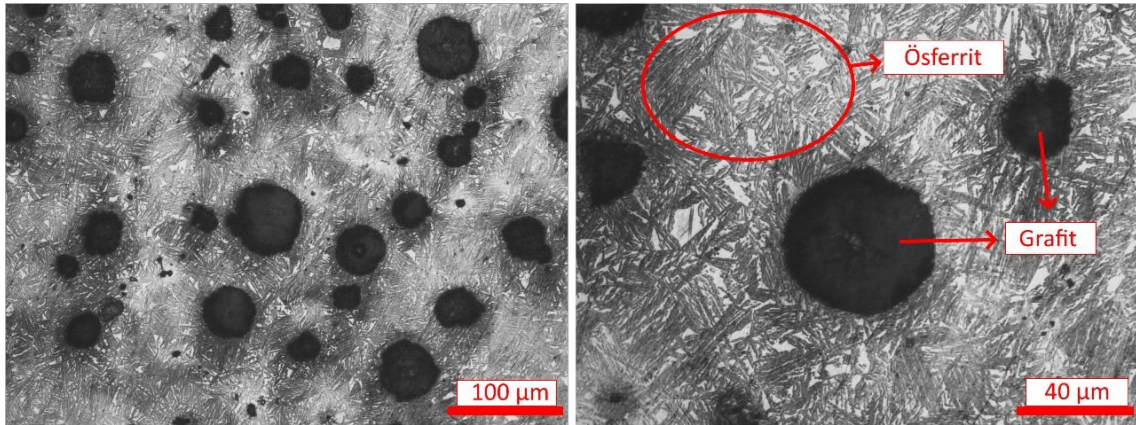
(a)



**Şekil 5.2.** 320°C sıcaklıkta 90 dakika östemperlenen malzemelerin optik mikroskop görüntüleri (200x (sol) ve 500x (sağ)); (a) alaşımsız, (b) 0,74 Ni, (c) 0,22 Mo-2,22 Si, (d) 0,22 Mo-2,49 Si

350°C sıcaklık değerinde 90 dakika süre tuz banyosunda östemperlenen GGG-70 KGDD numunelere ait mikroyapı görüntüleri Şekil 5.3’de gösterilmektedir.





(d)

**Şekil 5.3.** 350°C sıcaklıkta 90 dakika östemperlenen malzemelerin optik mikroskop görüntüleri (200x (sol) ve 500x (sağ)); (a) alaşımsız, (b) 0,74 Ni, (c) 0,22 Mo-2,22 Si, (d) 0,22 Mo-2,49 Si

320°C ve 350°C östemperleme sıcaklıklarında 90 dakika süreyle ısıl işlem uygulanan dört farklı malzemenin mikroyapıları detaylı olarak incelenmiştir. İncelemeler sonucunda mikroyapılarda gözle görülür boyutta herhangi bir döküm hatasına ve karbür yapısına rastlanılmamıştır. Bu sebeple mekanik özelliklerde meydana gelen olumlu artışın karbür yapılarından kaynaklanmadığı östemperleme sonucunda meydana gelen faz dönüşümünün etkisiyle ösferrit (yüksek karbonlu östenit ve ferrit) oluşumundan kaynaklı olarak meydana geldiği sonucuna ulaşılmıştır. Isıl işlem öncesi ve sonrasına ait mikroyapılar karşılaştırılmış ve tüm malzeme yapılarının östemperlenmiş KGDD yapısına dönüşmüş olduğu görülmüştür.

Östemperleme ısıl işleminin etkisi ile grafit morfolojisi, sayısı ve boyutlarında belirgin olarak değişimlere rastlanılmamıştır. Ancak alaşım elementi ilavesinin grafit morfolojisi üzerindeki etkileri çok daha belirgindir. Buradan da anlaşılacağı üzere KGDD üretiminde kullanılacak olan alaşım elementlerinin seçiminin ne kadar önemli olduğu bir kez daha vurgulanmaktadır.

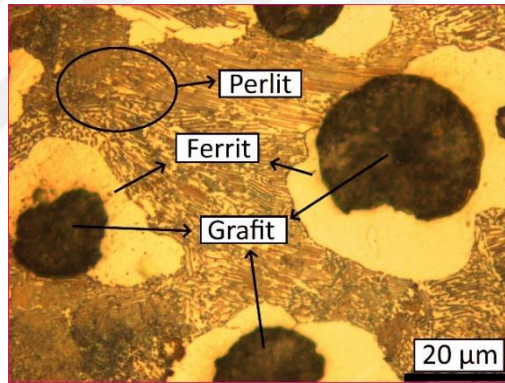
Alaşımsız olarak üretilen malzemede Ni ve Mo elementi bulunmadığından diğer tür alaşımların grafit morfolojileri ve grafit boyutları arasındaki fark açıkça görülmektedir. Ni ve Mo elementlerinin grafit boyutlarının önemli ölçüde büyümesine sebep olduğu mikroyapı görüntülerinde açıkça görülmektedir. Alaşımsız türdeki malzemede Si elementinin yapıdaki varlığı nodül oluşumuna önemli ölçüde katkıda bulunduğu sonucu da incelemelerde elde edilen bir başka bulgudur.

Düşük Si ve yüksek Si elementi üçüncü (%2,22 Si) ve dördüncü (%2,49 Si) türdeki malzemelerin mikroyapıları incelendiğinde, Si elementinin kompozisyondaki artışının nodül sayısı üzerinde artışa sebep olduğu belirgin bir şekilde görülmektedir.

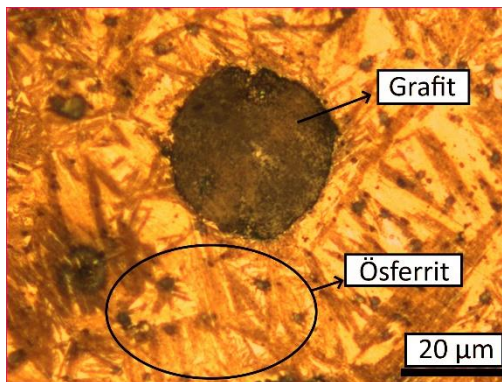


Östempereleme sıcaklıkları olan 320°C ve 350°C sıcaklıklarının alt beynit ve üst beynit bölgelerine olan konumları sebebiyle ösferrit fazında meydana gelmiş olan farklılıklar mikroyapıda belirgin şekilde görülmektedir. 320°C sıcaklıkta yapılan östempereleme işleminde alt beynitik bölgeye daha yakın olunması sebebiyle ösferrit fazının kesiti biraz daha ince olduğu görülürken, 350°C sıcaklıkta yapılan östempereleme işleminde ise ösferrit fazının kesitinin biraz daha kalın olduğu görülmektedir. Bunun sebebi olarak ısı işlem sürelerinin aynı olmasına karşın östempereleme sıcaklığında yapılan artışın difüzyon hızına etki etmesinden dolayı 350°C sıcaklıkta yapılan östempereleme işleminde kesit kalınlaşması meydana geldiği sonucuna ulaşılmaktadır.

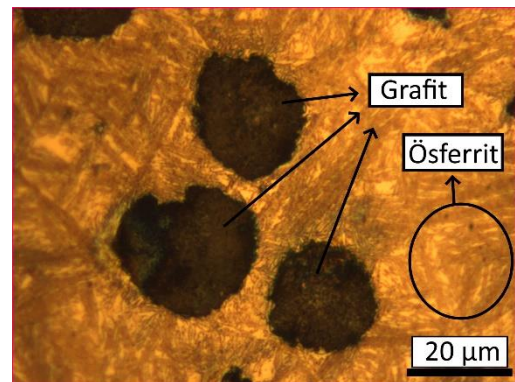
Alaşım sız malzemeden alınan numuneye ait olan detaylı mikroyapı (1000x) görüntüleri Şekil 5.4'de gösterilmektedir. Isıl işlem görmemiş olan (a) resminde koyu renkli küresel grafitler, grafitlerin etrafında bulunan ferrit yapıları ve perlit matrisi görülmektedir. Isıl işlem uygulandıktan sonra oluşan yapılar da (b) ve (c) resimlerinde görülmekte olduğu gibi küresel grafit yapıları ve ösferrit yapıları görülmektedir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 5.4.** Alaşım sız malzemeye ait 1000x mikroyapı görüntüleri a) ısı işlem görmemiş, b) 320°C sıcaklıkta östemperelemiş c) 350°C sıcaklıkta östemperelemiş

## 5.2. Brinell Sertlik Deneyi Sonuçları

Östemperleme ısı işleminin sonrasında malzemenin kazanmış olduğu sertlik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla ham numuneler, 320°C ve 350°C sıcaklık değerlerinde östemperlenen numunelerin sertlik değerleri ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre ham döküm malzemelerin ısı işlem sonrasında büyük ölçüde sertlik kazandığı belirlenmiştir. Sertlik ölçümleri her numune için 3 adet yapılmış olup ortalama değerleri Çizelge 5.1’de gösterilmektedir.

**Çizelge 5.1.** Malzemelere ait Brinell sertlik değerleri

Isıl İşlem	Alaşimsız	0,74 Ni	0,22 Mo-2,22 Si	0,22 Mo-2,49 Si
Ham döküm (As-cast)	212 ± 0,8	239 ± 2,7	239 ± 3,6	253 ± 5,5
320°C östemperlenmiş	315 ± 3,5	339 ± 4,2	339 ± 7,4	329 ± 3,2
350°C östemperlenmiş	307 ± 0,8	296 ± 7,4	314 ± 3,7	294 ± 6,5

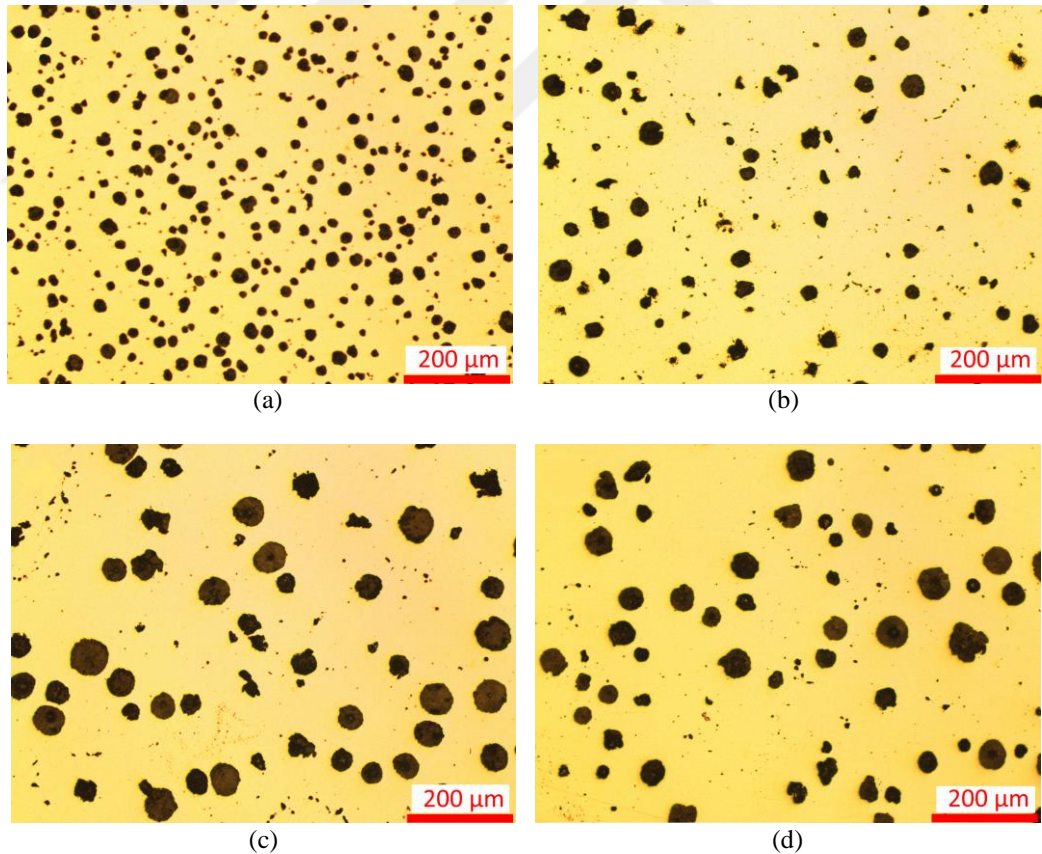
Yapılan incelemelerde herhangi bir karbür yapısına rastlanılmamış olmasından dolayı sertlik değerlerinde meydana gelen artışın sebebinin faz dönüşümünden kaynaklandığı önemli bir bulgudur. Sertlik sonuçlarında yapılan incelemeye göre östemperleme sıcaklığındaki azalmanın sertlik değerinde önemli artışa sebep olduğu sonucu görülmektedir. Bu durumun temel sebebi östemperleme sıcaklığı olan 320°C sıcaklığının alt beynitik bölgeye yakın olmasından kaynaklanmaktadır.

### 5.3. Küreselleşme Oranları ve Grafit-Ferrit-Perlit Yüzdeleri

Yapılan tez çalışmasında döküm işlemi yapılan malzemelerin hangi oranlarda küreselleşme gösterdiğinin belirlenmesi amacıyla Clemex Image Analysis programı yardımıyla optik mikroskopta 100x büyütme değerinde ölçümler yapılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen küreselleşme yüzdeleri Çizelge 5.2’de gösterilmektedir. Yapılan ölçümler doğrultusunda ısıtılma işlem görmemiş ham haldeki GGG-70 KGDD malzemelerin tamamında %80’in üzerinde küreselleşme oranı belirlenmiştir. Küreselleşme oranı hesaplanan dağlanmamış mikroyapılar Şekil 5.5’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.2. Alaşımara ait küreselleşme oranları

	Alaşımatsız	0,74 Ni	0,22 Mo-2,22 Si	0,22 Mo-2,49 Si
<b>Nodularite (%)</b>	86,6	82,97	82,47	84,05
<b>Nodül Miktarı (1/mm<sup>2</sup>)</b>	907	377	248	260



Şekil 5.5. Dağlanmamış mikroyapılara ait görseller (100x);  
(a) alaşımatsız, (b) 0,74 Ni, (c) 0,22 Mo-2,22 Si, (d) 0,22 Mo-2,49 Si

Ayrıca küreselleşme oranının yanında nodül boyutlarının dağılımı ve yüzdeler analizleri de yapılmıştır. Yapılan analize ait bilgiler Çizelge 5.3’de verilmektedir. Analiz sonuçları ve mikroyapı resimlerinde de belirgin olarak görülmekte olduğu üzere Mo ve Ni ilavesinin nodül sayısında düşüşe sebep olmaktadır. Ancak nodül sayısında meydana gelen bu düşüşün yanında grafit boyutlarında artışın da olduğu görülmektedir. %0,22 oranında Mo içeren malzemelerde Si elementi oranlarında yapılan artışın sebep olduğu nodül sayısı artışı da malzeme özelliklere önemli ölçü de etki eden bir diğer parametredir.

**Çizelge 5.3.** Alaşımların nodül boyutlarının ve yüzdelerinin dağılımı

Alaşımsız		0,74 Ni		0,22 Mo-2,22 Si		0,22 Mo-2,49 Si		
Aralık (µm)	Miktar (adet)	Alan (%)	Miktar (adet)	Alan (%)	Miktar (adet)	Alan (%)	Miktar (adet)	Alan (%)
80-160	0	0	2	3	1	1	0	0
40-80	51	18	96	66	88	66	73	60
20-40	413	65	92	25	105	30	119	36
10-20	300	14	99	4	31	2	41	3
0-10	280	2	173	2	99	1	78	1

Son olarak Clemex Image Analysis programı ile alaşımlara ait grafit, perlit ve ferrit yüzdeleri belirlenmiştir. Buradan elde edilen verilen Çizelge 5.4’de gösterilmektedir. Elde edilen veriler alaşımların ısıtılma işlemi öncesinde perlitik matrisle sahip olduğunu göstermektedir.

**Çizelge 5.4.** Alaşımlara ait grafit, perlit ve ferrit oranları

Alaşım Oranı	Grafit (%)	Perlit (%)	Ferrit (%)
Alaşımsız	13,22	80,29	6,5
0,74 Ni	7,98	90,61	1,42
0,22 Mo-2,22 Si	11,77	83,6	4,64
0,22 Mo-2,49 Si	12,1	69,14	18,77

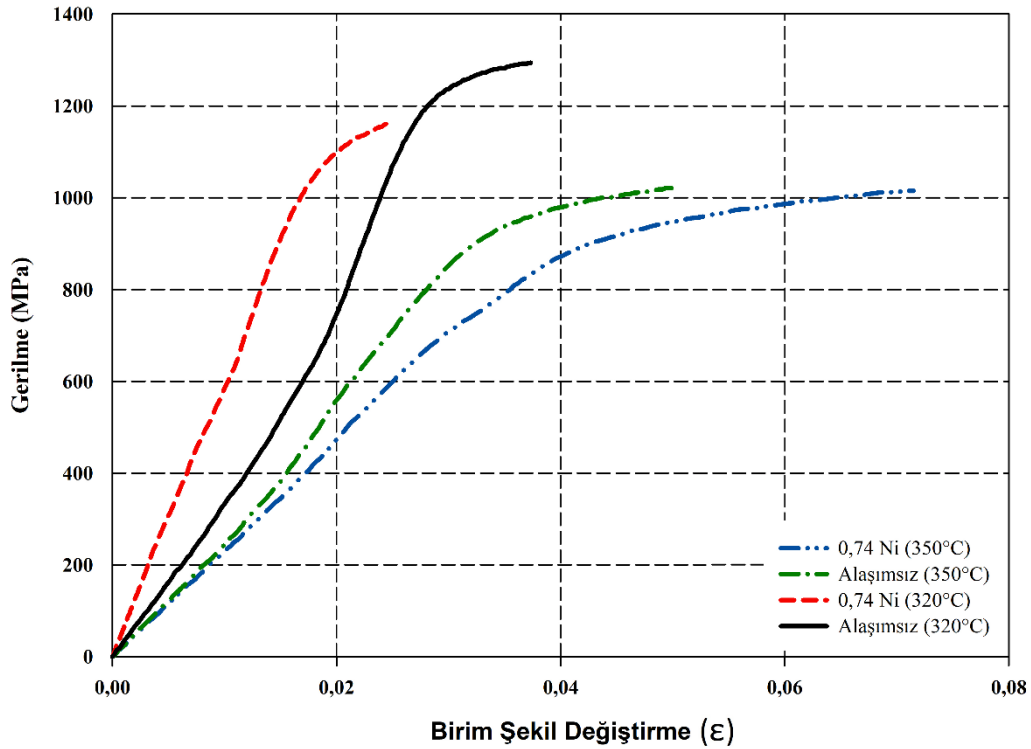
#### 5.4. Çekme Deneyi Sonuçları

Yapılan tez çalışmasında ASTM E8/E8M standartları dahilinde hazırlanan test numuneleri kullanılarak çekme deneyi yapılarak malzemelere ait mekanik özellikler belirlenmiştir. Çekme testi sonuçları ve kırılma yüzeyleri üzerinde yapılan incelemeler sonucunda malzemelerin kırılma türünün gevrek kırılma olduğu tespit edilmiştir. Test sonuçlarından elde edilen verilen Çizelge 5.5’de belirtildiği gibidir.

Çizelge 5.5. Çekme testine ait sonuçlar

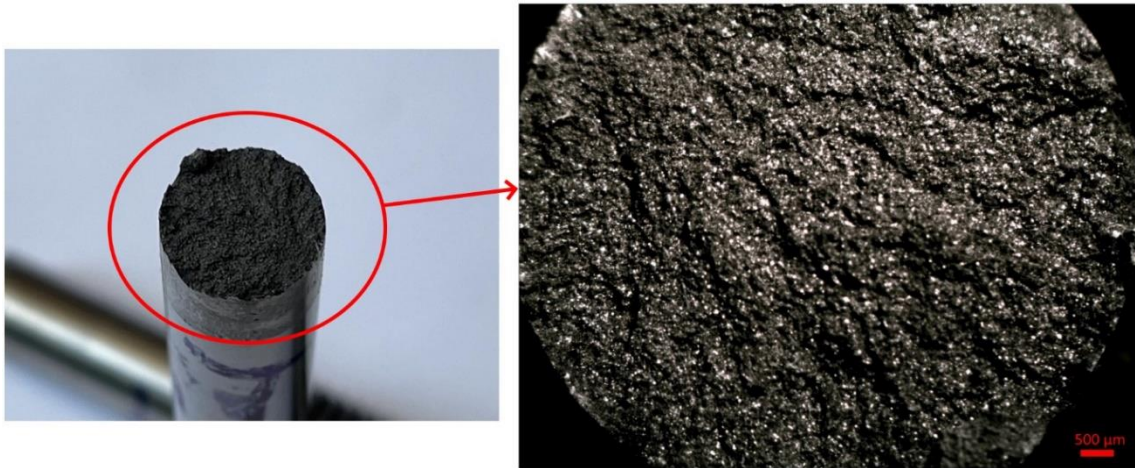
	0,74 Ni (Ascast)	Alaşimsız (Ascast)	0,74 Ni (320°C)	Alaşimsız (320°C)	0,74 Ni (350°C)	Alaşimsız (350°C)
<b>Akma mukavemeti (MPa)</b>	420	391,65	660,22	690,41	760,64	710,88
<b>Çekme mukavemeti (MPa)</b>	790	814,25	1165,92	1293,33	1006,79	1021,57
<b>Uzama (%)</b>	4,23	5,31	2,5	3,75	7,14	5

Ayrıca çekme test cihazının elde ettiği anlık veriler kullanılarak Şekil 5.6’da gösterilmekte olan gerilme-birim şekil değiştirme grafiği elde edilmiştir. Grafikte görüldüğü üzere 350°C sıcaklıkta östemperlenen numunelerin uzama miktarının 320°C sıcaklıkta östemperlenen numunelere göre daha fazla olduğu görülmektedir.

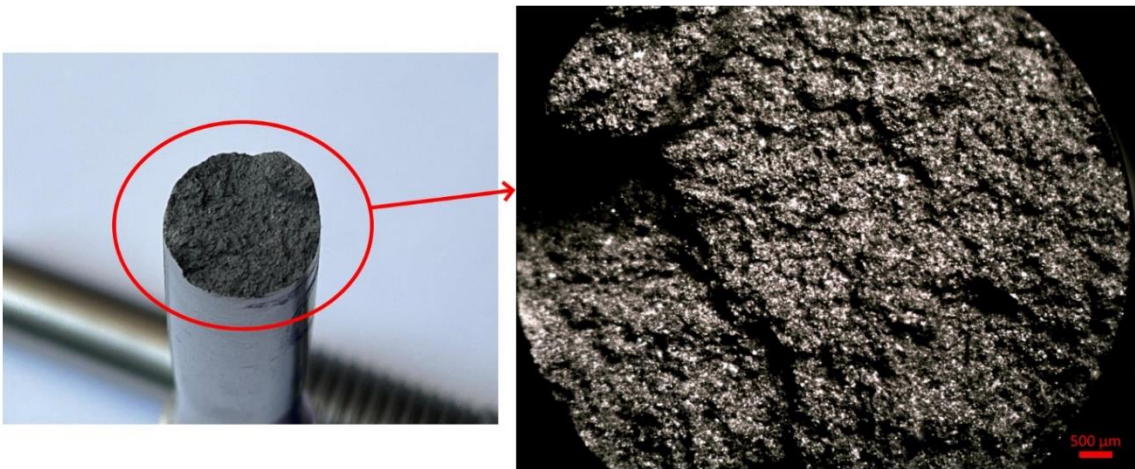


Şekil 5.6. Gerilme – birim şekil değiştirme (ε) grafiği

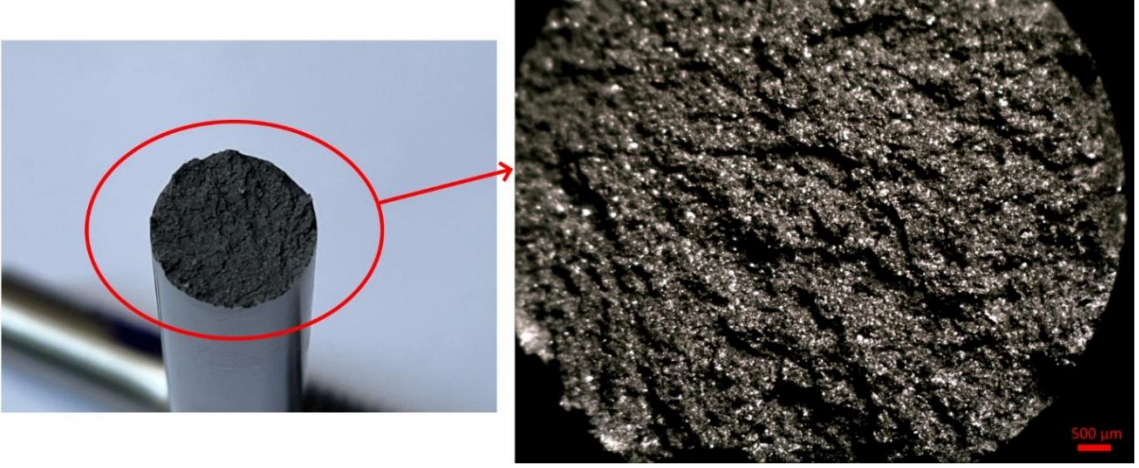
Çekme testi tamamlandıktan sonra kırılma yüzeylerinin incelenmesi sonucunda malzemenin mekanik karakteristiği hakkında daha detaylı bilgiler elde edilmiştir. Kırılma yüzeylerinde yapılan incelemede kırılma türünün genel olarak gevrek kırılma şeklinde olduğu görülmektedir. Çekme testleri sonucunda malzemelerin %2,5 ile %7,14 aralığında uzama göstererek bir miktar plastik deformasyon gösterdiği görülmektedir. Ancak kırılma yüzeyleri incelendiğinde çok az miktarda plastik deformasyon olduğu görülmektedir. Bununla birlikte numune yüzeylerine yakın bölgelerinde kayma dudakları (shear lips), Şekil 5.6'da gösterilen belirgin plastik deformasyonu açıklamaktadır. Ancak 350°C sıcaklıkta yapılan östemperleme sıcaklığında malzemenin daha sünek davranış gösterdiği Şekil 5.6'da görülmektedir. Kırılma yüzeylerine ait resimler Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9, Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Diğer dökme demir sınıfları ile kıyaslandığında elde edilmiş olan malzemelerin mukavemet ve süneklik değerleri çok daha yüksektir.



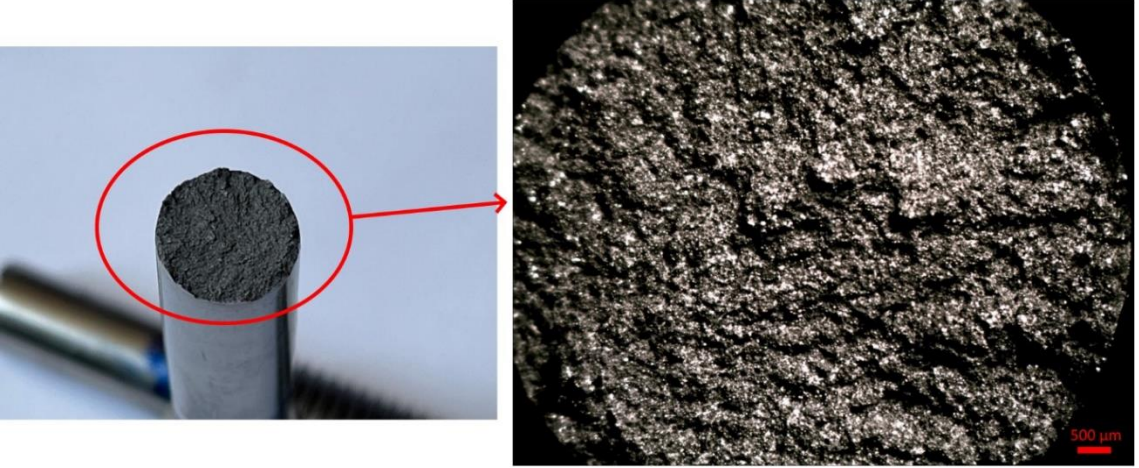
Şekil 5.7. Alaşimsız 350°C sıcaklıkta östemperlenmiş numuneye ait kırılma yüzeyi



Şekil 5.8. %0,74 Ni 350°C sıcaklıkta östemperlenmiş numuneye ait kırılma yüzeyi



Şekil 5.9. Alaşimsız 320°C sıcaklıkta östemperlenmiş numuneye ait kırılma yüzeyi



Şekil 5.10. %0,74 Ni 320°C sıcaklıkta östemperlenmiş numuneye ait kırılma yüzeyi

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Sonuçlar ve Öneriler

Yapılan yüksek lisans tez çalışması kapsamında dört farklı oranda alaşım elementi ilavesi yapılan GGG-70 KGDD malzemelerin 320° ve 350°C olmak üzere farklı iki sıcaklık parametresinde yapılan östemplenme ısıl işleminin mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin istatistiksel yöntemler kullanılarak optimizasyonu yapılmıştır.

Çalışma kapsamında alaşım elementi ilavesinin östemplenebilirlik üzerine etkisinin incelenmiştir. Sonuç olarak perlitik matris ve grafit yapıları etrafında ferrit yapılarına sahip olan KGDD malzemelerin tamamen östemplenerek ösferrit (yüksek karbonlu östenit ve ferrit) fazı elde edildiği görülmüştür. Elde edilen ösferrit fazının malzemenin mekanik özelliklerini olumlu etkilediği görülmüştür.

Farklı oranlarda alaşım elementi içeren dört farklı GGG-70 özellikli KGDD malzemelerin östemplenme ısıl işlemi öncesinde sahip olduğu mikroyapı özellikleri yapılan analizler ile belirlenmiştir. Bunun sonucunda da malzemenin perlitik matris ve grafit yapılarına sahip KGDD malzeme olduğu belirlenmiştir. Ayrıca küreselleşme oranları ve grafit boyutları gibi çeşitli parametreler de belirlenmiştir. Bütün bulgular malzemenin mekanik özelliklerine önemli ölçüde etki etmektedir. GGG-70 özellikli KGDD malzemelere östemplenme ısıl işlemi yapılması sonucunda genel olarak 200 HB olan sertlik değerlerinin 300-330 HB aralıklarına kadar arttığı görülmüştür.

Sertlik test sonuçlarının incelenmesi sonucunda, östemplenme sıcaklığının azalması sonucu alt bey nitik bölgeye yaklaşıldığı bilindiğinden 320°C sıcaklıkta yapılan bekletme işleminin sertlik değerleri 350°C sıcaklık değerinde yapılan bekletme işlemine göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Çekme deneyi sonuçlarında da görüldüğü üzere 320°C sıcaklıkta östemplenen numunelerin akma ve çekme mukavemetleri 350°C sıcaklıkta östemplenen malzemelere göre daha yüksektir. Bu durumun tam tersi olarak 350°C östemplenen numunelerin uzama miktarları 320°C sıcaklıkta östemplenen malzemelerden daha fazla olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. Çekme testi sonrasında deney malzemelerinin kırılma yüzeylerinin incelenmesi doğrultusunda kırılma türünün genel olarak gevrek kırılma şeklinde olduğu görülmektedir. Bununla birlikte numune yüzeylerine yakın bölgelerinde kayma dudakları (shear lips), Şekil 5.6'da gösterilen belirgin plastik deformasyonu açıklamaktadır. Bu durum diğer dökme demir sınıflarında tamamen gevrek kırılma olarak görülmektedir. Ancak imalatı yapılan ve östemplenme ısıl işlemi uygulanan KGDD malzemelerin belirli bir oranda süneklik ve aynı zamanda yüksek



mukavemet göstermesi diğer tür dökme demirlere göre birçok avantajının olduğunu göstergesidir.

Yapılan çekme testleri doğrultusunda Çizelge 5.5'te verilmekte olan akma ve çekme mukavemeti değerleri farklı alaşım oranlarına sahip GGG-70 KGDD malzemelerin 320°C ve 350°C sıcaklık değerlerinde östemperlenmesi sonucunda elde edilmiştir. Östemperleme sıcaklığının 320°C'den 350°C'ye arttırılması ile alaşımsız kompozisyona ait malzemenin akma mukavemeti %2 oranında artarken, %0,74 Ni içeren malzemenin akma mukavemeti %15 artmaktadır. Ancak çekme mukavemeti değerlerinde ise alaşımsız malzemenin değeri %20 artarken, %0,74 Ni içeren malzemenin değerinin %15 oranında azaldığı görülmüştür. Çizelge 6.1'de AISI 4140 çeliğine uygulanmış olan ısıt işlemler ve bu ısıt işlemlerin kazandırdığı akma ve çekme mukavemeti değerleri görülmektedir. Elde edilen bu mekanik özellikler kıyaslandığında östemperlenmiş GGG-70 KGDD malzemelerin AISI 4140 çeliğine benzer mekanik özelliklere sahip hale getirilebileceği ortaya konulmuştur. Ancak östemperleme işlemi sonucunda KGDD malzemelerin en fazla %7,14 uzama değerine sahip olabilirken AISI 4140 çeliği Çizelge 6.1'deki gibi farklı ısıt işlem türlerine göre bu değer çok daha üzerinde olan %11.5 - %25.7 aralığındaki uzama değerlerine sahip olabilmektedir.

**Çizelge 6.1.** AISI 4140 çeliğinin bazı ısıt işlemler ile kazanmış olduğu mekanik özellikler (Callister ve Rethwisch, 2018)

Isıt İşlemler	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
Tavlanmış (815°C)	417	655	25,7
Normalizasyon (870°C)	655	1020	17,7
Yağda su verilmiş ve tavlanmış (315°C)	1570	1720	11,5

Si, Mo ve Ni elementlerinin farklı oranlarda alaşım elementi olarak kullanılması sonucunda birim alana düşen küre sayısını önemli oranda değiştirdiği görülmektedir. Alaşımsız olarak adlandırılan malzemede Ni elementi neredeyse bulunmazken diğer alaşımların % 0,74 Ni içermesinin grafit büyümesine sebep olan temel etken olduğu tespit edilmiştir. Ni ve Mo elementi ilavesinin östemperleme kabiliyetini önemli ölçüde arttırarak malzemelerin mekanik özelliklerini etkilediği belirlenmiş olan diğer özelliklerdendir.

**KAYNAKLAR**

- Ahmadabadai, M. N., 1997, Bainitic transformation in austempered ductile iron with reference to untransformed austenite volume phenomenon, *Metallurgical and materials transactions. A, Physical metallurgy and materials science*, 28(10).
- Ahmed, M., Soliman, M., Youssef, M., Bähr, R., & Nofal, A., 2021, Effect of Niobium on the Microstructure and Mechanical Properties of Alloyed Ductile Irons and Austempered Ductile Irons, *Metals*, 11(5), 703.
- Alabi, G. F. A., & Aluko, F. I., 2013, Production of Austempered Ductile Iron with Optimum Sulphur level for effective Mechanical Properties, *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, 2(12), 67-71.
- Aranzabal, J., Gutierrez, I., Rodriguez-Ibabe, J. M., & Urcola, J. J., 1997, Influence of the amount and morphology of retained austenite on the mechanical properties of an austempered ductile iron, *Metallurgical and materials transactions A*, 28(5), 1143-1156.
- Artola, G., Gallastegi, I., Izaga, J., Barreña, M., & Rimmer, A., 2017, Austempered ductile iron (ADI) alternative material for high-performance applications, *International Journal of Metalcasting*, 11(1), 131-135.
- Ayday, A., 2013, Elektrolitik plazma teknolojisi ile küresel grafitli dökme demir malzemesinin yüzey özelliklerinin geliştirilmesi, (Doktora Tezi), *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya.
- Bahmani, M., Elliott, R., & Varahram, N., 1997, The austempering kinetics and mechanical properties of an austempered Cu–Ni–Mo–Mn alloyed ductile iron, *Journal of Materials Science*, 32(18), 4783-4791.
- Bartosiewicz, L., Singh, I., Alberts, F. A., Krause, A. R., & Putatunda, S. K., 1995, The influence of chromium on mechanical properties of austempered ductile cast iron, *Journal of materials engineering and performance*, 4(1), 90-101.
- Bayati, H., & Elliott, R., 1997, Role of austenite in promoting ductility in an austempered ductile iron, *Materials science and technology*, 13(4), 319-326.
- Bedolla-Jacuinde, A., Hernandez-Hernandez, R. A., Guerra, F. V., & Mejia, I., 2020, The role of chromium during austempering of ductile iron, *Metallurgical Research & Technology*, 117(1), 104.
- Behera, G. ve Sohala, S. R., 2012, Effect of copper on the properties of austempered ductile iron castings, *National Institute of Technology*, Rourkela.
- Benam, A. S., 2015, Effect of alloying elements on austempered ductile iron (ADI) properties and its process, *China Foundry*, 12(1), 54-70.
- Bendikiene, R., Ciuplys, A., Cesnavicius, R., Jutas, A., Bahdanovich, A., Marmysh, D., & Sherbakov, S., 2021, Influence of Austempering Temperatures on the Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Cast Iron, *Metals*, 11(6), 967.
- Bilici, M. K., 2004, Alaşımsız dökme Demirlerin aşınma özelliği, (Yüksek lisans tezi), *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Bosnjak, B., & Radulovic, B., 2004, Effect of austenitising temperature on austempering kinetics of Ni-Mo alloyed ductile iron, *Materials and Technology*, 38(6), 307-312.
- Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G., 2018, Materials Science and Engineering, 10th Edition, *Wiley*, Danvers.
- Čatipović, N., Živković, D., & Dadić, Z., 2018, The effects of molybdenum and manganese on the mechanical properties of austempered ductile iron, *Tehnički vjesnik*, 25(2), 635-642.

- Čatipović, N., Živković, D., Dadić, Z., & Ljumović, P., 2021, Effect of Copper and Heat Treatment on Microstructure of Austempered Ductile Iron, *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 1-14.
- Cetin, B., Halim, M. E. C. O., Davut, K., Arslan, E., & Uzun, M. C., 2016, Microstructural analysis of austempered ductile iron castings, *Hittite Journal of Science and Engineering*, 3(1), 29-34.
- Chandler, H., 1994, Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels, 2nd Edition, *ASM International*, Materials Park, Ohio.
- Demirlek, M., 2013, Küresel grafitli dökme demirlerin yüksek çevrimli yorulma davranışına silisyum oranının etkisi, (Doktora Tezi), *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Duwe, S., Liepe, M., Schrumpf, M., Tonn, B., & Bähr, R., 2021, A new ductile iron for mechanically and thermally strained rolls Part 2: material development varying Ni, Mo, Cr content using DoE, *International Journal of Cast Metals Research*, 1-8.
- Elliott, R., 1988, Cast iron technology, 1st Edition, *Butterworths*.
- Gençsoy, U., 2016, GGG40 küresel grafitli dökme demirin mikroyapı ve mekanik özelliklerine östemperleme ve indüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin etkisi/The effect of austempering and induction surface hardening processing on the microstructure and mechanical properties of ductile cast iron GGG40.
- Gider, G., 2015, Farklı Oranlarda Silisyum İçeren Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikro Yapılarına Çift Kademeli Östemperlemenin Etkisi, (Doktora tezi), *Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Gorny, M., Gondek, Ł., Tyrała, E., Angella, G., & Kawalec, M., 2021, Structure homogeneity and thermal stability of austempered ductile iron. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 52(6), 2227-2237.
- Hasırcı, H., & Erdoğan, M., 2000, Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementleri Cu Ni ve Östemperleme Süresinin Mikroyapı ve Çekme Özellikleri Üzerine Etkileri.
- Hayrynen K L, Brandenburg K R and Keough J R., 2002, Applications of Austempered Cast Irons. *AFS Transactions*, 110: 1-10.
- Hegde, A., BM, G., Hindi, J., Sharma, S., & MC, G., 2021, Effect of austempering temperature and manganese content on the impact energy of austempered ductile iron, *Cogent Engineering*, 8(1), 1939928.
- Keough, J. R., Hayrynen K.L. ve Pioszak, G. L., 2010, Designing with Austempered Ductile Iron (ADI)., *AFS Proceedings*, 10-129.
- Kılıçlı, V., 2004, Küresel grafitli dökme demirlerde kısmi östenitleme ve östemperleme ısıl işleminin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi, (Yüksek Lisans), *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.
- Klocke, F., Arft, M. ve Lung, D., 2010, Material-related aspects of the machinability of Austempered Ductile Iron, *Production Engineering*, 4(5), 433-441.
- Konca, E., Tur, K., & Koç, E., 2017, Effects of alloying elements (Mo, Ni, and Cu) on the austemperability of GGG-60 ductile cast iron, *Metals*, 7(8), 320.
- Kovacs Sr, B. V., 1990, Austempered ductile iron: fact and fiction, *Mod. Cast*, 80(3), 38-41.
- Labrecque, C. ve Gagné, M., 1998, Ductile Iron: Fifty Years of Continuous Development, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37(5), 343-378.
- Lünenbürger, A., 1991, Zum Unwandlungs-und Verformungsverhalten bainitisch-austenitischer Siliziumstähle.

- Özcan, A., 2003, The effect of SN content and isothermal transformation temperature on the mechanical properties of austempered ductile cast iron, (Master's thesis), *Middle East Technical University*.
- Öztürk, E. & Yıldırım, M., 2019, Östemperleme Sıcaklık ve Süresinin Östemperlenmiş Sünek Dökme Demirlerin Mikro Yapı ve Sertliğine Etkisi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(3), 604-611.
- Öztürk, E. ve Yıldırım, M., 2019, Östemperleme sıcaklığının küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi, (Yüksek lisans), *Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya.
- Pereira, H. B., Tschiptschin, A. P., Goldenstein, H., & Azevedo, C. R. F., 2021, Effect of the austenitization route on the bainitic reaction kinetics and tensile properties of an alloyed austempered ductile iron, *International Journal of Metalcasting*, 1-14.
- Sağlam, D., 2009, Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri. (Yüksek lisans), *Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Stefanescu, D. M., 1990, Classification and basic metallurgy of cast iron, *ASM International, Metals Handbook*, 10th Edition., 1, 3-11.
- Thein, T. U. N., & LWIN, K. T., 2008, Optimizing the microstructure and mechanical properties of austempered ductile iron for automobile differential gear, *Journal of metals, materials and minerals*, 18(2), 199-205.
- Trudel, A. ve Gagne, M., 1997, Effect of composition and heat treatment parameters on the characteristics of austempered ductile irons, *Canadian Metallurgical Quarterly*, 36(5), 289-298.
- Yazman, Ş., Kara, A., Avca, A., Akdemir, A., & Kısakürek, E., 2012, Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementlerinin ve Östemperleme Isıl İşleminin Mikroyapıya ve Mekanik Özelliklere Etkisi, *14th International Materials Symposium (IMSP'2012)*, Denizli.