



MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN
ÜRETİMİNDE MODÜLÜN MİKRO YAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

Oğuzhan ÇOLAK

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği
Ana Bilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK
2019
(Her Hakkı Saklıdır)**

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÜRETİMİNDE MODÜLÜN
MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Oğuzhan ÇOLAK

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

Bayburt
Haziran, 2019

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK danışmanlığında, 152001001 numaralı Oğuzhan ÇOLAK tarafından hazırlanan “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretiminde Modülün Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi” konulu bu çalışma 13.06.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

İmza:

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar YÜKSEL

İmza:

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Engin ERBAYRAK

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

26.06.2019

Prof. Dr. Metin UÇURUM

Enstitü Müdürü V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bu çalışmada şahsıma ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.


Oğuzhan ÇOLAK

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÜRETİMİNDE MODÜLÜN MİKRO YAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ

Oğuzhan ÇOLAK

Bayburt Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

Bu tez kapsamında bir küresel grafitli dökme demir alaşımı olan GGG70L malzemesi kullanılmıştır. A iş parçası 100 mm x 100 mm x 300 mm, B iş parçası 50 mm x 50 mm x 300 mm ve C iş parçası 25 mm x 25 mm x 300 mm ebatlarında olan dikdörtgen prizma şeklindeki iş parçasına dökümü yapılmıştır. İş parçalarının modül değerleri hesaplanmıştır.

Modül değişiminin malzemenin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. A ve B iş parçasından C iş parçası ebatlarında numuneler çıkartılarak modül değişiminin sertlik, çekme ve mikro yapı üzerinde etkileri incelenmiştir. Numuneler önce parlatma işlemlerine tabi tutulmuş sonrasında ise dağlanmış. Numunelerin mikro yapı incelemeleri yapıldıktan sonra alınan görüntüler üzerinden fotoğrafları çekilmiştir. Sonrasında imaj analizleri yapılmıştır. Numunelerin dağlama öncesi küreselleşme, ortalama küre çapı ve kürelerin yüzde dağılımı; numuneler dağlandıktan sonra mikro yapı incelemesi ve yüzde faz dağılımı belirlenmiştir. Son olarak numunelerin SEM incelemeleri yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda cevabı beklenen sonuçlara ulaşılmıştır. Döküm malzemesinin kimyasal bileşiminin standartlara uygun olduğu belirlenmiştir. Modül boyutu azaldıkça çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Sertliğin modül boyutunun azalmasına ters orantılı bir şekilde arttığı görülmüştür. Modül değeri düşük olan numunenin daha hızlı soğumaya bağlı olarak daha küçük küre çapına sahip olduğu görülmüştür. Modül değeri daha küçük olan numunenin daha hızlı katılaştığı ve buna paralel bir şekilde mm² ye düşen küre sayısının arttığı görülmüştür. % Küresellik ve % küresel grafit miktarının modül değeri düştükçe arttığı gözlemlenmiştir. Modül değişiminin yapıdaki faz değişimine direkt etki etmediği tespit edilmiş olup, faz analizindeki değişimlerin mevcut numunelerin kimyasal bileşimine bağlı olarak etkilenmekte olduğu görülmüştür.

2019, 123 sayfa

Anahtar kelimeler: Döküm, küresel grafitli dökme demir, modül, imaj analiz, mikro yapı

ABSTRACT

MS Thesis

THE EFFECT OF THE MODULE TO MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN THE PRODUCTION OF SPHERICAL GRAPHITE CAST IRONS

Oğuzhan ÇOLAK

Bayburt University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Lecturer PhD Murat ÇOLAK

In this thesis, GGG70L material, which is a spherical graphite cast iron alloy, has been used. Model A was cast to rectangular prism shaped models with dimensions of 100 mm x 100 mm x 300 mm, model B 50 mm x 50 mm x 300 mm and model C 25 mm x 25 mm x 300 mm. Module values of the models were calculated.

The effects of the change in the module value on the microstructure and mechanical properties of the material were investigated. In the size of C model samples were removed from A and B model and the effects of modulus change on hardness, tensile and microstructure were investigated. First the samples were subjected to polishing and then etching. After the microstructure investigations of the samples were taken, photographs were taken from the images taken. Afterwards, image analysis was performed. Sphericalization of samples before etching, mean sphere diameter and percentage distribution of spheres; Microstructure analysis and percentage phase distribution were determined after the samples were etching. Finally SEM examinations of the samples were made. As a result of the study, the expected results were reached. It has been determined that the chemical composition of the casting material confirms to the standards. As the module size decreased, tensile strength, yield strength and % elongation values were determined to decrease. It was determined that the hardness increased in an inverse proportion to the decrease of the module size. It was determined that the sample with low module value had a smaller sphere diameter due to faster cooling. It was observed that the sample with smaller module value solidified more rapidly and the number of spheres over to mm² was increased in parallel. It has been observed that the amount of sphericity and % sphericity graphite increase as module value decreases. It has been found that the change of the module does not directly affect the phase change in the structure and it is seen that the changes in the phase analysis are affected by the chemical composition of the existing samples.

2019, 123 pages

Keywords : Casting, Spherical Graphite Cast Iron, Module, Image Analysis, Microstructure

TEŞEKKÜR

Çalıőmalarımın yürütölmesi sırasında bana ilgi ve desteğini eksik etmeyen, bilgi ve deneyimleriyle bana yol gösteren saygı değer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK'a, sonsuz teşekkür ve saygılarımı sunarım.

Çalıőmalarım süresince bana her türlü motivasyon desteği veren babama, manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen annem ve abime teşekkür ederim.

Oğuzhan ÇOLAK

Haziran / 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	13
2.1 Dökme Demirler.....	13
2.1.1 Dökme demirlerde fazlar	15
2.1.2 Dökme demir çeşitleri	17
2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirler	26
2.2.1 Küresel grafitli dökme demirlerin genel özellikleri	27
2.2.2 Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri.....	29
2.2.3 Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	35
2.2.4 Küresel grafitli dökme demirlerin bileşimini oluşturan elementler	39
2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi.....	42
2.3.1 Küresel grafitli dökme demirlerin üretiminde kullanılan şarj malzemeleri	44
2.3.2 Ergitme	45
2.3.3 Küreselleştirme işlemi.....	45
2.3.4 Aşılama işlemi.....	55
3. MATERYAL ve YÖNTEM	60
3.1 İş Parçası Tasarımı ve Modül Hesaplamaları.....	60

3.2 İş Parçası İmalatı ve Kalıpların Hazırlanması.....	62
3.3 Ergitme ve Döküm İşlemleri	64
3.4 Döküm Numunelerinin İncelenmesi	67
3.5 Sertlik Değerlerinin Belirlenmesi	68
3.6 Çekme Testi Deneyleri.....	69
3.7 Metalografik Hazırlık ve Mikro Yapı Fotoğraf Çekimi İşlemleri	72
3.8 İmaj Analiz Yöntemi ile Mikro Yapı Karakterizasyonu.....	73
3.8.1 Küresellik ölçümleri.....	74
3.8.2 Faz analizi incelemeleri.....	80
3.8.3 Taramalı elektron mikroskop (SEM-EDS) analizi.....	83
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	85
4.1 Kimyasal Bileşim Uygunluğunun Kontrolü	85
4.2 Mekanik Test Sonuçları	86
4.2.1 Çekme testi deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi.....	86
4.2.2 Sertlik testi deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi	90
4.3 Mikro Yapı İncelemeleri	93
4.4 İmaj Analiz Değerlendirmeleri	102
4.4.1 Parlatma sonrası elde edilen mikro yapı imaj analiz sonuçları.....	102
4.4.2 Dağlama sonrası elde edilen mikro yapı imaj analiz sonuçları.....	112
4.5 SEM İncelemeleri.....	114
5. SONUÇLAR	117
KAYNAKLAR	119
ÖZGEÇMİŞ

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

% P	Yüzde fosfor
% Si	Yüzde silisyum
A _D	Döküm yüzey alanı
CE	Karbon eşdeğeri
GGG	Küresel grafitli dökme demir
MPa	Mega Paskal
M _D	Döküm modülü
V _D	Döküm hacmi

Kısaltmalar

ASTM	American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Malzeme Kurumu)
BSD	Brinell Sertlik Değeri
DDK	Dökme Demir Küresel
DIN	Alman Norm Enstitüsü
EDS	Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Saçılımlı Spektroskopi)
KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
ISO	Uluslararası Standart Örgütü
SEM	Scanning Electron Microscopy (Taramalı Elektron Mikroskop)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Fe-C diyagramının gösterilişi	14
Şekil 2.2 Dökme demir alaşımlarında karbon ve silisyum içerik aralıkları.....	15
Şekil 2.3 ASTM A 247' ye göre A-tipi grafit şekli	18
Şekil 2.4 ASTM A 247' ye göre B-tipi grafit şekli	18
Şekil 2.5 ASTM A 247' ye göre C-tipi grafit şekli	19
Şekil 2.6 ASTM A 247' ye göre D-tipi grafit şekli	20
Şekil 2.7 ASTM A 247' ye göre E-tipi grafit şekli.....	20
Şekil 2.8 % 4 Nital ile dağlanmış 150x büyütmede beyaz dökme demir mikro yapısının gösterilişi	21
Şekil 2.9 a) Mg ilavesi ile yapı değişimi, b) Perlitik dökme demirde Mg ilavesi ile çekme mukavemeti değişimi, c) Mg, Ti, Ce ilavesi ile yapı değişimi.....	22
Şekil 2.10 100x büyütmede temper yapısı.....	23
Şekil 2.11 Gerilim/gerinim tablosu.....	29
Şekil 2.12 KGDD kaliteleri ve çekme/uzama dayanım eğrileri	30
Şekil 2.13 Ferritik yapı, büyütme: 200x (50 µm)	32
Şekil 2.14 % 50 Ferritik % 50 perlitik yapı, büyütme: 500x (20 µm).....	32
Şekil 2.15 Perlitik küresel grafitli dökme demir büyütme: 600x (20 µm).....	33
Şekil 2.16 Temperleme ısıl işlemi görmüş martenzitik küresel grafitli dökme demir mikro yapısı (büyütme 100x).....	34
Şekil 2.17 Östenitik küresel grafitli dökme demir büyütme (100x) nital ile dağlanmış	34
Şekil 2.18 Farklı küresel grafitli dökme demirlere ait içyapı resimleri ve çekme mukavemeti değerleri.....	35
Şekil 2.19 Yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir elde etmek için gerekli karbon ve silisyum oranları.....	40
Şekil 2.20 KGDD üretiminin şematik akış diyagramı.....	43
Şekil 2.21 Magnezyumun küreselleşmeye etkisi.....	46
Şekil 2.22 Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi.....	48
Şekil 2.23 Küresel grafitli dökme demir üretiminde açık pota yöntemi.....	49
Şekil 2.24 Sandwich potası yönteminin gösterilişi	50
Şekil 2.25 Mg faydalanma yüzdesinin işlem sıcaklığı ile değişimi.....	50

Şekil 2.26 İbrikli pota yönteminin gösterilişi	51
Şekil 2.27 Flotret yönteminin kademeli olarak gösterilişi	52
Şekil 2.28 Inmold yönteminin gösterilişi.....	52
Şekil 2.29 Daldırma yönteminin gösterilişi	54
Şekil 2.30 Enjeksiyon yönteminin şeması	55
Şekil 2.31 Aşılama durumuna sıcaklığın etkisi	57
Şekil 2.32 1370° C’de uygulanan iki aşılama yönteminin karşılaştırılması	57
Şekil 3.1 Döküm numune geometri ve ölçüleri (A: 100 mm x 100 mm x 300 mm, B: 50 mm x 50 mm x 300 mm ve C: 25 mm x 25 mm x 300 mm)	61
Şekil 3.2 A iş parçası için kalıplama katı iş parçası görüntüsü.....	62
Şekil 3.3 B iş parçası için kalıplama katı iş parçası görüntüsü.....	63
Şekil 3.4 C iş parçası için kalıplama katı iş parçası görüntüsü.....	63
Şekil 3.5 Sıvı metal ergitme, küreleştirme, potaya alma görüntüleri	65
Şekil 3.6 Döküm sonrası kalıptan çıkmış 100 x 100 x 300 mm ebatlarındaki A iş parçası görüntüsü	66
Şekil 3.7 Döküm sonrası kalıptan çıkmış 50 x 50 x 300 mm ebatlarındaki B iş parçası görüntüsü	66
Şekil 3.8 Döküm sonrası kalıptan çıkmış 25 x 25 x 300 mm ebatlarındaki C iş parçası görüntüsü	67
Şekil 3.9 Döküm numunelerin incelenmek üzere kesilmesi.....	67
Şekil 3.10 Sertlik ölçümü, çekme testi ve mikro yapı incelemelerinin yapıldığı bölgelerin gösterilmesi.....	68
Şekil 3.11 Sertlik ölçme testi örnek görüntüler	69
Şekil 3.12 Deney çubuğundan çekme test numunesinin çıkarıldığı bölgenin katı iş parçası görüntüsü	70
Şekil 3.13 İstenilen boyutlarda çekme çubuğu alma işlemi.....	70
Şekil 3.14 Çekme çubuğu ve çekme cihazı örnek görüntüler.....	71
Şekil 3.15 Bilgisayar destekli imaj analiz sistemi görüntüsü	73
Şekil 3.16 Parlatma sonrası numune örnek mikro yapısı.....	74
Şekil 3.17 Resim özelliklerinin geliştirilmesi uygulaması örnekler	76
Şekil 3.18 İki faz olduğu varsayılan mikro yapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntü	77

Şekil 3.19 a) Küre sayısı ve uzunlukları, b) Küreselleşme oranı tespiti, c) Faz oranı tespiti.....	79
Şekil 3.20 a) KGDD numune örnek mikro yapısı 100x büyütmede (dağlama sonrası), b) Resim özelliklerinin delineate işlemi uygulanarak geliştirilmesi	81
Şekil 3.21 Numune mikro yapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntü	82
Şekil 3.22 Örnek mikro yapı numunesi için yüzde faz dağılımı.....	83
Şekil 3.23 Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı	84
Şekil 4.1 Çekme testi sonucu numunelerin kırılma görüntüsü	86
Şekil 4.2 Çekme testi sonrası numune kırık yüzey görüntüsü	87
Şekil 4.3 Test cihazından alınan örnek gerilim uzama diyagramı görüntüsü	88
Şekil 4.4 Döküm deney numunelerine ait sertlik testi sonuçları	90
Şekil 4.5 Soğuma hızı ve kalınlıktaki değişime bağlı olarak ortaya çıkan sertlik değerleri	93
Şekil 4.6 A iş parçası için, a) 50x büyütmede, b) 100x büyütmede çekilen parlatma sonrası mikro yapı görüntüleri	94
Şekil 4.7 B iş parçası için, a) 50x büyütmede, b) 100x büyütmede çekilen parlatma sonrası mikro yapı görüntüleri	95
Şekil 4.8 C iş parçası için, a) 50x büyütmede, b) 200x büyütmede çekilen parlatma sonrası mikro yapı görüntüleri	96
Şekil 4.9 A iş parçası için, a) 200x büyütmede, b) 500x büyütmede çekilen dağlama sonrası mikro yapı görüntüleri	97
Şekil 4.10 B iş parçası için, a) 200x büyütmede, b) 500x büyütmede çekilen dağlama sonrası mikro yapı görüntüleri	98
Şekil 4.11 C iş parçası için, a) 200x büyütmede, b) 500x büyütmede çekilen dağlama sonrası mikro yapı görüntüleri.....	99
Şekil 4.12 Parlatma sonrası a) Orijinal mikro yapı resmi, b) İmaj analizde işlenmiş resim görüntüsü.....	103
Şekil 4.13 İmaj analiz ölçüm sonuçları a) % Küresellik b) Küre çapı (μm) c) % Küresellik grafit miktarı d) 100x büyütmede küre sayısı.....	105
Şekil 4.14 a) Kesit kalınlığı ve soğuma hızının yapıdaki % perlite etkisi b) Kesit kalınlığı ve soğuma hızının yapıdaki % ferrite etkisi	111
Şekil 4.15 Dağlama sonrası 100x büyütmede a) Orijinal mikro yapı resmi, b) İmaj analizde işlenmiş resim görüntüsü	112
Şekil 4.16 Faz analizi ölçüm sonuçları	113

Şekil 4.17 A iş parçası 1000x büyütme SEM görüntüsü	114
Şekil 4.18 B iş parçası 200x büyütme SEM görüntüsü	115
Şekil 4.19 C iş parçası 500x büyütme SEM görüntüsü	115
Şekil 4.20 Küresel grafit-ana matris ara yüzey 2000x büyütmede SEM görüntüsü	116
Şekil 4.21 Ana matris perlit yapısı 2000x büyütmede SEM görüntüsü.....	116



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Farklı kesit kalınlıklarına sahip numunelerin mikro yapı ve sertlik değerleri.....	7
Çizelge 2.1 Bazı elementlerin grafit yapısına etkileri.....	24
Çizelge 2.2 Dökme demir türleri ve dökme çeliğin karşılaştırılması	25
Çizelge 2.3 Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri.....	31
Çizelge 2.4 Küresel grafitli dökme demirlerin TS 526'ya göre standardı ve kullanım alanları.....	36
Çizelge 2.5 DIN 1693'e göre parçadan ayrı dökülen numune özellikleri	37
Çizelge 2.6 Uluslararası ISO R 1083 standardı	38
Çizelge 2.7 ASTM, A 536-70 standardı	38
Çizelge 2.8 Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan yöntemler.....	47
Çizelge 2.9 Inmold yönteminde küreselleştirici miktarının artmasıyla küre sayısındaki değişimin gösterilişi	53
Çizelge 2.10 Küresel grafitli dökme demir için bazı ferrosilisyum esaslı aşılama bileşimleri.....	58
Çizelge 3.1 Yüzey işleme durumu	72
Çizelge 4.1 Deneylerde kullanılan GGG70L döküm alaşımının kimyasal bileşimi..	85
Çizelge 4.2 Deney numunelerine ait ortalama çekme testi sonuçları	88
Çizelge 4.3 Vaxon, Barinoc ve UltraSeed ile aşılama döküm numunelerinin sertlik değerleri.....	91
Çizelge 4.4 Farklı numunelere ait kesit kalınlığına bağlı olarak sertlik sonuçları.....	92
Çizelge 4.5 a) Vaxon aşılama kullanılarak döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri, b) Barinoc aşılama kullanılarak döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri c) UltraSeed aşılama kullanılarak döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri	107
Çizelge 4.6 Parlatma sonrası numunelere ait imaj analiz sonuçları.....	109
Çizelge 4.7 Mikro yapı imaj analiz ölçüm sonuçları	109
Çizelge 4.8 Farklı kesit kalınlığına sahip numunelerin mikro yapıları ile ilgili sonuçlar	110

1. GİRİŞ

Döküm, ucuz, esnek, gelişme ve yeniliklere açık olması gibi birçok özelliğinin yanında sıvı metale istenen nihai şeklin verilmesine imkan veren bir imalat yöntemidir. Tek seferde basit ya da karmaşık şekilli parçalar, herhangi bir malzemeden ergitilerek üretilebildiği gibi, birkaç mm ile birkaç metre arasında parçaların boyutları ve birkaç gram ile birkaç ton arasında da ağırlıkları değişebilmektedir.

Kimyasal bileşiminde % 2'den fazla C bulunan demir malzemeler grubu dökme demir malzemeler olarak isimlendirilir. Genel olarak yaklaşık % (2–4) C ve % (1–3) Si içerirler. Bu malzemeler nihai şekil ve boyutlara ancak dökümle getirilebildiği için dökme demir olarak adlandırılırlar. Çok geniş aralıkta değişen mukavemet, korozyon direnci, kolay işlenebilme, sertlik, titreşimleri yutma ve aşınmaya dayanıklılık gibi özelliklerinin yanında ekonomik olması dökme demirlerin kullanım alanını genişletmiştir.

Dökme demirlerde katılaşma sırasında önemli bir miktarı ayrılan karbon mikro yapıda ayrı bir yapı elemanı olarak bulunur. Dökme demirin tipinin belirlenmesinde meydana getirdiği şekil ve biçimle belirleyici olan karbon; özellik bakımından da dökme demire etki etmiş olmaktadır. Soğuma hızı, üretim yöntemi ve devamındaki ısı işlem metotları gibi değişkenler dökme demirlerde değişik gurupların oluşumunu, malzemenin kimyasal kompozisyonu için belirleyici olmaktadır. Dökme demirlerin özelliklerinin meydana çıkmasında, mikro yapılarında ortaya çıkan fazların büyük etkisi vardır. Gri dökme demir; yüksek karbon ve silisyum oranlı dökme demirlerin yavaş soğumaları sırasında, sıvı demirdeki karbonun ayrılarak grafit lamelleri oluşturacak şekilde katılaştığı dökme demir türü olarak bilinmektedir.

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), az miktarda magnezyum, seryum gibi küreleştirici ilavelerin döküm aşamasına geçilmeden ergiyik demire katılması ve aşılama işlemi sonucu karbonun grafit küreler şeklinde olduğu dökme demir türüdür.

Adlarından da anlaşıldığı gibi yapısında dökülmüş durumda çeliğe benzer bir matris içinde dağılmış küre şekilli grafitler ihtiva eder. Grafitlerin şekli gri dökme demirden yapı açısından farklı kılmaktadır. Matris yapısı ve grafit şekli KGDD'in mekanik özelliklerinde etkilidir. KGDD, gri dökme demirin düşük ergime derecesi, iyi akışkanlık, iyi dökülebilme, mükemmel işlenebilme, iyi kesme mukavemeti gibi özellikleriyle yüksek mukavemet, tokluk, süneklik, sıcak işlenebilme ve sertleşebilme gibi çeliğin mühendislik yönünden olumlu yönlerini bir araya getiren üstün kaliteli mühendislik malzemeleridir.

KGDD'de nihai ürün yapısındaki küre oluşumunu; üretimdeki küreleştirme ve aşılama işlemleri ile bu işlemlerin oluşturduğu etkilerin birçok etkene bağlı olarak farklılık göstermesi direkt olarak etkilemektedir. Küresellik, KGDD'de metalurji kalitesinin önemli göstergesidir. Bu değerler kontrol altına alınarak mikro yapı ve çeşitli testler ile elde edilen nihai ürünün kalitesi hakkında bilgi edinilebilir.

Bu çalışmada, farklı modüle sahip dikdörtgen prizma şeklinde iş parçalarına GGG70L alaşımının dökümünde mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkileri araştırılmıştır. GGG70L ifadesi küresel grafitli dökme demirlerin DIN standartında gösterim şekli olup GGG küresel grafitli dökme demirin kısaltılmasıdır. 70 değeri alaşımın çekme mukavemetinin 700 MPa, L ise ısıl işleme uygun olduğunu göstermektedir. Mekanik test olarak malzemelere çekme deneyi ve sertlik deneyi işlemleri uygulanarak malzemenin normal koşullar altında kullanımı incelenmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında KGDD numunedeki grafit kürelerinin çapı, küresellik durumu ve kürelerin yüzde dağılımı ile ilgili incelemeler yapılmıştır.

Çalışmada kuma döküm, metalografi, çekme testi ve sertlik işlemleri, mikro yapı görüntüleme ve görüntü analizi teknikleri kullanılmıştır. Çalışma deneysel bir çalışma olup, bölüm 2'de konu ile ilgili kuramsal temeller üzerinde durulmuş, bölüm 3'de ise materyal ve metod açıklanmıştır. Bölüm 4'de araştırma bulguları literatürde bulunan benzer çalışma sonuçlarıyla beraber verilmiştir. Bölüm 5'de tez sonucunda elde edilen genel sonuçlar derlenerek özet şeklinde verilmiştir.

KGDD üretim sürecinde yapılan işlemler ve bu işlemlerin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkileri ile ilgili birçok çalışma çeşitli araştırmacılar tarafından literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmalar kısaca açıklanmıştır.

Javaid ve Davis (2002) çalışmasında ince cidarlı KGDD'lerin mekanik özelliklerini etkileyen mikro yapısal faktörleri araştırmıştır. Farklı kalınlıktaki numuneler üzerinde incelemeler yapmıştır. 1,5 mm kalınlığındaki numunede mm^2 'de ortalama 2500, 2 mm kalınlığındaki numunede 2200, 3 mm kalınlığındaki numunede ortalama 1300 küre sayısına ulaşmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kalınlığın artmasının ferrit oranının ve ortalama grafit çapının artmasına, kalınlığın azalmasında küre sayısının ve sementit miktarının artmasına neden olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Javaid ve Davis, 2002).

Doğan vd. (2003) çalışmasında basamak plaka dökümleri ve bireysel KGDD dökümler yapmıştır. Plaka dökümleri için 1,5 mm ile 6 mm kesit kalınlığında, dökümler için 2 mm ile 6 mm kesit kalınlığına sahip parçalar kullanılmıştır. İnce cidarlı KGDD'lerin mikro yapıları bir görüntü analizi yöntemiyle sayısal olarak değerlendirilmiştir. Kesit kalınlığına bağlı olarak matris yapısı ve grafit yapısı incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda kesit kalınlığı azaldıkça perlit fazı miktarı küre sayısı ve küreselliğin arttığı ve küre boyutunun azaldığı görülmüştür (Doğan vd. 2003).

Şen (2004) çalışmasında Al-Si alaşımları ile KGDD'ler için döküm mikro yapılarının farklı modüllü üç kaplı ısı analizini yapmıştır. Bu araştırmasında yeni sıfır eğrileri kullanarak soğuma analizi için gerekli gizli ısılar hesaplanmıştır. Modüle bağlı olarak tespit edilen gizli ısı ile mikro yapı arasında doğru bir orantı olduğu belirlenerek gizli ısının hesaplanarak mikro yapının önceden tahmini mümkün hale gelmiştir. Ayrıca çalışma sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır (Şen, 2004).

- Ötektik sıcaklık ve ötektik büyüme zamanı modül arttıkça artmaktadır.
- Modül azaldığında küre boyutu küçülürken küre sayısı artmaktadır.
- Gizli ısı değerleri modülün artmasıyla artmaktadır (Şen, 2004).

Bayraktar (2009) yapmış olduğu çalışmada savurma döküm yöntemi ile üretilen KGDD borular ve kuma döküm yöntemi ile üretilen KGDD'den imal edilmiş boru bağlantı parçalarının metalografik ve mekanik özelliklerini standartlar kapsamında incelemiştir. Mikro yapı çalışmaları ve mekanik deneyler kesit kalınlığı ve küre sayısına göre numunelerde detaylı bir biçimde yapılarak elde edilen sonuçlar literatürdeki bilgiler ile karşılaştırmıştır. Bu çalışmada ulaşılan sonuçları şöyle sıralayabiliriz.

- KGDD boruların bağlantı parçalarına göre aynı kesit kalınlığa sahip olduğu durumlarda küre sayısı açısından daha iyi olduğu görülmüştür.
- Aynı kesit kalınlığında olan parçalarda savurma dökümdeki küre sayısı kuma dökümden 6 – 8 kat daha fazla çıkmıştır.
- Mekanik özellikler bakımından boru mikro yapısında çok fazla (>1100 adet/mm²) küre olmasının, olumsuz sonuçları olduğu bulunmuştur (Bayraktar, 2009).

Bockus ve Zaldarys (2009) çalışmasında KGDD üretiminde grafit parametreleri üzerinde kesit kalınlığının ve bekletme süresinin nasıl etkiler yaptığı ile ilgili çalışmalar yapmıştır. İstenen bir yapıyı elde etmek için gerekli koşulları belirlemek amaçlanmıştır. 3 ile 50 mm arasında değişen kalınlıklarda plakalar dökülmüştür. Mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya şu sonuçlar çıkmıştır.

- Grafit boyutlarının 5, 10 ve 15 dk. sürelerinde sonuç değişmezken 20 ve 25 dk geçtikten sonra homojen olmayan grafit küreleri gözlemlenmiştir.
- Kesit boyutu arttıkça kürelerin çapının arttığı ve döküm üzerinde kesit kalınlığının önemli etkilere neden olduğu ortaya çıkmıştır.
- Küreselleştirme işleminden sonraki zamanın, % kopma uzama üzerinde önemli etkiye sahip olduğu görülmüştür (Bockus ve Zaldarys, 2009).

Ekinci (2009) çalışmasında KGDD'lerin aşılamayla bağlantılı olarak ferrit, perlit, grafit, sementit, ortalama grafit çapı, küre sayısı, sertlik, darbe enerjisi gibi farklı özelliklerinin ne türlü değişikliklere uğradığını deneylerle ortaya koymuştur. Araştırmasında aşılama için kullanılan farklı bileşenlerin KGDD'lerin mikro yapı ve mekanik özelliklerine etkilerini incelemiştir. Si-Al-Ca, Si-Al-Ca-Ba, Si Al-Ca-Ce bileşimine sahip üç aşılama için kullanılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- İnce cidarlı dökümlerde, en çok küreselleşmeyi destekleyen aşılama için Ba elementi içeren aşılama olmuştur.
- Kesit kalınlığı arttıkça küre çapı ve darbe direnci artmış, küre sayısı ve sertlik düşmüştür.
- Artan küre sayısı ile darbe direnci azaldığı, küreselleşme oranının arttığı görülmüştür (Ekinci, 2009).

Arda (2010) çalışmasında üç farklı KGDD alaşımını (GGG40, GGG60 ve GGG80) üç farklı modül oluşturacak şekilde 100 x 100 x 100 mm, 156 x 156 x 156 mm ve 210 x 210 x 210 mm ölçülerinde küpler halinde kum kalıplara dökümünü gerçekleştirmiştir. Böylece alaşımın çeşidinin ve modülün ölçülerinin hacimsel çekme ve genleşme üzerine etkilerini araştırmıştır. Araştırmasının sonucundaki sonuçları aşağıda sıralanmıştır.

- Küp boyutunun büyümesinin geometrik modülün büyümesine neden olduğu ve modülün büyümesinde döküm numunelerde daha fazla genleşmeye yol açtığı boyutsal ölçümlerdeki sonuçlardan anlaşılmıştır.
- Farklı KGDD alaşımlarının kullanıldığı deneyler sonucunda karbon eşdeğerleri yaklaşık olarak aynı olduğu için alaşımın farklı olması dökme demirin hacimsel değişim davranışı açısından önemli bir etki göstermemiştir.
- KGDD'lerde besleyici boğaz ölçülerinin önemli bir yeri olduğu ve olması gerekenden fazla büyük besleyici boğaz boyutunun bağlantı noktalarında çekinti boşluğu oluşturduğunu göstermiştir.

- KGDD'lerin modellenmesinde döküm simülasyon programları kullanılmak istendiğinde olumlu sonuçlar alınacağı anlaşılmıştır (Arda, 2010).

Yıldız vd. (2013) çalışmasında piyasada ticari olarak üretim yapan bir dökümhanenin kendi üretim yöntemine uygun kalite ve maliyet analizlerine uygun aşılama ve küreleştirici eleman seçimini amaçlamıştır. Bunun için farklı küreleştirici ve aşılama elementler katılarak yapılan dökümlerden sertlik ve mikro yapı incelemeleri yapılarak en ideal küreleştirici ve aşılama seçimi optimizasyonu yapılmıştır. Çalışmada kullanılan teknikler; metal ergitme, kuma döküm, metalografi, optik mikroskop, sertlik, mikro yapı görüntüleme ve görüntü analizleridir. Yapılan çalışmalar sonucu elde edilen sonuçlar şu şekildedir.

- Sertlik değerleri 160-200 HBN arasında değişiklik göstermiş olup, GGG40 standardı malzeme için uygun değerlere sahip olduğu görülmüştür.
- Mikro yapı numunelerinin dağlama sonrası çekilen fotoğraflarının imaj analiz yazılımında işlenmesi sonucu yapıda ortalama % 50 perlit, % 40 ferrit ve % 10 küresel grafit olduğu belirlenmiş ve bu faz yüzdelerinin üretilmek istenen malzeme için uygun olduğu anlaşılmıştır.
- En uygun sonuçlar pahalı küreleştirici ve aşılama kullanılan dökümlerden elde edilmiştir. Ancak diğer dökümlerden standart değerlerde malzeme elde edilmiş olması ve maliyet/kalite analizi yapıldığında ekonomik malzemeler kullanımının daha uygun olduğuna karar verilmiştir. (Yıldız vd. 2013).

Güzel vd. (2014) çalışmasında küresel grafitli döküm demirlerde kesit kalınlığının mikro yapı ve sertlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada belirlenen kimyasal pozisyona göre KGDD küreselleştirici ve aşılama ilavesiyle dökülmüştür. Farklı kesit kalınlıklarına sahip numuneler üzerinde sertlik ve mikro yapısı ile ilgili incelemeler yapılmıştır. Görüntü analiz programıyla sayısal değerler belirlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan sonuçlar şu şekildedir.

- Katılama oranı, kesit kalınlığı arttıkça azalmıştır.
- Kesit kalınlığının artmasıyla sertlik değerleri azalmıştır.

- Kesit kalınlığının artmasıyla küre sayısı ve sertliğin düştüğü, ancak küre çapı ve ferrit yüzdesinin arttığı görülmüştür.
- KGDD dökümde yüksek mekanik özellikleri sağlayabilmek için kesit kalınlığı çok önemli bir yere sahiptir.
- İstenilen mikro yapı ve sertlik değerlerine ulaşmak için kimyasal bileşim, küre sayıları, kesit kalınlığı önemli bir yer tutar.

Farklı kesit kalınlığına sahip numunelerin mikro yapıları ve sertlik değerleri ile ilgili değerler Çizelge 1.1’de gösterilmiştir (Güzel vd. 2014).

Çizelge 1.1 Farklı kesit kalınlıklarına sahip numunelerin mikro yapı ve sertlik değerleri (Güzel vd. 2014)

Numuneler	Kesit Kalınlığı (mm)	Küre Sayısı (Grafit Küreleri/mm ²)	Ferrit (%)	Sertlik (HB)
1	12,7	250	45	198
2	25,4	228	48	177
3	38,1	192	57	170
4	50,8	166	63	158
5	63,5	159	71	148
6	76,2	148	73	140

Yalçın (2014) çalışmasında, EN-GJS-XSiMo 4 0,5 (GGG SiMo 4 0,5) ve EN-GJS-XSiMo 4 1 (GGG SiMo 4 1) kalitesinde SiMo Küresel dökme demirlerden; 2 mm, 4 mm, 6 mm kalınlığında ince kesitli plaka numuneleri ile 15 mm, 30 mm, 45 mm kalınlığında kalın kesitli plaka numunelerinin dökümü yaparak kesit kalınlığındaki farkların mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda ince kesitten kalın kesite gidildiğinde grafit boyunun büyüdüğü, buna bağlı olarak da yine ince kesitten kalın kesite gidildiğinde küreselleşme yüzdesinin düştüğü ve küre sayısının azaldığı gözlemlenmiştir. Genel olarak ısıtılma işleme giren parçaların sertlik değerlerine bakıldığında, kesit kalınlığı arttıkça sertlik değerlerinin de önemli ölçüde olmasa da arttığı görülmüştür. Tüm parçalardan alınan mikro yapı numuneleri incelendiğinde, ısıtılma işleme giren ve girmeyen tüm parçaların

yapılarının ferritik olduğu, grafit formunun ise ideal küre şeklinde olduğu gözlemlenmiştir (Yalçın, 2014).

Yıldız (2014) çalışmasında endüstriyel koşullarda dökümü gerçekleştirilmiş olana küresel ve lamel grafitli dökme demirlerin optik mikroskop ve imaj analiz yöntemleri kullanarak mikro yapısal özelliklerin incelenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda metalografik numune hazırlama, dağlama, optik mikroskop ve imaj analiz teknikleri ve renkli metalografi teknikleri uygulanmıştır. Çalışmada Anadolu Döküm firmasında üretilen farklı mikro yapıdaki KGDD'ler için olan numunelerin iç yapı analizlerini incelemek için bilgisayar destekli imaj analiz yazılımları kullanılmıştır. Numunelerin mikro yapı özellikleri temel alınarak üretimlerinin dökülen standarda uygunluğu test edilmiştir. Numunelere parlatma sonrası ve dağlama sonrası mikro yapı incelemeleri uygulanmıştır. Yapılan çalışmalar ışığında şu sonuçlara varılmıştır.

- Mikro yapı incelemeleri sonucunda dökümü yapılan numunelerin standart değerlerde ve üretimlerinin uygun olduğu görülmüştür.
- Parlatma sonrası yapılan bir inceleme döküm iç yapısında bulunan küresel grafitlerin şeklini, küreselliğini ve yüzde faz dağılımını tespit edebilmek için daha elverişlidir. İmaj analiz programı tarafından mm^2 başına düşen küre sayısının standartlar için belirlenen aralıkta olduğu görülmüştür.
- Dağlama sonrası çekilen fotoğraflarının imaj analiz programıyla işlenmesi sonucu mikro yapı numunelerinin döküm yapısında ortalama % 50 perlit, % 40 ferrit ve % 10 küresel grafit olduğu ve bununda üretilmesi istenen malzemeye uygun olduğu tespit edilmiştir.
- Farklı küreleştirici ve aşılama kullanılarak yapılan dökümler sonucunda uygun sonuçlara pahalı küreleştirici ve aşılama kullanılan dökümlerden ulaşılmıştır. Ancak standart değerlerde malzemelerin diğer dökümlerden elde edilebilmiş olması ve maliyet/kalite analizi yapıldığında ekonomik malzeme kullanımının getirdiği maddi fayda düşünülerek ekonomik malzeme kullanımının daha uygun bir karar olduğu kanısına varılmıştır.

- KGDD'lerin özelliklerinin üretim süreçlerindeki her parametreye doğrudan bağlı olup, döküm paçalarından numuneler alınarak mikro yapılarının incelenmesi metoduyla malzeme özellikleri anlaşılabilir. (Yıldız, 2014).

Alabbasian vd. (2016) çalışmasında Ni dirençli KGDD'in mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerinde aşılama ve modül yapısının nasıl etkileri olduğunu araştırmıştır. Bu amaçla, 2, 5, 8, 10, 15 ve 20 mm kalınlığındaki numunelerin, grafit küre sayısı, grafit küreselliği ve yapıdaki grafit küre büyüklüğü ve karbür içeriği gibi mikro yapısal özelliklerini belirlemek amacıyla EDS ile donatılmış elektron mikroskobu ile incelemeler yapıldı. Sertlik ve çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Metalografik analiz sonucunda matrisin östenit ve $FeNi_3$ 'ün ince parçacıklarından meydana geldiği görülmüştür.
- Tane sınırı bölgelerindeki bazı çökeltilerin Cr bakımından zengin karbür fazı olduğu anlaşılmıştır.
- Kalınlığın artırılması karbür içeriğinin azalmasına, sertlik değerinin düşmesine sebebiyet vermiştir.
- Aşılama işlemi grafit küreselliğini ve küre sayısının artmasına, karbür oluşum eğiliminin ise azalması çekme dayanımı özelliklerinin artması sağlanmıştır. (Alabbasian vd. 2016).

Kabnure vd. (2017) çalışmasında otomobil çark dökümü üzerinde araştırma yapmıştır. Küçük bölümlerin merkezi göbeğe bağlanmadığı kısımlarda değişken kesit kalınlığı bulunduğu için otomobil çark seçilmiştir. Dökümlerin katılma simülasyonlarının analizi yapılmıştır. Döküm sonucunda elde edilen numuneler farklı kesit kalınlıkları için mikro yapı ve sertlik bakımından incelenmiştir. Mikro yapı ve sertliğin çoklu tepki optimizasyonu belirlemek amacıyla kombine taguchi ve gri ilişkisel analiz (GRA) kullanılmıştır. Belirlenen farklı kesit kalınlığındaki 6 kritik bölgede soğutma oranı için yapılan ölçümler sonucunda ortaya çıkan sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Kesit kalınlığındaki azalış ve soğutma hızındaki artışla % perlitin arttığı görülmüştür.
- Kesit kalınlığındaki azalış ve soğutma hızındaki artışla % ferritin arttığı belirlenmiştir.
- Kesit kalınlığındaki azalış ve soğutma hızındaki artışla sertliğin arttığı anlaşılmıştır (Kabnure vd. 2017).

Karadeniz vd. (2017) çalışmasında piyasada en geniş kullanım alanına sahip 3 farklı aşılama ve 2 çeşit aşılama farklı oranlarda katılarak GGG-60 malzeme ile döküm deneyleri yapmıştır. Bu şekilde farklı aşılama türü ve miktarlarının kullanılmasına bağlı olarak ortaya çıkan malzemenin iç yapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Optik mikroskop ile içyapı değerlendirmeleri, çekme dayanımı ve sertlik değerleri ile mekanik özellikler ortaya konulmuştur. Üç farklı aşılama elementin farklı kombinasyonlarıyla KGDD üretimindeki uygunluğunun kontrolü için yapılan çalışmadan çıkan sonuçları şöyle sıralayabiliriz.

- Tane boyutu büyük olan aşılama kullanılan numunelere kıyasla tane boyutu daha küçük aşılama kullanılan numunelerin daha iyi mekanik özellikler gösterdiği görülmüştür.
- Aşılama ilavesiyle yapılan dökümler sonucu elde edilen numunelerden parlatma işlemi sonrası yapılan mikro yapı incelemelerinde küre çapının ortalama 15 µm civarında ve mm² başına düşen küre sayısının standartlarda olması gereken değerler içinde olduğu anlaşılmıştır.
- Aşılama ilavesi olmadan yapılan dökümlerin KGDD standartlarına uygun olmadığı anlaşılmıştır.
- Döküm numunelerinde aşılama ilavesine bağlı olarak sertlik oranlarında azalma tespit edilmiştir.
- Aşılama çeşidi ve miktarına bağlı olarak yapılan testlere göre % 0,2 oranında aşılama ilave edilen döküm numunelerin % 0,5 aşılama ilave edilenlere göre

çekme testi sonuçları düşük olduğu gözlenmiştir. Daha küçük ebatlı aşılama ilave edildiğinde mekanik değerlerin artış olduğu görülmüştür.

- Mekanik testlerin de aşılama ebat ve ilave miktarının döküm numuneleri üzerinde yapılan deneylerde etkili olduğu tespit edilmiştir.
- Optimum sonuçlar tane boyutu 0,2-3,0 mm arasında değişen ve % 0,5 oranda aşılama ilavesi sonucu olduğu görülmüştür (Karadeniz vd. 2017).

Kasvayee vd. (2017) çalışmasında, KGDD dökümün mekanik özelliklerine katılma koşullarının ve silisyum içeriğinin etkilerini araştırmış ve ampirik modeller ile gerilme davranışını tahmin etmeye çalışmıştır. % 2.36 ve % 3.71 silikon muhtevasına sahip olan GJS-500-7 ve GJS-500-14'ün iki sünük demir kullanılmıştır. Farklı kalınlıklarda altı plaka üzerinde çalışılmıştır. Mikro yapı analizi, gerilme ve sertlik testleri dökme malzeme üzerinde uygulanmıştır. Ludwigson denklemi ile gerilme davranışı hesaplanmıştır. Gerilme kırılma yüzeyleri, gözeneklilik oranını ölçmek için analiz edildi. Modeller, mikro yapı temelli gerilme davranışının öngörülmesi için bir döküm işlemi simülasyonuna işlenmiştir. Yapılan çalışmalardan sonra şu sonuçlara ulaşılmıştır.

- Brinell sertlik sonuçlarına göre GJS-500-7'de 7 ve 15 mm plakalarda en yüksek ortalama sertlikler ortaya çıkmıştır. GJS-500-14 kalite için plaka kalınlığının değişmesi anlamlı bir sertlik farkına neden olmamıştır.
- Yüksek silisyum içeren GJS-500-14 için, GJS-500-7'e göre daha yüksek grafit parçacık sayısı ve küre sayımı olduğu görülmüştür.
- Türetilmiş modellerin döküm işlemi simülasyonunda uygulanması, döküm simülasyonu, mikro yapı ve gerilme davranışı açısından büyük oranda doğru olarak bulunmuştur (Kasvayee vd. 2017).

Megahed vd. (2018) çalışmasında, kompakt grafitli dökme demirin (CGI) mekanik özellikleri ve mikro yapısına bekleme süresi, kalınlık ve tavlama ısıl işleminin etkisini incelemiştir. GGG70'in bir orta frekans indüksiyon ocağında baz metal olarak kullanarak CGI örnekleri döküm için üretilmiştir. Kalınlık 20 mm'den 5

mm'ye düşürüldüğünde soğutma oranının artmasına bağlı olarak dendritik yapının eğiliminin arttığı görülmüştür. Yapılan çalışmalardan ortaya çıkan sonuçlar şu şekildedir.

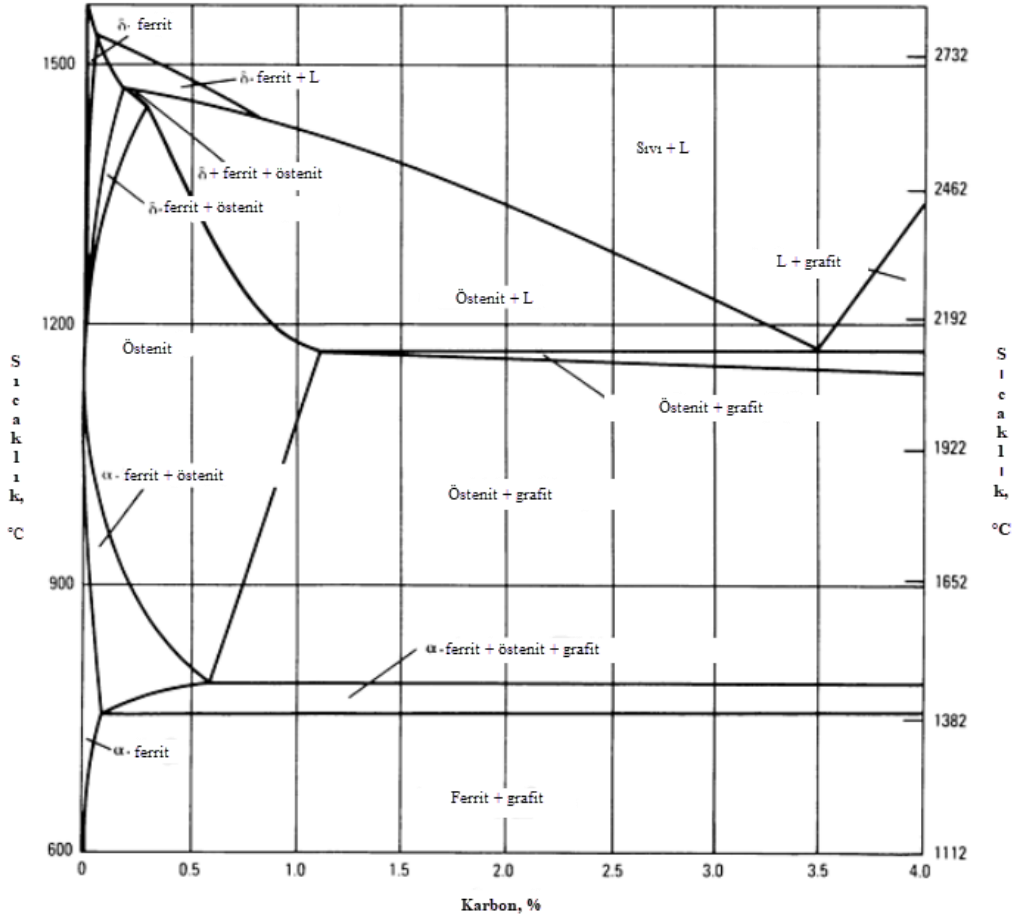
- Döküm süresinin 10 dakikadan 17 dakikaya yükseltilmesi, Mg içeriğinin % 0,031'den % 0,021'e düşürülmesiyle neticelenir. Bu durum küre sayısının yaklaşık % 50 oranında azalmasına, böylece mekanik özelliklerin etkilenmesine neden olmuştur.
- Perlit yüzdesinin dökme süresine, kalınlığına bağlı olduğu ve kalınlığın düşmesi ve dökülme süresinin ksalmasının soğuma hızını arttırdığı görülmüştür. Bu durum perlitik matris içinde dendritik yapının oluşmasına neden olmuştur.
- Tavlanmış numunelerin döküm numunelerine göre daha düşük çekme dayanıma, (döküm numunelerinin yaklaşık % (60-70)'i) ve daha düşük sertliğe (% (55-60) oranında) sahip olduğu anlaşılmıştır.
- Kesit kalınlığı arttıkça bütün numunelerde, küresellik yüzdesinin azaldığı tespit edilmiştir (Megahed vd. 2018).

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 Dökme Demirler

Demir cevherinin indirgenmesi ve ergitilmesi biçimiyle elde edilen pikin fırınlardan yeniden geçirilip bazı metalürjik işlemlere tabi tutulduktan sonra bir kalıp içine boşaltılıp ve kalıp boşluğu şeklini alarak katılaşması ile ortaya çıkan malzemeye dökme demir denir (ASM, 1988). Çeşitlerinin tümü iyi dökülebilirlik ve iyi mekanik özellikleri bünyesinde barındırır. Bu özelliklerin başlıcalarını sıralayacak olursak; düşük ergime sıcaklığına sahip olma (1150–1300 °C), ötektik bileşime yakın iyi akışkanlık özelliği gösterme, yüksek döküm ve kalıp şeklini alabilme yeteneğine sahip olma, kolay ve ucuz ergitme işlemlerine sahip olma, geniş aralıkta kimyasal bileşim olması, talaşlı imalat yöntemiyle iyi işlenebilme, yüksek titreşim söndürme kabiliyetinin olması, aşınma ve korozyona karşı dayanıklılık göstermesidir (Smoljan vd. 2002; Yılmaz, 2003; Tong, 2011).

Fe-C diyagramında dökme demirler % 2'den % 6,67'ye kadar dökme demir olarak gösterilir. Fe-C diyagramı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Fakat pratikte yüksek karbon oranı kırılma hızına sebebiyet verdiği, % 4,4'e kadar karbon ve % 3,5'a kadar silisyum içeren bir Fe-C-Si alaşımı olarak bilinir (ASM, 2004). Karbon katılaşma sırasında büyük miktarı ayrılarak dökme demirin yapısında grafit olarak görülüp farklı şekil, büyüklük ve dağılımı dökme demirin tipini ve özelliklerini belirlemektedir (Türen, 1998). Albayrak (2001) Dökme demirlerin otomotiv endüstrisinde, ziraat makinalarında, makine sanayinde, kimya sanayinde, inşaat sanayinde madencilik ve metalürji sanayinde, ulaştırma sanayinde, güç sektöründe, denizcilikte, takım tezgâhlarında ve ev eşyası gibi geniş kullanım alanlarının olması, en önemli avantajlarından biridir (Aytaçoğlu, 2012).



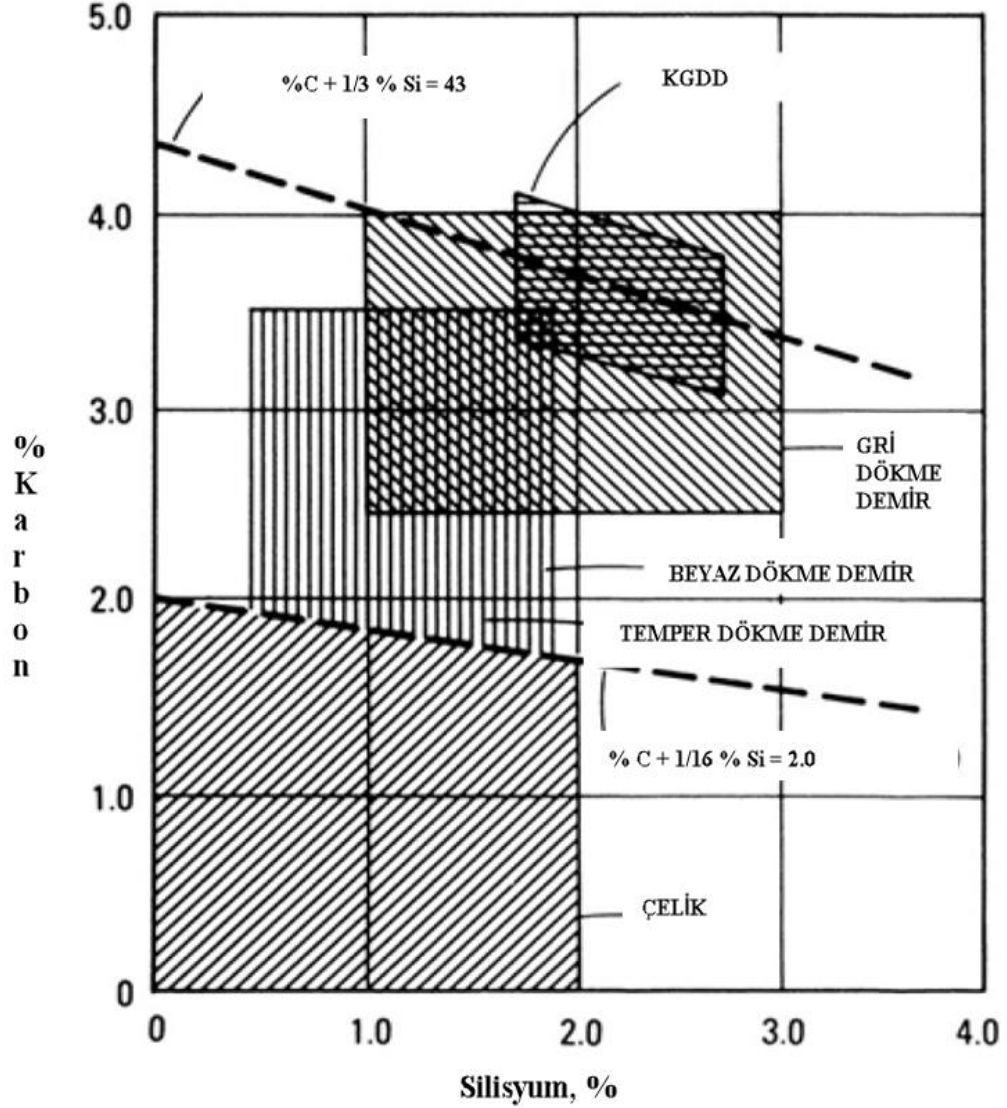
Şekil 2.1 Fe-C diyagramının gösterilişi (Laird, 1993)

Karbon, silisyum ve fosfor gibi alaşım elementlerinin miktarları dökme demirin sıvılaşıma ve katılaşıma sıcaklığı ve ötektik bileşimi gibi parametreleri etkileyerek dökme demirin mekanik özelliklerinde değişmesine yol açmaktadır. Bu etkinin derecesi karbon eş değeri (CE) olarak tanımlanan parametre ile hesaplanabilmektedir. Denklem (2.1)'de bu hesaplama gösterilmektedir (ASM,1988).

$$CE = \% C + \frac{\% Si + \% P}{3} \quad (ASM, 1988). \quad (2.1)$$

Bu formülü kullanarak alaşımın ötektik, ötektik altı veya ötektik üstü formda olduğu belirlenir. Karbon eş değeri % 4,25 ise dökümün ötektik, % 4,25'ten az ise dökümün ötektik altı, % 4,25'ten fazla ise dökümün ötektik üstü bileşime sahip olduğu anlaşılır (Ateş, 2013).

Dökme demirler için C ve Si en önemli iki alaşım elementidir. Dökme demirlerde tavsiye edilen sınır şartlar ile bileşim aralıkları Şekil 2.2’de verilmiştir (ASM, 1990).



Şekil 2.2 Dökme demir alaşımlarında karbon ve silisyum içerik aralıkları (ASM, 1990).

2.1.1 Dökme demirlerde fazlar

Mikro yapıya duyarlı örnek teşkil eden dökme demirler, ayrı tipte yapısal bileşiklere sahip dökme demirlerin değişik biçimli grafitlerin oluşumuna sebep olurlar. En önemli yapı bileşen ve türleri maddeler halinde aşağıda verilmektedir (ASM, 1988).

- Grafit

Karbon, dökme demirlerde serbest veya bileşik halde bulunabilmektedir. Katılaşmayla beraber gri dökme demirde lamel şeklinde, beyaz dökme demirin ısı işlemden geçirilmesiyle rozet şeklinde, dökme demirde az miktarda magnezyum ve seryum ilavesiyle küre şeklinde grafitler elde edilebilir. Gri dökme demirin lamel grafitli yapıya sahip olması süneklik özelliğinin olmamasına neden olurken, temper dökme demirin yapısındaki rozet şekilli lameller ve KGDD'in yapısındaki küre şekilli grafitler lameller kadar sünekliğe etki etmez (ASM, 1988).

- Sementit

Dökme demirlerde demir tamamen ya da kısmen sementit halde bulunabilir. Beyaz ve çil uygulanmış dökme demirlerin katılaşması esnasında oluşan serbest veya kitle halindeki sementit, çok sert ve kırılgan olup bu özelliğini ana bileşenini oluşturduğu dökme demir tiplerine de yansıtır. Karbon dökme demir bileşimindeki yüzdesinin 15 katı kadar sementit ortaya çıkarabilir. Böyle bir durum malzemenin çok sert ve kırılgan olmasına neden olur (ASM, 1988).

- Ferrit

Dökme demirlerde kendisinin sertleşmesini ve mukavemetinin artmasını sağlayan silisyumu içeren faz olan ferrit, oda sıcaklığında hacim merkezli kübik yapıdaki demir ile az miktarda karbonun oluşturduğu orta derecede mukavemetli ve nispeten sünek bir katı eriyik olarak açıklanabilir. Dökme demirlerde yapısal açıdan ya serbest halde ya da perlit içinde ferrit oluşur. Dökme demir karbonunun serbest olarak oluşabildiği ve bileşiminde grafitleştiricilerin olduğu bir yapıda soğuma hızı da yavaş ise serbest ferritin ortaya çıkma şansı fazladır (ASM, 1988).

- Perlit

Yan yana sıralı halde ferrit ve sementit tabakalarından oluşmuş iki faz karışımıdır. Oluşan perlitin miktarı grafitleşme mertebesiyle alakalıdır. Perlitik gri dökme demir yaklaşık olarak % (0,5–0,9) birleşik karbon ihtiva eder. Birleşik karbonun daha düşük yüzdede olması ise çoğunlukla serbest ferritin bulunduğu anlamına gelir (ASM, 1988).

- Steadit

Özellikle gri dökme demirde bulunan fosfor düşük ergime dereceli (954-982 °C) bir demir-demir fosfür ötektiği olan “Steadit” şeklinde olup, steadit % 10,2 fosfor içerir. Sementit gibi çok sert ve kırılıgandır (Odabaşı, 2004).

- Östenit

Kübik yüzey merkezli demir ile karbonun meydana getirdiği katılaşma esnasında meydana gelen ve yavaş soğuma ile perlit, ferrit veya ikisinin karışımına dönüşen bir katı eriyik olarak açıklanabilir. Dökme demirlerde kükürtten dolayı manganez ve demir sülfürler, silikatlar gibi metalik olmayan inklüzyonlar da bulunabilir. Demir sülfür, düşük ergime dereceli, faz sınırlarında toplanan gevreklik veren zararlı bir empüritedir. Matris içinde çok kenarlı geometrik şekiller halinde bulunan manganez sülfür plastiktir ve gevreklik vermez (Odabaşı, 2004).

Özet olarak dökme demirlerde birçok kimyasal bileşim bulunmakla birlikte mikro yapıyı ve dolayısıyla özellikleri etkileme noktasında tek başına bir etken değildir. Soğuma hızları, katılaşma mekanizması, dökümhane uygulamasındaki değişkenler diğer önemli parametrelerdir (ASM, 1988).

2.1.2 Dökme demir çeşitleri

- **Gri dökme demir**

Katılaşmadan sonra içerdiği C’un büyük kısmı grafit lamelleri halinde bulunacak şekilde bir bileşime sahip bu dökme demirin kırık yüzeyi isli gri renktedir. Lamel grafitli dökme demirlerin, yalnız grafit şekli göz önüne alındığında 5 bölüme ayrılır. Bunlar; A tipi gri dökme demir, B tipi gri dökme demir, C tipi gri dökme demir, D tipi gri dökme demir, E tipi gri dökme demir’dir (ASM, 1990).

A tipi gri dökme demir: En önemli özelliği yapısındaki lamel grafitlerin düzenli bir büyüklüğe sahip olup, düzgün dağılım göstermesi olan A tipi gri dökme demirler; gri dökme demirlerin tipik grafit şekli olup ferrit veya perlit ile beraber bulunmaktadır (Şekil 2.3). Yüksek miktarlarda çekirdeklenme sağlanabildiğinde düşük miktarlarda bir alt soğuma oluşacaktır. Böylece büyüme hızları düşük grafit hücreleri oluşur;

yani A tipi grafitler oluşur. Katılma süresinin uzun tutulması, katılmanın çok uzun bir soğuma aralığında olması ve hatta teşvik edilmesi gerekir. Grafit boyları ve kalınlıklarını artırılabilmek için katılma süresinin uzun tutulması, katılmanın çok uzun bir soğuma aralığında olması gerekir. A tipi grafitleşmeyi sadece ötektik katılma aralığında görebiliriz (ASM, 1990).



Şekil 2.3 ASTM A 247' ye göre A-tipi grafit şekli (ASM, 1988)

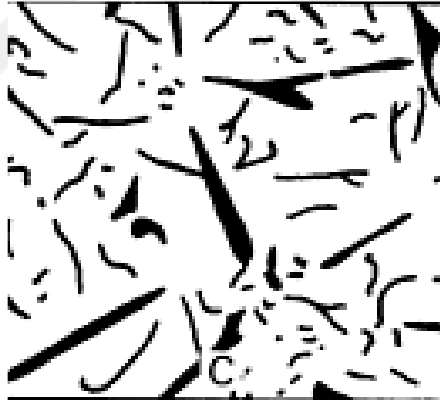
B tipi gri dökme demir: Grafitler mikro yapıda grafit yumakları (rozet) şeklindeki olup, gelişi güzel dağılmıştır (Şekil 2.4). İlave element ve ısıl işlem gibi hamlelerle çekme ve basma özellikleri yükseltilebilir. İşlenebilme özellikleri çok iyi olup, lamel boyutları büyüdükçe malzeme yumuşaklık kazanır (ASM, 1990).



Şekil 2.4 ASTM A 247' ye göre B-tipi grafit şekli (ASM, 1988)

C tipi gri dökme demir: Ötektik üstü katılaşma sonucu oluşan grafit yapısı olan C tipi gri dökme demir üretmek için çekirdek sayısının üst düzeyde olması, kristalleşme hızının düşük seviyelerde tutulması, büyüme hızının yüksek olması ve malzemenin soğuma hızının yüksek seviyelerde tutulması gibi şartların sağlanması gerekmektedir.

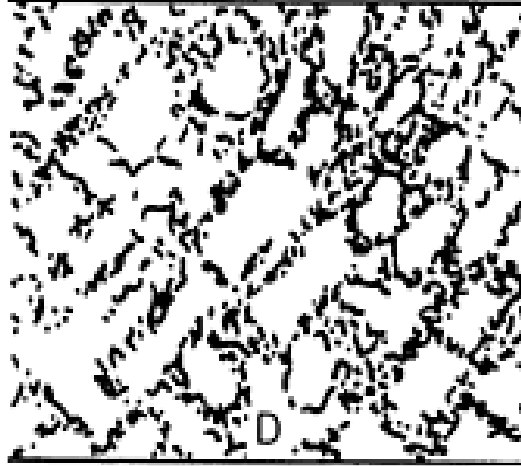
Katılaşma süresi, katılaşma başlamasından çok kısa bir süre içerisinde gerçekleşir. Cr, Mn gibi bazı alaşım elementleri C tipi grafit yapısını teşvik edici özellik taşımakta olup, katılaşma süreci başlamasından çok kısa bir süre içerisinde gerçekleşir. C tipi grafit yapısına sahip dökme demirler termal şoka dayanıklıdır, fakat düşük mukavemet ve işlendikten sonra kaba yüzey ortaya çıkarır. Yapısındaki çok iri grafitler çekme mukavemetinin düşmesine ve işlenmiş yüzeylerde görünüm bozukluklarının olmasına neden olur. Sistemin elastik modülü düşüktür (Şekil 2.5) (ASM, 1990).



Şekil 2.5 ASTM A 247' ye göre C-tipi grafit şekli (ASM, 1988)

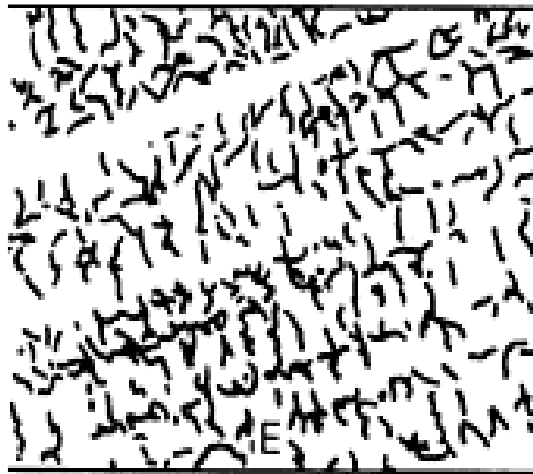
D tipi gri dökme demir: Yüksek silisyum içeren dökme demirlerin hızlı soğuma şartlarında rastgele yönlenmiş küçük boyutlu grafitler olup, hiperötektik alaşımlarda görülmektedir. Hücresel şekilde olan bu tip grafitlerin oluşumuna katılaşma esnasında aşırı soğumanın sebep olduğu düşünülmekte olup, bu ince grafit tipi genellikle matris perlitik olsa bile ferrit ile birlikte bulunmaktadır (Şekil 2.6). Dikine kesitlerde A veya B tipi grafitlerle beraber bulunan bu tip çoğunlukla soğuma hızının hızlı olduğu ince kesitlerde bulunmaktadır. Malzemenin mukavemetinde bir artış meydana getirmeyen, iyi işlenebilme özelliği kazandıran bu tip; genellikle soğuma hızının hızlı olduğu ince kesitlerde mevcut olup, dikine kesitlerde A veya B tipi

grafitlerle beraber bulunur. Karbür ve perlit oluşumunda Ti, Al gibi bazı alaşım elementlerinin etkisi olmaktadır (ASM, 1990).



Şekil 2.6 ASTM A 247' ye göre D-tipi grafit şekli (ASM, 1988)

E tipi gri dökme demir: Ötektik altı katılaşmada karşılaşılan bu grafit yapısı hipoötektik bileşimlerin katılaşması sırasında malzemenin mukavemetinde A tipi grafitlere kıyasla daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Düşük karbonlu dökme demirlerde tercihli yönlenme durumu gösteren ve dentritler arası yapı arz eden grafitlerdir (Şekil 2.7). Birincil östenit miktarının yüksek olması E tipi grafitin meydana gelmesinde önemli bir yer tutar. Sertlik, çekme mukavemeti, basma mukavemeti açısından yüksek sayılabilecek olmakla birlikte çok yüksek döküm sıcaklıklarında görülmektedirler (ASM, 1990).



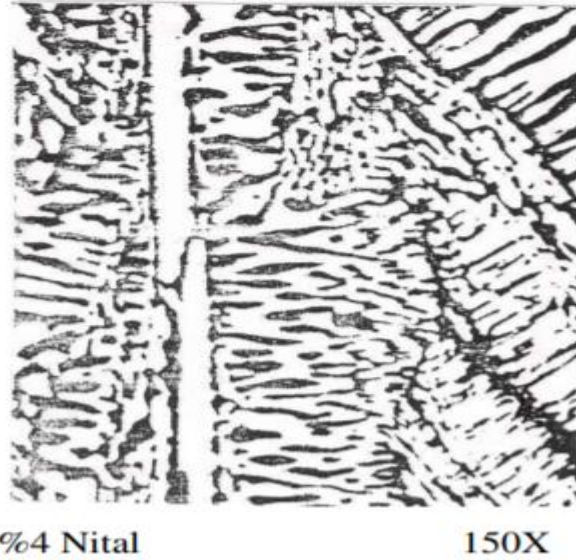
Şekil 2.7 ASTM A 247' ye göre E-tipi grafit şekli (ASM, 1988)

- **Beyaz dökme demir**

Karbonun tamamı sementit olarak bileşik halinde bulunan ve katılaşma sıcaklığında hızlı soğuma yoluyla elde edilen beyaz dökme demirler; sementitin sert ve gevrek bir bileşik oluşundan dolayı aşınmaya karşı dirençlidir (Toptaş, 2009).

Mikro yapısı sementit ve perlitten oluşan beyaz dökme demirler, ötektik altı alaşımlardır (Şekil 2.8). Gevrek ve işlenebilmeleri zor olan beyaz dökme demirlerin düşük darbe dirençleri ve işlenebilme kabiliyetlerinin kötü olmasından dolayı uygulama alanları dardır. Bu nedenle süneklik gerektirmeyen aşınmaya dirençli çimento karıştırıcıların astarları, değirmen bilyeleri, tel çekme kalıpları ve ekstrüzyon nozulları gibi alanlarda kullanılır (Toptaş, 2009).

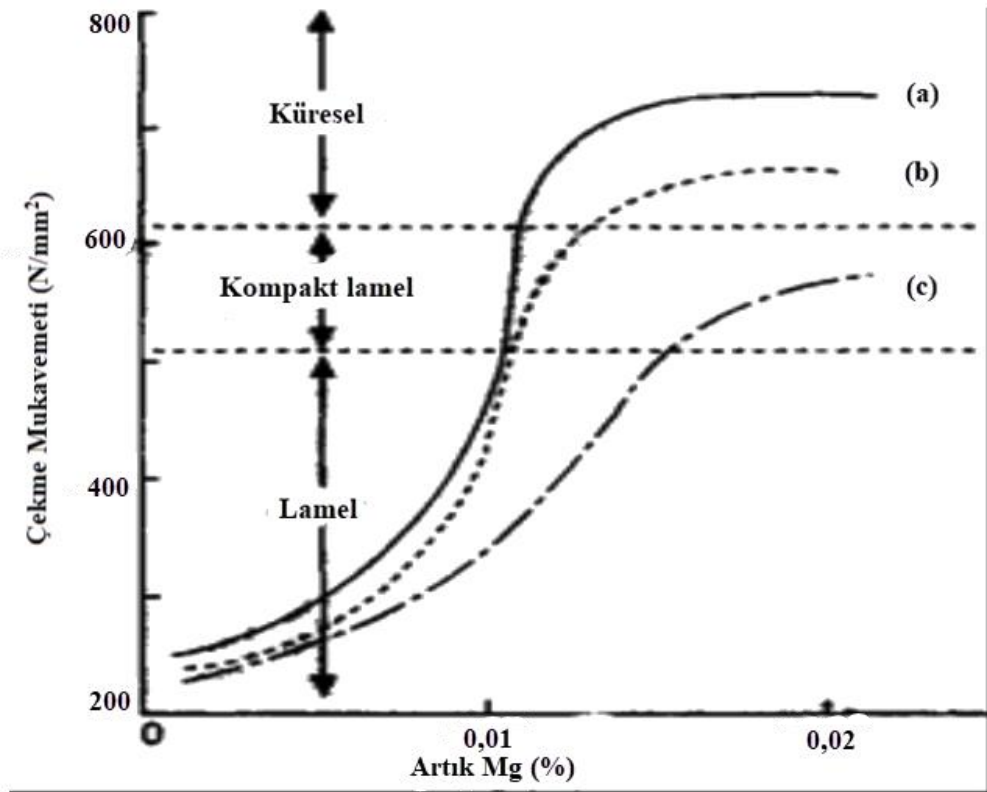
Ayrıca temper dökme demir üretmek için yüksek miktarlarda beyaz dökme demir kullanarak temper dökme demir üretilmektedir. Alaşımsız beyaz dökme demirin mekanik özellikleri; çekme mukavemeti: 140-495 MPa, basma mukavemeti: 1410-1760 MPa elastisite modülü: $1,4 \times 10^6$ - $1,76 \times 10^6$ MPa, sertlik: 375-600 HB aralıklarında değişmektedir (Toptaş, 2009).



Şekil 2.8 % 4 Nital ile dağlanmış 150x büyütmede beyaz dökme demir mikro yapısının gösterilişi (Cavcar, 1996)

- **Kompakt (vermiküler) grafitli dökme demirler**

Az miktarda Mg'un sıvı Fe-C-Si alaşımına eklenmesiyle lamel-kompakt-küresel grafit geçişi sağlanmış olur. Tamamıyla kompakt grafitli yapıyı oluşturmak pek mümkün değildir. Mg, Ce, Ti üçlüsüyle oldukça geniş bileşim aralığında kompakt bir yapı elde etme imkanı olabilir (Şekil 2.9). Tam kompakt yapı oluşturarak için yalnızca Mg katkısı yeterli değildir. Mg-Ce-Ti alaşımı kalıp veya potada eklenerek lamel veya küresel grafit yapmaya elverişli dökme demirlere uygulanabilmektedir. Magnezyum ve seryum, kükürtle rahatça tepkime verebilmektedir. Sıvı alaşımdaki kükürt yüzdesi düşük cüruf oluşumu ve ekonomik açılardan dolayı 0,035'ten az olmalıdır. (Yıldız, 2014).



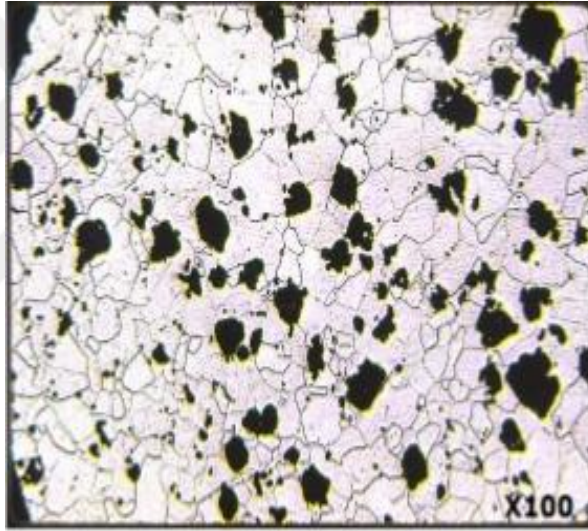
Şekil 2.9 a) Mg ilavesi ile yapı değişimi, b) Perlitik dökme demirde Mg ilavesi ile çekme mukavemeti değişimi, c) Mg, Ti, Ce ilavesi ile yapı değişimi (Yıldız, 2014)

% 0,015'e kadar N₂ ilavesi yapılarak kalın parçalarda küresel yapı elde edilmeye çalışılsa da ilave edilen N₂'nin kontrol etmek çok zor olduğundan tümüyle küresel yapı sağlanamaz. Bu şekilde bozulan mekanik özellikler nitrürlenmiş ferro-

manganez kullanımı ile kısmen giderilerek, iyi mukavemetli lamel grafitli dökme demirlerin ucuz olarak üretimi sağlanmaktadır (Yıldız, 2014).

- **Temper dökme demir**

Isıl işleme tabi tutulan beyaz dökme demirin yapısında parçalanmış hale gelen sementit ve perlit yavaş soğutulmuş karbonun rozet şeklini (temper karbon) alması sağlanır (Şekil 2.10). Mikro yapısal olarak ferritik ve perlitik olarak ikiye ayrılan temper dökme demirlerde ferritik temper dökme demirler, temperlemenin oksidan ya da nötr bir ortamda yapılmasına göre 2 çeşittir: Beyaz temper dökme demir (Oksidan ortamda üretilen) ve siyah temper dökme demir (Nötr ortamda üretilen) (Aytaçoğlu, 2012).



Şekil 2.10 100x büyütmede temper yapısı (Yıldız, 2014)

- **Küresel grafitli dökme demir**

Gri dökme demirden farklı olarak grafitlerin küre halinde bulunduğu KGDD'ler; % (3,5-3,9) oranında karbon ve % (1,8-2,8) oranında silisyum ihtiva eden üçlü Fe-C-Si alaşımlarıdır (Cantekinler, 2008). KGDD, nodüler, sfero ve düktil dökme demir isimleriyle de anılır (Toptaş, 2009). Dökme demire ergimiş halde seryum ve magnezyum (Ce ve Mg) gibi nadir toprak elementleri ilave edilerek karbonun küre formuna dönüşmesi sağlanır (Aytaçoğlu, 2012). Bilici (2004) Bunun yanında

bileşime bazı elementlerin ilave edilmesiyle farklı yapılar oluşturulabilir. Bazı elementlerin grafit yapısına etkileri Çizelge 2.1’de gösterilmiştir (Yıldız, 2014).

Çizelge 2.1 Bazı elementlerin grafit yapısına etkileri (Bilici, 2004)

Küreleştiriciler	Çekirdekleyici (%)	Lamel Yapılar (%)	Küreselliği Bozanlar (%)
Mg	Si	As (0,02)	Cd (0,01)
Ca	Al (0,5-1)	Bi (0,002)	Se (0,03)
Li	Ca (0,5-1)	Cu (2,7-3,5)	Te (0,02)
Na	Ba (0,007)	Pb (0,002)	Ti (0,1)
K	Sr (0,007)	Sb (0,002)	Zn (0,1)
Be	B (0,02)	Sn (0,15)	Zr (0,1)

Grafitlerin gri dökme demirdeki gibi lamel halinde ve keskin köşeli değil, küre formunda olması KGDD'lere süneklik ve mukavemet sağlar. Küre formunda olan grafitlerde keskin köşelerde olduğu gibi gerilim yoğunlaşması olmayacağından KGDD'ler daha yüksek mukavemet ve tokluk gösterir. KGDD'in sahip olduğu bu özellikler uygulamaların birçoğunda temper dökme demir ve gri dökme demire göre onu daha iyi bir konumda olmasını sağlamaktadır. Ayrıca küresel grafitler, katılaşma sırasında aşılama ile oluştuğu için grafit kürelerini ortaya çıkarmak için temper dökme demirde gibi ısı işleme ihtiyacı duyulmaz (Toptaş, 2009)

Grafitlerin sayısı ve dağılımı KGDD'lerde metalürjik kalitenin çok önemli bir göstergesi olup, küre sayısı ortalama bir değer olarak 100 adet/mm² kabul edilir (ASM, 1988).

Çeliklere nazaran farklı kimyasal bileşime sahip olan dökme demirler; özellikle yüksek karbon ihtiva ettiği için kırılğan bir yapıdadırlar. Bundan dolayı düşük süneklige sahip olup, sıcak veya soğuk şekilde şekillendirilemezler. Buna rağmen dökme demirler, aşınma ve korozyona karşı yüksek direnç gösterir. Yüksek mukavemet ve yüksek işlenebilme kabiliyeti gibi üstün özellikleri sayesinde fazlaca kullanım alanı bulurlar. Dökme demir türleri ve dökme çeliğe ait çeşitli özelliklerin kıyaslanması Çizelge 2.2’de gösterilmiştir (Ateş, 2013).

Çizelge 2.2 Dökme demir türleri ve dökme çeliğin karşılaştırılması (Ateş, 2013)

Özellik	GDD	BDD	TDD	KGDD	ÇD
Dökülebilirlik	5	3	4	5	2
İşlenebilirlik	5	-	4	4	3
Güvenilirlik	1	2	3	5	4
Titreşim Söndürme Kabiliyeti	5	2	4	4	2
Yüzey Sertleşebilirliği	5	-	5	5	3
Elastisite Modülü	3	-	4	5	5
Darbe Direnci	1	-	3	4	5
Aşınma Direnci	3	5	2	4	1
Korozyon Direnci	5	4	4	5	2
Mukavemet/Ağırlık Oranı	1	-	2	5	3
Üretim Maliyeti	5	5	3	4	2

(1: En kötü, 5: En iyi)

2.2 Küresel Grafitli Dökme Demirler

Birinci Dünya Savaşı yıllarında İngiltere’de A.A Griffith adında bir mühendis malzemelerin içinde bulunan çatlakların, malzemelerin kırılma davranışına neden olduğunu açıklayan bir kuram ortaya koyuyor (Griffith, 1921). Griffith’in ortaya koyduğu bu kuram o dönemde yaşayan mühendislerin gri dökme demirdeki sivri grafit parçacıklarının birer çatlak gibi davranıp malzemeyi zayıflatabileceğini anlamalarını sağlıyor. Böylece daha güçlü ve daha sünek bir dökme demir için grafit yapraklarının küreselleşmesi ve sivri uçlarının gitmesinin gerektiği ortaya çıkmıştır (Çetin, 2016).

1948 yılında AFS kongresinde; British Cast Iron Research Association’dan kongreye katılan İngiliz Henton Morrogh, yaptığı sunumda dökme demir içine az miktarda seryum (Ce) ekleyerek grafit yapraklarını küreselleştirdiğini ve bu şekilde KGDD’in üretildiğini duyurmuştur. (Çetin, 2016).

İngilizler bu duyuruyu yaptıklarında Amerikalılar grafit parçacıklarını küreselleştirmenin yolunu bulmuş fakat bu keşfi duyurmak yerine ticari açıdan düşünerek patent alma yolunu tercih etmişlerdi. KGDD’in icadının Amerikalılar tarafından yapılmış görünmesini sağlayacak olan patent başvurusu 25 Ekim 1949 tarihinde kabul edildi. KGDD keşfinin altına ise International Nickel Company’de görev yapan Keith D. Millis, Albert P. Gegnebin ve Norman B. Pilling’in isimleri yazılmış oldu (Çetin, 2016).

Birçok keşifte olduğu gibi KGDD’in keşfinde de; KGDD’nin patentinin altında adı olan Keith D. Millis’in niyeti aslında KGDD üretmek değildi. Millis beyaz dökme demir üretmek için tedarikinde sıkıntı bulunan krom yerine kullanabileceği alternatif bir element bulma çabasıydı. Bu aşamada beyaz dökme demiri meydana getirebilen bir element olan magnezyumu kullanmıştır. Magnezyum aynı zamanda grafit parçacıklarında küreselleştiren bir element olduğu için; Millis yaptığı çalışmalar sayesinde KGDD’nin üretimini sağlayacak şifreyi de bulmuştu. (Çetin, 2016).

2.2.1 Küresel grafitli dökme demirlerin genel özellikleri

- **Aşınma direnci**

Aşınma direnci; KGDD'lerin en önemli özelliklerinden olup, birçok endüstriyel uygulamadan da anlaşılacağı üzere gri dökme demirinki ile eşittir. Aşınma direncinin iyi olması bu malzemenin krank milleri, hadde merdaneleri, dergi kalıpları, dişliler, kesici takımları gibi endüstriyel uygulamalarda kullanılmasını sağlar.

KGDD aynı sertlik değeri için çeliğe göre aşınma direnci üstün gelmektedir. Yağlama özelliğine sahip olan grafit, yeterli olmayan yağlama şartlarında bile iyi sonuçlar vermektedir (Ekinci, 2009).

- **Süneklik**

Genellikle test numunelerinin gerilim altında uzaması ve boyun verecek şekilde koparılması ile yapılan süneklik, kısmen çeliğinkinden düşük olmaktadır (ASM, 1990).

Gri dökme demirlerde matris süneklige sahip olmasına rağmen, lamel şeklindeki grafitler matrisin sünekligine olumsuz etkilemektedir. Temper dökme demirler % 18'e kadar uzama gösterebilirler (ASM, 1990).

KGDD ise diğer dökme demir türlerinden daha iyi süneklik ve dayanım kombinasyonuna sahip olduğu için daha tok bir malzemedir (ASM, 1990).

- **Mukavemet**

Grafit dışındaki matris yapısı KGDD'nin mukavemeti için belirleyicidir. Normal gri dökme demire göre, farklı cinsteki KGDD'ler 3-5 kat daha fazla dayanıma sahiptir. Eşdeğer süneklik ve darbe dayanımı için karşılaştırıldığında ferritik KGDD, ferritik temper dökme demire göre; perlitik KGDD, perlitik temper dökme demire göre % 50 oranında daha yüksek mukavemete sahiptir. Aynı sertlik değeri için çelik ile kıyaslandığında çeliğin maksimum çekme dayanımı % 15 daha fazla iken, KGDD'nin akma dayanımı bir miktar da fazla olduğu belirlenmiştir (Ekinci, 2009).

- **Korozyon direnci**

Genel olarak dökme demirlerin korozyon direnci çeliğe göre iyidir. Gri dökme demire göre daha yüksek korozyon direncine sahip olan KGDD'ler yüksek basıncı uygulanan ve korozyon direnci aranan alanlarda kullanılmaktadır (ASM, 1988).

Yüksek sıcaklıklarda genleşme ve oksidasyon direnci yönünden üstünlüklere sahip olan KGDD'ler, gri dökme demire kıyasla fırın kapıları, ızgaralar, döküm olukları gibi uygulamalarda 10 kat daha iyi dayanım sağlarlar (ASM, 1988).

- **Darbe direnci**

Ferritik cins ile KGDD'de maksimum darbe direnci sağlanır. 20 Joule civarı değerlere çentik darbe deneyinde ulaşılabilmektedir (ASM, 1988).

Aşırı derecede düşük sıcaklıkların önem arz ettiği ve titreşim söndürme özelliğinin istendiği birçok uygulamada KGDD'ler yer bulmuştur (ASM, 1988).

- **Dökülebilirlik**

Yüksek derecede akıcılık ve düşük döküm sıcaklığı bir arada olması, çok karmaşık parçaların dökülebilmesine olanak sağlamaktadır. Yüksek karbonlu gri dökme demire oranla KGDD daha yüksek döküm kalitesine sahiptir. Döküm parçalarının birçoğu çelik döküm için dökülemeyecek kadar karmaşık ve gri dökme demirden daha iyi özellikler aranacak durumda olabilir. Böyle durumlarda kesit hassasiyeti kısmen düşük olan KGDD kullanıldığında ince ve kalın kesitler arasındaki yapısal farklılıklar aşırı derecede olmamaktadır (ASM, 1990).

- **Basınca dayanım**

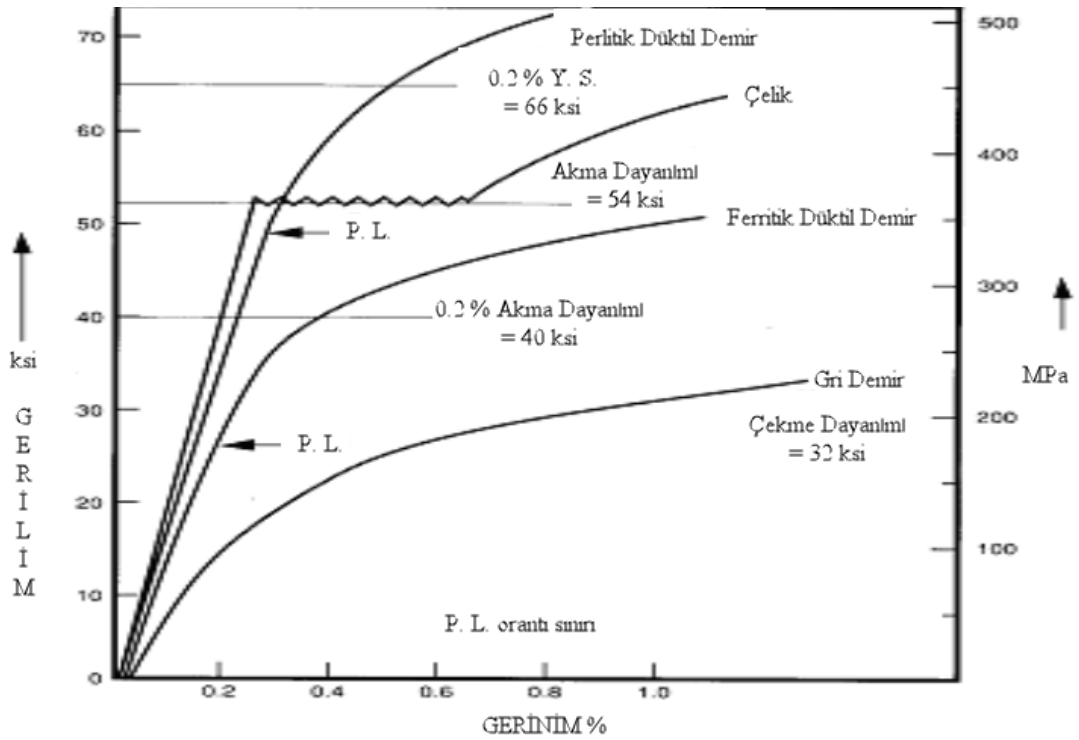
Yüksek mukavemet ve dökülebilirlik özelliğinin yanı sıra basınca dayanımının da yüksek olması KGDD'nin birçok alanda kullanılmasını sağlamıştır (Ekinci, 2009).

Bunların yanında kolay işlenebilirlik ve daha yüksek ısı iletkenliği çeliğe göre üstün özellikleri arasında bulunur (Ekinci, 2009).

2.2.2 Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri

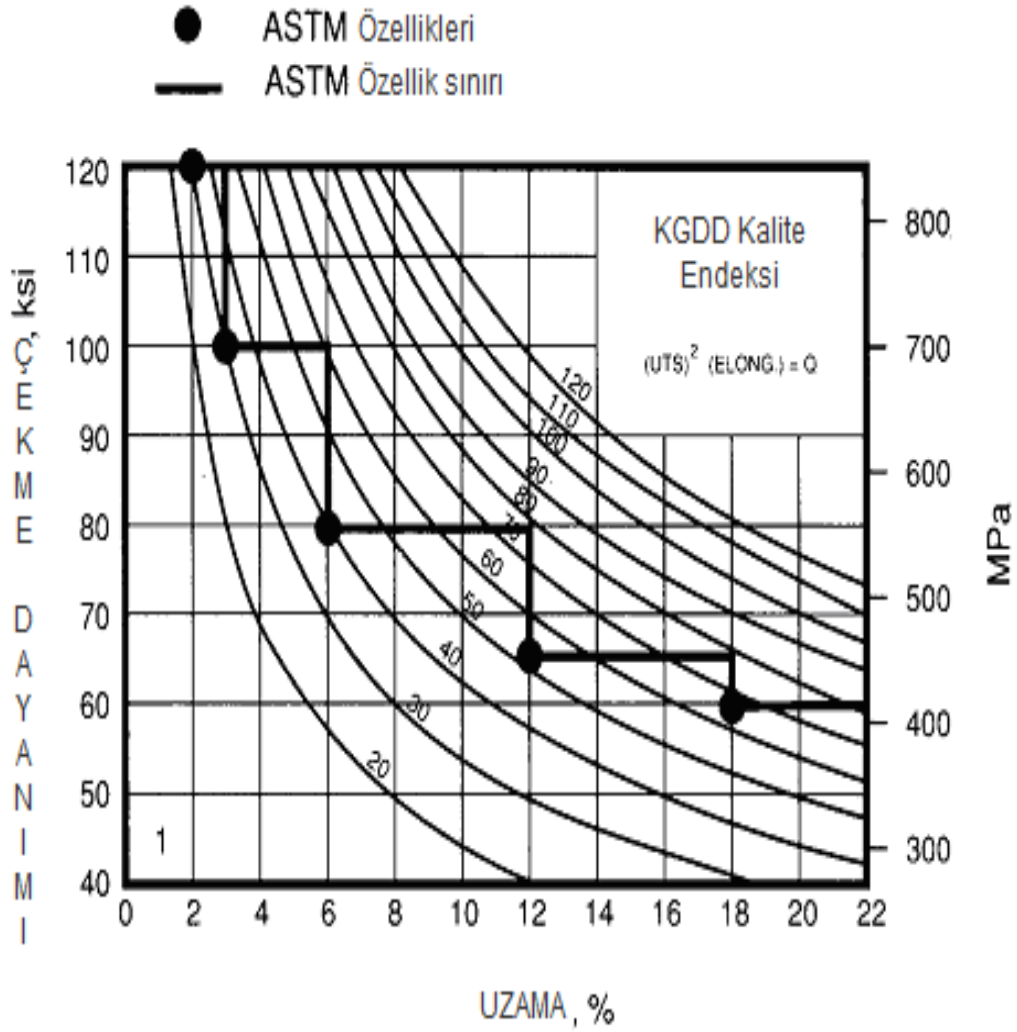
Genellikle alaşımlandırmaya bağlı olarak mekanik özellikleri değişen KGDD'de çekme dayanımı, tokluk ve sertlik Cu ve Ni ilavesi ile arttırılabilir.

Gerilim giderme dışında başka ısıl işlemler de uygulanabilen tek demir çeşidi olan KGDD'de farklı elementlerin ilavesiyle korozyon ve oksitlenme direnci arttırılabilir. KGDD 350 MPa–1600 MPa aralığında bir çekme dayanımına sahiptir (Şekil 2.11) (Sorelmetal, 1990).



Şekil 2.11 Gerilim/gerinim tablosu (Sorelmetal, 1990)

Tokluk ve esneklikleri ile diğer dökme demirlerden ayrılan KGDD, alaşım ve kalitesine göre değişebilir de % 25'e varan uzamalar gösterebilmektedirler (Şekil 2.12) (ASM, 1990).



Şekil 2.12 KGDG kaliteleri ve çekme/uzama dayanım eğrileri (ASM, 1990)

Çoğunlukla döküm halleri ile kullanılan KGDG genellikle perlitik-ferritik yapıdadır. Ferritik matris büyük oranda ısıl işlem ile üretilmektedir. Yüksek mukavemetli matrislerin elde edilmesini sağlayan ısıl işlem ile süneklik ve dayanım artırılabilir. Eşdeğer sertlikteki gri dökme demir ve eşdeğer mukavemete sahip çeliğe göre KGDG'nin işlenebilirliği daha iyidir. Korozif ortamlarda ise genellikle çelikten daha iyi, gri dökme demire eş aşınma direncine sahiptir. Ferrit ve perlitin sertliği ile yapıdaki perlitin oranı ve tane büyüklüğü, KGDG'de kesit boyutunu değiştirmektedir. İnce perlitik veya beynitik matris ile yüksek mukavemet, sertlik ve düşük süneklik sağlanabilir. Matrisin tamamen ferritik olması ise mukavemet ve sertlikteki azalma ile birlikte yüksek sünekliğin sağlanmasını sağlayabilir (Ekinci, 2009). Ferritik ve perlitik mikro yapıya sahip KGDG'lerin genel mekanik özellikleri Çizelge 2.3'de verilmiştir (Forrest, 2005).

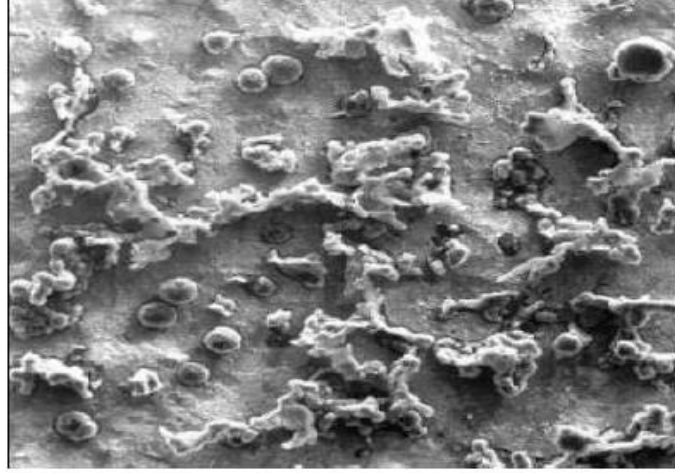
Çizelge 2.3 Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri (Forrest, 2005)

Mikro yapı	Ferritik	Perlitik
Çekme Mukavemeti (MPa)	370-550	650-750
Akma Mukavemeti (MPa)	221-350	360-410
Sertlik (BSD)	120-170	240-255
Kopma Uzaması (%)	12-30	1-8

KGDD ani sıcaklık değişimlerinde şekli bozulmadan kalabildiği bilinmektedir. Yapısı tamamıyla ferritik olan KGDD'ler en yüksek düzeyde tokluğa sahip olan KGDD'dir. Yapıda perlit yüzdesi arttıkça tokluk derecesi azalmaktadır (Gilbert, 2003).

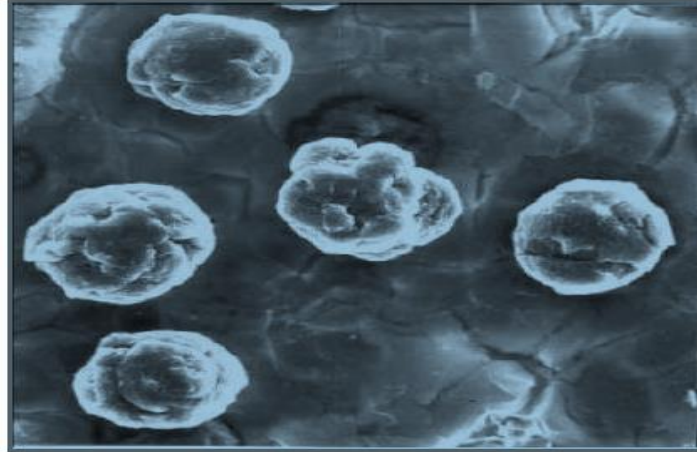
KGDD'ler hakkında bilgi verecek olursak;

Ferritik KGDD: Östenit içerisinde çözülen karbonun tamamının küresel grafit hale dönüşmesiyle meydana gelecek malzemenin mikro yapısı ferritik bir matris ve bu matris içerisinde gelişigüzel halde bulunan küresel grafitten oluşur (Şekil 2.13) (Aytaçoğlu, 2012). Tavlama ısıl işlemi ile üretilmekte olup, 250 MPa minimum akma mukavemetlerine ve % 15 minimum uzama değerine sahiptir (Ekinci, 2009). Bu yapı yüksek süneklik, çentik darbe dayanımı ve çok iyi talaş kaldırabilme özelliklerine sahiptir (Albayrak 2001).



Şekil 2.13 Ferritik yapı, büyütme: 200x (50 μm) (Imasogie ve Wendt, 2004)

Perlitik ferritik KGDD: Ferritik yapıya nazaran daha yüksek çekme ve aşınma direncine sahip bu KGDD dökülmüş halde kullanılan perlitik malzemelere göre daha düzenli karbür dağılımına sahip olduklarından daha iyi mekanik özellik gösterirler (Albayrak 2001). Ferrit-perlit KGDD'in iç yapısı Şekil 2.14'de görülmektedir. Minimum akma mukavemeti 420 MPa olup, çoğunlukla döküm halinde kullanılırlar (Ekinci, 2009).



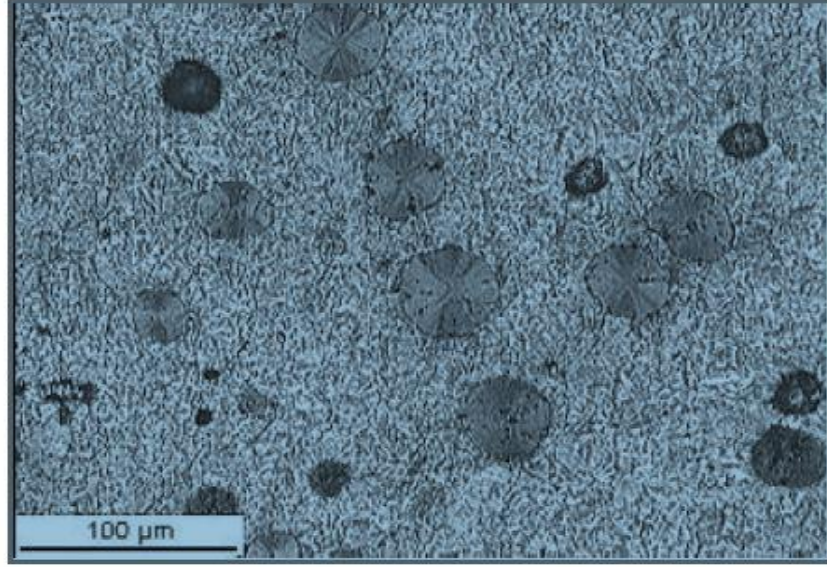
Şekil 2.14 % 50 Ferritik % 50 perlitik yapı, büyütme: 500x (20 μm) (Imasogie ve Wendt, 2004)

Perlitik KGDD: Östenitten ayrılan karbonun grafitlerin bulunduğu bölgelere kadar ilerleyemediği ve ferrit ile karbür levhalarının devamlı olarak birbirlerine bitişik durumda olduğu malzeme yapısına "perlit" adı verilir (Şekil 2.15) (Aytaçoğlu, 2012). Minimum akma mukavemetleri 500 MPa olup, alaşım elementi ilave edilerek üretilirler (Ekinci, 2009).



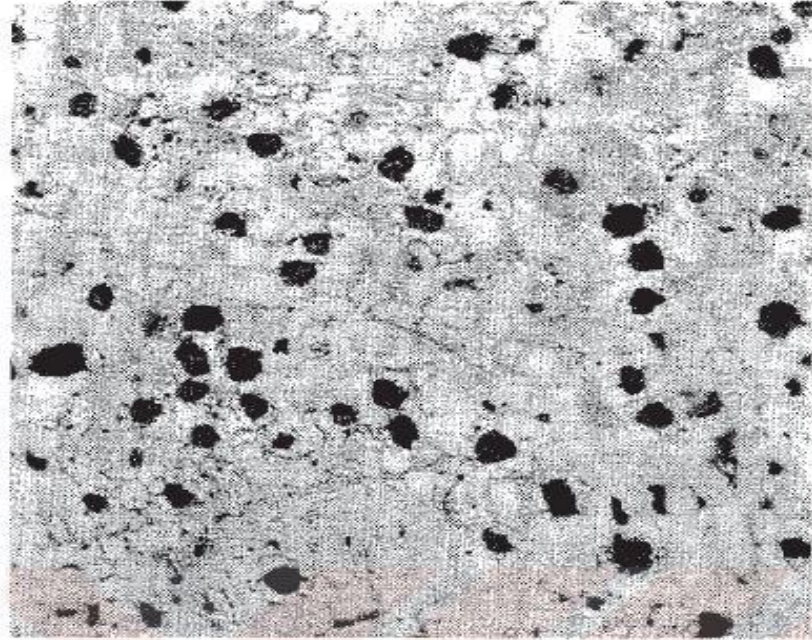
Şekil 2.15 Perlitik küresel grafitli dökme demir büyütme: 600x (20 μm) (Imasogie ve Wendt, 2004)

Martenzitik KGDD: Bu yapıda yeterince alaşım elementi ilavesi veya su verme + temperleme ısıl işlemi yapılarak perlit oluşumu önlenir. Isıl işlem ile meydana gelen temperlenmiş martenzit yapısı yüksek statik dayanım ve aşınma direnci ile birlikte düşük süneklik ve tokluk oluşmasına neden olur. Martenzitik KGDD'nin iç yapısı Şekil 2.16'da görülmektedir. (Karamusaoğlu, 2009).



Şekil 2.16 Temperleme ısıl işlemi görmüş martenzitik küresel grafitli dökme demir mikro yapısı (büyütme 100x) (Karamusaoğlu, 2009)

Östenitik KGDD: çekme mukavemeti en düşük KGDD türü olmasına rağmen iyi korozyon ve oksitlenme direncine sahiptir. Yüksek sıcaklıklarda boyutsal kararlılık da diğer önemli özelliklerindedir (Şekil 2.17) (Yavuz, 2006).

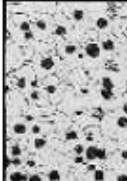
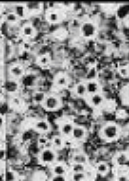

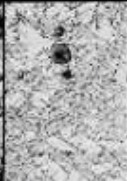






Şekil 2.17 Östenitik küresel grafitli dökme demir büyüme (100x) nital ile dağlanmış (Aytaçoğlu, 2012)

Beynitik KGDD: KGDD'nin bu cinsi alaşımlama ve/veya ısıl işlem uygulanarak elde edilen sert ve aşınma dirençli bir malzemedir (Karamusaoğlu, 2009).

Östemperli KGDD: Üst düzeyde mukavemet, tokluk ve aşınma direnci özelliklerine sahip bir türdür. Standart KGDD türlerine oranla 2 kat daha süneklik ve tokluk sağlamaktadır. Yorulma ve aşınma direnci açısından çok iyi olup, iyi kırılma tokluğuna sahiptir (Yavuz, 2006).

KGDD'in yapısındaki yüksek miktardaki grafit içeriğinin yanında, matris yapısı KGDD'in mekanik özelliklerinin belirlenmesini sağlar. İy yapı ve çekme mukavemeti arasındaki bu ilişki Şekil 2.18'de gösterilmektedir (Karamusaoğlu, 2009).

MATRİS YAPISI							
Ferrit	Ferrit-Perlit	Perlitik	Martenzitik	Temperlenmiş Martenziti	OKGDD	OKGDD	Öztenitik
414 MPa	552 MPa	690 MPa	-	793 MPa	1050 MPa	1600 MPa	310 MPa
							

Şekil 2.18 Farklı küresel grafitli dökme demirlere ait içyapı resimleri ve çekme mukavemeti değerleri (Karamusaoğlu, 2009)

2.2.3 Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması

Yalçın (2007) Türk Standartları Enstitüsüne göre KGDD'lerin sınıflandırılması Çizelge 2.4'de verilmiştir. Burada, DDK sembolü, dökme demir küresel grafitli manasına, DDK sembolünden sonraki sayılar kgf/mm^2 olarak minimum çekme mukavemetini belirtmektedir (Toptaş, 2009).

Çizelge 2.4 Küresel grafitli dökme demirlerin TS 526'ya göre standardı ve kullanım alanları (Yalçın, 2007)

Sınıfı	Çekme Muk. (MPa)	%0,2 Akma Muk. (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)	Mikro yapı	Kullanım alanı
DDK-40	410	275	12	140-201	Daha çok Ferritik	Fittingler, inşaat iskele parçaları, fren merkezleri, büyük tekerlekler, pistonlar, potalar, fırın kapakları
DDK-50	490	345	7	170-241	Ferrit+Perlit	Kompresör pistonları, tekerlekler, pompa gövdeleri, dişli kutuları, traktör parçaları, tarım makine parçaları, valfler
DDK-60	590	390	3	192-269	Perlit+Ferlit	Büyük dişliler, kağıt sanayinde kullanılan haddeler, hidrolik kontrol alet yatakları, uçak motor parçaları
DDK-70	685	440	2	229-302	Daha Çok Perlitik	Kam milleri, kazıcı uçlar, kavramalar, pistonlar, kalıplar, makine parçaları
DDK-80	785	490	2	248-352	Perlitik	Piston kolları, hadde silindirleri, krank milleri, soğuk kalıplar, kam milleri, makine kılavuzları, palet makaraları, küçük dişliler
DDK-35,3	345	215	22	-	Ferritik	Darbe dayanımının önemli olduğu dökümler
DDK-40,3	390	245	18	-	Ferritik	

Alman DIN standardında TSE sınıflandırmasından farklı olarak KGDD'nin sembolü GGG'dir (Ekinci, 2009). Alman (DIN) standardına göre dökme demirlerin sınıflandırılması Çizelge 2.5'de verilmiştir (Toptaş, 2009).

Çizelge 2.5 DIN 1693'e göre parçadan ayrı dökülen numune özellikleri (Toptaş, 2009)

Tanım	Çekme dayanımı N/mm ²	0,2 Akma dayanımı N/mm ²	% Uzama	Matris yapı
GGG - 40	400	250	15	Daha çok Ferritik
GGG - 50	500	320	7	Ferritik-perlitik
GGG - 60	600	380	3	Perlitik-ferritik
GGG - 70	700	440	2	Daha çok Perlitik
GGG - 80	800	500	2	Perlitik

Uluslararası ISO R 1083 standardında sınıflandırma işareti olarak minimum çekme mukavemeti ve minimum % uzamayı gösteren rakamlar kullanılmakta olup, Çizelge 2.6'da verilmiştir (Ekinci, 2009).

Çizelge 2.6 Uluslararası ISO R 1083 standardı (Ekinci, 2009)

Sınıf	Çekme Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	Uzama (%)
70-2	700	450	2
60-2	600	400	2
50-7	500	350	7
42-12	420	280	12
38-17	380	240	17

ASTM, A 536-70 standardında sınıflandırma işareti olarak minimum çekme mukavemeti, minimum akma gerilmesi, MPa olarak ve minimum % uzamayı gösteren rakamlar kullanılmakta olup, Çizelge 2.7’de gösterilmektedir (Ekinci, 2009).

Çizelge 2.7 ASTM, A 536-70 standardı (Ekinci, 2009)

Sınıf	Çekme Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	Uzama (%)
60-40-18	600	400	18
65-45-12	650	450	12
80-55-06	800	550	6
100-70-03	1000	700	3
120-90-02	1200	900	2

2.2.4 Küresel grafitli dökme demirlerin bileşimini oluşturan elementler

KGDD'lerin yapısını olumsuz etkilediği için Pb, Bi, Sb, As, P, S gibi elementlerin bünyede bulunması istenmezken, Ni, Mo, Cr, Mn, V, Cu gibi elementlerin ise fiziksel özelliklerine olumlu etkisi olduğu için yapıda bulunması istenir. Bu elementlerin etkileri grafit şekli, karbürlerin dağılımı ile yüzdesi ve matris yapı ve özellikleri üzerinde kendini gösterir. Ayriyetten alaşım elementleri vasıtasıyla soğuma hızlarından meydana gelecek karbür oluşumu kontrol altında tutulmaktadır (ASM, 1988).

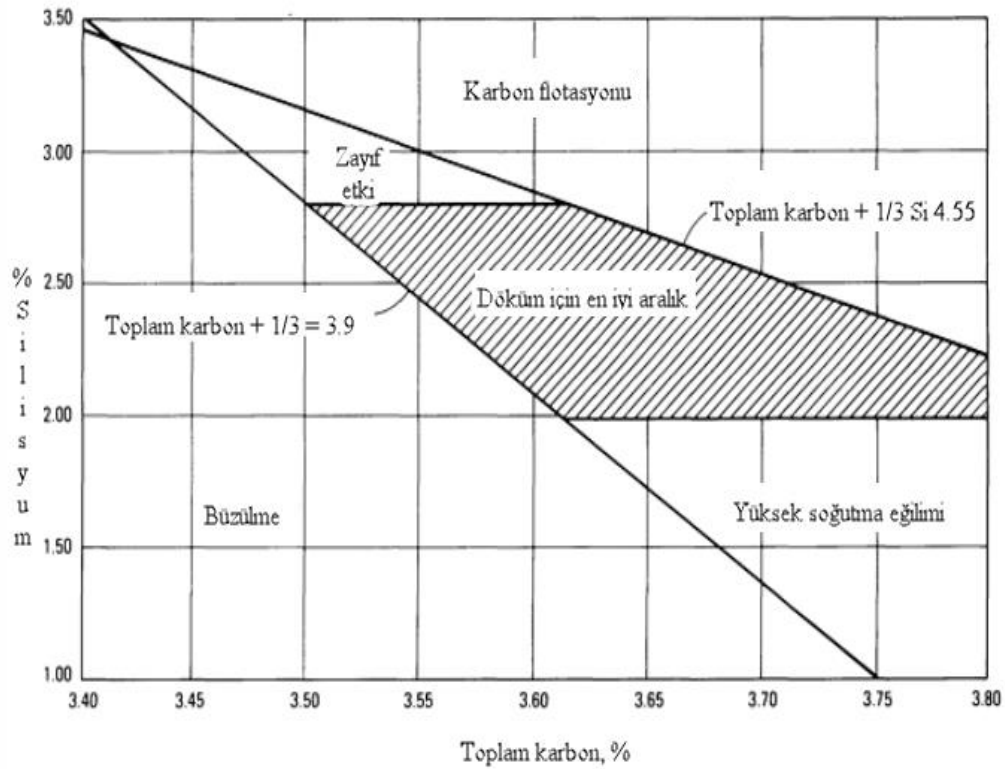
- **Karbon**

KGDD'lerin bileşiminde % (3-4) oranında bulunan karbon oranı arttıkça dökümün akışkanlık ve beslenme özelliklerinin iyileşmesine katkıda bulunarak döküm kabiliyetinin artmasına ve grafit kürelerinin sayısının artmasına sebep olur (ASM, 1988).

- **Silisyum**

KGDD'lerde % (1,80-2,80) aralığında bulunan silisyum ötektoid dönüşüm esnasında meydana gelen ferritin oranına ve sertliğine katkıda bulunarak dökme demir mukavemetinde de önemli bir artış oluşmasını sağlar. KGDD'in sünek gevrek geçiş sıcaklığını da arttırdığından dolayı maksimum süneklik ve tokluk için % 2'nin aşışığında olması sağlanmalıdır. Silisyum miktarı karbon eşdeğeri üzerinde etkili olduğu için grafitleşme ve karbon segregasyonunda payı büyüktür. Silisyum karbon aktivitesini arttırmakta ve grafitin ayrışmasını pekiştirmektedir. İşlem sonunda sıvı metale ferrosilisyum olarak katılarak grafit küreleri için çekirdekleştirici görevi yapan silisyum, küre sayısının kontrolü içinde büyük önem teşkil etmektedir (ASM, 1988).

Arzu edilen özellikleri oluşturabilmek için en ideal karbon ve silisyum oranları Şekil 2.19'da verilmiştir (ASM, 1988).



Şekil 2.19 Yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir elde etmek için gerekli karbon ve silisyum oranları (ASM, 1988)

- **Manganez**

Eğer ferritik döküm yapısı olan demirde maksimum süneklik elde edilmek isteniyorsa manganez oranının % 0,2 ile sınırlandırılması gerekirken, perlitik yapıda bir demirde ise bu oran % 1'e kadar ulaşabilir. Kükürtün kötü etkisini sınırlandırmak ve tane sınırında meydana çıkan demir sülfür ötekiği oluşumunu engellemek için kullanılır (ASM, 1988).

- **Fosfor**

Fosfor steadit fazı oluşturarak kırılabilirliği artırırken tokluğu, sünekliği, plastik şekil değiştirmeyi ve kaynak edilebilirliği ise kötü yönde etkiler. Fosforun artması ile akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve sertlik artış gösterirken uzama değerinde ise azalış görülür. Bu nedenle yapıda maksimum % 0,05'de tutulmalıdır (ASM, 1988).

- **Kükürt**

Magnezyum işleminden önce % 0,02 ya da daha az bir seviyeye indirilerek grafitliği küreleştirmek için gerekli olan magnezyum miktarının daha fazla kullanılması sağlanır (ASM,1988).

- **Bakır**

Magnezyum miktarı ile birlikte sıvı dökme demirdeki çözünürlüğü yaklaşık % 3,5 olan bakırın çözünürlüğü düşer. Grafit şekline % 3 bakır değerine kadar herhangi bir olumsuz etkisi bulunmamaktadır. Grafitleştirici bir element olan bakırın miktarı artarken yapıdaki perlit miktarı da yükselir. Tamamıyla perlitik bir yapıda eklenen bakır ilavesi arttıkça mekanik özelliklerinin artış oranında azalmaya neden olacaktır. Yapıda yüksek miktarda bakır kırılganlığa neden olup, akma değeri artarken çekme ile sertlik değeri azalır (ASM, 1988).

- **Kalay**

Sementit oluşumuna etkisi olmamakla birlikte perlit oluşumunun hızlanmasına katkıda bulunur. Ferritik KGDD'lerde olmamalıdır. Kalay miktarı ile sertlik, çekme dayanımı ve akma sınırı artmakta, uzama değeri ise bakır ve kalay ile birlikte azalmaktadır (ASM,1988).

- **Magnezyum**

Magnezyum miktarı, grafitin küresel formda olmasını sağlamak için % 0,02'yi aşmamalıdır. Sıvı dökme demirdeki kükürt ve oksijeni gidermek için kullanılan magnezyum, miktarı ihtiyaç duyulandan üzerinde olduğu zaman grafit şeklini bozucu ve küre sayısını azaltıcı etkiye sahiptir (ASM,1988).

- **Nikel**

KGDD'lerde dayanımı artırıcı etkiye sahiptir. Malzemenin sertleştirme özelliğini arttırması nedeniyle ısı işlem uygulanan dökümlerde eklenir (ASM,1988).

- **Krom**

En kuvvetli karbür dengeleyici elementlerden biri olan krom, ferritik KGDD üretiminde % 0,03'ün altında kalmaması gerekir. Diğer karbür dengeleyici elementlerin oranıyla alakalı olarak perlitik türlerin üretiminde ise % 0,06'ya kadar çıkabilir (ASM, 1988).

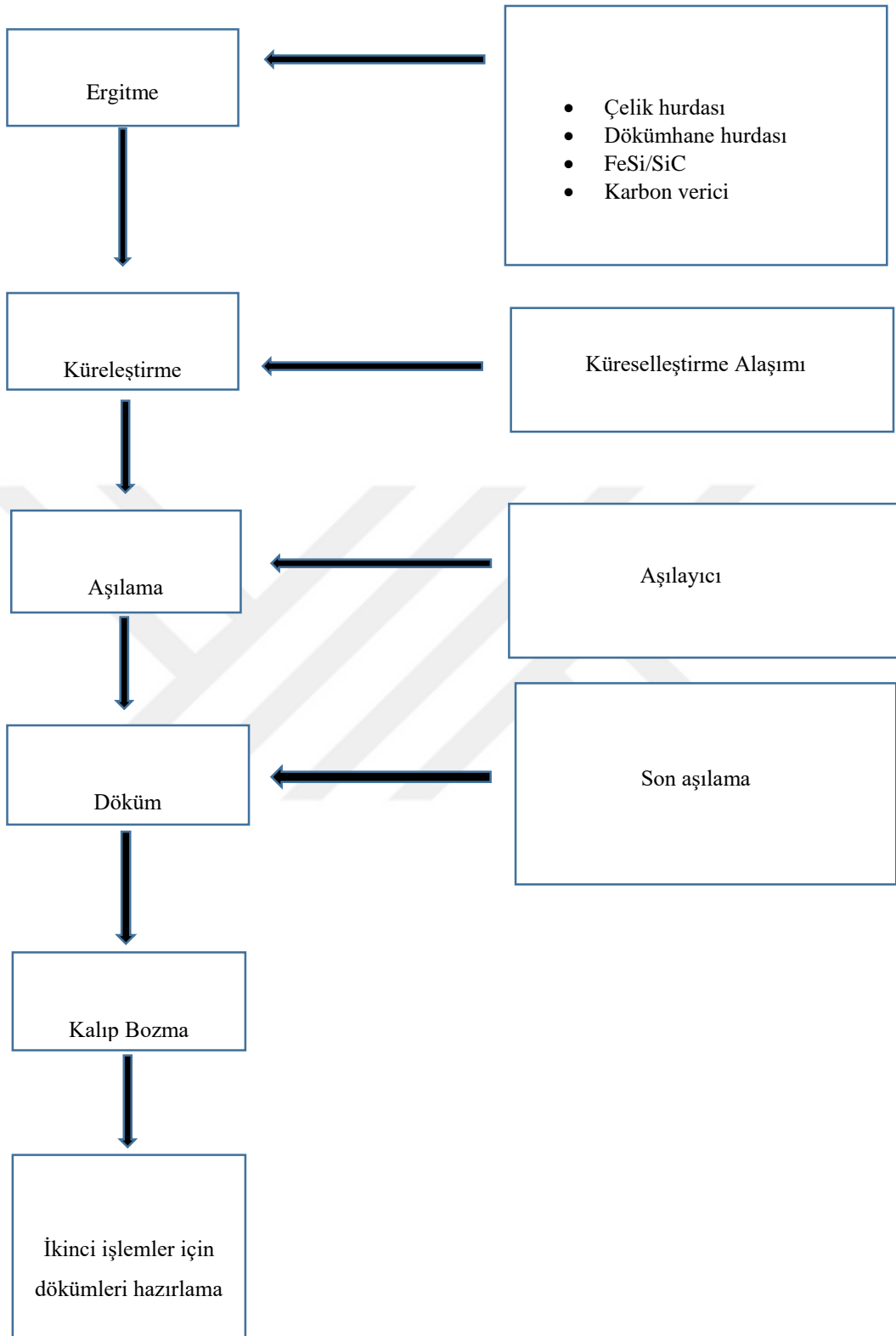
Yukarıdaki bahsedilen elementlerin haricinde çekirdekleşme potansiyeline etki eden antimon, kurşun, titanyum, tellür, bizmut ve zirkonyum gibi elementlerde ya çok az kullanılmalı ya da bileşimde hiç kullanılmamalıdır (ASM, 1988).

2.3 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi

Magnezyum, tek başına veya seryum gibi nadir toprak elementlerle birlikte önemli derecede ilavesiyle dökme demirde küresel grafitin oluşmasını sağlayarak KGDD üretiminde çok büyük rol oynamaktadır. Seryum, kalsiyum, lityum, sodyum, yitrium gibi elementler de küresel grafit oluşumunu desteklemesine rağmen magnezyum mevcut durumda KGDD için en avantajlı yöntemdir (Şen, 2004).

Magnezyum yeterli miktarda ilave edildikten sonra ergiyik aşılır ve dökülür. Grafitin çökmesi küre biçiminde olur. Magnezyumun kaynama sıcaklığı 1090 °C olup, işlem sıcaklığında Mg'un yüksek buhar basıncı nedeniyle şiddetli bir reaksiyon bulunmaktadır. Bu nedenle sıvı demirin şiddetli karışmasına ve buhar biçiminde Mg'un önemli derecede kaybına neden olur. Mg işlemi sırasında metal yüzeyinde oksitler ve sülfidlerin oluşturduğu cüruf dökümden önce tamamıyla uzaklaştırılmalıdır. Aksi durumda dökümler zararlı cüruf kalıntıları barındırır (Brown (1994).

KGDD üretiminin şematik akış diyagramı Şekil 2.20'de gösterilmektedir. KGDD döküm üretiminin ilk adımı şarj malzemesini seçmek, ikinci adımı küreselleştirmedir. Aşılama KGDD üretimi için olması gereken önemli bir aşamadır. Yüksek kaliteli KGDD dökümlerin üretimindeki birçok kademe önemli kontrol gerektirir. Küreleştirme işleminden önce sınırlı bir aşırı ısıtma ve bekleme zamanı olmalıdır. 1450 °C – 1510 °C arası sıcaklıklar magnezyum işlemi için ergiyiğin olması gereken sıcaklıklardır (Şen, 2004).



Şekil 2.20 KGDD üretiminin şematik akış diyagramı (Şen, 2004)

2.3.1 Küresel grafitli dökme demirlerin üretiminde kullanılan şarj malzemeleri

Ergiyiğin bileşimini belirleyen; şarj yapmak için kullanılan ham malzemelerdir. Şarj kalitesinin kontrolü büyük önem arz etmektedir. Bileşim, teslim zamanı, sağlanan kalite gibi faktörler açıkça belirtilmelidir (Henych,1998).

Ergiyiğin çekirdeklenme potansiyeline şarjın metalik bileşenlerinin önemli bir etkisi varken çelik ve döngü malzemesi (hurda) çekirdeklenme potansiyeline etkisi çok azdır. Ergiyikler için; pik demirler, grafit, silisyum karbür ve diğer ferro silisyum ilaveleri çekirdeklenme potansiyeline sahiptir. Sementit oluşumu için düşük potansiyel gösteren ve katılaşma esnasında iyi karşılık veren dökme demirleri üretmek için, dönüş hurdaları % 50'den az, çelik bileşeni ise % 40'ı geçmemeli ve şarjda pik demir kullanılmalıdır (Muratore, 1998).

KGDD üretiminde kullanılan şarj malzemelerini şöyle sıralayabiliriz:

- Pik
- Çelik hurdası
- KGDD demir hurdası-döngü malzemesi
- Direk redüklenmiş demir cevheri
- Ferro alaşımlar ve silisyum karbür
- Karbon vericiler (doğal grafit, suni grafit, kok kırığı)

Pik, aşılama karşı olumlu yanıt vermesi, serbest karbür bulunmayışı, mikro yapısının kararlı olması ve mekanik özellikleri nedeniyle dökme demir üzerinde kalıcı bir etkiye neden olur (Bayraktar, 2009).

Çelik hurdası, KGDD üretiminde şarjın teşkilinde önemli bir malzeme olup, hurda temininde temel husus iyi kalite çelik olmalıdır. İyi kalite kimyasal analiz, şekil ve büyüklük özelliklerini içerir (Bayraktar, 2009).

KGDD demir hurdası-döngü malzemesi, kimyasal analizinin bilinmesi ve çoğunlukla temiz olması yönleriyle dökühaneler için en önemli şarj malzemelerden biri

durumundadır. Çok nadir durumlar haricinde KGDD döküm hurdası dışında başka döküm hurdası olmamalıdır (Bayraktar, 2009).

Direk redüklenmiş demir cevheri, çok fazla olmamasına rağmen KGDD üreticileri tarafından % (5-10) kullanılmaktadır (Bayraktar, 2009).

Ferro alaşımlar, istenilen analize ve şarj malzemesine bağlı olarak KGDD üretiminde kullanılır. Ferro alaşımlar kullanıldığında kimyasal analizlerin bilinmesi gerekir. Eriyikte hem karbon hem de silisyumun istenilen duruma getirilmek istendiğinde silisyum karbür kullanılarak sağlanabilir (Bayraktar, 2009).

Karbon vericiler, ergitmeyle pota indüksiyon fırınlarında çoğunlukla kullanılır. Karbon verici ergitme işleminden önce ana metale (% 0,1) ilave edildiğinde çekirdeklenme kabiliyetini arttırıp, işlem sırasında olan karbon kaybını telafi ederek KGDD kalitesine olumlu katkıda bulunmaktadır (Bayraktar, 2009).

2.3.2. Ergitme

Kaliteli bir küresel grafitli döküm parçanın üretimi için öncelikle ocakta doğru bir alaşım oranı tutturmalı ve temiz bir ergiyik hazırlanmalıdır. Dökme demir için hazırlanan ergiyiğin metalürjik kalitesini istenen seviyeye getirebilmek için birçok yöntem bulunur. Özellikle Japon dökümhanelerinde, dünya üzerinde hiç pik demiri kullanmadan KGDD üreten birçok dökümhane olduğu bilinmektedir (Çetin, 2016).

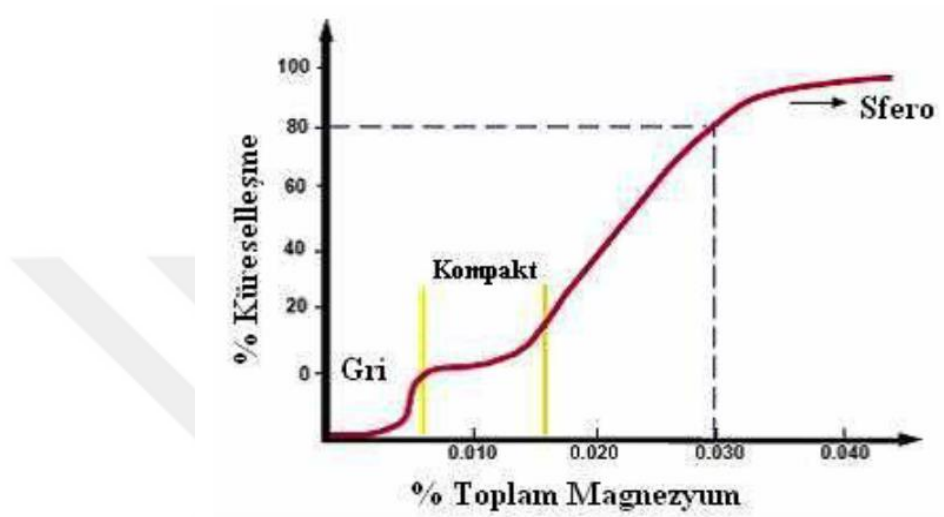
KGDD'in ergitme açısından diğer dökme demirlerle arasında farklılık bulunmamaktadır. Ergitme işleminde, aşılama sırasında magnezyum ilavesi azaltacak etkenlerin meydana gelmesinden uzak durulmalıdır (Arda, 2010).

2.3.3 Küreselleştirme işlemi

- **Mg İlavesi**

Özdemir (2007) Bir atmosfer basınçta 650 °C'de ergiyip, 1120 °C'de buharlaşan magnezyumun sıvı demir sıcaklıklarındaki buhar basıncı, normal atmosfer basıncından 10 misli daha büyük olup; sıvı demir yüzeyi havaya açık olduğunda yanarak kaybolur. 1450°C üzerindeki sıcaklıklarda ilave magnezyum da kayıp çok olduğundan, sıvı demir sıcaklığının 1350-1450 °C aralığında olması uygun olur. Sıvı

metal ile temas eden magnezyum bir anda buharlaşacağı için eğer uygun şekilde yapılmazsa reaksiyon çok şiddetli bir şekilde olabilir. Hava ile temas etmeden önce magnezyum buharının içinden geçerek yükseldiği sıvı metal derinliği, magnezyum verimini belirler. Uygun metalürjik ortamı sağlamak ve reaksiyon şiddetini azaltmak amacıyla magnezyum başka elementlerle alaşımlandırılır (Yıldız, 2014). (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 Magnezyumun küreselleşmeye etkisi (Ecob ve Hartung, 2003)

Magnezyum, ergiyikten kükürt ve oksijenin uzaklaştırılması amacıyla kullanılan bir elementtir. Magnezyum kullanılarak katılaşmaya kadar geçen süre zarfında bir daha oksidasyon ve kükürt alımı engellenmiş olur. Grafit şekil bozukluklarının oluşmaması ve küre sayısının azalmaması için ihtiyaç duyulan miktarın üzerindeki kalıcı magnezyum miktarı olmaması gerekir. Eğer ergimiş metalde oksijen ve kükürt çok miktarda bulunursa magnezyumun önemli bir kısmı, magnezyum oksit ve sülfürlerin ortaya çıkmasında harcanacaktır. Bunun yanında küreleşmeyi emniyete almak amacıyla magnezyum çok az oranda nadir toprak elementleri ile beraber katılır. Sıvı metale ilave edilecek magnezyum miktarı ile alakalı formül (2.2)'de verilmektedir (Yıldız, 2014).

$$\% \text{ Mg (ilave edilen)} = \frac{\text{İstenen Mg (\%)}}{\text{Mg verimi (\%) x 0.01}} + \text{Bileşimdeki (\% S)} \quad (2.2)$$

Bilici (2004) KGDD'lerde kendi başına küreleştirici olarak kalsiyum kullanılabilmesine rağmen ana görevi, magnezyumun etkinliğini arttırmak ve magnezyum reaksiyonunun uçuculuğunu azaltmaktır. Bunların yanında kalsiyum eriyikteki oksijenle girdiği reaksiyonda CaO meydana getirerek aşılama işleminin etkinliğine olumlu katkı sağlar. (Yıldız, 2014).

Bilici (2004) Seryum (Ce), Lantanyum (La), Praseodmiyum (Pr) ve Neodmiyum (Nd) elementleri en çok kullanılan küreleştirici nadir toprak elementleri ailesindedir. Eğer bu elementler düşük kükürt içeren dökme demirde sadece küreleştirici olarak kullanılırsa bütünüyle bir küresel bir yapı elde edilse de, % 60'ın üstüne çıkmayacak bir küresellik seviyesi ortaya çıkmış olur. Seryum, nadir toprak elementleri arasında en yararlısı iken Lantanyum çok kuvvetli bir şekilde karbür kristalleşmesini destekleyici görev görür (Yıldız, 2014).

KGDD Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan yöntemler Çizelge 2.8'de verilmiştir (Yıldız, 2014).

Çizelge 2.8 Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan yöntemler (Cevher, 2006)

Alaşımlar	Teknik vasıtalar
NiMg, CuMg	Açık pota
FeSiMg % 3/5 – FeSiMg % 5/7 FeSiMg % 8/10 – FeMg paletleri % 6/10	Sandwich, Kapaklı pota, Flotret, Inconod, Kalıp içinde gazalma
Mg kaplı tel Mg kok	Daldırma, Dönen pota, Daldırılmış ilaveli pota
Saf Mg çubuk Saf Mg tozu	Konvertör, Basınçlı pota Daldırma, Enjeksiyon

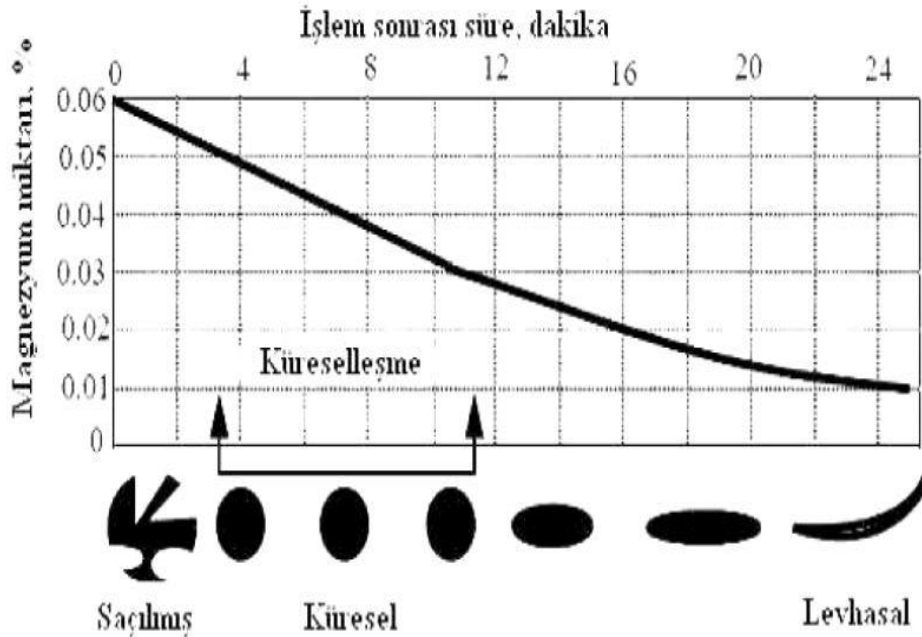
- **Küreselleştirme etkisinin zamanla azalması**

Küreselleştirme işlemi sonuna doğru etki zamanla azalarak ve lamelimsi (Quasi-Flake) olarak tanımlanan grafitler meydana gelmektedir (Bayraktar, 2009).

Küreselleştirme etkisinin zamanla azalmasının bağlı olduğu faktörleri sıralarsak;

1. Dökümden önce magnezyum miktarı ne denli fazla ise etki kaybı o kadar hızlı olmaktadır. Mg sıvıdaki kükürt ve oksijeni bağladığı için gereğinden fazla mg olumsuz etki yapmaktadır.
2. Sıcaklığın artması etki kaybını artırıcı etkiye sahiptir.
3. Cüruf miktarı etki kaybını arttırdığı için cürufun hemen ve çok temiz olarak alınması gerekmektedir.

Etki kaybının artması, hücre sayısında azalmaya ve grafit şeklinde artmaya neden olarak kendisini gösterir (Aytaçoğlu, 2012). Magnezyum etkisi ve işlem süresi arasındaki ilişki Şekil 2.22’de gösterilmiştir (Ekinci, 2009).

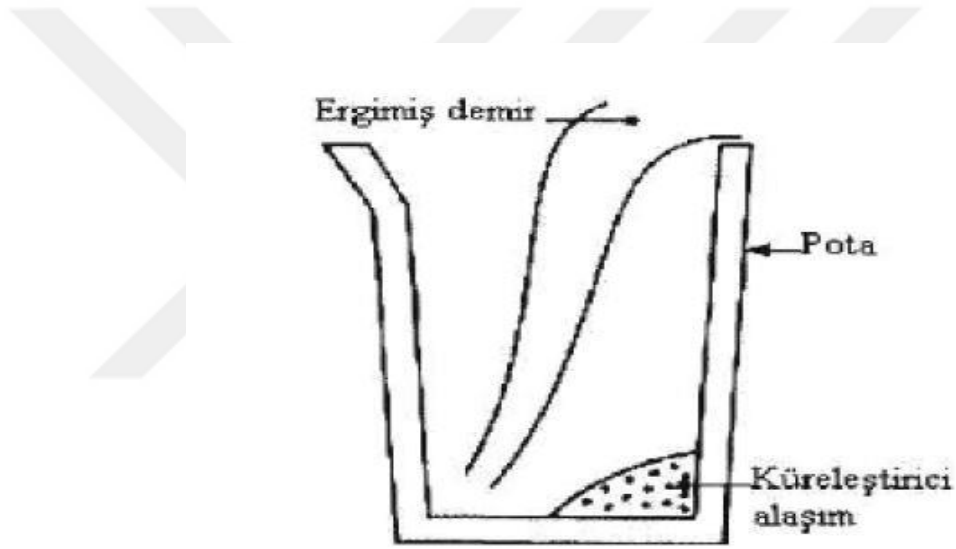


Şekil 2.22 Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi (ASM,1989)

- **Potada küreselleştirme yöntemleri**

Potada küreselleştirme yöntemleriyle ilgili yöntemler aşağıda sıralanmış olup, yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir.

- Açık pota yöntemi ile küreselleştirme: Düşük yatırım maliyeti ve basit olması nedeniyle birçok dökümhanenin tercih ettiği bir yöntemdir. Alaşım (FeSiMg) işlem potasının tabanına yerleştirildikten sonra pota doldurulur (Şekil 2.23) (Aytaçoğlu, 2012). Sıvı dökme demire kıyasla daha hafif olan FeSiMg bir yandan tepkimeye girmekte, diğer yandan de yüzme eğiliminde olduğu için işlemin veriminin % (20-30) gibi nispeten daha düşük değerlerde olmasına neden olur (Çetin, 2016).

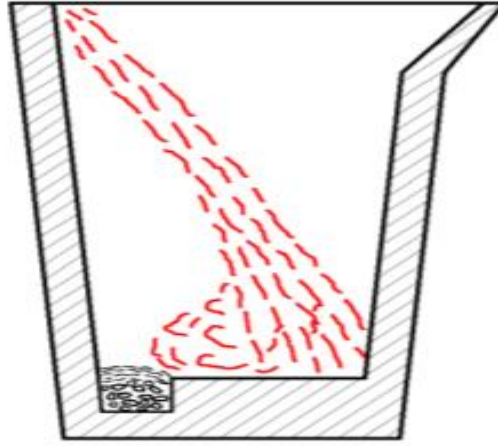


Şekil 2.23 Küresel grafitli dökme demir üretiminde açık pota yöntemi (Brown, 1994)

- Sandviç (Sandwich) yöntemi ile küreselleştirme

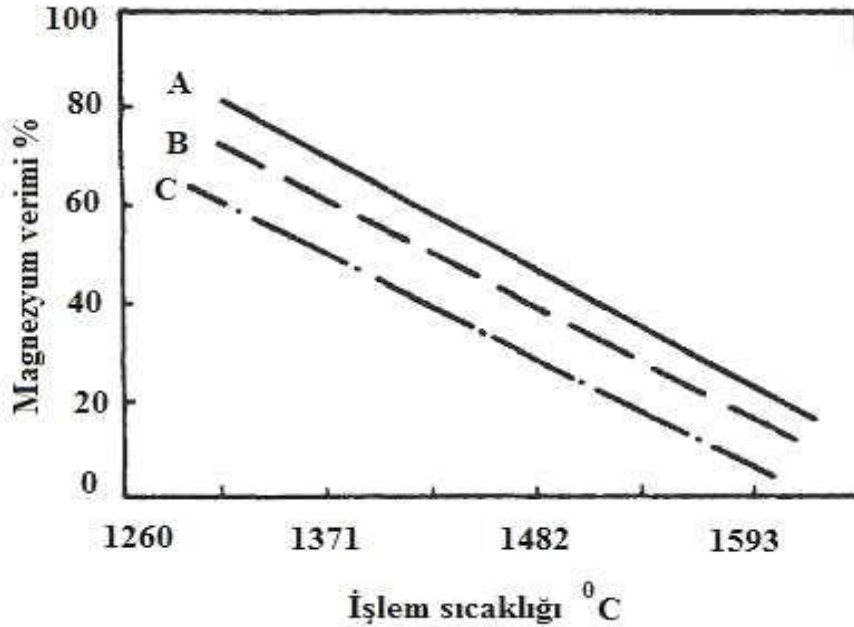
Bu yöntemde; magnezyum alaşım malzemesi üzerine ocaktan dökülen ergiyik alaşımın üzerine direkt olarak gelmemelidir. Ardından hızlı bir şekilde potayı doldurmak gerekir.

Sandviç potası yöntemi Şekil 2.24'de gösterilmiştir.



Şekil 2.24 Sandviç potası yönteminin gösterilişi (ASM,1990)

- Sandviç yönteminde ergiyiğin % 2'si miktarında çelik talaşı ve KGDD talaşı ile küreselleştirici malzemenin üzeri örtülerek dökümle birlikte FeSiMg'un yanması da önlenmiş olur. İşlem sonunda ortaya çıkan magnezyum faydalanma yüzdesi, işlemin yapıldığı eriyik sıcaklığıyla alakalıdır (Ekinci, 2009). Mg faydalanma yüzdesinin işlem sıcaklığı ile değişimi Şekil 2.25'de gösterilmiştir (Ekinci, 2009).

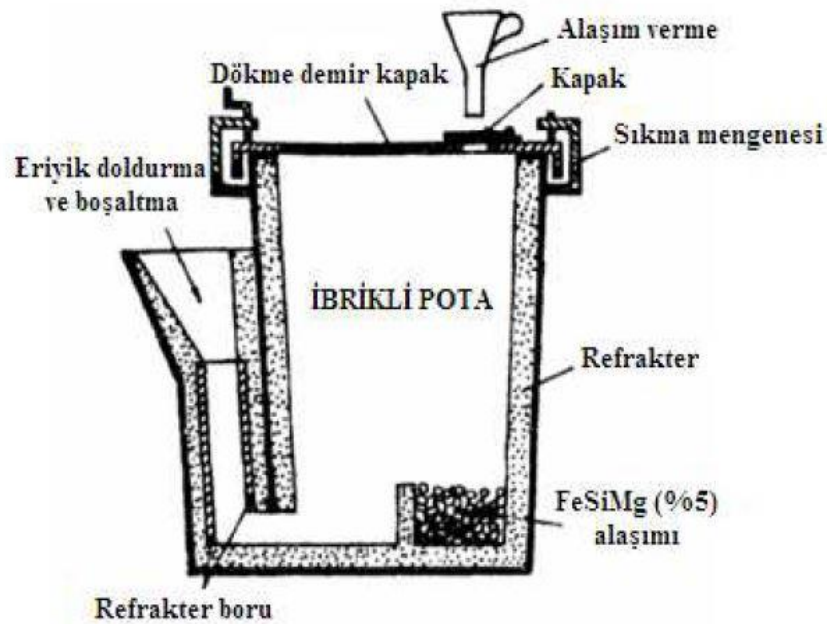


Şekil 2.25 Mg faydalanma yüzdesinin işlem sıcaklığı ile değişimi

(A) 15 Mg-85 Ni, (B) 15 Mg-50 Ni-35 Si, (C) 9 Mg-48 Si-1 Ca-42 Fe (Ekinci, 2009)

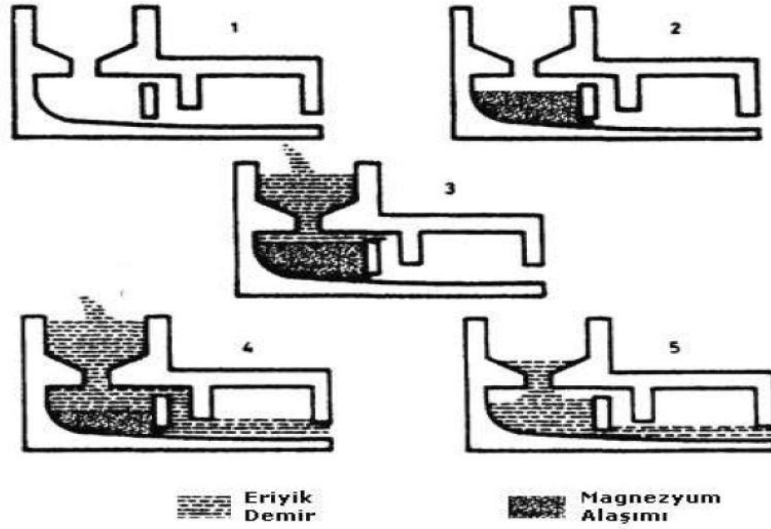
- Kapaklı pota yöntemi ile küreselleştirme: Kapaklı pota yöntemi, sandviç yönteminde oluşan MgO dumanının meydana gelmesini engellemek diğer yandan da magnezyum verimini arttırmayı sağlamak amacı ile QIT Peret Titane tarafından geliştirilmiştir. (Aytaçoğlu, 2012).

- İbrikli pota yöntemi ile küreselleştirme: Kapaklı potaların bir tür alternatifi olan bu yöntemde, ibrik deliğinden potaya verilen eriyik reaksiyonun sona ermesiyle yine aynı delikten dökülmektedir (Şekil 2.26) (Aytaçoğlu, 2012).



Şekil 2.26 İbrikli pota yönteminin gösterilişi (Aytaçoğlu, 2012)

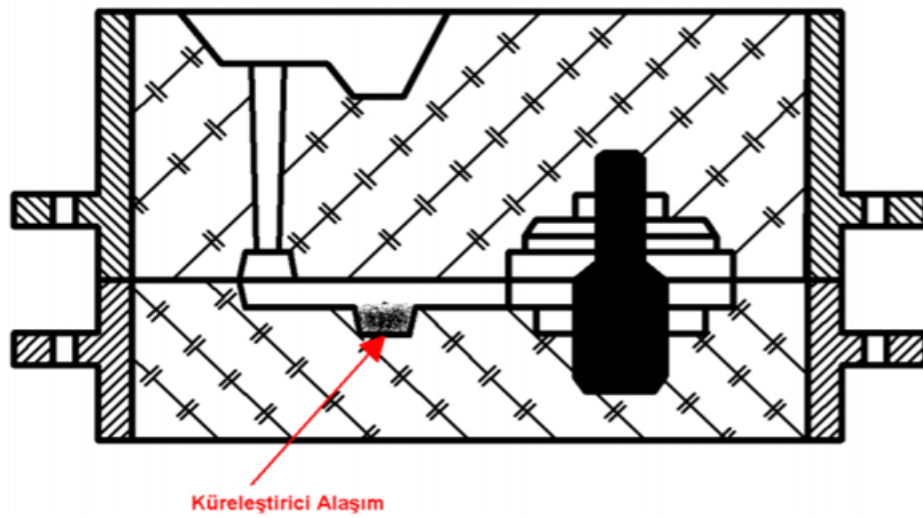
- Flotret yöntemi ile küreselleştirme: Bu yöntemde yatay durumda birbiri ile irtibatlı bir kanal sistemi bulunmaktadır. Küreselleştirme işlemi aralıklı bir şekilde yapılmakta ve her işlemin devamında ön kısım üzerindeki kapak açılmakta ve FeSiMg alaşımı hazne içine doldurulmaktadır. Eriyik ocaktan sistemin döküm yoluna geçirilmektedir. Ergiyik toplanarak resimde görüldüğü üzere reaksiyon için olması gereken yavaş akış hızına ulaşılmaktadır (Şekil 2.27) (ASM, 1990).



Şekil 2.27 Flotret yönteminin kademeli olarak gösterilişi (ASM, 1990)

- Vorteks yöntemi ile küreselleştirme: Bu yöntemde ergiyik akış anında bir girdap oluşturarak küreselleştirici Mg alaşımı ile karıştırılmaktadır. % (8-20) arasında magnezyum içeren FeSiMg alaşımları küreselleştirici olarak işleme sokulmaktadır. (Cevher 2006).

- Inmold yöntemi ile küreselleştirme: Diğer bütün yöntemlerden farkı en son aşamada kalıpta yapılmasıdır. İn mold yöntemi Şekil 2.28’de gösterilmiştir.



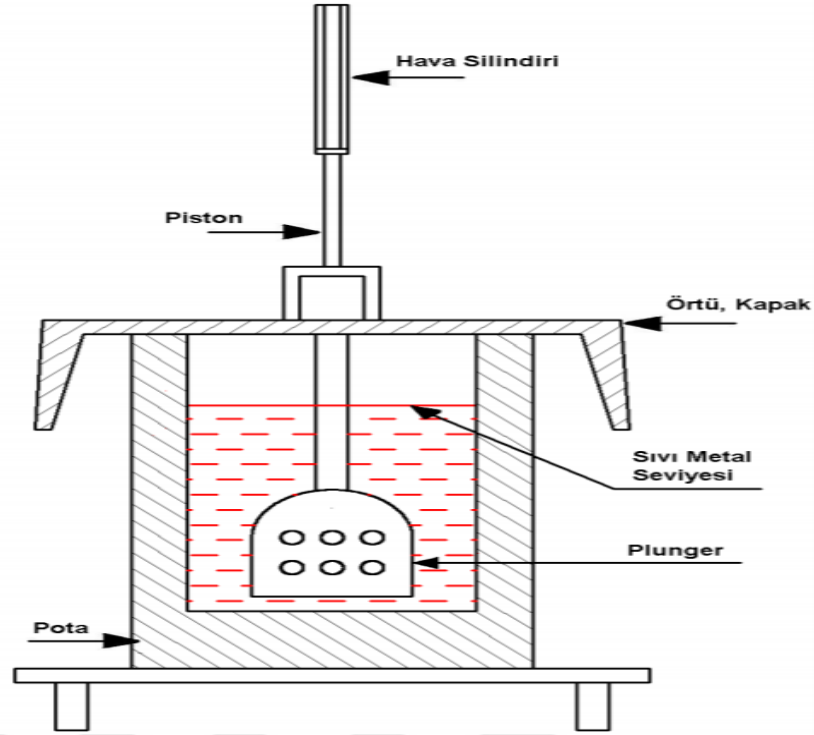
Şekil 2.28 İn mold yönteminin gösterilişi (ASM, 1990)

Inmold yönteminde küreselleştirici miktarının artmasıyla birlikte küre sayısındaki değişim Çizelge 2.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 2.9 Inmold yönteminde küreselleştirici miktarının artmasıyla küre sayısındaki değişimin gösterilişi (Aytaçoğlu, 2012)

%MgFeSi	0,5 %	0,75 %	1,0 %	1,25 %	1,5 %
Küre Sayısı	Mevcut değil	Mevcut değil	44	102	86
Grafit şekli	Lamel	Lamel	Küresel % 65	Küresel % 95	Küresel % 95

- Daldırma yöntemi ile küreselleştirme: Daldırma yönteminde ise çoğunlukla grafitten veya refrakter malzemeden çan şeklinde delikli bir kap içerisine % 40 veya daha fazla magnezyum içeren alaşım konulur (Şekil 2.29). Sıvı demir potasına alaşımın içinde bulunduğu bu kap daldırılır. Açık potaya göre daha yüksek magnezyum verimi elde edilen daldırma yönteminde, artık magnezyum seviyesi daha iyi bir biçimde kontrol altına alınabilmektedir. En önemli dezavantajı açık pota yöntemine oranla sıcaklık kaybının daha çok olmasıdır. (Cevher, 2006).

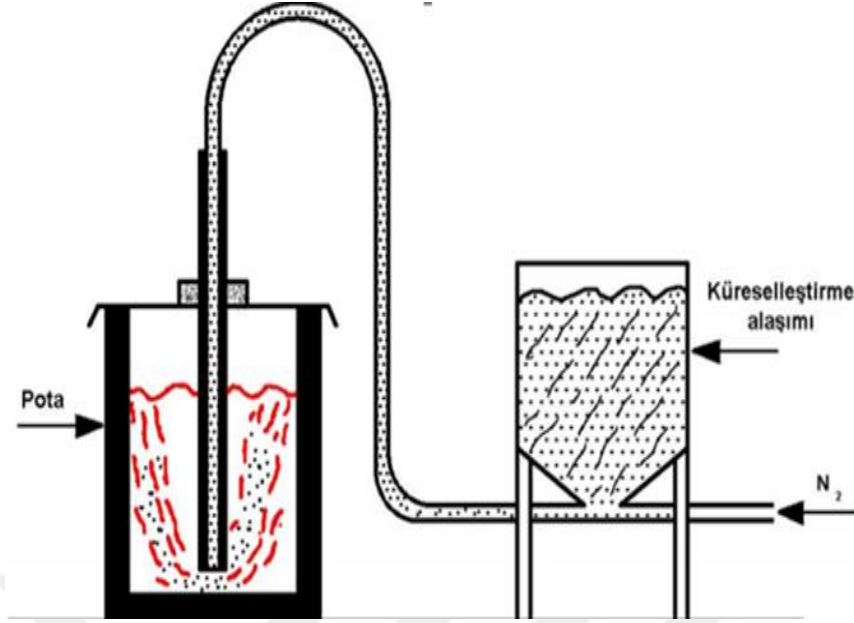


Şekil 2.29 Daldırma yönteminin gösterilişi (ASM, 1990)

- MAP yöntemi ile küreselleştirme: Birkaç kat refrakter ile sıvanmış ve tabanında reaksiyonun başlamasını sağlamak amacıyla küçük bir yüzeyin açık tutulduğu blok halindeki magnezyum ile küreleşme sağlanır. Bu blok halindeki magnezyum refrakter kaplı bir çubukla sıvı metale daldırılır ve 30 ile 40 saniye aralığında reaksiyon sürer. 1400 °C'ta % 65 şeklinde magnezyum verimi olmaktadır. Ancak işlem sıcaklığı arttıkça verim de azalacaktır. (Aytaçoğlu, 2012).

- Konverter yöntemi ile küreselleştirme: Diğer adı Fischer konverteri olan bu yöntemde Mg metalini içeren özel bir konvertör potası bir bölmede kullanılır. Pota sıvı demir ile doldurulup ağzı sıkıca kapatılarak Mg metali demirin altında kalacak şekilde döndürülür (Şen, 2004).

- Enjeksiyon yöntemi ile küreselleştirme: Potadaki metalin içine ince metalik magnezyum parçaları itilir. Küreleştirici; uygun bir aparat kullanılarak argon ve azot gibi gazlarla pota içindeki sıvı metale pülverize olarak püskürtülür (Şekil 2.30). Eğer istenirse kükürt giderici gereçler de küreleştirici gereç ile beraber sıvı metal içine püskürtülebilir (ASM, 1990).



Şekil 2.30 Enjeksiyon yönteminin şeması (ASM, 1990)

- Basıncılı pota ile küreselleştirme: Sızdırmazlığı sağlanmış bir kısma işlem potası konularak, o kısmın basıncı 30 atmosfer civarlarına çıkarılır. Devamında metalik magnezyum işlem potasındaki erimiş metale daldırılır. Basınç nedeniyle, magnezyum metali etkili karıştırılır (ASM, 1990).

2.3.4 Aşılama işlemi

Ergiğin çekirdek ihtiyacının uygun sayıya getirilmesi işlemine aşılama denir. Grafitin kristalizasyonu ve büyümeleri için bu çekirdekler olmazsa olmazdır. Aynı kristalografik özellikte malzemeler ile sağlanan homojen çekirdeklenme olduğu gibi, ayrı bir malzemenin çekirdek yapıcı özelliği ile de sağlanabilen heterojen çekirdeklenme de olabilir (ASM, 1988).

KGDD'lerde ise aşılama işlemi küresel grafit kristallerinin meydana gelmesini sağlayan heterojen çekirdekler oluşturur. FeSiMg işlemi ile az veya çok yarı aşılama durumunda bulunan eriyik, aşılama yapılması ile çok sayıda çekirdeklere sahip olmaktadır. Bu durumun oluşması karbür oluşumunu da büyük ölçüde etkileyip, önlemektedir (Bayraktar, 2009).

Küresel grafitli demirlerde baz ergiğin Si miktarının, aşılama ile verilen Si miktarına oranı doku özellikleri üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Eğer

aşılama ile verilen Si miktarı az ise, metalurjik kalite kötüdür. Bunun tersi durumda yani eğer ergiyik Si miktarı çok düşük ise grafit küre sayısında azalma ve döküm durumunda karbürler bulunacaktır. Bundan dolayı dökümhanelerde toplamı sabit kalmak şartı ile eriyik Si miktarı ve aşılama ile verilen Si bu belirtilen iki sınır içinde optimum oran bulunmalıdır. Bu durumda Mg küreleştirme işlemi için verilen Si miktarı etkisi hesaba katılmamalıdır (Bayraktar, 2009).

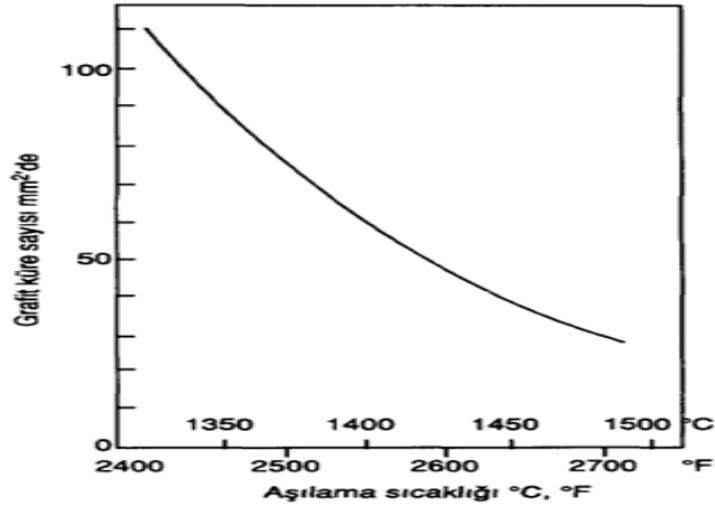
Skaland (2003) yaptığı çalışmasında kimyasal bileşim ve işlem parametrelerinin kontrolünün sağlam dökümler açısından büyük önem teşkil ettiğini ortaya koymuştur. Aşılama işleminin optimize edilmesi çekinti boşluklarının meydana gelmesinin oluşumunu engelleyerek yüksek küre sayılarına ulaşıldığını tespit etmiştir (Skaland, 2003).

Alabbasian vd. (2016) çalışmasında aşılamanın Ni dirençli KGDD'in mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Aşılama işleminin grafit küreselliğini ve küre sayısının arttırdığı, karbür oluşum eğilimini ise azaltarak gerilme özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür (Alabbasian vd. 2016).

Karadeniz vd. (2017) çalışmasında 3 farklı aşılama ilavesini (1. aşılama ilavesi 3-6 mm, 2. aşılama ilavesi 1-3 mm ve 3. aşılama ilavesi 0.2-0,5 mm) % 0,2 ve % 0,5 oranında katarak GGG-60 malzeme ile döküm deneyleri yapmış ve farklı aşılama tür ve miktarlarının malzemeye olan etkilerini araştırmıştır. Aşılama katılmadan yapılan dökümlerin KGDD standartlarına uygun olmadığı belirlenmiştir. Aşılama miktarı % 0,2 oranından % 0,5'e çıktığında çekme testi sonuçlarında artış olduğu görülmüştür. Aşılama ilavesinin ebat ve miktarının döküm numuneleri üzerindeki deneylerde etkili olduğu belirlenmiştir. Tane boyutunun (0,2-3) mm arasında değişen ve % 0,5 oranda aşılama ilavesi olduğunda optimum sonuçlara ulaşıldığı görülmüştür (Karadeniz vd. 2017).

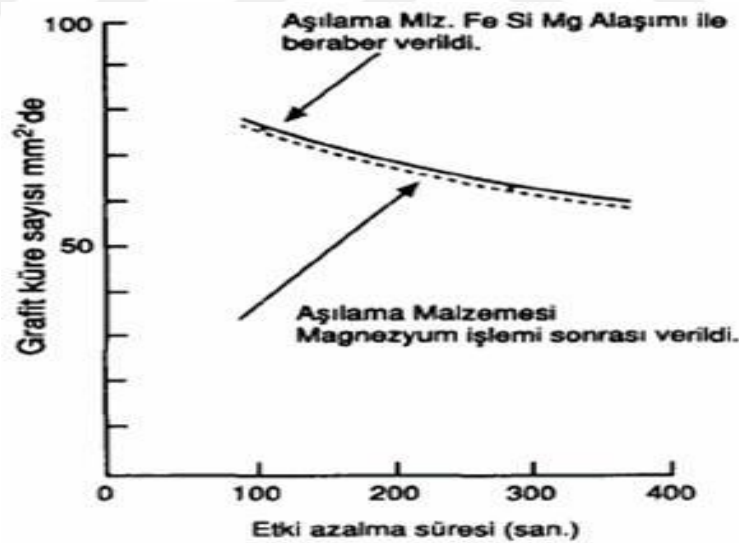
- **Aşılama teknikleri**

İşlem potasından sıvı metalin dökülmesi sırasında aşılama malzemesinin döküm potasına aktarılmasıyla aşılama yapılır. Sıvı metal sıcaklığı azaldıkça, aşılamanın etkisi artmaktadır. Aşılama sıcaklığı ile grafit küre sayısı arasındaki ilişki Şekil 2.31'de gösterilmiştir (Bayraktar, 2009).



Şekil 2.31 Aşılama durumuna sıcaklığın etkisi (Bayraktar, 2009)

FeSiMg ile birlikte aşılama yapıldığında sıcaklığa bağlı olarak grafit küre sayısı Şekil 2.32'de gösterilmiştir. 1370 °C eriyik sıcaklığında yapılan bu karşılaştırmada grafit sayısı açısından farklı bir durum olmadığı anlaşılmaktadır. (Bayraktar, 2009).



Şekil 2.32 1370° C'de uygulanan iki aşılama yönteminin karşılaştırılması (Bayraktar, 2009)

- **Aşılama malzemeleri ve etkileri**

Ca, Al, Ba, Sr gibi elementleri belli miktarlarda bünyesinde bulunduran FeSi temelli alaşımlar bir aşılama işlemi için etkili ve aşılama aktiviteleri fazladır. KGDD için bazı FeSi esaslı aşılama malzemeleri Çizelge 2.10'da gösterilmiştir (Yılmaz, 2003).

Çizelge 2.10 Küresel grafitli dökme demir için bazı ferrosilisyum esaslı aşılama bileşimlerinin bileşimleri (Labrecque ve Gagne, 1998)

Aşılama Çeşidi	%								
	Si	Al	Ca	Ba	Sr	Zr	Mn	Mg	Nadir Toprak Elementleri
% 75 FeSi,Ca	75	0,6-1,25	0,6-1,0						
FeSi-Ba	60-65	1,0	0,8	0,8		6	6		
FeSi-Ba	60-65	0,5-1,7	1,0	9-11					
FeSi-Ba	60-65	1,5	2,0	5-6			9-10		
FeSi-Ba	70-75	0,8-1,20	0,8-1,2	1,75-2,25					
FeSi-Zr	80	1,5-2,5	2,5			1,5			
FeSi-Sr	75	<0,5	<0,1		0,8				
FeSi-Sr	45-50	<0,5	<0,1		0,8				
FeSi-Ce	45	0,5	0,5						
FeSi-Ce	45	0,5	0,5						13 (%10Ce)
% 45 FeSi	45-50	0,8	0,8						3,5 (%3Ce)
% 45 FeSi- Mg	45-50	0,8	0,8					1,25	
FeSi-La	75	1,5							2,0-2,5 La

CaSi alaşımı 1480 °C'nin altında kolay bir şekilde çözünmediği için KGDD'nin aşılama sırasında nadir olarak kullanılmaktadır. Al miktarı ince gaz boşluklarına sebebiyet verdiği için bütün aşılama malzemelerinde azami % 1 olmakla beraber nadir durumlarda üretici firmadan bu miktarın % 0,7 olması istenebilir (Ekinci, 2009).

Seryum (Ce) birçok aşılama malzemesini olumlu yönde etkilemektedir. Seryum hem küre sayısını artırır hemde zamanla etkinin azalmasını önlemektedir. Bu sonuçlara sadece SrFeSi aşılama malzemesi uymamaktadır (ASM, 1988).

Seryumun en fazla etkilediği alaşım Fe-Si'dur. Seryum küresel grafitli dökme demirlerde, küreleşmeye olumsuz etkileri olan elementlerin, etkilerini azaltan bir görevi bulunmaktadır. Kullanılan FeSiMg alaşımlarının çoğunda seryum miktarı azdır. Ce miktarı % 0,01'dir. Bünyesinde seryum bulunan aşılama malzemelerinde Bizmut (Bi) olması durumunda küre sayısı önemli derecede artmaktadır. Bizmutun en etkili miktarı % 0,02'da olmaktadır. Aşılama etkinliğinin azalmasının etkisi ince parça kesitlerinde artan karbür oluşumu, kalın kesitlerde grafit yüzmesi olayı ile grafit patlaması riskinin fazlaşması şeklinde kendisini göstermektedir (ASM, 1988).

Aşılama sonrası ergiyik içindeki SiO_2 , CaO , Al_2O_3 ve BaO bileşikleri Brawn Devinimi yapar vaziyettedir. Yani ergiyik içinde serbest bir şekilde hareket halinde olmakta, diğer bir parçacığa çarpmaları durumunda koagülasyon (daha büyük oksit taneleri) oluşmaktadır. Bu hareket, sıcaklık ve süreye uyulduğunda zaman geçtikçe Brawn Devinimi yapan parçacık sayısı azalır ve aşılama işleminden az bir zaman sonra aşılamanın aktivitesi sürekli olarak düşer (Ekinci, 2009).

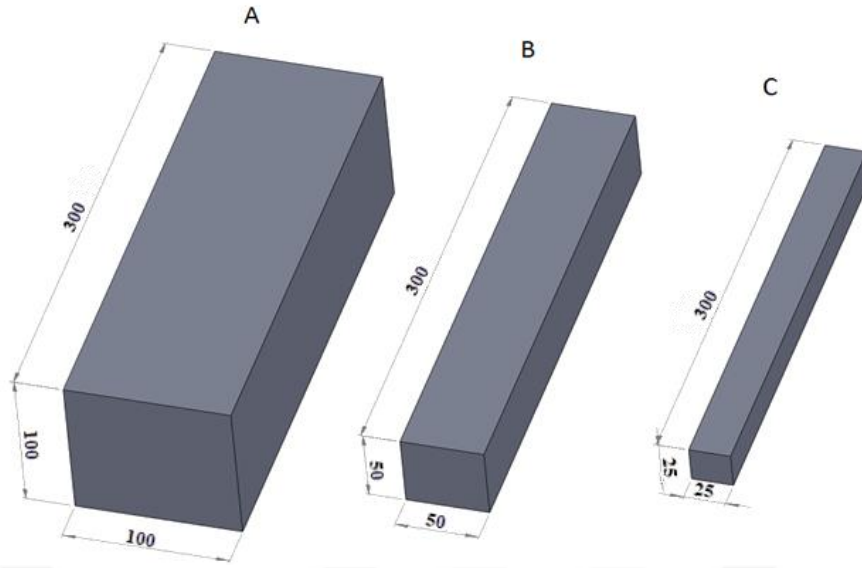
3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Deneysel çalışmalar genel olarak iş parçası tasarımı ve modül hesaplamaları, kalıplama ve döküm deneyleri, metalografik hazırlık ve mikro yapı imaj analiz incelemeleri, mekanik test çalışmaları olarak dört ana başlık altında toplanmıştır.

Tasarım çalışmaları kapsamında döküm deneylerinde kullanılacak iş parçası geometrisi, kalıplama tasarımı açıklanmıştır. Farklı modüle sahip dikdörtgen prizma şeklinde üç farklı iş parçası tasarlanmıştır. Tasarlanan döküm geometrilerinin modül değerleri ile ilgili modül hesaplamaları yapılmıştır. Kalıplama ve döküm deneyleri ticari olarak faaliyet gösteren Daloğlu Döküm Makine Sanayi ve Ticaret Limited Şirketinde, GGG70L alaşımı ile gerçekleştirilmiştir. Döküm sonrası numuneler mikro yapı incelemeleri için kesme, metalografik olarak hazırlama süreçlerinde geçirilmiş ve mikro yapı, SEM ve imaj analiz sistemi ile değerlendirmeleri yapılmıştır. Mekanik testler kapsamında sertlik ve çekme deneyi testleri gerçekleştirilmiştir.

3.1 İş Parçası Tasarımı ve Modül Hesaplamaları

Döküm deneylerinde kullanılacak iş parçası geometrisinin tasarımı bundan sonra yapılacak bütün çalışmaları etkilediğinden oldukça önemlidir. İş parçası tasarımında göz önüne alınan en önemli parametre katılma sırasında döküm parça iç kesitinde birbirinden farklı modül değerlerine sahip döküm numuneler elde etmektir. Özetle, tasarlanan geometri; farklı modüle sahip dikdörtgen prizma şeklindedir. Böylece tasarlanan iş parçalarına döküm yapıldığında modül değişiminin malzemenin sertlik dayanımı, çekme dayanımı ve mikro yapı üzerindeki etkileri incelenmesi mümkün olacaktır. Bu amaçla tasarlanan iş parçalarının ölçüleri Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1 Döküm numune geometri ve ölçüleri (A: 100 mm x 100 mm x 300 mm, B: 50 mm x 50 mm x 300 mm ve C: 25 mm x 25 mm x 300 mm)

Döküm deneylerinde kullanılacak dikdörtgen prizma şeklinde iş parçalarının ölçüleri; A iş parçası: 100 mm x 100 mm x 300 mm, B iş parçası: 50 mm x 50 mm x 300 mm ve C iş parçası: 25 mm x 25 mm x 300 mm'dir (bkz. Şekil 4.1). Belirlenen ebatlara göre her bir iş parçası için modül değerleri klasik hesaplama yöntemleri ile hesaplamaları yapılmıştır (Kayıkcı ve Akar, 2007).

Döküm modülü = Döküm hacmi / Döküm yüzey alanı

$$M_D = V_D / A_D$$

A iş parçası için;

$$M_D = (10 \times 10 \times 30) / [4 \times (10 \times 30) + 2 \times (10 \times 10)]$$

$$M_D = 3000 / 1400$$

$$M_D = 2,1428 \text{ cm}$$

B iş parçası için;

$$M_D = (5 \times 5 \times 30) / [4 \times (5 \times 30) + 2 \times (5 \times 5)]$$

$$M_D = 750 / 650$$

$$M_D = 1,1538 \text{ cm}$$

C iş parçası için;

$$M_D = (2,5 \times 2,5 \times 30) / [4 \times (2,5 \times 30) + 2 \times (2,5 \times 2,5)]$$

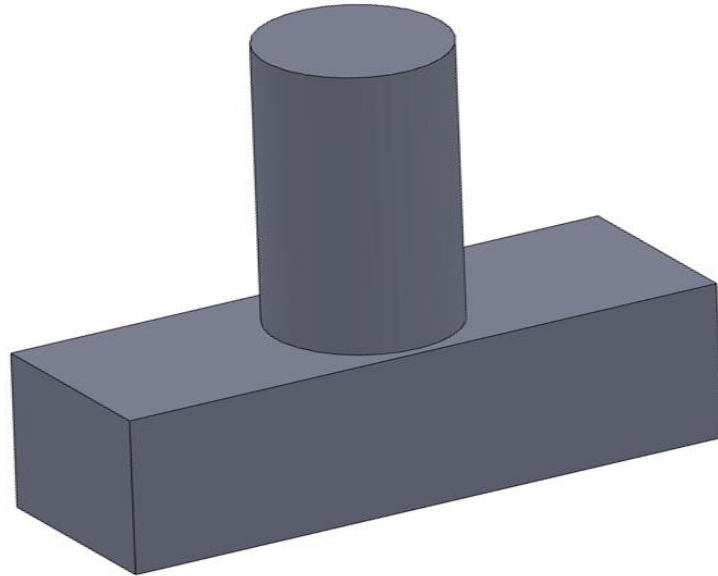
$$M_D = 187,5 / 312,5$$

$$M_D = 0,6 \text{ cm}$$

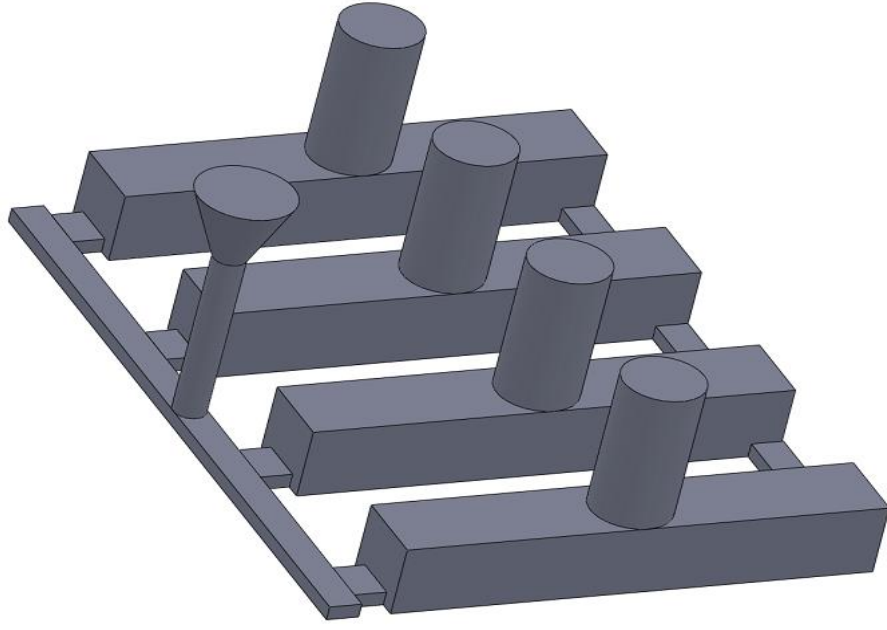
Yapılan hesaplamalar sonucu modül değerlerinin 0,6 cm ile 2,14 cm modül arasında değiştiği tespit edilmiştir. İlgili kesitler ve modül değerleri, KGDD'ler ile üretilen parçalar göz önüne alınarak, ortalama kesit kalınlıklarına bağlı olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla çalışma kapsamında modül değeri değişiminin etkisinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerinde etkisi belirlenebilmesi sağlanabilecektir.

3.2 İş Parçasının İmalatı ve Kalıpların Hazırlanması

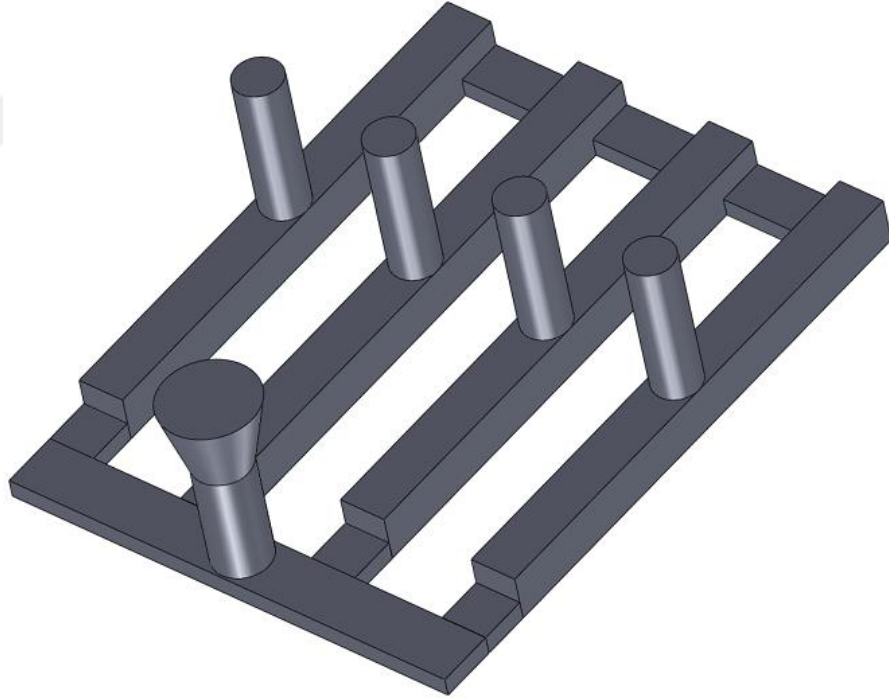
Modül hesaplamaları sonucu uygun görölen ebatlarda tasarım için iş parçası imalatına geçilmiştir. İş parçası imalatı yapılırken deneylerden elde edilen tüm sonuçların birbiriyle karşılaştırılabilmesi açasından iş parçası geometrisi sabit tutulmuştur. İş parçası belirlenen geometride uygun ebatlarda serbest iş parçası olarak imal edilmiştir. A iş parçası için tek besleyicili olarak tasarlanmış kalıplama katı iş parçası görüntüsü Şekil 3.2'de, B iş parçası için 4'lü besleyici olarak tasarlanmış kalıplama katı iş parçası görüntüsü Şekil 3.3'de ve C iş parçası için 4'lü besleyici olarak tasarlanmış kalıplama katı iş parçası görüntüsü Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.2 A iş parçası için kalıplama katı iş parçası görüntüsü



Şekil 3.3 B iş parçası için kalıplama katı iş parçası görüntüsü



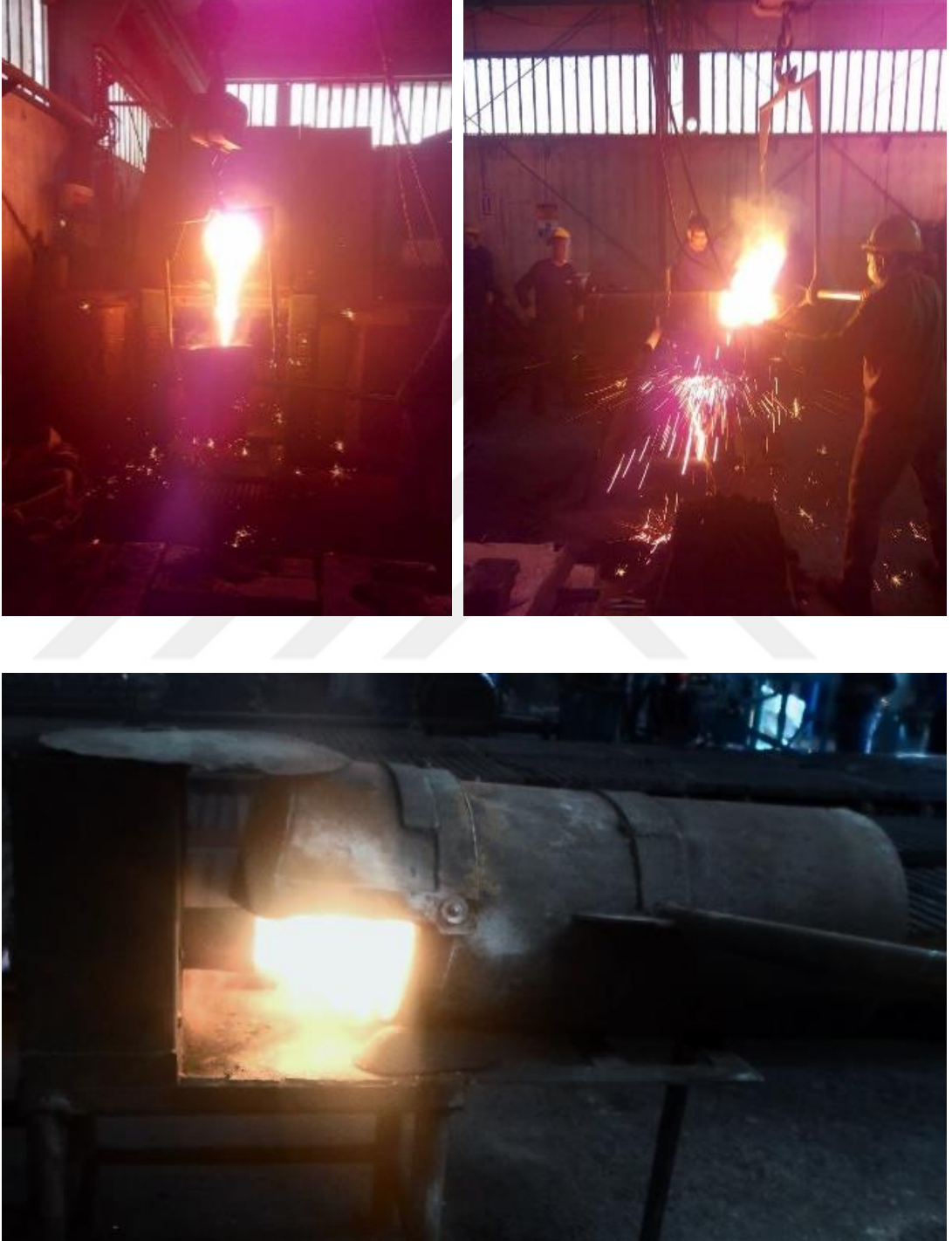
Şekil 3.4 C iş parçası için kalıplama katı iş parçası görüntüsü

Çalışma kapsamında farklı modül değerlerine sahip her bir iş parçasının çekinti oluşturmayacak şekilde besleyiciler ile kalıplanması sağlanmıştır. İş parçası ebatlarına bağlı olarak tekli ve dörtlü olarak tasarım ve imalat sürecine girmiştir.

Modelci tarafından hazırlanan iş parçası, dereceler arasına yerleştirildikten sonra iş parçası üzerine, iş parçasının kumdan kolayca ayrılması için yüzey ayırıcı madde ve grafit sürülmüştür. Bu işlemlerden sonra hazırlanmış olduğumuz kum kalıp içerisine kademeli olarak doldurularak sıkıştırılmıştır. Kumun, iş parçasının tam şeklini alabilmesi için el ve tokmak yardımı ile kum sıkıştırılarak homojen bir yüzey elde edilmiştir. Kalıp doldurulduktan sonra kalıp yüzeyindeki fazlalık kum master yardımı ile sıyırıldıktan sonra kalıp üzerinde CO₂ gazının kalıp içerisine daha iyi tatbik edilebilmesi için şiş delikleri açılmıştır. Açılan şiş deliklerinin de yardımıyla CO₂ gazı kalıbın her tarafına uygulanmış ve kalıbın sertleşmesi sağlanmıştır. Kalıp sertleştikten sonra derecenin bağlantı noktalarına tokmak ile vurularak iş parçası kalıptan ayrıldı. Kalıbın tek tarafı bu şekilde hazırlandıktan sonra diğer tarafı da aynı şekilde hazırlanarak kalıplar birleştirildi. İş parçaları kalıplama esnasında boyut farklılığı ve derece ebatlarından dolayı A iş parçası bir dereceye 1 adet, B iş parçası bir derecede 4 adet, C iş parçası bir derecede 4 adet olarak uygun besleyici ile birlikte dökülmüştür.

3.3 Ergitme ve Döküm İşlemleri

Ergitme işlemleri firmada bulunan 1000 kg (1 ton) ergitme kapasitesine sahip indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiş ve ocaktan alınan sıvı metal cepli tip potada küreleştirme ve aşılama işlemleri uygulanmıştır. Döküme hazır hale gelen sıvı metal numune üretmek için hazırlanmış kum kalıp içerisinde dökülmüştür. Sıvı metalin ergitmesi ve küreleştirme işlemleri için potaya alınması esnasında görüntüleri Şekil 3.5'de mevcuttur.



Şekil 3.5 Sıvı metal ergitme, küreleştirme, potaya alma görüntüleri

Dökülen numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra yolluklarından ayrılmış besleyicili fotoğraf görüntüleri A iş parçası için Şekil 3.6'da, B iş parçası için Şekil 3.7'de ve C iş parçası için Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.6 Döküm sonrası kalıptan çıkmış 100 x 100 x 300 mm ebatlarındaki A iş parçası görüntüsü



Şekil 3.7 Döküm sonrası kalıptan çıkmış 50 x 50 x 300 mm ebatlarındaki B iş parçası görüntüsü

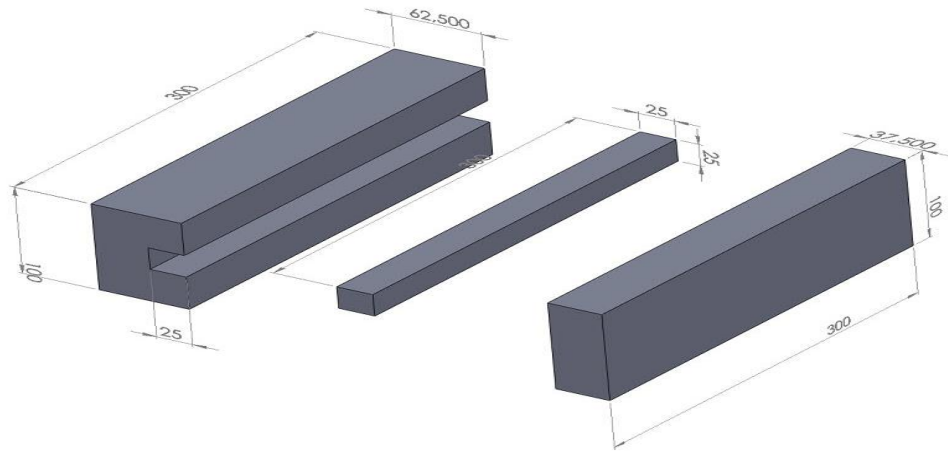


Şekil 3.8 Döküm sonrası kalıptan çıkmış 25 x 25 x 300 mm ebatlarındaki C iş parçası görüntüsü

Daloğlu Döküm firmasında üretilen numunelerin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi için firmada bulunan Spectromax marka cihaz kullanılmıştır. Firma numuneler için kimyasal analiz testlerini gerçekleştirmiştir.

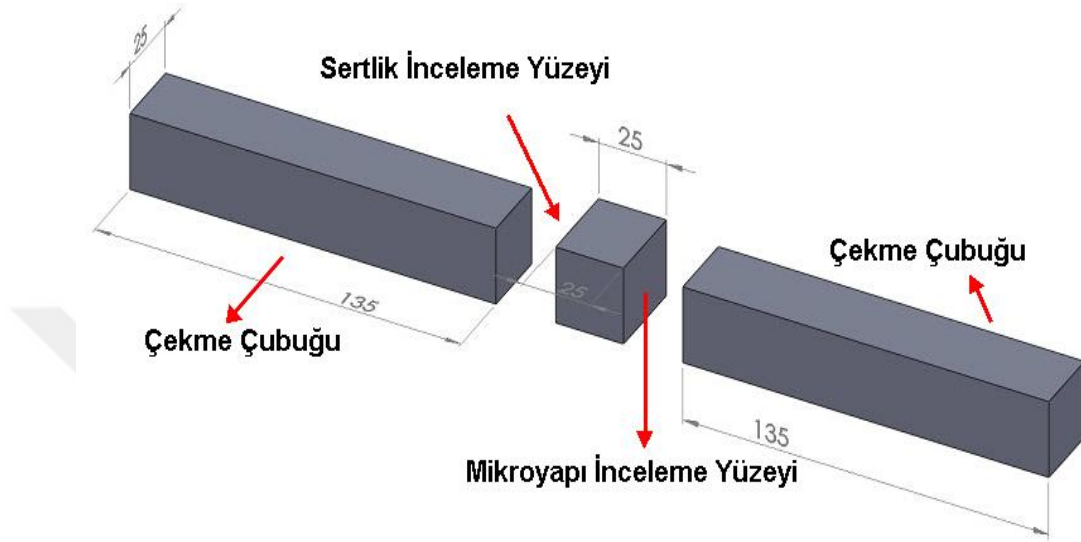
3.4 Döküm Numunelerinin İncelenmesi

Farklı modül değerlerine sahip döküm numuneleri modül değişiminin sertlik, çekme ve mikro yapı üzerinde etkilerinin incelenmesi için A ve B iş parçasından C iş parçası ölçülerine sahip numune çıkartmak için kesilmiş ve incelemeler yapılmıştır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Döküm numunelerin incelenmek üzere kesilmesi

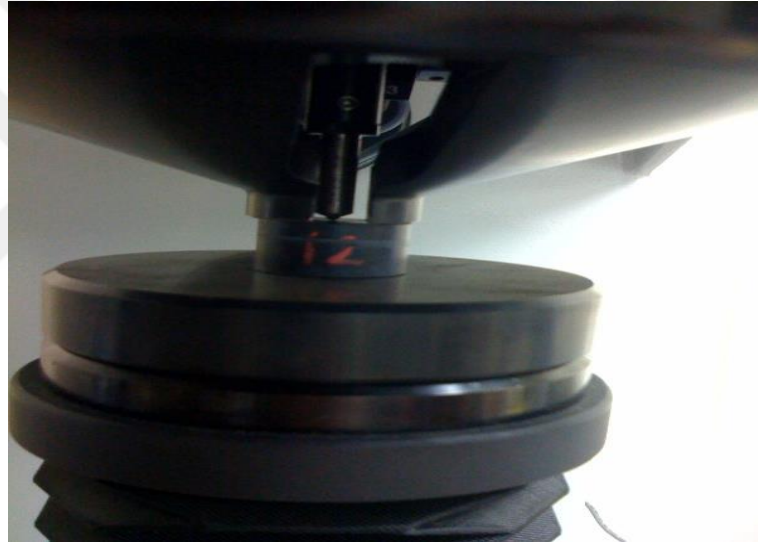
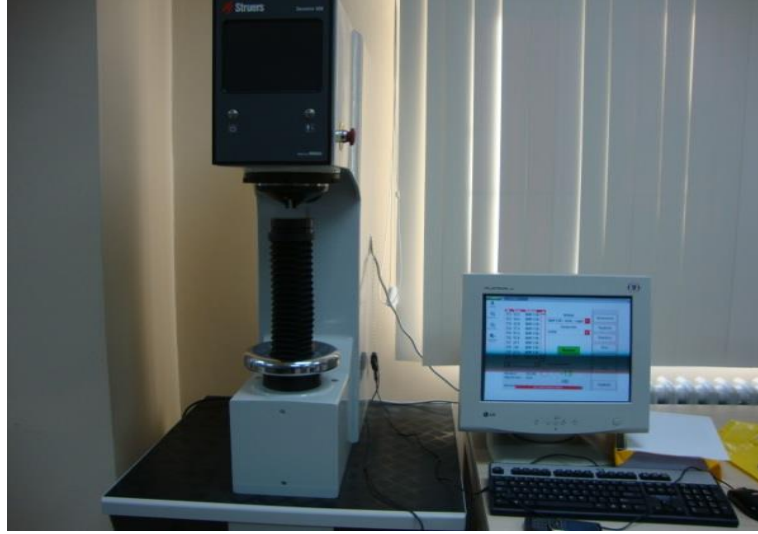
Çıkarılan numuneler 25 x 25 x 300 mm ebatlarındadır (bkz. Şekil 3.9). Çıkarılan numunelerden 2 adet çekme çubuğu çıkartılmış ve orta kısımdan 25 mm kalınlıkta sertlik ve mikro yapı incelemesi için numune elde edilmiştir. Çekme çubuğu, sertlik ölçümü ve mikro yapı incelemelerinin yapıldığı yerler Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.10 Sertlik ölçümü, çekme testi ve mikro yapı incelemelerinin yapıldığı bölgelerin gösterilmesi

3.5 Sertlik Değerlerinin Belirlenmesi

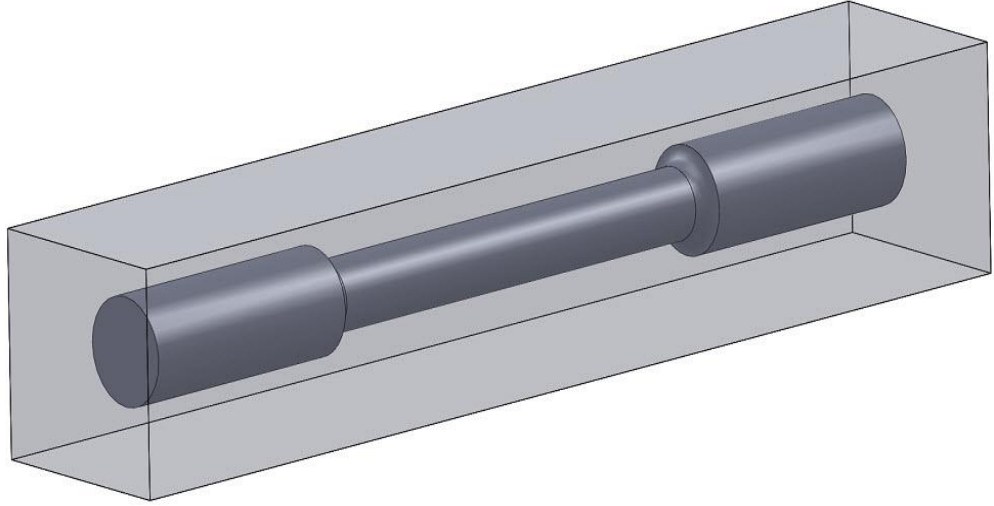
GGGG 70L malzememizin sertlik değerlerinin belirlenmesi amacı ile elde ettiğimiz numunelerin Brinell sertlik ölçümleri yapılmıştır. STRUERS Duramin-500 marka sertlik cihazı ile oda sıcaklığında sertlik işlemleri yapılmıştır. Sertlik işleminde numune sertlik cihazına yerleştiriliyor ardından sertlik işlemine geçiliyor (bkz. Şekil 3.11). Sertlik işleminde numuneye 294,30 N'luk yük uygulanıyor. Bu uygulanan yükün süresi 3 sn sürüyor ve 66,8 x'lik görüntü oluşuyor. Her bir numuneye sertlik testi uygulanmıştır (Şekil 3.11).



Şekil 3.11 Sertlik ölçme testi örnek görüntüleri

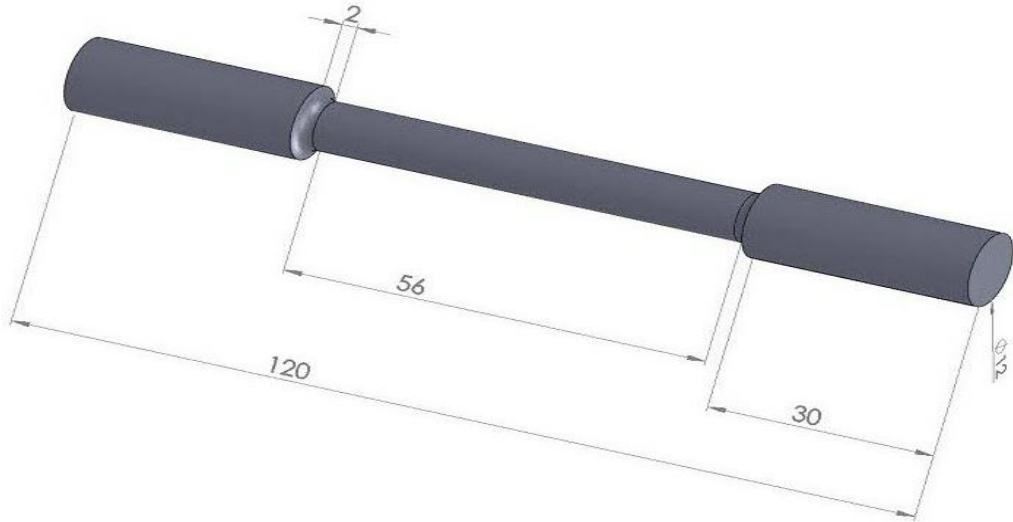
3.6 Çekme Testi Deneyleri

Döküm numunelerden çekme çubuğu işlenmek üzere iki adet 25 x 25 x 135 mm ebatlarında çubuk çıkarıldı (bkz. Şekil 3.10). Çekme numunesinin tasarımı; istenilen ölçülerde çekme çubuğu tasarlanmış olup kesim işlemi yapıldıktan sonra CNC'de işlenerek çekme çubuğu çıkarılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12 Deney çubuğundan çekme test numunesinin çıkarıldığı bölgenin katı iş parçası görüntüsü

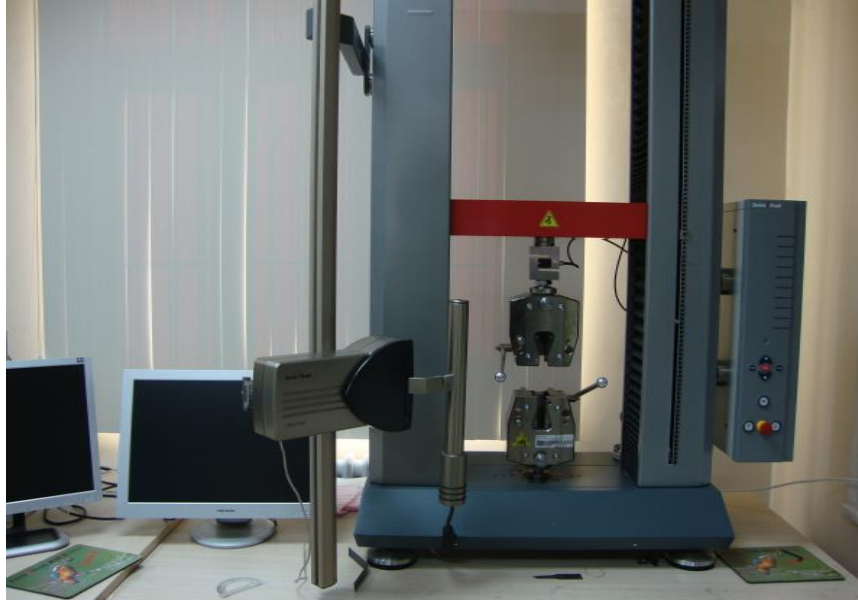
Çekme test çubukları için istenilen boyutlarda hazırlanan numunelerin mm cinsinden ölçülendirmesi yapılmıştır. (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 İstenilen boyutlarda çekme çubuğu alma işlemi

Çekme testleri oda sıcaklığında Zwick-Roell marka çekme test cihazı ile ASTM E 8 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Malzeme, çekme deneyi sonuçlarıyla belirlenen mekanik özelliklerinin yöne göre değişmediği izotropik bir malzemedir. Ortam sıcaklığına ve deney süresince ortaya çıkan gerilme haline bağlı olarak çekme

hızı 0,05 mm/sn'dir. Deneylerde yüzde uzama oranlarının belirlenmesi amacıyla malzemelere işaret konulmuş ve elde edilen sonuçlardan uzama oranları da tespit edilmiştir. İşleme sonrası teste hazır çekme test çubuğu ve çekme testi işleminden örnek görüntüler Şekil 3.14'de verilmiştir.



Şekil 3.14 Çekme çubuğu ve çekme cihazı örnek görüntüler

3.7 Metalografik Hazırlık ve Mikro Yapı Fotoğraf Çekimi İşlemleri

GGG 70L malzemesinin metalografik işlemleri için numuneler şerit testerede daha küçük boyutlara alındıktan sonra disk ile kesilerek yaklaşık olarak 25 x 25 mm boyutlarında kesildi. Daha sonra zımparalama makinesinde numuneler sırasıyla 180, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış akabinde 6 ve 3 μm 'luk elmas pasta süspansiyonu ile keçe üzerinde parlatılmıştır. Numunelere uygulanan zımparalama ve parlatma kademeleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Yüzey işleme durumu

İşlem Sırası	1	2	3	4	5	6
Zımpara Numarası	180	400	600	800	1000	1200
Elmas Süspansiyonu	6 mikron			3 mikron		

Zımparalama ve parlatma işlemi yaparken aşağıdaki esaslara dikkat edilmiştir;

- Zımparalama esnasında kopan tozların parçaya zarar vermemesi için su ile temizlenmesi,
- Zımparalanan malzeme çizikler sadece tek yönde olana kadar ince zımpara kâğıdına geçilmemesi,
- Bir sonra ki zımpara kâğıdına geçildiğinde parça yüzeyine bulunan çizikler 90° gelecek şekilde zımparalamaya devam edilmesi,
- Zımparalama işlemlerinden sonra parlatma işlemine geçilmesi,
- Parlatma işlemi süresince sürekli parça kontrol edilmesi,
- Parlatılan malzemeler dağlama işlemine tabi tutulması.

Metalografik hazırlık süreçlerinden geçirilen numuneler parlatma sonrası % 2'lik Nital ile (% 2 Nitrik asit + % 98 saf alkol) (8-15) sn süre ile dağlanmıştır. Numunelerin mikro yapı incelemeleri, 1000 kez büyütme yeteneğine sahip, 22 mm geniş görüş alanı, ince odaklamada, 0,1 mm ile 1 µm hassasiyet özelliklerine sahip Nikon Eclipse L150-A tip mikroskopta yapılmıştır. Fotoğraf çekimleri bu mikroskoba bağlı çalışan bir Clemex dijital kamera ile alınan görüntüler üzerinden Clemex Vision Lite görüntü analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.8 İmaj Analiz Yöntemi ile Mikro Yapı Karakterizasyonu

Mikroskoba bağlı bir kamera aracılığı ile hazırlanan numunelerden alınan görüntünün bilgisayara aktarılması ve bilgisayarda bir program ile kullanıcı tanımlı, yarı otomatik ya da otomatik olarak analizlerin yapılması şeklinde gerçekleştirilen yöntem imaj analiz yöntemidir. Yazılım mevcut resimdeki renk farklılıklarını dikkate alarak her bir kontrasttaki rengi farklı birer faz ya da bölge olarak algılayıp bize bu farklara göre sonuçlar verme şeklinde analiz yapar. Mikro yapı incelemeleri için belirlenen imaj analiz sistemi görüntüsü Şekil 3.15'de gösterilmektedir.

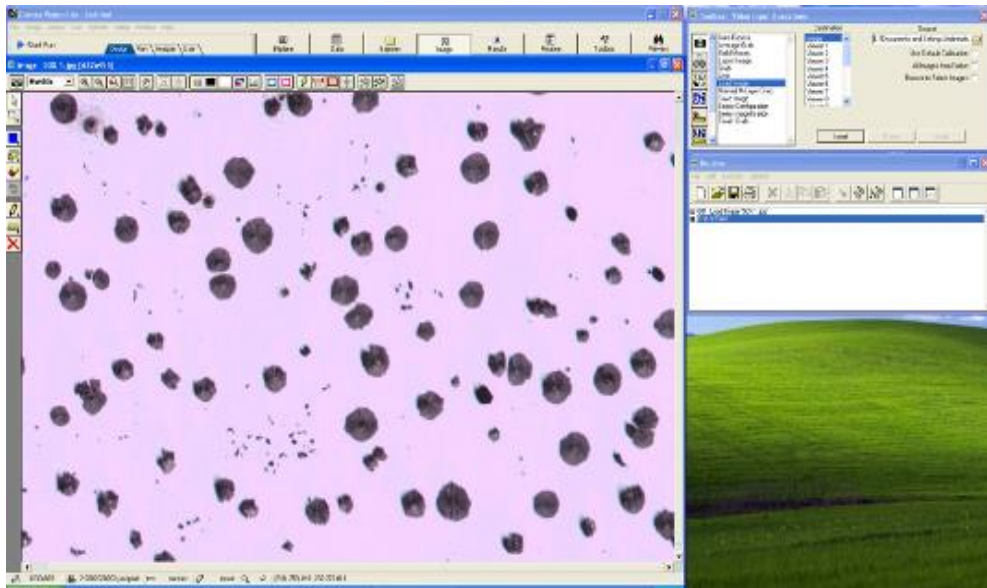


Şekil 3.15 Bilgisayar destekli imaj analiz sistemi görüntüsü (Clemex Defining Intelligent Microscopy, 1990)

İmaj analizi yöntemini kullanarak; gözenek tayini, kaplama kalınlığı ölçümü, dekarbürizasyon derinliği, tane boyutu analizi, kalıntı faz ölçümü, küreselliğin ölçümü, grafit lamel hesabı, faz dağılımı oranının hesaplanması, dentrit kolları mesafesi ölçümü, boy, açı, çevre ve üç noktadan yarıçap ölçümü, tanecik sayımı analizlerinin yapılması mümkündür. Bu çalışmada kimyasal bileşimi verilen numunelere ait mikro yapı incelemeleri ve imaj analiz çalışmaları yapılmıştır (bkz. Çizelge 3.1). Öncelikle parlatılmış numunelerin dağlama öncesi mikro yapı incelemeleri yapılarak; küreselleşme, ortalama küre çapı ve kürelerin yüzde dağılımı incelenmiştir. Sonrasında numune dağlanarak dağlama sonrası mikro yapı incelemesi ve yüzde faz dağılımı belirlenmiştir (Clemex Defining Intelligent Microscopy, 1990; Aob Test Sistemleri, 2007).

3.8.1 Küresellik ölçümleri

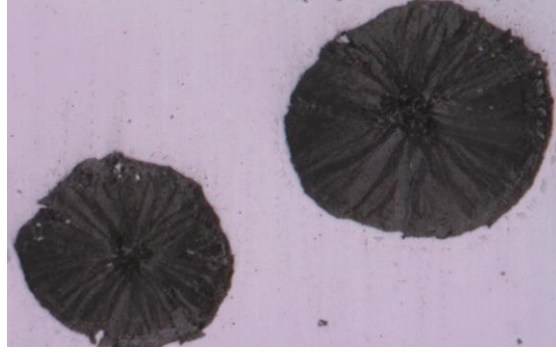
Metalografik hazırlık süreçlerinden sonra numune dağlama öncesi mikroskopta incelenerek KGDD malzemenin kürelerinin ölçümü yapılmıştır. Nikon marka Eclipse L150 A model düz tip optik mikroskoba bağlı çalışan Clemex imaj analiz yazılımı vasıtasıyla çekilen numunenin mikro yapı görüntülerinin fotoğraf görüntüsü Şekil 3.16'da verilmiştir.



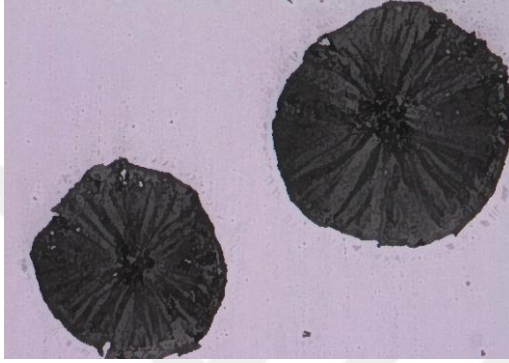
Şekil 3.16 Parlatma sonrası numune örnek mikro yapısı

Resim üzerinde ölçüm ve yapının analiz işlemleri için temel fark gözlemlenen renk farklılıkları olup, inceleme yapılacak görüntünün kalitesi ve netliği sonuçları direkt etkilemektedir. Sonuçlar üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu için yükleme işleminden sonra resim özelliklerinin daha iyi hale getirilmesi gerekmektedir. “Toolbox” menüsü içerisinde “Gray Operations” sekmesinde bulunan farklı alternatifler ile bu durumu sağlamak mümkündür. Bunlar resimdeki ton farklılıklarını daha belirgin hale getiren “Delineate” seçeneği ile resimdeki ton farklılıkları daha belirgin hale getirilebilmektedir. “Smooth” seçeneği ile renkler arasındaki keskin ton geçişleri yumuşatılabilmektedir. Renk karşıtlıklarını güçlendirmek için “Sharpen” ve siyah beyaz renk dönüşümü için ise “Invert” seçenekleri bulunmaktadır. Resim özelliklerinin geliştirilmesi için yapılan uygulamalardaki değişimin resim üzerinde örneklendirilmesi Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Bunlardan yazılımda yapılacak ölçüm ve analize bağlı olarak bazıları ayrı ayrı veya birlikte seçilebilir. Seçimdeki önemli nokta renklerin istenen analize uygun olarak görüntülenmiş olmasıdır.

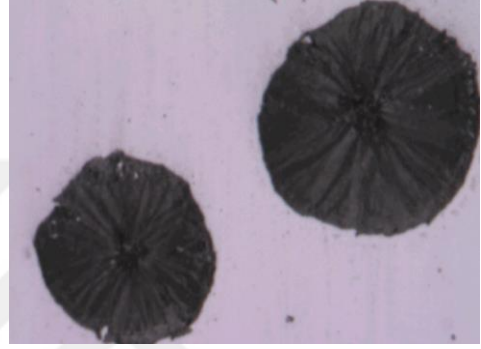
Mikro yapının daha net bir şekilde görülmesi işleminden sonra analiz işlemine geçilir. Bu işlem için ton dönüştürme ayarlaması yapılması gerekmektedir. Ton dönüştürmesi için “Toolbox” menüsü içerisinde “Gray / Binary Operations” sekmesi seçilerek, bu kısımdan yapıda incelemek istediğimiz nesne seçimi sağlanır. Bu adım için resim ve yapılacak analize bağlı olarak farklı alternatifler bulunmaktadır. “Auto Gray Thresholding” seçeneğini kullanarak ton dönüştürme işlemi için seçimi otomatik olarak yapabiliriz. Bu seçim sonrası yapıda kaç farklı faz varsa o kadar ton dönüştürme seçimi yaparız. Seçilen sayıda faz kadar farklı renkte otomatik olarak dönüştürme işlemi yapılmaktadır. Renk eşikleri manuel olarak belirtilerekde bu seçim yapılabilir. Renk eşileştirilmesi yapılan resim Şekil 3.18’de görülmektedir.



Orijinal resim



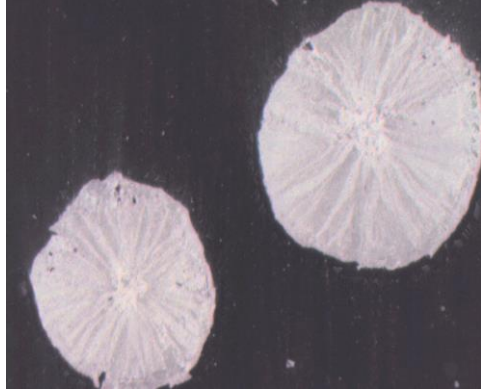
“Delineate” işlemi sonrası



“Smooth” işlemi sonrası

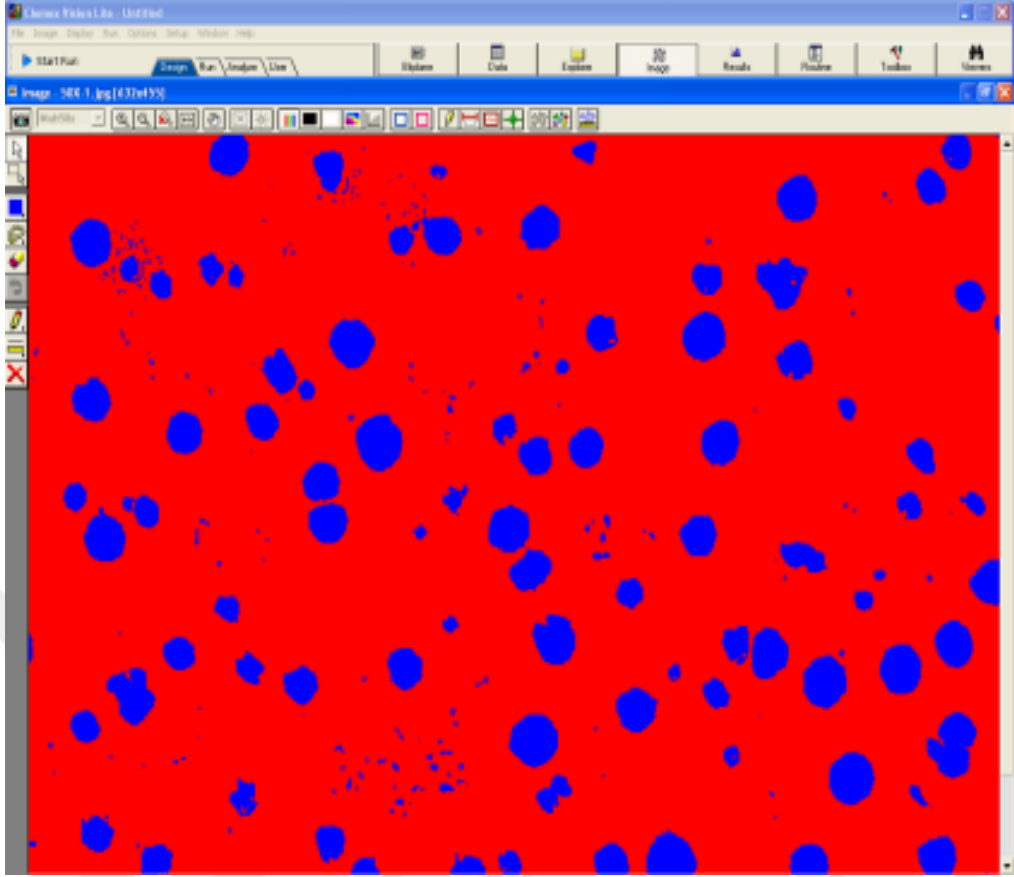


“Sharpen” işlemi sonrası



“Invert” işlemi sonrası

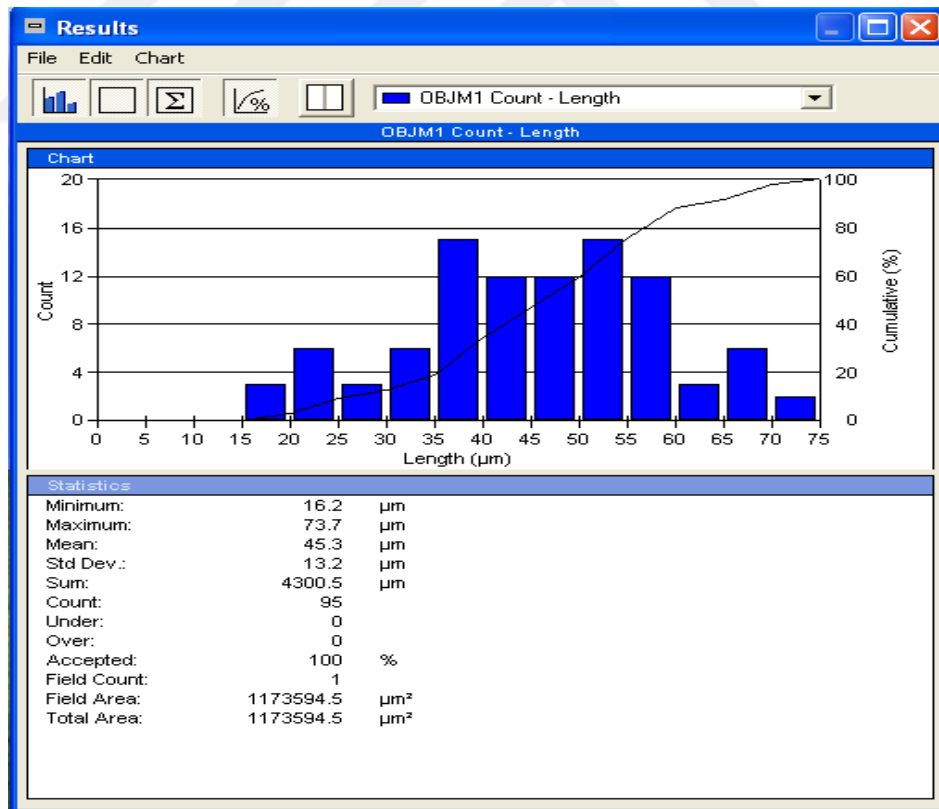
Şekil 3.17 Resim özelliklerinin geliştirilmesi uygulaması örnekler



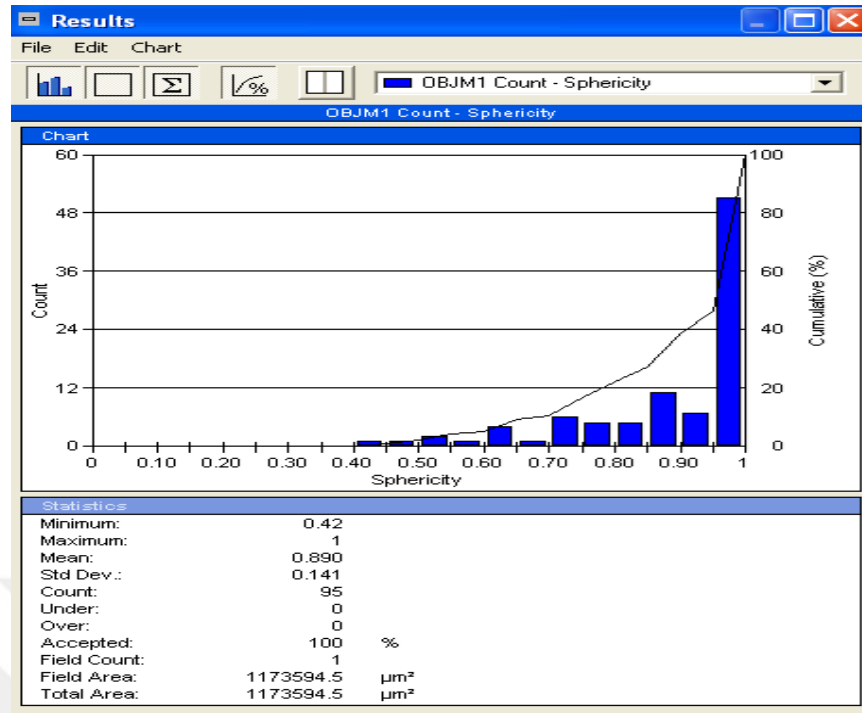
Şekil 3.18 İki faz olduğu varsayılan mikro yapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntü

Eğer sonuçların daha doğru olabilmesi isteniyorsa ton dönüştürme işleminden sonra resim üzerinde bazı revizyonlar yapılması gerekmektedir. Örneğin bazı grafit kürelerinin içlerinde optik mikroskopta farklı bölgeler çıkmıştır. Bu resim sonuçları incelendiğinde sanki küre grafit içinde farklı bir faz varmış gibi değerlendirilmektedir. Bunu önlemek için etrafı kapalı alan oluşturan grafitini içinin doldurulması sağlanır. Numunelerin mikro yapısı analizinde istenen boyutun altındaki kürelerin hesap dışı bırakılması revize edilecek başka bir işlemdir. Mikro yapıda çok küçük boyutta görülen ve grafit olmayan gözenek ve diğer kalıntı şeklinde yapıların renklerinin siyah olarak görülmesinden dolayı yazılım tarafından grafit olarak tanımlanabileceği için, bu yapılar malzeme hakkında sonuçları olumsuz olarak etkilemektedirler. “Toolbox” menüsü içerisinde “Binary Operations” sekmesi içerisindeki “Chord Size” seçeneği işaretlenip, sınır değeri (örneğin 5 μm) belirlenerek işlem onaylandığında belirlenen sınır değerinden daha küçük çaptaki küreler hesap dışı tutularak bu olumsuz durumun önüne geçilebilmektedir.

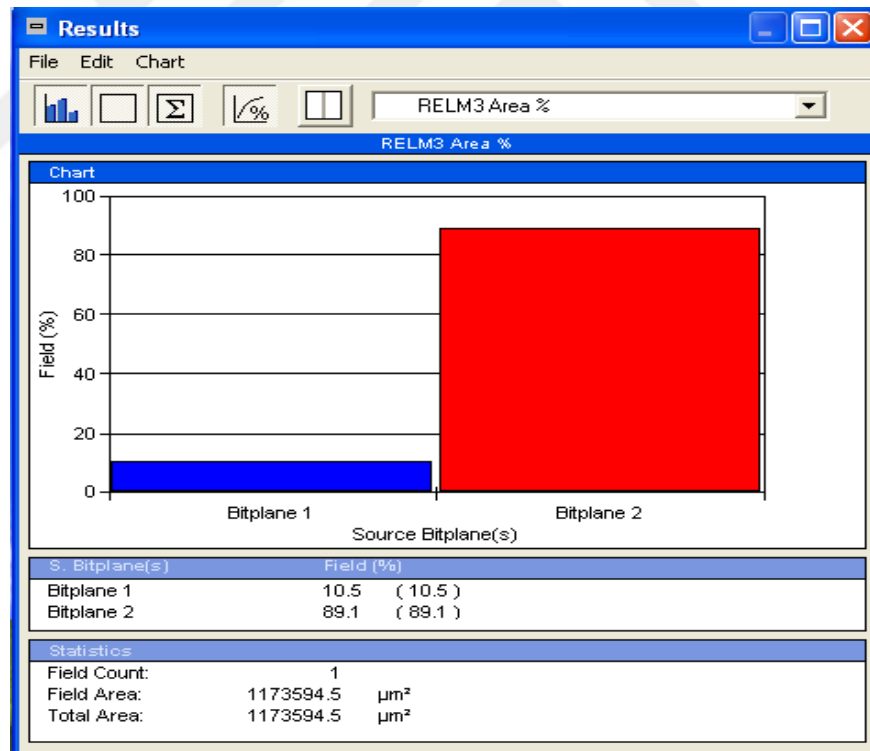
İncelenecek olan resim üzerinde gerekli işlemler yapılacak analiz ve resim özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermekte olup örnek olarak ele alınan KGDD numune mikro yapısında küresellik ölçümü için bu işlemler yeterli görülmektedir. Bundan sonra sonuçların incelenmesi ile analiz tamamlanacaktır. “Object measure”, “Field measure” ve “Relative Measure” olarak 3 farklı şekilde Clemex İmaj analiz yazılımında sonuçlar gözlenebilmektedir. Yapıdaki nesnelere ile ilgili alan, uzunluk, çap, kalınlık, genişlik, küresellik en/boy oranı gibi sonuçları “Object Measure” ile, yapıdaki alan bazlı sonuçları “Field Measure” ile ve mevcut fazların yüzde dağılımı “Relative Measure” sekmeleri ile belirlenerek birbiriyle ilişkili sonuçları görmek mümkündür. Örnek numunenin küresellik işlemi için son olarak “Toolbox” menüsü içerisinde “Object Measure” sekmesi içerisinde “Sphericity” ve “Length” seçilmiştir. Elde edilen sayısal verilere ait sonuçlar Şekil 3.19’da görülmektedir. İnceleme yaptığımız resimdeki numunenin küre sayısı ve uzunlukları Şekil 3.19a’da, küreselleşme oranı Şekil 3.19b’de resimdeki fazların oranları Şekil 3.19c’de gösterilmiştir.



a)



b)



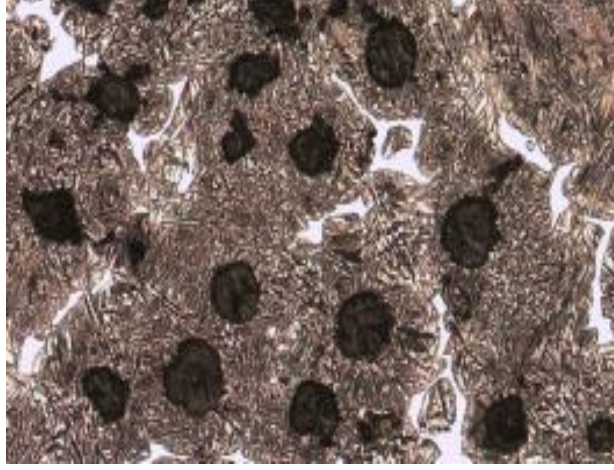
c)

Şekil 3.19 a) Küre sayısı ve uzunlukları, b) Küreselleşme oranı tespiti, c) Faz oranı tespiti

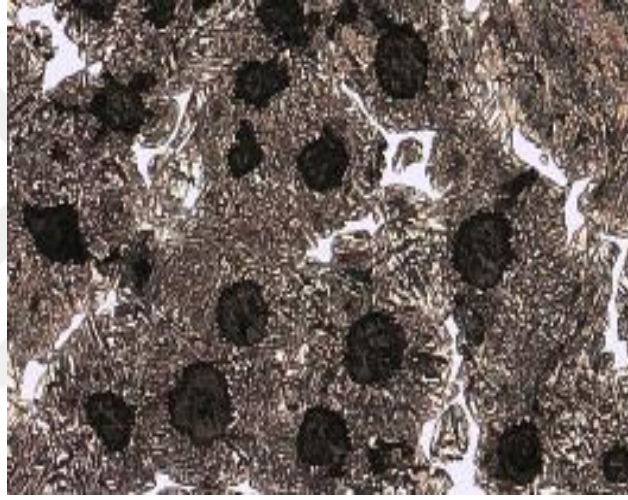
İmaj analiz tekniğiyle elde edilen sayısal verilere ait sonuçlar verilmiştir (bkz. Şekil 3.19). İnceleme yaptığımız resimdeki numunenin sonuçlarına baktığımızda mikro yapı üzerinde 95 adet küre tespit edilmiş ve minimum küre çapı: 16,2 μm , maksimum küre çapı: 73,7 μm , ortalama çap ise 45,3 μm olarak bulunmuştur (bkz. Şekil 3.19a). Tespit edilen 95 adet kürenin, küreselleşme oranı incelenmiş ve küreselleşme oranı % 89 olarak bulunmuştur (bkz. Şekil 3.19b). Resimdeki fazların oranları karşılaştırıldığında ise mavi fazın oranı % 10,5, kırmızı fazın oranı % 89,1 ve yok saydığımız alan ise % 0,4 olarak ölçülmüştür (bkz. Şekil 3.19c).

3.8.2 Faz analizi incelemeleri

KGDD malzemeye ait dağlanmış numunenin örnek mikro yapı fotoğraf görüntüsü ve resime işlem uygulandıktan sonraki görüntüsü Şekil 3.20'de gösterilmektedir. Dağlama sonrası KGDD numunesinin örnek numune yapısının görüntüsü Şekil 3.20a'da görülmektedir. Faz dağılımı hesaplamaları verilen örnek resim üzerinde yapılacaktır. Numunemizin içyapısında oluşan farklı fazlar resimde farklı renklerde görülmektedir. Bu sebeple faz ayırımı program tarafından renk değişimine göre yapılmaktadır. İnceleme yapılacak görüntünün kalitesi ve netliği sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple resim üzerinde yükleme işlemi sonrası resim özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bunun için "Toolbox" menüsü içerisinde "Gray Operations" sekmesinde "Delineate" seçeneği kullanılmıştır. Resim özelliklerinin geliştirilmesi için yapılan uygulama sonucu mikro yapıdaki değişim Şekil 3.20.b'de gösterilmiştir. Resimde görülen yapının daha net bir şekilde görülmesi işlemi tamamlandıktan sonra analiz yapmak için renk eşleştirmeleri yapılmıştır. Renk eşleştirmesi için resim ve yapılacak analize bağlı olarak farklı alternatifler mevcuttur.



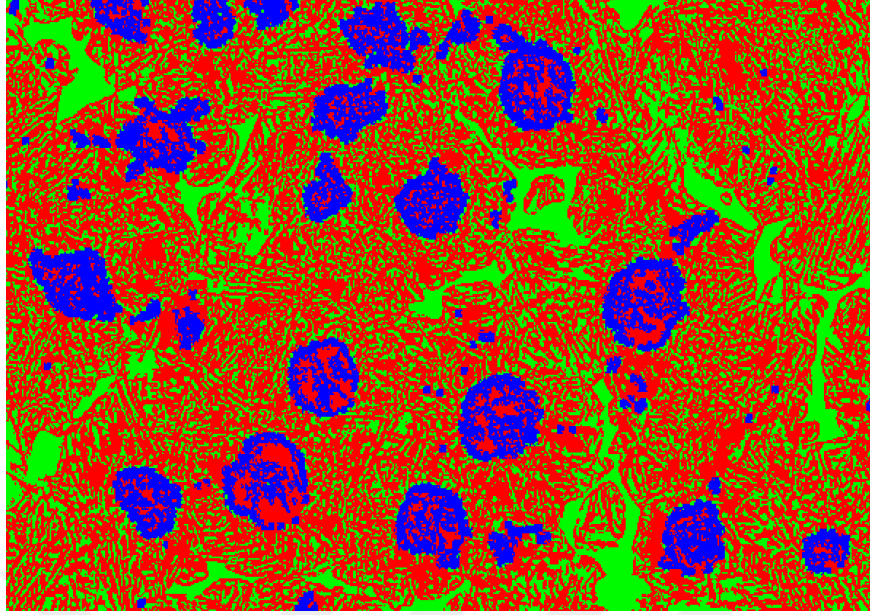
a)



b)

Şekil 3.20 a) KGDD numune örnek mikro yapısı 100x büyütmede (dağlama sonrası), b) Resim özelliklerinin delineate işlemi uygulanarak geliştirilmesi

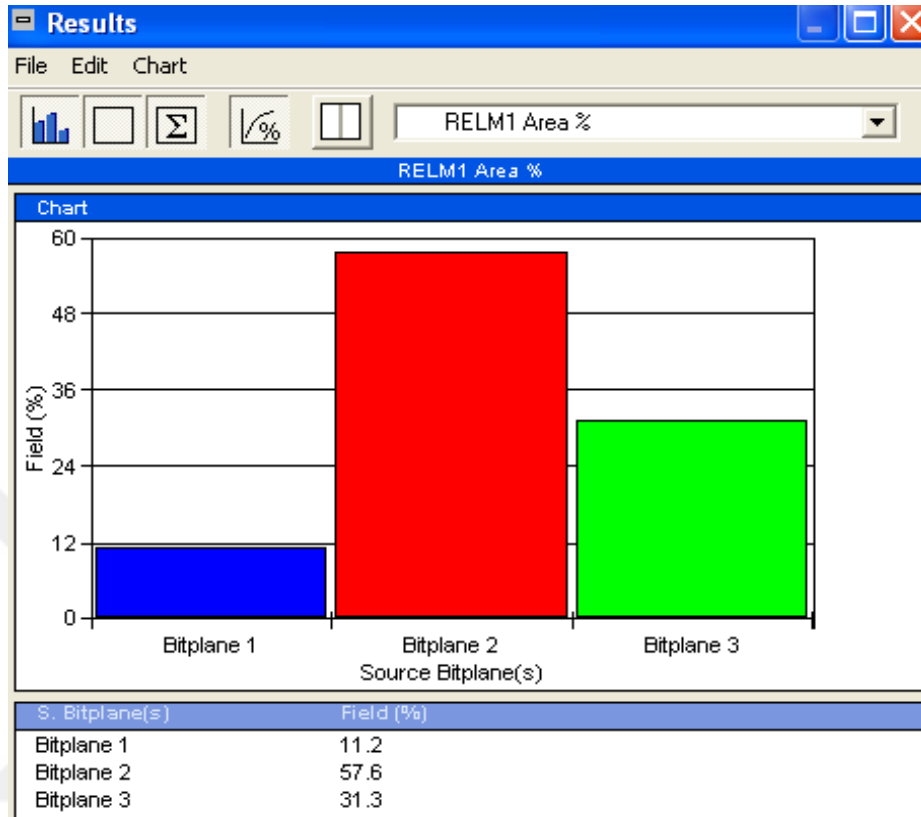
Renk eşleştirme işlemi için seçimi otomatik olarak “Auto Gray Thresholding“ seçeneğini kullanarak yapabiliriz. Bu seçim sonrası yapıda kaç farklı faz varsa o kadar renk eşleştirmesi seçimi yaparız. Numune mikro yapı resmi incelendiğinde malzemenin kimyasal bileşim ve üretim şartlarına bağlı olarak yapıda siyah renkte görülen küresel grafitler, beyaz renkte görülen sementit ve beynit yapıda gözlenmiştir. Eşleştirme işlemi seçilen sayıda faz kadar farklı renkte bölge otomatik olarak belirlenmektedir. Bu seçim istenirse renk eşiklerinin elle olarak da ayarlanması yapılabilir. Renk eşleştirmesi yapılan resim Şekil 3.21’de görülmektedir.



Şekil 3.21 Numune mikro yapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntü

Resimdeki renk eşleştirmesi tamamlandıktan sonra istenirse sonuçlara geçilebilir. Ancak resimdeki renk dağılımından da anlaşılacağı gibi bu sonuçlar bizi yanıltır. Çünkü resimde mavi renkte görülen küresel grafitlerin içinde kırmızı renkte tanımlanan beynit varmış gibi görülmektedir. Bu bizi yanıltacaktır. Bu hatayı önlemek için kürelerin içinin mavi renge dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem için “Toolbox” menüsü içerisinde “Binary Operations” sekmesi içerisindeki “Fill” seçeneği işaretlenerek içerişi doldurulmak istenen renk belirlenir. Bu şekilde etrafı kapalı alan oluşturan resimde mavi renkten görülen kürelerin içini de mavi renkte algılaması sağlanacaktır. Bu işlem sonrasında resim üzerinde orijinal resim incelenerek sonuçların daha doğru olması açısından düzeltilmesi gereken bir işlem varsa düzeltme yapılır. Örnek olarak orijinal resimde mavi renkte görülen çok küçük küresel grafitler bulunmamaktadır. Bunu gidermek için belirli bir çapın altındaki kürelerin seçiminin kaldırılmasını sağlayabiliriz. Bu işlem “Toolbox Binary Operations” içindeki “Chord Size” seçeneği ile yapılır. Resim üzerindeki gerekli revize işlemleri bittikten sonra sonuçların incelenmesine geçilebilir. Resim üzerindeki 3 farklı fazın yüzde dağılımının bulunması için “Toolbox” menüsü içindeki “Relative Measure” sekmesinden “Area Percent” işaretlenir. Bu kısımda hangi renkte belirlenen renklerin faz dağılımlarını bulmak istiyorsak ilgili renkler

seçilir. Sonrasında “Insert” tuşuna basılarak sonuçlar gözlemlenir. Sonuçlar Şekil 3.22’de görülmektedir.



Şekil 3.22 Örnek mikro yapı numunesi için yüzde faz dağılımı

Sonuçlar incelendiğinde mavi renkte görülen küresel grafitlerin % 13,2, kırmızı renkte görülen beyritin % 55,5 ve yeşil renkte görülen ferritin % 31,3-31,2 olduğu tespit edilmiştir.

3.8.3 Taramalı elektron mikroskop (SEM-EDS) analizi

Farklı modüllerdeki GGG70L alaşım yapılarını incelemek amacıyla mikro yapı için hazırlanmış numune yüzeyleri kullanılmıştır. Farklı modüllerdeki GGG70L alaşımının yüzey görüntüleri incelenmiştir. Numuneler Bayburt Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında bulunan FEI Nova Nano SEM 450 markalı Taramalı Elektron Mikroskop (SEM) cihazında incelenmiştir. Cihaz 3.23’de gösterilmektedir.



Şekil 3.23 Taramalı elektron mikroskop (SEM) cihazı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Deneysel sonuçlar olarak, farklı modül değerlerine sahip GGG70L KGDD numunelere ait mekanik test ve mikro yapı incelemesi sonuçları verilecektir. Mekanik testler kapsamında çekme deneyleri ve sertlik deneyleri yapılmış ve sonuçların modüle bağlı olarak değişimleri tartışılmıştır.

Ticari olarak faaliyet gösteren Daloğlu Döküm Makina San. ve Tic. A.Ş. firmasında üretilen farklı mikro yapı özellikleri gösteren KGDD numunelerin mikro yapı incelemeleri bilgisayar destekli imaj analiz yazılımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Mikro yapı incelemelerinde modül değişiminin yapıda grafit oluşumuna etkisi değerlendirilmiştir. Numunelerin mikro yapı özelliklerinden üretimlerinin dökülen standarda uygunluğu kontrol edilecektir. Numuneler parlatma sonrası ve dağlama sonrası ayrı ayrı mikro yapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Bu sebeple sonuçlar buna uygun olarak parlatma sonrası ve dağlama sonrası olarak ayrı ayrı verilecektir.

4.1 Kimyasal Bileşim Uygunluğunun Kontrolü

Döküm deneylerinde kullanılan alaşımlar uygunluğunun kontrolü için alınan numunelere ait kimyasal bileşim analiz sonuçları ile ilgili değerler Çizelge 4.1’de verilmiştir. Kimyasal analiz deneyleri numunelerin üretildiği Daloğlu Döküm firmasında bulunan spektrometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Kimyasal bileşim değerleri incelendiğinde alaşımların standart bileşim aralığında olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 4.1 Deneylerde kullanılan GGG70L döküm alaşımının kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Mg
%	3,36	2,38	0,5	0,03	0,01	0.019	0,44	0,72	0,56	0,05

4.2 Mekanik Test Sonuçları

4.2.1 Çekme testi deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

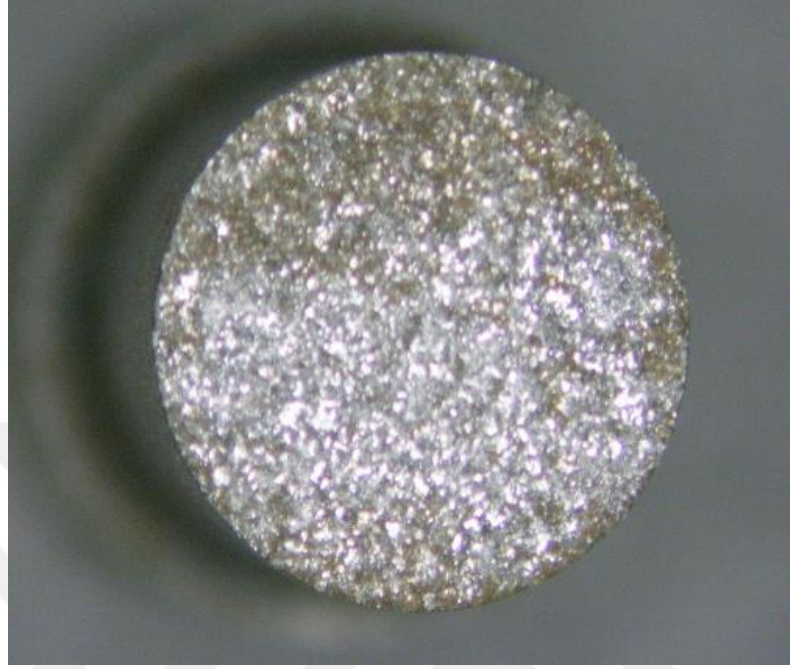
Döküm deneylerinden materyal ve yöntem bölümünde anlatıldığı gibi çekme çubukları çıkarılmış ve numuneler verilen ölçülere uygun olarak çekme testi için hazırlanmıştır (bkz. Şekil 3.13). Çekme testleri oda sıcaklığında Zwick-Roell marka çekme test cihazı ile 0,05 mm/sn hızda gerçekleştirilmiştir. Farklı modüle sahip A, B ve C numunelerinden üçer adet çekme testi gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri sonucunda elde edilen numunelerden bazılarının kırılma görüntüsü Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 Çekme testi sonucu numunelerin kırılma görüntüsü

Çekme deneyi sonucu elde edilen değerler GGG70L malzemeden beklenen özelliklerin altında kaldığı deneylerde testler tekrar edilmiştir. Yapılan incelemelerde ilgili testlerde numunelerin yüzey işleme sırasında gözle görülemeyecek küçük çentiklerden ötürü numunenin beklenmeyen yerlerinden kırılma gerçekleştiği gözlenmiştir. Ancak her bir numune için en az 3 test sonucuna göre değerlendirmeler yapılmıştır. Test sonuçlarının değerlendirilmesinde numunenin kırıldığı yerin dışında

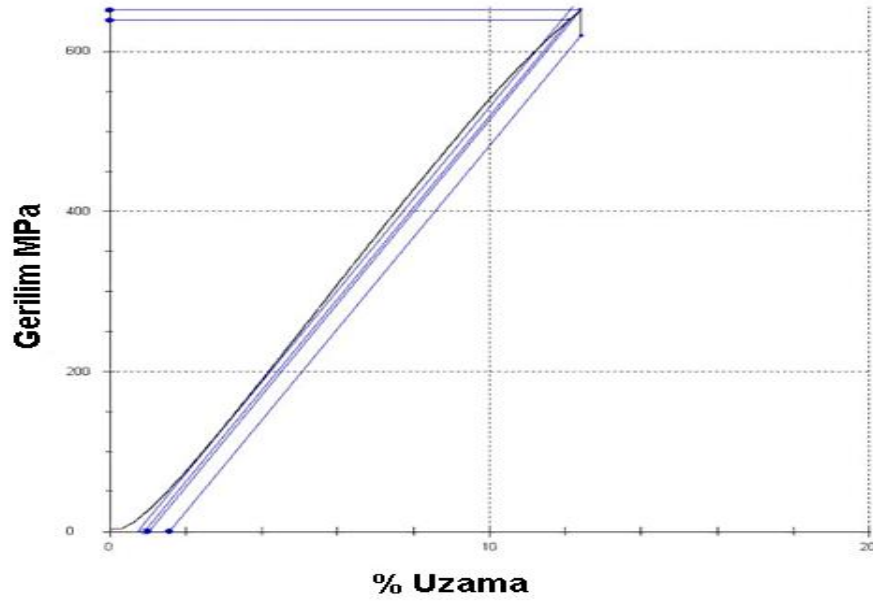
numune kırık yüzeyleride değerlendirilmiştir. Çekme testi sonucu kırılan numune kırık yüzey görüntüsü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2 Çekme testi sonrası numune kırık yüzey görüntüsü

Görüldüğü gibi test sonucu kırılan yüzey istenilen formda istenilen bölgeden kopmuştur (bkz. Şekil 4.1). Kopma yüzeyinde ise herhangi bir porozite ve inklüzyon olmadığı gözlenmiş ve kopmanın istenen şekilde gerçekleştiği anlaşılmıştır (bkz. Şekil 4.2).

Çekme testi sonrası her bir numune için test cihazından veriler grafik olarak ve excel dataları olarak elde edilmiştir. Örnek olarak cihazdan alınan her bir numune için gerilim uzama diyagramı Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3 Test cihazından alınan örnek gerilim uzama diyagramı görüntüsü

Numunelere ait cihazdan elde edilen veriler ile yapılan çalışmalar sonucu deney numunelerine ait çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve % uzama değerleri tespit edilmiştir. Her bir numune için sonuçlar toplu olarak Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 Deney numunelerine ait ortalama çekme testi sonuçları

Deney Numunesi	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
A iş parçası	620,4	504,8	5,4
B iş parçası	671,8	546,2	4,2
C iş parçası	725,2	564,6	2,6

Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde numunelere ait çekme mukavemeti değerlerinin GGG70L standardı numune için belirtilen standartlara uygun olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca % uzama ve akma mukavemeti değerleri de ilgili alaşım standardında belirtilen değer aralıklarında olduğu tespit edilmiştir. Modül değişiminin ilgili alaşıma ait çekme testi üzerindeki etkisi değerlendirildiğinde ise modül değişimine bağlı olarak çekme, akma mukavemetinde artış ve % uzama değerlerinde azalış gösterdiği görülmektedir. 2,14 cm modüle sahip A iş parçasında çekme mukavemeti değeri 620,4 MPa iken, 1,15 cm modüllü B iş parçasında 671,8 MPa ve 0,6 modüllü C iş parçasında ilgili değer yaklaşık %15 artışla 725,2 MPa seviyelerine kadar çıktığı görülmüştür. Modüle bağlı olarak değişim numune iç yapısı ile ilişkili olduğu ve mikro yapıda ortaya çıkan grafit kürelerinin boyut ve dağılımlarının modül küçülmesine bağlı olarak değişmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir (bkz. Çizelge 4.2). Konu ile ilgili yapılan literatür araştırmalarında da modül küçülmesinin mikro yapıda grafitlerin küre boyutları ve biçimlerini ve homojen bir dağılım sergileme yönünde davranış gösterdiğini açıklayan birçok çalışma mevcuttur. KGDD'lerin mikro yapısında bulunan küreler yağlayıcı özellik göstererek malzemenin mukavemetini arttırdığı düşünülmektedir. Dolayısıyla ne kadar küçük çapta ve fazla sayıda küre grafit var ise buna bağlı olarak döküm numune mukavemeti artış göstermektedir.

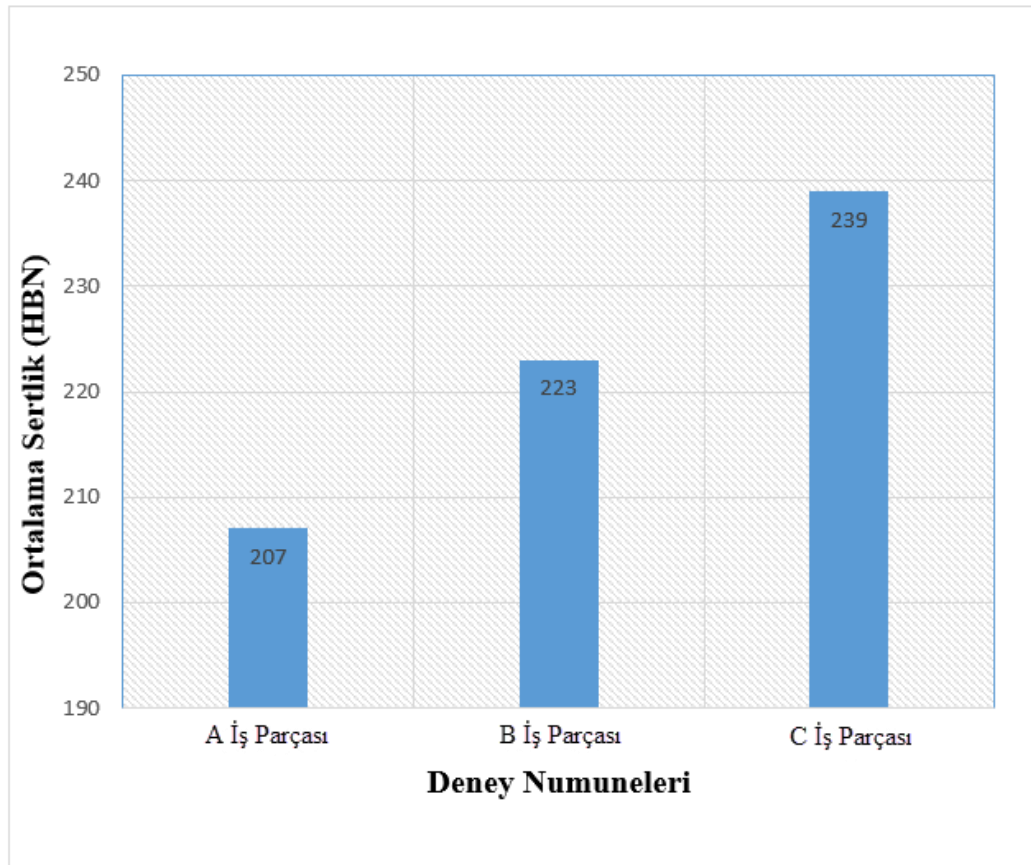
Alabbasian vd. (2016) çalışmasında dökme sünek Ni dirençli dökme demirin mikro yapı ve mekanik özellikleri oda sıcaklığında incelemiştir. En yüksek çekme mukavemetine sahip numunenin 2 mm kalınlıktaki numune olduğu görülmüştür. Çekme dayanımı kalınlık arttıkça azalmıştır (Alabbasian vd. 2016).

Kasvayee vd. (2017) çalışmasında, % 2,36 ve % 3,71 silikon muhtevasına sahip GJS-500-7 ve GJS-500-14 iki sünek demir kullanmıştır. 7 mm levhalar için 5 mm kalınlıkta, 7.5 mm genişliğinde ve 80 mm uzunluğundaki ölçülerde çekme numuneleri elde edilmiştir. Çekme testleri, bir Zwick/Roell Z100 test makinesi kullanılarak yapılmıştır. 7 mm'lik plakadan 30 mm'lik plakaya gittikçe GJS-500-7'de % 0,2 akma dayanımı için 375'ten 310 MPa, GJS-500-14'de 0,2 akma dayanımı için 381-407 MPa ve GJS-500-14 (Sb) 0,2 akma dayanımı için 381-401 MPa aralığında ölçülmüştür (Kasvayee vd. 2017).

Javaid vd. (1999) ve Achour vd. (2000) çalışmasında numuneleri çekme dayanımı bakımından kıyasladığında 3 mm kalınlıktaki plakalardan elde edilen numunelerin 12 mm kalınlıktan elde edilen numunelerden daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğunu belirlemişlerdir (Javaid vd. 1999; Achour vd. 2000).

4.2.2 Sertlik testi deneyi sonuçları ve değerlendirilmesi

Farklı modül değerlerine sahip döküm deneylerinde elde edilen numunelere ait sertlik ölçümleri 294,30 N'luk yük ile 3 saniyede gerçekleştirilmiştir. Kalıp içerisinde dökülen alaşımların aynı bölgelerinden karşılaştırma amaçlı alınan numunelerine ait ortalama sertlik değerleri Şekil 4.4'de verilmiştir. İlgili numuneler için en az 5 ölçüm gerçekleştirilerek ortalama değerler elde edilmiştir.



Şekil 4.4 Döküm deney numunelerine ait sertlik testi sonuçları

Sertlik testi sonuçlarından da görüldüğü gibi A iş parçasında 207 BSD, B iş parçasında 223 BSD ve C iş parçasında 239 BSD sertlik değeri tespit edilmiştir (bkz. Şekil 4.4). İlk olarak belirtilmesi gereken husus; ilgili sertlik değerlerinin GGG70L KGDD standardına uygun ve kabul edilebilir seviyelerdedir. Sonuçlarda dikkat çeken bir husus çekme testinde de olduğu gibi sertlik değerleri modül değişimine bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Modül değerinin düşmesine bağlı olarak sertlik değerleri daha hızlı katılaşmadan dolayı artış göstermiştir. Deney numuneleri içerisinde en düşük modüle sahip C iş parçası 239 BSD ile en yüksek sertlik değerine sahip numune olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde sertlik testi sonuçlarının mevcut literatürde yapılan benzer çalışmalar ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Ekinci (2009) çalışmasında üç farklı aşılama için numunelerde yapılan sertlik testi sonuçlarına bakıldığında kalınlık azaldıkça (veya modül) sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Kalınlık değişimine bağlı olarak sertlik değişimi Çizelge 4.3'de verilmiştir (Ekinci, 2009).

Çizelge 4.3 Vaxon, Barinoc ve UltraSeed ile aşılama numunelerinin sertlik değerleri (Ekinci, 2009)

	2 mm	3 mm	6 mm	12 mm
Vaxon	285	250	195	185
Barinoc	295	235	190	170
UltraSeed	280	245	200	180

Alabbasian vd. (2016) çalışmasında değişen kalınlıktaki numunelerin sertlik değerleri üzerindeki etkisini incelemiştir. En yüksek sertlik değeri 2 mm kalınlıktaki numunede belirlenmiş olup, onu sırasıyla 6 mm ve 10 mm kalınlıktaki numune takip etmektedir (Alabbasian vd. 2016).

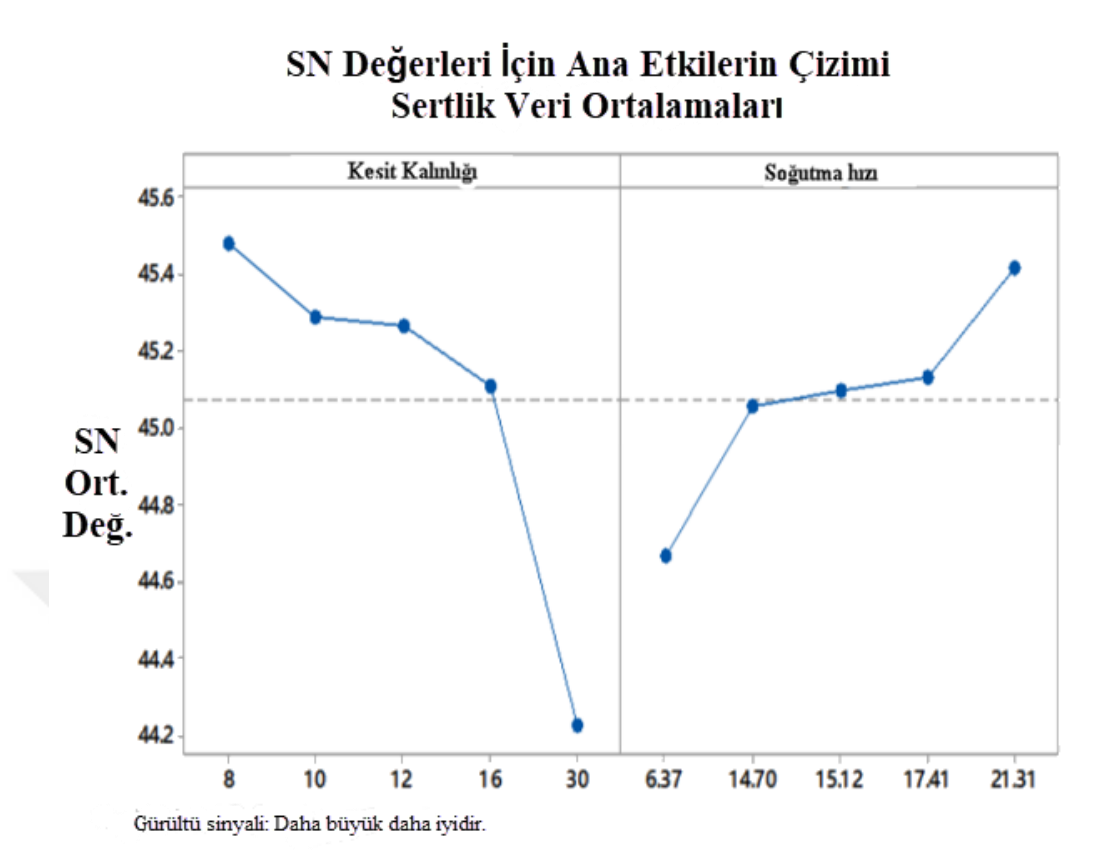
Güzel vd. (2014) çalışmasında KGDD'lerde kesit kalınlığının mikro yapı ve sertlik üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Farklı kesit kalınlıklar üzerinde yaptığı sertlik testi sonucunda kesit kalınlığı arttıkça sertliğin düştüğü sonucuna ulaşmıştır (Çizelge 4.4) (Güzel vd. 2014).

Çizelge 4.4 Farklı numunelere ait kesit kalınlığına bağlı olarak sertlik sonuçları (Güzel vd. 2014)

Numuneler	Kesit Kalınlığı (mm)	Sertlik (HB)
1	12,7	198
2	25,4	177
3	38,1	170
4	50,8	158
5	63,5	148
6	76,2	140

Kasvayee vd. (2017) çalışmasında, % 2,36 ve % 3,71 silikon muhtevasına sahip GJS-500-7 ve GJS-500-14 iki sünek demir kullanmıştır. Brinell sertliği, 750 kg yük ve 5 mm çelik bilya kullanılarak ISO 6506-1: 2005 standardında altı farklı kalınlıkta 7, 15, 30, 50, 75 mm plaka kalınlıkları için ölçümler yapılmıştır. Brinell sertlik sonuçlarına göre GJS-500-7'de 7 ve 15 mm plakalar için en yüksek ortalama sertliği ortaya çıkmıştır. Plaka kalınlığının değiştirilmesi GJS-500-14 kalite için anlamlı bir fark teşkil etmemiştir (Kasvayee vd. 2017).

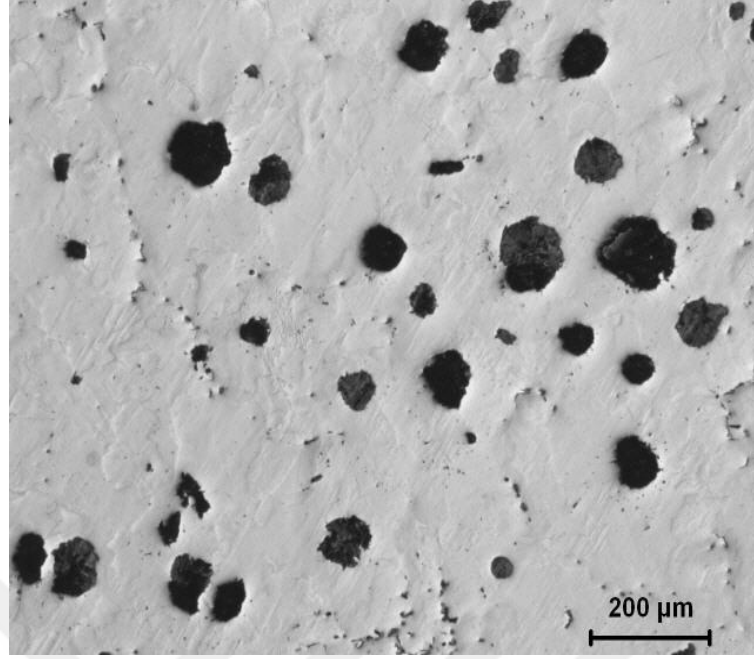
Kabnure vd. (2017) çalışmasında otomobil çark dökümü üzerinde araştırma yapmıştır. Dökülmüş dökümlerden alınan farklı kesit kalınlıklarına sahip numuneler sertlik açısından incelemiştir. Yaptığı sertlik ölçümleri sonucunda soğuma hızındaki artışla ve kesit kalınlığının azalmasıyla arttığı ortaya konulmuştur. SN (sinyal/gürültü) oranı olup kesit kalınlığı ve soğuma hızının sertliğe etkisi Şekil 4.5'de verilmiştir (Kabnure vd. 2017).



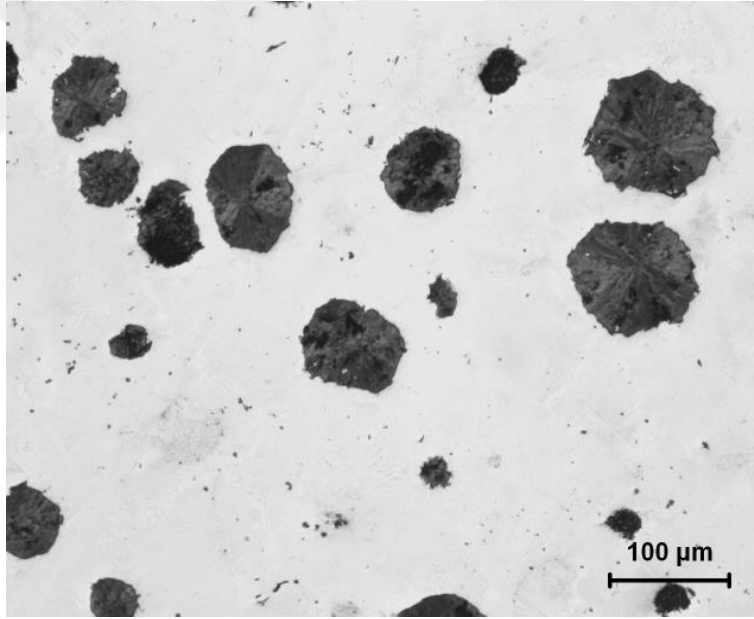
Şekil 4.5 Soğuma hızı ve kalınlıktaki değişime bağlı olarak ortaya çıkan sertlik değerleri (Kabnure vd. 2017)

4.3 Mikro Yapı İncelemeleri

Döküm numunelerden, değişen modül değerlerinde oluşan iç yapının incelenmesi için numuneler alınmıştır. Numuneler metalografik olarak hazırlandıktan sonra mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Modül farkına bağlı mikro yapı değişimlerinin görülmesi amacıyla yapılan dökümlerden alınan mikro yapı resimleri çekilmiştir. 2,14 cm modüle sahip A iş parçası için 50x ve 100x büyütmelerde parlatma sonrası çekilen mikro yapı resimleri Şekil 4.6'da verilmiştir. 1,15 cm modüllü B iş parçası için 50x ve 100x büyütmelerde parlatma sonrası çekilen mikro yapı resimleri Şekil 4.7'de verilmiştir. 0,6 cm modüllü C iş parçası için benzer şekilde 50x ve 200x büyütmelerde parlatma sonrası çekilen mikro yapı resimleri Şekil 4.8'de verilmiştir.

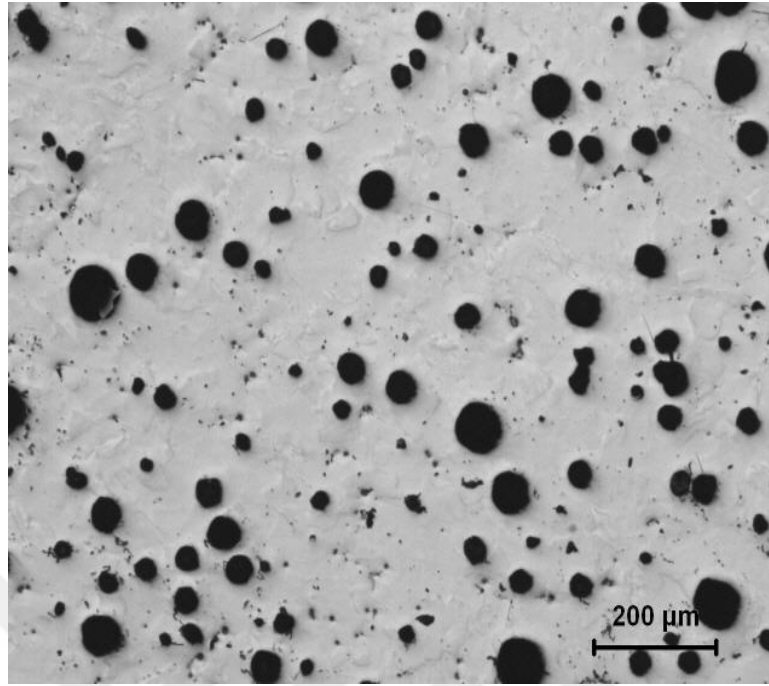


a)

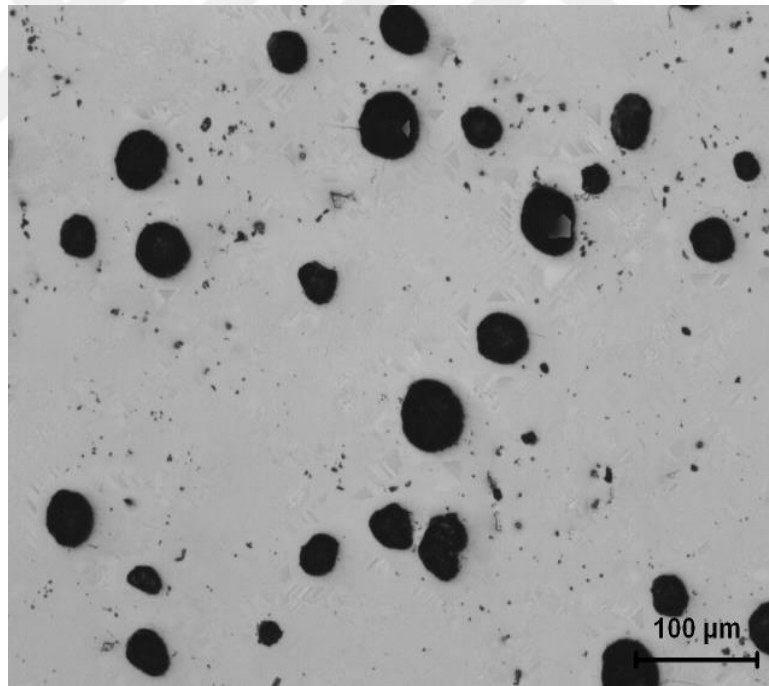


b)

Şekil 4.6 A iş parçası için, a) 50x büyütmede, b) 100x büyütmede çekilen parlatma sonrası mikro yapı görüntüleri

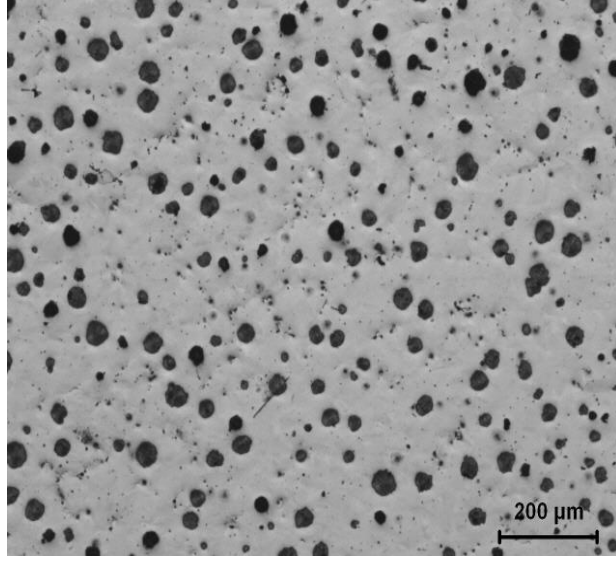


a)

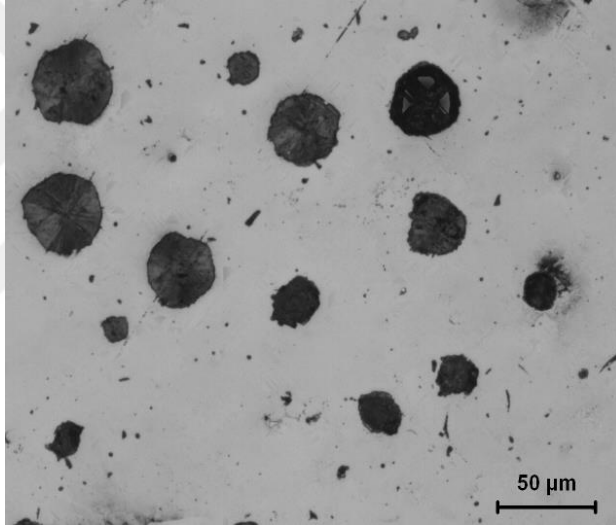


b)

Şekil 4.7 B iş parçası için, a) 50x büyütmede, b) 100x büyütmede çekilen parlatma sonrası mikro yapı görüntüleri



a)



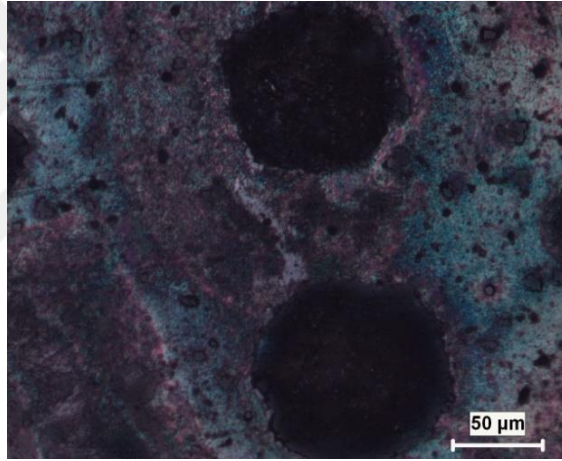
b)

Şekil 4.8 C iş parçası için, a) 50x büyütmede, b) 200x büyütmede çekilen parlatma sonrası mikro yapı görüntüleri

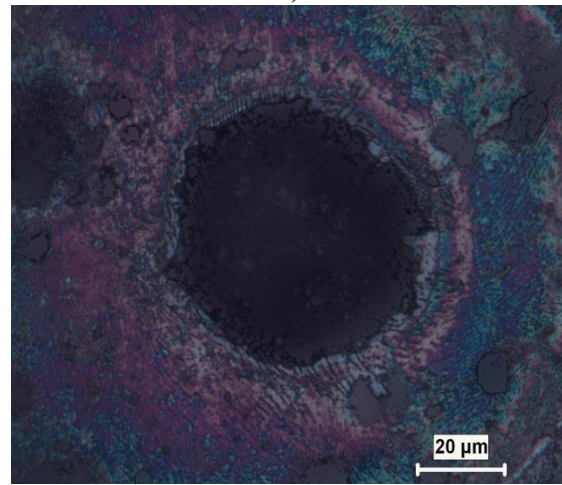
Mikro yapı resimleri incelendiğinde ilk olarak matris üzerinde küresel grafitlerden oluşan bir yapı karşımıza çıktığı anlaşılmaktadır. Grafitlerin küre şeklinde katılmış olması da numunelerin ve küreleştirme işleminin beklendiği gibi yapıldığı sonucunu ortaya çıkarmaktadır. Modül değişiminin, mikro yapı üzerindeki etkisi incelendiğinde şekillerden de açıkça görüldüğü gibi modül değerinin azalmasına başka bir deyişle katılma hızının artması daha kısa zamanda katılmanın gerçekleşmesine bağlı olarak numunelerde ortaya çıkan grafit kürelerinin çaplarının azaldığı görülmektedir (bkz Şekil 4.6, bkz Şekil 4.7, bkz Şekil 4.8). Modül değişimi

mikro yapıda ortaya çıkan grafit kürelerinin ve döküm malzemenin özelliklerine doğrudan etki etmektedir.

Ana matris üzerindeki fazların tespiti için numunelerin dağlama sonrası mikro yapısı incelenmiştir. Dağlama işlemi; metalografik hazırlık süreçlerinden geçirilen numunelerin parlatma sonrası % 2'lik Nital ile (8 -15) sn süre ile tatbik edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. A iş parçasından alınan numunelere ait 200x ve 500x büyütmeden çekilen dağlanmış mikro yapı resimleri Şekil 4.9'da verilmiştir. B iş parçasından alınan numunelere ait 200x ve 500x büyütmeden çekilen dağlanmış mikro yapı resimleri Şekil 4.10'da verilmiştir. C iş parçasından alınan numunelere ait 200x ve 500x büyütmeden çekilen dağlanmış mikro yapı resimleri ise Şekil 4.11'de verilmiştir.

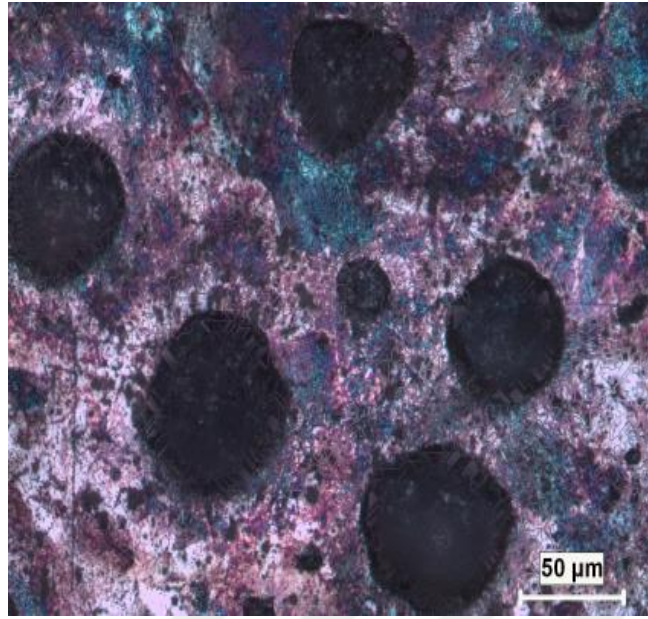


a)

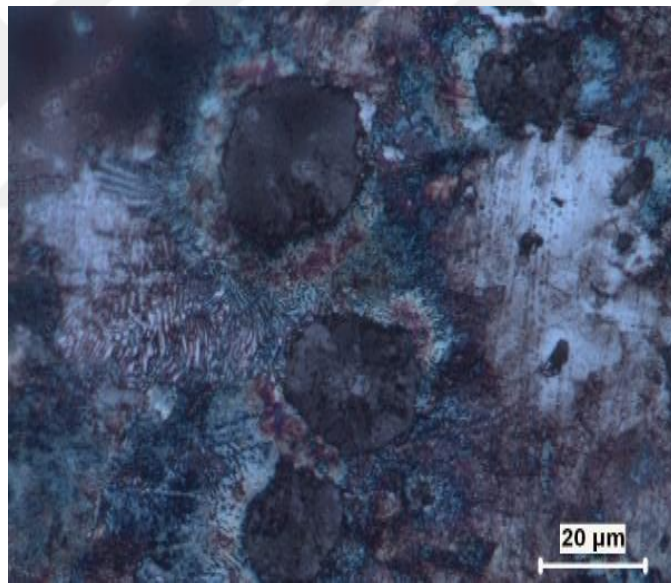


b)

Şekil 4.9 A iş parçası için, a) 200x büyütmede, b) 500x büyütmede çekilen dağlama sonrası mikro yapı görüntüleri

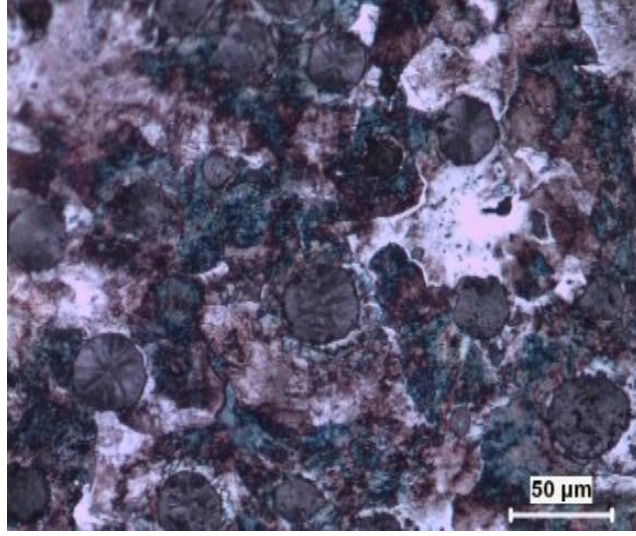


a)

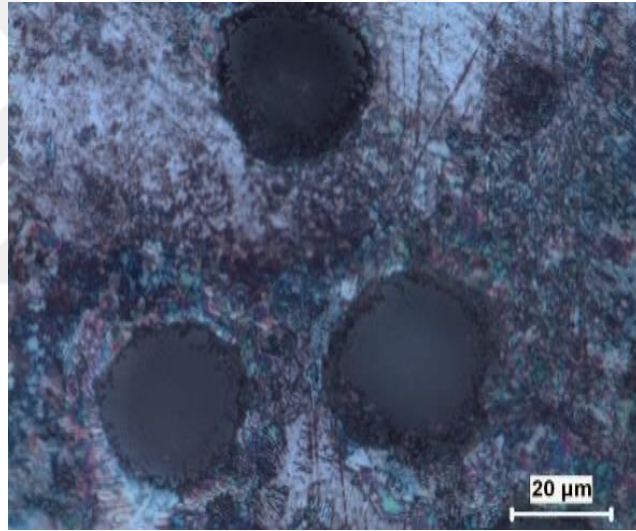


b)

Şekil 4.10 B iş parçası için, a) 200x büyütmede, b) 500x büyütmede çekilen dağlama sonrası mikro yapı görüntüleri



a)



b)

Şekil 4.11 C iş parçası için, a) 200x büyütmede, b) 500x büyütmede çekilen dağlama sonrası mikro yapı görüntüleri

Dağlanmış mikro yapı resimlerinde de görüldüğü gibi yapımız alaşımın kimyasal bileşimine uygun olarak ferrit ve perlit fazlarını içeren bir yapı sergilemiştir (bkz Şekil 4.9, bkz Şekil 4.10, bkz Şekil 4.11). İlgili döküm numunelerin kimyasal bileşimi incelendiğinde mikro yapıda ortaya çıkan yapının alaşımın kimyasal bileşim ve üretim standartlarına göre uygun oluşu anlaşılmaktadır. Dağlanmış numune mikro yapı resimlerinde de parlatılmış numune mikro yapı resimlerinde olduğu gibi modül değerinin azalması ile ortalama grafit kürelerinin çapının azaldığı gözlenmektedir.

Modül değerine bağlı olarak grafit kürelerinin küçülmesi literatürde yapılan ilgili çalışmalarda da tespit edilmiş bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak modül değerinin ortaya çıkardığı grafit kürelerin çapları, % küresellik gibi nicel değerler ayrıca imaj analiz sonucu tespit edilebilecektir.

Ekinci (2009) çalışmasında numuneleri % 2'lik Nital ile dağlanmıştır (% 2 Nitrik asit + % 98 saf alkol). Dağlama (12-14) sn süre ile yapılmış ve su ile durulanan numune leke oluşumunu engellemek için iyice kurutulmuştur. Dağlanmamış numunelerin mikro yapı fotoğraflarından ortalama küre sayısı bulunmuştur. Test edilen numunelerde kalınlık azaldıkça ortalama grafit çapında da küçülme meydana gelmiştir. Ayrıca küre sayısı arttıkça küresellikte artmaktadır (Ekinci, 2009).

Javaid ve Davis (2002) çalışmasında ince cidarlı KGDD'lerin mekanik özelliklerini etkileyen mikro yapısal faktörleri değerlendirmiştir. Çalışmada artan kalınlığın ferrit oranında ve ortalama grafit çapında artmaya neden olduğu, kalınlığın azalmasıyla ise küre sayısının ve sementit miktarının arttığı belirlenmiştir (Javaid ve Davis, 2002).

Bockus ve Zaldarys (2009) çalışmasında KGDD üretiminde grafit parametrelerinde kesit kalınlığı etkisi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Farklı kesit kalınlığındaki parçalar üzerinde mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. 3, 5, 24 ve 50 mm kesit kalınlığına sahip parçaların mikro yapı incelemelerinin sonucunda kesit kalınlığı arttıkça ortalama küre çaplarının arttığı görülmüştür. Sonuçta KGDD'lerde kesit kalınlığının, grafit kürelerinin boyutu üzerinde büyük bir etkisi olduğu ortaya çıkmıştır (Bockus ve Zaldarys, 2009).

Yalçın (2014) çalışmasında, EN-GJS-XSiMo 4 0,5 (GGG SiMo 4 0,5) ve EN-GJS-XSiMo 4 1 (GGG SiMo 4 1) kalitesinde SiMo küresel dökme demirlerden 2, 4 ve 6 mm kalınlığına sahip ince kesitli plaka numuneleri ve 15, 30 ve 45 mm kalınlığında kalın kesitli plaka numunelerinin dökümünü yaparak ısıl işlem öncesinde ve sonrasında mikro yapı ve mekanik özellikleri araştırmıştır. Mikro yapı incelemeleri sonucunda kesit kalınlığı arttıkça; grafit boyunun büyüdüğü, bununla bağlantılı olarak küreselleşme yüzdesinin düştüğü ve küre sayısının azaldığı sonucuna varılmıştır (Yalçın, 2014).

Doğan vd. (2003) çalışmasında 1,5 mm ile 6 mm kesit kalınlığındaki basamak plaka ve 2 mm ile 6 mm kesit kalınlığına sahip küresel grafitli dökümlerin mikro yapılarını incelemiştir. İstatiksel analiz yapılarak döküm parametrelerinin mikro yapıya etkisini araştırmıştır. Kesit kalınlığı azaldıkça perlit içeriği, küre sayısı ve küreselliğin arttığı, küre boyutunun azaldığı sonucuna ulaşmıştır (Doğan vd. 2003).

Şen (2004) çalışmasında döküm numunelerinde modüle bağlı olarak küre sayısı, ortalama grafit çapı, küreselleşme oranı (%) ve grafit (%)'in değişimini incelemiştir. Yaptığı üç döküm için çizdirdiği grafiğe göre; modül küçüldükçe küre sayısının arttığı, ortalama grafit çapının azaldığı, küreselleşmenin arttığı ve grafit yüzdesinin azaldığı sonuçlarına ulaşmıştır (Şen, 2004).

Güzel vd. (2014) çalışmasında KGDD'lerde kesit kalınlığının mikro yapı ve sertlik üzerindeki etkileri araştırmıştır. Zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerinden sonra farklı kesit kalınlıkları üzerinde metalografik incelemeler yapılmıştır. Kesit kalınlığı arttıkça küre sayısının azaldığı, küre çapı ve ferritik yüzdesinin arttığı görülmüştür (Güzel vd. 2014).

Megahed vd. (2018) çalışmasında GGG 70'in bir orta frekans indüksiyon ocağında temel metal olarak kullanarak döküm için üretilen sıkıştırılmış grafit demir örnekleri (CGI) üretilmiştir. Numunelerin mikro yapısı optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Numuneler bloğun farklı kalınlıklarından (5, 10, 15 ve 20 mm) kesilerek 16 numune oluşturulmuş ve bakalite alınmıştır. Daha sonra numuneler elle öğütülmüş ve 1 mikrometre partikül büyüklüğündeki elmas süspansiyonla parlatma işlemi yapılarak; % 2 Nital ile dağlanmıştır. Perlit yüzdesinin döküm süresine ve kalınlığına bağlı olduğu daha uzun döküm süresi, düşük kalınlıklarda daha küçük perlit yüzdesinin olduğu anlaşılmıştır. Tüm numuneler için duvar kalınlığı arttıkça küresellik yüzdesinin azaldığı ortaya çıkmıştır (Megahed vd. 2018).

Alabbasian vd. (2016) çalışmasında dökme Ni dirençli KGDD'in mikro yapı ve mekanik özellikleri oda sıcaklığında incelemiştir. En yüksek küre sayısına sahip numune 2 mm kalınlıkta numune olup onu sırasıyla 6 mm kalınlıkta numune ve son olarak 10 mm kalınlıkta numune takip etmiştir. Kalınlık arttığında, küre sayısında, soğutma oranının azalmasından dolayı bir düşüş eğilimi olduğu görülmüştür (Alabbasian vd. 2016).

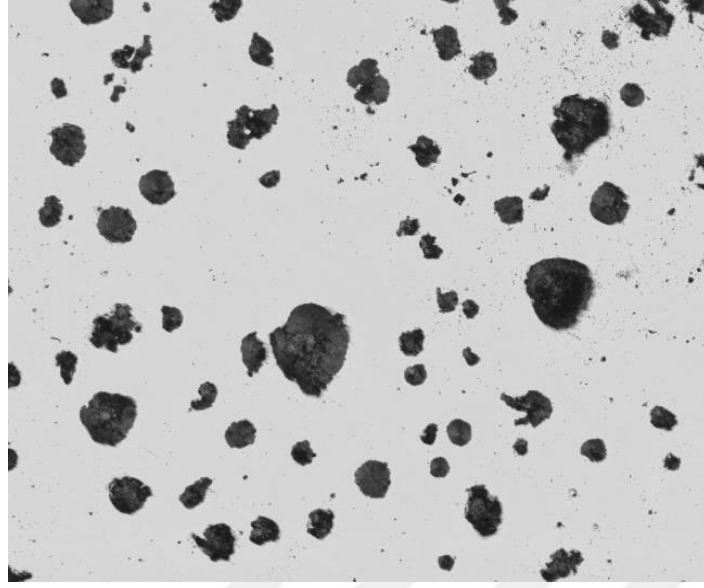
Kasvayee vd. (2017) çalışmasında, % 2.36 ve % 3.71 silikon muhtevasına sahip GJS-500-7 ve GJS-500-14 iki sünük demir kullanmıştır. Farklı soğutma hızları sağlayan farklı kalınlıklardaki altı plakadan oluşan dökme malzeme üzerinde mikro yapı analizi uygulanmıştır. Mekanik olarak parlatılan numuneler % 5 Nital çözeltisi ile kazanmıştır. Grafit boyutu ve çevreleyen ferrit bölgelerinin GJS-500-7' de olduğu gibi plaka kalınlığının artırılmasıyla arttığı görülmüştür. Kalın plakalarda (örneğin 75 mm plaka) grafit parçacıkları, GJS-500-14'e nazaran GJS-500-7'de çok daha büyük olduğu tespit edilmiştir (Kasvayee vd. 2017).

4.4. İmaj Analiz Değerlendirmeleri

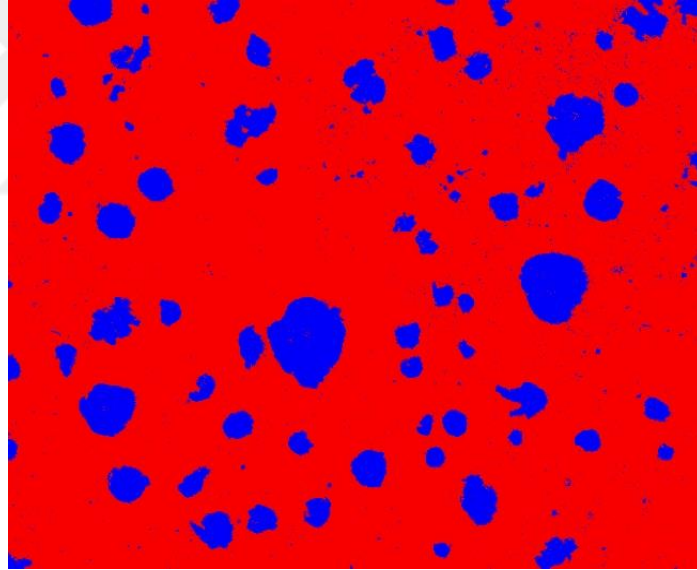
Tez kapsamında yapılan imaj analiz değerlendirmelerinde farklı modül değerlerine sahip farklı mikro yapı özellikleri gösteren KGDD'lere ait numunelerin bilgisayar destekli imaj analiz yazılımlarıyla mikro yapı analizleri inceleme sonuçları verilecektir. Numunelerin mikro yapı özelliklerinden üretimlerinin döküm standardına uygunluğu kontrol edilecektir. Numuneler parlatma sonrası ve dağlama sonrası ayrı ayrı mikro yapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Bu sebeple sonuçlar parlatma sonrası ve dağlama sonrası olarak ayrı ayrı verilecektir.

4.4.1 Parlatma sonrası elde edilen mikro yapı imaj analiz sonuçları

Kimyasal bileşimleri verilen GGG70L KGDD numuneler metalografik olarak hazırlandıktan sonra bilgisayara bağı kamera ile Nikon marka mikroskoptan mikro yapı görüntüleri alınarak Clemex İmaj Analiz yazılımıyla işlenmiştir (bkz. Çizelge 4.1). Parlatma sonrası çekilmiş örnek bir mikro yapı resmi ve resim üzerinde yapılan analiz sonucu işlenmiş resim örneği Şekil 4.12'de verilmiştir.



a)

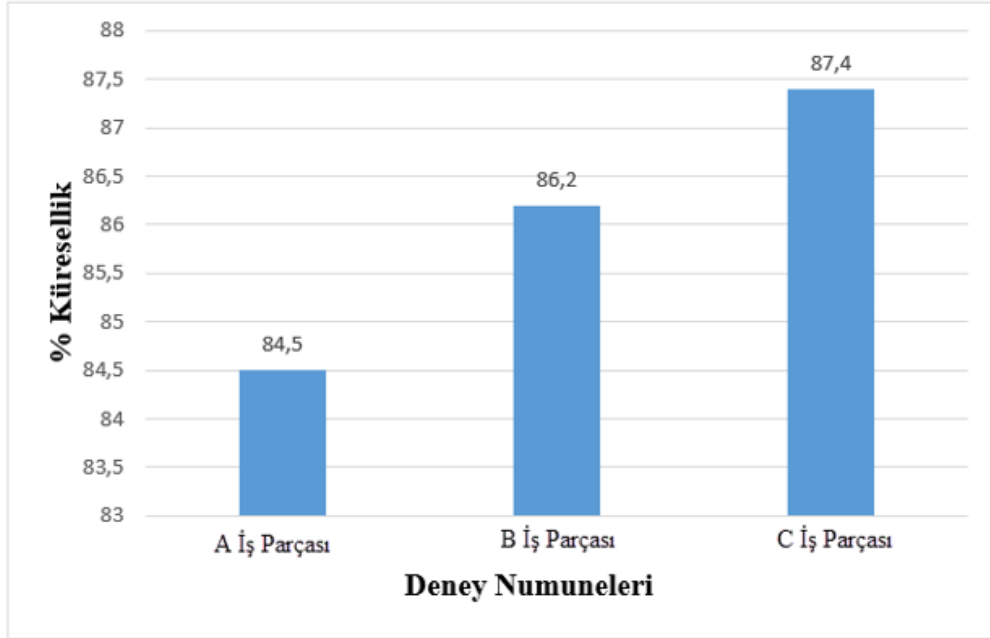


b)

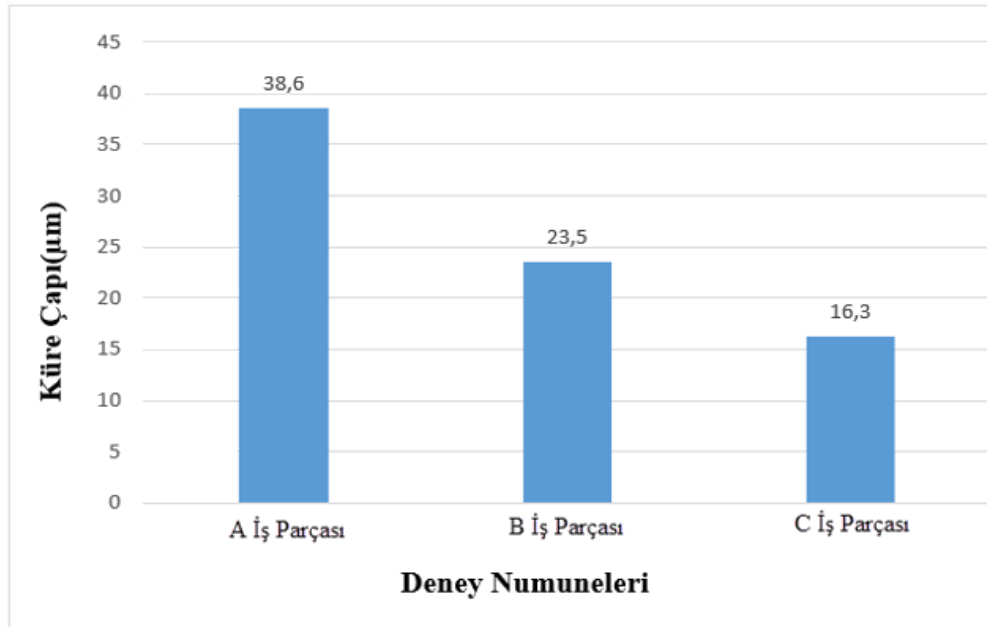
Şekil 4.12 Parlatma sonrası a) Orijinal mikro yapı resmi, b) İmaj analizde işlenmiş resim görüntüsü

Parlatma sonrası yapılan mikro yapı incelemelerinde de görüldüğü gibi resimde sadece ana matris ve grafit küreleri tespit edilebilmektedir. Numunelerin parlatma sonrası mikro yapı resimleri çekilerek, resimlerden numune içyapısındaki % küresellik miktarı, ortalama küre çapı ölçümü ve kürelerin kapladığı yüzde alan ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler daha geniş bir alanı kapsaması ve daha net sonuçlar verdiği tespit edildiğinden, numunelere ait 100x büyütmede çekilen mikro yapı

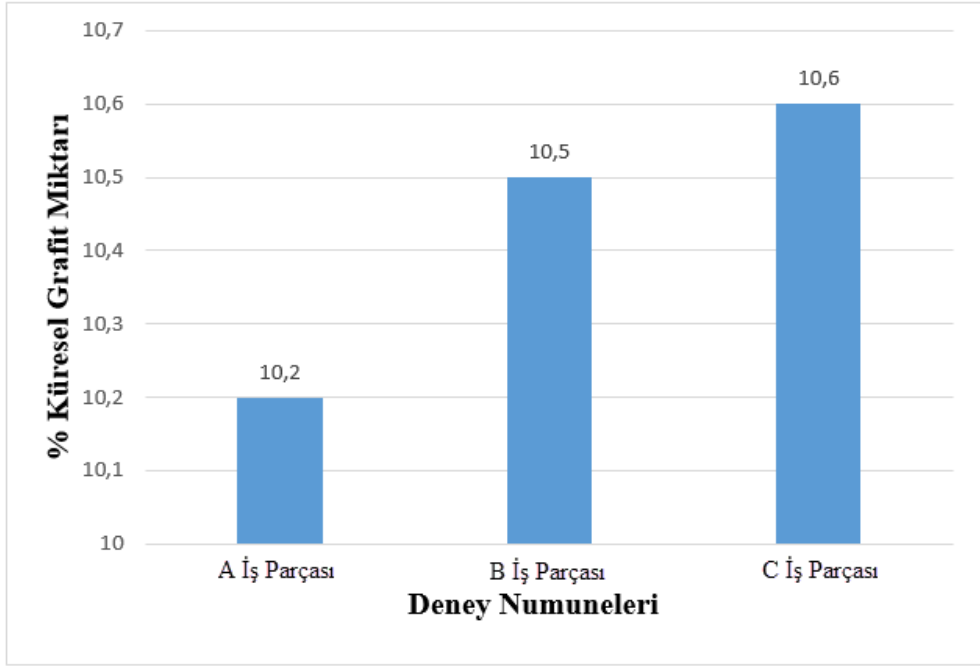
resimleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Her bir modül değerindeki numunelerden yapılan birçok ölçüme ait ortalama imaj analiz sonuçları Şekil 4.13’de verilmiştir.



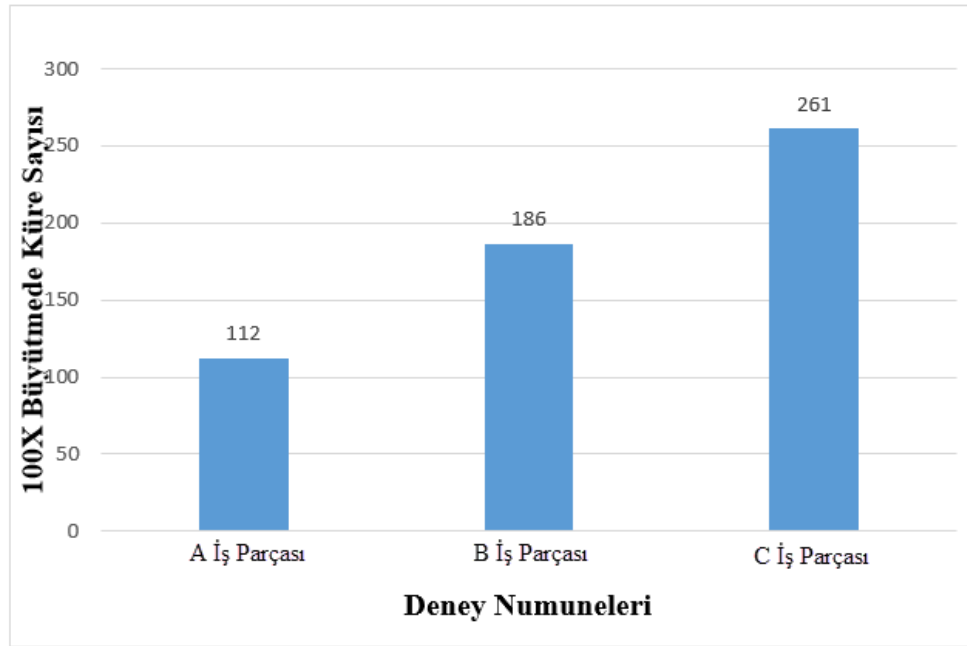
a)



b)



c)



d)

Şekil 4.13 İmaj analiz ölçüm sonuçları a) % Küresellik b) Küre çapı (μm) c) % Küresellik grafit miktarı d) 100x büyütmede küre sayısı

KGDD numunelerden alınan mikro yapı resminden yapılan inceleme sonuçlarına göre, A iş parçası küresellik yüzdesi 84,5, ortalama küre çapı, 38,6 µm ve kürelerin yapı üzerinde kapladığı alan % 10,2 olarak tespit edilmiştir. B iş parçasında küresellik yüzdesi 86,2, ortalama küre çapı, 23,5 µm ve grafit kürelerinin kapladığı alan % 10,5 seviyesi civarındadır. En hızlı katılaşma gerçekleşmiş olan C iş parçasında ise küresellik yüzdesi 87,4, ortalama küre çapı, 16,3 µm ve % 10,6 oranında grafit kürelerinin kapladığı alan olarak ölçüm yapılmıştır (bkz. Şekil 4.13). Farklı modül değerlerine sahip KGDD üretiminde mikro yapı üzerinde etkisinin incelendiği ve küre sayılarının belirlendiği çalışmada kesit kalınlığının incelenmesi ile katılaşma zamanının azalmasına bağlı olarak küre çapının azaldığı ve küre sayısının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca soğuma hızının artması ile birlikte, kürelerin daha düzgün yapıda oluşarak % küresellik değerlerinin arttığı, ortalama küre çapının azalarak, birim alana düşen küre sayılarının arttığı tespit edilmiştir.

İmaj analiz yazılımında ayrıca mevcut kürelerin hangi çaptan % kaç ve kaç adet küre olduğu tespit edilebilmektedir. Küresellik ölçüm sonuçları ise numunenin ASTM A247 standardına göre yapıda sayılan kaç adet grafit küresinin % kaç küresellik değerine sahip olduğunu gösterilebilmektedir. İstenirse kaç adet kürenin hangi küresellik yüzdesinde olduğu sonuçlar da istatistiki değerlerden anlaşılabilir. Bu değerlere göre mikro yapının ve dökümün uygunluğu hakkında fikir sahibi olunabilir. İlgili döküm parçayı temsil edilecek şekilde alınan numuneden benzer şekilde birçok ölçüm yapılarak ortalama sonuçları alınıp buna yapılan değerlendirmelerde her bir modül değerindeki dökümlerin % küresellik değerlerinin, küre sayısı ve küresel grafit çaplarının ilgili alaya ait standart değerlere uygun olduğu anlaşılmaktadır.

Javaid ve Davis (2002) çalışmasında 1,5, 2 ve 3 mm kalınlığındaki numuneler kullanılmış ve sırasıyla mm²'de ortalama 2500, 2200, 1300 küre olduğu belirtilmiştir (Javaid ve Davis, 2002).

Megahed vd. (2018) çalışmasında GGG 70'in bir orta frekans indüksiyon ocağında temel metal olarak kullanarak kompakt grafit demir örnekleri (CGI) üretmişlerdir. Optimum mekanik özellikleri belirlemek amacıyla numuneler üzerinde optik metalografi ve görüntü analiz programı vasıtasıyla ferrit ve perlit yüzdesi ortaya

çıkarılmıştır. 10 ve 20 mm kalınlıktaki perlit içeriğinin tüm numunelerde % 80'in üzerinde olduğu belirlenmiştir (Megahed vd. 2018).

Achour vd. (2000) ve Ruxanda vd. (2001) yaptıkları çalışmada KGDD'lerde 4 mm'den az kalınlıkta küre sayısının soğuma hızına da bağlı olarak 2000 küre/mm²'ye kadar arttığını görmüşlerdir (Achour vd, 2000; Ruhanda vd, 2001).

Ekinci (2009) çalışmasında üç farklı aşılama kullanılarak yaptığı dökümlerde plaka boyutları 120 x 40 mm, plaka kalınlıkları 12, 6, 3 mm ve 2 mm olan döküm iş parçasını kullanmıştır. Yapılan ölçüm sonuçlarında bütün döküm numunelerinden ulaşılan ferrit, perlit, grafit, sementit yüzdeleri, küresellik yüzdesi, küre sayısı ve ortalama grafit çapı Çizelge 4.5'de verilmiştir (Ekinci, 2009).

Çizelge 4.5 a) Vaxon aşılama kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri, b) Barinoc aşılama kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri c) UltraSeed aşılama kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri (Ekinci, 2009)

Kalınlık (mm)	Ferrit (%)	Perlit (%)	Grafit (%)	Sementit (%)	Küresellik (%)	Ortalama grafit çapı (µm)	Küre sayısı (küre/mm ²)	γ (hale) kalınlığı (µm)	r ^γ /r ^ε
2	27	62	9	2	94	7	919	5	1.25
3	70	18	12	-	93	8	721	9	1.66
6	72	14	13	-	93	14	623	17	1.86
12	67	19	14	-	92	18	496	24	2.07

a)

Çizelge 4.5 a) Vaxon aşılaiıcı kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri, b) Barinoc aşılaiıcı kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri c) UltraSeed aşılaiıcı kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri (devam) (Ekinci, 2009).

Kalınlık (mm)	Ferrit (%)	Perlit (%)	Grafit (%)	Sementit (%)	Küresellik (%)	Ortalama grafit çapı (µm)	Küre sayısı (küre/mm ²)	γ (hale) kalınlığı (µm)	r ^γ /r ^β
2	11	75	6	8	95	6	1415	4	1.11
3	85	3	12	-	95	8	1189	10	1.92
6	80	8	12	-	93	10	679	21	2.18
12	83	8	9	-	91	13	411	27	2.25

b)

Kalınlık (mm)	Ferrit (%)	Perlit (%)	Grafit (%)	Sementit (%)	Küresellik (%)	Ortalama grafit çapı (µm)	Küre sayısı (küre/mm ²)	γ (hale) kalınlığı (µm)	r ^γ /r ^β
2	21	62	10	7	95	8	1368	6	1.18
3	83	5	12	-	94	10	838	14	2.0
6	73	14	13	-	92	17	472	21	2.14
12	74	13	13	-	90	19	298	25	2.17

c)

Yıldız (2014) dökme demirlerde faz analizini yaptığı çalışmasında numunelerin imaj çalışmalarından yapıdaki ortalama küresellik yüzdesi, kürelerin çapı ve kapladığı alan yüzdesi değerlerini tespit etmiştir (Yıldız, 2014).

Çizelge 4.6 Parlatma sonrası numunelere ait imaj analiz sonuçları (Yıldız, 2014)

Numune	Küresellik (%)	Ortalama Küre Çapı (µm)	Kürelerin Kapladığı Alan (%)
1-Ferrit + Perlit (50x-1)	89,5	45,7	10,4
2-Perlit + Ferrit (50x-1)	82,6	41,9	13,1
3- Perlitik Alaşım (50x-5)	87,1	39,3	10,4
4-Asiküler Yapı (50x-1)	69,6	51,5	6,2

Yıldız vd. (2013) çalışmasında parlatma sonrası numunelerin mikro yapı fotoğraflarının imaj analiz çalışmalarını yapmıştır. Bu şekilde her bir numuneye ait küresellik yüzdesi, küresel grafitlerin kapladığı yüzde alan, yapıda ortalama küre sayısı ve ortalama küre çapı belirlenmiştir. Mikro yapı imaj analiz ölçüm sonuçları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir (Yıldız vd. 2013).

Çizelge 4.7 Mikro yapı imaj analiz ölçüm sonuçları (Yıldız vd. 2013)

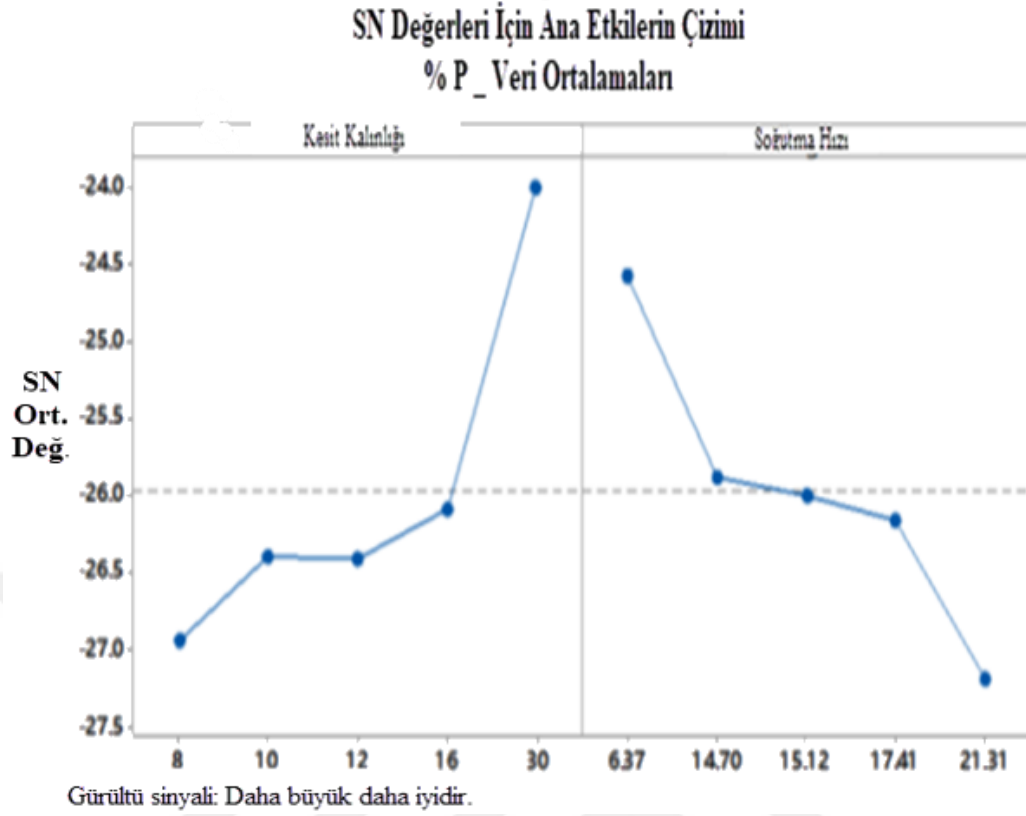
Numune	(%) Küresellik	Küre Çapı (µm) (Ortalama)	Kürelerin Grafit miktarı (Yüzde Dağılımı)	Küre Sayısı (100 X Büyütmede)
1.Numune	87,7	13,9	10,1	289
2.Numune	83,5	14,4	10,7	261
3.Numune	81,8	15,2	10,3	252
4.Numune	79,1	15,5	9,8	224

Güzel vd. (2014) çalışmasında küresel grafitli döküm demirlerde kesit kalınlığının mikro yapı ve sertlik üzerindeki etkileri araştırmıştır. Görüntü analiz programıyla mikro yapı ile ilgili ulaştığı sonuçlar Çizelge 4.8’de verilmiştir (Güzel vd. 2014).

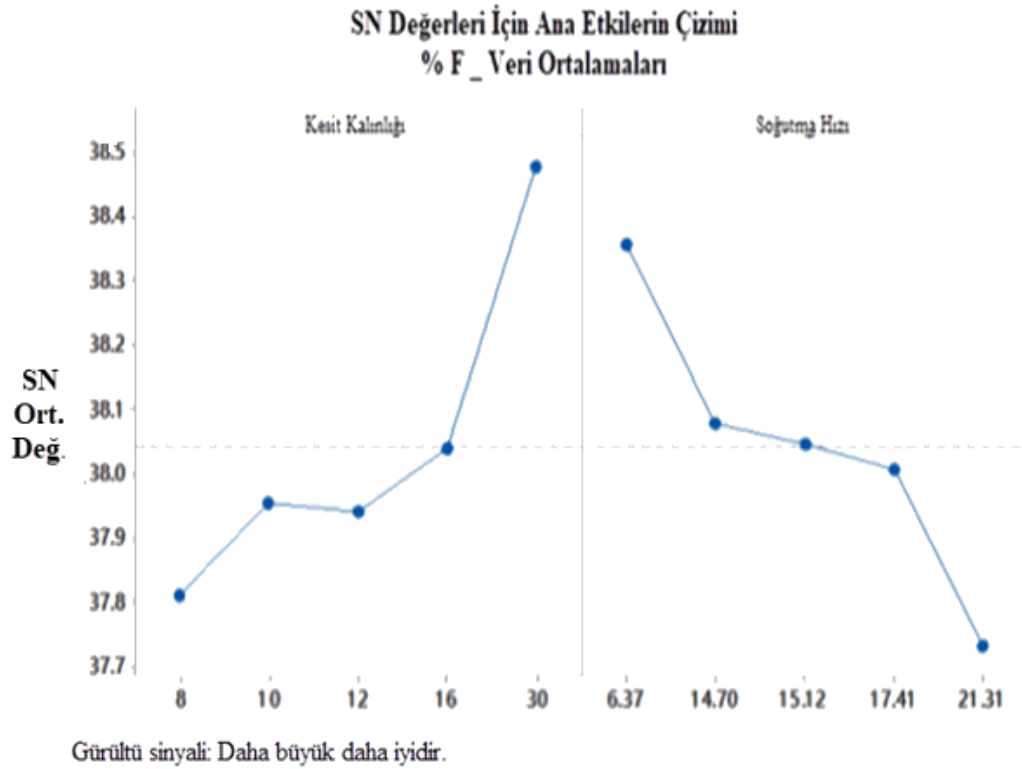
Çizelge 4.8 Farklı kesit kalınlığına sahip numunelerin mikro yapıları ile ilgili sonuçlar (Güzel vd. 2014)

Numuneler	Kesit Kalınlığı (mm)	Küre sayısı (Grafit küreleri/mm ²)	Ferrit (%)
1	12,7	250	45
2	25,4	228	48
3	38,1	192	57
4	50,8	166	63
5	63,5	159	71
6	76,2	148	73

Kabnure vd. (2017) çalışmasında, otomobil çark dökümü üzerinde araştırma yapmıştır. Dökümlerden alınan farklı kesit kalınlıklarına sahip numunelerin mikro yapısı optik mikroskop ile incelenmiştir. Parametreleri analiz etmek için Minitab 17 yazılımı kullanılmıştır. SN (sinyal/gürültü) oranı olup, kesit kalınlığı ve soğuma hızının yapıdaki % perlit ve % ferrite etkisi Şekil 4.14’de gösterilmiştir. % perlitin soğuma hızındaki düşüş ve kesit kalınlığındaki artışla arttığı görülmüştür. % ferritin kesit kalınlığında artışla ve soğuma hızındaki azalışla arttığı anlaşılmıştır. (Kabnure vd. 2017).



a)

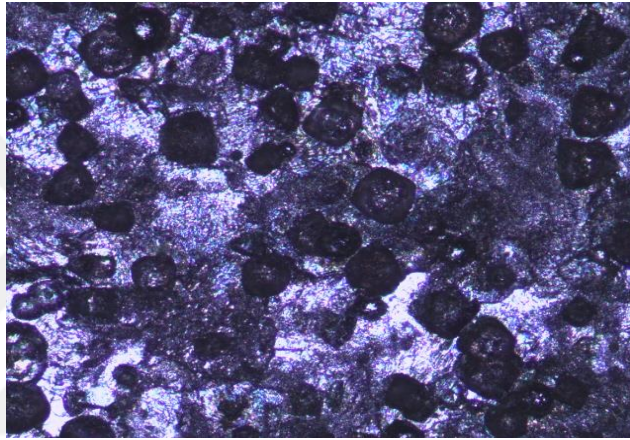


b)

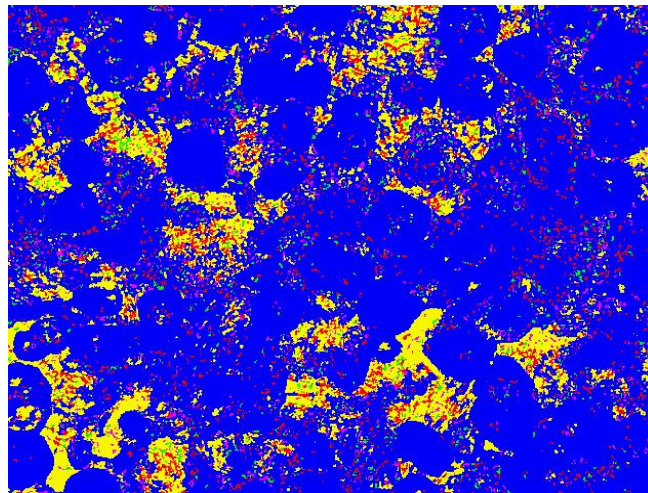
Şekil 4.14 a) Kesit kalınlığı ve soğuma hızının yapıdaki % perlitte etkisi b) Kesit kalınlığı ve soğuma hızının yapıdaki % ferrite etkisi (Kabnure vd. 2017)

4.4.2 Dağlama sonrası elde edilen mikro yapı imaj analiz sonuçları

Numuneler parlatma sonrası % 2 nital çözeltisi ile dağlandıktan sonra tekrar mikro yapı incelemeleri yapılmış ve resimleri çekilmiştir. Dağlama sonrası numune mikro yapısında fazlar farklı renklerde görüntülenebilmektedir. Bu resimlerin incelemeleri sonucu yapıdaki fazları ve yüzde faz dağılımları tespit edilebilecektir. İmaj analiz çalışmalarında renk farklılığının daha belirgin olduğu ve daha net sonuçlar alınabileceği düşünülerek çalışmalar 100x büyütmedeki resimlerde yapılmıştır. Örnek bir dağlanmış numune mikro yapı resmi ve resim üzerinde yapılan analiz sonucu işlenmiş resim örneği Şekil 4.15’de görülmektedir.



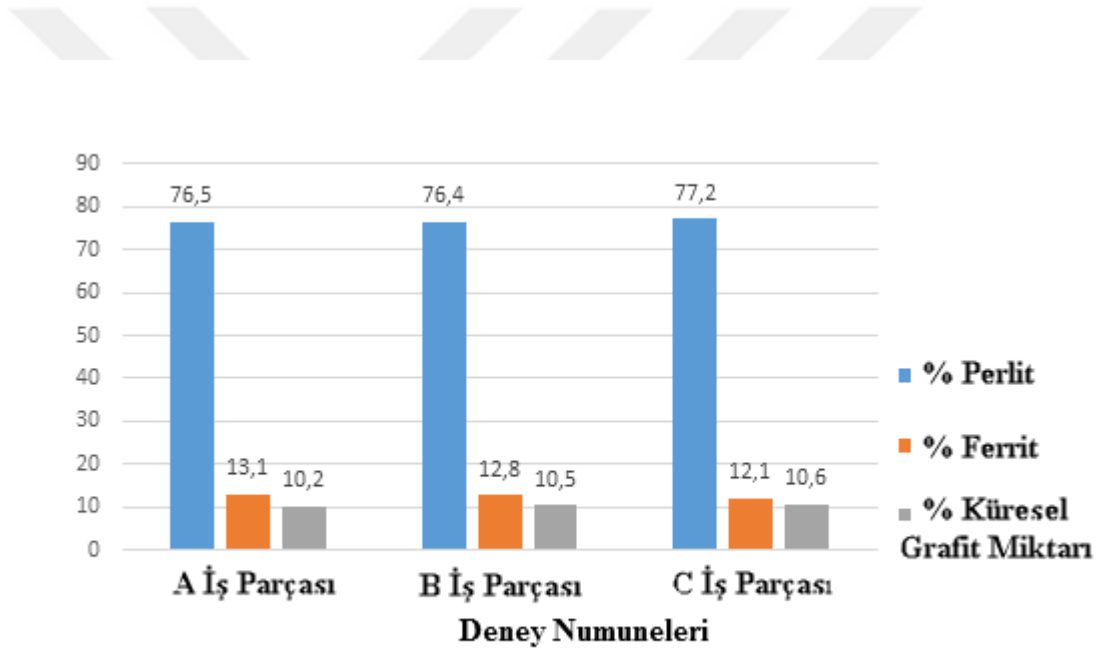
a)



b)

Şekil 4.15 Dağlama sonrası 100x büyütmede a) Orijinal mikro yapı resmi, b) İmaj analizde işlenmiş resim görüntüsü

Dağlama sonrası örnek mikro yapı incelemelerinde de görüldüğü gibi perlit ağırlıklı yapıda, ayrıca ferrit ve küresel grafitler mevcuttur. İmaj analiz çalışmalarında fazların belirlenmesi aşamasında mikro yapı resmi üzerinde perlit ve küresel grafitler renk tonlarının birbirine yakın olmasından dolayı aynı faz gibi algılanmaktadır. Bu sebeple ilgili analizde elde edilen perlit değerinin belirlenmesi için yapıda belirlenen mavi renkte işlenmiş olan perlit ve grafitlerin toplamı elde edilecektir (bkz. Şekil 4.15). Elde edilen değerden parlatma sonrası elde edilen % küresel grafit değeri çıkartılarak ilgili modüldeki ortalama perlit faz değeri tespit edilmiştir. Her bir modül değerindeki numunelerden yapılan birçok ölçüme ait ortalama faz miktarları Şekil 4.16'da mevcuttur.



Şekil 4.16 Faz analizi ölçüm sonuçları

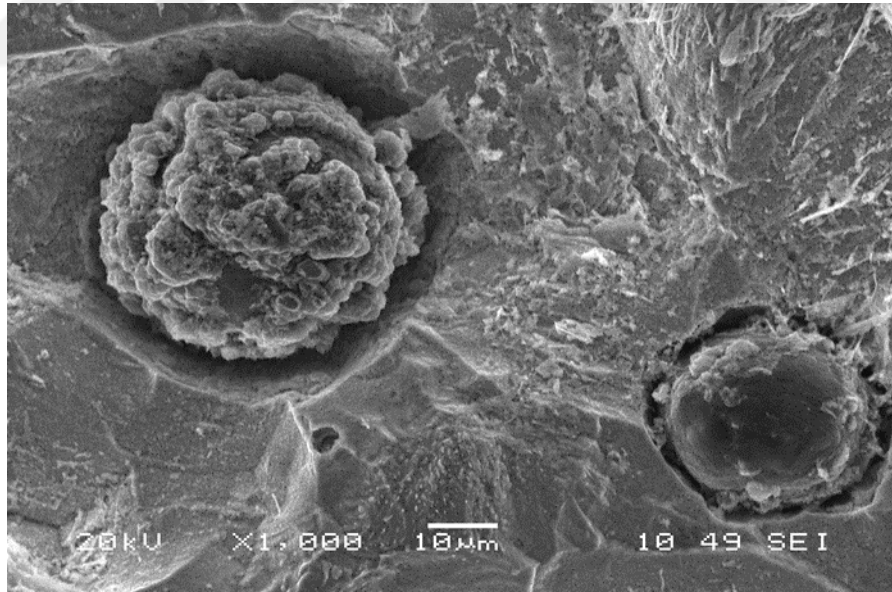
Ortalama faz analiz değerleri incelendiğinde ve yapılan çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında modül değişiminin yapıdaki faz değişimine sistematik ve doğrudan bir etkisi olmadığı düşünülmektedir. İlgili faz analizi değerlerinin değişimi daha çok mevcut numunelerin kimyasal bileşimine bağlı olarak etkilenmekte ayrıca hızlı katılaşmaya bağlı olarak oluşan grafit kürelerinin ebatlarının küçülmesi ile ilişkili

olduğu düşünölmektedir. Yapı içerisinde ayrıca kalıntı seviyelerde diğer renklerde göröntölenen fazlar da mevcut olduğu tespit edilmiştir (bkz. şekil 4.16).

Literatürdeki dağlama sonrası faz incelemeleri ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Kesit kalınlığındaki değişime bağlı olarak % perlit ve % ferrit değerleri ile ilgili sonuçlar önceki sayfalarda parlatma sonrası imaj analizi sonuçları kısmında parlatma sonucunda yapılan imaj analiz sonuçlarıyla bereber bir bütönlük oluşturacak şekilde sayısal sonuçlar halinde verilmiştir (bkz. Çizelge 4.5, bkz. Çizelge 4.8, bkz. şekil 4.14).

4.5 SEM İncelemeleri

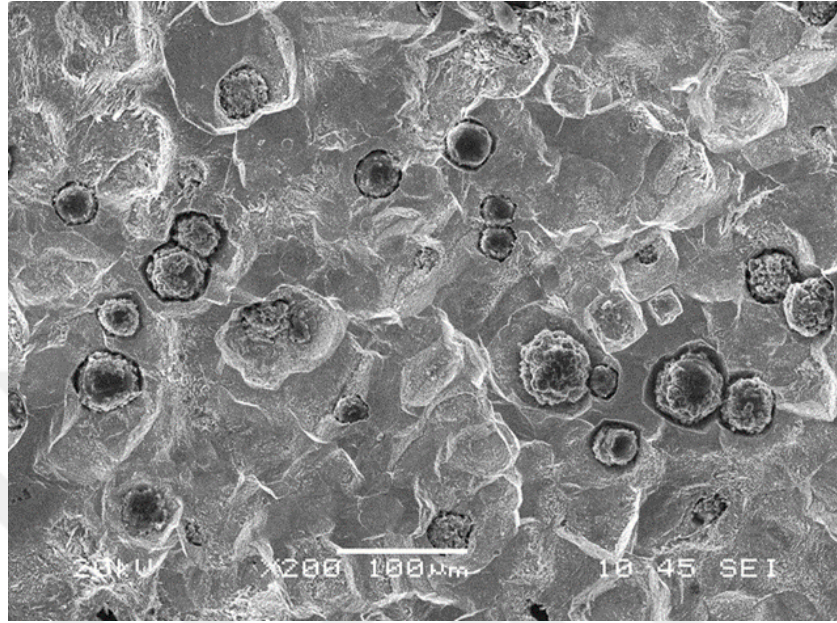
Derin dağlama sonrası numunelere ait SEM cihazı ile elde edilen göröntöleri farklı büyötmelerde çekilmiştir. Numune üzerinde daha genel bir görönmü ile fikir edinilmesi için A iş parçası için 1000x büyötmeye çekilen SEM göröntüsü sonuçları şekil 4.17'de verilmiştir.



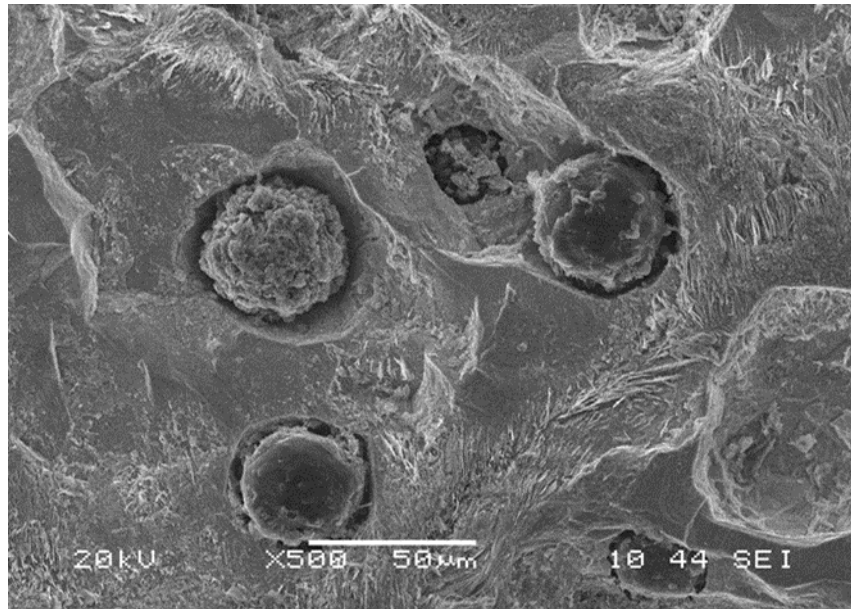
şekil 4.17 A iş parçası için 1000x büyötmeye SEM göröntüsü

Numuneye ait SEM göröntüsünde yapıda mevcut grafit küreleri, ana yapı üzerindeki ferrit ve perlit yapıları görölmektedir (bkz. şekil 4.17) Grafit kürelerinin biçiminin küreselliğinin yüksek olduğu SEM göröntüsü sonucu anlaşılabilmektedir. B iş

parçası için 200x büyütmede çekilen SEM görüntüsü Şekil 4.18’de verilmiştir. C iş parçası için 500x büyütmede çekilen SEM görüntüsüne ise Şekil 4.19’da yer verilmiştir.

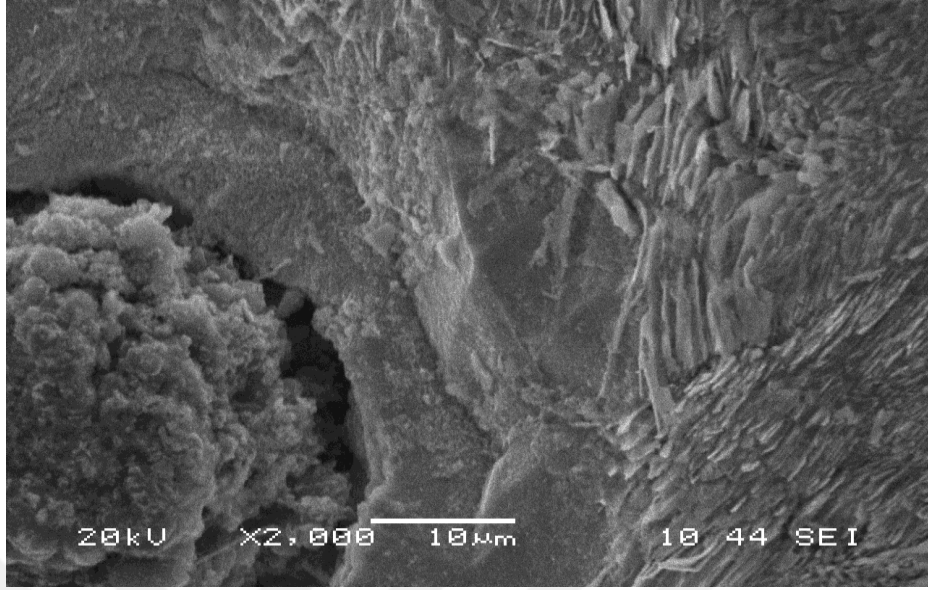


Şekil 4.18 B iş parçası 200x büyütme SEM görüntüsü

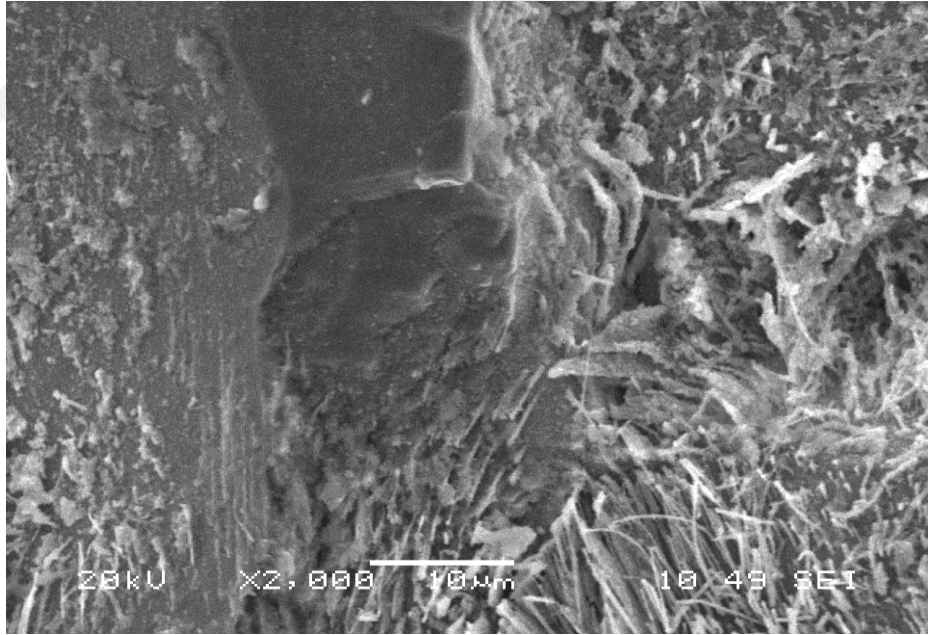


Şekil 4.19 C iş parçası 500x büyütme SEM görüntüsü

Küresel grafit ve ana matris ara yüzey görüntüsü Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Ana matris perlit yapısı 2000x büyütmede çekilen SEM görüntüsü ise Şekil 4.21’de verilmiştir.



Şekil 4.20 Küresel grafit-ana matris ara yüzey 2000x büyütmede SEM görüntüsü



Şekil 4.21 Ana matris perlit yapısı 2000x büyütmede SEM görüntüsü

5. SONUÇLAR

Tez kapsamında döküm malzemesi olarak GGG70L kullanılmış olup, üç farklı modüle sahip dikdörtgen prizma şeklinde iş parçaları üzerinde mikro yapı incelemeleri ve mekanik testler uygulanmıştır. Yapılan çalışmalarda modül büyüklüğünün KGDD numuneleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- 100 mm x 100 mm x 300 mm ebatlarındaki A iş parçası, 50 mm x 50 mm x 300 mm ebatlarındaki B iş parçası ve 25 mm x 25 mm x 300 mm ebatlarındaki C iş parçası için yapılan klasik hesap yöntemleriyle, A iş parçasının modül büyüklüğü 2,14, B iş parçasının modül büyüklüğü 1,15 ve C iş parçasının modül büyüklüğü 0,6 bulunmuştur.
- Kimyasal bileşim değerleri incelendiğinde alaşımların standart bileşim aralığında olduğu görülmüştür.
- Yapılan çekme testi sonuçlarında çekme mukavemetleri A iş parçasında 620,4 MPa, B iş parçasında 671,8 MPa ve C iş parçasında 725,2 MPa olarak bulunmuştur. Modül boyutu azaldıkça döküm numunelerindeki çekme mukavemetinin arttığı görülmüştür. Aynı şekilde akma mukavemeti değerlerindeki modül boyutu azaldıkça ters orantılı olarak arttığı, % uzama değerlerinin ise modül büyüklüğü azaldıkça azaldığı görülmüştür.
- Sertlik testi sonuçlarında bulunan ortalama değerler A iş parçası için 207 HBN, B iş parçası için 223 HBN ve C iş parçası için 239 HBN olarak bulunmuştur. Elde edilen sonuçlara göre modül boyutunun azalmasına ters orantılı olacak şekilde sertliğin arttığı belirlenmiştir.
- Farklı modül boyutuna sahip numunelerin parlatma sonrası imaj analiz değerlendirilmeleri yapılarak birçok ölçüme ait ortalama % küresellik, küre çapı, % küresel grafit miktarı ve 100x büyütmede küre sayıları belirlenmiştir. Bu değerlerin belirlenmesinde kullanılan imaj analiz yönteminin etkili ve uygun olduğu anlaşılmıştır.

- % Kuresellik değerleri A numunesi için 84,5, B numunesi için 86,2 ve C numunesi için 87,4 bulunmuştur. % Kuresel grafit miktarı A numunesi için 10,2, B numunesi için 10,5 ve C numunesi için 10,6 bulunmuştur. % Kuresellik ve % kuresel grafit miktarının modül boyutuna bağlı olarak değiştii anlaşılmıştır.
- En küçük küre çapı, modül büyüklüğü en küçük olan C numunesinde 16,3 μm olarak bulunmuştur. B numunesinde 23,5 μm , A numunesi için 38,6 μm olarak belirlenmiştir. Modül boyutu az olan numune daha hızlı soğuduğu için daha küçük küre çapına sahip olmuştur.
- 100x büyütmede mm^2 'ye düşen küre sayısı A numunesi için 112, B numunesi için 186 ve C numunesi için 261 olarak belirlenmiştir. Modül boyutu küçük olan numunenin daha hızlı katılaşmasına paralel bir şekilde mm^2 ' ye düşen küre sayısının arttığı görülmüştür.
- Farklı modül boyutuna sahip numunelerin dağlama sonrası imaj analiz değerlendirilmeleri yapılarak modül boyutunun yapıdaki faz değişimine olan etkisi incelenmiştir. A iş parçası için % perlit değeri 76,5, B iş parçası için 76,4 ve C iş parçası için 77,2 bulunmuştur. % Ferrit değerleri ise A iş parçası için 13,1, B iş parçası için 12,8 ve C iş parçası için 12,1 bulunmuştur. Bulunan değerler göz önüne alındığında modül boyutundaki farklılığın yapıdaki faz değişiminde belirleyici bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Achour, L., Gamba, M. M., Boeri, R ve Sikora, J. (2000a). *Determinacion de parametros de colada para la obtencion de pequenos espesores en fundicion de grafito esferoidal*. **Proceedings of the SAM 2000 Congress**, Neuquen.
- Achour, L., Gamba M. M., Boeri R. ve Sikora J. (2000b). *Thin Wall Ductile Iron Castings: Characterization of the Microstructure*. **Proceedings of The IBEROMET VI Congress**, Barcelona.
- Alabbasian, F., Boutorabi, S. M. A. ve Kheirandish, S. (2016). *Effect of inoculation and casting modulus on the microstructure and mechanical properties of ductile Ni-resist cast iron*. **Materials Science & Engineering A**, 651, 467-473.
- Albayrak, Ö. (2001). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Porozite Oluşumunun Araştırılması*. Mersin Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Aob Test Sistemleri, (2007). *Mat Plus 4.1 İmaj Analiz Programı Tanıtımı*. <http://www.aoblab.com/index.html>, 05.03.2019.
- ASM International Handbook Committee, (1988). **ASM Volume 15 Casting**. Metals Park Ohio: ASM International.
- ASM International Handbook Committee, (1989). **ASM Volume 17 Nondestructive Evaluation And Quality Control**. Metals Park Ohio: ASM International.
- ASM International Handbook Committee, (1990). **ASM Volume 1 Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. Metals Park Ohio: ASM International.
- ASM International Handbook Committee, (2004). **ASM Volume 9 Metallography and Microstructures**. Metals Park Ohio: ASM International.
- Arda, İ. (2010). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Katılaşma Modellemesi ve Gerçek Dökümler İle Karşılaştırılması*. Sakarya Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Ateş, B. (2013). *Katı Çözelti Sertleşmesinin Küresel Grafitli Dökme Demirin Dönel Eğmeli Yorulma Davranışına Etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Aytaçoğlu, L. C. (2012). *Dökme Demirlerde Termal Analiz ve Matematiksel Yaklaşım*. Sakarya Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Bayraktar, M. (2009). *Düktül Demir Dökümlerde Küre Sayısının Tespiti ve Mekanik Özelliklere Etkisi*. Sakarya Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).

- Bilici, M. K. (2004). *Alaşımız Dökme Demirlerin Aşınma Özelliği*. Marmara Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Brown J. (1994). *Foseco Foundryman's Handbook*. ABD: Butterworth–Heinemann.
- Bockus S. and Zaldarys, G. (2009). *Influence of the Section Size and Holding Time on the Graphite Parameters Of Ductile Iron Production*. *Metalurgia*, 48 (1), 19-22.
- Cantekinler, A. (2008). *Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kaynak Gücünün Mekanik Özelliklere Etkilerinin Araştırılması*. Selçuk Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Cavcar, M. M (1996). *Dökme Demirler ve Dökme Demirlerin Kaynağı*. Ankara: Oerlikon Yayın Evi.
- Cevher, Ö. (2006). *Dökme Demirlerde Sert Faz Oluşumunun Önlenmesi ve Giderilmesi*. Sakarya Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Clemex Defining Intelligent Microscopy, (1990). *Clemex İmaj Analiz Programı Tanıtımı*. <http://www.clemex.com/>, 07.03.2019.
- Çetin A. (2016). *Küresel Grafitli Dökme Demir*. Ankara: El Kitabı Dökümhane Eğitim Projesi Özel Sayı Serisi.
- Doğan, Ö. N., Schrems K. K ve Hawk J. A. (2003). *Microstructure Of Thin-Wall Ductile Iron Castings*. 107th MetalCasting Congress & CastExpo, Milwaukee.
- Ecob, C.M ve Hartung, C. (2003). *An Alternative Route for the Production of Compacted Graphite Irons*, 51 Indian Foundry Congress, Cast Metals - Vision 2010, Jaipur.
- Ekinci, E. (2009). *Düktül Demirlerde Aşılma Sınırının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi*. Sakarya Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Forrest, R. D. (2005). *Some Factors Affecting The Mechanical Properties of Ductile Iron (1755)*. BCIRA Report.
- Gilbert, G. N. J. (2003). *An Introduction to The Mechanical Properties of Nodular Cast Iron (1649)*. BCIRA Report.
- Griffith, A. A. (1921). *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. The Royal Society, 221, 163-198.

- Güzel E., Yüksel Ç., Bayrak Y., Şen Ö. ve Ekerim A. (2014). *Effect of Section Thickness On The Mikrostructure and Hardness Of Ductile Cast Iron*. *Materialprufung*, 56 (4), 285-288.
- Henych, I. (1998). *Trends in Melting and Magnesium Treatment of Ductile Iron Melt*. The Ductile Iron Society's 1998 Keith D. Millis World Symposium on Ductile Iron, USA.
- Imasogie, B.I. ve Wendt, U. (2004). *Characterization of Graphite Particle Shape In Spheroidal Graphite Iron Using A Computer-Based Image Analyzer*. *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, 3(1), 1-12.
- Javaid, A., Thomson J, Sahoo, M. ve Davis, K. (1999). *Factors Affecting the Formation of Carbides in Thin Wall DI Castings*. *AFS Trans*, 107, 441–456.
- Javaid, A. and Davis, K.G. (2002). *Evaluation of Microstructural Factors Affecting the Mechanical Properties of Thin-Wall Ductile Iron Castings*. *Road Materials and Pavement Design*. Microscopy Society of America, 12(1), 177-194.
- Kabnure, B. B., Shinde V.D. ve Kolhapure R. R. (2017). *Property Optimization of Impeller Casting Using GRA*. International Conference on Advances in Thermal Systems, Materials and Design Engineering (ATSMDE 2017), India.
- Karadeniz, E., Çolak, M. ve Barutçu, F. (2017). *GGG-60 Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminde Aşılmalı Türü ve Miktarının İçyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi*. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 6(1), 275-282.
- Karamusaoğlu, H. A. (2009). *Küresel Grafitli Dökme Demir'in (GGG-60) İşlenmesinde Kesici Takım Geometrisinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi*, Karabük Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Kasvayee K. A., Ghassemali E., Svensson I. L., Olofsson J. ve Anders E. W. J. (2017). *Characterization and Modeling of The Mechanical Behavior of High Silicon Ductile Iron*. *Materials Science & Engineering A*, 708, 159-170.
- Kayıkcı, R. ve Akar N. (2007). *Farklı Kesit Kalınlıklarına Sahip Büyük Hacimli Bir Çelik Dökümün Simülasyon Teknikleri ile Tasarlanması*. *Politeknik Dergisi*, 10(4), 219-227.

- Labrecque, C. ve Gagne, M. (1998). *Review Ductile Iron: Fifty Years of Continuous Development*. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37(5), 343-378.
- Laird, G. (1993). *Some Comments on White Cast Iron Microstructures and Wear Properties*. Annual Meeting of the American Foundrymen's Society (AFS): 97th Casting Congress, Chicago.
- Muratore, E. C. (1998). *The Effect of Metallic Charge / Melt History on Nucleation Potential in Ductile Cast Irons*. AFS International Inoculation Conference, USA.
- Megahed H., El-Kashif E., Shash A. Y. ve Essam, M. A. (2018). *Effect of Holding time, Thickness and Heat Treatment On Microstructure and Mechanical Properties of Compacted Graphite Cast Iron*. *Journal of Materials Research and Technology*, 487, 1-9.
- Odabaşı, A. (2004). *Kokil ve Kum Kalıba Döküm Yöntemleriyle Üretilen Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin X-Işınları ve Taramalı Elektron Mikroskobu Çalışmalarıyla Karakterize Edilmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Özdemir, Ö. (2007). *Otomotiv Sektöründe Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimine Etki Eden Parametrelerin Teorik İncelenmesi Ultrasonik Ses Hızı Yöntemiyle Tahribatsız Kontrolü ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması*. Eskişehir Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Ruxanda, R., Sanchez B. L., Massone J. ve Stefanescu D.M. (2001). *on the Eutectic Solidification of Spheroidal Graphite Iron: An Experimental and Mathematical Modelling Approach*. AFS Trans, 109, 1037-1047.
- Skaland, T. (2003). *A New Method for Chill and Shrinkage Control In Ladle Treated Ductile Iron*. Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, USA.
- Smoljan B., Cajner F. ve Landek D. (2002). *An Analysis of Induction Hardening of Ferritic Ductile Iron*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 11, 278-282.
- Sorelmetal (1990). *Sorelmetal Ductile Iron Data Section II*. Montreal: Rio Tinto Iron and Titanium Inc.
- Şen, Ö. (2004). *Dökme Demirlerde Isıl Analiz Yöntemiyle Yapı Belirlenmesi*. Yıldız Teknik Üniversitesi, (Doktora Tezi).
- Tong, X., Zhou H., Liu M. Ve Dai M. (2011). *Effects of Striated Laser Tracks On Thermal Fatigue Resistance of Cast Iron Samples With Biomimetic Nonsmooth Surface*. *Materials and Design*, 32, 796–802.

- Toptaş, M. (2009). *Farklı Isıl İşlemlerin Küresel Grafitli Dökme Demirin Yorulma Davranışına Etkisi*. Afyon Kocatepe Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Türen, Y. (1998). *Kupol Ocağında Kullanılan Flakslardan Kireçtaşı ve Mermerin Alternatif Kullanımının Gri Dökme Demirin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi*. Gazi Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Yalçın, E. (2014). *İnce ve Kalın Kesitli SiMo Küresel Dökme Demirlerin Isıl İşlem Öncesinde ve Sonrasında Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri*. 7. Uluslararası Ankiros Döküm Kongresi, İstanbul.
- Yalçın, Y. (2007). *Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Aşınma Davranışının İncelenmesi*. Tübitak Projesi Raporu.
- Yavuz, K. (2006). *GGG-70 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demir Kam Millerinin İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması*. Gazi Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Yıldız, M. (2014). *Dökme Demirlerde Nicel Faz Teknikliklerinin İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi).
- Yıldız, M., Çolak M. ve Kayıkcı R. (2013). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Dökümünde Ticari Olarak Kullanılan Farklı Küreleştirici ve Aşıl原因cılarının Döküm Kalitesine Etkisinin İncelenmesi*. 1st. International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, Sakarya.
- Yılmaz, F. (2003). *İçme-Atık Su ve Gaz Dağıtım Şebekelerinde Dökme Demirler ve Düktil Demir Uygulamaları*. İstanbul: İstanbul Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi Yayını.

ÖZGEÇMİŞ



Oğuzhan ÇOLAK

1990 yılında Samsun'da doğdu. İlköğretimini Samsun 23 Nisan İlköğretim Okulunda, Lise Eğitimini Samsun Tülay Başaran Anadolu Lisesinde tamamladı. Son dönemi Erasmus Öğrenci Öğretim Hareketliliği kapsamında Opole University of Technology'de olmak üzere Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünü bitirdi. 2015 yılında Çevre ve Şehircilik Bakanlığı'na bağlı Bayburt İl Müdürlüğü'ne Makine Mühendisi olarak atandı. Aynı yıl Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği tezli yüksek lisans eğitimine başladı. 2017 yılında Anadolu Üniversitesi İktisat Fakültesi-Kamu Yönetimi Bölümünü bitirdi. Oğuzhan ÇOLAK Meslek hayatına Bayburt Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğü bünyesinde devam etmektedir.