

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

**DÖKME DEMİRLERDE NİCEL FAZ ANALİZ
TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhterem YILDIZ

Enstitü Anabilim Dalı

:

METAL EĞİTİMİ

Tez Danışmanı

:

Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI

Ocak 2014

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DÖKME DEMİRLERDE NİCEL FAZ ANALİZ
TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhterem YILDIZ

Enstitü Anabilim Dalı : METAL EĞİTİMİ

Bu tez / ... /2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/Oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

.....
Jüri Başkanı

.....
Üye

.....
Üye

ÖNSÖZ

Çalışmalarımnda bana her zaman destek olan tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Ramazan KAYIKCI' ya, deneyleri gerçekleştirmemde bana yardımcı olan Sayın Arş. Gör. Murat ÇOLAK' a, Anadolu Döküm Sanayi A.Ş. çalışanlarına teşekkür ederim. Ayrıca çalışmalarımı gerçekleştirdiğim Sakarya Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü çalışanlarına teşekkür ederim.

Ayrıca bana, her zaman her konuda yardımcı olan ve hayat boyu en büyük desteği sağlayan sevgili eşim ve oğluma teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
TABLOLAR LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii

BÖLÜM 1.

LİTERATÜR TARAMASI.....	1
1.1. Dökme Demirler	1
1.2. Dökme Demir Çeşitleri	4
1.2.1. Beyaz dökme demir.....	4
1.2.2. Lamel grafitli (gri) dökme demirler	5
1.2.3. Kompakt (vermiküler) grafitli dökme demirler	5
1.2.4. Temper dökme demir.....	6
1.2.5. Küresel grafitli dökme demirler	7
1.3. Dökme Demirlerin Yapı Bileşenleri.....	8
1.3.1. Grafit	8
1.3.2. Sementit	8
1.3.3. Ferrit	8
1.3.4. Perlit	8
1.3.5. Steadit	8
1.3.6. Ostenit	8
1.3.7. Ledeburit	9

BÖLÜM 2.

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER.....	10
2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Metalurjisi	11
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demire Alaşım Elementlerinin Etkisi	11
2.2.1. Karbon.....	13
2.2.2. Silisyum.....	13
2.2.3. Manganez	14
2.2.4. Fosfor	14
2.2.5. Kükürt.....	14
2.2.6. Bakır	14
2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	14
2.3.1. Ferritik küresel grafitli dökme demirler	16
2.3.2. Ferritik-Perlitik küresel grafitli dökme demirler	16
2.3.3. Perlitik küresel grafitli dökme demirler	16
2.3.4. Martenzitik küresel grafitli dökme demirler	17
2.3.5. Beynitik küresel grafitli dökme demirler	17
2.3.6. Ostenitik küresel grafitli dökme demirler	17
2.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan İşlemler.....	17
2.4.1. Küreleştirme (magnezyum) işlemi	17
2.4.2. Küreselleştirme etkisinin zamanla azalması.....	19
2.4.3. Potada küreleştirme işlemi (sandwich yöntemi)	21
2.4.4. Kapaklı pota yöntemi	22
2.4.4.1. İbrikli pota yöntemi	23
2.4.4.2. Daldırma (Plunger) yöntemi	24
2.4.4.3. Üfleme yöntemi	24
2.4.4.4. Konvektör yöntemi	25
2.4.4.5. Vorteks küreleştirme yöntemi	26
2.4.4.6. Kalıpta (Inmold) yöntemi	26
2.4.5. Küreselleştiricinin sıvı metale verilmesi	27
2.4.6. Küreselleştiricinin potadaki sıvı metalin üstüne atılması.....	27
2.5. Aşılama	27
2.5.1. Aşılama teknikleri	27
2.5.2. Aşılama etkisinin zamanla azalması	28

2.6. Grafitin Dağılımı ve Şeklini Etkileyen Elementler.....	29
2.7. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Katılaşması	30
2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mühendislik Özellikleri.....	34
2.8.1. Çekme mukavemeti.....	34
2.8.2. Yorulma mukavemeti	34
2.8.3. Aşınma direnci.....	35
2.8.4. Titreşim sönümlenme	35
2.8.5. Termal şok	35
2.8.6. Korozyona direnç	35
2.9. Küresel Grafitli Dökme Demirin Kullanım Alanları.....	35
BÖLÜM 3.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	37
3.1. Deneyleerde Kullanılan Numunelerin Temin Edilmesi.....	37
3.2. Metalografik Hazırlık Süreçleri	38
3.3. Clemex Vision Lite Yazılımıyla Görüntü Analizlerinin Yapılışı.....	38
3.3.1. Küreselleşme incelemesi ve ölçülmesi.....	39
3.4. Faz Dağılımının İncelenmesi ve Ölçülmesi	49
BÖLÜM 4.	
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	58
4.1. Parlatma Sonrası Mikroyapı ve Görüntü Analiz Sonuçları.....	58
4.2. Dağlama Sonrası Mikroyapı ve Görüntü Analiz Sonuçları	62
BÖLÜM 5.	
GENEL SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR.....	68
ÖZGEÇMİŞ	73

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Fe	: Demir
Fe ₃ C	: Demir Karbür (Sementit)
C	: Karbon
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Ni	: Nikel
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
Ce	: Seryum
CE	: Karbon eşdeğerliği
KGDD	: Küresel grafitli dökme demir
DIN	: Alman norm enstitüsü
ASTM	: Amerikan standart
BCIRA	: İngiliz dökme demir Araştırma Derneği
TSE	: Türk standartları enstitüsü
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Dökme demirlerde Si ve C oranına göre içyapı oluşumu (Maurer Diyagramı)	3
Şekil 1.2. Tipik beyaz dökme demir yapısı	4
Şekil 1.3. Gri ve beyaz dökme demirde soğuma eğrileri	5
Şekil 1.4. a) Mg ilavesi ile yapı değişimi, b) Perlitik dökme demirde Mg ilavesi ile çekme mukavemeti değişimi, c) Mg,Ti, Ce ilavesi ile yapı değişimi ..	6
Şekil 1.5. a) x100 büyütmedeki temper yapısı, b) x500 büyütmedeki temper yapısı	7
Şekil 2.1. Tipik Küresel Grafit Yapısı	10
Şekil 2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirde Boğa Gözü	11
Şekil 2.3. KGDD'lerde en iyi döküm aralığının şematik gösterimi	13
Şekil 2.4. Magnezyumun küreselleşmeye etkisi	18
Şekil 2.5. Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi	20
Şekil 2.6. Magnezyum ile küreleştirme işlemi için uygun bir döküm potasının çap ve yüksekliği arasındaki bağlantılar	21
Şekil 2.7. Sandwich yöntemi	22
Şekil 2.8. BCIRA – Kapaklı pota.....	22
Şekil 2.9. İbrikli pota yöntemi.....	23
Şekil 2.10. Daldırma yöntemi	24
Şekil 2.11. Üfleme yöntemi	25
Şekil 2.12. Kalıpta küreleştirme.....	26
Şekil 2.13. Magnezyum ve aşılamanın mikro yapıda yaptığı değişim	28
Şekil 2.14. KGDD'de grafit hataları a) Gelişmemiş grafit, b) Yarı lamelli grafit, c) Küçük lamelli grafit, d) Patlamış grafit.....	30
Şekil 2.15. Ötektik altı KGDD' in tipik ideal ve gerçek soğuma eğrileri.....	31
Şekil 2.16. KGDD'lerde tipik bölgelerin gösterimi	32

Şekil 2.17. Ötektikaltı küresel grafitli dökme demir katılaşmasının şematik gösterimi	32
Şekil 2.18. Katı bir daire içinde kürenin eş ısıl büyümesi ve bir düzgün ara yüzle dairenin büyümesi a)Ötektik öncesi faz katılaşması: sıvı ile temastaki kürenin büyümesi b)Ötektik katılaşma: daire çevrelemesi c)Katı daire içinde kürenin büyümesi	33
Şekil 2.19. Ötektik üstü küresel grafitli dökme demirin katılaşma sırasının şematik gösterimi, (a) Grafitin eş düzlem kesitinde katılaşmanın yolu, (b) soğuma eğrisi	34
Şekil 3.1. Bilgisayar destekli imaj analiz sistemi görüntüsü.....	38
Şekil 3.2. KGDD numune örnek mikroyapısı (dağlanmamış).....	40
Şekil 3.3. Kayıtlı resmin programa yüklenmesi.....	40
Şekil 3.4. Resim yükleme işleme sonrası ekran görüntüsü.....	41
Şekil 3.5. Resim özelliklerinin geliştirilmesi menüsünde örnek görüntü	42
Şekil 3.6. Resim özelliklerinin geliştirilmesi uygulaması örnekleri	42
Şekil 3.7. Ton dönüştürme menüsü görünümü	43
Şekil 3.8. “Auto Gray Threshold” seçeneği ile iki fazlı yapıdaki dönüştürme işlemi görüntüsü.....	43
Şekil 3.9. İki faz olduğu varsayılan mikroyapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntü	44
Şekil 3.10. Kürelerin içinin doldurulması işlemi menüsü görüntüsü.....	45
Şekil 3.11. Grafit kürelerinin içinin doldurulması	45
Şekil 3.12. Belli sınır değeri altındaki yapıların kaldırılması menüsü	46
Şekil 3.13. Belirlenen sınır değeri altındaki kürelerden seçimin kaldırılması	46
Şekil 3.14. Küresellik sonuçlarının seçimi menüsü	47
Şekil 3.15. Renklendirilmiş faz ve kürelere ait mikroyapı görüntüsü.....	47
Şekil 3.16. a)Ölçülen küre sayısı ve uzunlukları, b)Küreselleşme oranının tespiti, c)Faz oranlarının tespiti.....	48
Şekil 3.17. Asiküler KGDD numune örnek mikroyapısı 100x (Dağlanmış)	49
Şekil 3.18. Resim yükleme işleme sonrası ekran görüntüsü	50
Şekil 3.19. Resim özelliklerinin Delineate işlemi uygulanarak geliştirilmesi	50
Şekil 3.20. “Auto Gray Threshold” seçeneği ile iki fazlı yapı da eşleştirmesi sonucu görüntüsü.....	51

Şekil 3.21. Üç faz olduğu varsayılan mikroyapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntü	51
Şekil 3.22. Grafit kürelerinin içinin doldurulması	52
Şekil 3.23. Grafit kürelerinin etrafında kapalı alan oluşmaması resmi.....	52
Şekil 3.24. Grafit kürelerinin içinin manuel olarak doldurulması sonucu resim görüntüsü	53
Şekil 3.25. Belirli bir çapın altındaki kürelerin seçiminin kaldırılması	54
Şekil 3.26. Sonuçların görüntülenmesi için gerekli menü görüntüsü ve yüzde faz dağılımı oluşumu için oluşturulan nihai “routine” menüsü	55
Şekil 3.27. Örnek mikroyapı numunesi için yüzde faz dağılımı verilmiştir	55
Şekil 3.28. Mikroyapı numunesi yüzde faz dağılımı	56
Şekil 4.1. Ferrit + perlit içeren 1 numaralı numune mikro yapı resimleri	59
Şekil 4.2. Perlit + ferrit içeren 2 numaralı numune mikroyapı resimleri	59
Şekil 4.3. Perlitik alaşımlı 3 numaralı numune mikroyapı resimleri	60
Şekil 4.4. Asiküler yapı 4 numaralı numune mikroyapı resimleri	60
Şekil 4.5. Ferrit + perlit içeren 1 numaralı numune mikro yapı resimleri	62
Şekil 4.6. Perlit + ferrit içeren 2 numaralı numune mikroyapı resimleri	63
Şekil 4.7. Perlitik alaşımlı 3 numaralı numune mikro yapı resimleri	64
Şekil 4.8. Asiküler yapı 4 numaralı numune mikro yapı resimleri	65
Şekil 4.9. Parlatma sonrası numunelere ait imaj analiz sonuçları	65

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Dökme demir çeşitleri ve bulunan elementler	3
Tablo 1.2. Muhtelif elementlerin grafit yapısına etkileri	7
Tablo 2.1. TS 526/1977'e göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması	15
Tablo 2.2. Alman standartları (DIN 1693).....	15
Tablo 2.3. ASTM, A 536-70 standardı	15
Tablo 2.4. KGDD'lerin çeşitleri ve mikro yapısı	16
Tablo 2.5. Tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan işlem yöntemleri	19
Tablo 2.6. Alaşım cinsi ve küreselleştirme işlemi tipine göre Magnezyum verimi (% olarak).....	20
Tablo 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerinin kimyasal bileşimleri	37
Tablo 3.2. Örnek numune için yüzde faz dağılımı.....	57
Tablo 4.1. Parlatma sonrası numunelere ait imaj analiz sonuçları.....	61

ÖZET

Anahtar kelimeler; Küresel grafitli dökme demirler, Faz analizi, Küreleşme analizi.

Kimyasal bileşiminde genel olarak yaklaşık % 2–4 C ve % 1–3 Si içeren demir malzemeler genel olarak dökme demir olarak isimlendirilir. Bu malzemeler nihai şekil ve boyutlara ancak dökümle getirilebildiği için dökme demir sınıfına dahil edilirler. Dökme demirlerde karbon miktarının büyük kısmı katılaşma sırasında ayrışır ve dökme demirin mikro yapısında ayrı bir yapı elemanı olarak görülür. Dökme demirlerde malzemenin kimyasal bileşimi, soğuma hızı ve üretim yöntemine bağlı olarak katılaşma sırasında karbonun oluşturduğu şekil ve biçim dökme demirin tipini belirlemekte ve malzeme özellikleri üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Ayrıca dökme demirlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin oluşumunda, mikro yapılarında meydana gelen fazların büyük etkisi vardır.

Bu tez çalışması kapsamında optik mikroskop ve imaj analiz yönteminin dökme demirlerin mikroyapısal özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilirliği incelenmiştir. İmaj analizi olarak adlandırılan sistemlerin temel prensibi bir mikroskop, mikroskoba bağlı bir kamera ve bu kamera aracılığı ile hazırlanan numunelerden alınan görüntünün bilgisayara aktarılması ve bilgisayarda bir program ile kullanıcı tanımlı, yarı otomatik ya da otomatik olarak analizlerin yapılması esasına dayanmaktadır. Numune üzerinden alınan mikro yapı resimlerinden bu teknik sayesinde; tane boyutu, kalınlık ölçümü, küreselliğin ölçümü, fleyk grafit sınıflandırması, faz dağılımı, üç noktadan yarıçap ölçümü ve tanecik sayımı gibi analizler yapılabilmektedir.

Bu çalışmada endüstriyel koşullarda dökülmüş küresel ve lamel grafitli dökme demirlerde faz oranlarının nicel olarak ölçülebilmesine yönelik imaj analiz tekniklerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Çalışma kapsamında bu amaca ulaşmak için; metalografik numune hazırlama, dağlama, optik mikroskop ve imaj (görüntü) analiz teknikleri ve renkli metalografi teknikleri kullanılmıştır.

INVESTIGATION OF QUANTITATIVE PHASE ANALYSIS METHODS IN CAST IRONS

SUMMARY

Key Words; Spherical Raphite Irons, Phase Analysis, Spherodization Analysis.

Ferrous materials which contain approximately 2-4 % C and 1-3 % Si are generally named cast irons. Since, these materials can only be brought into their final shapes they are classified as cast irons. During solidification most of the carbon separate out to form a new phase in the microstructure of cast irons. The shape of carbon which depends on the chemical composition, cooling rate and way of production during solidification, determines the type of cast iron and its properties. Additionally, phases forming in the microstructure have significant effects on the formation of physical and mechanical properties of cast irons.

In this thesis study, to identify the microstructural features the use of optical microscope and image analysis methods have been investigated. The main principle of image analysis systems is based on a microscope, a camera connected to the microscope and a camera image taken from prepared samples transferred to a computer captured by the camera and analysis of the image by the user semi-automatically or automatically. Such analysis as, grain size, thickness measurements, spheroidization, fleyk graphite classification, distribution of the phases, three points radius measurement and grain counts can be conducted.

The aim this study is to investigate the effective use of image analysis techniques for quantitative identification of the microstructural phases in commercially produced cat irons. During the study to achieve this aim, metallographic sample preparation, etching, optical microscope, image analysis techniques and colour metallography have been used.

BÖLÜM 1. LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Dökme Demirler

Ham demirin (pik) ergitme fırınlarında ergitilmesi ve bazı metalürjik işlemlerle değişiklik yapılması sonucu bir kalıp içine dökülmesine ve kalıp boşluğu şeklini alarak katılaşması ile meydana gelen malzemeye dökme demir denir [1]. Dökme demirler, çeliklere benzer demir-karbon alaşımı sınıfına girerler. Demir içinde %2'ye kadar C oranı var ise çelik olarak; % 2'den % 6,67'ye C içerdiğinde ise malzeme dökme demir olarak isimlendirilir. Ancak yüksek C oranı malzemeyi aşırı kırılgan yaptığı için dökme demirler % 4'e kadar C, % 3,5'e kadar Si içerirler.

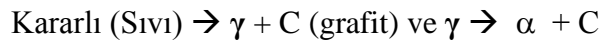
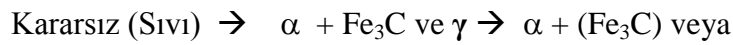
Dökme demirler döküm endüstrisinin en yüksek tonaja sahip ürününü teşkil etmektedirler. Dökme demirlerin iyi bir mühendislik malzemesi olması ve ucuz üretilebilmesi bu malzemeye talebi arttırmaktadır. Dökme demirlerinde değişik mühendislik özelliklerinin bulunması kullanım sahasının genişlemesini sağlamaktadır[2]. Dökme demirler, sünek olmadıkları için soğuk ve sıcak işlemler uygulanmak suretiyle şekillendirilemezler. Ama gerek döküm kolaylığı gerekse de mamul parça özellikleri ve aşağıdaki özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptirler [1].

- a. Düşük ergime sıcaklığı (1150-1300°C),
- b. İyi akışkanlık (ötektik bileşime yakın),
- c. Döküm ve kalıp şeklini alabilme kabiliyetinin yüksek olması,
- d. Ergitme işlemlerinin kolaylığı ve ucuzluğu,
- e. Kimyasal bileşim sınırlarının geniş tutulabilmesi,
- f. Çeşitli kısımlardan ibaret bir iş parçasının tek bir işlemle elde edilebilmesi,
- g. Talaşlı imalat tekniğinde iyi işlenebilmesi,

- h. Titreşim söndürme özelliğinin çok iyi olması,
- i. Basma mukavemetinin yüksek olması,
- j. Aşınma ve korozyona dayanıklılık,

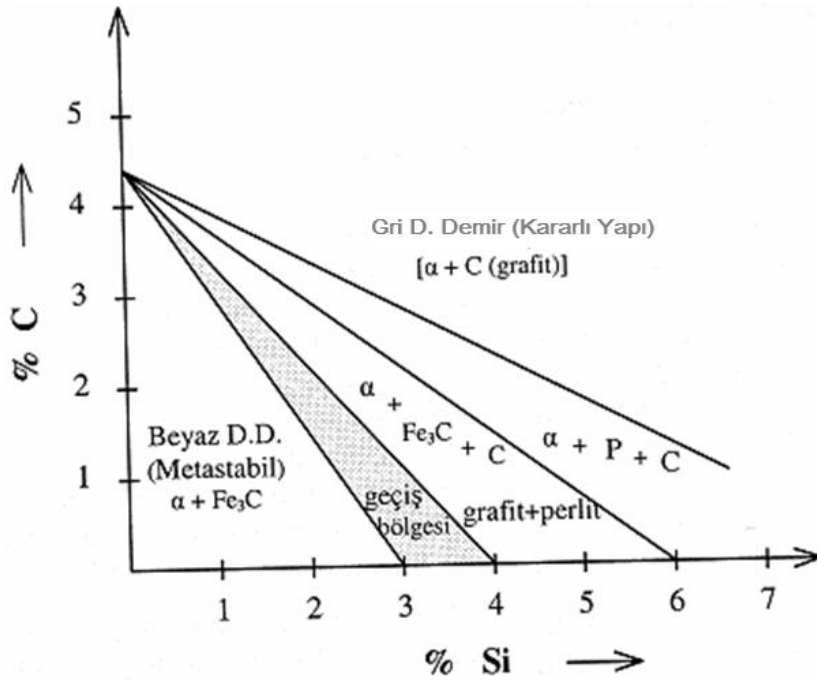
İçyapı oluşumuna kimyasal kompozisyonlarının yanında özellikle soğutma hızı ve alaşım elementleri yardımıyla müdahale edilebilmektedir. Bu şekilde içyapının hangi fazlardan oluştuğuna, oluşan fazların şekline ve oranına bağlı olarak isimlendirilmesiyle birlikte genel özelliklerinin değişimi sağlanır [1,3].

Malzemede, normal hızda soğumayla kararsız katılaşmanın gereği olan α ve kararsız Fe_3C (sementit) fazları oluşur. Bu tür malzemelerin kırılma yüzeyleri beyaz parlak gümüş renginde görüldüğü için beyaz dökme demir adını alır. Aynı kompozisyon aralığının kararlı katılaşma gösteren (çeşitli oran ve şekillerde α ve C fazlarından oluşan) alaşımlarına ise (grafitlerin etkisiyle kırılma yüzeylerinin koyu renginden dolayı) gri dökme demir denir. Aynı karbon oranında da olsa, katılaşma ve dönüşümlerin sonuç itibarıyla;



sistemlerden hangisine göre gerçekleşeceği (gri veya beyaz dökme demirlerden hangisinin oluşacağı), faz dönüşümlerinin gerçekleştiği soğuma hızına, alaşım elementlerinin cinsine ve oranına bağlı olacaktır (Şekil 1.1) [3].

Soğuma hızının artması ve özellikle Mn, Cr, Mo, V gibi elementlerin varlığı kararsız katılaşmaya yol açar. Soğuma hızının kontrollü tutulması (fırında soğutma gibi) veya yüksek sıcaklıklarda tutarak soğutma ve Si başta olmak üzere Al, Ni, Cu, Ti gibi elementlerin varlığı, (C oranının artışı) grafit oluşumunu teşvik eder [3].



Şekil 1. 1. Dökme demirlerde Si ve C oranına göre içyapı oluşumu (Maurer Diyagramı) [3]

Dökme demirler günümüzde endüstride en çok ve yaygın kullanma durumuna göre; gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, beyaz dökme demir ve temper dökme demir olmak üzere dört ana grup şeklinde sınıflandırılır (Tablo 1.1).

Tablo 1. 1. Dökme demir çeşitleri ve bulunan elementler [4]

Element	Küresel grafitli Dökme Demir	Gri Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	Temper Dökme Demir
Karbon	3,0- 4,0	2,5-4,0	1,3-3,6	2,00-2,60
Silisyum	1,8-2,8	1,0-3,0	0,5-1,9	1,10-1,60
Mangan	0,10-1,00	0,25-1,0	0,25-0,80	0,20-1,00
Kükürt	0,03 maksimum	0,02-0,25	0,06-0,20	0,04-0,18
Fosfor	0,10 maksimum	0,05-1,0	0,06-0,18	0,18 maksimum

1.2. Dökme Demir Çeşitleri

1.2.1. Beyaz dökme demir

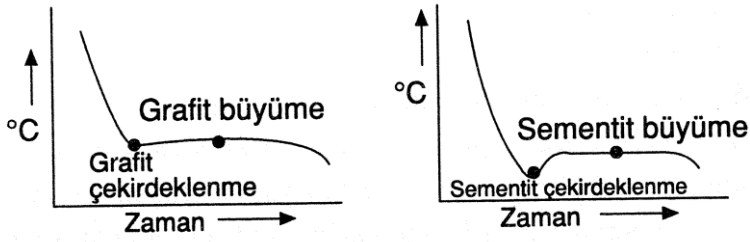
Yüksek soğuma hızlarında gerçekleşen katılaşma ve dönüşümlerle karbonun sementit (Fe_3C) halinde oluştuğu kırılma yüzeyi beyaz görünen dökme demir çeşididir. Kırılma yüzeyine göre beyaz dökme demir denilirken, kararsız katılaşma ve dönüşümlerin verdiği baskın özelliklerden dolayı da sert döküm demir [3].

Dökme demirler iki farklı mekanizmayla katılaşırlar. Gri ve beyaz dökme demir diye anılan bu iki farklı katılaşma yapıları bazı ortak özellikler de gösterirler. Genel olarak; Si ve Ni' in gri dökme demir yapısını oluşturma özelliği, Mn ve Cr'da beyaz dökme demir özelliği vardır. Yüksek oranda S içeren dökme demirlerde ($S > \%0,15$) gri yapı oluşurken düşük S yüzdelerinde ise beyaz yapı oluşur (Şekil 1.2).



Şekil 1. 2. Tipik beyaz dökme demir yapısı [5]

Beyaz dökme demirlerde ana yapıyı oluşturan Fe_3C 'nin çekirdeklenmesi genellikle yavaştır. Ayrıca çekirdeklenmenin oluştuğu sıcaklık da oldukça düşüktür. Çekirdeklenmeden sonra hızlı bir Fe_3C büyümesi meydana gelir. Grafit ise Fe_3C 'den daha yüksek sıcaklıkta çekirdeklenip büyür ve gri dökme demir yapısını oluşturur. Ani bir aşırı soğumada Fe_3C 'nin grafitten daha hızlı büyüyeceği genel bir kabuldür [1]. Şekil 1.3'de Gri ve beyaz dökme demirlerde soğuma eğrileri verilmiştir.



Şekil 1. 3. Gri ve beyaz dökme demirde soğuma eğrileri

1.2.2. Lamel grafitli (gri) dökme demirler

Gri dökme demir kararlı katılaşma ve (düşük soğuma hızlarında) dönüşümler sonucu karbon atomlarının esas itibariyle grafit kristalleri halinde yapı içerisinde yer aldığı ve bu yüzden de kırılma yüzeylerinin koyu (gri) görüldüğü için gri dökme demir olarak adlandırılmaktadır. Geniş kullanım alanı bulan dökme demir grubudur.

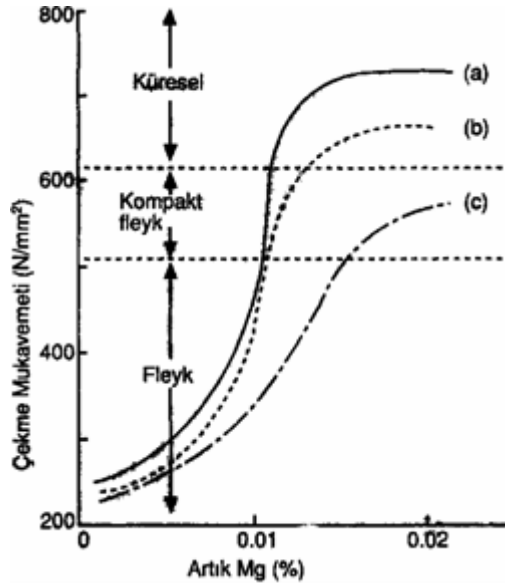
Gri dökme demirler iyi döküm kabiliyeti, kabul edilir mukavemet, iyi işlenebilme kabiliyeti gösterip kritik olmayan parçalar üretilebilir. Gri dökme demirlerin üretim maliyeti düşüktür. Gri dökme demire % 3,2 C, % 1,9 Si, % 0,69 Mn, % 0,09 S ve % 0,04 P bileşimi örnek verilebilir. Bu bileşim fazla kritik olmadığından metalografik veya mekanik özellik adlandırılmada ölçü olarak alınabilir [1].

Gri dökme demir terimi belli bir dökme demir tipini belirtiyorsa da gri dökme demirin kimyasal bileşimi yapı ve özellikleri geniş sınırlar içinde değişebilmektedir. Gri dökme demirler esas olarak demir - karbon - silisyum alaşımı olup ötektik sıcaklığında ostenit'in katı eriyik olarak içerebileceğinden fazla karbonu olan alaşımlardır. Bileşimdeki bu fazla karbon grafit lamelleri halinde çöker. Gri dökme demirler genellikle % 1.7 ile 4.5 karbon ve % 1 ile 3 silisyum içerirler [2].

1.2.3. Kompakt (vermiküler) grafitli dökme demirler

Bu dökme demire bazen vermiküler grafitli dökme demir de denilmektedir. Sıvı Fe-C-Si alaşımına az miktarda Mg ilave edilerek fleyk-kompakt-küresel grafit geçişi sağlanır. Tümüyle kompakt grafitli yapı elde etmek çok zordur. Şekil 1.4'de görüldüğü gibi Mg, Ce, Ti üçlüsü sayesinde oldukça geniş bileşim aralığında kompakt

yapı elde edilebilir. Sadece Mg ilavesiyle tam kompakt yapı elde etmek zordur. Fleyk veya küresel grafit yapmaya elverişli dökme demirlere Mg-Ce-Ti alaşımı kalıp veya potada ilave edilerek uygulanabilmektedir. Mağnezyum ve Seryum, Kükürtle kolayca reaksiyona girebilmektedir. Düşük curuf oluşumu ve ekonomik olması açısından sıvı alaşımdaki kükürt yüzdesi 0,035'ten az olmalıdır.

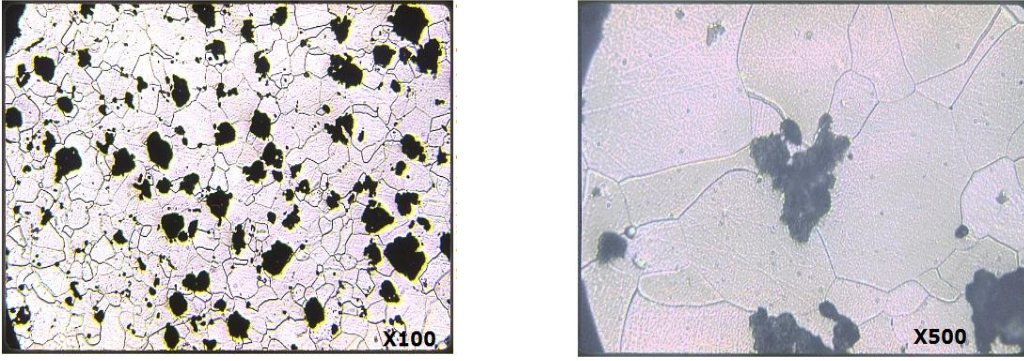


Şekil 1. 4. a) Mg ilavesi ile yapı değişimi, b) Perlitik dökme demirde Mg ilavesi ile çekme mukavemeti değişimi, c) Mg, Ti, Ce ilavesi ile yapı değişimi [1]

Kalın parçalarda küresel yapı elde etmek için % 0,015'e kadar N_2 ilavesi yapılır. İlave edilen N_2 'nin kontrolü çok zor olduğu için tamamen küresel yapı elde edilemez. Bunun sonucu olarak mekanik özellikler bozulur. Günümüzde nitrürlenmiş ferro - manganez kullanımı ile bu problem kısmen giderilerek, iyi mukavemetli fleyk grafitli dökme demirler ucuz olarak üretilebilmektedir [1].

1.2.4. Temper dökme demir

Temper dökme demir; grafit-siz, sert ve kırılğan olan beyaz dökme demirin temperlenmesi olarak adlandırılmaktadır. Isıl işlem ile karbürlerin parçalanması sonucu oluşan, yüksek mukavemetli, sünek ve iyi işlenebilme özelliğine sahiptir. Ayrıca mikro yapısı ferrit ve temper karbonundan meydana gelen rozet şekilli dökme demir Şekil 1.5'te görülmektedir [4].



Şekil 1. 5. a) x100 büyütmedeki temper yapısı, b) x500 büyütmedeki temper yapısı [6]

1.2.5. Küresel grafitli dökme demirler

Küresel grafitli dökme demirin (KGDD) serbest karbonu, lamel yerine küre şeklindedir. Bu nedenle ABD'de nodüler dökme demir, İngiltere'de ise KGDD olarak adlandırılır. Karbonun lamel yerine küre şeklinde olması için aşılama işlemi yapılır. Küresel yapının oluşması için dökümden önce ergiyik demire çok küçük miktarda magnezyum ilave edilmektedir. Ayrıca bileşime bazı elementler ilave edilerek değişik yapılar elde edilmektedir. Tablo 1.2'de muhtelif elementlerin grafit yapısına etkileri görülmektedir [7].

Tablo 1. 2. Muhtelif elementlerin grafit yapısına etkileri

Küreleştiriciler	Çekirdekleyici	Fleyk Yapanlar	Küreseli 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)

Küresel grafitli dökme demirin kimyasal kompozisyonu gri dökme demire benzemektedir. Grafitlerin lamel yerine küre şeklinde olması, dökme demire süneklik ve mukavemet gibi özellikler kazandırır. Lamel grafitli dökme demir ile küresel

grafitli dökme demirin bileşimleri açısından önemli bir farkları yoktur. Fakat karakteristik özellikleri ve kullanım alanları bakımından büyük farklılıklar bulunmaktadır [7].

1.3. Dökme Demirlerin Yapı Bileşenleri

1.3.1. Grafit

Karbon, demire bağlı olarak sementit (beyaz dökme demir) veya serbest olarak grafit halinde (gri d.d., temper d.d., küresel grafitli d.d.) bulunur.

1.3.2. Sementit

Bir demir - karbür (Fe_3-C) metallar arası bileşiği olduğu için çok sert ve gevrek.

1.3.3. Ferrit

İçerisinde pek az miktarda karbon (oda sıcaklığında % 0,02) bulunan çok yumuşak ve uzama kabiliyeti yüksek demirdir.

1.3.4. Perlit

Bir ötektoid bileşimidir. Ferrit tabakalarının sementit tabakaları üzerine alternatif olarak girmesiyle meydana gelir. Sertliği ve mukavemeti ferritten fazladır.

1.3.5. Steadit

Bir demir - fosfat (Fe_3P) bileşiğidir. Çok sert ve gevrek bir yapıdadır.

1.3.6. Ostenit

Adi dökme demirlerde, $750^{\circ}C$ 'nin üzerinde görülen yüzey merkezli kübik Fe - C kristali şeklindedir. Özel dökme demirlerde oda sıcaklığında da yapıda bulunabilir.

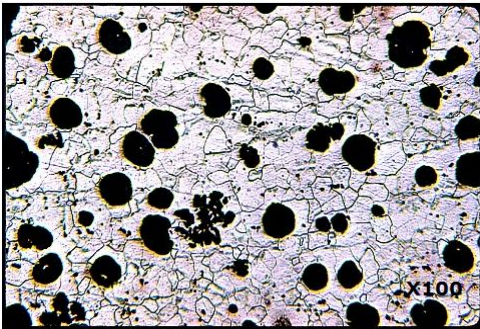
1.3.7. Ledeburit

Ötektik yapısının özel ismidir. Dökme demirler genel olarak yukarıdaki yapılardan iki veya daha fazlasına sahiptirler. Yukarıda kısaca belirttiğimiz yapı bileşenleri aynı zamanda çelikte de bulunmaktadır.

BÖLÜM 2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Küresel grafitli dökme demirlerin, yeni bir malzeme olarak ortaya çıkışı 7 Mayıs 1948'de “*Philadelphia Pennsylvania'daki American Foundrymen's Society*” toplantısına dayanmaktadır. Krom gibi bazı maddeler kritik malzeme olarak görünmeye başlamıştı. Bu element yerine karbonla karbür yapacağı bilinen ve tahmin edilen diğer elementlerle birlikte magnezyum da denenmiştir. Farklı bir çalışmada ise nikel içeren martenzitik beyaz dökme demir üretiminde magnezyum kullanılarak bazı farklı sonuçlar alınmıştır [8]. Yine aynı toplantıda küresel grafitli dökme demir üretimi konusunda sunduğu tebliğde Amerika'daki çalışmalardan bağımsız olarak dökme demirde küresel grafit teşekkülünün nadir toprak elementlerinden seryum ile mümkün olduğu açıklanmıştır [9].

Bu tip dökme demir için sphero, nodüler ve küresel grafitli adları kullanılmıştır. Ülkemizde kabul edilen daha çok Küresel Grafitli Dökme Demir tabiridir (Şekil 2.1).

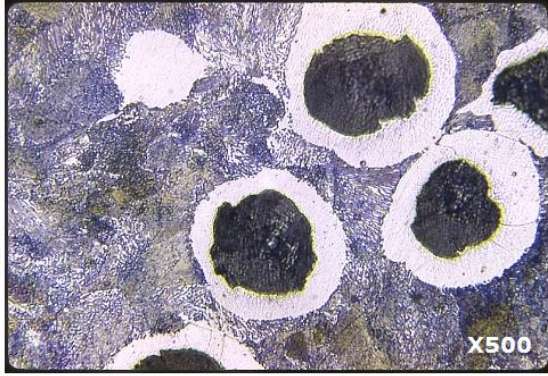


Şekil 2. 1. Tipik Küresel Grafit Yapısı [6]

Küresel grafitli dökme demirin, çeliğinkine benzer bir matris içinde dağılmış küre şekilli grafitlerden oluşur. Yapı açısından gri dökme demirden ayrıcalığı grafitlerin

şeklidir. Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri grafit şekli ve matris yapısı tarafından etkilenmektedir [2].

Ayrıca Şekil 2.2’de KGDD’lerde Boğa Gözü görülmektedir.



Şekil 2. 2. Küresel Grafitli Dökme Demirde Boğa Gözü [5]

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Metalurjisi

Küresel grafitli dökme demirler gri dökme demirlerden farklı olarak, aynı karbon eş değerliği için, ötektik katılaşması daha yüksek sıcaklıkta başlayan malzemelerdir. Bu durum küre şekilli grafit bir östenit kabuğu ile çevrilir ve yalnız bir faz (östenit) ötektik yapıyla temas halinde kalır. Bu tarz katılaşmaya neo-ötektik katılaşma denilmektedir. Her bir östenit kabuğu bir hücredir. Bu hücre içindeki grafitin büyüebilmesi için östenit kabuğundan içeriye doğru karbon difüzyonu olmalıdır. Bu nedenle küresel grafitli dökme demirlerde, gri dökme demirlere nazaran daha yavaş bir katılaşma olmaktadır. Neo-ötektiğin büyümesi başladıktan sonra, küresel grafit çekirdeklenmesi olmaz. Dolayısıyla küresel grafitlerin sayısı katılaşmanın hemen başlangıcında belirlenmiş olur. Ötektoid sıcaklığına kadar mevcut grafitler üzerine karbon çökmesi olur [10]. Sıvı ile temas halinde bulunan ve içerisinde grafit büyümesi ile gerçekleşen neotektik katılaşma aralığı 50 °C’ye kadar çıkabilmekte olup, sıvının bulunduğu sıcaklık aralığı daha geniş olmaktadır [11,2].

2.2. Küresel Grafitli Dökme Demire Alaşım Elementlerinin Etkisi

Küresel grafitli dökme demirlerin bileşimindeki temel elementler karbon ve

silisyumdur. Karbon, pik geri dönüşüm hurdalarından ve karbon içeren malzemelerden sağlanarak grafitlerin oluşumu gerçekleşmektedir.

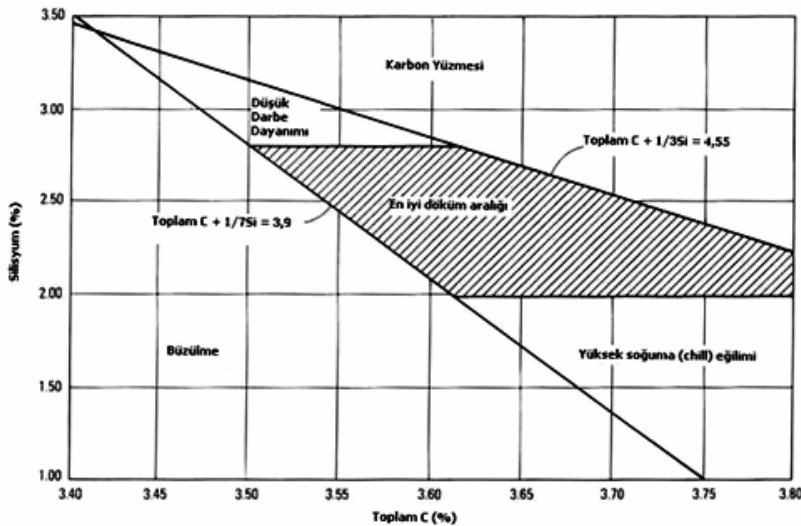
Küresel grafitli dökme demirlere ilave edilen alaşım elementlerinin tür ve miktarları büyük önem taşımaktadır. KGDD'lere ilave edilen alaşım elementlerinin en önemlileri karbon (C) ve silisyum (Si)'dir. Karbon miktarı % 3 - 4 arasında olmaktadır. Silisyum ise küreleştirme ve aşılamağa bağılı olarak, kesit kalınlığına göre, 1,2-2,5 cm kesit kalınlığına sahip parçalar için % 1,8 - 2,9 arasında bulunmaktadır. KGDD'ler de karbon eşdeğerliği (KE) genellikle % 4,3 - 4,65 arasında değişmektedir. Kesit arttıkça karbon eşdeğerliği azalmaktadır. Bunun sebebi ise kalın kesitli ve yüksek karbon eşdeğerliği'ne sahip bir KGDD'de, döküm parça üst yüzeyinde karbon yüzmesi adı verilen olayın meydana gelmesidir. Silisyum (Si), Karbonun (C) aktivitesini yükselten ve grafit oluşumunu teşvik eden güçlü bir grafit oluşturucu ve ferrit oluşumunu teşvik edici bir elementtir. Silisyumun (Si) artması düşük sıcaklıklardaki darbe direncini düşürmekte, Si'un % 3'ün üzerinde olması darbe direncini artıran bir etki göstermektedir [12].

Kesit kalınlığı 25 mm veya daha fazla olan ince dökümlerde, manganın karbür oluşturucu etkisi, silisyum miktarının artışı ile karşılanmaktadır. 12 mm kesit kalınlığındaki bir döküm parçası için silisyum oranının % 2,5'dan % 3,0'e artışı, mangan oranının % 0,25'den, % 0,35'e artmasına imkân verir. Kalın kesitli döküm parçalarında segregasyon nedeniyle bu tür mangan artışı söz konusu olmaktadır. Mangan tercihli olarak sıvı içerisinde segrege olur. Katılaşma hızı azaldıkça bu segregasyon belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Ortalama % 0,4 Mn içeren alaşımda son katılaşan sıvıdaki Mg oranının % 25 veya daha fazla olabileceği, kanıtlanmıştır. Kesit kalınlığının artmasıyla bu segregasyon silisyum tarafından engellenememeye başlar, çünkü silisyum segregasyonu ilk katılaşmada oldukça fazladır.

2.2.1. Karbon

KGDD bileşiminde % 3-4 oranında karbon bulunmaktadır. Karbon miktarının artmasıyla grafit kürelerinin sayısının artmasına sebep olur. Ayrıca döküm kabiliyetinin artmasına neden olur [13].

Şekil 2.3'de KGDD'lerde en iyi döküm aralığı gösterilmektedir. Bu şekilden Si oranının 2,8'i geçmesi durumunda darbe dayanımında düşme olduğu görülmektedir. Ayrıca en iyi döküm aralığının da % 2-2,8 Si ve % 3,5-3,8 C içeriğinde sağlandığı anlaşılmaktadır.



Şekil 2. 3. KGDD'lerde en iyi döküm aralığının şematik gösterimi [14]

2.2.2. Silisyum

KGDD içerisinde silisyum miktarı % 1,8-2,8 arasındadır. Silisyum ötektoid dönüşümde oluşan Ferrit'in oranını ve sertliğini arttırarak dökme demir mukavemetinde de önemli artış meydana getirir. Maksimum tokluğun ve sünekliğin sağlanması için silisyum oranı % 2'nin altında tutulmalıdır [2]. Mevcut Sementit'i (Fe₃C), Demir ve Grafit'e (karbon) bozunadurmasıyla, grafit oluşmasını teşvik eder [15].

2.2.3. Manganez

Özellikle kalın kesitli dökümlerde manganez tane sınırı karbürlerinin oluşumunu teşvik eder. Bunun sonucunda ise süneklik ve tokluk düşer. Ferritik döküm yapısı istenen KGDD malzemelerde manganez oranının % 0,2 tutulması sonucunda maksimum süneklik elde edilmesi için gereklidir. Ayrıca perlitik döküm yapısı sağlamak için manganez oranı % 1'e kadar çıkabilir [2].

2.2.4. Fosfor

Yapıda steadit fazı oluşturarak kırılabilirliği artırır. Bu nedenle yapıda maksimum % 0,05 olarak sınırlandırılmalıdır [13].

2.2.5. Kükürt

Grafitleri küreselleştirmek için kullanılan magnezyum miktarının daha fazla kullanımını gerektirdiği için bileşimi, magnezyum işlemi öncesinde % 0,02 veya daha az bir seviyeye indirilmelidir [13]. Kükürt Sementit'i kararlı yapma meyli gösterir. Fe₃C'nin, Fe ve grafitte parçalanmasını önleyerek silisyumun etkisini azaltır [15].

2.2.6. Bakır

Malzemede işlenebilirliği artırmak ve toklukla birlikte yüksek sıcaklığa ve korozyona mukavemet sağlar [13,2].

2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Küresel grafitli dökme demirlerin Türk Standartları Enstitüsüne (TSE) göre sınıflandırılması Tablo 2.1'de verilmiştir. DDK işareti Dökme Demir Küresel Grafitli anlamına gelmektedir ve DDK işaretini izleyen sayılar minimum çekme mukavemetini göstermektedir.

Tablo 2. 1. TS 526/1977'e göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması [16]

Sınıf	Çekme Mukavemeti(MPa)	Akma Mukavemeti(MPa)	Uzama (%)	Sertlik (BSD)	Mikro yapı
DDK 40	400	280	12	140-201	Daha çok ferrit
DDK 50	500	350	7	170-241	Ferrit - perlit
DDK 60	600	400	3	192-269	Perlit - ferrit
DDK 70	700	450	2	229-302	Daha çok perlit
DDK 80	800	500	2	248-352	Perlitik
DDK 35,3	350	220	22	---	Ferritik
DDK 40,3	400	240	18	---	Ferritik

Alman DIN standardında küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması TSE sınıflandırılmasına benzemekte ancak, işareti GGG olarak, Tablo 2.2'de verilmektedir.

Tablo 2. 2. Alman standartları (DIN 1693) [16]

Sınıf	Çekme Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	% Uzama
GGG-40	400	250	15
GGG-50	500	320	7
GGG-60	600	380	3
GGG-70	700	440	4
GGG-80	800	500	2

ASTM, A-536-70 standardında ise minimum çekme mukavemeti, minimum akma gerilmesi, MPa olarak ve minimum % uzamayı gösteren rakamlar sınıflandırma işareti olarak kullanılır (Tablo 2.3).

Tablo 2. 3. ASTM, A 536-70 standardı [16]

Sınıf	Çekme Muk.	Akma Muk.	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

Tablo 2.4’de KGDD’lerin çeşitleri ve bunların mikro yapıları görülmektedir.

Tablo 2. 4. KGDD’lerin çeşitleri ve mikro yapısı [17]

Malzeme Cinsi	GGG40	GGG50	GGG60	GGG70	GGG80
Mikro Yapı	FERRİTİK	←			PERLİTİK

2.3.1. Ferritik küresel grafitli dökme demirler

Ferrit matris yapısı içerisine dağılmış grafit kürecikleri dökme demire iyi bir süneklik ve darbe direnci ile birlikte düşük karbonlu çeliklere eşdeğer bir çekme ve akma mukavemeti sağlar.

Ferritik KGDD elde etmek için üç yol vardır. Sıvı dökme demire, ağırlığına göre uygun miktarda magnezyum alaşımı katmak, perlitik küresel grafitli dökme demire ısı işlem uygulamak ve sıvı küresel grafitli dökme demirin katılaşmasını çok yavaş bir şekilde yapmak. Ferritik KGDD döküm yoluyla elde edilebilir [17].

2.3.2. Ferritik-Perlitik küresel grafitli dökme demirler

Bu tip malzemeler en yaygın küresel grafitli malzeme çeşididir ve genellikle doğrudan döküm yoluyla elde edilir. Grafit kürecikleri hem ferrit hem de perlit içeren matris yapı içerisine dağılmış olarak bulunur [17]. Mekanik özellikleri perlitik ve ferritik küresel grafitli dökme demirlerin arasındadır. İşlenebilirliği iyidir ve üretim maliyetleri düşüktür.

2.3.3. Perlitik küresel grafitli dökme demirler

Perlit matris yapısı içerisinde bulunan grafit kürecikleri dökme demire, yüksek mukavemet, iyi aşınma direnci ve ortalama süneklik ve darbe direnci kazandırır. İşlenebilirlik ise benzer mekanik özelliklere sahip çeliklere göre oldukça üstündür [17].

2.3.4. Martenzitik küresel grafitli dökme demirler

Bu tip KGDD'de perlit oluşumunu önlemek için yeterince alaşım elementi ilave edilebilir veya su verme ve temperleme ısıl işlemi birlikte uygulanır. Isıl işlem sonucunda oluşan temperlenmiş martenzit yapısı yüksek statik dayanım ve aşınma direnci yanında düşük süneklik ve tokluk sağlar [17].

2.3.5. Beynitik küresel grafitli dökme demirler

Küresel grafitli dökme demirin bu cinsi alaşımlama ısıl işlem uygulanarak elde edilen sert ve aşınma dirençli bir malzemedir.

2.3.6. Ostenitik küresel grafitli dökme demirler

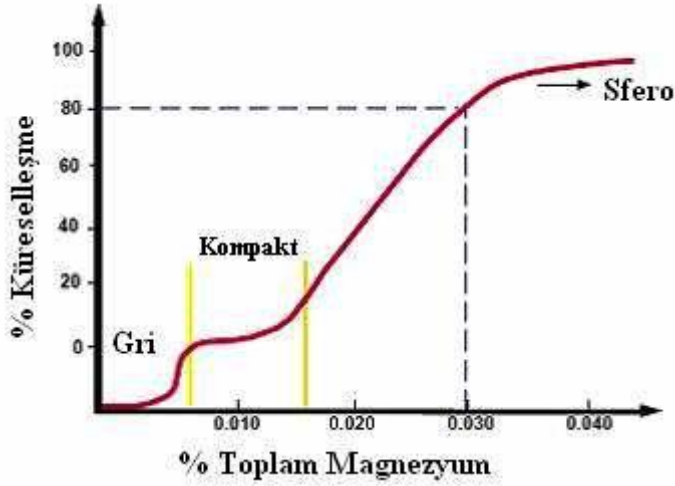
Ostenitik matris elde etmek için alaşımlanan bu cins küresel grafitli dökme demir, korozyon ve oksidasyon direnci, üstün manyetik özellikler, statik dayanım ve yüksek sıcaklıklarda boyutsal değişimin kararlı olmasını sağlar [17]. Matris ostenitten ve az miktarda perlitten oluşur. Grafitler küresel şekillerini bir miktar kaybederler. Genellikle yüksek miktarda nikel içerirler.

2.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan İşlemler

2.4.1. Küreleştirme (magnezyum) işlemi

Magnezyum, bir atmosfer basınçta 650 °C'de ergir ve 1120 °C'de buharlaşır. Sıvı demir sıcaklıklarında magnezyumun buhar basıncı, normal atmosfer basıncından 10 misli daha büyüktür. Buna ilaveten sıvı demir yüzeyi havaya açık olduğu zaman magnezyum yanarak kaybolur. Yüksek sıcaklıklarda (1450°C' nin üzerinde) ilave magnezyum da kayıp çok olduğundan, sıvı demir sıcaklığının 1350 - 1450 °C arasında tutulması uygun olur [18]. Dolayısıyla sıvı metal ile temas eden magnezyum aniden buharlaşır ve uygun şekilde yapılmadığı takdirde reaksiyon çok şiddetli olabilir. Magnezyum'un verimi, hava ile temas etmeden önce, magnezyum buharının içinden geçerek yükseldiği sıvı metal derinliğine bağlıdır. Dolayısıyla sıvı metalin

magnezyum buharı ile yıkanan derinlik magnezyum verimi açısından önemli olmaktadır. Reaksiyon şiddetini azaltmak ve uygun metalurjik şartları sağlamak için, genellikle magnezyum başka elementlerle alaşımlandırılır [19]. Şekil 2.4'de magnezyumun küreselleşmeye etkisi görülmektedir.



Şekil 2. 4. Magnezyumun küreselleşmeye etkisi [19]

Magnezyum, kükürt ve oksijenin eriyikten bertaraf edilmesi için kullanılan bir elementtir. Böylece eriyik katılaşmaya kadar geçen süre içinde tekrar oksidasyon ve kükürt alımına karşı korunmuş olur. İhtiyaç duyulan miktarın üzerindeki kalıcı magnezyum miktarı, grafit şekil bozukluklarına neden olur, küre sayısını azaltır. Sementit ve perlit oluşumunu sağlar. Ergimiş metalin oksijen ve kükürt içermesi çok yüksek ise önemli miktarda magnezyum, magnezyum oksit ve sülfürlerin meydana gelmesinde harcanacaktır. Bununla birlikte küreleşmeyi emniyete almak için magnezyum çok küçük oranlarda nadir toprak elementleri ile birlikte eklenir [7,1]. Sıvı metale ilave edilecek magnezyum miktarı ile ilgili birçok formül geliştirilmiştir. Bunlar arasında en basit ve kullanımı en kolay olanı aşağıda verilmiştir.

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

Kalsiyum küresel grafitli dökme demirlerde tek başına küreleştirici olarak kullanılmasına rağmen ana rolü, magnezyum reaksiyonunun uçuculuğunu düşürmek ve magnezyumun etkinliğini geliştirmektir. Kalsiyum aynı zaman da eriyikteki oksijenle reaksiyona girip CaO oluşturarak aşılama uygulamasının etkinliğini artırır.

Buna karşılık eklenen kalsiyum miktarının % 0,03'ü aşması durumunda magnezyumun karbür oluşturma eğilimi ortaya çıkar [7,1].

Nadir toprak elementleri ailesinden küreleştirici olarak en çok kullanılan Seryum (Ce), Lantanyum (La), Praseodmiyum (Pr) ve Neodmiyum (Nd) elementleridir. Eğer nadir toprak elementleri düşük kükürt içeren dökme demirde yalnızca küreleştirici olarak kullanılırsa, tamamen küresel bir yapı getirmesine karşılık küresellik seviyesi % 60'ın altında olur. Nadir toprak elementleri içerisinde en yararlı olanı Seryum iken, Lantanyum şiddetli bir şekilde karbür kristalleşmesini teşvik edici rol oynar [7,1].

KGDD küreleştirme işlemleri ve uygun ilave yöntemleri için kullanılan çeşitli Mg alaşımları Tablo 2.5'te verilmektedir.

Tablo 2. 5. Tipik Mg küreselleştirme alaşımları ve kullanılan işlem yöntemleri [20]

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

2.4.2. Küreselleştirme etkisinin zamanla azalması

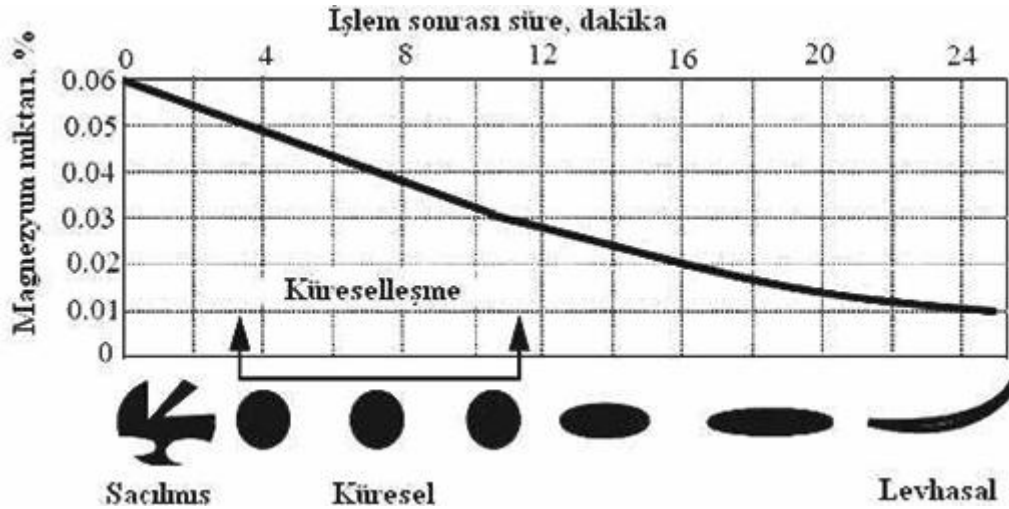
Küreselleştirme işlemi sonu, etki zamanla azalmakta ve Quasi-Flake olarak tanımlanan grafit oluşmaktadır. Etkinin zamanla kaybı ile ilgili olarak yapılan çalışmalar birçok faktörün geçerli olduğunu ortaya koymuştur. Bu olayın açıklanmasında ön sırayı, oksidasyon ile magnezyumun yanması teşkil etmektedir. Magnezyum verimi ile ilgili mukayeseli bilgi Tablo 2.6'da verilmiştir [1].

Tablo 2. 6. Alaşım cinsi ve küreselleştirme işlemi tipine göre Magnezyum verimi (% olarak) [20]

Alaşım cinsi	Küreselleştirme işlemi tipi		
	Açık pota	Daldırma	Basınçlı pota
Mg-Ni	50	60	-
Mg-Ni-Si	40	-	-
Mg-Fe-Si			
Mg-Si	35	45	-
Mg kırıntısı			

Küreselleştirme etkisinin azalması şu faktörlere bağlıdır [11]. Ocak astar malzemesi olan silika ile çalışmada etki kaybı bazik astara göre daha fazladır. Sıcaklığın artmasıyla birlikte etki kaybı artmaktadır. Cüruf miktarı etki kaybını arttırmakta olup cürufun hemen ve çok temiz olarak alınması gerekir. Ön magnezyum miktarı ne kadar fazla ise etki kaybı o kadar hızlıdır.

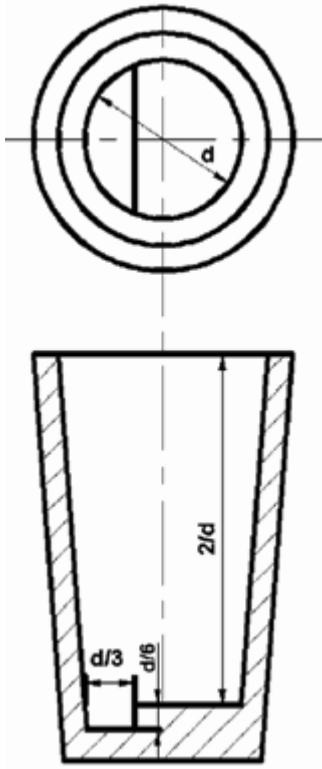
Etki kaybının artması kendisini hücre sayısının azalması ve grafit şeklinin bozulması ile gösterir. Şekil 2.5’de magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişim görülmektedir [21].



Şekil 2. 5. Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi [22]

2.4.3. Potada küreleştirme işlemi (sandwich yöntemi)

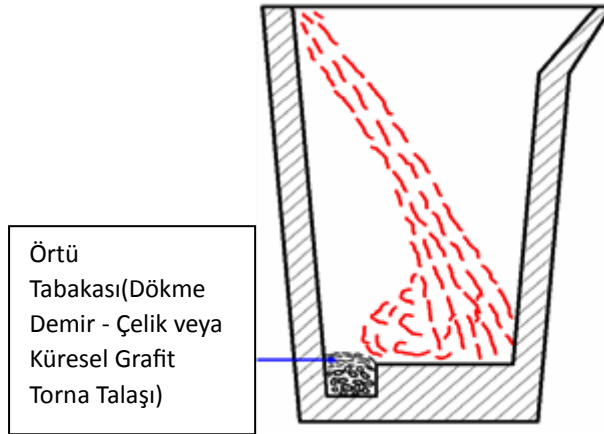
Magnezyum alaşımları ile küreleştirme işlemi uygun potada yapılmalıdır. Yaklaşık pota boyları Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2. 6. Magnezyum ile küreleştirme işlemi için uygun bir döküm potasının çap ve yüksekliği arasındaki bağlantılar [23]

Bu yöntemde, küreleştirici potanın dip kısmında özel olarak hazırlanan boşluğa (cep) yerleştirilir. Küreleştiricinin üzeri çeşitli gereçlerle örtülür (Şekil 2.7). Potaya doldurulan sıvı metal, bu örtü tabakasını eritinceye kadar, alaşımdaki magnezyum reaksiyona girmemektedir. Sıvı metal, potaya dolduktan sonra örtü eritmekte ve reaksiyon başlamaktadır. Bu yöntemde küreleştiricinin buharlaşması az olduğundan, işlem çok başarılı olmaktadır.

Bu yöntemde; ocaktan dökülen eriyik magnezyum alaşımı malzemesi üzerine direkt olarak gelmemesi ve pota hızlı bir şekilde doldurulması hususuna dikkat edilmelidir.

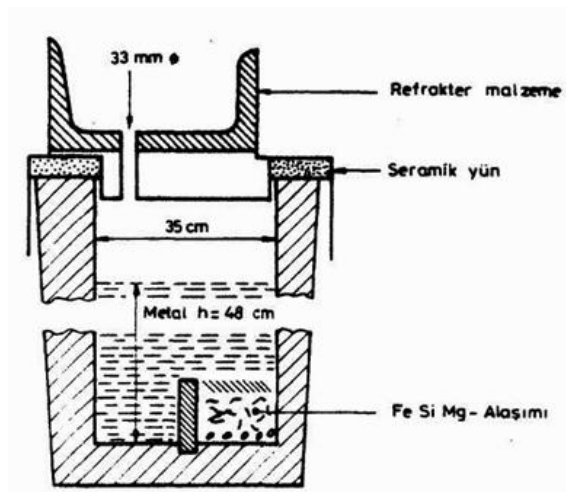


Şekil 2. 7. Sandwich yöntemi [18]

En çok uygulanan yöntem, Sandwich yöntemi olup, küreselleştirici malzemenin üzeri eriyiğin % 2'si miktarında çelik talaşı veya düktil dökme demir talaşı ile örtülür. Küreleştirici gerecin üzerini örtmek için çeşitli örtü gereçleri kullanılır. Kullanılan örtü gerecine göre de sandviç yöntemi çeşitli adlar almaktadır [18].

2.4.4. Kapaklı pota yöntemi

Kapaklı pota yöntemi, pratik ve yaygın olarak kullanımı bir metot olup sandwich yönteminin elverişsiz tarafları olan işlem esnasındaki MgO dumanının oluşmasını önlemek ve diğer taraftan da magnezyum verimini arttırmak amacı ile geliştirilmiştir (Şekil 2.8). Bir diğer elverişliliği ise işlem sıcaklığının ısı kayıplarının az olması nedeni ile 30 °C daha düşük alınabilmesi [11].



Şekil 2. 8. BCIRA – Kapaklı pota [24]

Kapaklı pota sistemleri, hareketli kapaklı ve sabit kapaklı yöntemler olarak iki grupta toplanırlar.

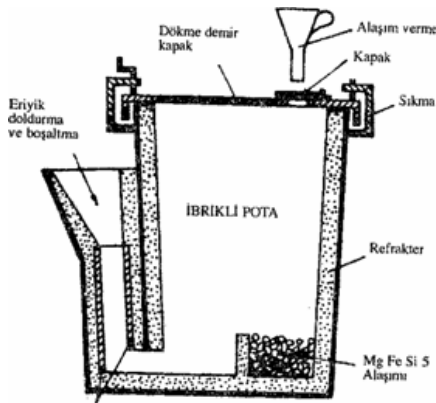
Konvansiyonel sistemde, eriyik ocaktan tundish potasına alınır. Magnezyum alaşımının potaya yerleştirilmesinde hareketli kapağın alınması dökümhanelerde değişik şekillerde yapılmaktadır. Bu yöntemle 80 kg'dan 14 tona kadar eriyikler küreselleştirme işlem kapasitelidir. Magnezyum verimi % 60'tır.

UPO yönteminde hareketli kapak yarı sabit bir hale getirilmiş, Tundish'deki eriyik doldurma deliği (100mm çap) aynı zamanda dizayn değişikliği ile boşaltma deliği olarak da kullanılmıştır. Kapak üzerindeki ikinci bir delikten magnezyum alaşımı $FeSiMg_5$ cep içine dökülmekte ve sonra bir sac kapakla burası kapalı tutulmaktadır.

UPO potası ve kapağının astarı grafitik silika refrakter olduğundan 200 işlem yapılabilir. $FeSiMg_5$ miktarı % 1,5 olup bu değer Sandwich yöntemine nazaran % 30 oranında bir elverişlilik göstermektedir. Eriyik sıcaklığı UPO yönteminde 1510 °C'dir [24].

2.4.4.1. İbrikli pota yöntemi

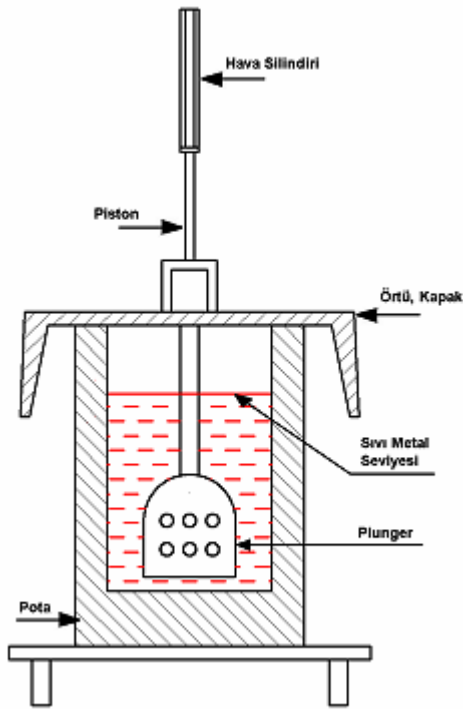
Şekil 2.9'da gösterildiği gibi kapaklı potaların bir alternatifi olan bu yöntemde, eriyik potaya ibrik deliğinden verilmekte, reaksiyonun sona ermesinden sonra aynı delikten dökülmektedir. UPO yöntemindeki elverişliliklere sahip bir yöntemdir [1].



Şekil 2. 9. İbrikli pota yöntemi [1]

2.4.4.2. Daldırma (Plunger) yöntemi

Daldırma yönteminde ise genellikle minimum % 40 magnezyum içeren alaşım refrakter malzemedен veya grafitten çan şekilli delikli bir kap içine konulur. Bu kap sıvı demir potasına daldırılır (Şekil 2.10). Daldırma yöntemi, artık magnezyum seviyesinin çok daha iyi kontrol edilebilme olanağını sağlar ve açık potaya nazaran daha yüksek magnezyum verimi elde edilir. Magnezyum emdirilmiş kok veya demir-magnezyum briketleri için de aynı yöntem kullanılabilir. Daldırma yönteminin dezavantajı ise sıcaklık kaybının açık pota yöntemine nazaran daha fazla oluşudur. Daldırma yönteminde kullanılan en yaygın Ca-Si-Mg alaşımıdır. Bundan başka yüksek magnezyum ile Mg-Fe-Si ve düşük nikelli Mg-Si-Ni gibi alaşımlarda kullanılır [11].

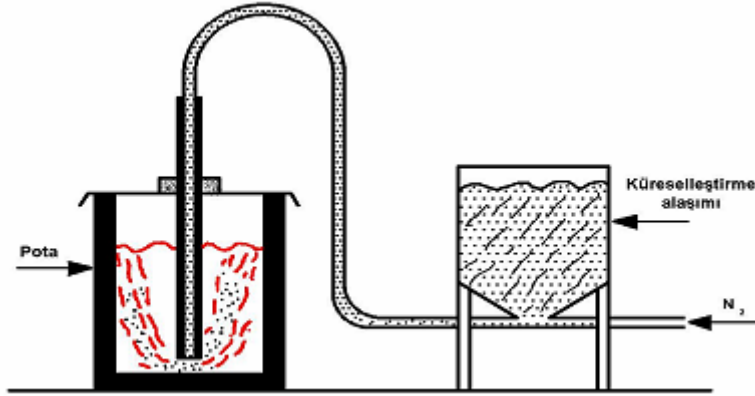


Şekil 2. 10. Daldırma yöntemi [18]

2.4.4.3. Üfleme yöntemi

Bu yöntemde küreleştirici, argon ve azot gibi gazlarla pota içindeki sıvı metale uygun bir aparat yardımıyla pülverize olarak püskürtülür. Bu yöntemle, küreleştirici

ile beraber sıvı metal içine istenirse kükürt gidericiler de püskürtülebilir. Şekil 2.11’de üfleme yöntemi ile küreselleştirme işlemi görülmektedir.



Şekil 2. 11. Üfleme yöntemi [18]

2.4.4.4. Konvektör yöntemi

Konvektörde küreselleştirme yöntemi, konverter tabanının köşesine dışarıdan bir kapak aracılığı ile saf magnezyum yerleştirilir. Sıvı metal doldurulduktan sonra konverterin ağzı kapatılır ve reaksiyon ürünü gaz, dumanın dışarı çıkması önlenir. Bu şekilde magnezyum verimi de artar. Yöntemin diğer bir elverişliliği en ucuz küreselleştirici olan saf magnezyum metalinin kullanılmasıdır. Ayrıca ergiyik kükürt miktarı da diğer yöntemlere nazaran daha yüksek olabilmektedir.

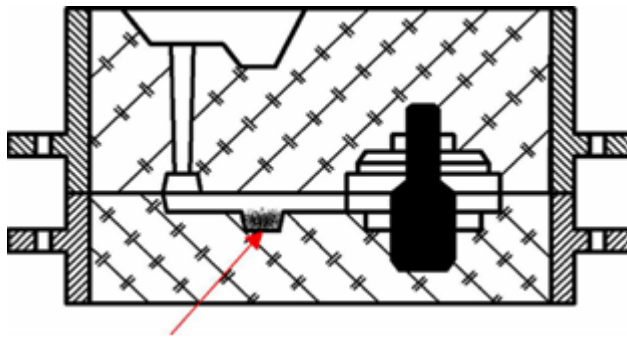
Bu yöntemin uygulanmasında dökümhanelerin yüksek üretim kapasitelerine sahip olma zorunluluğudur. Bunun nedeni küçük konverterlerde sıcaklık kayıplarının fazla olmasıdır. Ayrıca pota yöntemi ile kıyaslandığında komplike bir yöntem olması sebebiyle bakım masrafları fazladır [11].

2.4.4.5. Vorteks küreleştirme yöntemi

Bu yöntem de küreselleştirici Mg alaşımı demir eriyiğin akışı anında bir girdap oluşturması ile karıştırılmaktadır. Küreselleştirici olarak % 8-20 arasında magnezyum içeren FeSiMg alaşımları kullanılmaktadır. Magnezyum verimi işlemin uygulama sıcaklığına ve kullanılan alaşım malzemelerindeki magnezyum miktarına bağlı olarak değişmektedir [20].

2.4.4.6. Kalıpta (Inmold) yöntemi

Kalıp içinde yapılması 1960'lı yılların sonuna doğru geliştirilmiş bir yöntemdir. Diğer yöntemlerden farklılığı küreleştirme işleminin en son safhada kalıpta yapılmasıdır [20]. Şekil: 2.12'de kalıpta küreleştirme işlemi görülmektedir.



Şekil 2. 12. Kalıpta küreleştirme [18]

Kullanılan FeSiMg alaşımı ile magnezyumun kuvvetli küreselleştirici ve silisyumun aşılama etkisinden faydalanılmaktadır. Böylece aşılama için FeSi ilavesi gerekmemektedir. Küreselleştirme işlemi ve aşılama mümkün olan en son proses kademesinde yapıldığından magnezyumun oksidasyonu ve aşılama etkisinin azalması söz konusu değildir. Bu yöntemle üretilen döküm parçalarında; sementitler mevcut değil, küre sayısı fazla ve grafit küreleri çok daha küçüktür. Mekanik özellikler döküm durumunda elde edilebildiğinden ısı işlemi gerekmez.

Bu yöntem daha çok seri üretim yapılacağına uygulanır. Az sayıdaki parçaların

üretiminde *Sandwich* yöntemi daha uygun olmaktadır. Model ve maça sandığı fiyatı artar. Yolluk, kanal ve besleyici tasarımı; karışık olduğundan, döküm öncesi pratik deneyimlerle tespit edilmelidir.

2.4.5. Küreselleştiricinin sıvı metale verilmesi

Sıvı dökme demir, ocaktan potaya alınırken küreselleştirici el veya yardımcı donanım ile sıvı metale katılır. Bu işlemde, dökme demire göre özgül ağırlığı daha fazla olan, Fe-Ni-Mg ve Ni-Mg gibi küreselleştiriciler kullanılır.

2.4.6. Küreselleştiricinin potadaki sıvı metalin üstüne atılması

Bu yöntemde de özgül ağırlığı, dökme demirden fazla olan küreselleştiriciler kullanılır.

2.5. Aşılama

Aşılamanın metalurjik tanımı; eriyiğin çekirdek ihtiyacının uygun sayıya getirilmesidir. Bu çekirdekler, grafitin kristalizasyonu ve büyümeleri için elzemdir. Bilindiği gibi homojen, yani aynı kristalografik özellikte malzemeler ile sağlanan çekirdekler olduğu gibi, ayrı bir malzemenin çekirdek yapıcı özelliği de mevcuttur ve buna heterojen çekirdeklenme denilmektedir.

2.5.1. Aşılama teknikleri

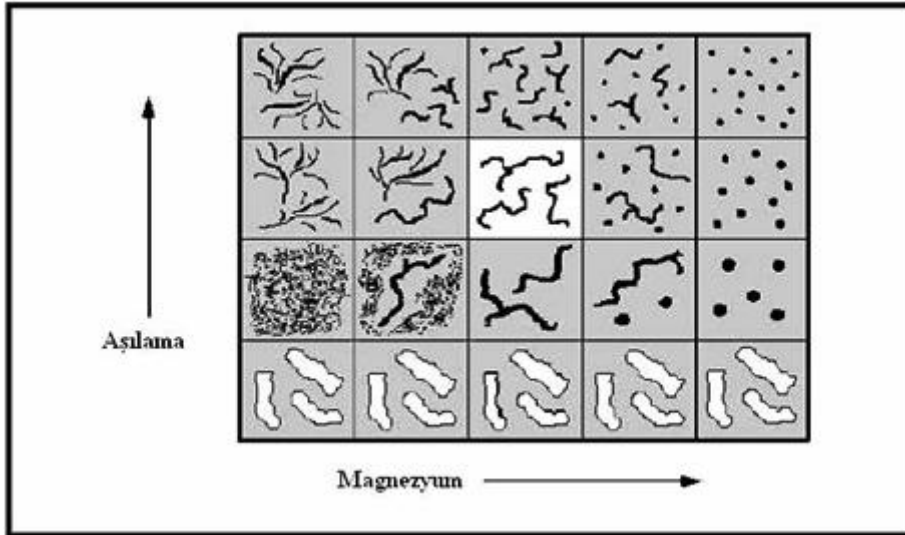
Yeterli miktarda magnezyum ilavesinden sonra demir aşılır ve dökülür. Grafit küreler şeklinde çöker. Sıvı demire magnezyumu ilave etmek kolay değildir.

Magnezyum düşük sıcaklıkta (1090 °C) buharlaşır. Bu durum Mg'un yüksek buhar basıncından dolayı şiddetli bir reaksiyona sebep olur. Beyaz magnezyum oksit dumanı ışığında yükselme olur. İlave edilen Mg'dan dolayı Oksitler ve Sülfidler metal yüzeyinde cüruf oluşturur. Cüruf dökümden önce mümkün olduğunca tamamen uzaklaştırılmalıdır. Oluşan cüruflar döküm parçalarında zararlı kalıntılara yol açabilir [25].

Aşılama, KGDD üretimi için gerekli bir adımdır. Potada, kalıba metal akışı sırasında ve kalıp içerisinde olmak üzere üç farklı şekilde Mg eklenebilir. Küresel grafitli dökme demirin aşılama, çil eğilimini azaltarak oluşan küresel grafit sayısını artırır. Aşılama maddelerinin çoğu Al, Ca, Ba, Mn, Zr içeren Fe-Si alaşımlarıdır. Bu elementler alaşımların çözünürlüğünü artırmak için kullanılır [26].

2.5.2. Aşılama etkisinin zamanla azalması

Aşılama maddesi zamanla etkisini kaybeder. O nedenle aşılama mümkün olduğunca hemen döküm işleminden önce yapılmalıdır. En yüksek verim almak için döküm sıvısına ilave edilmelidir. Aşılama işlemi potanın dibinde 10-15 cm sıvı metal varken yapılır ve böylece hızlı ergitme ve sıvı metalle tamamen karışma gerçekleştirilir. Dökümhanede genellikle aşılama maddesi Mg ile beraber ilave edilir. Şekil 2.13'de magnezyum ve aşılamanın mikroyapıda yaptığı değişim gösterilmektedir [27].



Şekil 2. 13. Magnezyum ve aşılamanın mikro yapıda yaptığı değişim [28]

Aşılama maddesinin boyutu hızlı ergiyebilecek kadar küçük ve hemen okside olmayacak ve aniden patlama yapmayacak kadar büyük olmalıdır. Bir genelleme olarak iyi bir sonuç almak için mümkün olduğu kadar geç aşılama gerekir, aşılama sonrası geçen zamanla aşılamanın etkisi kaybolduğu gibi bu zaman ısı

kaybına da yol açmakta ve azalan ısı grafit küre sayısını da azaltmaktadır. Ayrıca aşılama sıcaklığı ne kadar yüksek ise aşılama verimi de o kadar düşük olur. Dolayısıyla aşılamanın mümkün olan en düşük sıcaklıkta ve en son anda yapılması en uygun sonucu verir [1].

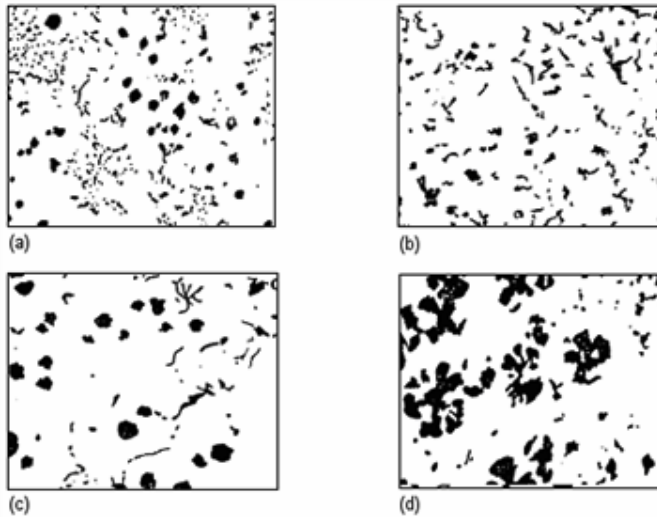
2.6. Grafitin Dağılımı ve Şeklini Etkileyen Elementler

Grafit dağılımı tanım olarak birim hacimdeki grafit kürelerinin sayısıdır. Bu değer kesit üzerinde birim alana düşen grafit küre kesiti sayısı ile doğru orantılıdır ve (grafit küre sayısı/mm²) olarak ölçülür. Silisyum oranı arttıkça küre sayısı da artar. Ancak fazla silisyum “Chunk-type” gelişmemiş grafit parçacıkları şekline yol açar.

Küreleşme Küresel Grafitli Dökme demirde istenilen bir durumdur, ancak küreleştirici oranının malzemedan istenilen özelliğe göre uygun seviyede olması gerekir. Düşük oranda meydana gelen küreleşme malzemedan beklenen mekanik özelliklerin değişmesine neden olmaktadır. Ayrıca dökümlerde irili ufaklı grafit küreleri yerine, eşit büyüklükte küresel grafit oluşumu istenmektedir. Grafit kürelerinin yapı içindeki dağılımı belli bir hat üzerinde dizilmek yerine rasgele dağınık şekilde yapıda bulunması istenir. Küresel grafitli dökme demirlerde, grafitlerin sayısı ve dağılımı metalurjik kalitenin çok iyi ve hassas bir göstergesidir. Küre sayısının 100 adet/mm² olması ortalama bir değer olarak tercih edilir [29].

Karbon miktarı hem grafit şeklini hem de boyutunu etkiler. Yüksek nikel ve silisyum içeriği de grafit şeklinin bozulmasını kolaylaştırabilir. Bu etki özellikle, orta veya kalın kesitli, yüksek nikelli ostenitik küresel grafitli dökme demirde görülmektedir. Küresel grafitli dökme demirde grafit şeklinin küreden sapışı kabaca dört şekilde olmaktadır (Şekil 2.14) [17].

- a. "*Exploded Graphite*" gelişmemiş grafit küresi,
- b. "*Quasi-Flake Graphide*" yarı lamelli grafit,
- c. "*Flake Graphide*" küçük lamelli grafit,
- d. "*Chunk Graphide*" gelişmemiş grafit parti külleri,



Şekil 2. 14. KGDD’de grafit hataları a) Gelişmemiş grafit, b) Yarı lamelli grafit, c) Küçük lamelli grafit, d) Patlamış grafit [30]

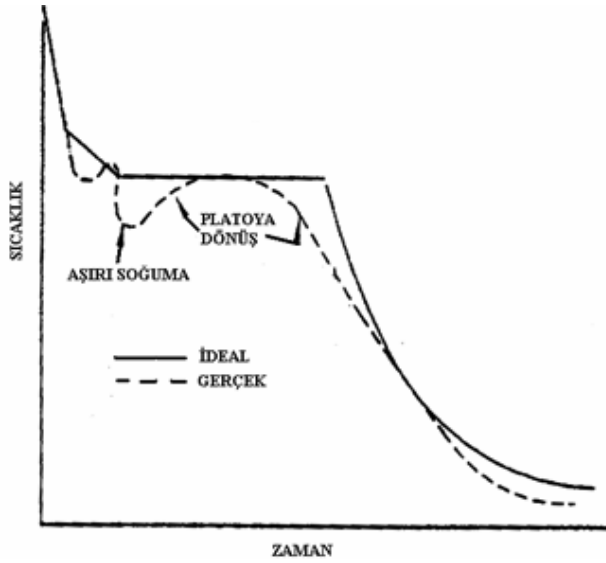
2.7. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Katılaşması

KGDD’de ötektik yapıya etkisi en fazla olan element silisyumdur. Silisyum ötektik yapıyı daha düşük karbon miktarlarına kaydırmakta ve eşdeğer miktarın belirlenmesinde alaşımın karbon miktarı ile toplanır. Bu iki değer toplamına karbon eşdeğeri denir. Yapılan incelemeler %1 silisyumun ötektik yapıyı %0.31 azalttığını ortaya koymuştur [31]. Karbon eşdeğerliği şu şekilde hesaplanabilir.

$$\text{Karbon Eşdeğerliği (KE)} = \% C + (\% Si + \% P) / 3$$

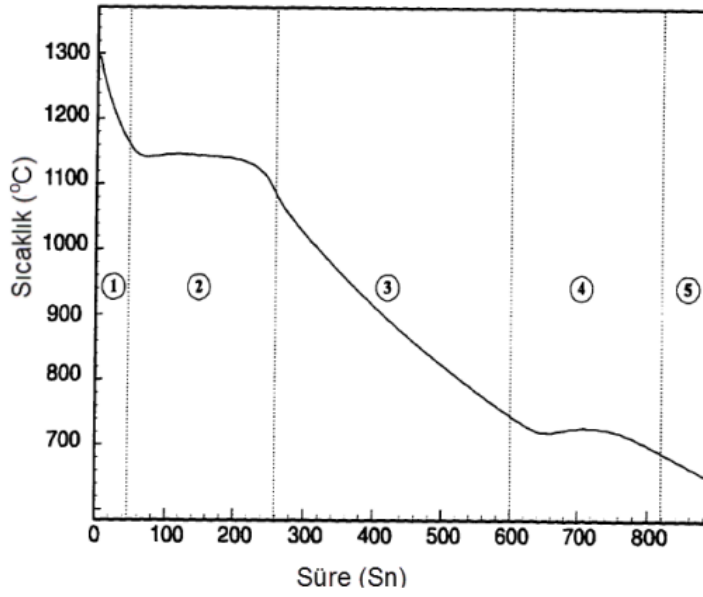
Örneğin; % 2.5 C, % 1 Si, % 0.5 P bileşiminde olan bir Dökme Demirin Karbon Eşdeğerliği ise $(2.5 + (1.0 + 0.5)/3) \%3.0$ ’tür. Fe-C denge diyagramından okunduğu zaman, sanki % 3 karbonlu dökme demir gibi işlem görecektir [15].

Karbon eşdeğerliği değerinin tam olarak 4,3 olması, yani alaşımın ötektik olması çok nadir sağlanan bir olaydır. Çok az miktarda da olsa kaçınılmaz olan bir aşırı soğuma, katılaşmanın ötektik altı veya ötektik üstü olarak başlamasını sağlar. Ötektik katılaşma veya ötektik katılaşmadan farklılıklar zamana bağlı olarak sıcaklığın ölçülmesi ile belirlenir. Ötektik altı KGDD’in ideal ve gerçek soğuma eğrileri Şekil 2.15’de gösterilmiştir.



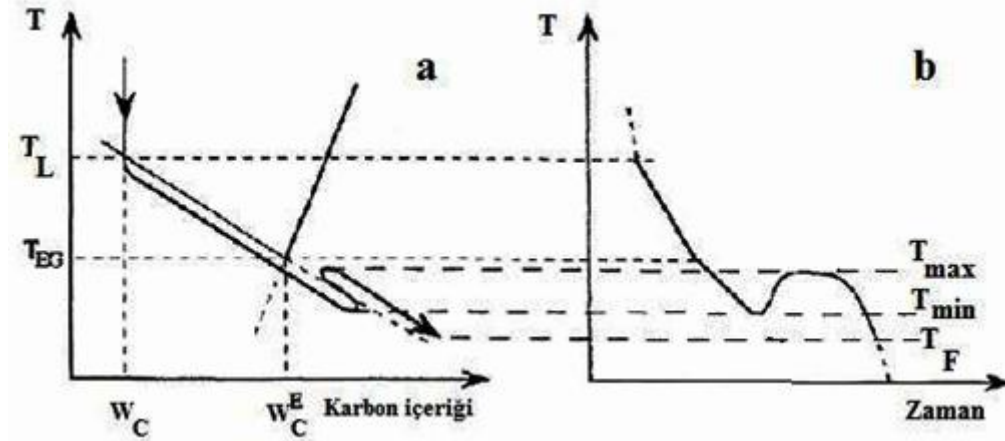
Şekil 2. 15. Ötektik altı KGDD' in tipik ideal ve gerçek soğuma eğrileri [32]

Fe ve C olmak üzere iki bileşenden oluşan bir sistemin soğuma hızı, homojen bir faz mevcut olduğu sürece, sistemin içinde bulunduğu ortamın ve alaşımın termik özelliklerine bağlıdır. Eriyikten, birinci faz katı durumda demir, grafit veya demir karbür ayrışmaya başladığında, soğuma hızı azalır. Daha sonra ikinci faz oluştuğunda ısı durumu, kayıpları dengeleyeceğinden bir duraklama meydana gelir. Soğuma eriyik fazın tamamının katılaşmasından sonra tekrar devam eder. Soğuma eğrisinin ideal durumdan sapmasının izlenmesi bize KGDD'in katılaşması hakkında önemli bilgiler verir. Soğuma eğrisindeki ilk duraklama, eriyikten primer fazın (katı faz) katılaşma başlangıcını gösterir. Ötektik altı gri dökümde bu faz östenitten ibarettir. Bu anda katılaşma hızı yüksektir ve denge durumu sıcaklığına erişildiğinde yavaşlayacaktır. Bundan sonraki soğuma eriyiğin ötektik sıcaklığına erişmesini sağlar ve ikinci faz gecikmeli olarak katılaşmaya başlar. Soğuma noktasının oluşumunun nedeni budur. Sıcaklığın tekrar yükselmesi, demir ve grafitin beraberce katılaşmasını gösterir. Bu kuvvetli sıcaklık artışı rekalesens veya platoya dönüş olarak adlandırılır. Rekalesens katılaşan iki fazın ısı durumları ve soğuma hızına bağlı olarak ötektik sıcaklığına erişebilir veya onun altında kalabilir. Soğuma hızı katılaşma ısılarının üzerinde olduğunda, ne rekalesens ne de duraklama sıcaklığı görülebilir. Soğuma eğrisinin, katılaşma sonuna doğru eğimi, katı fazlardan birinin tümü ile eriyikte kaybolduğunu gösterir. İhtilafı olmasına rağmen bu fazın, KGDD'de grafit olduğu üzerinedir ve ikincil çekinti olayının nedenini teşkil eder [31]. Şekil 2.16'da KGDD'lerde katılaşma bölgeleri görülmektedir.



Şekil 2. 16. KGDD'lerde tipik bölgelerin gösterimi [33]

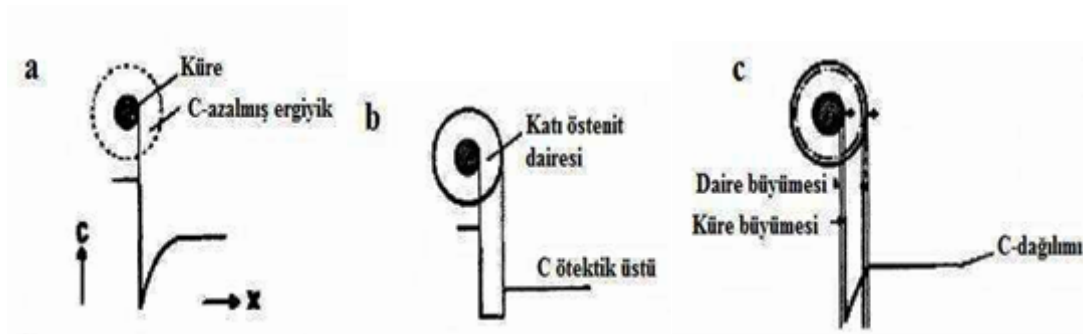
Alaşımın türü bileşimin ötektik hattındaki konumuna göre ötektik-altı, ötektik ve ötektik-üstü olarak temsil edilir. Demir ergiyiğinden ostenitin çekirdeklenmesi ve büyümesi (ostenit dendritleri) likidüs sıcaklığı T_L 'nin altına düştüğü zaman görülür. Soğuma esnasında, östenit dendritleri büyür ve sıvı bileşimi ostenit/likidüs hattına paralel olarak artar (Şekil 2.17 a) [34].



Şekil 2. 17. Ötektikaltı küresel grafitli dökme demir katılaşmasının şematik gösterimi

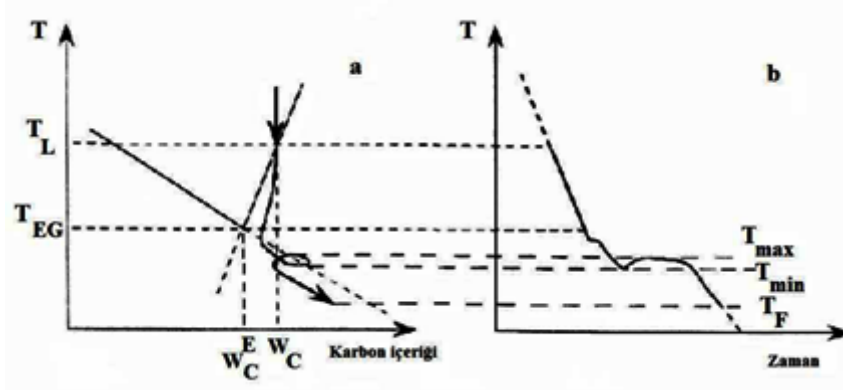
Ötektik sıcaklığı T_{EG} 'ye ulaşıldığında grafitin çekirdeklenmesi başlar. Grafit parçacıkları bir östenit kabuğu tarafından çevrelenmeden önce kısa bir süre sıvıdan serbest olarak büyümektedir. Ötektik kürelerin daha fazla büyümesi ostenit kabuklarının içinden sıvıdan grafit kürelerine doğru karbon difüzyonu ile kontrol

edilir (Şekil 2.18). Bu büyüme süreci yavaştır. T_{erg} altında T_{min} sıcaklığında ötektik kürelerin sayısı ve büyümesi için itici güç bütün ötektik reaksiyonun daha hızlı ilerlemesi için yeterince yüksektir. Bu ötektik reaksiyonun etkili başlangıcıdır. O bir maksimum sıcaklığa (T_{max}) kadar bir parlamaya neden olmak için yeterli şiddettedir. Bu ısıl analiz esnasında ötektik durmaya öncülük eder (Şekil 2.18 b). Katılaşma genellikle daha düşük TE sıcaklığında tamamlanır.



Şekil 2. 18. Katı bir daire içinde kürenin eş ısı büyümesi ve bir düzgün ara yüzle dairenin büyümesi a)Ötektik öncesi faz katılaşması: sıvı ile temastaki kürenin büyümesi b)Ötektik katılaşma: daire çevrelemesi c)Katı daire içinde kürenin büyümesi [11]

Ötektik üstü bir demirin katılaşma sırası Şekil 2.19'de gösterilir. Ötektik üstü katılaşma ergiyikten grafit parçacıklarının çekirdeklenmesi ve serbest büyümesi ile başlar. Bu iki süreç zordur ve dengeden biraz sapma ile ilerler. Bundan dolayı, grafitin ötektik öncesi çökmesi ile ilgili katılaşma yolu grafit/likidüs hattının biraz aşağısında yerleştirilir (Şekil 2.19 a). Onun tam yeri soğuma hızına ve ergiyik hazırlamaya (küreselleştirme ve aşılama) bağlıdır. Grafit çökmesinin safhası ısıl analiz esnasında soğuma eğrisinde görülemez. Çünkü grafitin içerilen miktarı küçüktür. Ötektik-altı dökme demirde olduğu gibi katılaşma yolunun östenit, likidüsüne paralel olarak yapıştığı şartlarda ilerlediği düşünülür. Yoğun ötektik reaksiyonu, ötektik kürelerinin sayısı ya da onların büyümesi için itici güç çok küçükse geciktirilebilir. Metal parlamasının başladığı T_{min} sıcaklığı ile soğuma devam eder (Şekil 2.19 b).



Şekil 2. 19. Ötektik üstü küresel grafitli dökme demirin katılaşma sırasının şematik gösterimi, (a) Grafitin eş düzlem kesitinde katılaşmanın yolu, (b) soğuma eğrisi [34]

2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mühendislik Özellikleri

Küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri çelik ile dökme demirler arasındadır. Mekanik özellikler yönünden çeliğe benzerken, kimyasal ve fiziksel özellikler bakımından dökme demirlere benzemektedir. Bunun için çok geniş kullanım alanlarına sahiptirler.

2.8.1. Çekme mukavemeti

Çekme mukavemeti, uygulanan ısıl işlem ve alaşımlandırmaya göre 40 kg/mm^2 ile 80 kg/mm^2 arasında değişir. Uzama ve gerilme diyagramı adi dökümlerden ayrılarak, çeliğe benzer. Akma noktası temper dökümden çok fazladır. Bundan dolayı küresel grafitli dökme demirler çok ağır yükleri taşıyabilirler. Küresel grafitli dökme demirlerin elastik özellikleri oldukça yüksektir [35].

2.8.2. Yorulma mukavemeti

Yorulma mukavemetinin, çekme mukavemetine oranı olan dayanma oranı dövme karbonlu çeliklerden yüksektir. Gerilim değişme faktörü çelikten düşük olduğu için, shaft imaline elverişlidir [35].

2.8.3. Aşınma direnci

Aşınma direnci, dökme demirlerin genel bir karakteristik özelliğidir. Küresel grafitli dökme demirinde aşınma direnci oldukça yüksektir. Dinamik ve statik yükler altında gelişi güzel dağılmış gerilimlere karşı küresel grafitli dökme demir çok iyi mukavemet gösterir. Bu sebeple dişli çarkı imalinde kullanılır [35].

2.8.4. Titreşim sönümlenme

Grafitlerin küresel halde bulunması nedeniyle titreşim sönümlenme özelliği kır dökme nazaran daha iyidir.

2.8.5. Termal şok

Gri dökme demirin termik şok direnci çok düşüktür. Küresel grafitli dökme demir ise termik şoklara karşı mukavemetlidir. Ani sıcaklıkla dökme demir çatlayabilir ve bu çatlama iş parçasının içine doğru ilerleyebilir. Ancak ilerleyen bir çatlak durdurmak için çatlakın ilerlemiş ucuna delik açılmalıdır. Böylece çatlakın ilerlemesi için yeni bir başlangıç noktası bulunması gerekir. Küresel grafitli dökme demirde de aynı görevi yapı içerisinde küresel grafitler yapar [35].

2.8.6. Korozyona direnç

Küresel grafitli dökme demir kır dökme demirin gösterdiği korozyon direncine sahiptir. Deniz suyuna, alkalilere ve zayıf asitlere karşı mukavimdir. Çelikten 5 kat daha iyi korozyon direnci ve yüksek mukavemete sahip olduğu için petrol, kimya endüstrisinde ve denizcilik endüstrisinde kullanılır [35].

2.9. Küresel Grafitli Dökme Demirin Kullanım Alanları

Küresel grafitli dökme demirler, bugün çeşitli endüstri sahalarında uygulama imkânları bulmuş bir malzeme tipidir. Küresel grafitli dökme demirlerin kullanım sahaları aşağıda verilmiştir [36,37]

KGDD'den imal edilen bazı parçaları madencilik ve metalürji sektöründe; kırıcı gövdeleri, pompa gövdeleri, alüminyum ve kurşun ergitme potaları, cüruf potaları, pres makineleri, kalıplama dereceleri, sıcak hadde merdaneleri gibi yerlerinde kullanılmaktadır. KGDD'den imal edilen bazı makine parçaları ise hidrolik presler, silindirler, dövme presleri kafa ve silindirleri, krank presleri dişlileri, eğme makineleri çerçeveleri, akslar, dişliler sayılabilir. KGDD'den imal edilen traktör parçaları, ön tekerlek çatalları, transmisyon kutuları, pedallar ziraat sektörünün kullanım alanlarına girmektedir. KGDD'den imal edilen beton karıştırıcı parçaları, yol inşaatı makineleri inşaat sektöründeki kullanım alanlarıdır. KGDD'den imal edilen kurutma silindirleri, valflar, pompalar, plastik ekstrüzyon silindirleri, plastik karıştırıcılar kimya sektörünün kullanım alanlarını oluşturmaktadır. Güç aktarımında ise uçak konstrüksiyonu, diferansiyel dişli kutusu, volanlar, dişli kutuları, dişli selektör çatalları, tekerlek kalıpları KGDD'den imal edilmiş bazı parçalardır. KGDD'den kompresör gövde ve kafaları, gaz tribünü kompresör kutuları, su türbinleri dökme parçaları güç üretiminde de kullanılmaktadırlar.

BÖLÜM 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışmaları kapsamında yapılan deneysel çalışmalar aşağıda detaylı bir şekilde verilmiştir. Döküm numuneler ticari olarak üretilmiş olup, Anadolu Döküm A.Ş. Kocaeli firmasından tedarik edilmiştir. Farklı mikro yapı özelliklerine sahip küresel grafitli dökme demir numunelere uygulanan metalografik hazırlık süreçleri ileriki bölümlerde açıklanacaktır. İncelemeler için Clemex Vision Lite bilgisayar destekli imaj analiz yazılımı ile mikro yapı karakterizasyon metot ve süreçleri ve yazılımda uygulanması gereken işlem basamakları açıklanacaktır.

3.1. Deneylerde Kullanılan Numunelerin Temin Edilmesi

Çalışmada Anadolu Döküm Sanayi firmasında ticari olarak üretilen parçalardan numuneler alınmıştır. Numuneler mikro yapı incelemelerine hazırlanması için uygun ebatlarda kesilmiştir. Tablo 3.1’de numune alınan malzemelere ait kimyasal bileşim ve mikro yapı açıklamaları verilmiştir. Numuneler bilinçli olarak farklı mikro yapı özellikleri içerecek şekilde temin edilmiştir.

Tablo 3. 1. Deneysel çalışmalarda kullanılan numunelerinin kimyasal bileşimleri

No	% Kimyasal Bileşim										Mikroyapısı
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Mg	
N1	2,27	0,08	0,04	0,008	0,03	0,01	0,04	0,68	0,04	2,27	Ferrit + perlit
N2	3,68	2,47	0,13	0,02	0,01	0,04	0,61	0,03	0,008	0,05	Perlit + ferrit
N3	3,48	2,16	0,11	0,05	0,01	0,06	0,09	1,67	1,58	0,05	Perlitik, Alaşımli
N4	3,69	1,40	0,69	0,04	0,01	0,78	0,51	3,52	0,04	0,04	Asiküler Yapı

3.2. Metalografik Hazırlık Süreçleri

Metalografik numune hazırlama ve incelemeler; Sakarya Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Deney numuneleri öncelikle kesilmiş ve kesilen numuneler sırasıyla 80, 120, 240, 400, 600, 800, 1000, 1200, 2500 SiC zımpara kâğıtlarıyla zımparalama işlemleri yapılmıştır. Numuneler daha sonra sırasıyla 6µm, 3µm ve 1µm'lik elmas pasta yardımıyla çuha üzerinde parlatılmıştır. Parlatılan numuneler %2'lik Nital ile (%2 Nitrik asit + %98 saf alkol) 8-15 sn süre ile dağlanmış ve durulanan numunede leke oluşumunu engellemek için iyice kurutulmuş ve daha sonra numunelerin mikroyapı fotoğrafları Nikon Eclipse L-150-A marka optik mikroskop ile çekilmiştir.

3.3. Clemex Vision Lite Yazılımıyla Görüntü Analizlerinin Yapılışı

İmaj analiz olarak adlandırılan sistemlerin temel prensibi Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bir mikroskop, mikroskoba bağlı bir kamera ve bu kamera aracılığı ile hazırlanan numunelerden alınan görüntünün bilgisayara aktarılması ve bilgisayarda bir program ile kullanıcı tanımlı, yarı otomatik ya da otomatik olarak analizlerin yapılması esasına dayanmaktadır. İmaj analiz programı; malzememizin makro veya mikro yapı resimlerinin analizleri için geliştirilmiş ve özellikle metalurji kalite kontrolünde ve laboratuvarlarında, araştırma ve ölçüm yapmamızı sağlayan bir analiz sistemidir. Yazılımın analiz yapma esası; mevcut resimdeki renk farklılıklarına göre her bir kontrastaki rengi farklı birer faz ya da bölge olarak algılayıp bize bu farklılara göre sonuçlar vermesi ile açıklanabilir [12-14].



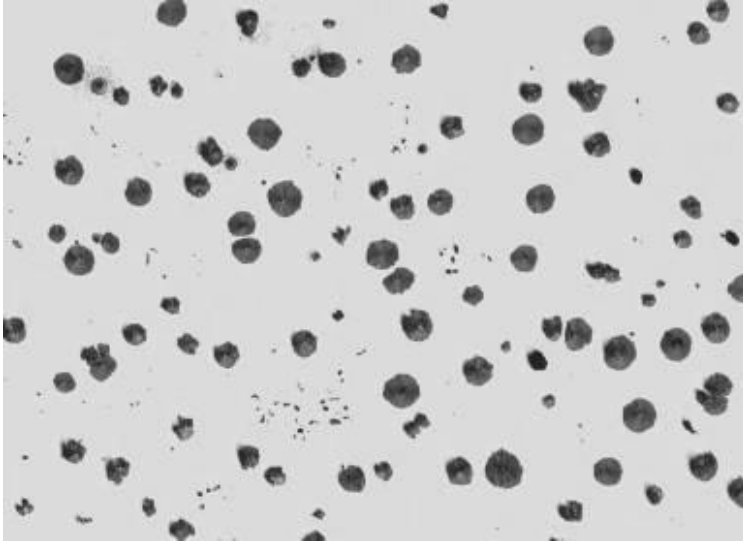
Şekil 3. 1. Bilgisayar destekli imaj analiz sistemi görüntüsü [12]

Piyasada imaj analiz yapmamızı sağlayan birçok yazılım mevcuttur. Bunlar tıp, biyoloji, metalurji gibi farklı sektörlerle yönelik olabilmektedir. Yazılımın analiz mantığı her bir sektör içinde benzer olması sayesinde aynı programla farklı sektörlerdeki resimleri istediğimiz doğrultuda analiz yapmamızı mümkün kılmaktadır. Bu tekniği kullanarak; porozite tayini, kaplama kalınlığı ölçümü, dekarbürüzyon derinliği, tane boyutu analizi, kalıntı faz ölçümü, küreselliğin ölçümü, grafit fleyk hesabı, faz dağılımı oranının hesaplanması, dentrit kolları mesafesi ölçümü, boy, açı, çevre ve üç noktadan yarıçap ölçümü, tanecik sayımı analizlerinin yapılması mümkündür. Ayrıca 1000 mikron boyundaki mikroskop cam ile hassas kalibrasyon sorası otomatik olarak resme ölçek yerleştirme ve ölçümler sonrası raporlama ve arşivleme işlemleri pratik bir şekilde yapılabilmektedir [12-14].

Bu çalışmada kimyasal bileşimi Tablo 3.1’de verilen numunelere ait mikroyapı incelemeleri ve imaj analiz çalışmaları yapılacaktır. Numunelerin mikro yapısı göz önüne alındığında malzemeler küresel grafitli dökme demir malzeme olduğundan ilk olarak parlatılmış numuneler dağlama öncesi küreselleşme, ortalama küre çapı ve kürelerin yüzde dağılımı incelenecektir. Sonrasında numune dağlanarak dağlama sonrası mikro yapı incelemesi ve yüzde faz dağılımı belirlenecektir.

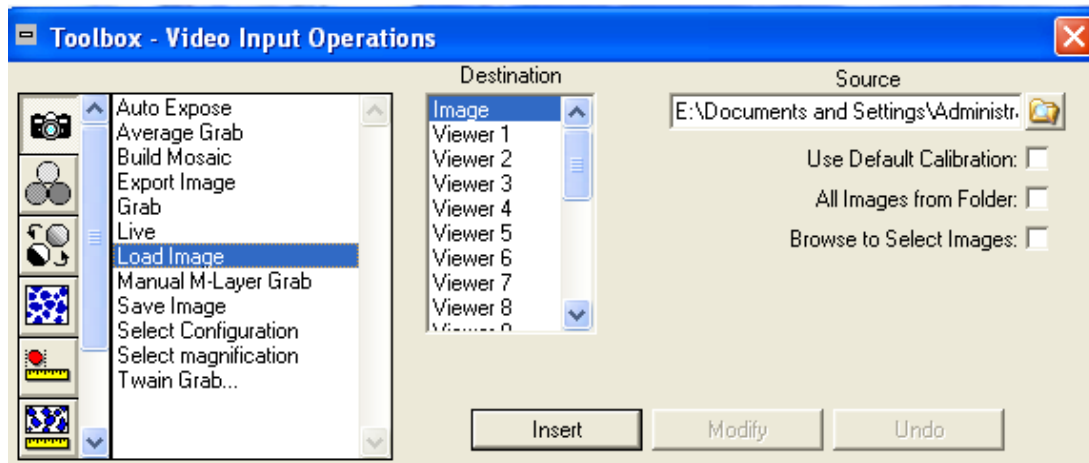
3.3.1. Küreselleşme incelemesi ve ölçülmesi

Küresel Grafitli Dökme demir malzemenin mikro yapısında oluşan kürelerin ölçümü için metalografik hazırlık süreçlerinden sonra numune dağlama öncesi mikroskopta incelenmiştir. Numune mikroyapı görüntüleri Nikon marka Eclipse L150 A model düz tip optik mikroskoba bağlı çalışan Clemex imaj analiz yazılımı yardımıyla alınmıştır. Şekil 3.2’de bir numuneden alınan tipik mikroyapı fotoğraf görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 2. KGDD numune örnek mikroyapısı (dağlanmamış)

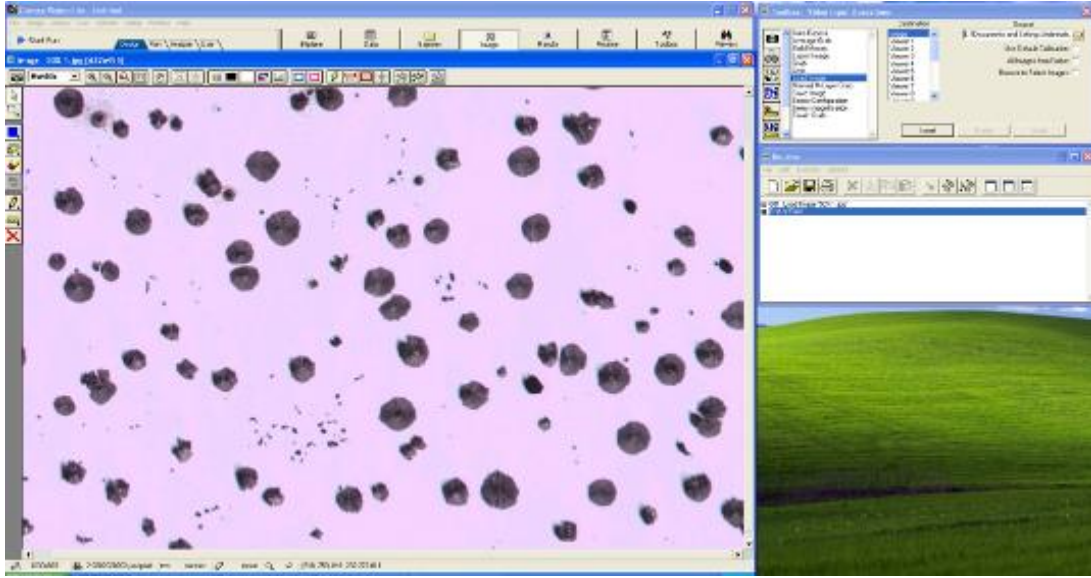
Fotoğrafı çekilen ya da daha önceden resmi çekilmiş numune mikroyapısı için yazılım ile küresellik ölçümü yapılabilmektedir. Burada daha önceden bilgisayara kaydedilmiş mikroyapı resmi üzerinde inceleme aşamaları verilecektir. İlk olarak kayıtlı resim yüklemek için “Toolbox” menüsü içerisinde “Video Input Operations” sekmesinde “Load image” seçilir. İnceleme yapılacak olan resim yeri tanımlanarak “Insert” butonuna tıklanarak resim ekrana yüklenir ve inceleme başlar. (Şekil 3.3).



Şekil 3. 3. Kayıtlı resmin programa yüklenmesi

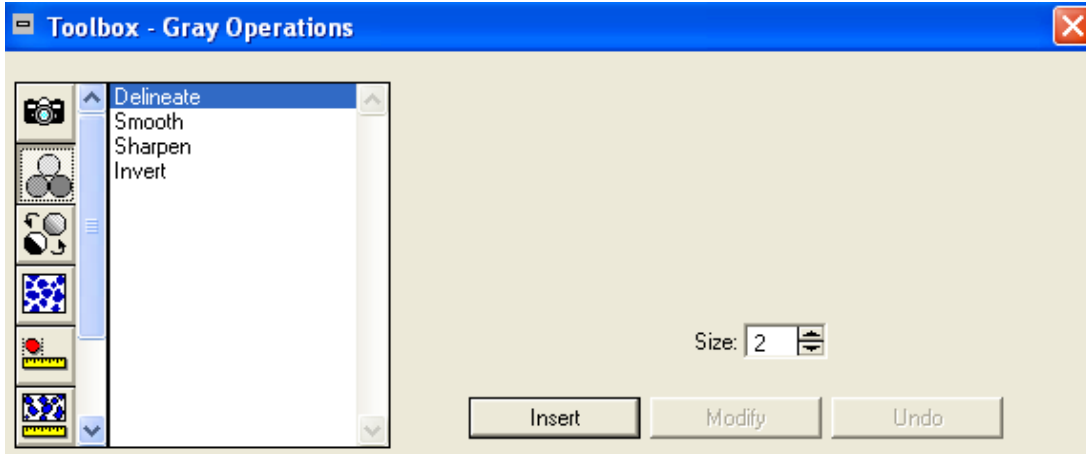
Kayıtlı resim üzerinde inceleme yapılırken resmin yüklenmesi esnasında program bizden mikroyapı üzerindeki ölçüleri tanımlayabilmek için kalibrasyon yapmamızı ister. Yapı üzerinde varsa skala değerine göre yada bilinen uzunluk skalasına göre

kalibrasyon işlemi yapılarak seçenek onaylanır. Burada işlem doğruluğu sonuçları doğrudan etkilemektedir. Mevcut numuneden canlı mikro yapı çekimi sırasında yapılan ölçümlerde kalibrasyon işleminin yapılmasına gerek yoktur. Şekil 3.4’de programa resim yüklendikten sonraki ekran görüntüsü verilmiştir.

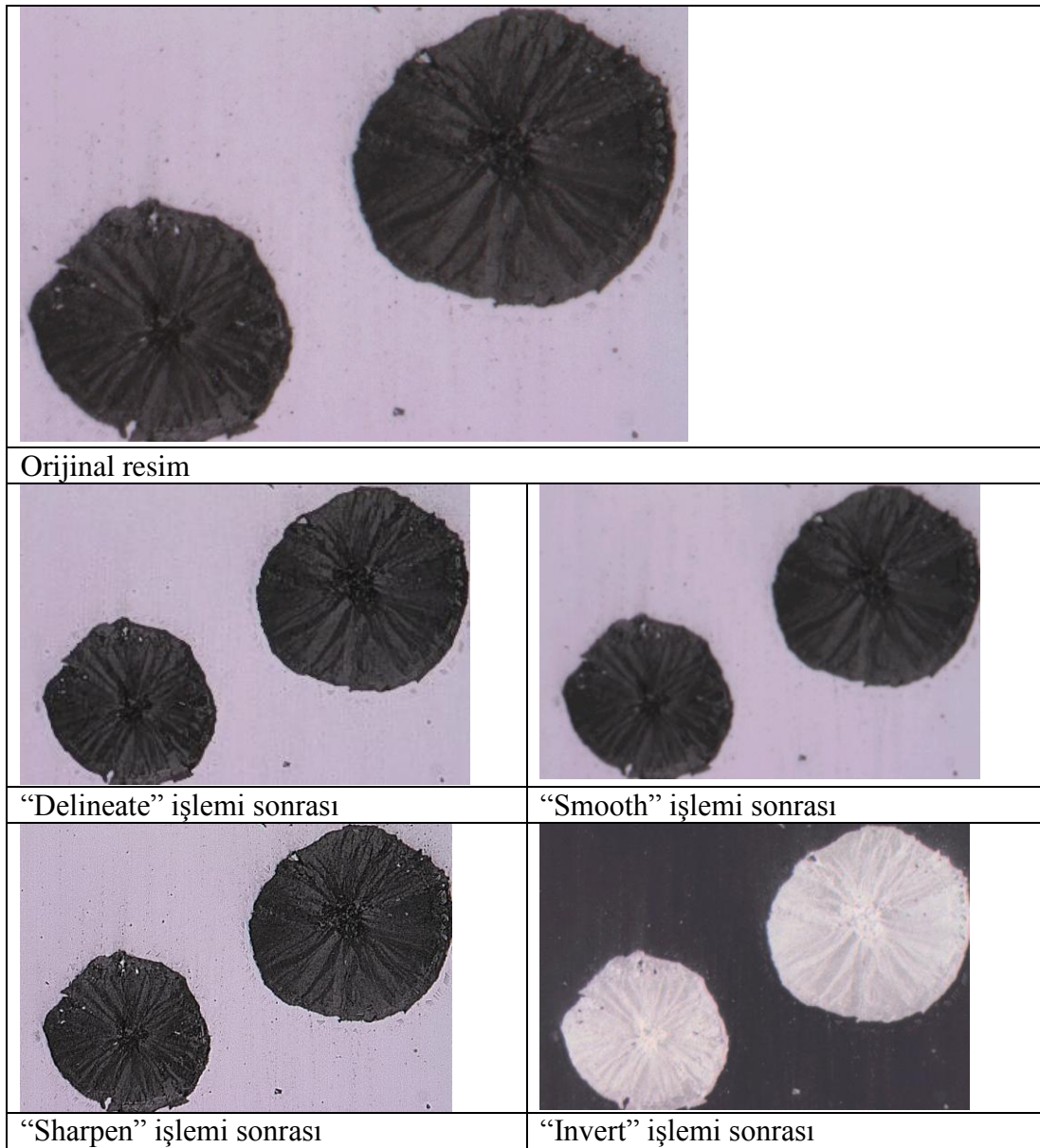


Şekil 3. 4. Resim yükleme işleme sonrası ekran görüntüsü

Resim üzerinde ölçüm ve yapının analiz işlemleri için temel fark gözlemlenen renk farklılıklarıdır. 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 farklı alternatifler bulunmaktadır. Bunlar resimdeki ton farklılıklarını daha belirgin hale getiren “*Delineate*”, renkler arasındaki keskin ton geçişlerini yumuşatan “*Smooth*” renk karşıtlıklarını güçlendiren “*Sharpen*” ve siyah beyaz renk dönüşümü yapan “*Invert*” seçenekleri mevcuttur [38]. Şekil 3.5’de resim özelliklerinin geliştirilmesi ile ilgili menü seçimi görüntüsü verilmiştir. Şekil 3.6’da resim özelliklerinin geliştirilmesi için yapılan uygulamalardaki değişim resim üzerinde örneklendirilmiştir. Yazılımda yapılacak ölçüm ve analize bağlı olarak bunlardan biri ya da bir kaç birliktte seçilebilir. Temel mantık renklerin istenen analize uygun olarak görüntülenmiş olmasıdır.

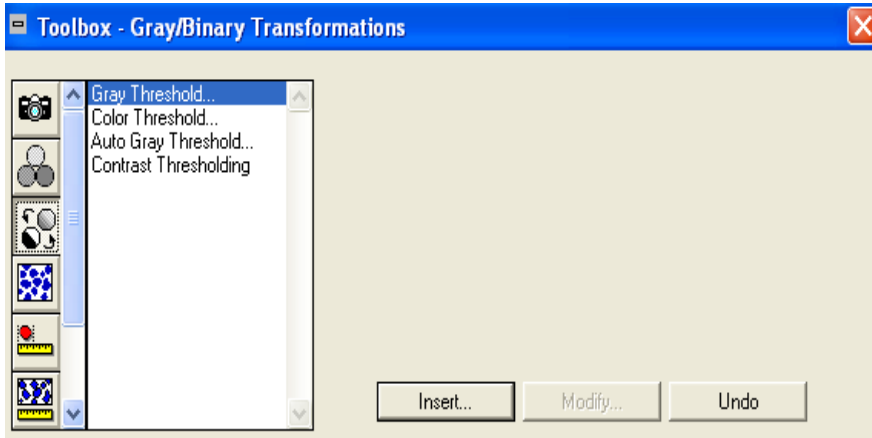


Şekil 3. 5. Resim özelliklerinin geliştirilmesi menüsünde örnek görüntü



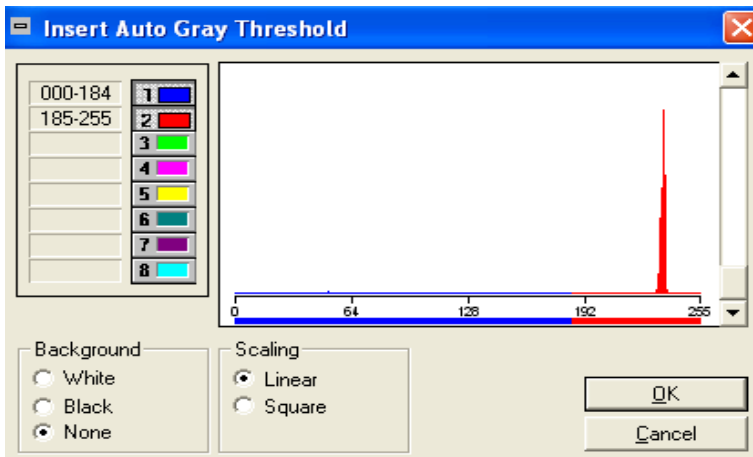
Şekil 3. 6. Resim özelliklerinin geliştirilmesi uygulaması örnekleri

Resimde görülen yapının daha net bir şekilde görülmesi işlemi tamamlandıktan sonra analiz yapmak için ton dönüştürme ayarlaması yapılması gerekmektedir. Ton dönüştürmesi için “Toolbox” menüsü içerisinde “Gray / Binary Operations” sekmesi seçilir. Bu bölümden yapıda incelemek istediğimiz nesne seçimi sağlanır. Bu işlem için resim ve yapılacak analize bağlı olarak farklı alternatifler mevcuttur. Şekil 3.7’de menü görüntüsü verilmiştir.



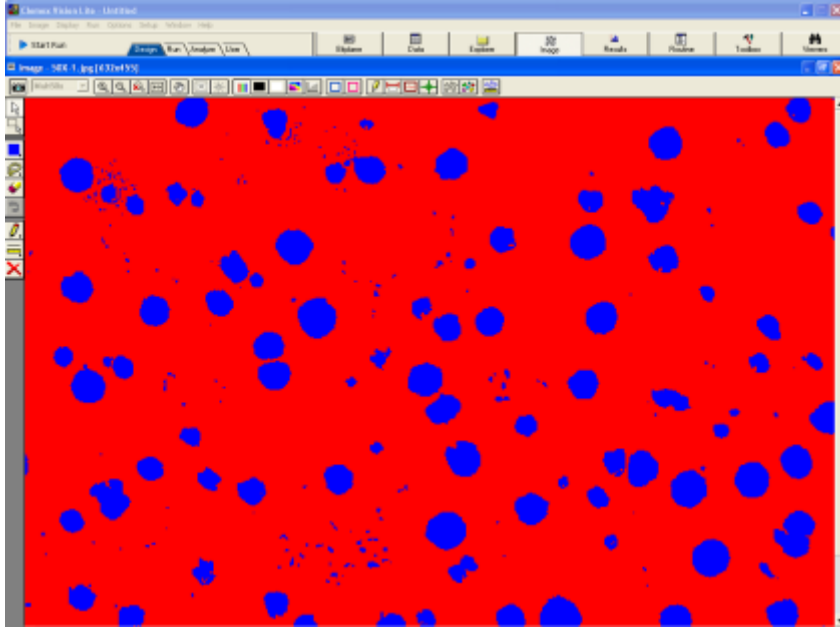
Şekil 3. 7. Ton dönüştürme menüsü görünümü

Ton dönüştürme işlemi için seçimi otomatik olarak “Auto Gray Thresholding” seçeneğini kullanarak yapabiliriz. Bu seçim sonrası yapı da kaç farklı faz varsa o kadar ton dönüştürme seçimi yaparız. Şekil 3.8’de iki faz içeren mikroyapı resminde ton dönüştürme işlemi görüntüsü verilmiştir.



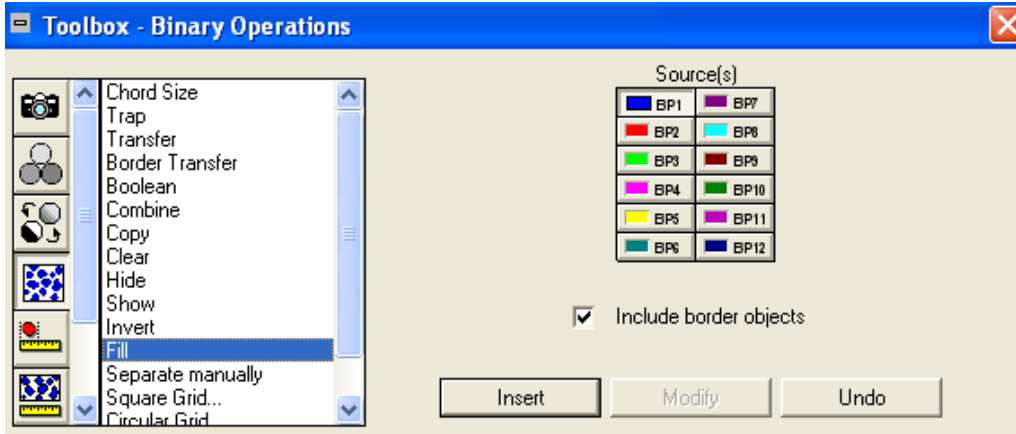
Şekil 3. 8. “Auto Gray Threshold” seçeneği ile iki fazlı yapıdaki dönüştürme işlemi görüntüsü

Dönüştürme işlemi seçilen sayıda faz kadar farklı renkte otomatik olarak belirlenmektedir. Bu seçim istenirse renk eşiklerinin manuel olarak belirtilmesiyle de yapılabilir. Şekil 3.9’da renk eşleştirmesi yapılan resim görülmektedir.

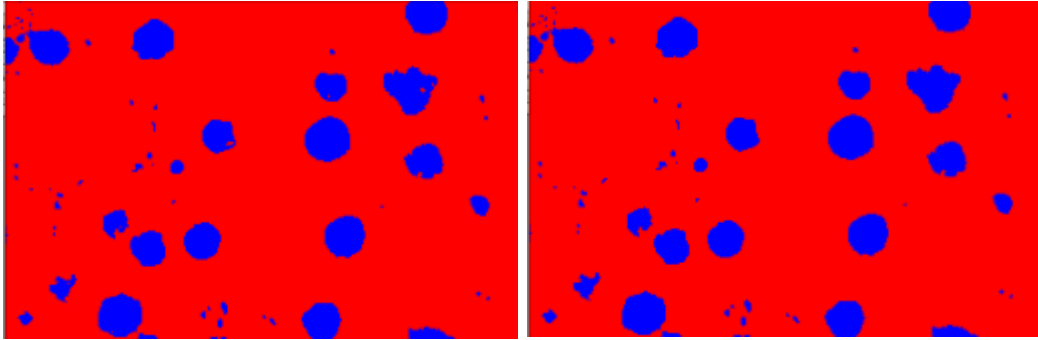


Şekil 3. 9. İki faz olduğu varsayılan mikroyapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntü

Resimdeki ton dönüştürme işlemi tamamlandıktan sonra isterse sonuçlara geçilebilir. Ancak sonuçların daha doğru olabilmesi için resim üzerinde bazı revizyonlar yapılması gerekmektedir. Şekil 3.10’da da görüldüğü gibi 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 resimde mavi renkten görülen kürelerin içini de mavi renkte algılaması sağlanacaktır. Bunun için “Toolbox” menüsü içerisinde “Binary Operations” sekmesi içerisindeki “Fill” seçeneği işaretlenerek içerisi doldurulmak istenen renk belirlenir. Örnek mikro yapıda grafit küreleri mavi renkte olduğundan mavi renk için seçim yapılır. Şekil 3.11’de doldurma işlemi sonucu görüntü değişimi verilmiştir.

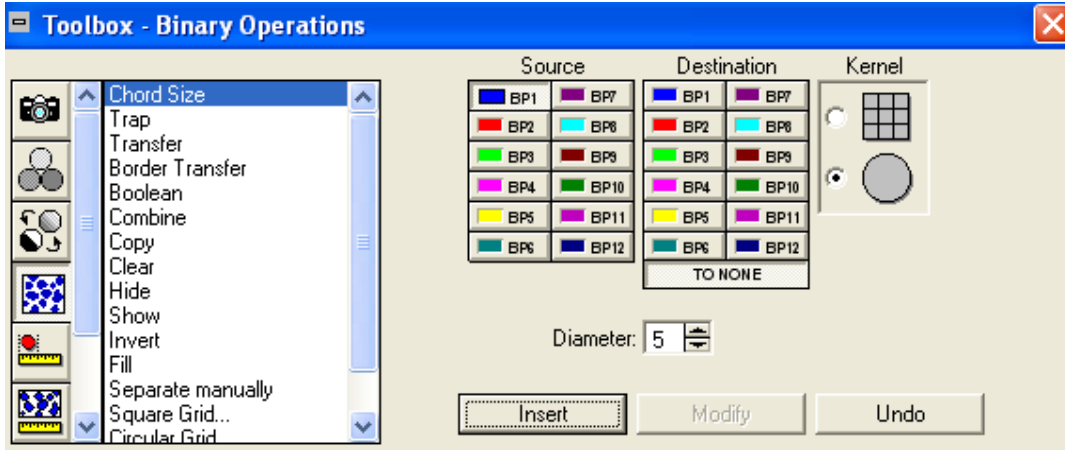


Şekil 3. 10. Kürelerin içinin doldurulması işlemi menüsü görüntüsü

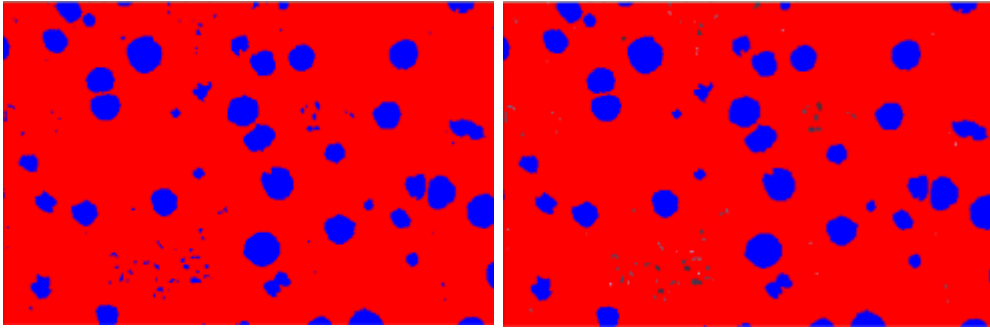


Şekil 3. 11. Grafit kürelerinin içinin doldurulması

Küresel grafitli dökme demir numunelerin mikro yapısı analizinde revize edilecek bir diğer işlem de istenen boyutun altındaki kürelerin hesap dışı bırakılmasıdır. Bunun sebebi mikro yapıda çok küçük boyutta görülen ve grafit olmayan porozite ve diğer kalıntı şeklinde yapıların renklerinin siyah olarak görülmesinden dolayı yazılım tarafından grafit olarak tanımlanabilmektedir. Bu sebeple bu yapılar malzeme hakkında sonuçları olumsuz yönde etkilemektedirler. Bu işlem için “*Toolbox*” menüsü içerisinde “Binary Operations” sekmesi içerisindeki “Chord” Size seçeneği işaretlenir. Şekil 3.12’deki örnekte olduğu gibi sınır değeri (5 μm) belirlenerek işlem onaylandığında belirlenen sınır değerinden daha küçük çaptaki küreler hesap dışı tutulur. Şekil 3.13’de 5 μm çapının altındaki küre görünümlü yapıların hesap dışı tutulmasına örnek bir resim verilmiştir.



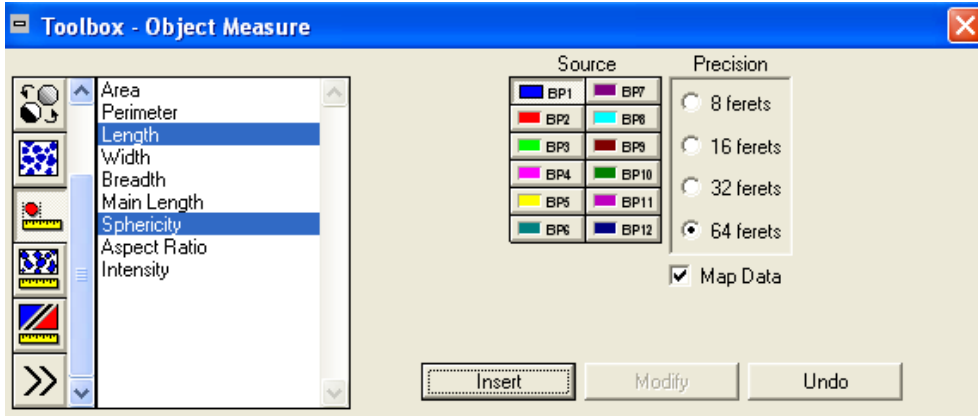
Şekil 3. 12. Belli sınır değeri altındaki yapıların kaldırılması menüsü



Şekil 3. 13. Belirlenen sınır değeri altındaki kürelerden seçimin kaldırılması

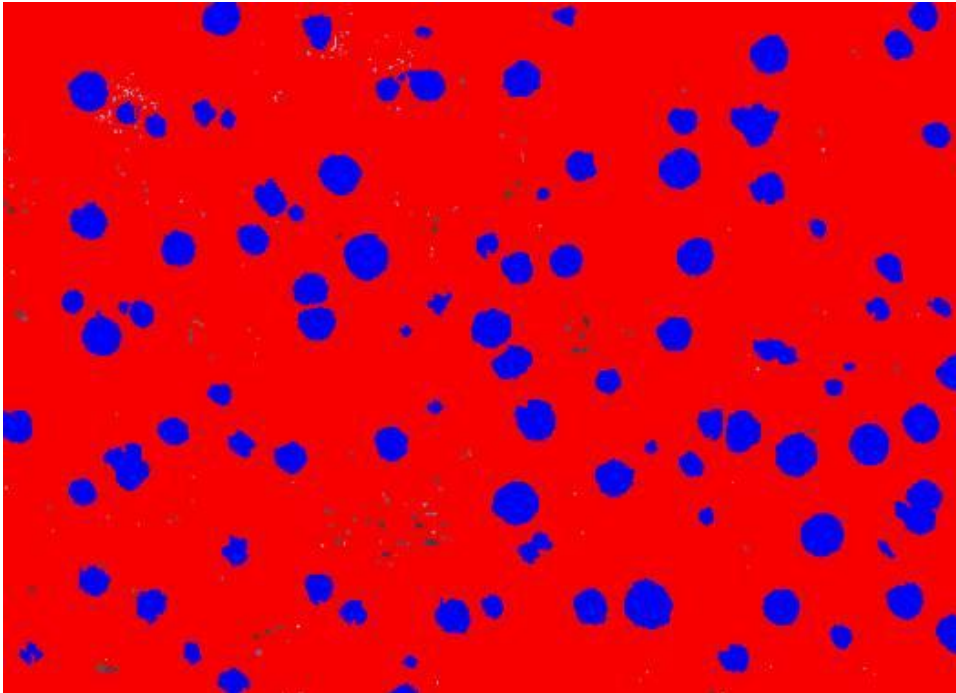
İncelenecek olan resim üzerinde gerekli işlemler yapılacak analiz ve resim özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örnek olarak ele alınan KGDD numune mikro yapısında küresellik ölçümü için bu işlemler yeterli görülmektedir. Bundan sonra sonuçların incelenmesi ile analiz tamamlanacaktır. Clemex İmaj analiz yazılımında sonuçlar, “*Object measure*”, “*Field measure*” ve “*Relative Measure*” olarak 3 farklı şekilde gözlenebilmektedir. “*Object Measure*” ile yapıdaki nesnelere ile ilgili alan, uzunluk çap, kalınlık, genişlik, küresellik en/boy oranı gibi sonuçları, “*Field Measure*” ile yapıdaki alan bazlı sonuçları ve “*Relative Measure*” ile mevcut fazların yüzde dağılımı gibi birbirleriyle ilişkili sonuçları görmek mümkündür.

Örnek numunenin küresellik işlemi için son olarak “*Toolbox*” menüsü içerisinde “*Object Measure*” sekmesi içerisinde “*Sphericity*” ve “*Length*” seçilir (Şekil 3.14).



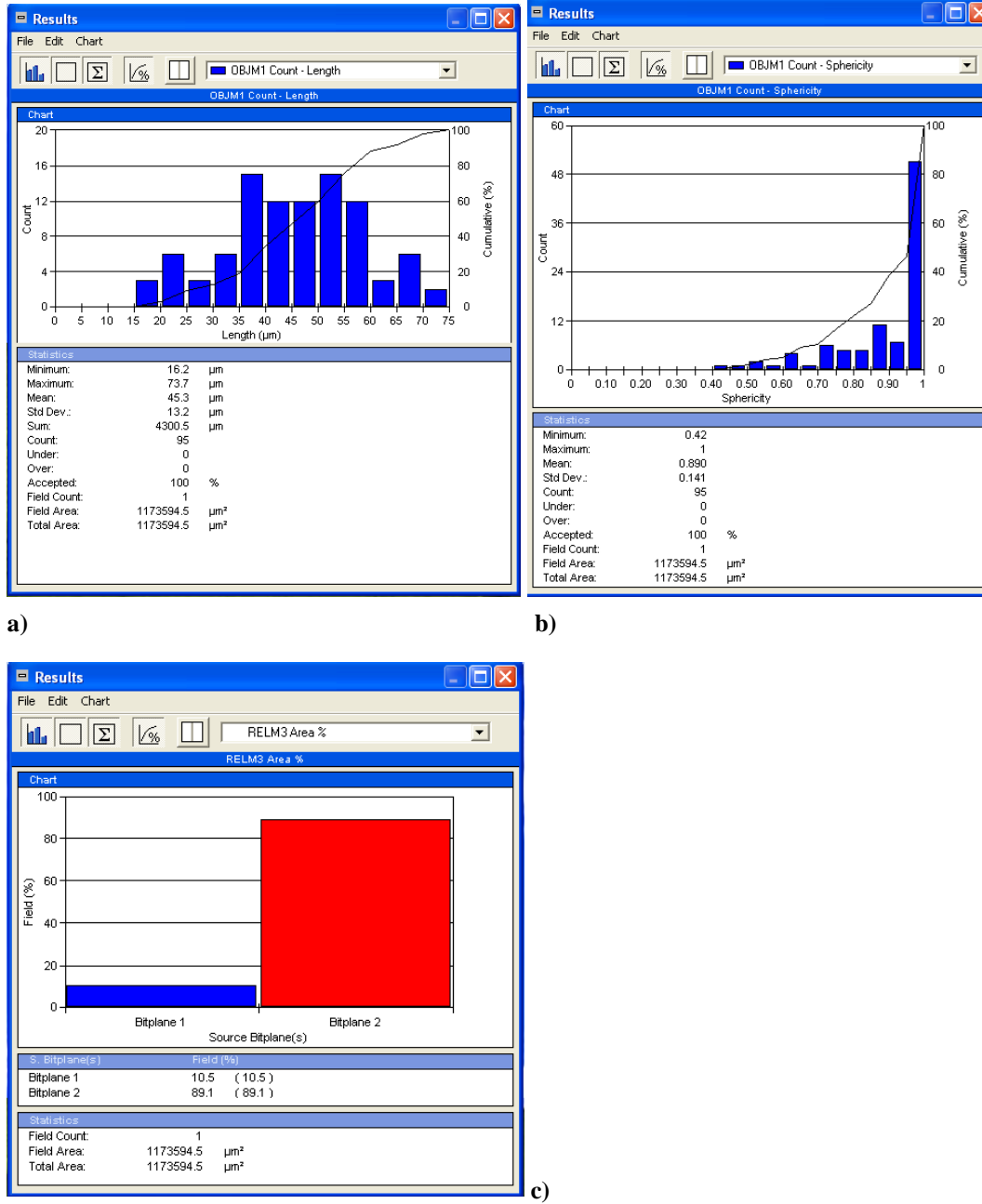
Şekil 3. 14. Küresellik sonuçlarının seçimi menüsü

Yapılan ayarlamalar ve girilen parametreler doğrultusunda sonuç görüntüsü için Şekil 3.15'deki görüntü elde edilmiştir.



Şekil 3. 15. Renklendirilmiş faz ve kürelere ait mikroyapı görüntüsü

Şekil 3.15'den elde edilen sayısal verilere ait sonuçlar Şekil 3.16'da görülmektedir. Şekil 3.16.a'da inceleme yaptığımız resimdeki numunenin küre sayısı ve uzunlukları, Şekil 3.16.b'de küreselleşme oranı ve son olarak Şekil 3.16.c'de resimdeki fazların oranları tespit edilmiştir.



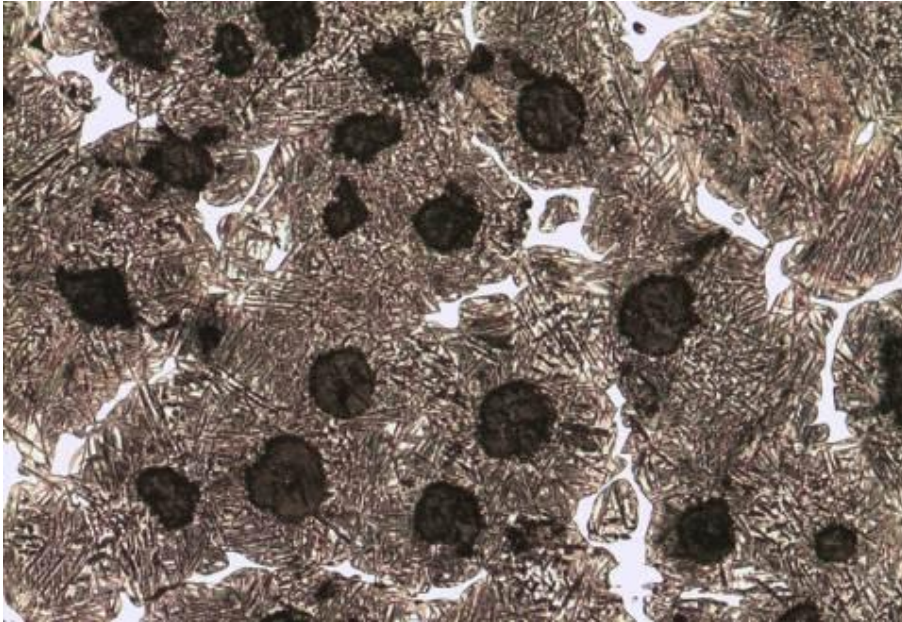
Şekil 3. 16. a) Ölçülen küre sayısı ve uzunlukları, b) Küreselleşme oranının tespiti, c) Faz oranlarının tespiti

İmaj analiz tekniğiyle elde edilen sayısal verilere ait sonuçlar Şekil 3.16'da verilmiştir. Şekil 3.16'da inceleme 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 olarak bulunmuştur. Şekil 3.16.b'de tespit edilen 95 adet kürenin, küreselleşme oranı incelenmiş ve küreselleşme oranı %89 olarak bulunmuştur. Şekil 3.16.c'de resimdeki fazların

oranları karşılaştırıldığında ise mavi fazın oranı % 10,5, kırmızı fazın oranı % 89,1 ve yok saydığımız alan ise % 0,4 olarak ölçülmüştür.

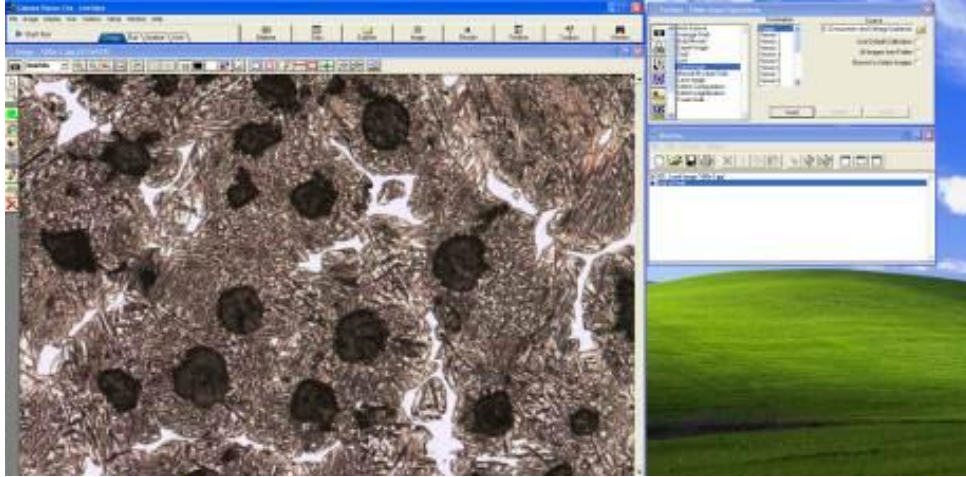
3.4. Faz Dağılımının İncelenmesi ve Ölçülmesi

Bu bölümde Küresel Grafitli Dökme demir malzemeye dağlanmış numune mikroyapısında oluşan farklı fazları ve yüzdelerinin belirlenmesi işlemleri anlatılacaktır. Şekil 3.17’de numunenin mikroyapı fotoğraf görüntüsü mevcuttur. Faz dağılımı hesaplamaları aşağıdaki resim üzerinde yapılacaktır.



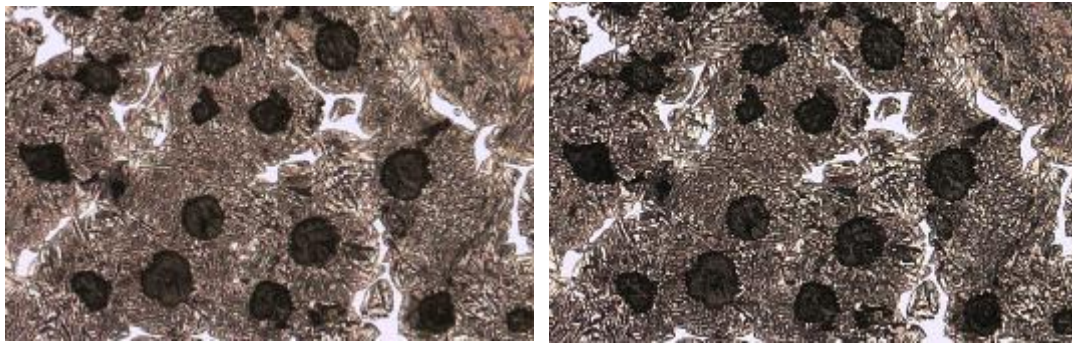
Şekil 3. 17. Asiküler KGDD numune örnek mikroyapısı 100x (Dağlanmış)

İlk olarak “*Toolbox*” menüsü içerisinde “*Video Input Operations*” sekmesinde “*Load Image*” seçilerek programa yüklenir. Mikroyapı resminin programa yüklenmesi esnasında program resimdeki ölçüleri tanımlayabilmek için kalibre yapmamızı ister. Ancak farklı fazların yüzde dağılımı yapılacağından kalibre bu işlem için sonucu değiştirmeyecektir. Şekil 3.18’de programa resim yüklendikten sonra ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3. 18. Resim yükleme işleme sonrası ekran görüntüsü

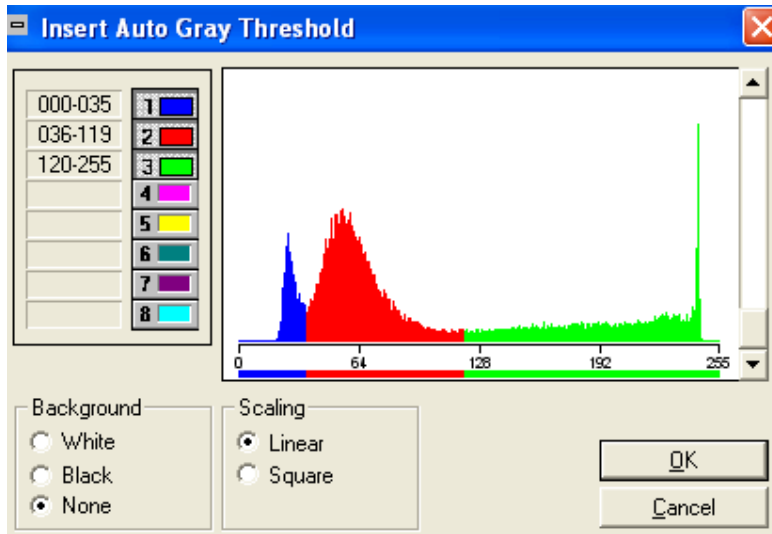
Numunemizin içyapısında oluşan farklı fazlar resimde farklı renklerde görülmektedir. Bu sebeple faz ayırımı program tarafından renk değişimine göre yapılmaktadır. İnceleme yapılacak görüntünün kalitesi ve netliği sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple resim üzerinde yükleme işlemi sonrası resim özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bunun için *“Toolbox”* menüsü içerisinde *“Gray Operations”* sekmesinde *“Delineate”* seçeneği kullanılmıştır. Şekil 3.19’da resim özelliklerinin geliştirilmesi için yapılan uygulama sonucu mikroyapıdaki değişim gösterilmiştir.



Şekil 3. 19. Resim özelliklerinin Delineate işlemi uygulanarak geliştirilmesi

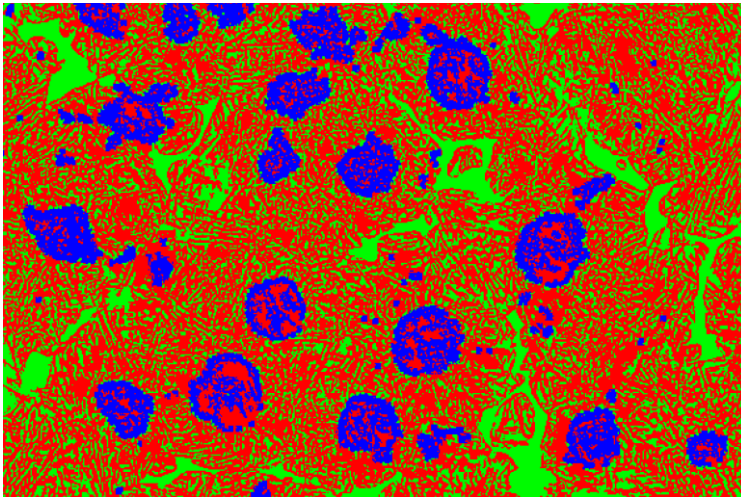
Resimde görülen yapının daha net bir şekilde görülmesi işlemi tamamlandıktan sonra analiz yapmak için renk eşleştirmeleri yapılmalıdır. Renk eşleştirmesi için *“Toolbox”* menüsü içerisinde *“Gray / Binary Operations”* sekmesi seçilir. Bu bölümden yapıda incelemek istediğimiz nesne seçimi sağlanır. Bu işlem için resim ve yapılacak analize bağlı olarak farklı alternatifler mevcuttur. Renk eşleştirme işlemi için seçimi otomatik olarak *“Auto Gray Thresholding”* seçeneğini kullanarak yapabiliriz. Bu

seçim sonrası yapı da kaç farklı faz varsa ya da o kadar renk eşleştirmesi seçimi yaparız. Numune mikroyapı resmi incelendiğinde malzemenin kimyasal bileşim ve üretim şartlarına bağlı olarak yapıda siyah renkte görülen küresel grafitler, beyaz renkte görülen sementit ve beynit yapıda gözlenmiştir. Bu düşüncemiz doğrultusunda 3 faza göre sonuç bulmaya çalışılmıştır. Şekil 3.20’de iki faz içeren mikroyapı resminde renk eşleştirme görüntüsü verilmiştir.



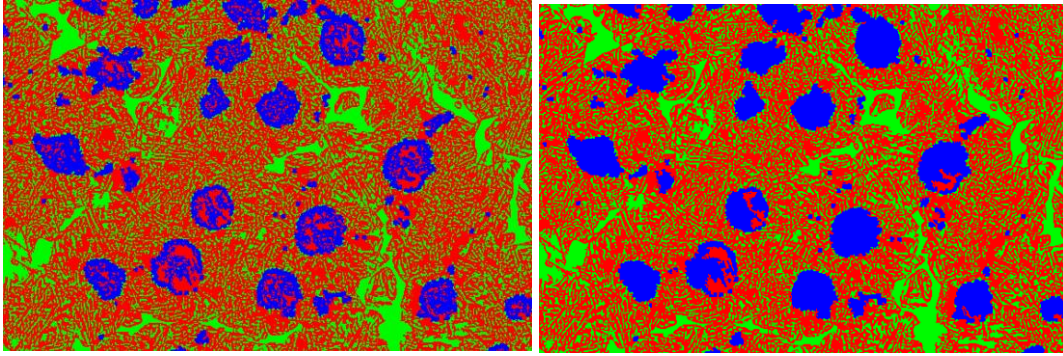
Şekil 3. 20. “Auto Gray Threshold” seçeneği ile iki fazlı yapı da eşleştirmesi sonucu görüntüsü

Eşleştirme işlemi seçilen sayıda faz kadar farklı renkte bölge otomatik olarak belirlenmektedir. Bu seçim istenirse renk eşiklerinin manuel olarak da ayarlanması yapılabilir. Şekil 3.21’de renk eşleştirmesi yapılan resim görülmektedir.



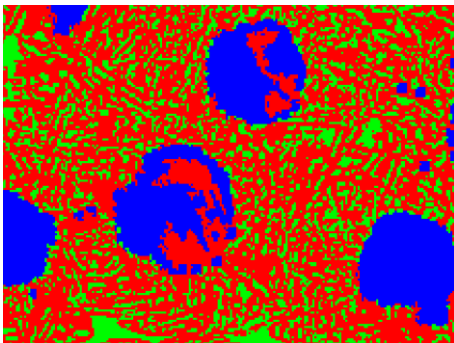
Şekil 3. 21. Üç faz olduğu varsayılan mikroyapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntü

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 içerisi doldurulmak istenen renk belirlenir. Bu şekilde etrafı kapalı alan oluşturan resimde mavi renkten görülen kürelerin içini de mavi renkte algılaması sağlanacaktır. Örnek mikroyapıda grafit küreleri mavi renkte olduğunda mavi renk için seçim yapılmıştır. Şekil 3.22’de doldurma işlemi sonucu görüntü değişimi verilmiştir.



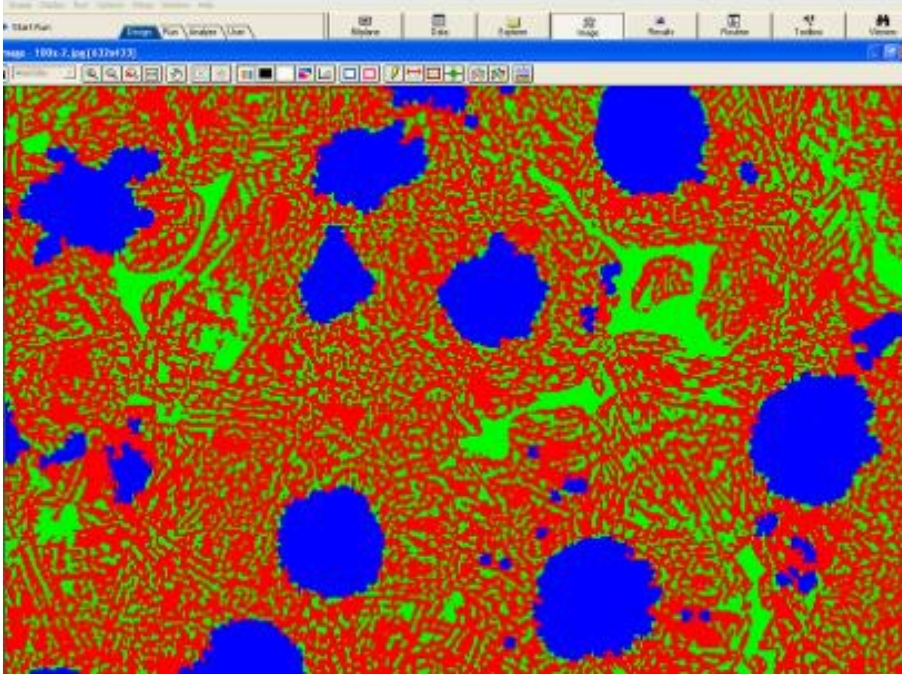
Şekil 3. 22. Grafit kürelerinin içinin doldurulması

Ancak Şekil 3.22’de görüldüğü gibi doldurma işleminden sonrada hala bazı küreler tamamen seçilememiş olabilir. Bunun sebebi resimde ilgili kürenin etrafının kapalı alan oluşturacak şekilde mavi renkte olmamasıdır. Bu durum Şekil 3.23’de de görülmektedir. Bu durumu önlemek için bu aşamadan sonra programda manuel olarak ilgili alan tanımlanarak istenen faz olacak şekilde ayarlanabilir.



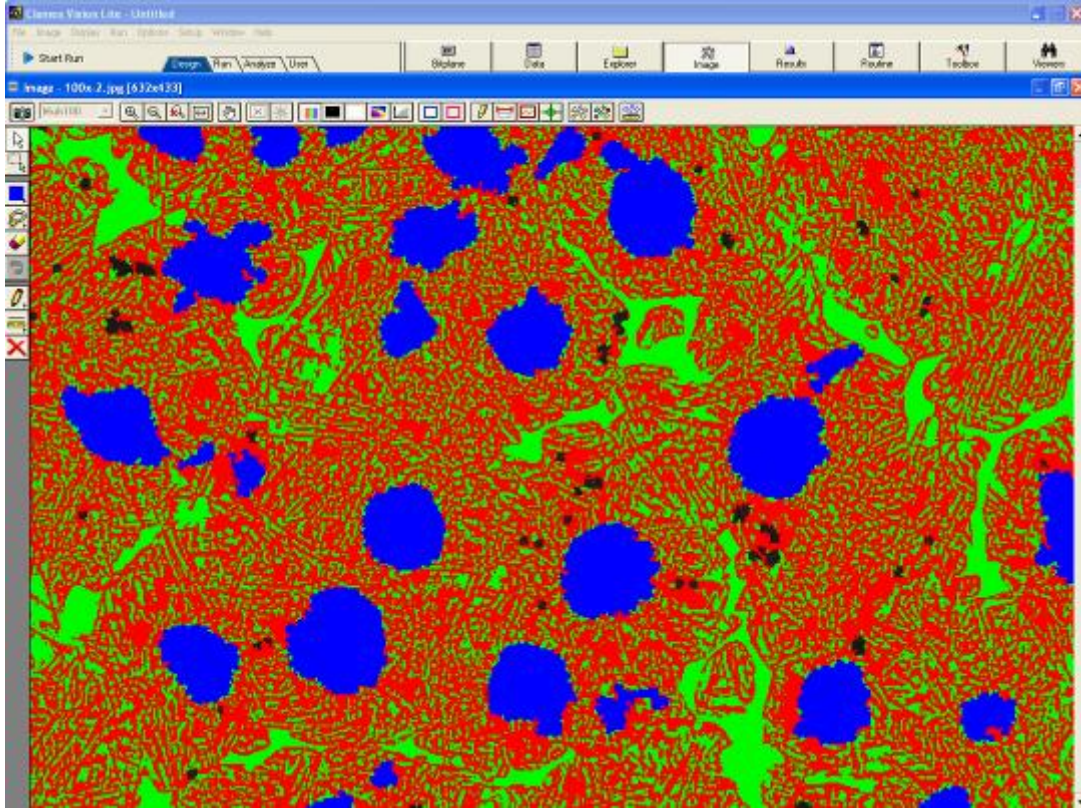
Şekil 3. 23. Grafit kürelerinin etrafında kapalı alan oluşmaması resmi

Programda manuel olarak doldurma için “*Laso and Fill*” ile işlem yapılır. Şekil 3.24’de manuel olarak doldurma sonucu resim görüntüsü verilmiştir. Bu işlemler yapılırken orijinal resim göz önünde bulundurularak hareket edilmelidir.



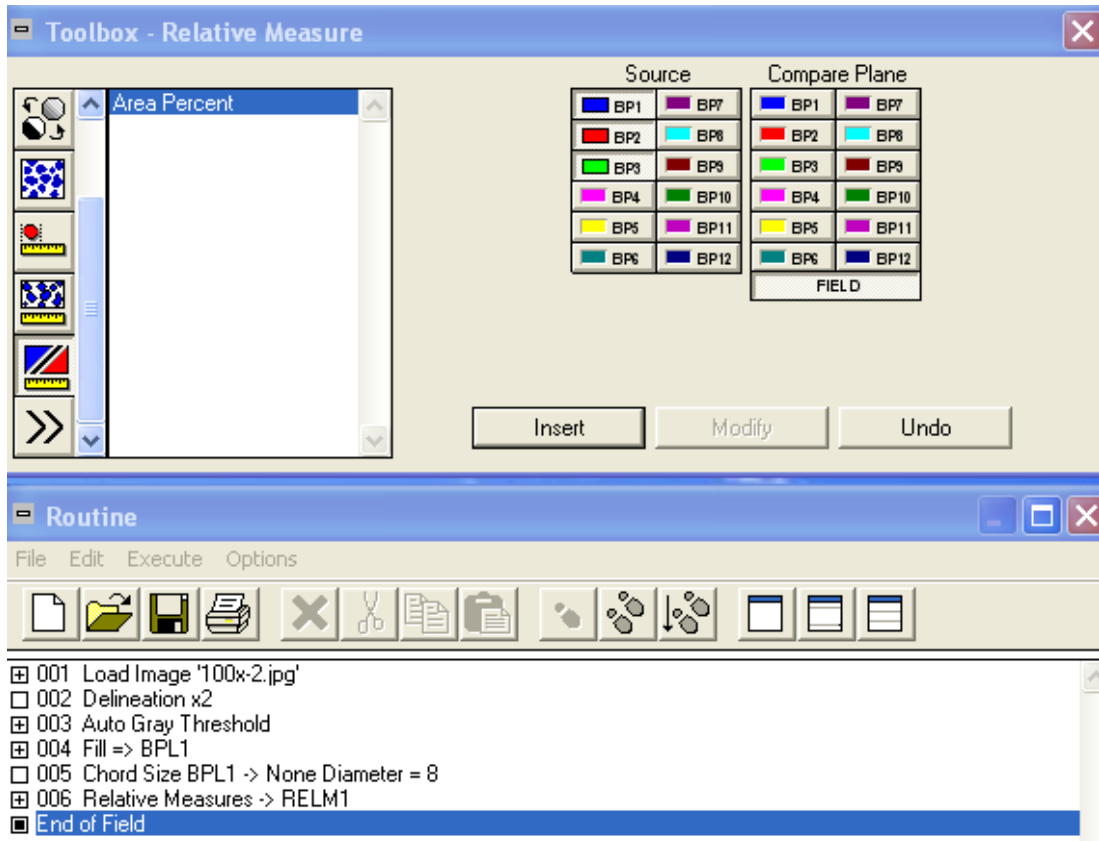
Şekil 3. 24. Grafit kürelerinin içinin manuel olarak doldurulması sonucu resim görüntüsü

Bu işlem sonrasında resim üzerinde orijinal resim incelenerek sonuçların daha doğru olması açısından düzeltilmesi gereken bir işlem varsa düzeltme yapılır. Örnek olarak Mesela 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 yapıldı. Şekil 3.25’de 8 μm altındaki kürelerden seçimin kaldırılması sonrası sonuç resmi verildi.

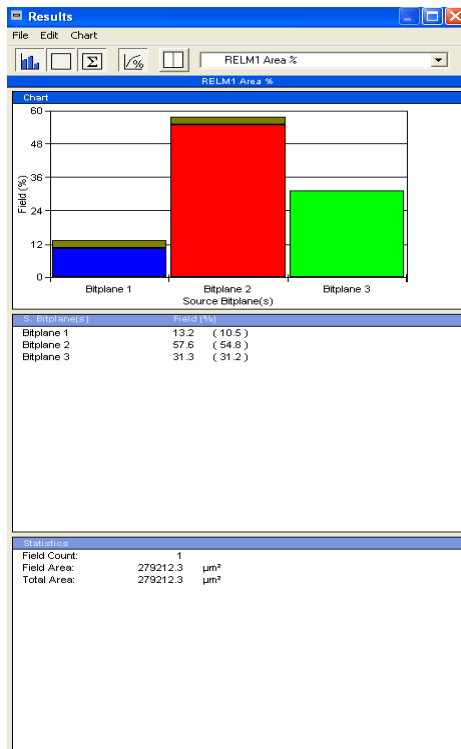


Şekil 3. 25. Belirli bir çapın altındaki kürelerin seçiminin kaldırılması

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. Şekil 3.26’da sonuçların görüntülenmesi için gerekli menü görüntüsü ve yüzde faz dağılımı oluşumu için oluşturulan nihai “*Routine*” görülmektedir. Bu kısımda ayrıca hangi renkte belirlenen renklerin faz dağılımlarını bulmak istiyorsak ilgili renkler seçilir. Sonrasında “*Insert*” tuşuna basılarak sonuçlar gözlemlenir. Sonuçlar Şekil 3.27’de görülmektedir.

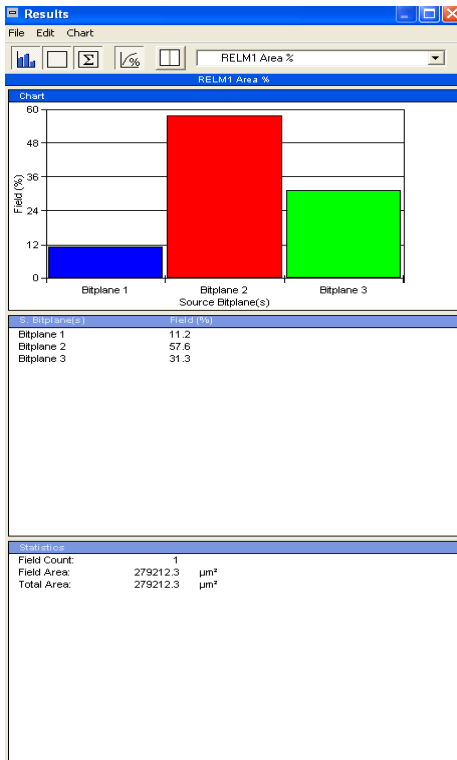


Şekil 3. 26. Sonuçların görüntülenmesi için gerekli menü görüntüsü ve yüzde faz dağılımı oluşumu için oluşturulan nihai "routine" menüsü



Şekil 3. 27. Örnek mikroyapı numunesi için yüzde faz dağılımı verilmiştir

Sonuçlar incelendiğinde mavi renkte görülen küresel grafitlerin % 13,2 -10,5; kırmızı renkte görülen beynitin % 57,6 -54,8 ve yeşil renkte görülen ferritin % 31,3 -31,2 olduğu tespit edildi. Faz yüzdesi değerleri net bir sayı değil de bir aralık şeklinde verilmiştir. Bunun sebebi programa otomatik olarak renk eşleştirmesi yapılmasının ardından manuel olarak eşleştirme yapılmasıdır. Yapılan işlemler sonucu faz yüzdeleri değişmiştir. Bu aşamada gerçek ya da gerçeğe en yakın faz yüzdelerini belirlemek için sonuca ulaşırken izlenen yol düşünülmelidir. Bu örnekte yapılan işlem basamakları incelenecek olursa otomatik renk eşleştirmesi sonucu ilk olarak küresel grafitlerin içindeki kırmızı renkteki görüntüler mavi olarak tanımlanmıştır. Daha sonrasında mavi olarak gözlemlenen 8 mikrometre altındaki bölgeler resimden seçimi kaldırılarak tanımsızlaştırılmıştır. Ayrıca sonuçların değerlendirilmesi açısından ilave olarak bir analiz daha yapılması faydalı olacaktır. Bu analizde otomatik renk eşleştirmesi sonucu doğrudan faz yüzdeleri hesaplanmalıdır. Bu şekilde yapılan analiz sonucu Şekil 3.28’de görülmektedir.



Şekil 3. 28. Mikroyapı numunesi yüzde faz dağılımı

Şekil 3.28’de Görülen sonuçları karşılaştırdığımızda resim üzerindeki revizyon sonucunda hiç etkilenmeyen yeşil renkli sementit yüzdelерinin değişiklik göstermediği anlaşılmaktadır. Arada % 0,1 farklılık küsurattan kaynaklanmaktadır.

Program % 0,1 hassasiyette analiz yapmaktadır. Her iki analiz sonucundaki mavi renkteki küresel grafit yüzdesi değerlendirildiğinde ilk sonuçta revizyonlar sonrası yüzde dağılım değeri gerçek sonuca daha yakındır. Çünkü ilk analiz sonucu yapılan revizyon işlemleri küresel grafit baz alınarak yapılmıştır. Örnek mikro yapısında % 13.2 oranında küresel grafit olarak değerlendirilmiştir. Son olarak kırmızı renkli beyrit yüzdesi için diğer iki fazın yüzdesi belirlendiğinden kalan miktar olarak yorumlanabilir. Sonuç olarak yüzde faz dağılım örnek numune için nihai olarak Tablo 3.2’de aşağıdaki şekilde değerlendirilmiştir.

Tablo 3. 2. Örnek numune için yüzde faz dağılımı

Faz	Programda görülen renk	% miktarı (± 0.05)
Küresel grafit	Mavi	13,2
Beyrit	Kırmızı	55,5
Sementit	Yeşil	31,3

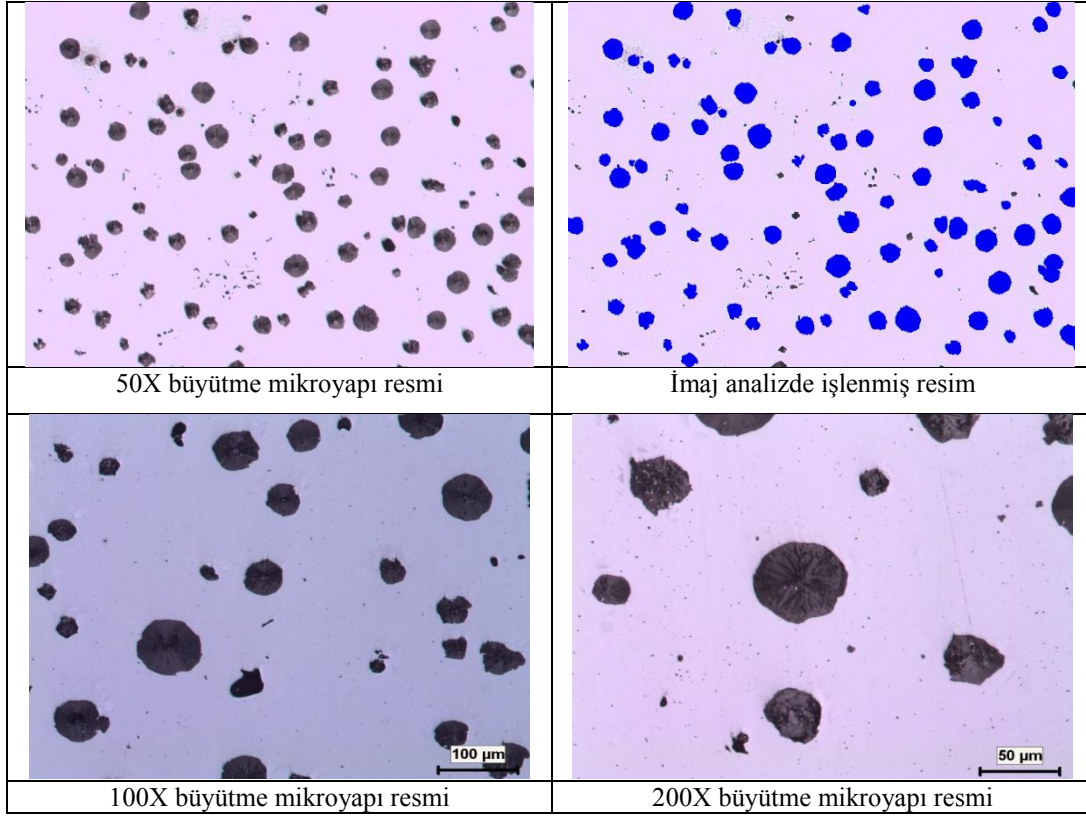
BÖLÜM 4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde ticari olarak faaliyet gösteren Anadolu Döküm firmasında üretilen farklı mikro yapı özellikleri gösteren küresel grafitli dökme demirlere ait numunelerin bilgisayar destekli imaj analiz yazılımlarıyla içyapı analizleri inceleme sonuçları verilecektir. 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.

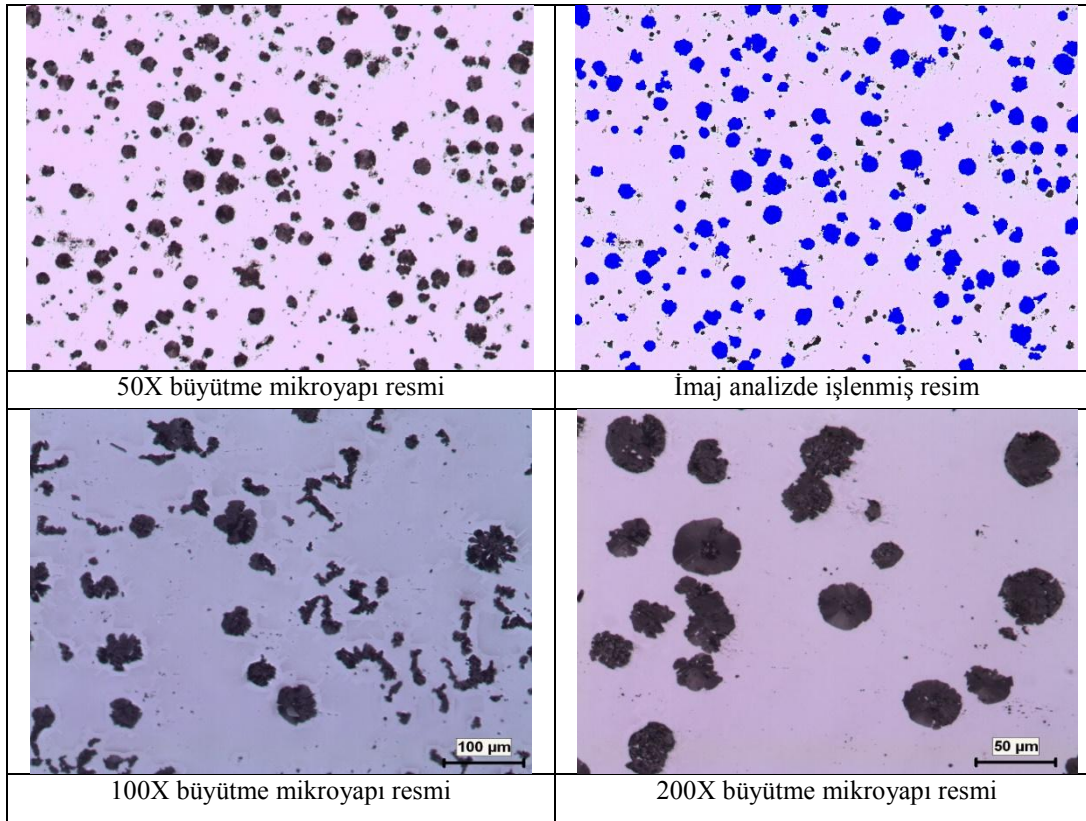
4.1. Parlatma Sonrası Mikroyapı ve Görüntü Analiz Sonuçları

Kimyasal bileşimleri ve beklenen mikro yapı özellikleri Tablo 3.1’de verilen dökümlere ait numuneler metalografik olarak hazırlandıktan sonra bilgisayara bağlı kamera ile Nikon marka mikroskoptan mikroyapı görüntüleri alınarak resimler Clemex İmaj Analiz yazılımıyla işlenmiştir.

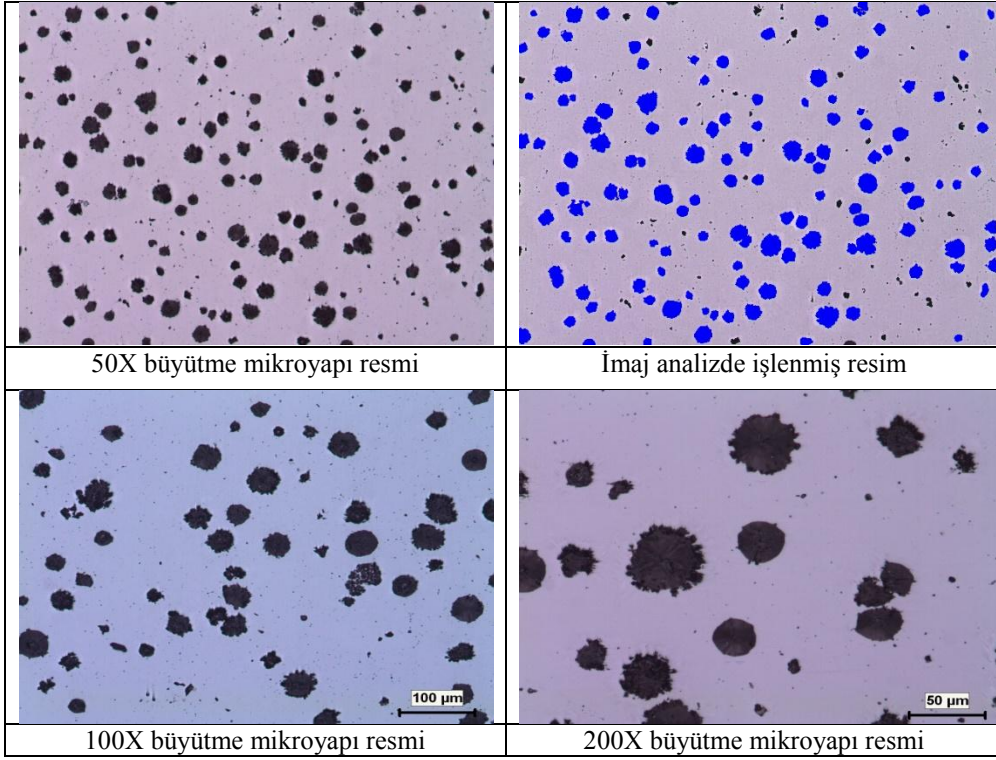
Numuneler parlatma sonrası 50, 100 ve 200 büyütme oranlarında mikro yapı resimleri çekilmiştir. Mikro yapıdaki küresellik yüzdesi, ortalama küre çapı ölçümü, kürelerin kapladığı yüzde alan ölçümleri için yapılan imaj analiz çalışmaları 50X büyütme resimlerinde yapılmıştır. Sırasıyla Şekil 4.1’de 1 numaralı ferrit + perlit içeren, Şekil 4.2’de perlit + ferrit içeren, Şekil 4.3’de perlitik alaşımlı ve Şekil 4.4’de asiküler yapı numunelere ait 50X, 100X ve 200X büyütmelerde çekilmiş mikroyapı resimlerine ait görüntüler verilmiştir. Ayrıca resimlerde 50X büyütmedeki resim üzerinde yapılan analiz sonucu işlenmiş resim örneği de görülmektedir.



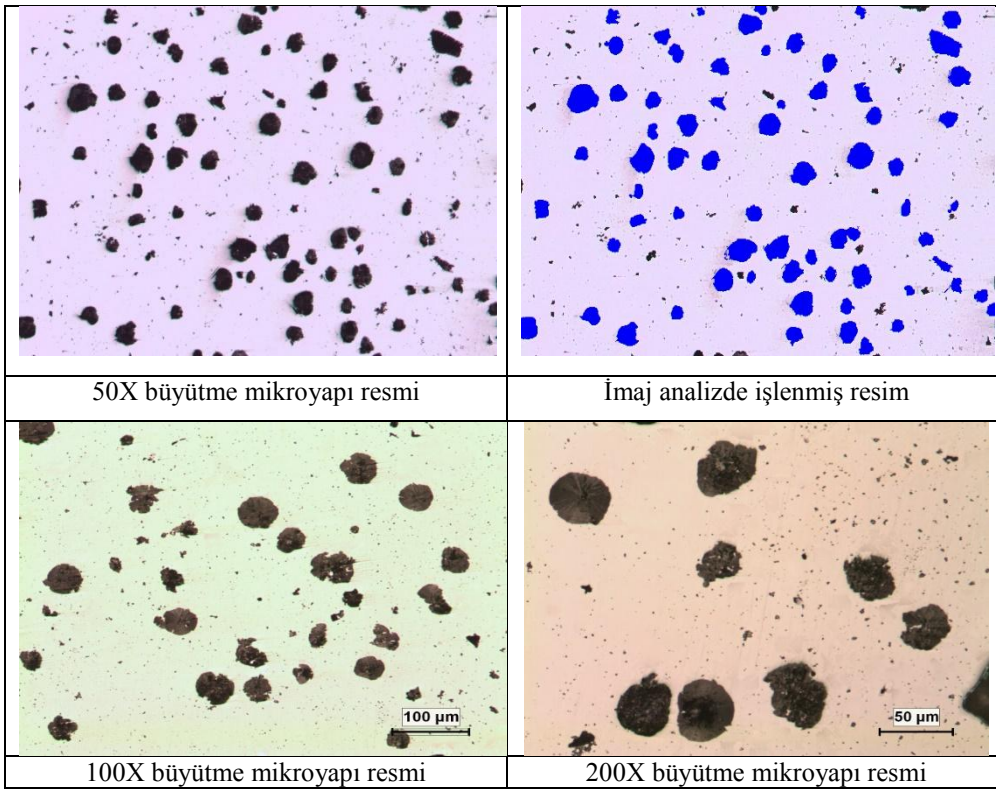
Şekil 4. 1. Ferrit + perlit içeren 1 numaralı numune mikro yapı resimleri



Şekil 4. 2. Perlit + ferrit içeren 2 numaralı numune mikroyapı resimleri



Şekil 4. 3. Perlitik alaşımlı 3 numaralı numune mikroyapı resimleri



Şekil 4. 4. Asiküler yapılı 4 numaralı numune mikroyapı resimleri

Şekil 4.1'den Şekil 4.4'e kadar olan farklı mikro yapıya sahip numunelere ait resimlerden de görüldüğü gibi parlatma sonrası yapıda sadece küresel grafitler tespit edilebilmektedir. Bu resimlere ait imaj çalışmalarından yapıdaki küresellik yüzdesi, kürelerin çapı ve kürelerin kapladığı alan yüzdesi değerleri bulunmuştur. Her biri yapıda birçok ölçüm yapılarak ortalama değerler Tablo 4.1'de verilmiştir.

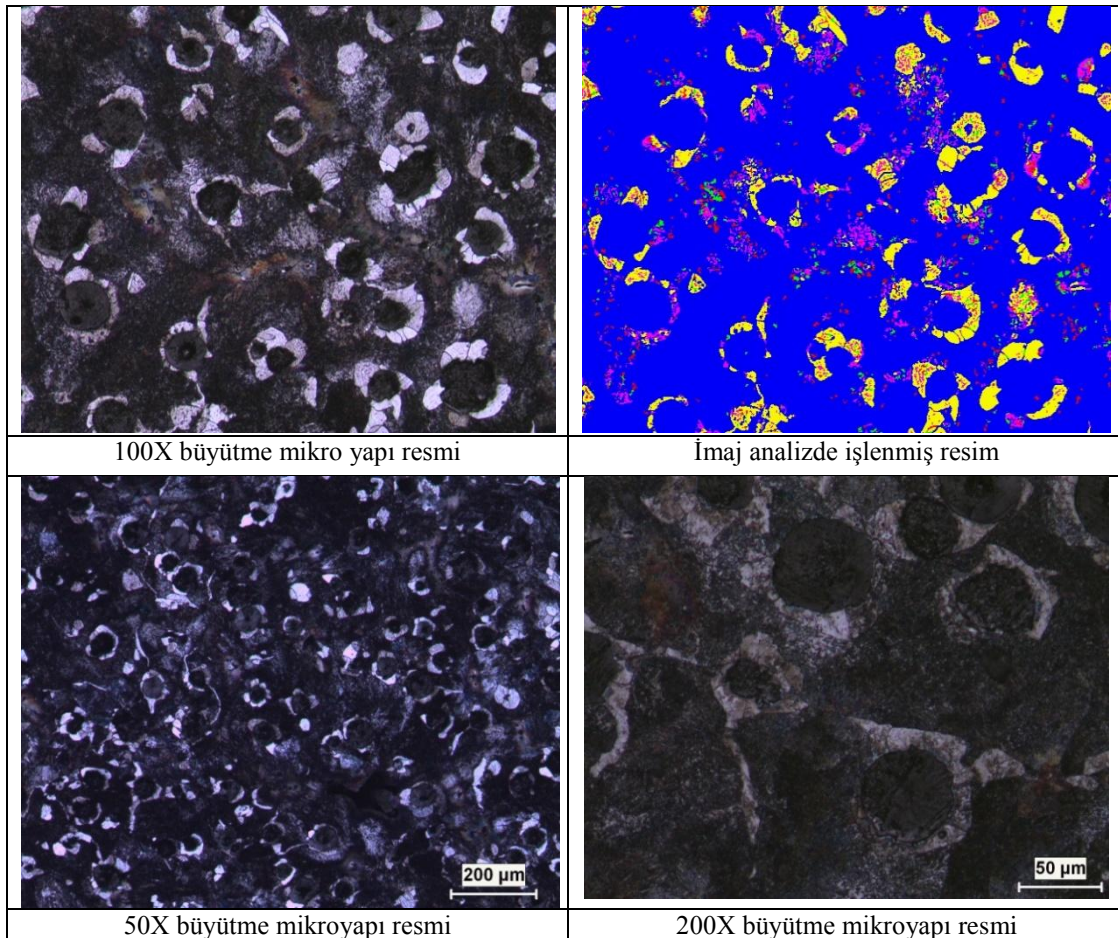
Tablo 4. 1. Parlatma sonrası numunelere ait imaj analiz sonuçları

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

Küresel grafitli dökme demir numunelerden alınan mikro yapı resminden yapılan inceleme şu şekilde sonuçlanmıştır. 1 numaralı numune resminde küresellik yüzdesi % 89,5, ortalama küre çapı 45 μm civarında ve kürelerin kapladığı alanda % 10,4 civarındadır. İki numaralı numune incelendiğinde küresellik yüzdesinin 82,6, ortalama küre çapı 42 μm civarındadır. Kürelerin kapladığı alan ise % 13,1 seviyesindedir. Üç numaralı numunede katılan alaşım elementlerinin de ilavesiyle yapıdaki küresellik % 87 civarında ve ortalama küre çapı 40 μm dir. Kürelerin kapladığı alan ise % 10,4 olarak tespit edilmiştir. Asiküler yapı olduğu düşünülen 4 numaralı numunede küre boyutları diğer numunelere nazaran daha büyük ve 50 μm civarında bulunmuştur. Küresellik yüzdesi ise % 70 seviyelerine kadar düşmüştür. Kürelerin kapladığı alan ise % 6 seviyesindedir. Programda 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 sonuçlarda 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 göre yorum yapılmalıdır.

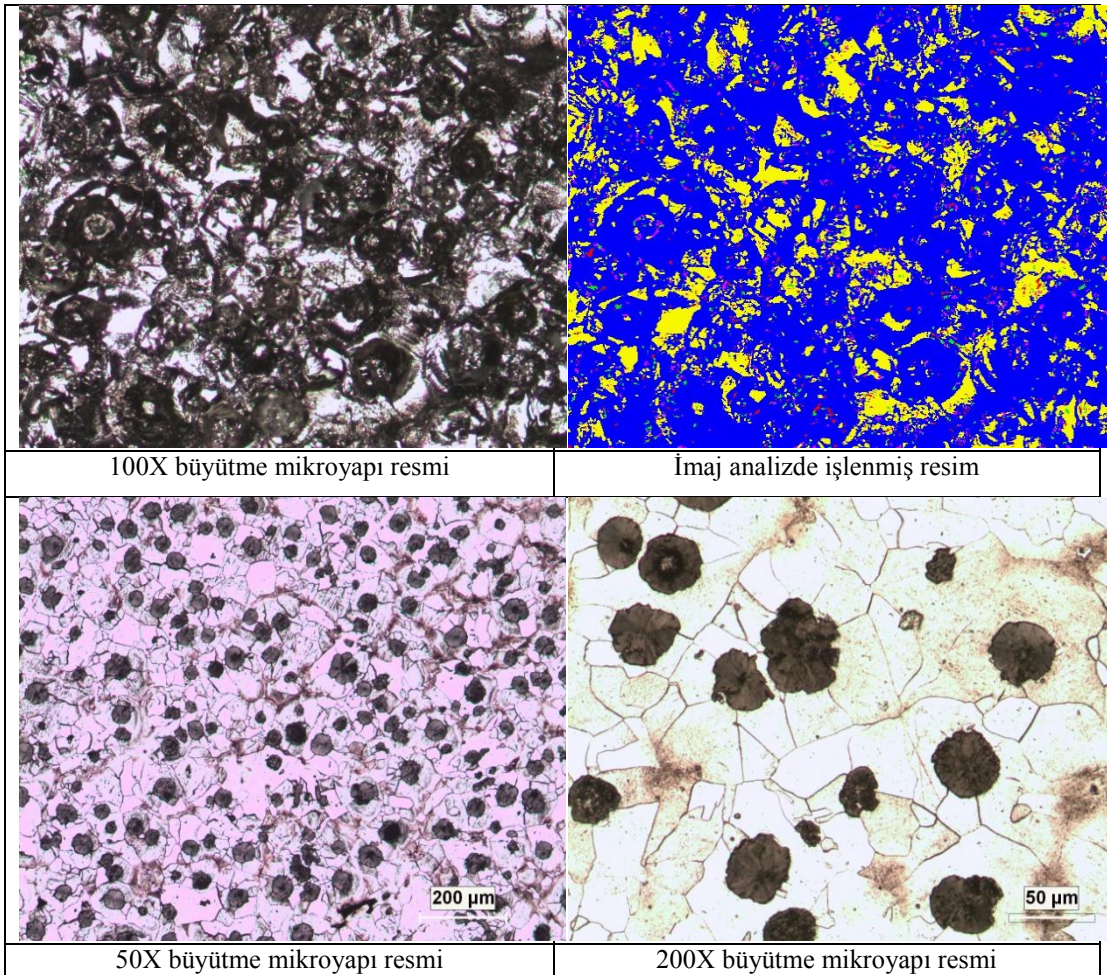
4.2. Dağlama Sonrası Mikroyapı ve Görüntü Analiz Sonuçları

Numuneler parlatma sonrası % 2 nital çözeltisi ile dağlandıktan sonra tekrar mikro yapı incelemeleri yapılmış ve resimleri çekilmiştir. Dağlama sonrası numune iç 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. Ayrıca numunelere ait 50X ve 200X büyütmelerde resimler çekilmiştir. Sırasıyla Şekil 4.5'de 1 numaralı ferrit + perlit içeren, Şekil 4.6'da perlit + ferrit içeren, Şekil 4.7'de perlitik alaşımlı ve Şekil 4.8'de asiküler yapıları numunelere ait 50X, 100X ve 200X büyütmelerde çekilmiş mikroyapı resimlerine ait görüntüler verilmiştir. Ayrıca resimlerde 100X büyütmedeki resim üzerinde yapılan analiz sonucu işlenmiş resim örneği de görülmektedir.



Şekil 4. 5. Ferrit + perlit içeren 1 numaralı numune mikro yapı resimleri

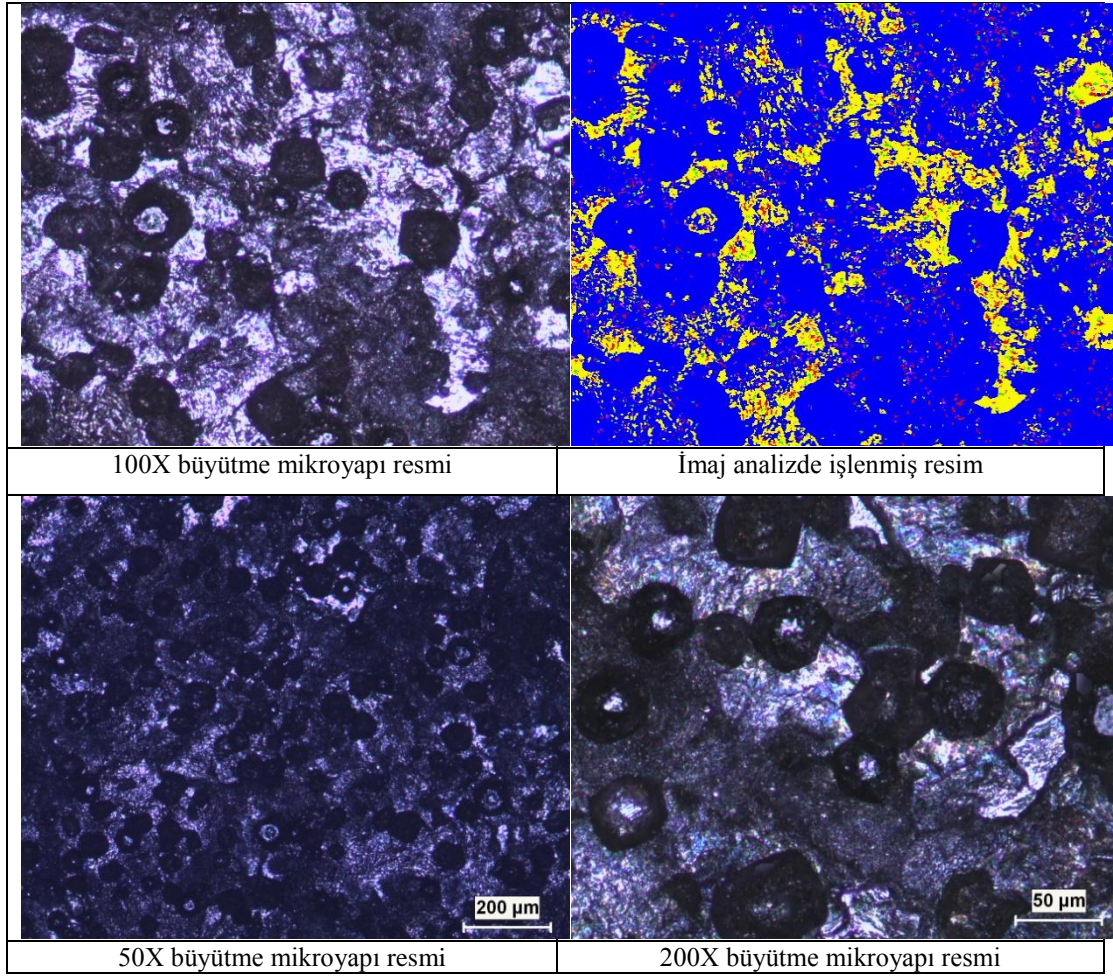
Şekil 4.5’de ferrit ağırlıklı küresel grafitli dökme demir numuneye ait mikroyapı imaj analizinde % 86.9 oranında mavi renkle görüntülenen ferrit ve küresel grafit yüzdesi tespit edilmiştir. Ferrit ve küresel grafitlerin rengi siyah olarak görüntülendiğinden ve programda renk farklılığın göre ölçüm yaptığından ferrit ve küre yüzdesi ayrı ölçüm yapılamamaktadır. Ancak aynı numuneye ait parlatma sonrası yapılan ölçümden kürelerin kapladığı yüzde alan belirlenmişti. Buradan edinilen bilgi sayesinde toplamda % 10.4 küresel grafit yüzdesi ve kalan % 76.5 lik yüzde kısımda da ferrit olduğu tespit edilebilir. İşlenmiş resimde sarı renkte görülen perlit yüzdesi ise % 9,8 olarak bulunmuştur. Ayrıca kalıntı seviyelerde diğer renklerde görüntülenen fazlarda mevcuttur.



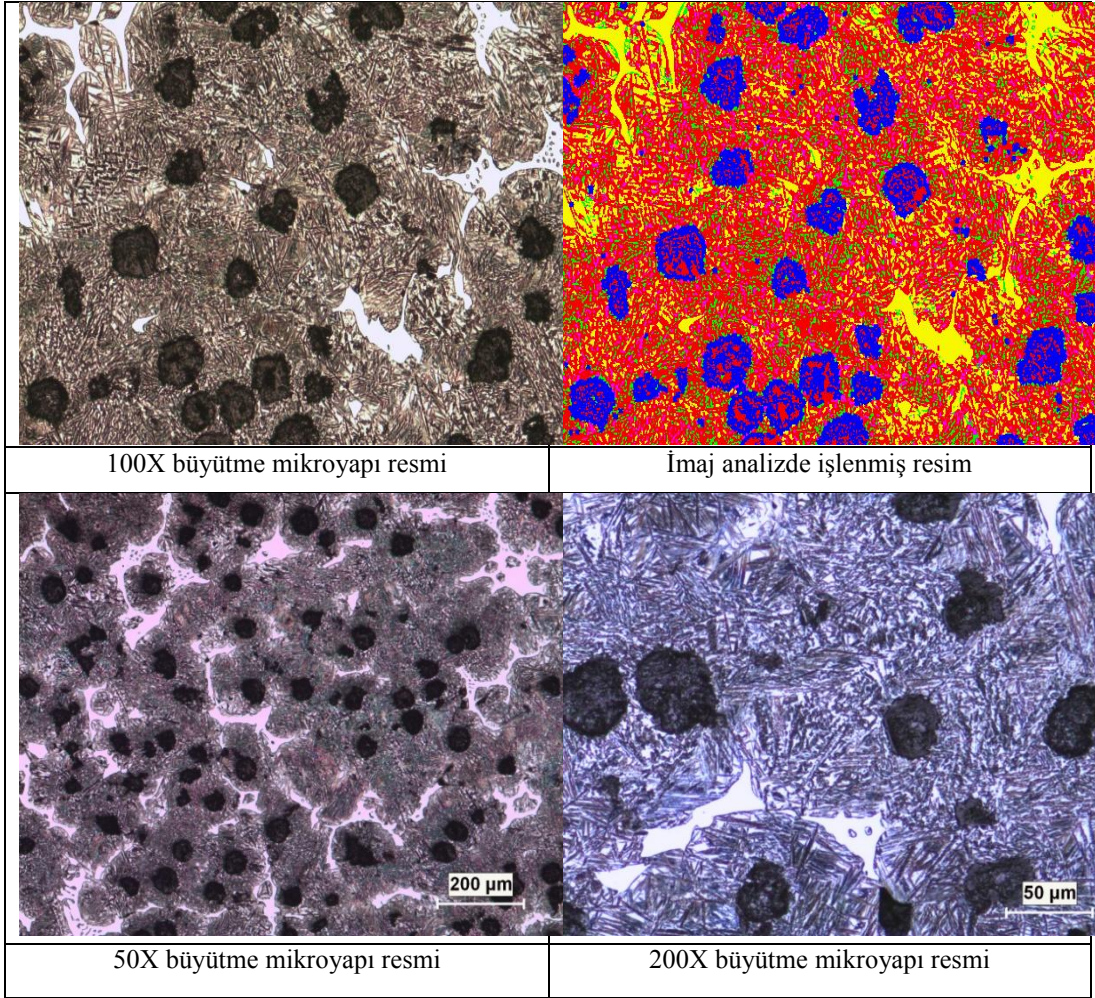
Şekil 4. 6. Perlit + ferrit içeren 2 numaralı numune mikroyapı resimleri

Şekil 4.6’da perlit-ferrit küresel grafitli dökme demir numuneye ait mikroyapı imaj analizinde % 74.2 oranında mavi renkle görüntülenen ferrit ve küresel grafit yüzdesi

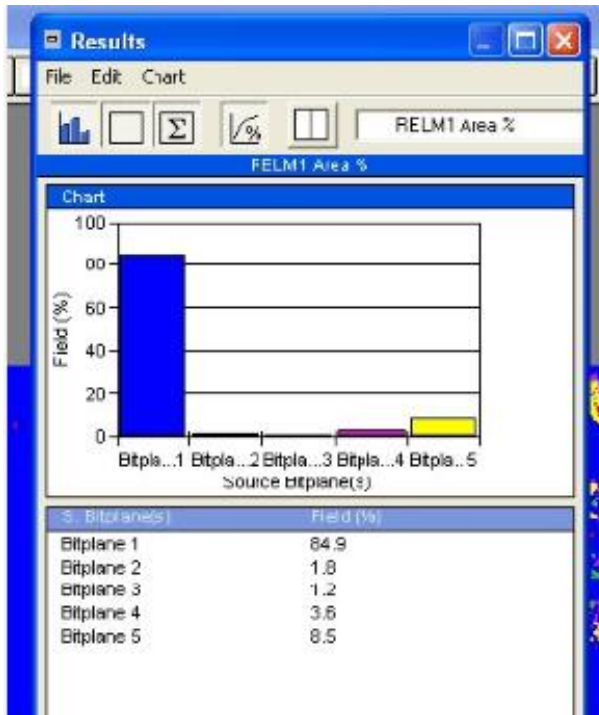
tespit edilmiştir. Aynı numuneye ait parlatma sonrası yapılan ölçümden kürelerin kapladığı yüzde alan % 13,1 olduğundan kalan % 61,1'lik yüzde kısımda da ferrit olduğu tespit edilebilir. İşlenmiş resimde sarı renkte görülen perlit yüzdesi ise % 21,8 olarak bulunmuştur. Ayrıca kalıntı seviyelerde diğer renklerde görüntülenen fazlarda mevcuttur.



Şekil 4. 7. Perlitik alaşımlı 3 numaralı numune mikro yapı resimleri



Şekil 4. 8. Asiküler yapılı 4 numaralı numune mikro yapı resimleri



Şekil 4. 9. Parlatma sonrası numunelere ait imaj analiz sonuçları

BÖLÜM 5. GENEL SONUÇLAR

Küresel Grafitli Dökme Demirlerde nicel faz analiz tekniklerinin incelenmesi başlıklı bu çalışmada farklı mikro yapı özelliklerine sahip numunelerin iç yapı incelemeleri bilgisayar destekli olarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar aşağıda özet şekilde sıralanmıştır;

Ticari olarak dökümleri yapılan numunelerin mikroyapı incelemeleri sonucu standart değerlerde olduğu ve üretimlerinin uygun olduğu anlaşılmıştır.

Döküm içyapısındaki bulunan küresel grafitlerin şeklini küreselliğini ve yüzde faz dağılımını incelemek için parlatma sonrası incelemek uygundur. Böylece numune yüzeyinde grafitler net bir şekilde görüntülenip inceleme yapılabilir. Üretimin uygunluğunun kontrolü için yapılan incelemelerde imaj analiz programı tarafından mm^2 başına düşen küre sayısının standartlarda gerekli değer aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Mikroyapı numunelerinin dağlama sonrası çekilen fotoğraflarının imaj analiz programıyla işlenmesi sonucu döküm yapısındaki faz yüzdeleri belirlenmiştir. Buna göre yapıda ortalama %50 perlit, %40 ferrit ve %10 küresel grafit olduğu tespit edilmiş ve bununda üretilmesi hedeflenen malzemeye uygun olduğu belirlenmiştir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde farklı küreleştirici ve aşılama kullanılarak yapılan dökümlerden elde edilen sonuçlarda en optimum 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 sağladığı maddi avantaj düşünülerek ekonomik malzeme kullanımının daha uygun olduğuna karar verilmiştir.

Küresel grafitli dökme demirlerin özellikleri üretim süreçlerindeki her parametreye doğrudan bağlıdır. Bu sebepten dolayı süreç parametrelerinde meydana gelen değişimler doğrudan mikro yapıyı ve mekanik özellikleri etkilemektedir. Üretilen malzeme özellikleri ve kalitesinde çok önemli etkiye sahip olan küresellik pek çok üretim parametresine bağlı olmakla birlikte, dökümhanede uygulanan aşılama ve küreleştirme işlem pratiklerinin rolü çok büyüktür. Döküm paçalarından alınan numunelerin mikro yapılarının incelenmesiyle malzeme özellikleri belirlenebilmektedir.

Dökümlerden alınan numunelerin mikro yapı analizinde bilgisayar destekli imaj analiz tekniklerinin uygun bir şekilde kullanımı bu aşamada pratik bir yöntemdir. Numuneden alınan net ve anlaşılır mikro yapı resimleri malzeme analizinde çok önemli bir etkiye sahiptir. İmaj analiz yöntemiyle inceleme yapılırken orijinal resim değerlendirilerek gerekli gerekiyorsa revizyon işlemleri yapılmalıdır. Aksi takdirde sonuçlar bizi yanıltacaktır. Yazılım sadece resim üzerindeki her bir pikselin renk koduna göre işlem yapmakta olduğundan tanımlamaların doğru bir şekilde yapılması gerekmektedir. Bu sebepten kullanıcı faktörü incelenecek resim kalitesine bağlı olarak önem kazanmaktadır. Ancak malzeme içyapısı hakkında tecrübeli dökümhane personeli bilgisayar destekli imaj analiz programlarını kullanarak numunelerinin içyapılarını inceleyerek, uyguladıkları aşılama ve küreleştirme işlemini uygunluğunu kontrol edebilir. Bu doğrultuda gerekiyorsa üretim süreçlerinde yenileme yapılması ve üretilen dökümlerin kalitesinin artması mümkün olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] YILMAZ, F., İçme-Atık su ve gaz dağıtım şebekelerinde dökme demirler ve düktil demir uygulamaları, Iski Yayını, İstanbul, 2003.
- [2] ÇAVUŞOĞLU, N., Döküm Teknolojisi 1, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu, 1981.
- [3] DEMİRCİ, A H., Mühendislik malzemeleri, Aktüel, İstanbul, 2004.
- [4] ERDOĞAN M., Mühendislik alaşımlarının yapı ve özelliği, Nobel Yayın Dağıtım, Cilt 1, Ankara, 2000.
- [5] GEORGE, Langford Sc D., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, May. 1966 ([http://www.georgesbasement.com /Microstructures/CastIronsHighAlloySteelsSuperalloys](http://www.georgesbasement.com/Microstructures/CastIronsHighAlloySteelsSuperalloys)).
- [6] Metallurgical and Materials Transactions B Volume 3, Number 1, 55-64, DOI:10.1007/BF02680585(<http://www.ceesvandevelde.eu/newfecdiagram.htm>).
- [7] BİLİCİ, M.K., Alaşımsız dökme demirlerin aşınma özelliği, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sf:7, İstanbul, Türkiye, 2004.
- [8] GAGNEBİN, A P., The first 25 years of Ductile Iron Modern Casting A.F.S. Vol. 63, No: 5, May 1973.
- [9] MORROGH, H., We have come a long way since 1948 Modern Casting A. F.S.Vol. 63, No. 5, May 1973.

- [10] ÇELİK, O N., Küresel grafitli dökme demirlerde Cu, Ni ve Mo Alaşım elementlerinin ostemperleme sonucu beynit oluşumuna etkisinin incelenmesi ve sinirsel ağ modeli ile değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sf:5-6, Eskişehir, 1996.
- [11] EKİNCİ, E., Düktil demirlerde aşıluyıcının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sf:12-16/38-46, Haziran, 2009.
- [12] SEYFİ, A., Östemperlenmiş GGG 60 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sf:4-6, Ankara, Mart 2006.
- [13] ASM Handbook, Properties and Selection: Irons, Steels and High Performance Alloys, Metals Park, ASM Int, 1:1063, 1990.
- [14] AKÇA, C., Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirde alaşım elementlerinin östenit-martenzit dönüşümüne etkisi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
- [15] KAYIRAN, E., Malzeme teori ve pratik, Nurol Matbaacılık, İskenderun-Hatay, 1999.
- [16] TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası ve KOSGEB ortak yayını, Küresel grafitli dökme demirin tipik özellikleri ve kullanım yerleri tabloları, 2006.
- [17] KIRCALI, K K., Farklı matris yapılaraya sahip küresel grafitli dökme demirlerin mekanik ve işlenebilirlik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Sf:15-25, Bursa, 2006.

- [18] TC Millî Eğitim Bakanlığı, Küresel Grafitli Dökme Demir MEGEP (Meslekî eğitim ve öğretim sisteminin güçlendirilmesi projesi) Metalurji Alanı, Ankara, 2006.
- [19] ÖZDEMİR, Ö., Otomotiv sektöründe kullanılan küresel grafitli dökme demir üretimine etki eden parametrelerin teorik incelenmesi ultrasonik ses hızı yöntemiyle tahribatsız kontrolü ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Metalurji Mühendisliği Anabilim Dalı, Sf:1-13, Eskişehir, Mayıs, 2007.
- [20] CEVHER, Ö., Dökme demirlerde sert faz oluşumunun önlenmesi ve giderilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sf:61-62, Ağustos, 2006.
- [21] Metals Handbook, Nondestructive evaluation and quality control, Sintercast Yayını, Sf:231-236, 2006.
- [22] HUERTA, E., POPOVSKY V., A Study of hold time, fade effects and microstructure in ductile iron, AFS Cast Iron Inoculation Conference, September 29-30 Schaumburg, Illinois, 2005.
- [23] KARSAY, S I., Ductile Iron, Production Practices Sf: 56, AFS, 1985.
- [24] İZGİZ, S., K.G.D.D. Üretimi, Yolluk besleyici tasarımı, Isıl işlemi ve özellikleri, Segem, ANKARA, 1988.
- [25] ŞEN, Ö., Küresel grafitli dökme demirlerin üretimi ve işlem yöntemlerinin karşılaştırılması, Metal Dünyası, 2003.
- [26] LABRECQUE, C., GANGE, M., Review ductile iron: Fifty Years of Continuous Development, Canadian Metallurgical Quaterly, C: 37, No:5 Sf: 343-378, 1998.

- [27] CAMPBELL, J., Castings Second Edition. University of Birmingham, UK. 2003.
- [28] SERGEANT, G.F., FULLER G., BCIRA- Foundry Technology, Source Book, AFS, Sf: 331-360, 1990.
- [29] Genel Döküm Teknolojisi, Seminer notları, Segem, 360s, 1978.
- [30] BERKİN, K., GGG 50 Sınıfı dökme demire bakır ilavesinin mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sf:16-18, İstanbul, Eylül, 2009.
- [31] CANTEKİNLER, A., Ferritik dökme demirlerde kaynak gücünün mekanik özelliklere etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sf: 20-23, Konya 2008.
- [32] ÇETİN, M., Karabük pikinden küresel grafitli dökme demir üretiminde etkili parametreler, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1998.
- [33] VİJİYARAGHAVAN ,R., A Model for evolution of as-cast microstructure in ductile iron alloys, Graduate School of the University of Wisconsin-Madison in partial fulfillment of the requirements for the degree Doctor of Philosophy, December, 1996.
- [34] ŞEN, Ö., Dökme demirlerde ısı analiz yöntemiyle yapı belirlenmesi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Sf 48, 2004.
- [35] KARAMUSAOĞLU, H A., Küresel grafitli dökme demir'in (GGG 60) işlenmesinde kesici takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Anabilim Dalı, Sf:30-32, Karabük, Eylül, 2009.

[36] ERSÜMER, A., Demir döküm, Birsen Kitabevi Yayını, İstanbul, 1981.

[37] <http://www.eraslandokum.com.tr>.

[38] <http://www.Turing.com.tr>.

ÖZGEÇMİŞ

Muhterem Yıldız, 07.05.1979 da Manisa' da doğdu. İlk ve orta öğretimini Yeşilkavak İlköğretim Okulunda; Lise eğitimini Salihli' de tamamladı. 1996 yılında Salihli Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi, Metal İşleri Bölümünden mezun oldu. 1997 yılında başladığı CBÜ Turgutlu Meslek Yüksekokulu Kaynak Teknolojisi bölümünü 1999 yılında bitirdi. 2000 yılında Sakarya Üniversitesi, Metal Öğretmenliği Bölümüne girdi ve 2004 yılında mezun oldu. 2005 – 2007 yılları arasında Elba Basınçlı Döküm Aş. nde kalite kontrol proses sorumlusu olarak çalıştı. 2008 yılından beri polis olarak görev yapmaktadır. 2009 yılında SAÜ FBE metal eğitimi bölümünde başladığı Yüksek lisans eğitimi bitirme aşamasına gelmiştir. Evli ve 1 çocuk babasıdır. Muhterem Yıldız' ın 1 adet uluslararası tebliği bulunmaktadır; “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Dökümünde Ticari Olarak Kullanılan Farklı Küreleştirici ve Aşıl原因larının Döküm Kalitesine Etkisinin İncelenmesi, 1st International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science, 7-9 June 2013, Sakarya-Turkey“

M. YILDIZ	DÖKME DEMİRLERDE NİCEL FAZ ANALİZ TEKNİKLERİNİN İNCELENMESİ	OCAK 2014
------------------	--	------------------