

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

**DÜKTİL DEMİRLERDE AŞILAYICININ MİKROYAPI  
VE MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Metalurji ve Malzeme Müh. Ercan EKİNCİ**

**Enstitü Anabilim Dalı : MET. VE MALZ. MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr.Fevzi YILMAZ**

**Haziran 2009**



## ÖNSÖZ

Çalışmalarında bana her zaman destek olan tez danışmanım değerli öğretim üyesi Sayın Prof.Dr. Fevzi YILMAZ' a, deneyleri gerçekleştirmemde bana yardımcı olan Sayın Araştırma görevlisi Metalurji ve Malzeme Yüksek Müh. Özgür CEVHER'e , Döküm işlemlerimi gerçekleştirdiğim ALFA Döküm Fabrikası çalışanlarına, döküm işlemlerim sırasında bana destek olan Sayın Ferit ILGAR'a teşekkür ederim. Benim bu aşamaya gelmemi sağlayan SAÜ Müh. Fak. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü öğretim elemanlarına, test ve deneylerini gerçekleştirdiğim bölüm laboratuvar çalışanlarına şükranlarımı sunarım.

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

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER .....	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	viii
TABLolar LİSTESİ.....	xii
ÖZET.....	xiii
SUMMARY.....	xiv

## BÖLÜM 1.

GİRİŞ.....	1
------------	---

## BÖLÜM 2.

DÜKTİL DEMİR.....	3
2.1. Düktil Demirlerin Genel Özellikleri.....	3
2.1.1 Aşınma direnci.....	3
2.1.2. Mukavemet.....	3
2.1.3. Süneklik.....	4
2.1.4. Dökülebilirlik.....	4
2.1.5. Darbe direnci.....	5
2.1.6. Korozyon direnci.....	5
2.1.7. Basınca dayanım .....	6
2.2. Düktil Demirlerin Mekanik Özellikleri.....	6
2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.....	10
2.4. Küresel Grafitli Dökme Demirin Katılaşması.....	12
2.5. KGDD Bileşimindeki Ana Elementler ve Etkileri.....	17
2.5.1 Karbon.....	17
2.5.2 Silisyum.....	17

2.5.3 Bakır.....	18
2.5.4. Kalay.....	18
2.5.5. Magnezyum.....	19
2.5.6. Nikel.....	19
2.5.7. Krom.....	19
2.5.8. Fosfor.....	19
2.5.9 Kükürt.....	20
2.5.10 Mangan.....	20
2.6. Karbon Eşdeğerliği.....	20
2.7. İndüksiyon Ocakları ve Ergitme.....	22
2.8. İndüksiyon Ocaklarının Tarihçesi.....	23
2.9. İndüksiyon Ocaklarının Diğer Isıtma Yöntemlerine Üstünlükleri..	26
2.10. İndüksiyon Bobinleri.....	26
2.11. İndüksiyon Isıtma Spektrumu.....	26
2.12. İndüksiyon ile Isıtma Prensibi ve Kullanım Alanları.....	27
2.13. Dalma Derinliği.....	28
2.14. Düktil Demir Üretiminde İndüksiyon Ocaklarının Kullanımı.....	29

### BÖLÜM 3.

KÜRELEŞTİRME VE AŞILAMA.....	31
3.1. Küreleştirme İşlemi.....	31
3.1.1. Küreleştirme etkisinin zamanla azalması.....	32
3.2. KGDD’ de Uniform Olmayan Küre Hacminin Oluşması.....	34
3.3. Potada Küreleştirme Yöntemleri.....	35
3.3.1. Açık pota.....	36
3.3.2. Sandwich yöntemi.....	36
3.3.3. Kapaklı pota yöntemi.....	38
3.3.4. İbrikli pota yöntemi.....	40
3.3.5. Flotret yöntemi.....	41
3.3.6. Vorteks yöntemi.....	43
3.3.7. Inmold yöntemi.....	43
3.3.8. Daldırma yöntemi.....	45
3.3.9. MAP yöntemi.....	45

3.11.10. Konverter yöntemi.....	45
3.11.11. Enjeksiyon.....	46
3.11.12. Basınçlı pota.....	46
3.4. Aşılama İşlemi.....	46
3.5. Aşılama Malzemesinin Sahip Olması Gereken Özellikler.....	49
3.6. Aşılama Malzemeleri.....	50
3.7. Çekirdek Sayısının Doku Yönlendirmede Etkisi.....	52
3.8. Dökme Demirlerde Aşılama ile Sağlanan Özellikler.....	53
3.9. Farklı Aşılama Malzemelerinin Etkinliklerinin Zamanla Değişimi.....	53
3.10. Düktil Demirlerin Aşılmasında Etkinin Zamanla Azalması.....	55
3.11. Aşılama Cihazlarındaki Önemli Elementler.....	57
3.12. Aşılama Etkileyen Faktörler.....	57

#### BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	59
4.1. Giriş.....	59
4.2. Numune Modeli ve Ölçüleri.....	61
4.3. Döküm Kalıplarının Hazırlanması.....	62
4.4. Şarj, Ergiyik ve Döküm.....	63
4.5. Düktil Demir Numunelerin Hazırlanması.....	65
4.6. Deneyler ve Deneylerde Kullanılan Cihazlar.....	66
4.6.1. Metalografik inceleme.....	66
4.6.1.1. Metalografik parlatma cihazı.....	66
4.6.1.2. Numune hazırlama.....	66
4.6.1.3. Zımparalama.....	67
4.6.1.4. Parlatma.....	67
4.6.1.5. Dağlama.....	67
4.6.1.6. Optik mikroskop cihazı.....	68
4.6.1.7. SEM cihazı.....	69
4.6.2. Sertlik cihazı ve sertlik testi uygulaması.....	70
4.6.3. Darbe cihazı ve darbe testi uygulaması.....	71

## BÖLÜM 5.

DENEYSEL SONUÇLAR.....	73
5.1. Vaxon(Si-Al-Ca) Aşılavıcı Kullanılarak üretilmiş Düktil Demir Mikroyapısı.....	73
5.2. Barinoc (Si-Al-Ca-Ba) Aşılavıcı Kullanılarak Üretilmiş Düktil Demir Mikroyapısı.....	75
5.3. UltraSeed (Si-Al-Ca-Ce) Aşılavıcı Kullanılarak Üretilmiş Düktil Demir Mikroyapısı.....	77
5.4. Döküm Numunelerinin Mikroyapı Karakterizasyonu.....	85
5.5. Sertlik (BSD) Deneyleri.....	89
5.6. Darbe Deneyleri.....	91
5.7. Sonuçların İrdelenmesi.....	92
KAYNAKLAR.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	100

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopy
CE	: Karbon Eşdeğeri
KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
Sc	: Doymuşluk Derecesi
$\delta$	: Nüfuz Derinliği (mm)
Fe	: Demir
Fe <sub>3</sub> C	: Karbür
BSD	: Birinel Sertlik Değeri
C	: Karbon
Ni	: Nikel
Si	: Silisyum
Mn	: Mangan
Mg	: Magnezyum
Ce	: Seryum
Ba	: Baryum
P	: Fosfor
S	: Kükürt
$\mu_r$	: Bağlı Manyetik Geçirgenlik
F	: Frekans(Hz)
DIN	: Alman Norm Enstitüsü
MPa	: Megapaskal
BCIRA	: İngiltere Dökme Demir Araştırma Birliği
ASTM	: Amerikan Standardı



## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Perlitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. Döküm hali ile kullanılmaktadır. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır.....	8
Şekil 2.2.	Martenzitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. Temperleme ısıl işlemi görmüş ve %3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır.....	8
Şekil 2.3.	Ferritik-Perlitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır.....	9
Şekil 2.4.	Ferritik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır.....	9
Şekil 2.5.	Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır.....	10
Şekil 2.6.	Ötektik altı küresel grafitli dökme demirin katılaşma sırasının şematik gösterimi, (a) silisyumun eş düzlem kesitinde katılaşmanın yolu, (b) soğuma eğrisi .....	14
Şekil 2.7.	Katı bir daire içinde kürenin eşsıl büyümesi ve bir düzgün arayüzeyle dairenin büyümesi.....	15
Şekil 2.8.	Ötektiküstü küresel grafitli dökme demirin katılaşma sırasının şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.9.	Kesit kalınlığına göre karbon eşdeğerliğindeki değişim.....	21
Şekil 2.10.	Fe-C-Si diyagramının % 1,2,3,4 silisyuma göre değişimi.....	22
Şekil 2.11.	(a) İndüksiyon ocağının şematik görüntüsü. (b) Kanallı indüksiyon ocağı ve kesit görüntüsü.....	30
Şekil 3.1.	Magnezyumun küreselleşmeye etkisi.....	31
Şekil 3.2.	Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi.....	33
Şekil 3.3.	Küresel grafitli dökme demir üretiminde açık pota yöntemi.....	36
Şekil 3.4.	Sandwich potası yöntemi.....	37
Şekil 3.5.	Mg faydalanma yüzdesinin işlem sıcaklığı ile değişimi.....	38

Şekil 3.6.	BCIRA – Kapaklı pota.....	39
Şekil 3.7.	İbrikli pota yöntemi.....	41
Şekil 3.8.	Flotret yöntemi.....	42
Şekil 3.9.	Parçada beyaz katılaşılan, soğuma hızının fazla olduğu bölgeler....	48
Şekil 3.10.	Aşılama durumuna sıcaklığın etkisi.....	48
Şekil 3.11.	Magnezyum ve aşılamanın mikroyapıda yaptığı değişim.....	49
Şekil 3.12.	Lamel grafitli gri dökme demirde zamana bağlı olarak aşılama ajanlarının etkinlikleri.....	54
Şekil 3.13.	Farklı aşılama malzemelerinin zamanla nodül sayısına et- kileri.....	55
Şekil 3.14.	KGDD’de farklı aşılama ajanlarının etkinlikleri.....	57
Şekil 4.1.	Deneysel döküm numunesinin, a)şematik gösterimi, b)modeli, c)döküm hali.....	61
Şekil 4.2.	a) Kalıplama aşamasından kum kalıp örneği, b) Kalıplanmış kum kalıp örneği.....	62
Şekil 4.3.	Metalografik parlatma cihazı.....	66
Şekil 4.4.	Optik mikroskop görüntüsü.....	68
Şekil 4.5.	SEM cihazı.....	69
Şekil 4.6.	Sertlik test cihazı.....	70
Şekil 4.7.	Darbe test cihazı.....	71
Şekil 4.8.	Darbe test numunelerinin a) üstten, b) yandan, c) şematik gösterimi.....	72
Şekil 5.1.	2mm kalınlığındaki Vaxon aşılama ajanı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100).....	73
Şekil 5.2.	3mm kalınlığındaki Vaxon aşılama ajanı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100).....	73
Şekil 5.3.	6mm kalınlığındaki Vaxon aşılama ajanı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100).....	74
Şekil 5.4.	12mm kalınlığındaki Vaxon aşılama ajanı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100).....	74

Şekil 5.5.	2mm kalınlığındaki Barinoc aşılama ağırlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100).....	75
Şekil 5.6.	3mm kalınlığındaki Barinoc aşılama ağırlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100).....	75
Şekil 5.7.	6mm kalınlığındaki Barinoc aşılama ağırlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı dağlanmıştır (x100).....	76
Şekil 5.8.	12mm kalınlığındaki Barinoc aşılama ağırlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100).....	76
Şekil 5.9.	2mm kalınlığındaki UltraSeed aşılama ağırlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100) .....	77
Şekil 5.10.	3mm kalınlığındaki UltraSeed aşılama ağırlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı.....	77
Şekil 5.11.	6mm kalınlığındaki UltraSeed aşılama ağırlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100).....	78
Şekil 5.12.	12mm kalınlığındaki UltraSeed aşılama ağırlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı(x100).....	78
Şekil 5.13.	Vaxon , Barinoc, Ultraseed aşılama ağırlayıcıları ile üretilmiş numunelerin mikroyapı karakterizasyonu(dağlanmamış).....	79
Şekil 5.14.	Vaxon , Barinoc, Ultraseed aşılama ağırlayıcıları ile üretilmiş numunelerin mikroyapı karakterizasyonu(dağlanmış).....	80
Şekil 5.15.	Vaxon ile aşılanmış 2mm kalınlığındaki numunenin SEM görüntüsü.....	81
Şekil 5.16.	Vaxon ile aşılanmış 2mm kalınlığındaki numunede bulunan sementitin SEM görüntüsü.....	82
Şekil 5.17.	Vaxon ile aşılanmış 3mm kalınlığındaki numunenin SEM görüntüsü.....	82
Şekil 5.18.	Barinoc ile aşılanmış 2mm kalınlığındaki numunenin SEM görüntüsü.....	83
Şekil 5.19.	Ultraseed ile aşılanmış 2mm kalınlığındaki numunenin SEM görüntüsü.....	83
Şekil 5.20.	Ultraseed ile aşılanmış 2mm kalınlığındaki numune mikroyapısında bulunan grafit küresinin SEM görüntüsü.....	84
Şekil 5.21.	Mikroyapı karakterizasyonu.....	85

Şekil 5.22.	Vaxon ile aşılınmış numunelerin ferrit, perlit ve grafit yüzdelерinin şematik olarak gösterimi.....	87
Şekil 5.23.	Barinoc ile aşılınmış numunelerin ferrit, perlit ve grafit yüzdelерinin şematik olarak gös.....	87
Şekil 5.24.	UltraSeed ile aşılınmış numunelerin ferrit, perlit ve grafit yüzdelерinin şematik olarak gösterimi.....	88
Şekil 5.25.	Vaxon,Barinoc ve UltraSeed ile aşılınmış numunelerin ortalama grafit çaplarının şematik gösterimi.....	88
Şekil 5.26.	Kalınlık değişimi ile küresayısı değişiminin şematik gösterimi.....	89
Şekil 5.27.	Kalınlık değişimi ile numunelerin sertlik değerlerinin şematik gösterimi.....	90
Şekil 5.28.	Küre sayısına bağlı olarak sertlik değerinin değişiminin şematik gösterimi.....	90
Şekil 5.29.	Vaxon,Barinoc ve UltraSeed aşılایıcılar kullanılarak üretilmiş dökümlerden alınan numunelerin darbe enerjisi değerlerinin şematik gösterimi.....	91
Şekil 5.30.	Küre sayısına bağlı olarak darbe enerjisinin değişimi.....	92

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri.....	7
Tablo 2.2.	TS 526/1977'e göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	11
Tablo 2.3.	Alman standartları (DIN 1693).....	11
Tablo 2.4.	Uluslararası ISO R 1083 standardı.....	12
Tablo 2.5.	ASTM, A 536-70 standardı.....	12
Tablo 3.1.	Alaşım cinsi ve küreselleştirme işlemi tipine göre magnezyum verimi (% olarak).....	35
Tablo 3.2.	Vorteks yöntemi işletme değerleri.....	43
Tablo 3.3.	Gruplar halinde genel aşılama malzemeleri .....	50
Tablo 3.4.	KGDD'de farklı aşılama ajanlarının etkinlikleri.....	55
Tablo 4.1.	Kullanılan sere sfero pikin kimyasal kompozisyonu.....	63
Tablo 4.2.	Kullanılan çelik hurda kimyasal kompozisyonu.....	64
Tablo 4.3.	Dökümde kullanılan küreselleştirici FeSiMg bileşiminin kimyasal kompozisyonu.....	64
Tablo 4.4.	Dökümlerde kullanılan 3 farklı aşılama ajanının kimyasal kompozisyonu.....	64
Tablo 4.5.	Döküm sonrası küresel grafitli dökme demirin kimyasal kompozisyonu.....	65
Tablo 5.1.	Vaxon aşılama ajanı kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri.....	86
Tablo 5.2.	Barinoc aşılama ajanı kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri.....	86
Tablo 5.3.	UltraSeed aşılama ajanı kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri.....	86
Tablo 5.4.	Vaxon, Barinoc ve UltraSeed ile aşılama yapılmış döküm numunelerinin sertlik değerleri (BSD) .....	89

## ÖZET

Anahtar Kelimeler: Düktil Demir, Küresel Grafitli Dökme Demir, Aşılama, Mikroyapı, Grafit Karakterizasyonu

Düktil demirlerin (Küresel grafitli dökme demir) uygulamaları farklı mekanik özellikleri ile geniş bir alana yayılmıştır. Kolay üretimi ve nispeten düşük maliyetinden dolayı giderek kullanım alanı artmaktadır. Ancak günümüzde giderek ince kesitli fakat yüksek mukavemetli dökümler tercih edilmektedir. Kullanılan demirin azaltılması malzeme tüketimi ve üretim için gereken enerji miktarının azalmasını sağlamaktadır. Bu açıdan bakılırsa yapılan çalışmalar günümüzde kendini iyice hissettiren küresel ısınmaya karşı olumlu sonuçlar verebilir.

Küresel grafitli dökme demirlerin aşılama, malzemedeki istenilen özelliklerin elde edilmesinde çok önemli bir yer tutar. Aşılama için kullanılan aşılama türü, miktarı, boyutu gibi değişkenler aşılama verimini doğrudan etkiler.

Bu çalışmada, küresel grafitli dökme demirlerin çeşitli karakteristik özelliklerinin (ferrit, perlit, grafit, sementit, ortalama grafit çapı, küre sayısı,  $\gamma$ -hale kalınlığı, sertlik, darbe enerjisi) aşılama ile nasıl değiştiği deneylerle verilmiştir. Araştırmada, küresel grafitli dökme demirlerin aşılama sırasında kullanılan farklı bileşenlerin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir.

Çalışmalar ince cidarlı dökümlerde, Ba elementi içeren aşılama türünün daha fazla küreleşmeyi teşvik ettiğini göstermiştir. Artan kesit kalınlığı ile küre sayısının azaldığı, küre çapının arttığı, darbe direncinin arttığı, hale kalınlığının arttığı, sertliğin düştüğü görülmüştür. Ayrıca artan küre sayısı ile darbe direncinin azaldığı, küreselleşme oranının ise arttığı tespit edilmiştir.

# **INNOCLATION EFFECTS MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES IN DUCTILE IRONS**

## **SUMMARY**

Keywords: Ductile Iron, Spheroidal Graphite Cast Iron, Inoculation, Microstructure, Graphite Characterization

Applications of Ductile iron (Spheroidal graphite cast iron) have increased steadily in recent years due to its different mechanical properties. Relatively low-cost production and the capability of producing a range of microstructures increase the use of spheroidal graphite cast iron. Today increased demand for strong thin-wall spheroidal graphite cast iron castings to provide components with high strength to weight ratios. Reducing the weight of spheroidal graphite cast iron castings by producing thin wall parts is an important method for saving energy. In this side, these developments can help the prevedion of global warming.

Inoculation is important in spheroidal graphite cast iron production to obtain good mechanical and microstructure properties. In inoculation, inoclat type, inoclat quantity and dimension determine the inoclation performance.

In this study, the characteristic features of spheroidal graphite cast iron (ferrite, pearlite, graphite and cementite percent, average graphite diameter, nodule count,  $\gamma$ -halo thickness, hardness, impact energy) are searched. How various variables affect the occurrence explained. The effects of various inoclants in microstructure and mechanical properties were searched.

In this investigation, it was observed that the inoclat which has Ba element show best performans for nodularity. When the graphite number increase impact energy decrease and in the same time nodularity is increases. With increasing casting thickness, both number and diameter of spheros increase. In addition, halo thickness and hardness decrease.

## BÖLÜM 1. GİRİŞ

Düktil demir (Küresel grafitli dökme demir) ilk defa 1948 yılında Amerikan Foundry Society'nin metal dünyasına üstün özelliklerde yeni bir demir esaslı döküm malzemesi olarak tanıtılmasıyla duyurulmuştur. 2. Dünya savaşına ABD'nin katılmasıyla kritik bazı metallerin ikmalinde problemlerin doğması, krom elementinin etkisine sahip aşınmaya dayanıklı beyaz dökme demirin krom yerine kullanılabilir bir elementle üretiminin gerçekleştirilebilmesi büyük bir rekabet yaratmıştı. International Nickel Company karbür yapıcı etkisi olan elementler üzerine çalışmalarına başlamış ve tüm akla gelen elementlerin etkileri araştırılmıştı. Nisan 1943'de %3,2 C, %1,75 Si ve %1 Ni içeren GG20 dökme demir ile %3,5 C, %2,25 Si, %2 Ni GG14 dökme demiri 80-20 Ni-Mg alaşımı kalıcı Mg miktarı %0,15 %0,3 - %0,4 - %0,5 olacak şekilde verilmişti. Bu işlemten sonra potada %0,5 FeSi 85-15 alaşımı ile aşılama yapılarak deney çubukları dökülmüştü. Çekme dayanımı deney sonuçları gri dökme demirin özelliklerinin daha yüksek değerlere ulaştığını göstermekle kalmayıp yeni bir malzemenin üretilmiş olduğunu ortaya koydu [1].

Yapılan mikroskobik çalışmalar grafitin lamel şeklinde olmayıp küresel bir yapıda olduğunu ortaya koydu. Böylece yüksek karbon değerine sahip dokusunda küresel grafitlerin olduğu, mekanik özellikler yönünden çelik dökümüne özdeş, üretim yöntemi yönünden dökme demir karakteri taşıyan yeni bir malzeme endüstriye kazandırılmış oldu. Düşük ergime derecesi, iyi akışkanlık, dökülebilme, iyi işlenebilme özelliği, iyi kesme mukavemeti gibi gri dökme demirin özellikleri ile yüksek mukavemet, tokluk, süneklik, sıcak işlenebilme ve sertleştirme gibi çeliğin üstün özelliklerini bir arada bulunduran yeni bir grup ortaya çıkmış oldu.



Ülkemizde profesyonel anlamda özel sektör tarafından büyük döküm fabrikaları 70'li yıllarda kurulmaya başlamıştır. Öncelikle yaş kum kalıba döküm teknolojisinin öğrenilmesi, tamamiyle özgün ürün üreten yani döküm bilgisini kendileri oluşturan döküm fabrikalarının sayısı zamanla artış göstermiştir. 90'lı yıllardaki ekonomik krizler döküm sektörünün dışarıya açılma yılları olmuş, bu da beraberinde yeni üretim teknolojilerinin yanında yeni kontrol teknolojilerine duyulan ihtiyaçları da beraberinde getirmiştir.

21. yüzyıla girildiğinde sınırların kalkması, dünya ticaretinin globalleşmesi, döküm sektörünü ileri teknoloji kontrol tekniklerini kullanarak yeni ürünlerin hızlı bir şekilde ve bir defada seri üretime sokmaya mecbur kılmıştır. Özellikle 2000'li yıllarda otomotiv sektöründe kıran kırana bir rekabet başlamıştır. Firmalar çelikten imal ettikleri parçaları küresel grafitli dökme demirden üretmek için çalışmalar yapmaya başlamışlardır. Döküm parçaların ağırlıklarını azaltma çalışmaları hızlanmıştır. Daha hafif, dolayısıyla daha az yakıt kullanan araçlar üretmek temel amaç olmuştur. Bu sebeple otomotiv, iş makineleri ve traktör endüstrilerinde çok hızlı bir şekilde daha ince et payına sahip döküm parça ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Çeliğin yaptığı işi yapabilen döküm parça tasarımları yapılmıştır. Ürünlerin devreye girme süreleri kısalmıştır.

Bu çalışmada düktil demir dökümü ile ilgili literatür araştırması yapılmıştır. Özellikle ince kesitli dökümlerde yapı özellik ilişkisi araştırılmıştır. Deney, aynı bileşime sahip şarjın küleştirme işleminden sonra 3 ayrı aşılایıcı ile muamele edilmesini kapsamaktadır. Si-Al-Ca, Si-Al-Ca-Ba, Si-Al-Ca-Ce bileşimine sahip aşılایıcıların relatif fayda değerleri ve etkinlikleri incelenmiştir.

## **BÖLÜM 2. DÜKTİL DEMİR**

### **2.1. Düktil Demirlerin Genel Özellikleri**

#### **2.1.1. Aşınma direnci**

Düktil demirlerin (Küresel grafitli dökme demir) en önemli özelliklerinden biri aşınma dirençlerinin iyi olmasıdır. Birçok endüstriyel uygulamalar, bu malzemenin aşınma direncinin gri dökme demirinkine eşit olduğunu göstermiştir. Bu özelliğinden dolayı, küresel grafitli dökme demirin endüstriyel uygulamaları, krankmilleri, hadde merdaneleri, delgi kalıpları, dişliler, kesici takımlar olarak sayılabilir.

Çelikle kıyaslandığında, küresel grafitli dökme demirin aşınma direnci, aynı sertlik değeri için, çeliğe göre önemli derece üstün gelmektedir. Grafitin yağlama özelliği sayesinde yetersiz yağlama şartlarında bile olumlu sonuçlar vermektedir.

#### **2.1.2. Mukavemet**

Küresel grafitli dökme demirin mukavemeti grafit dışındaki matris yapısına bağlıdır. Farklı cins küresel grafitli dökme demirler, normal gri dökme demirlere kıyasla 3-5 kez daha fazla dayanıma sahiptir. Bununla ilgili endüstriyel uygulama olarak kamyon kampanaları verilebilir. Ferritik küresel grafitli dökme demir, ferritik temper dökme ile kıyaslandığında(eşdeğer süneklik ve darbe dayanımı için) küresel grafitli dökme demir %50 oranında daha yüksek mukavemete sahiptir. Aynı kıyaslama perlitik

temper dökme demir için de geçerlidir. Bu kıyaslama çelik için yapıldığında, aynı sertlik değeri için çeliğin maksimum çekme dayanımı %15 daha fazla bulunurken, küresel grafitli dökme demirin akma dayanımı bir miktar fazla olduğu tespit edilmiştir [2].

### **2.1.3. Süneklik**

Süneklik genellikle test numunelerinin gerilim altında uzatılması ve boyun oluşturacak şekilde koparılması ile yapılmaktadır. Grafitik demirler boyun oluşturarak kopmadıklarından , uzama ve kesit daralması kısmen çeliğinkinden düşük olmaktadır.

Lamel grafitli dökme demirde süneklilik yoktur. Matrisin sünekliliği bulunmasına rağmen, grafit lamelleri bu sünek matrisin devamlılığını bozmaktadır.

Temper dökme demirler yaklaşık %18'e kadar uzama gösterebilirler, perlitik temper dökme ise bu değer %6-8 arasındadır.

Küresel grafitli dökme demir, temper dökme demire göre daha iyi süneklilik ve dayanım kombinasyonuna sahip olduğundan, daha tok bir malzemedir.

### **2.1.4. Dökülebilirlik**

Düşük döküm sıcaklığı ve yüksek derecede akıcılığın birarada bulunması, çok karmaşık parçaların dökülebilmesine imkan vermektedir.

Küresel grafitli dökme demir, yüksek karbonlu gri dökme demire kıyasla yüksek döküm kalitesine sahiptir. Birçok döküm parça çelik döküm için dökülemeyecek kadar karmaşık ve gri dökme demirden daha üstün özelliklerin aranması durumunda, küresel grafitli dökme demirin kesit hassasiyeti kısmen düşük olup, ince ve kalın kesitler arasındaki yapısal farklılıklar aşırı derecede olmamaktadır.

### **2.1.5. Darbe direnci**

Küresel grafitli dökme demirde maksimum darbe direnci, tamamen ferritik cins ile elde edilmektedir. Çentik darbe deneyinde yaklaşık 20 Joule değeri bulunabilmektedir. Bu da %0.4 karbonlu normaleştirilmiş, temperlenmiş çeliğe ve eşdeğer dökme demire karşı mukayese edilebilir niteliktedir.

Küresel grafitli dökme demir, titreşim söndürme özelliğinin arandığı, aşırı derecede düşük sıcaklıkların önemli olduğu yerlerde birçok uygulama alanları bulmuştur [2].

### **2.1.6. Korozyon direnci**

Dökme demirlerin korozyon direnci çeliğe göre yüksektir. Küresel grafitli dökme demirin korozyon direncinin, gri dökme demire kıyasla yüksek olması nedeniyle, yüksek basınç uygulanan ve korozyon direnci aranan yerlerde tercih edilmektedir.

Küresel grafitli dökme demir, yüksek sıcaklıklarda genişleme ve oksidasyon direnci yönünden üstünlükler arz etmektedir. Fırın kapıları, ızgaralar, döküm olukları uygulamalarında, gri dökme demire kıyasla 10 kat daha iyi dayanım göstermektedir. Ayrıca yüksek silisyum küresel grafitli dökme demirin oksidasyon direncini arttırmaktadır [3].

### 2.1.7. Basınca dayanım

Basınç dayanımının önemli olduğu yerlerde küresel grafitli dökme demirler çoğunlukla ideal bir malzeme olmaktadır. Yüksek mukavemet ve dökülebilirlik özelliği ile birlikte, basınca dayanım özelliği birçok alanda kullanımının artmasına neden olmuştur.

Bunların dışında çeliğe göre üstün özellikleri arasında kolay işlenebilirlik ve daha yüksek ısı iletkenliği de sayılabilir.

## 2.2. Düktil Demirlerin Mekanik Özellikleri

Düktil demir (Küresel Grafitli Dökme Demir) genellikle döküm halleri ile kullanılırlar ve bunlar çoğunlukla perlitik-ferritik yapıdadır. Ferritik matris şarj malzemesi olarak pik dökme demir kullanıldığında döküm şartlarına bağlı olarak elde edilir. Genellikle ferritik matris ısıl işlem ile üretilmektedir. Isıl işlemlerle yüksek mukavemetli matrisler elde edileceği gibi, sünekliğin ve dayanımın artırılması da mümkündür. Küresel grafitli dökme demirin işlenebilirliği, eşdeğer sertlikteki gri dökme demirden ve eşdeğer mukavemete sahip çelikten daha iyidir. Ayrıca korozif ortamlarda aşınma direnci gri dökme demire eş ve genellikle çelikten daha iyidir. Küresel grafitli dökme demirde kesit boyutu, katılaşmada soğuma hızını etkilemesi sonucu bileşime de bağlı olarak, ferrit ve perlitin sertliği ve yapıdaki perlitin oranı ve tane büyüklüğü ile değişmektedir. Yüksek mukavemet, sertlik ve düşük süneklik ince perlitik veya beyitlik matris ile elde edilir. Buna karşılık mukavemet ve sertlikteki azalma ile beraber yüksek süneklik, matrisin tamamen ferritik olması ile mümkündür. Tablo 2.1. de ferritik ve perlitik mikroyapıya sahip küresel grafitli dökme demirlerin genel mekanik özellikleri verilmiştir.

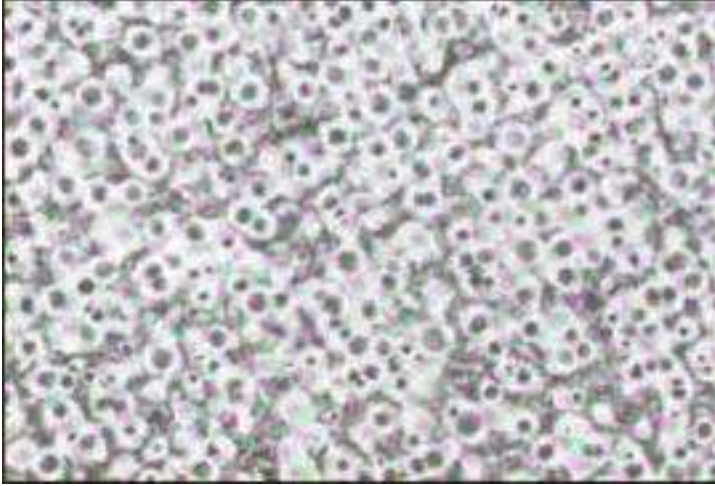
Tablo 2.1. Küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri [4]

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

Ani sıcaklık değişimlerine karşı küresel grafitli dökme demirlerin gösterdiği direnç gri dökme demirden ve çoğu çelikten daha fazladır. Örneğin 760 °C den soğuk suya daldırılan ince bir çelik parça muhtemelen çarpılacak, gri dökme demir ise çatlayacaktır. Aynı şartlarda küresel grafitli dökme demir parçasının bu sıcaklık değişimine rağmen, şekli bozulmadan karşılayabildiği bilinmektedir. Çeliklerde olduğu gibi küresel grafitli dökme demirlerin darbe direnci de sıcaklığa bağlı olup, yapı ve bileşim tarafından önemli derecede etkilenmektedir. Matris yapısı tamamen ferritik olan küresel grafitli dökme demirler en yüksek tokluğa sahip olanlardır. Tokluk derecesi, matriste artan perlit yüzdesi ile azalmaktadır [5].

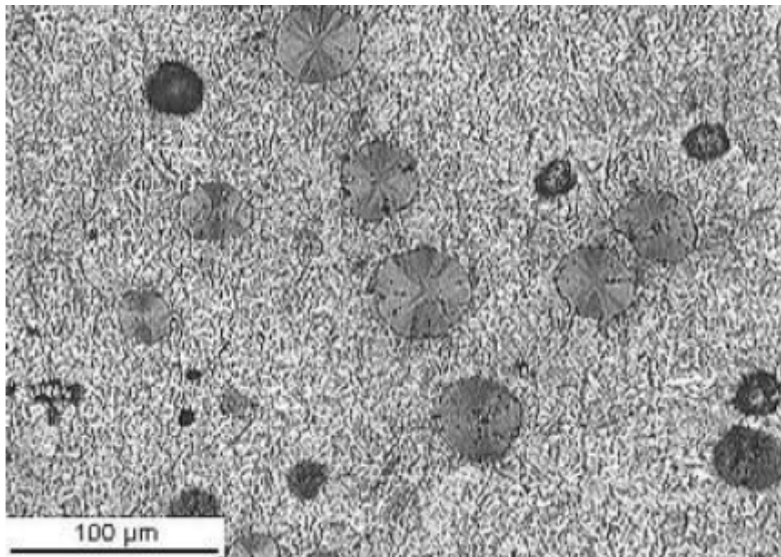
Ostenitik dökme demirler hariç küresel grafitli dökme demirler 5 grupta toplanırlar.

1. Grup yüksek mukavemetli küresel grafitli dökme demirlerdir. Matris yapısı perlittir. Alaşım elementi ilavesi ile üretilirler. Minimum akma mukavemetleri 500 MPa' dır. Şekil 2.1. de perlitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 2.1. Perlitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. Döküm hali ile kullanılmaktadır. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır (x100) [7]

2. Grup çok yüksek mukavemetli küresel grafitli dökme demirlerdir. Matris beyazıtik veya temperlenmiş martenzittir. Alaşım elementi ilavesi ile veya ısıl işleme üretilirler. Minimum akma mukavemetleri 640 MPa' dır. Şekil 2.2. martenzitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı görülmektedir.



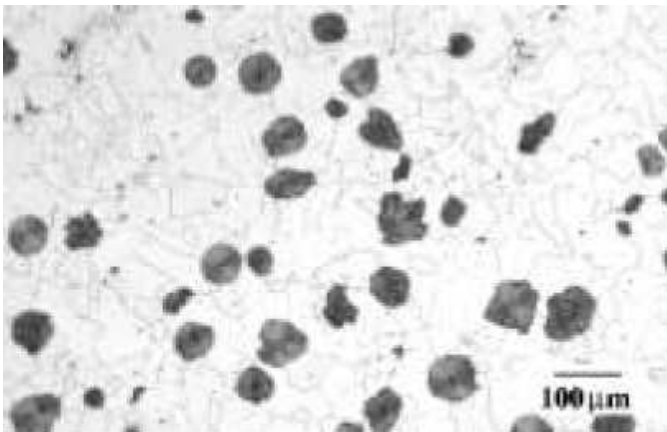
Şekil 2.2. Martenzitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. Temperleme ısıl işlemi görmüş ve %3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştır (x100) [6]

3. Grup Hakim yapısı perlit olan ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demirlerdir. Genelde döküm halinde kullanılırlar. Minimum akma mukavemeti 420 MPa'dır. Şekil 2.3. Ferritik-perlitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 2.3. Ferritik-Perlitik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştıır (x100) [8]

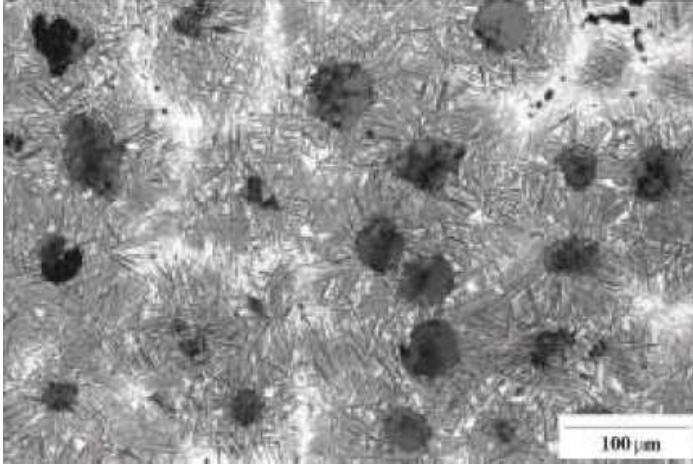
4. Grup Yumuşak küresel grafitli dökme demirlerdir. Matris tamamen ferrittir, tavlama ısıl işlemleri ile üretilirler. Minimum akma mukavemetleri 250 MPa'dır. Minimum uzama % 15 dir. Şekil 2.4 Ferritik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 2.4. Ferritik küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmıştıır [7]



5. Grup Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerdir. Ostemperleme ısı işlemi ile üretilirler. 1500 MPa çekme mukavemeti, 1000 MPa akma mukavemeti, % 7 min uzama gösterirler. Şekil 2.5 ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir mikroyapısı görülmektedir.



Şekil 2.5. Ostemperlenmiş küresel grafitli dökme demir mikroyapısı. % 3 Nital çözeltisi ile dağlanmış (x100) [7]

### 2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Küresel grafitli dökme demirlerin Türk Standartları Enstitüsüne (TSE) göre sınıflandırılması, Tablo 2.2 'de verilmektedir. DDK işareti "Dökme Demir Küresel Grafitli" anlamına gelmektedir ve DDK işaretini izleyen sayılar minimum çekme mukavemetini  $\text{kg/mm}^2$  olarak göstermektedir.

Tablo 2.2. TS 526/1977'e göre küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması

Sınıf	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (BSD)	Mikroyapı
<b>DDK 40</b>	400	280	12	140-201	daha çok ferrit
<b>DDK 50</b>	500	350	7	170-241	ferrit-perlit
<b>DDK 60</b>	600	400	3	192-269	perlit-ferrit
<b>DDK 70</b>	700	450	2	229-302	daha çok perlit
<b>DDK 80</b>	800	500	2	248-352	perlitik
<b>DDK 35,3</b>	350	220	22	---	ferritik
<b>DDK 40,3</b>	400	240	18	---	ferritik

Alman DIN standardında küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması TSE sınıflandırılmasına benzemekte ancak, işareti GGG olarak, Tablo 2.3'de verilmektedir.

Tablo 2.3. Alman standartları (DIN 1693)

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

Uluslararası ISO R 1083 standardında ise minimum çekme mukavemeti ve minimum % uzamayı gösteren rakamlar sınıflandırma işareti olarak kullanılmaktadır, Tablo 2.4'de verilmiştir.

Tablo 2.4. Uluslararası ISO R 1083 standardı

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

ASTM, A-536-70 standardında ise minimum çekme mukavemeti, minimum akma gerilmesi, MPa olarak ve minimum % uzamayı gösteren rakamlar sınıflandırma, işareti olarak kullanılır. Tablo 2.5’de gösterilmektedir.

Tablo 2.5. ASTM, A 536-70 standardı

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

#### 2.4. Düktil (Küresel Grafitli) Demirin Katılaşması

Küresel grafitli dökme demir karbon ve silisyum içeriğinin sırasıyla %3,5-3,9 ve %1,8-2,8’ e değişen üçlü Fe-C-Si alaşımıdır. Bileşimin seçimi döküm kesit ölçüsü ve hedeflenen mekanik özellikler tarafından belirtilir. C ve Si içeriğine bağlılığına rağmen küre oluşumu sonradan kontrol edilemez fakat alaşımın saflık seviyesi ve küreleştirici malzemelerinin ilavesinin bir sonucudur. Bununla birlikte metalik fazda

gömülen grafitin miktarı (i) C ve Si içeriği ve (ii) soğuma parametreleriyle kontrol edilir. Denge şartları altında C ve Si etkisi üçlü faz diyagramından çıkarılabilir.

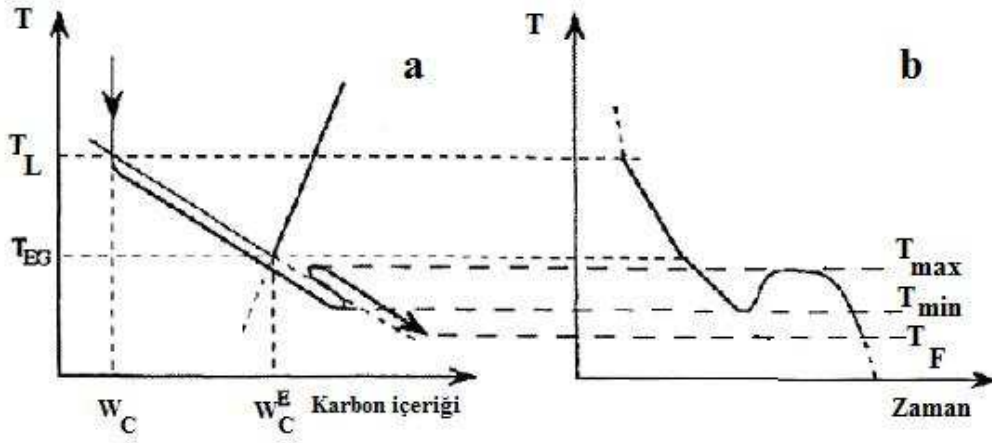
Küresel grafitli dökme demir lamel grafitli ile kıyaslandığında aynı karbon eşdeğerliği için, ötektik küresel grafitin katılaşmaya başlama sıcaklığı, lamel grafitliden daha yüksek olmaktadır. Östenit-küresel grafit ötektik reaksiyonu, sıvı içinde uygun yerlerde grafit çekirdeklerinin oluşumu ile başlar. Sıvı içinde grafit çekirdeklenmesi aşılmalı ilavesi ile teşvik edilmektedir. Sıvı içinde çözünmüş magnezyum bulunuyorsa, bu durumda grafitin lamel halde büyümesi engellenecek ve grafit küresel şekilde oluşacaktır.

Sıvı ile temas halinde bulunan ve içerisinde grafit büyümesi ile gerçekleşen katılaşmaya, neotektik katılaşma denilmektedir. Bu östenitler içerisinde karbon difüzyonu yoluyla, grafit küresinin büyüdüğü hücreler olarak düşünülebilir. Katılaşma olayı, gri dökme demirin katılaşma olayından daha yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu neotektik katılaşma aralığı 50 C 'ye kadar çıkabilmekte olup, sıvının bulunduğu sıcaklık aralığı daha geniş olmaktadır.

Neotektik büyümenin başlamasıyla, başka grafit çekirdeklenmesi olmayacağından, küre sayısı katılaşma başlangıcında belirlenmiş olacaktır. Katının daha sonraki soğuma olayı, ötektik sıcaklığına kadar mevcut küreler üzerine karbon çökmesi şeklinde devam eder [9].

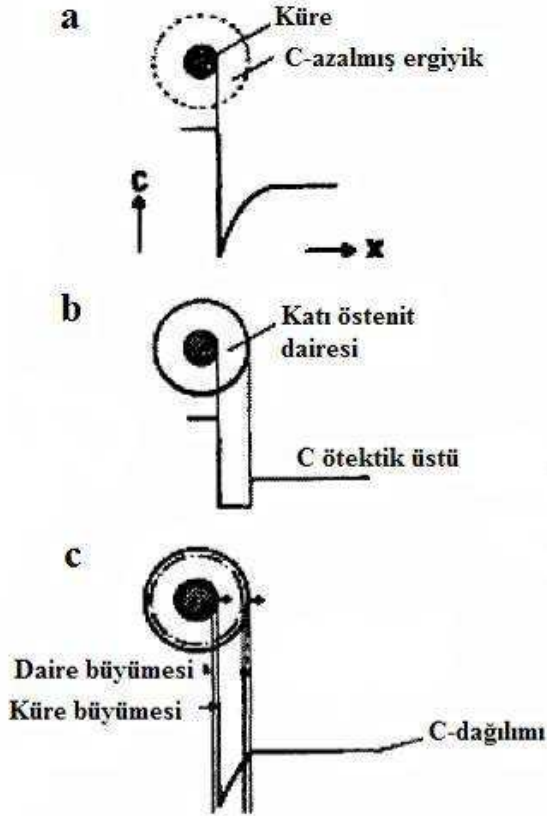
Alaşımın türü bileşimin ötektik hattına göre konumuna göre ötektik-altı, ötektik ve ötektik-üstü olarak temsil edilir. Ötektik altı alaşım durumunda katılaşma sırası Şekil 2.6' da gösterildiği gibi devam eder. Demir ergiyiğinden östenitin çekirdeklenmesi ve büyümesi için önemli engel olmadığından, östenit dendritleri sıcaklık ortalama likidüs sıcaklığı  $^{\circ}\text{TL}$  nin altına düştüğü zaman görünür. Soğuma esnasında,  $\gamma$

dendritleri büyür ve sıvı bileşimi ostenit/likidüs hattına paralel olarak artar. (Şekil 2.6a) [10].



Şekil 2.6. Ötektik-altı küresel grafitli dökme demir katılaşmasının sırasının şematik gösterimi, (a) Ostenitin eş düzlem kesitinde katılaşmanın yolu, (b) soğuma eğrisi [10]

Ötektik sıcaklığı  $T_{EG}$ ' ye ulaşıldığında grafitin çekirdeklenmesi başlar. Grafit parçacıkları bir ostenit kabuğu tarafından çevrelenmeden önce kısa bir süre için sıvıdan serbest olarak büyümektedir. Ötektik kürelerin daha fazla büyümesi ostenit kabuklarının içinden sıvıdan grafit kürelerine doğru karbon difüzyonu ile kontrol edilir (Şekil 2.7).



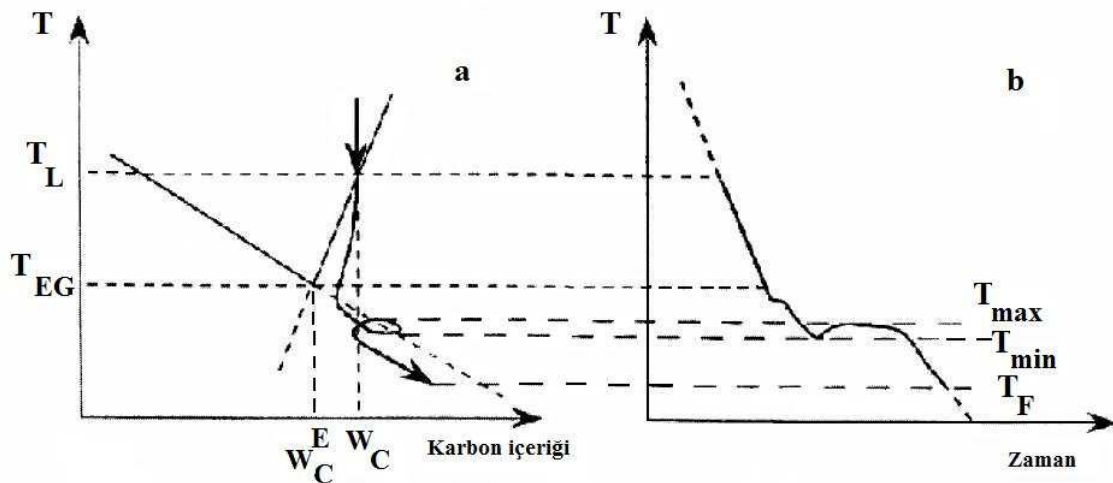
Şekil 2.7. Katı bir daire içinde kürenin eşitsiz büyümesi ve bir düzgün arayüzeyle dairenin büyümesi (a) ötektik öncesi faz katılaşması: sıvı ile temastaki kürenin büyümesi (b) ötektik katılaşma: daire çevrelemesi, (c) katı daire içinde kürenin büyümesi

Bunun sonucu, katılaşma olayı gri dökme demirinkine nazaran daha yavaş olmakta ve neo ötektik katılaşma aralığı  $50^{\circ}\text{C}$  kadar olabilmektedir. Küresel grafitli dökme demirde sıvı metal, gri dökme demire nazaran daha geniş bir sıcaklık aralığında ve daha düşük sıcaklıklarda mevcut olabilmektedir [36].

Bu büyüme prosesi yavaştır ve katılaşan metal, kalan sıvı\grfit likidüsüne göre çok aşırı doyurulmuş olduğu, TEG altında ostenit likidüs hattının ekstrapolasyonu boyunca ve böylece ostenit dendritleri daha fazla geliştiği şartta soğumaya devam eder. TEG altında  $T_{\text{min}}$  sıcaklığında ötektik kürelerinin sayısı ve onların büyümesi için itici güç bütün ötektik reaksiyonun daha hızlı ilerlemesi için yeterince yüksektir. Bu ötektik reaksiyonun etkili başlangıcıdır. O bir maksimum sıcaklığa ( $T_{\text{max}}$ ) kadar

bir parlama ya neden olmak için yeterli şiddettedir. Bu ısıl analiz esnasında ötektik durmaya öncülük eder (Şekil 2.6b). Katılaşma genellikle daha düşük TE sıcaklığında tamamlanır.

Ötektik-üstü bir demirin katılaşma sırası Şekil 2.8' de gösterilir. Ötektik-üstü katılaşma ergiyikten grafit parçacıklarının çekirdeklenmesi ve serbest büyümesi ile başlar. Bu iki proses zordur ve dengeden biraz sapma ile ilerler. Bundan dolayı, grafitin ötektik öncesi çökmesi ile ilgili katılaşma yolu grafit\likidüs hattının biraz aşağısında yerleştirilir (Şekil 2.8a). 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 gerçekten küçüktür. Katılaşma yolu ostenit likidüsünün yarı kararlı ekstrapolasyonunu kestiğinde ostenit ergiyikten çekirdeklenebilmektedir. Ötektik-altı dökme demirde olduğu gibi katılaşma yolunun östenit\likidüsüne paralel olarak yapıldığı 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 2.8b) [9].



Şekil 2.8. Ötektik-üstü küresel grafitli dökme demirin katılaşma sırasının şematik gösterimi, (a) Grafitin eş düzlem kesitinde katılaşmanın yolu, (b) soğuma eğrisi[9, 10]

## 2.5. Düktil Demir Bileşimindeki Ana Elementler ve Etkileri

Düktil demirin (Küresel grafitli dökme demir) doku ve özelliklerine periyodik sistemin bütün elementlerinin etkili olduğu söylenebilir. Pb, Bi, Sb, As, P, S gibi elementler zararlı etkilerinden dolayı bünyesinde bulunması istenmez. İyi mekanik özellikler kazandırabilmek için değişik alaşım elementleri ilave edilir. Bu alaşım elementlerinden bazıları tek başına bazıları ise başka elementlerle alaşımlandırılmış olarak sıvı dökme demire ilave edilir. Bu elementlerden en önemlileri; Ni, Mo, Cr, Mn, V, Cu olarak sıralanabilir. Bu elementler, karbürlerin dağılımı ve yüzdesini, grafit şeklini ve matris yapı ve özelliklerini etkilerler [11].

Malzeme özellikleri diğer taraftan soğuma hızına, parça et kalınlığına da bağlıdır. Tüm üretim aşamalarında, yani ham malzeme seçiminden, parçanın dereceden bozulması ve dışarı alınmasına kadar bu özellikler değişime uğrayacaktır.

### 2.5.1. Karbon

Grafit küreleri sayısı karbon yüzdesine doğrudan bağlıdır. Karbon oranındaki artış ayrıca akışkanlık ve besleme özelliklerini de iyileştirerek dökülebilirlik kabiliyetini artırır. Karbon eşdeğerinin 4,3'den büyük değerleri grafit kürelerinin oluşumu ve büyümesini teşvik eder.

### 2.5.2. Silisyum

Silisyum miktarı karbon eşdeğerini etkilediği için grafitleşme ve karbon segregasyonu üzerinde önemli rol oynar. Silisyum, karbon aktivitesini yükseltmekte ve grafitin ayrışmasını kuvvetlendirmektedir. Silisyum, ötektoid dönüşümde oluşan



ferritin oranını ve sertliğini arttırarak dökme demir mukavemetinde bir artış meydana getirmektedir. Silisyum daha çok ferrosilisyum olarak, işlem sonunda sıvı metale ilave edildiğinde grafit küreleri için çekirdekleştirici görevi görür ve grafit sayısının kontrolü açısından etkili olur [12].

### **2.5.3. Bakır**

Bakırın sıvı dökme demirdeki çözünürlüğü yaklaşık %3,5 dur. Bakırın çözünürlüğü magnezyum miktarı ile düşer. % 3 bakır değerine kadar grafit şekline hiçbir olumsuz etkisi yoktur. Bakırın varlığı, titanyum ve kalay gibi lamel grafit formu oluşturan ve mekanik özellikleri negatif yönde etkileyen elementlere karşı dökme demiri daha hassas duruma getirir. Bakır grafitleştirici bir elementtir. Bakır miktarı yükselirken yapıdaki perlit miktarı artar. Yapı tamamen perlitik olduğunda, bakır ilavesi ile mekanik özelliklerin artış oranı azalacaktır. Yüksek bakır miktarında yapı kırılmanlaşır, akma değeri artar ve çekme ile sertlik değeri düşer.

### **2.5.4. Kalay**

Perlit oluşumunu hızlandırır, fakat sementit oluşumuna etki etmez. Ferritik küresel grafitli dökme demirlerde bulunmaması gerekir. Küresel grafitli dökme demirlerde perlitin miktarı mangan, bakır ve kalay konsantrasyonunun artışıyla artmaktadır. Sertlik, çekme dayanımı ve akma sınırı kalay miktarı ile artmaktadır. Uzama değeri bakır ve kalay miktarı ile azalmaktadır.

### 2.5.5. Magnezyum

Grafitin küresel formda olması için gerekli magnezyum miktarı %0,02'den fazla olmamalıdır. Mg sıvı dökme demirdeki kükürt ve oksijeni gidermek içinde kullanılır. İhtiyaç duyulanın üzerinde magnezyum miktarı grafit şeklini bozucu ve küre sayısını azaltıcı etkiye sahiptir [6].

### 2.5.6. Nikel

Küresel grafitli dökme demirlerde dayanımı arttırır. Malzemenin sertleşme özelliğini arttıracığından ısıtılacak dökümlerde ilave edilir. Bu tür alaşımlar Ni-Resist malzemelerin temelini oluştururlar.

### 2.5.7. Krom

En kuvvetli karbür dengeleyici elementlerden birisidir. Ferritik küresel grafitli dökme demir üretiminde %0,03'un altında olmalıdır. Perlitik türlerin üretiminde ise diğer karbür dengeleyici elementlerin oranına bağlı olarak yaklaşık % 0,06'ya kadar bulunabilir.

### 2.5.8. Fosfor

Küresel grafitli dökme demirde fosfor "steadit" olarak bilinen çok kırılabilir bileşiğin oluşumuna neden olur. Tokluğu, sünekliği, kaynak edilebilirliği ve plastik şekil değiştirmeyi kötü yönde etkiler. Çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve sertlik fosforun artmasıyla artış gösterirken uzama değerinde düşüş gözlenir.

### 2.5.9. Kükürt

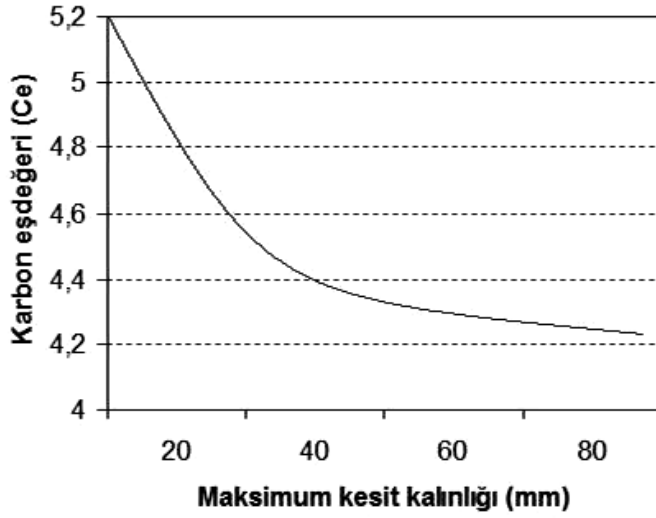
Kükürt miktarının artması küreleştirici amaçlı ilave edilen FeSiMg miktarını arttırıcı etki yapar. Mn/S oranı ferritleşme eğilimini etkiler ve MnS grafit oluşumunda çekirdek görevi görür.

### 2.5.10. Mangan

Kuvvetli bir perlit oluşturan alaşım elementidir. Mangan, kükürtün kötü etkisini dengeleyebilmek için kullanılır. Eğer yapıda mangan bulunmaz ise tane sınırında istenmeyen demir-sülfür ötektiği oluşur ve bu ötektik yaklaşık 985 °C de ergir. Kükürt miktarı mangan ile dengelenirse mangan sülfür tane içerisinde dağılmış halde bulunur. Mangan segregasyonu soğuma hızı ne kadar yavaş ise o kadar çok olur.

## 2.6. Karbon Eşdeğerliği

Basıçlı boru endüstrisi dışında küresel grafitli dökme demir üretimi ötektik-üstü: karbon eşdeğerliğindeki ( % 4,3 – 4,7 arasında) malzemelerle yapılmakta ve bunun sonucunda grafit sıvı içinde oluşacak veya daha ileri giderek yüzme eğilimi gösterecektir. Bu eğilim karbon eşdeğerliğinin artmasıyla artmaktadır. Ancak hızlı soğuma nedeniyle, ince kesitli döküm parçalarda karbon eşdeğerliği yüksek olmasına rağmen, karbon yüzmesi problemi ile karşılaşılabilir [13]. Şekil 2.9'da kesit kalınlığına göre karbon eşdeğerliğindeki değişim verilmiştir.

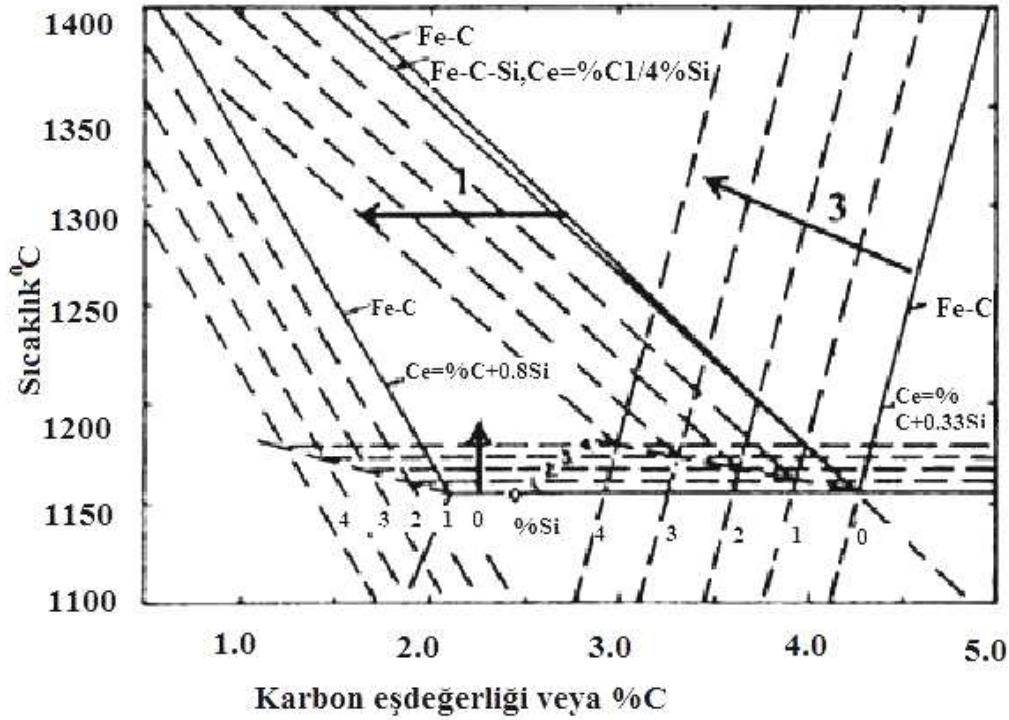


Şekil 2.9. Kesit kalınlığına göre karbon eşdeğerliğindeki değişim[37]

C - eşdeğeri formülü ile Si ve P' un etkisi karbon cinsinden yazılabilir. Bu yolla diyagram Fe–C ikili denge diyagramı şeklini alır. Si ve P ötektik bileşimindeki C seviyesini düşürürler, diğer bir deyişle ötektik noktayı sola kaydırır. Karbon eşdeğeri (CE) formülü aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$CE = \%C + (\%Si + \%P)/3$$

Son yıllarda bazı araştırmacılar karbon eşdeğerini farklı formülle hesaplamaktadırlar. Sıvılaştırma eşdeğeri formülünü (SEV) , Karbon eşdeğeri (CE) formülü ile aynı mütalaa etmektedirler. Bunlara göre CE formülü  $CE = \% C + \% Si / 4 + \% P / 2$  dir.



Şekil 2.10. Fe-C-Si diyagramının %1,2,3,4 silisyuma göre değişimi [14]

## 2.7. İndüksiyon Ocakları ve Ergitme

İndüksiyonla ergitme sanatı, metalik iş parçalarını belirtilen sıcaklık ve sürelerde fırın ortamında tutmaktır. Denetim kolaylığı, yüksek verimliliği, madde kayıplarının son derece düşük olması tam otomatik üretime uygunluğu ve çevre kirliliği yaratmaması gibi nedenlerden dolayı indüksiyonla ergitme ve sertleştirme günümüzde giderek yaygın bir kullanım kazanmıştır. Yüzey ısıtma ve magnetik olmayan kısımlar için yüksek frekans gücüne ihtiyaç vardır. Bundan dolayı, güç kaynağı radyo frekans bölgesinde enaz birkaç kW'lık güç sağlayabilmek zorundadır. İndüksiyonla ergitmede, malzemenin cins ve ebadına, ısıl işlemlerin amacına göre, 50 Hz' den 2 MHz' e kadar frekans değerlerinde alternatif gerilim veya güç kaynaklarına ihtiyaç vardır. Normal olarak, AC şebeke, frekans dönüştürücü, motor generatör grubu , vakum lambası vasıtası ile elde edilir. Bu güç kaynaklarının çok büyük avantajlara sahip olan statik inverterlerle sağlanmasına çalışılmaktadır [35].

Yarıiletken güç elemanları ile gerçekleştirilen statik inverterler ile erişilebilen güç ve frekans değerleri, rezonans devreli inverterler ve güç elemanlarındaki gelişmeler sayesinde, sürekli ve hızlı bir şekilde artmış ve günümüzde MHz mertebesindeki frekanslara yaklaşmıştır. Bu amaçla 10 kHz' lere kadar, akım kaynaklı ve yük komütasyonlu olarak bilinen paralel rezonans devreli tristörlü inverterler 20 yıl kadar önce kullanılmaya başlanmıştır. Kapı sönmümlü tristör GTO(Gate Turn-Off) ile 20 kHz' lere, izole kapılı bipolar transistör IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) ile 100kHz'lere ve MOSFET(Metal Okside Schottky Field Effect Transistor) ile birkaç yüz kHz'lere erişilmiştir.

Elektrik enerjisinin diğer enerji türlerine kolay çevrilmesi, üretimin kolay olması özellikle de tüketiminde diğer fosil kaynaklı yakıtlar gibi çevreye zarar vermemesi, kontrollü bir düzen olması ve çok çeşitli kaynaklardan elde edilebilmesi üstünlükleridir.

## **2.8. İndüksiyon Ocaklarının Tarihçesi**

İndüksiyonla ısıtmanın dayandığı temel prensip, teorik düzeyde Faraday (1791 - 1867) zamanında biliniyordu. Ancak bu devrede indüksiyonla ısıtma için yeterli güç kaynaklarının bulunmamış olması nedeniyle teorik prensiplerin uygulamaya geçmesi mümkün olmadı.

İndüksiyon ocakları ile ilgili ilk patent 1897'de İngiltere'de Ferranti tarafından alındı. Bulunan bu ocak tipine, metal bobinin dışına konduğu için " halka" veya "nüveli" ocak adı verildi. Ticari ilk uygulama ise 1900 yılında İsveç'te Gysimge'de Kjellin tarafından kurulan 80 kg kapasite ve 73 kW güçlü çelik ergitme ocağı oldu.

Daha sonraları 1906'da Essen (Almanya)'da Röchling Roden hauser ocağı geliştirdi . Bu ocağın en önemli özelliği 750 kW' lık bir güç ve 5 Hz frekans ile çalıştırılmasıydı. Güç faktörünün daha iyi olacağı umularak bu ocakta frekans çok düşük tutulmuştur.

İndüksiyon ocaklarının bu devredeki en büyük problemi özel, pahalı ve bakım güçlükleri fazla olan jeneratörlere ihtiyaç gösteren frekans düşüklüğü olduğudur. Nitekim 1900-1910 yılları arasında metalin karbon almasını engelleyen curuf örtüsü altında çalıştırılan ilk Heroult tipi ocaklarının piyasaya çıkarılması ile bu indüksiyon ocakları bütün özelliklerini kaybederek terkedilmiştir.

1916' da Ajax Metel Company' den Dr.G.H.Clamer, Leeds and Northrup'tan elektrik enerjisi ile ısı enerjisi elde edilmesi konusunda temel prensiplerle herhangi bir yanlılığın bulunup, bulunmadığının araştırılmasını istedi. Dr. Northrup bu konudaki çalışmaları sonunda " ümit verici " olarak görünen tek yöntemin yüksek frekanslı indüklenmiş akımlarla ıstma yöntemi olduğunu belirtiyordu.

Şebeke frekansında daha yüksek bir frekans ile çalışmada karşılaşılan en büyük sorun kompanzasyon kondansatörlerinin yarattığı sorunlardır. General Electric Company' nin kağıt kondansatör üretimi ile bu sorun da çözümlenmiş ve şebeke frekansının üzerinde çalışma imkanları artmıştır.

İlk orta frekans ergitme ocağı 1927 yılında Sheffield' da Electric Furnace Company ( EFCO ) tarafından gerçekleştirilmiş, bu tarihten sonra paslanmaz çelik üretimi ve özel alaşım hazırlanmasında kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır.

Ergitme ocaklarında karıştırma özelliği dolayısıyla düzgün bir metal ve ısı dağılımı, alaşım kayıplarının azlığı, sıcaklık ve bileşim kontrolünün çok iyi olması, işlem görececek malzeme özelliklerinin sınırlı olmaması, istenildiği zaman kısa süre

içerisinde soğuktan işleme alınabilmesi hava kirliliği probleminin olmayışı indüksiyon ergitme ocakları kullanımının yaygınlaşmasında temel faktörlerdir.

İndüksiyon ocaklarının çelik ergitiminde en hızlı gelişme gösterdiği konu paslanmaz çelik üretimi ve çelik dökümhanelerindeki uygulamaları oldu. Karbon kayıp veya kazanımının bulunmaması, hurdayı seri olarak ergitebilmesi, karbon ve diğer alaşım elementlerindeki oksitlenme, kayıplarının düşüklüğü nedeni ile bu ocaklar paslanmaz çeliklerin üretiminde kolaylıkla uygulanabilmiştir.

İkinci dünya savaşında sonra otomotiv endüstrisinin gelişimi elektromagnetik indüksiyon ile ısı işlemin önemini arttırmış, daha değişik uygulamaları için çalışmalar hızlandırılmış ve yüzey sertleştirme işlemleri için radyo frekansında ısıtıcılar geliştirilmiştir. Dalma etkisi dolayısıyla kontrol edilebilir işlem derinliği, kayıpların diğer sistemlere göre az oluşu, bantta seri üretim için uygulama kolaylıkları, yüzey sertleştirme işlemlerinde elektromagnetik indüksiyon ile ısıtma yönteminin kullanımını yaygınlaştırmıştır.

İndüksiyon ısıtıcılarının ilk kullanılmaya başlandığı dönemlerde ilk yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere göre yüksek olduğu bir gerçektir. Özellikle orta frekans ısıtıcılar ( motor-alternatör grupları) hem ilk yatırım, hem de periyodik bakım giderleri açısından pahalı bir sistem oluşturmaktadır. 1966 yılından itibaren yarıiletken güç sistemlerinin geliştirilmesi ile indüksiyon ergitmede yeni bir devir başladı. Bu devrede son zamanlarda kaydedilen en önemli gelişme değişen frekanslı indüksiyon ocakları olmuştur. Yarıiletken teknolojinin gelişimi ile bu ekonomi sorunu önemini kaybetmiş ve bu alandaki çalışmaları günümüzde oldukça yaygınlaşmasını sağlamıştır [35].



## 2.9. İndüksiyon Ocaklarının Diğer Ergitme Yöntemlerine Göre Üstünlükleri

İndüksiyon ısıtmanın, metal- işleme endüstrisinde yaygın kullanımına neden olan bazı avantajları şunlardır.

1. Metalleri ısıtma süresi çok kısadır.
2. Bütün parçayı ısıtmak yerine yüzeyin istenilen bölümlerini ısıtabilme yeteneği,
3. Gücün yalnızca gerektiğinde ısıtma için kullanılması sürekli fırın sıcaklığının korumak zorunluluğunun bulunmaması,
4. Kullanıcıya fuel-oil veya gaz ateşlemeli fırınlardan daha iyi çalışma imkanı sağlanması,
5. Diğer fırınlarda kullanılan gazlar nedeni ile hava kirliliğinin bulunmaması,
6. Ergitmede alaşımların mükemmel şekilde karışması,
7. Öncelikle son yıllarda ortaya çıkan hammadde ve yakıt darboğazına karşılık, indüksiyon fırınlarında atom enerjisinden de yararlanılabilmemesi,
8. Fırın ısısının kontrolünün kolay ve hassas bir şekilde gerçekleştirilebilmesidir.

## 2.10. İndüksiyon Bobinleri

İndüksiyon ile ısıtma için gerekli değişken manyetik alan bir bobin içinden geçen alternatif akımla elde edilir. Bu akımın frekansı her uygulama için uygun bir değer alır.

## 2.11. İndüksiyon Isıtma Spektrumu

Bir iş parçasının belirli bir güç sistemi ile verimli bir şekilde ısıtılıp ısıtılmayacağı , iş parçası malzemesinin elektriksel özelliklerine , manyetik özelliklerine, büyüklüğüne,

ulaşılması istenen sıcaklık ve uygulanacak frekansa bağlıdır. Küçük çaptaki parçaların ısıtılması veya küçük çaplı ocaklarda metal ergitimi daha yüksek frekanslara ihtiyaç gösterir. Belirli bir frekansla ısıtılabilen veya ergitilebilen bir malzeme daha yüksek frekanslarda da ısıtılabilir veya ergitilebilir. Ancak belirli bir frekansta daha küçük boyutlardaki malzemelerin ısıtma veya ergitme verimi önemli ölçüde düşer.

## 2.12. İndüksiyon ile Isıtma Prensibi ve Kullanım Alanları

İndüksiyon ısıtmanın genel prensibi elektromanyetik enerjinin ısı enerjisi haline dönüştürülmesine dayanır. Değişken bir manyetik akım iletken madde üzerinde bir gerilim indükler. ( Faraday kanunu ) İndüklenen bu gerilim , iletken üzerinde kendisine karşı oluşturulan akıma karşı koyacak şekilde bir akım yaratır.

İletkende yaratılan bu eddy akımı  $I^2 \times R$  ile tanımlanan gücü ısı enerjisi halinde açığa çıkarır. Sekonderi tek sarımdan oluşmuş ideal bir trafo ele alınsın. Eğer primer sarım sayısının , sekonder sarım sayısına oranı  $n$  ve primer akımı da  $I_p$ , sekonder akımı  $I_s = n I_p$  olacaktır. Primer akımına göre hayli yüksek olan bu akım iş parçasını çevreleyen indüksiyon bobininden geçerken güçlü bir manyetik akım oluşturur. Bu akım da iş parçasına bir gerilim indükleyip akım oluşturur.

İndüksiyon ısıtmada ısıtılacak parçanın her tarafı eşit miktarda ısı almamaktadır. Yalnız ısıtılacak parça ısıyı çok iyi ileten cinsten ise, parçanın her tarafı birbirine yakın miktarda ısıtılabilir. İndüksiyon ısıtma parçanın yüzeyinde çok yüksek, iç kısımlarında az, merkezinde ise daha az bir ısı meydana getirmektedir. Bu ısınma akım kaynağının frekansına ve deri kalınlığına bağlı olarak değişmektedir.

### 2.13. Dalma Derinliği

İndüksiyonla ısıtmada, malzemenin cinsine, büyüklüğüne ve amaca göre, uygun frekansın seçimini sağlayan önemli bir büyüklük Nüfuz Derinliği çok sık kullanılan bir ifadedir. Bütün akımın, malzeme yüzeyinden itibaren ve yüzeydeki yoğunlukla geçmesi halinde , erişebileceği derinliğe Nüfuz Derinliği adı verilir. Bu derinlik ;

$$\delta = 503 ( \rho f / \mu_r )^{1/2}$$

bağıntısı ile tanımlanır.

$\rho$  = özgül direnç (  $\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$  )

$\mu_r$  = bağıl manyetik geçirgenlik (A/m)

f = frekans (Hz)

$\delta$  = nüfuz derinliği (mm)

Eşitlikten görüleceği gibi frekansın artması deri kalınlığını azaltır. Dolayısıyla akım parçanın en dış yüzeyinde dağılır.

Malzemenin iletkenliği büyük ölçüde sıcaklığa bağlı olduğundan ortalama sıcaklığın alınması gerekir. Aynı şekilde  $\mu_r$  bağıl manyetik geçirgenliği de sıcaklığa bağlıdır. Ayrıca demir cinsi malzemelerde alan şiddetine de bağlıdır. Alışılmış olan şiddetleri için düşük sıcaklıklar için  $\mu_r$  50 ile 100 arasında alınabilir. Curie noktasının üzerinde demir cinsi malzemeler manyetik özelliklerini kaybettiklerinden  $\mu_r=1$  olur. Karbon yüzdesi az olan karbon çeliklerinde Curie noktası 768 °C' dir.

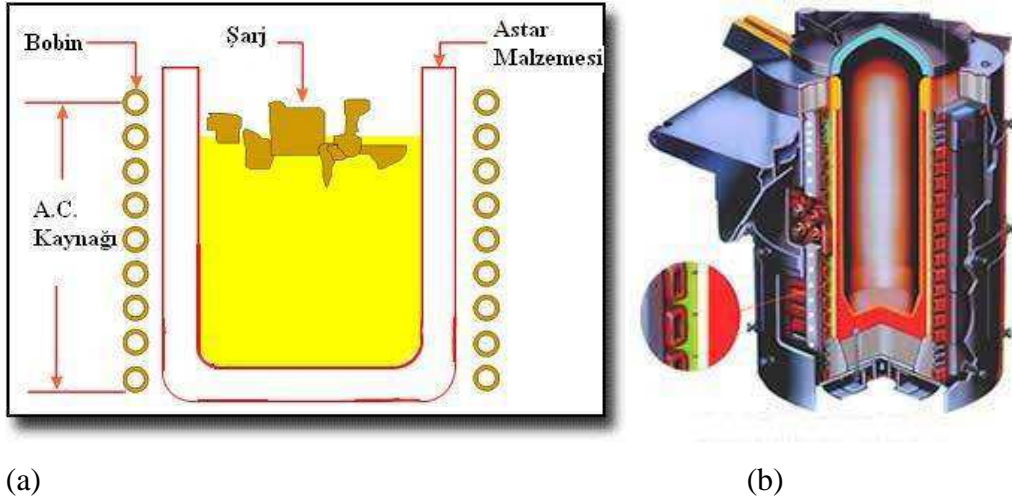
Kullanılan frekans ne kadar büyük olursa, Akım Nüfuz Derinliği o kadar küçük olur. Demir cinsi malzemelerde Curie noktasının altındaki hayli küçük olur. Curie noktasının üstünde ise demir olamayan metallere de büyüktür. Isıtmada iyi bir verim sağlayabilmek için ısıtılacak parçanın kalınlığı veya çapı en az Akım Nüfuz

Derinliğinin 4 katı olmalıdır. Pratik olarak frekansın seşilmesi bu şart sağlanacak şekilde yapılabilir.

#### **2.14. Düktil Demir Üretiminde İndüksiyon Ocaklarının Kullanımı**

Küresel grafitli dökme demir üretiminde kullanılan ergitme yöntemi ile kullanılan küreleştirici alaşımların cins ve miktarı arasındaki ilişki, dökümün kalitesi ve mekanik özellikleri açısından önem taşımaktadır. Dökme demir bileşiminin, şarjın ve ergitme yönteminin kontrolü, sağlam döküm oranında artış ve küreleştirici ilave oranında azalma sağlar. şekil 2.11' de indüksiyon ocağının şematik ve kesit görüntüleri görölmektedir.

Küresel grafitli dökme demir üretiminin büyük kısmı indüksiyon ocaklarında üretilmektedir. Bunun nedeni, iyi çalışma koşulları, ekonomik üretim, hedeflenen analiz değerlerinden çok az sapma değerleriyle sağlanmasıdır. Küresel grafitli dökme demir üretiminde genellikle asidik indüksiyon ocaklarında ergitme yapılır. Sıvı metaldeki karbon ve silisyum miktarı, çalışma sıcaklığı ocak astar ömrünü en fazla etkileyen parametrelerdir [15].



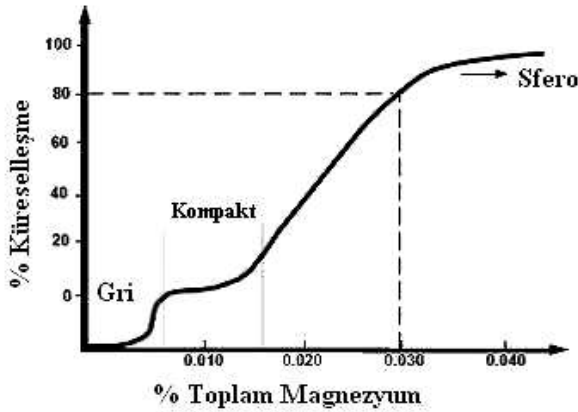
Şekil 2.11. (a) İndüksiyon ocağının şematik görüntüsü. (b) Kanallı indüksiyon ocağı ve kesit görüntüsü[15]

Küresel grafitli dökme demir üretiminde orta frekanslı indüksiyon ocakları en fazla tercih edilen ocaklardır. Bu ocaklarda soğuk şarjla başlama, sık analiz değişimlerine izin verme, çevreyi daha az kirletme ve daha az işletme problemleri vardır. Küresel grafitli dökme demir seri üretiminde optimum kalite ve ekonomi, indüksiyon ocağı ile bekletme ocağı dubleks çalışmasıyla elde edilmektedir.

## BÖLÜM 3. KÜRELEŞTİRME VE AŞILAMA

### 3.1. Küreleştirme İşlemi

Magnezyum, genellikle bir miktar Ca, Ce ve bazı diğer nadir toprak metalleriyle birlikte küreleştirme için en ideal ve ekonomik malzemedir. Küre şekilli grafitleri oluşturmak için gerekli olan magnezyum miktarı, dökme demirin ana bileşimindeki kükürt ve oksijen miktarlarına büyük ölçüde bağlıdır. Magnezyumla işlem (treatment) sırasında, dökme demir sıcaklığı 1538-1560 °C civarında olup magnezyumun buharlaşma sıcaklığının oldukça üzerindedir. 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 optimum metalurjik şartları sağlamak için, genellikle magnezyum başka elementlerle alaşımlandırılır. Şekil 3.1'de magnezyumun küreselleşmeye etkisi görülmektedir.



Şekil 3.1. Magnezyumun küreselleşmeye etkisi [21]

Sıvı metale ilave edilecek magnezyum miktarı ile ilgili bir çok formül geliştirilmiştir. Bunlar arasında en basit ve kullanımı en kolay olanı aşağıda verilmiştir.

$$\%Mg (\text{İlave edilen}) = \frac{\text{İstenilen Mg (\%)}}{\text{Mg verimi (\%)} * 0.01} - \text{Bileşimdeki S (\%)}$$

Bu bağıntıda şartlara bağlı oran, magnezyum verimine ait olandır. Bu oran % 10 ile % 90 arasında değişebileceğinden her uygulayıcı kendi şartları ve önceki tecrübelerinin sonuçlarına göre bu oranı saptamak durumundadır. Aşırı magnezyum kullanımının ekonomik sakıncası yanında, çekinti boşluğu oluşumunu arttırmaktadır. Dolayısıyla bileşimde istenen kalıcı magnezyum oranı % 0,040 ile % 0,050 aralığında kontrol edilmelidir ki bu da bilinen küreleştirme yöntemleri ile mümkündür [22].

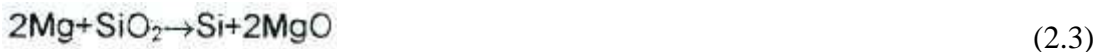
### 3.1.1. Küreleştirme etkisinin zamanla azalması

Küreleştirme etkisinin zamanla azalması ile ilgili yapılan çalışmalarda birçok faktörün geçerli olduğu ortaya konmuştur. Bu mekanizmanın açıklanmasında ilk sırayı oksidasyon ile magnezyum'un yanması teşkil etmektedir.

Oluşan reaksiyonlar:



ve oksijen bir oksitten alınıyorsa, örneğin SiO<sub>2</sub>, bu durumda:



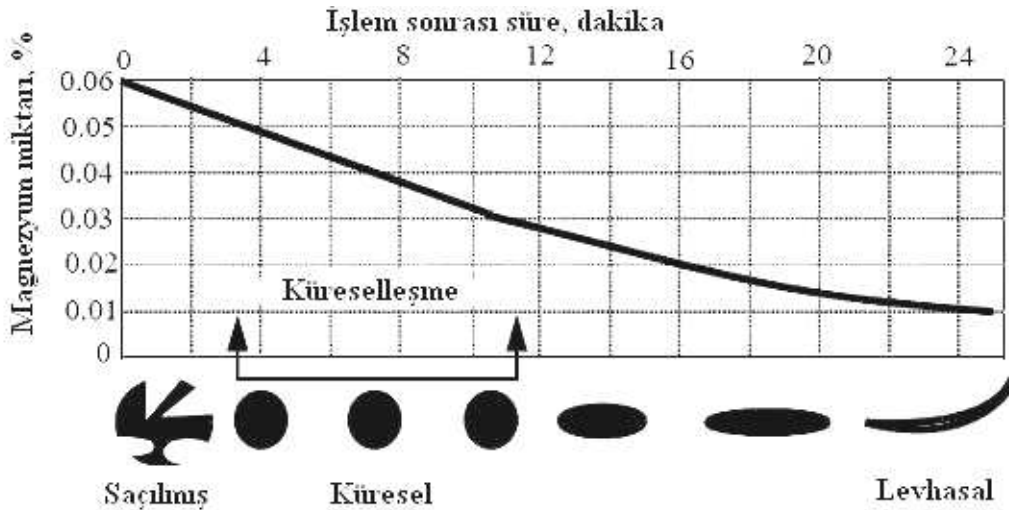


reaksiyonları geçerlidir [23].

Küreselleştirme etkisinin azalması aşağıdaki faktörlere bağlıdır;

1. Ön magnezyum miktarı ne kadar fazla ise etki kaybı o kadar hızlıdır.
2. Sıcaklığın artmasıyla birlikte etki kaybı artmaktadır.
3. Curuf miktarı etki kaybını arttırmakta olup curufun hemen ve çok temiz olarak alınması gerekir.
4. Ocak astar malzemesi etkisi; Silika astar malzemesi ile çalışmada, etki kaybı bazik astara göre daha fazladır.

Etki kaybının artması kendisini hücre sayısının azalması ve grafit şeklinin bozulması ile gösterir. Şekil 3.2’de magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişim görülmektedir [23].



Şekil 3.2. Magnezyum etkisinin işlem süresi ile değişimi [24]



### 3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirde Uniform Olmayan Küre Hacminin Oluşması

Esas olarak ince taneli kürelerin bulunduğu alanda, iri grafit kürelerinin dağılması olayı, katılma prosesi ile ilişkilidir. İri kürelerin genel ötektik katılmasından önce çekirdeklenerek, büyümek için daha fazla zaman bulması nedeni ile meydana geldiğine inanılmaktadır. Yapıda bu iri grafit kürelerinin bulunması döküm parçasının dayanımını, uzamasını ve tokluğunu azaltmaktadır.

Küre hacminde belirli değişikliklere neden olan şartlar üzerinde Barton'un çalışmaları bulunmakta olup ötektik-üstü malzeme kullanılması , geç aşılama işlemi küre hacmindeki farklılıkları daha da arttırmaktadır. Hiperötektik demirde, ötektik dönüşümden önce çekirdeklenmiş olan grafit küreleri büyümek için oldukça fazla zamana sahip olmakta, bu yüzden de ötektik katılma esnasında oluşmuş grafit kürelerinden daha büyük olmaktadırlar. Geç aşılama işlemi ötektik grafit kürelerinin küçük olmasını sağlamasına rağmen, hiperötektik grafit küresinin küçülmesini sağlayamamaktadır.

Yüksek döküm sıcaklığı, aynı zamanda katılma zamanını arttırıcı bir etkiye sahiptir. Bu yüzden yüksek döküm sıcaklığının büyük küre oluşumunu destekleyeceği bilinmelidir. Farklı büyüklüklerde küre oluşumuna, düşük magnezyum, düşük nadir toprak elementi, düşük kükürt bileşimi, yüksek tavlama ve döküm sıcaklığı neden olmaktadır [25]. Tablo 3.1'de Alaşım cinsi ve küreselleştirme işlemi tipine göre magnezyum verimi % olarak verilmiştir.

Tablo 3.1. 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	35	45	-
Mg-Si	-	35	-
Mg kırpıntı	-	-	20
Mg ingot	-	-	50

Küreselleştirme etkisinin azalması şu faktörlere bağlıdır:

1. Ön magnezyum miktarı ne kadar fazla ise etki kaybı o kadar hızlıdır.
2. Sıcaklıkla etki kaybı artmaktadır.
3. Cüruf miktarı etki kaybını arttırmakta olup, cürufun hemen ve çok temiz olarak alınması gerekir.
4. Ocak astar malzemesinin etkisi, silika astar ile çalışmada, etki kaybı, bazik astara nazaran daha fazladır.

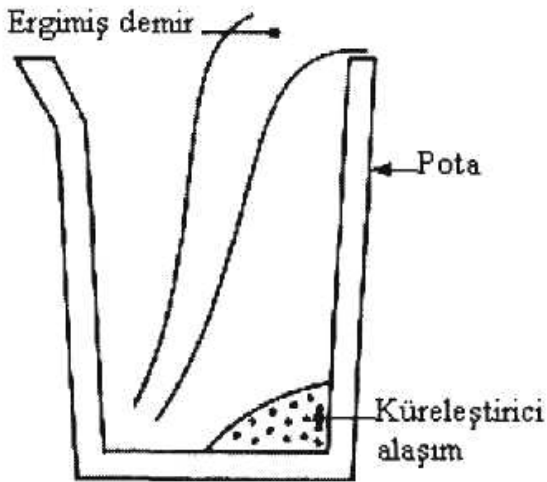
Etki kaybının artması kendisini hücre sayısının azalması ve grafit şeklinin bozulması ile gösterir [20].

### 3.3. Potada Küreselleştirme Yöntemleri

Küresel grafitli dökme demir üretimi için geliştirilmiş birçok farklı işlem yöntemi vardır. Bu işlem yöntemleri aşağıdakileri içerir:

### 3.3.1. Açık pota

Bu yöntem basitliğinden ve düşük yatırım maliyetinden dolayı çoğu dökümhanenin seçimidir. Alaşım işlem potasının tabanına yerleştirilir ve pota sonra doldurulur. Şekil.3.3' de açık pota yöntemi gösterilmektedir.

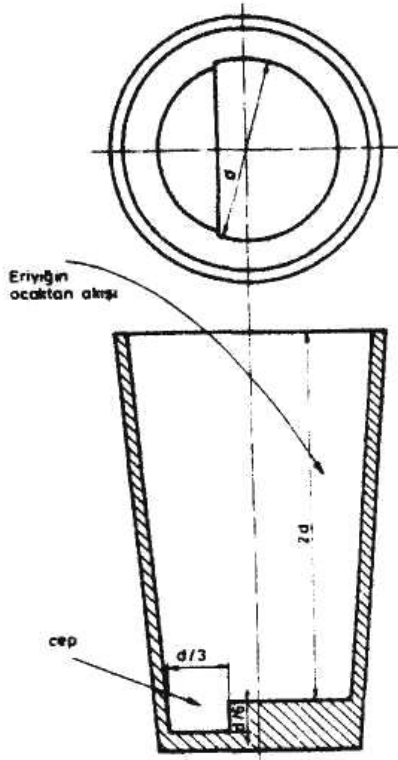


Şekil 3.3. Küresel grafitli dökme demir üretiminde açık pota yöntemi [26]

### 3.3.2. Sandwich yöntemi

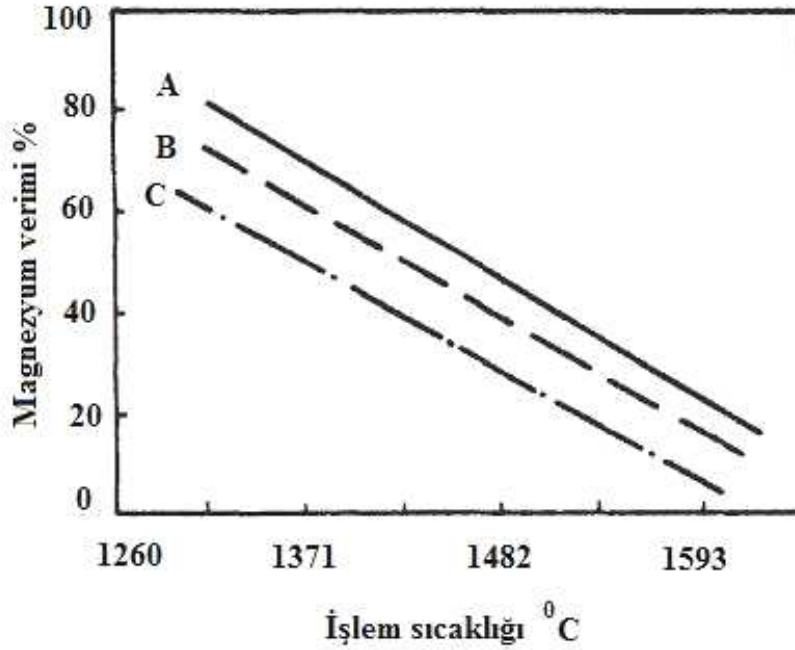
KGDD' in büyük bir bölümü potada küreleştirme işlemine tabi tutulmaktadır. Bu yöntemlerin en önemli elverişliliği basit ve kullanışlı olmasıdır. Magnezyumlu alaşım malzemesi ön ısıtılmış, boş potanın tabanındaki cep denilen boşluğa yerleştirilir ve ergiyik üzerine dökülür. Bu yöntemde iki şart önemlidir;

1. Ocaktan dökülen ergiyik magnezyum alaşımı malzemesi üzerine direkt gelmemelidir.
2. Pota hızlı bir şekilde doldurulmalıdır.



Şekil 3.4. Sandwich potası yöntemi [20]

En çok uygulanan yöntem Sandwich yöntemi olup küreselleştirici malzemenin üzeri eriyiğin %2' si miktarında çelik talaşı ve KGDD talaşı ile örtülür. Böylece hemen dökümle birlikte FeSiMg' un yanması önlenir. Bu işlem sonu erişilen magnezyum faydalanma derecesi, işlemin yapıldığı eriyik sıcaklığına bağlıdır.



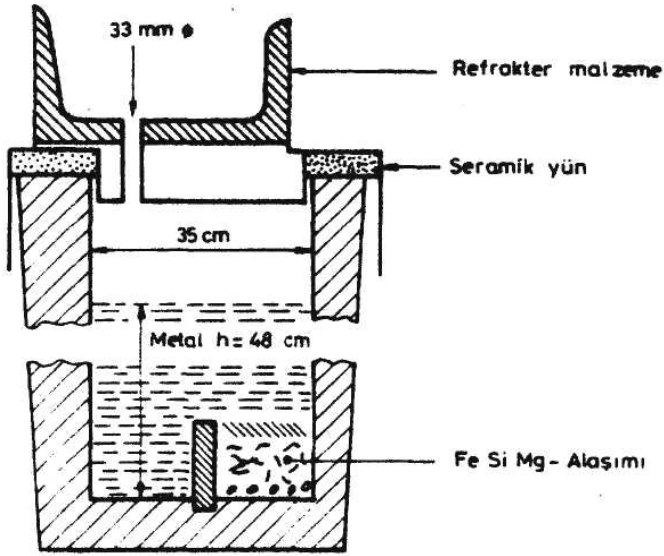
Şekil 3.5. Mg faydalanma yüzdesinin işlem sıcaklığı ile değişimi

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

Bu işlem sonu %2 miktarındaki çelik talaşının ısıtılması teorik olarak 26°C' lik bir ısı kaybına yol açmaktadır. 280 kg' lık işlem potasında yapılan sıcaklık ölçümleri toplam ısı kaybının 35°C civarında olduğunu göstermektedir.

### 3.3.3. Kapaklı pota yöntemi

Kapaklı pota yöntemi, pratik ve yaygın kullanımı olan bir metot olup sandwich yönteminin elverişsiz tarafları olan işlem esnasındaki MgO dumanının oluşmasını önlemek ve diğer taraftan da magnezyum verimini arttırmak amacı ile QIT Peret TITANE tarafından geliştirilmiştir. Bir diğer elverişliliği ise işlem sıcaklığının ısı kayıplarının az olması nedeni ile 30°C daha düşük alınabilmesidir. Bu söz konusu sıcaklık farkı 42 kwh veya enerji sarfiyatında %6' lık bir tasarruf demektir.



Şekil 3.6. BCIRA – Kapaklı pota [19]

Kapaklı pota sistemleri 2 ana grupta toplanırlar;

### 1. Hareketli kapaklı yöntemler

- a. Konvansiyonel sistem, direkt ocaktan potaya döküm
- b. İndirekt sistem, ergiyiğin ocaktan alınıp bir diğer yerde, işlem istasyonunda küreselleştirilmesi.

### 2. Sabit kapaklı yöntemler

- a. UPO-sistemi
- b. Sifonlu pota sistemi

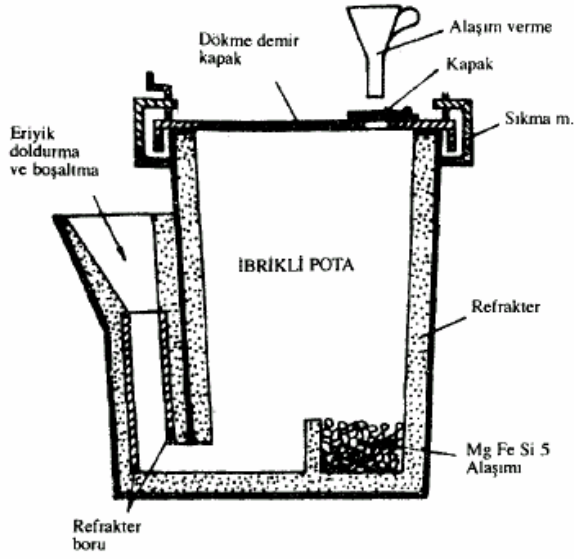
Konvansiyonel sistemde, ergiyik ocaktan tundish potasına alınır. Pota geometrik ölçüleri, geliştirilmiş bir diğer şekli, nozul çapı ve yöntemin açık pota ile karşılaştırılması de verilmiştir. Magnezyum alaşımının potaya yerleştirilmesinde

hareketli kapağın alınması dökümhanelerde değişik şekillerde yapılmaktadır. Bu yöntemle 80kg' dan 14 tona kadar ergiyikler küreselleştirme işlemine tabi tutulmaktadır. Magnezyum verimi %60' tır.

UPO yönteminde hareketli kapak yarı sabit bir hale getirilmiş, tundish'deki ergiyik doldurma deliği (100mm çap) aynı zamanda dizayn değişikliği ile boşaltma deliği olarak ta kullanılmıştır. Kapak üzerindeki 2. bir delikten magnezyum alaşımı  $FeSiMg_5$  cep içine dökülmekte ve sonra bir sac kapakla burası kapalı tutulmaktadır. UPO potası ve kapağı grafitik silika refrakter ile astarlanmış olup 200 işlem yapılabilir.  $FeSiMg_5$  miktarı %1,5 olup bu değer Sandwich yöntemine nazaran %30 oranında bir elverişlilik göstermektedir. Ergiyik sıcaklığı UPO yönteminde 1510°C'dir.

#### **3.3.4. İbrikli pota yöntemi**

Şekil 3.14' de 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.

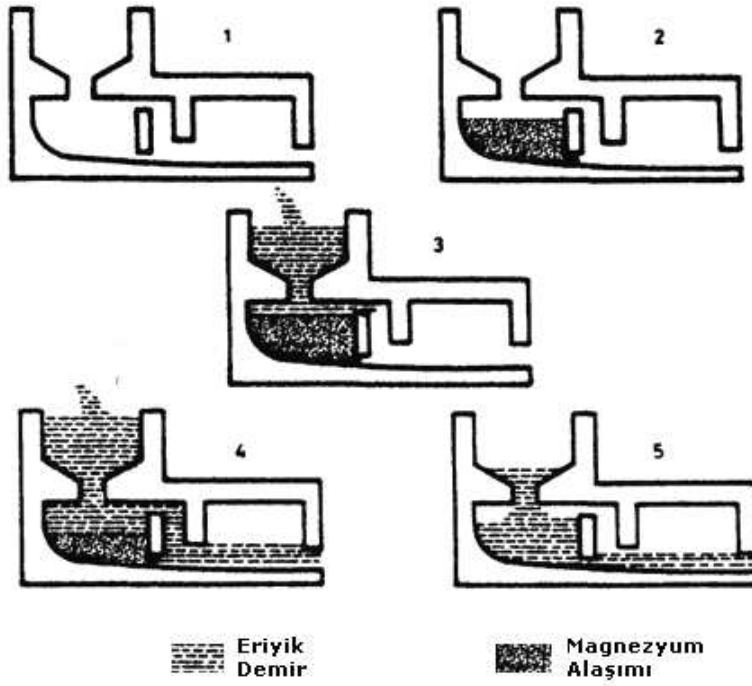


Şekil 3.7. İbrikli pota yöntemi [20]

### 3.3.5. Flotret yöntemi

Bu yöntemde, refrakter malzemesi ile kaplanmış kapalı bir bölümünde reaksiyon haznesinin bulunduğu ve eriyiğin akışı esnasında küreselleştirme işlemine tabi tutulduğu yatay durumda birbirleri ile irtibatlı bir kanal sistemi mevcuttur. Küreselleştirme işlemi aralıklı yapılmakta ve her işlemde sonra ön bölüm üzerindeki kapak açılıp FeSiMg alaşımı hazne boşluğuna yerleştirilmektedir. Eriyik ocaktan sistemin döküm yolluğuna verilmekte resimde görüldüğü gibi küreselleştirici malzeme haznesini sınırlayan tuğla veya bölüm tarafından eriyik toplanarak reaksiyon için gerekli yavaş akış hızı sağlanmaktadır [19].





Şekil 3.8. Flotret yöntemi [14]

Flotret yöntemi avantajları;

1. Düşük magnezyumlu (%3-4) küreselleştirici malzemeler kullanılmaktadır. Kullanım miktarı %2,2-2,3, magnezyum faydalanımı %53-58' dir. Kalıcı magnezyum miktarı %0,04-0,05. Alaşım % 1.5 Ce ihtiva etmektedir.
2. Grafit küre sayısı 150-200 küre / mm<sup>2</sup>' dir.
3. Şarjı düşük kükürt ve silisyum, mangan miktarına sahip pik, hurda malzeme ve soğuk şekillenen saç kırıntıları oluşturmaktadır.
4. İnce et kalınlıklarında dahi 4mm sementitsiz bir ana doku sağlanmaktadır.
5. GGG 40 - GGG 70 özelliklerinde KGDD döküm durumunda üretilmektedir. Perlit/ferrit oranı potaya bakır ilavesi ile kontrol altına alınmaktadır.

### 3.3.6. Vorteks yöntemi

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

Tablo 3.4'de işlemin uygulama sıcaklığı, kullanılan küreleşticideki Mg miktarı ve işlemdeki Mg verimi gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Vorteks yöntemi işletme değerleri [19]

Eriyik sıcaklığı	FeSiMg(%)	Mg (%)
1350	60	55
1400	55	60
1450	50	45

### 3.3.7. Inmold yöntemi

Kalıp içinde küreleştirme işleminin yapılması 1960'lı yılların sonuna doğru geliştirilmiş bir yöntem olup diğer bütün yöntemlerden farklılığı en son safhada kalıpta yapılmasıdır.

#### Avantajları;

1. FeSiMg alaşımı 2 görevi yerine getirmekte, magnezyumun kuvvetli küreselleştirici ve silisyumun aşılama etkisinden faydalanılmaktadır. Dolayısı ile aşılama için FeSi ilavesi gerekmemektedir.
2. Küreselleştirme işlemi ve aşılama mümkün olan en son proses kademesinde yapıldığından magnezyumun oksidasyonu ve aşılama etkisinin azalması söz konusu değildir.
3. Bu yöntem çok iyi özelliklerde döküm parçası üretimini mümkün kılmaktadır, bunlar;
  - a. Sementitler mevcut değildir
  - b. Küre sayısı fazladır
  - c. Grafit küreleri çok daha küçüktür
4. Mikro doku ve dolayısı ile mekanik özellikler döküm durumunda elde edilebildiğinden ısıtma işlemi gerekmez.

#### Dezavantajları;

1. Model ve maça sandığı fiyatı artar
2. Yolluk kanal ve besleyici tasarımı daha komplikedir, döküm öncesi pratik deneyimlerle tespit edilmelidir.
3. Baz ergiyiğin kükürt miktarı azami % 0,01 olmalıdır.
4. Bu yöntem bir parçanın seri üretimi söz konusu olduğunda uygulanır. Parça döküm sayısı az ise tercihen Sandwich yöntemine başvurulmalıdır.
5. Her kalıp bir işlem potası anlamına geldiğinden, kalite kontrol çalışmalarının buna göre yapılması gerekir .

### 3.3.8. Daldırma yöntemi

Daldırma yönteminde ise genellikle %40 veya daha fazla magnezyum içeren alaşım refrakter malzemeden veya grafitten çan şekilli delikli bir kap içine konulur. Bu kap sıvı demir potasına daldırılır. 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. Belirtilebilecek başlıca dezavantajı, sıcaklık kaybının açık pota yöntemine nazaran daha fazla oluşudur [27].

### 3.3.9. MAP yöntemi

Küreleşmeyi birkaç kat refrakter ile sıvanmış ve tabanında reaksiyonun başlaması için küçük bir yüzeyin açık bırakıldığı blok halindeki magnezyum ile gerçekleştirir. Bu blok, refrakter kaplı bir çubukla sıvı metale daldırılır reaksiyon süresi 30 ile 40 saniye kadardır. Magnezyum verimi, 1400°C' ta %65 olarak belirtilmektedir. Ancak verimin işlem sıcaklığı arttıkça azalacağı da açıktır.

### 3.3.10. Konverter yöntemi

Konverterde küreselleştirme yöntemi, Georg Fischer firmasının getirdiği bu yenilik nedeni ile yöntem adı verilmiştir ve Fischer konverteri olarak adlandırılır. Konverter tabanının köşesine dışardan 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.

Yöntemin elverişsiz yönleri, uygulanmasında dökümhanelerin yüksek üretim kapasitelerine sahip olma zorunluluğudur. Bunun nedeni küçük konverterlerde sıcaklık kayıplarının fazla olması ve bir pota ile kıyaslamada komplike bir yöntem olması sebebi ile bakım masraflarının fazlalığıdır. 1976 yılı başlarında 54 adet konverter çeşitli dökümhanelerde mevcut olmalarına rağmen ancak bunların bir kısmı kullanılabilirdi [19].

### **3.3.11. Enjeksiyon**

Küresel grafitli dökme demir üretimi için, ince metalik magnezyum parçaları pota içindeki metalin içine itilir. Bu yöntem çok popüler değildir.

### **3.3.12. Basıncı pota**

Bu yöntemde işlem potası sızdırmazlığı sağlanmış bir bölmeye yerleştirilir ve bölmenin basıncı yaklaşık 30 atmosfere çıkarılır. Sonra metalik magnezyum işlem potasındaki erimiş metale daldırılır. Basıncıdan dolayı, magnezyum metali etkili karıştırılır [27].

## **3.4. Aşılama İşlemi**

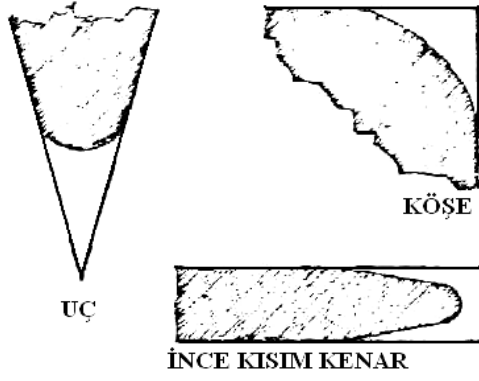
Lamel ve küresel grafitli dökme demirin dokusu ve dolayısı ile mekanik özellikleri ergiyiğin ergitmeden sonraki çekirdek sayısına ve parçanın soğuma hızına yani parçanın et kalınlığına bağlı olarak çok kuvvetli bir şekilde değişir. Çekirdek sayısını şarj malzemeleri özellikleri, ergitme tekniği ve ilave aşılama belirler.

Has demir miktarı fazla olan bir şarjda kafi miktarda çekirdek sayısı mevcut olacağından ( bu aynı zamanda doymuşluk derecesinde yüksek olduğunu belirtir, ) normal ergitme ve katılma şartlarında ve çok ince olmayan et kalınlığında parçada gri katılma sağlanabilir. Çelik hurdasının fazla miktarda kullanıldığında doymuşluk dereceside küçük olacak ve döküm sıcaklığında yüksek olduğunda mevcut çekirdek sayısı gri katılmayı sağlayamaz, böylece ince kesitlerde özellikle kenar, köşe ve parça uç kısımlarında beyaz katılmış bölgeler bulunur.

Lamel ve küresel grafitli dökme demir özelliklerini öncelikle stabil ve metastabil ötektik sıcaklıklar arasındaki soğuma hızı ve aşılamanın etkinliği belirler. Düşük aşılama düzeyi ve hızlı soğuma sonucu çil olarak tanımlanan, beyaz katılma meydana gelir. Bu durum doğal olarak parçanın ince ve köşe kısımlarında kendini gösterir. Bazı elementlerin, örneğin silisyumun mevcudiyetinde ötektik sıcaklıklar arasındaki fark artar, ve karbür oluşumuna temayül azalır. Krom elementi ise Silisyum' un etkisinin tersine sahiptir.

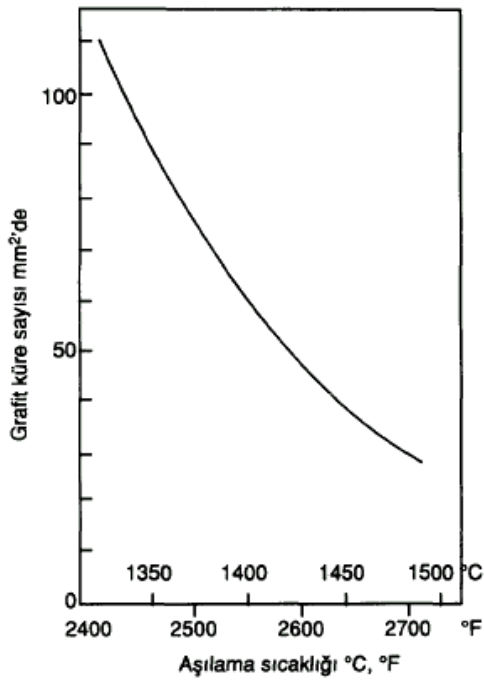
Çok sayıda hücrenin aşılansız olması halinde ( Çekirdekleştirilmiş ) aşırı soğuma az ve her bir hücrenin büyümesi de yavaştır. Böylece ASTM A-tipi grafit oluşur, ötektik hücre sayısı az ise aşırı soğuma fazla olacak ve hücreler hızlı büyüyeceklerdir. Hızlı büyüme ince, D-tipi grafit oluşumunu sağlar.

Küresel grafitli dökme demirlerde aşılamanın az olması ile ötektik tanelerin meydana geldiği çekirdek sayısında azalma olur. Aşırı soğuma artar ve beyaz katılma meydana gelir (Şekil 3.9.). Küresel grafitli dökme demirlerde düşük aşılama derecesinin sonucu nodul sayısı azdır [16].



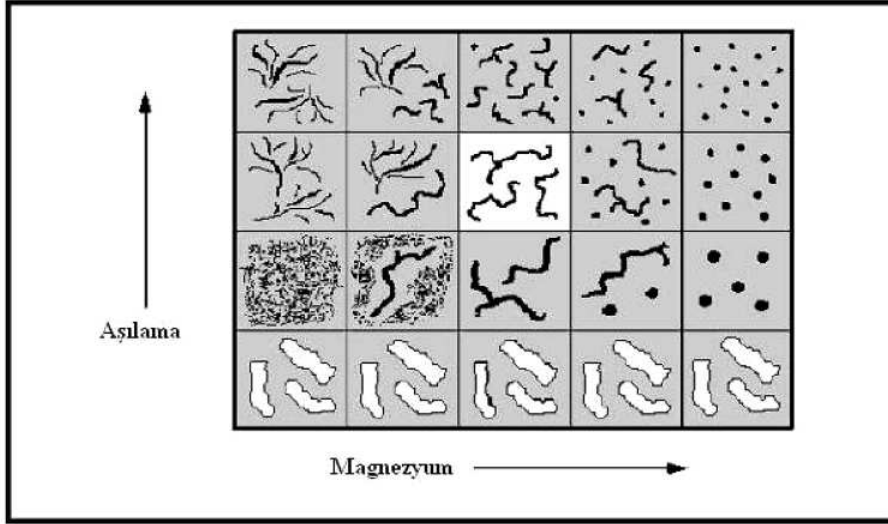
Şekil 3.9. Parçada beyaz katılaşan, soğuma hızının fazla olduğu bölgeler [16]

Bu durumlarda yetersiz çekirdekleyici sayısı ile eksik olan grafit çekirdek sayısı ergiyik içinde aşılama yöntemi ile artırılır. Doymuşluk derecesi 0,8'den küçük ve 10 mm'den ince et kalınlıklarında gri katılaşma, erginlik derecesinden ödün vermeksizin, ancak aşılama ile sağlanır. Aşılamanın sıcaklığa bağlı olarak etkisinin değişimi şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Aşılama durumuna sıcaklığın etkisi [16]

Aşılama ile 5 mm kalınlığındaki bir parça doymuşluk derecesine bağlı olmaksızın 240-260 HB sertliği aralığında dökülebilmektedir. Lamel grafitli gri dökümün istenen mekanik özellikleri arttıkça aşılamanın gerekli olacağı et kalınlığı fazlalaşacaktır.



Şekil 3.11. Magnezyum ve aşılamanın mikroyapıda yaptığı değişim [17]

### 3.5. Aşılama Malzemesinin Sahip Olması Gereken Özellikler

Aşılama olarak dökme demirde kullanılacak malzeme aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır.

1. Ergiyik demirde çok iyi bir çözülme ve homojen dağılım.
2. Ergiyik analizini olumsuz etkilememesi.
3. Karbon aktivitesini azaltmaması, hatta yükseltmesi.
4. Uzun süre kalıcı aşılama etkisinin olması.
5. Ucuz olması. Kolay stoklanabilmesi .





CaSi alaşımının KGDD' nin aşılanmasında ender kullanılmasının nedeni 1480°C'nin altında kolay bir şekilde çözünememesidir. Bütün aşılama malzemelerinde Al miktarı pinhole olarak adlandırılan ince gaz boşluklarına neden olduğundan azami %1' dir. Bazı durumlarda üretici firmadan bu miktarın %0,7 olacak şekilde kalması istenebilir.

Seryum (Ce) ile birçok aşılama malzemesinin etkisi arttırılmaktadır. Seryum küre sayısını arttırmakta, zamanla etkinin azalmasını engellemekte ve beyaz katılaşmaya temayülü indirgemektedir. Bu sonuçlara uymayan yegane aşılama malzemesi SrFeSi olmaktadır.

Seryumun etkisinin en fazla olduğu alaşım Fe-Si dur. KGDD' lerde seryum, küreleşmeyi olumsuz etkileyici elementlerin bu etkilerini azaltan bir görev üstlenir. Genel olarak kullanılan FeSiMg alaşımlarının çoğunda az miktarda seryum vardır. Ce miktarı %0,01' dir. Seryum ihtiva eden aşılama malzemelerinde Bizmut (Bi) bulunması halinde küre sayısı kuvvetli bir şekilde artmaktadır. Bizmutun en etkili miktarı %0,02' dir. FeSi, Mişmetal, Bizmutlu aşılama malzemelerinin kullanılmaları halinde yine zamanla bir etki azalması (küre sayısı) gözlenmesine rağmen, FeSi' a nazaran çok daha kuvvetli kalıcı bir etki mevcut olur (4-10 katı fazla ). Aşılama etkinliğinin azalması ile ince parça kesitlerinde karbür oluşumu artar, kalın kesitlerde grafit yüzmesi olayı ile grafit patlaması riski fazlaşır.

Aşılama sonrası ergiyik içinde bulunan SiO<sub>2</sub>, CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve BaO nükleleri Brawn moleküler hareketini yapar durumdadır. Yani serbest bir şekilde ergiyik içinde hareket halinde olup, diğeri bir parçacığın çarpmaları halinde koagülasyon (daha büyük oksit taneleri) oluşur. Bu hareket sıcaklık ve süreye bağılı kaldığında zamanla Brawn moleküler hareketini yapan parçacık sayısı azalır ve aşılama sonrasında itibaren kısa bir zaman biriminde aşılamanın etkinliğı sürekli olarak düşer [20].

### 3.7. Çekirdek Sayısının Doku Yönlendirmede Etkisi

Bir gri döküm parçası deneysel olarak katılma sürecinin belli bir anında eriyik azot içinde soğutulur ve numune azot içinde soğutulup mikroskop altında incelenirse, parça dış kısmında gri katılmanın meydana geldiği bir kalınlık ve iç kısımlar da istatistiki dağılmış çekirdeklenme noktalarından başlayan bir katılma görülür. Bu bize ötektik katılmanın ani ve parçanın tüm kesitine dağılmış olmadığını gösterir. Katılma süreci içinde aynı olay artık eriyikte devam edecektir. Böylece tüm eriyik belli bir süre sonra katılmaktadır. Kristalleşme başlangıç noktaları grafit ve östenitten ibaret olup, östenit düşük sıcaklıklarda değişik miktarlarda sementit, perlit veya ferrit'e dönüşecektir. Bu katılma ile teşekkül eden taneye ötektik tane adı verilir. Lamel grafitli dökme demirde bir çekirdekten değişik yönlerde olmak üzere eriyiğin içine doğru yönelmiş bir şekilde grafit yaprakları büyümekte, bu yapraklar arasında da östenit bulunmaktadır. Küresel grafitli dökme demirde çekirdeklenme ile küresel grafit oluşmakta ve östenitle çevrelenmektedir.

Her iki dökme demirde de ötektik kristalizasyon grafitle başlamaktadır ve östenit grafit üzerinde oluşmaktadır. Ergiyik alt veya üst ötektik ise kristalizasyon da östenit veya grafitle başlamaktadır. Ötektik tanelerin katılma esnasındaki dağılımları ve sayıları grafit kristalizasyonunu hızlandıran çekirdeklerin mevcudiyetine bağlıdır. İşte bir eriyiğin çekirdeklenme durumunu artırma ve dolayısı ile mekanik özelliklerin daha elverişli kılınması işleme aşılama adı vermekteyiz. Bu işlem için kullanılan alaşımlara da aşılama malzemeleri denir [16].

### 3.8. Dökme Demirlerde Aşılama ile Sağlanan Özellikler

Lamel grafitli dökme demirlerde :

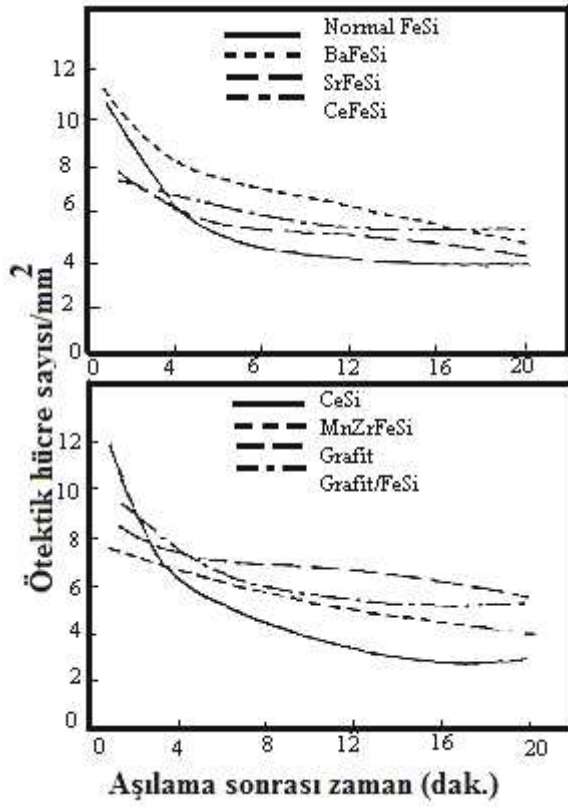
1. Beyaz katılaşma bertaraf edilir, ASTM A-tipi grafit oluşur.
2. D-tipi grafit meydana gelmeyeceğinden, ferrit miktarı azdır veya mevcut olmaz.
3. Parçanın farklı kesitlerinde homojen bir doku özelliği sağlanır.
4. Talaş alınma kabiliyeti artar.
5. Yüksek mukavemetli düşük S,CE sahip dökme demirlerde kaçınılmaz bir yöntemdir.

Küresel grafitli dökme demirlerde :

1. Beyaz ve karışık dokunun oluşumu engellenir.
2. Grafit küre sayısı dolayısı ile mekanik özellikler, çekme dayanımı ve süneklik özellikleri artar.

### 3.9. Farklı Aşılama Malzemelerinin Etkinliklerinin Zamanla Değişimi

Farklı aşılama malzemelerinin etkinliklerinin zamanla değişimini Şekil.3.12'de vermektedir. CaSi ve FeSi hemen eriyiğe ilave edilmelerinden sonra yani aşılama sonrası, çok yüksek ötektik hücre sayısını vermekte ancak, beş dakika sonra etkinlik yarıya düşmektedir.



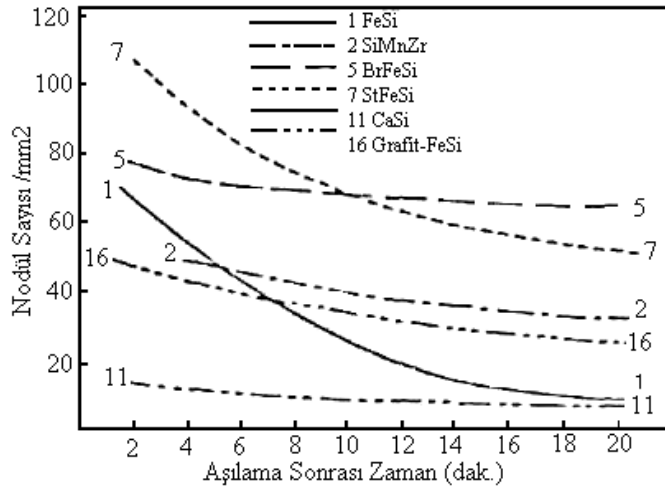
Şekil 3.12 Lamel grafitli gri dökme demirde zamana bağlı olarak aşılایıcıların etkinlikleri [16]

SrFeSi, CeFeSi, Mn/ZrFeSi de ise etkinlik zamanla büyük kısmı ile kalıcı olmaktadır. Genel olarak, başlangıçta yüksek ötektik hücre sayısı sağlayan aşılama malzemelerinin etkinlikleri, ilk 5 dakika da daha kuvvetli bir şekilde azalmaktadır.

Beyaz katılaşılan derinlik ile hücre sayısı arasında direkt bir ilişki mevcut değildir. Şöyle ki SrFeSi aşılama malzemesi en kuvvetli etkiye sahip olup, hücre sayısına az olarak arttırmakta buna karşın, CaSi çil derinliğini daha az etkilemekte, fakat başlangıç hücre sayısı bakımından daha fazladır.

### 3.10. Düktil Demirlerin Aşılmasında Etkinin Zamanla Azalması

Lamel grafitli dökme demirde olduğu gibi aşılama malzemesinin ilavesi ile etkinlik azami değerine erişmektedir. Düktil demirlerde aşılamanın zamanla etkisini kaybetmesi, buna bağlı olarak nodül sayısının değişimi Şekil 3.13’de verilmiştir.



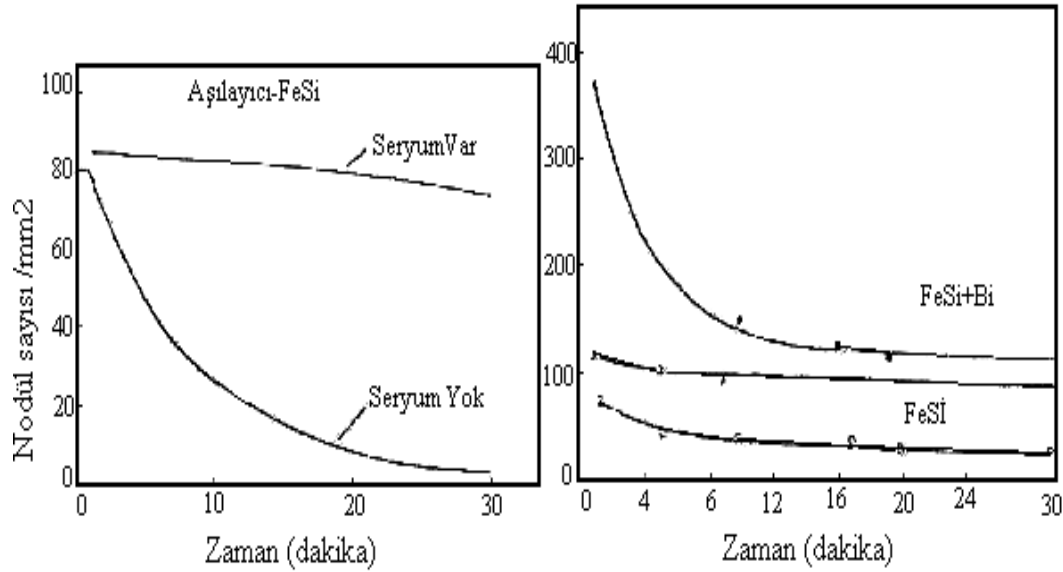
Şekil 3.13. Farklı aşılama malzemelerinin zamanla nodül sayısına etkileri [16]

Tablo 3.4. KGDD’de farklı aşılama malzemelerinin etkinlikleri [16]

No	Aşılama Malzemesi	Aşılama 2-3dk Sonra			Aşılama 30dk sonra		
		Nodül mm <sup>2</sup> de			Nodül mm <sup>2</sup> de		
		Ce varken	Ce yokken	Ce ilavesi ile değişim	Ce varken	Ce yokken	Ce ilavesi ile değişim
1	FeSi	124	62	+62	161	3	+95
2	Si-Mn-Zr-FeSi	81	33	+48	42	23	+19
3	Si-Mn-Ba-FeSi	82	76	+6	31	45	-14
4	St-FeSi	104	116	-12	36	47	-11
5	CaSi	6	6	0	3	3	0
6	Grafit+FeSi	109	47	-12	31	8	+23

Küresel grafitli dökme demirlerde Seryum, küreleştirmeyi olumsuz etkileyici elementlerin bu etkilerini azaltan bir görev üstlenir. Genel olarak kullanılan FeSiMg alaşımlarının çoğunda cüzi miktarda Seryum vardır. Ce miktarı % 0,01 dir.

Seryum ihtiva eden aşılama malzemelerinde bizmut (Bi) bulunması halinde nodül sayısı kuvvetli bir şekilde artmaktadır. Bizmutun en etkili miktarı % 0,02 dir. FeSi 'li metal ve bizmut lu aşılama malzemelerinin kullanılmaları halinde yine zamanla bir etki azalması (nodül sayısı) gözlenmesine rağmen, FeSi'a nazaran çok kuvvetli kalıcı bir etki mevcut olur. Seryum içeren aşılama ile aşılama düktil demir yapısındaki nodül sayılarının değişimi Tablo 3.4'de verilmiştir. Aşılama etkinliğinin azalması ile ince parça kesitlerinde karbür oluşumu artar, kalın kesitlere grafit yüzmesi olayı ile grafit patlaması riski fazlalaşır.



Şekil 3.14. KGDD'de farklı aşılama ajanlarının etkinlikleri [16]

### 3.11. Aşılایıcılarıdaki Önemli Elementler

Kalsiyum ve alüminyum içeren aşılایıcıların grafitleşmeye etkisi olduğu bilinmektedir. Değişik miktarlardaki Ca ve Al'un soğumayı azaltmadaki etkisini göstermektedir.

Ferrosilisteki Ca ve Al miktarı arttıkça aşılama kuvveti artar. Si metali az miktarda Al ve çok az miktarda Ca ile aşılama etkisizdir. Buna rağmen biraz Ca ve Al ilavesi ile Si metalinin aşılama etkisi artırılabilir. Bu gri dökme demirler için çok etkilidir. Bu aşılایıcı kullanıldığında cüruf artar ve problemler fazlalaşır.

% 0,05'in altında ilave edilen aşılایıcıların en etkilisi % 1,9 Al içerendir. Bu alaşım kullanıldığı takdirde porozite bırakacağından kullanımı çok dikkat ister .

### 3.12. Aşılamayı Etkileyen Faktörler

Doymuşluk derecesi (Sc )

$$Sc = \frac{C}{4.23-Si/3.2} \text{ olarak ifade edilir.}$$

Doymuşluk derecesi azaldıkça aşılamanın etkisi artmaktadır. Aşılama ile erişilen çekme dayanımı artışı:

Sc 0,8 için 9 MPa,

Sc 0,9 için 6 MPa,

Sc 1,0 için 2 MPa



Aşılamanın etkisini doymuşluk derecesinin azalması ile fazlalaşmasının primer kristalizasyon miktarının artmasında aranmalıdır.

Doymuşluk derecesinin fazla olduğu numunelerde grafit anormal olarak tanımlanır. Yani iyice homojen dağılmış ve hiç bir dentiritik yönelme göstermeyen biçimde bulunur. Aşılama düşük doymuşluk derecelerinde grafitin yukarıda belirtilen şekilde ayrışmasını kuvvetlendirmektedir.

## **BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

### **4.1. Giriş**

Bu araştırma sabit boyuttaki (1-1.5mm) farklı aşılıyıcıların aynı döküm ortamında kullanılması ile elde edilen küresel grafitli dökme demirlerde aşılamanın küreleşmeye ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

Düktil demir özellikleri üretim prosesindeki her parametreye doğrudan bağlıdır. Bu sebepten dolayı proses parametrelerinde meydana gelen değişimler doğrudan mikroyapıyı ve mekanik özellikleri etkilemektedir. Küresel grafitli dökme demirlerde küreleşme miktarı büyük önem taşır. Küreleşme pek çok üretim parametresine bağlı olsa da kullanılan aşılama ve küreleştiricinin rolü ön sıralarda gelmektedir.

Küreleştirici içeriği küreleşme prosesinin başarımını doğrudan etkileyen bir parametredir. Küreleştirici içerisindeki Mg ve Si yüzdelerinin oranı küreleştirmenin başarımında büyük rol oynar. Ayrıca ergiyik içerisinde ve küreleştirmede bulunan S miktarı da küreleşmeyi önemli ölçüde etkiler.

Küreleşme düktil demirde istenilen bir durumdur, ancak küreleştirici oranının malzemeden istenilen özelliğe göre optimum seviyede olması gerekir. Düşük oranda meydana gelen küreleşme malzemenin sertliğinin yüksek olmasına ve kırılabilirliğinin artmasına neden olurken yüksek oranda küreleşme ise malzeme sertliğinin düşmesine ve mekanik özelliklerin zayıflamasına neden olmaktadır.

Ayrıca dökümlerde irili ufaklı grafit küreleri yerine , eşit büyüklükte küresel grafit oluşumu istenmektedir.Grafit kürelerinin yapı içindeki dağılımı incelendiğinde ise kürelerin belli bir hat üzerinde dizilmek yerine rasgele dağınık şekilde yapıda bulunması istenir.

Düktil demir üretiminde istenilen özelliklere ulaşmada küreleştirici kadar kullanılan aşılایıcıda büyük önem taşır. Kullanılan aşılایıcının tane boyutu ve dağılımı, içerdiği elementlerin ve ilave miktarı nihai sonucu doğrudan etkilemektedir.

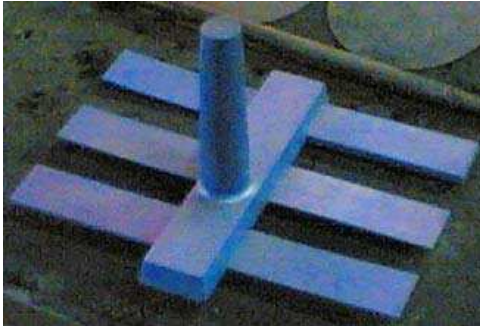
Eksik yada yetersiz aşılایıcı kullanımı küreleşmeyi ve sonrası katılşma evresini olumsuz etkiler. Mekanik ve metalografik gereksinimlerin düşük çıkmasına sebebiyet verebilir. Yüksek oranda aşılایıcı kullanımı ise hem ekonomik yönden hemde aşırı küreleşme oluşumu ile mekanik yönden olumsuz sonuçlar doğurabilir.

Bu çalışmada sabit döküm şatlarında aynı boyut aralığındaki üç farklı aşılایıcı kullanılarak farklı kesit kalınlıklarında elde edilen küreleşmenin ve mekanik özelliklerin değişimi araştırılarak optimum kesit kalınlığı ve uygun aşılایıcı tespit edilmeye çalışılmıştır.

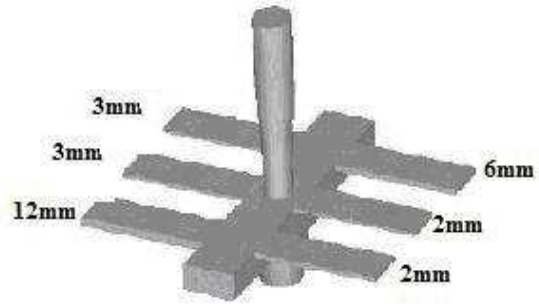
Bu dökümlerden alınan numuneler üzerinde mikroyapı incelemesi, sertlik testi ve darbe testi uygulanmıştır. Buradan elde edilen bulgular ışığında optimum kesit kalınlığı ve en uygun aşılایıcı belirlenmeye çalışılmıştır.

#### 4.2. Numune Modeli ve Kalıplar

Üç farklı aşılaiıcı kullanılarak yapılan dökümlerde Şekil 4.1'de gösterilen döküm modeli kullanılmıştır. Plaka boyutları 120x40mm, plaka kalınlıkları 12mm, 6mm, 3mm, 2mm dir.



a)



b)



c)

Şekil 4.1. Deneysel döküm numunesinin, a)şematik gösterimi, b)modeli, c)döküm hali

### 4.3. Döküm Kalıplarının Hazırlanması

Deneyleerde kalıp besleyici ve yolluk dizaynında kullanılan bileşenler;

- a. % 90-92 Silis kumu(Silis kumu tane boyutu 60-65 AFS)
- b. % 2 Bentonit
- c. % 2 Kömür tozu
- d. % 4-5 Nem

olacak şekilde karıştırılıp kalıplamada kullanılmıştır.(Şekil 4.2)



a)



b)

Şekil 4.2. Kalıplama çalışmasından örnekler a) Kalıplama aşamasından kum kalıp örneği, b) Kalıplanmış kum kalıp örneği

#### 4.4. Şarj, Ergiyik ve Döküm

Ergitme işlemleri 1 tonluk Indocherm marka devirmeli indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiştir. GGG 50 kalite malzeme için şarj hazırlanmıştır.

GGG 50 için şarj hesabı: 300 kg Sfero Piki,  
 300 kg Çelik hurda,  
 400 kg Döngü Malzemesi.  
 8 kg Karbon

Ergiyik alaşım 1580°C' ye ısıtılmış ve curuf yapıcı flux malzeme (perlit) kullanılarak curuf oluşumu sağlanmıştır. Oluşan curuflar toplayıcı bir maşayla ergiyik üzerinden alınmıştır. Ocakta erğitilen sfero piki ve hurda malzemesinin kimyasal bileşimleri Tablo 4.1 ve 4.2'de verilmiştir.

İstenen şarj sıcaklığı (1590°C) Heraeus electro-nite (Pt 10% Rh/Pt) termokupul kullanılarak ölçülmüştür. %1 oranında FeSiMg ile küreleştirme işlemi 1580°C' de ısıtılmış küreleştirme potasında gerçekleştirilmiştir. (25 kg ergiyik içerisine 250 gr FeSiMg küreleştirici) Aşılama sıvı metal döküm potasına alınırken metal akıntısına ilave edilerek yapılmıştır. %0.01 oranında aşılama ilavesi ile aşılama yapılmıştır. Kullanılan küreleştiricinin kimyasal bileşimi Tablo 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kullanılan sfero pikin kimyasal kompozisyonu

% C	% Si	% Mn	% S	% P
4.27	0.024	0.020	0.018	0.02

Tablo 4.2. Kullanılan çelik hurda kimyasal kompozisyonu

% C	% Si	% Mn	% S	% P
0.22	0.43	0.47	0.08	0.05

Tablo 4.3. Dökümde kullanılan küreleştirici FeSiMg bileşiğinin kimyasal kompozisyonu

% Si	% Mg	% Ca	% Al	% Re
44 - 48	5.2 - 5.8	1.4 - 1.8	0.4 - 1	0.4 - 0.8

Küreleştirme işleminden 15 saniye sonra aşılama yapılmıştır. Ergiyiğin % 0.1'i kadar aşılama yapan ergiyiğe ilave edilmiştir. 3 ayrı aşılama ardışık olarak aynı alaşıma ayrı potalarda ilave edilmiştir. Pota ağırlığı 25kg aşılama yapan ağırlığı 25 gr olarak alınmıştır. Yapılan dökümler Şekil 4.1c'de verilmiştir. Tablo 4.4.'te aşılama yapanların adları ve kimyasal kompozisyonları verilmiştir.

Tablo 4.4. Dökümlerde kullanılan 3 farklı aşılama yapanın kimyasal kompozisyonu(Aşılama yapan tane boyutu 1-1,5 mm arası)

	% Si	% Al	% Ca	% Ba	% Ce
Vaxon	73 - 78	1 - 1.5	0.5 - 1		
Barinoc	72 - 78	1.5 max	1 - 2	2 - 3	
Ultraseed	70 - 76	0.75 - 1.25	0.75 - 1.25		0.75 - 1.25

Dökümlerden sonra döküm numunelerinden spektral analiz yapılmış, ortalama değerler Tablo 4.5'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Döküm sonrası küresel grafitli dökme demirin kimyasal kompozisyonu

% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Al	% Mg
3.61	2.78	0.22	0.031	0.023	0.003	0.048

Karbon eşdeğerliği (CE)= %C + 1/3 (%Si + %P) formülü kullanılarak hesaplanmıştır. Bileşim , ötektik üstüdür ve mikroyapıda pirimer grafit kristalleri ile ötektik grafit kristalleri oluşabilecektir. Bulunan karbon eşdeğerliği ( CE ): 4.54'tür.

#### 4.5. Düktil Demir Numunelerin Hazırlanması

Düktil demir numunelerin döküm işlemi Ankara Sincan Organize Sanayi Sitesinde bulunan Alfa Döküm Tesislerinde yapılmıştır. Numuneler 1 tonluk devirmeli indüksiyonlu ocakta ergitilen sıvı metal ile kum kalıba döküm yöntemi ile elde edilmiştir. Aynı ocaktan artarda alınan potalarla sadece aşıluyıcı değiştirilerek döküm işlemi yapılmıştır.

Döküm sonrası kalıplar bozulup numuneler havada soğutulmuştur. Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra numuneler kesilerek ayrılmıştır. Metalografik inceleme için numuneler hazırlanmıştır.



## 4.6. DeneYler ve DeneYlerde Kullanılan Cihazlar

### 4.6.1. Metalografik inceleme

#### 4.6.1.1. Metalografik parlatma cihazı

DeneYlerde, Şekil 4.3 'de gösterilen Buehler marka parlatma cihazı kullanılmıştır.



Şekil 4.3. Metalografik parlatma cihazı (Sakarya Üni. Plazma Sprey Lab.)

#### 4.6.1.2. Numune hazırlama

Metalografik inceleme için döküm parçalarından numuneler kesilmiştir. Numune kesme işleminde daha homojen ve doğru sonuç eldesi için parçaların orta kesimlerinden numuneler alınmıştır.

#### **4.6.1.3. Zımparalama**

Kesilen numuneler sırasıyla 240-320-400-600-800 ve 1000 meşh sırasını takip eden SiC zımpara kağıdı ile sulu olarak zımparalanmıştır. Her bir zımparalama diskinde sadece önceki zımparalardan oluşan çizikleri gidermek için gerekli olan zaman kadar işleme tabi tutulmuştur.

#### **4.6.1.4. Parlatma**

Numuneler daha sonra sırasıyla 6µm, 3µm ve 1µm'lik elmas pasta yardımıyla çuha üzerinde en ufak çizgi kalmayacak şekilde ve grafit taneleri de iyice açılıncaya kadar parlatılmıştır.

#### **4.6.1.5. Dağlama**

Parlatılan numuneler %2' lik Nital ile dağlanmıştır (%2 Nitrik asit + %98 saf alkol). Dağlama 12-14 sn süre ile yapılmış ve su ile durulanan numune leke oluşumunu engellemek için iyice kurutulmuştur.

#### 4.6.1.6. Optik mikroskop cihazı

Numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.4'de gösterilen Zeiss marka AxioCam MRc5 model video kameralı optik mikroskop ile çekilmiştir. Çekilen resimler yine optik mikroskopta bulunan program yardımı ile ölçeklendirilmiştir.



Şekil 4.4. Optik mikroskop ve ekran görüntüsü (Sakarya Üni. Plazma Sprey Lab.)

#### 4.6.1.7. SEM cihazı

Derin dağlanmış düktil demir numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.5' de gösterilen ve Klimatik ortamda bulunan JEOL Marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak çekilmiştir.



Şekil 4.5. SEM cihazı (Sakarya Üniversitesi)

#### 4.6.2. Sertlik cihazı ve sertlik testi uygulaması

Numunelerin sertliklerinin ölçümünde Şekil 4.6' da gösterilen PROBE marka sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır. Numunelere 2.5mm çelik uçlu bilya ile 187.5kg yükde Brinel Sertlik testi uygulanmıştır.



Şekil 4.6. Sertlik test cihazı (ALFA döküm fabrikası/ Ankara)

Numunelerin sertliklerini doğru olarak ölçmek için test parçalarının iki yüzü birbirlerine paralel olacak şekilde taşlanmıştır. Böylece herhangi bir yanığa düşme engellenmiştir. Her numuneden en az 3 farklı noktadan sertlik değeri ortalaması alınarak sonuç saptanmıştır.

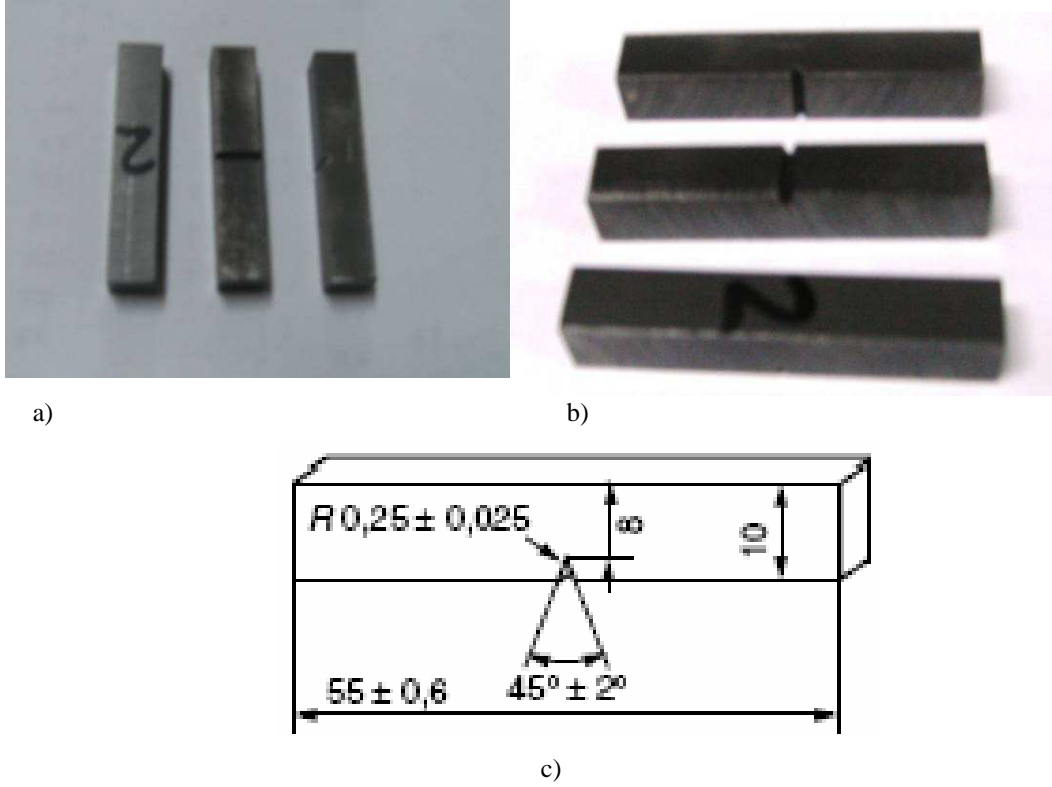
#### 4.6.3. Darbe cihazı ve darbe testi uygulaması

Numunelerin darbe enerjisini ölçmek için Şekil 5.10' da ALŞA Laboratuar Aletleri firmasının imali darbe cihazı kullanılmıştır. Darbe testi uygulanan numunelerin sıcaklıkları ve ortam sıcaklığı kontrol edilerek 20°C 'de yapılmıştır. 2mm, 3mm, 6mm, 12mm kalınlığındaki numunelerden 3 adet darbe test numunesi yapılmıştır. Numuneler kırıldıktan sonra çıkan sonuçların ortalaması alınarak nihai sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Darbe test cihazı (ALFA döküm fabrikası/ Ankara)

Bu çalışmada, düktil dökümlerin 2mm, 3mm, 6mm ve 12mm kalınlığındaki numunelerinden Şekil 5.11’de gösterildiği gibi hazırlanmış darbe numuneleri test edilmiştir. Deney esnasında numune sıcaklıkları oda sıcaklığında (20°C) tutulmuştur.

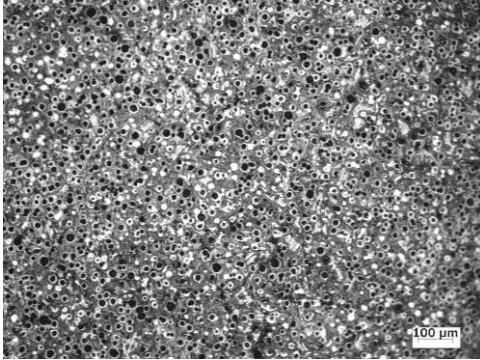


Şekil 4.8. Darbe test numunelerinin a) üstten, b) yandan, c) şematik gösterimi

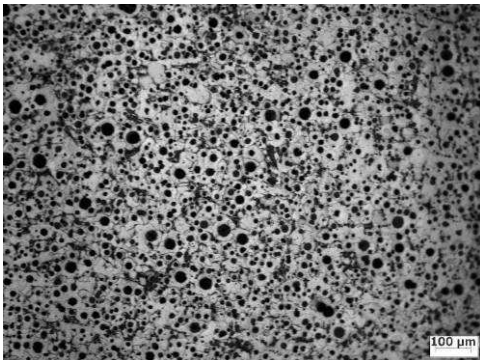
## BÖLÜM 5.DENEYSEL SONUÇLAR

### 5.1. Vaxon (Si-Al-Ca) Aşlayıcı Kullanılarak Üretilmiş Düktil Demirlerin Mikroyapısı

Dağlanmış düktil demir numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.1-5.4'te verilmiştir. Mikroyapı çekimleri 100 büyütmede yapılmıştır.

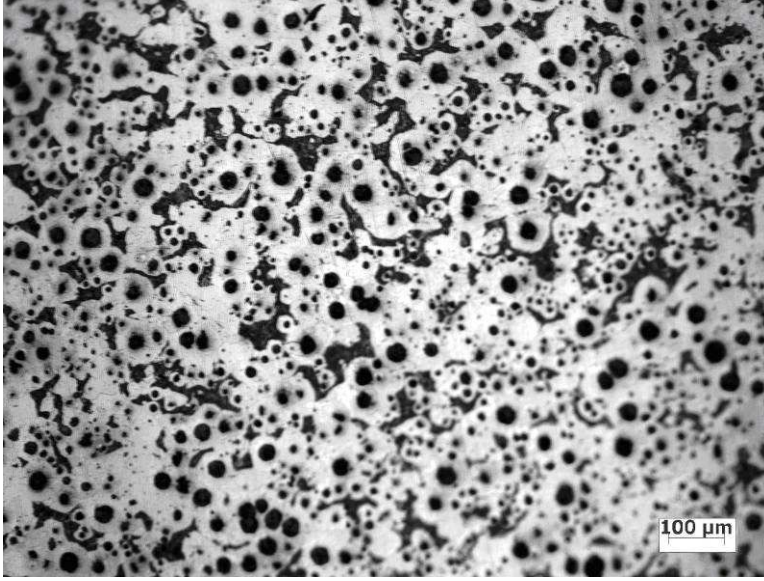


Şekil 5.1. 2mm kalınlığındaki Vaxon aşlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı

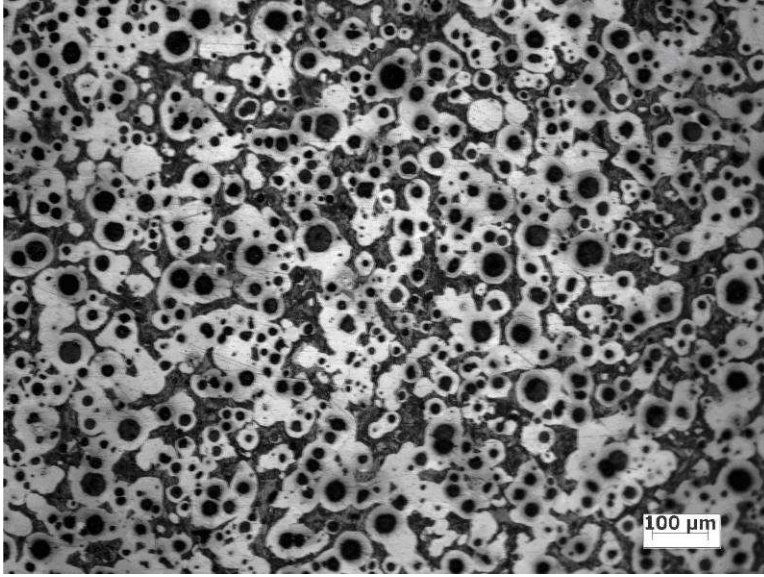


Şekil 5.2. 3mm kalınlığındaki Vaxon aşlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı





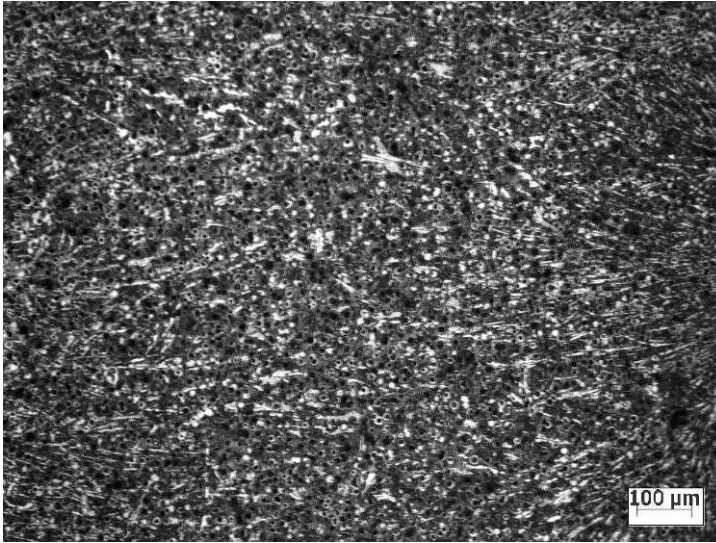
Şekil 5.3. 6mm kalınlığındaki Vaxon aşıl原因ıcı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı



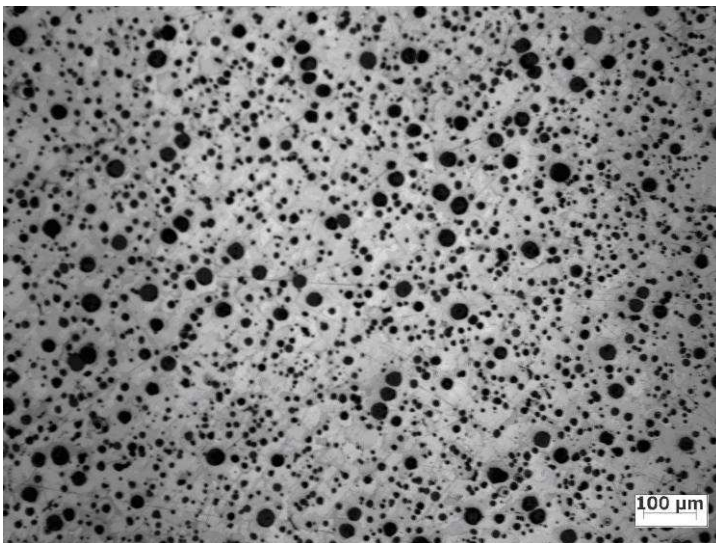
Şekil 5.4. 12mm kalınlığındaki Vaxon aşıl原因ıcı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı

## 5.2.Barinoc (Si-Al-Ca-Ba) Aşlayıcı Kullanılarak Üretilmiş Düktil Demir Numunelerin Mikroyapısı

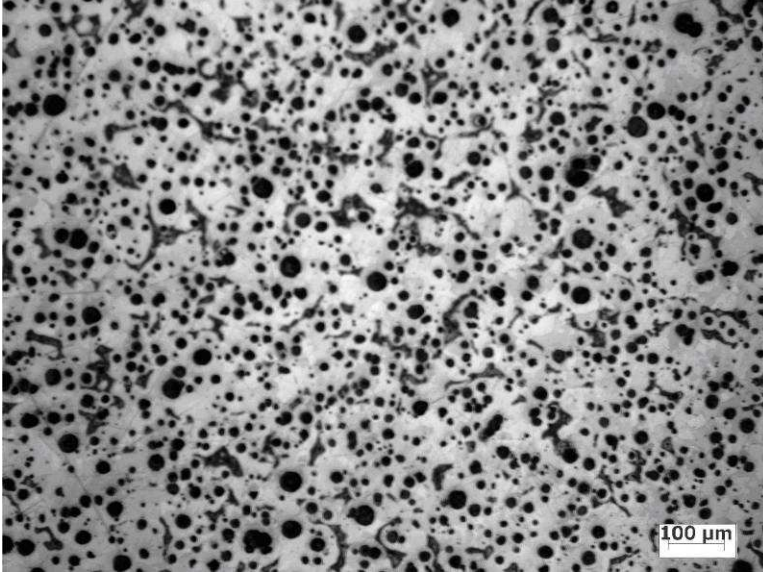
Dağlanmış düktil demir numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.5-5.8’de verilmiştir.



Şekil 5.5. 2mm kalınlığındaki Barinoc aşlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı



Şekil 5.6. 3mm kalınlığındaki Barinoc aşlayıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı



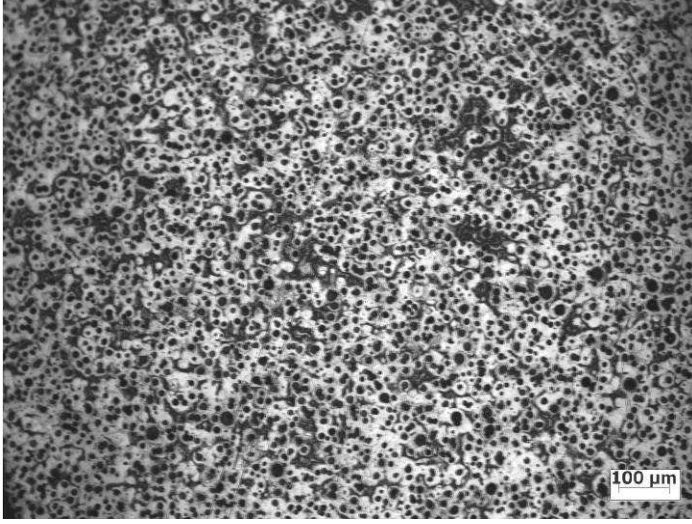
Şekil 5.7. 6mm kalınlığındaki Barinoc aşıl原因ıcı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı



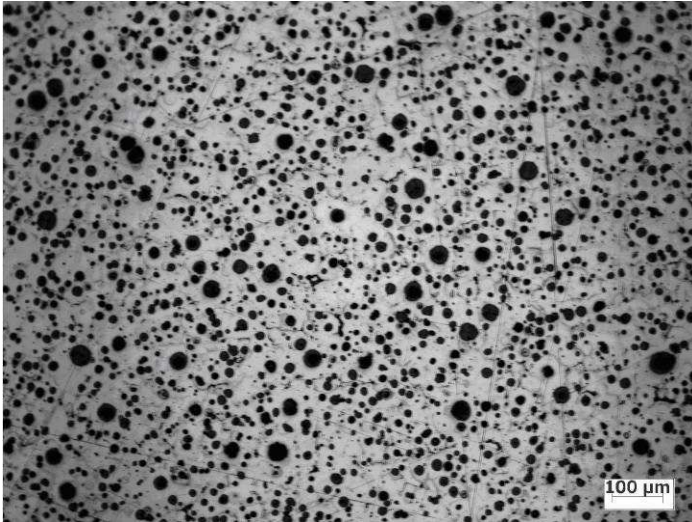
Şekil 5.8. 12mm kalınlığındaki Barinoc aşıl原因ıcı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı

### 5.3.UltraSeed (Si-Al-Ca-Ce) Aşılavıcı Kullanılarak Üretilmiş Düktil Demir Numunelerin Mikroyapısı

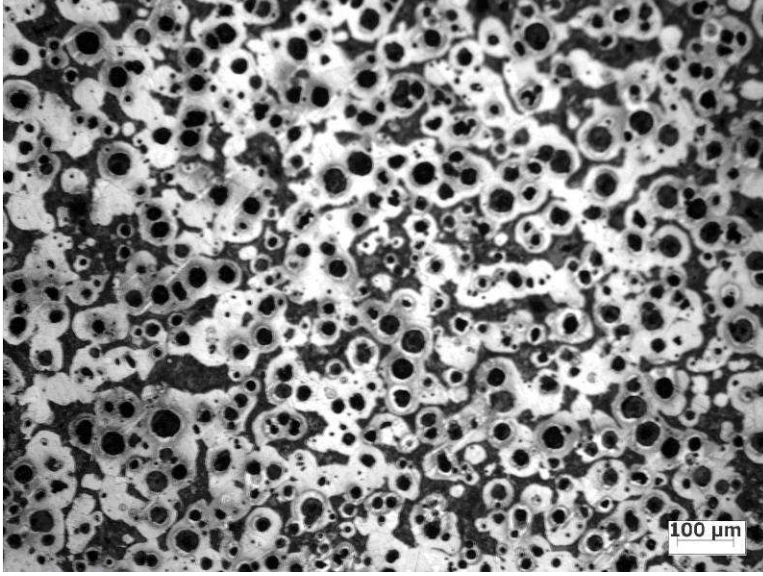
Dağlanmış düktil demir numunelerin mikroyapı fotoğrafları Şekil 5.9-5.12’de verilmiştir.



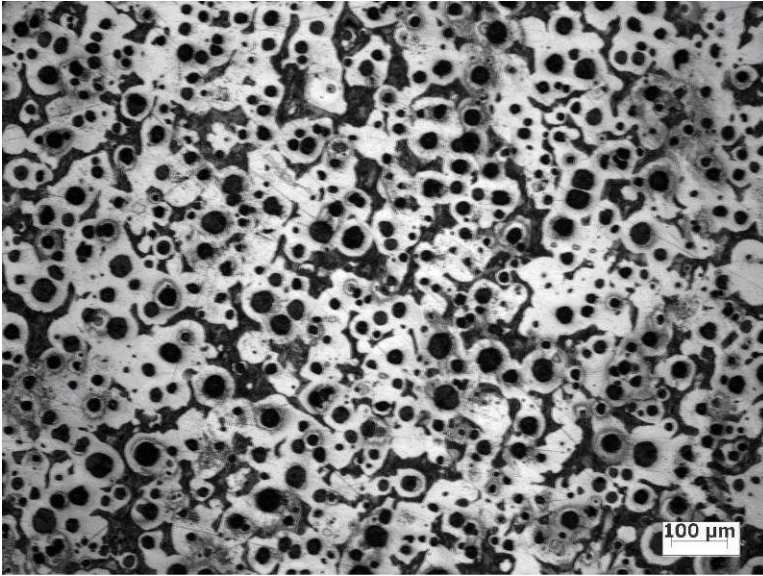
Şekil 5.9. 2mm kalınlığındaki UltraSeed aşılavıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı



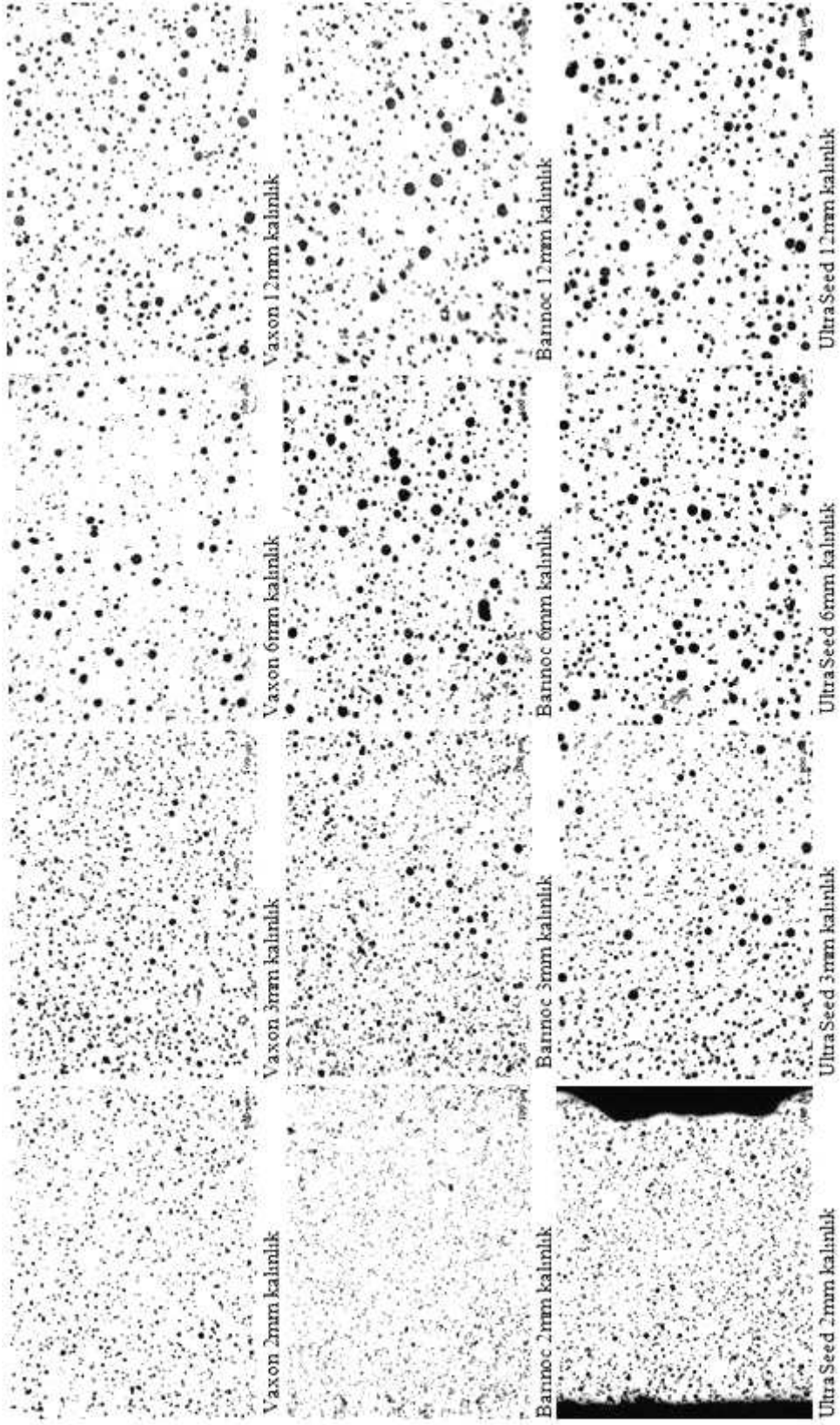
Şekil 5.10. 3mm kalınlığındaki UltraSeed aşılavıcısı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı



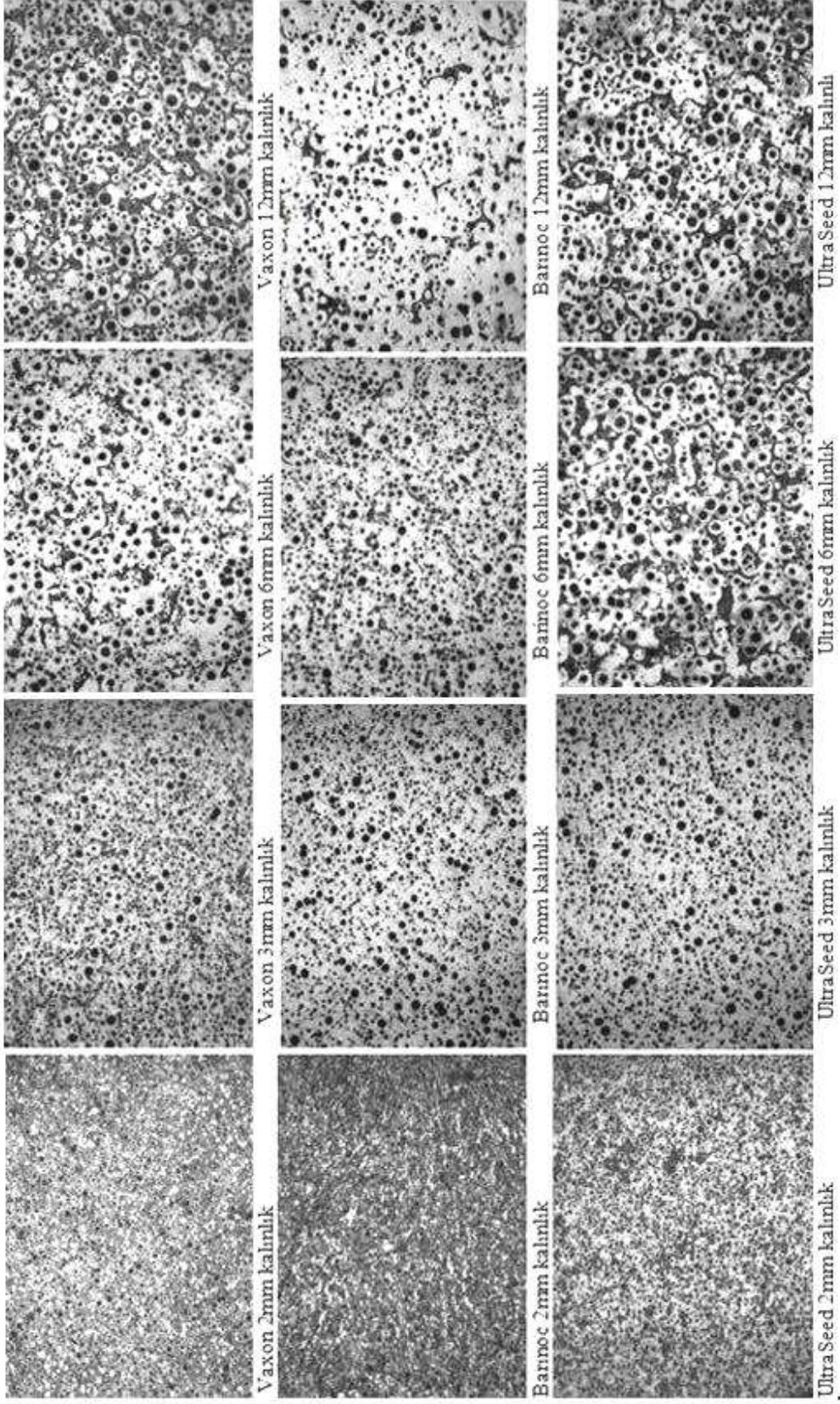
Şekil 5.11. 6mm kalınlığındaki UltraSeed aşıl原因ıcı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı



Şekil 5.12. 12mm kalınlığındaki UltraSeed aşıl原因ıcı kullanılmış döküm numunesinin mikroyapısı



Şekil 5.13. Vaxon, Bannoc, UltraSeed aşılayıcıları ile üretilmiş numunelerinin mikroyapı karakterizasyonu (dağlamamış X100)

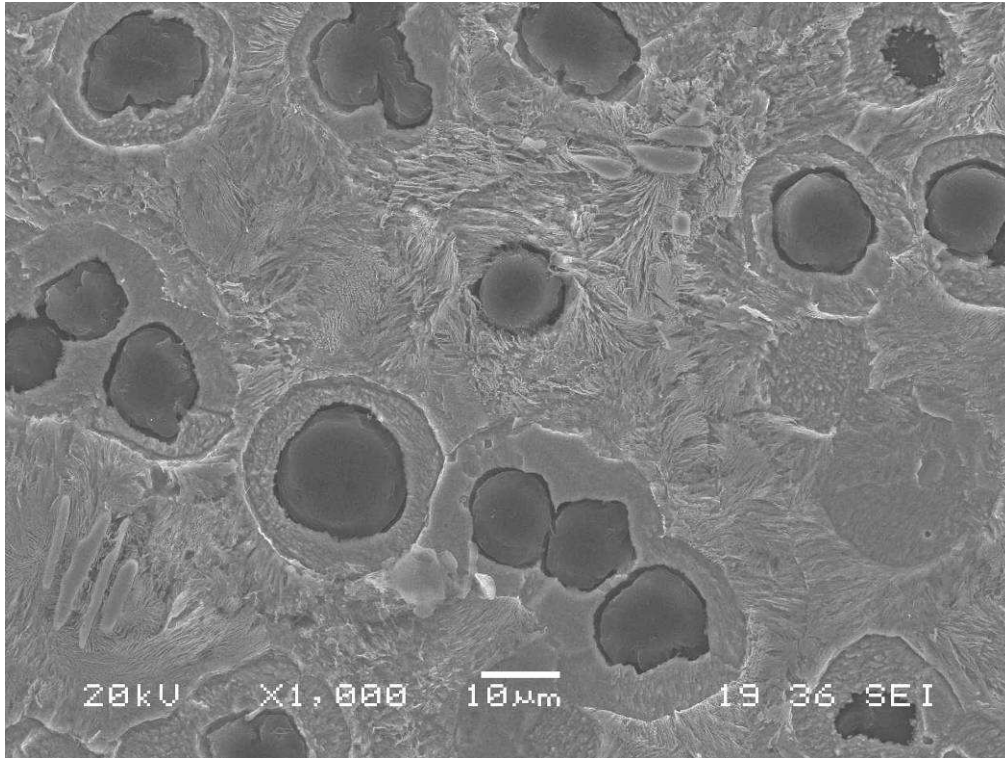


Şekil 5.14. Vaxon, Barinoc, UltraSeed aşlayıcıları ile üretilmiş numunelerinin mikroyapı karakterizasyonu (dağlanmış X100)

Mukayese amacı ile dağlanmamış düktil demir numuneler kalınlık ve aşılayıcıya bağlı olarak birlikte resimlenmişlerdir. Bu yolla, aynı büyütmede yapı elemanları (özellikle grafit) dağılımını , boyut ve hacim oranları mukayese edilebilmektedir. şekil 5.13’de dağlanmamış numunelerdeki grafit yapı ve dağılımları görölmektedir.

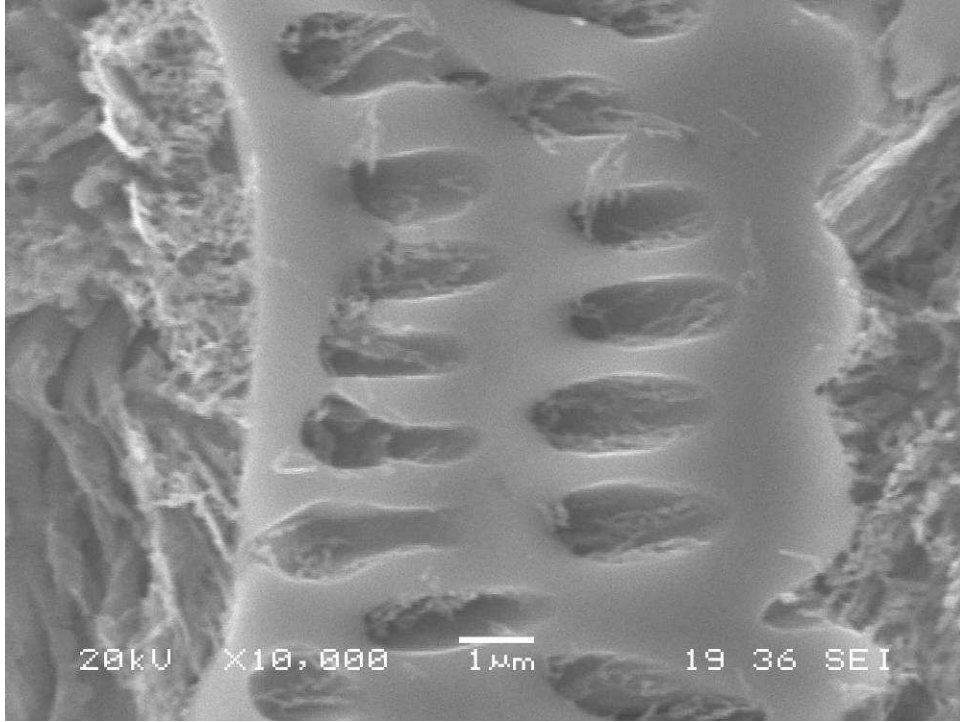
şekil 5.14’te ise dağlanmış numulerde grafitte ilave olarak ferrit ve perlit oluşumlarını da vermektedir.

2mm’lik kesitlerde yapı elemanları çok ince dağılım gösterdikleri için seçilememektedir. Bu numuneler SEM’de derin dağlama yapılarak incelenmiştir. Böylece , grafit, sementit ve haleler daha rahat seçilebilmiştir. şekil 5.15-5.19’da SEM fotoğrafları verilmiştir.

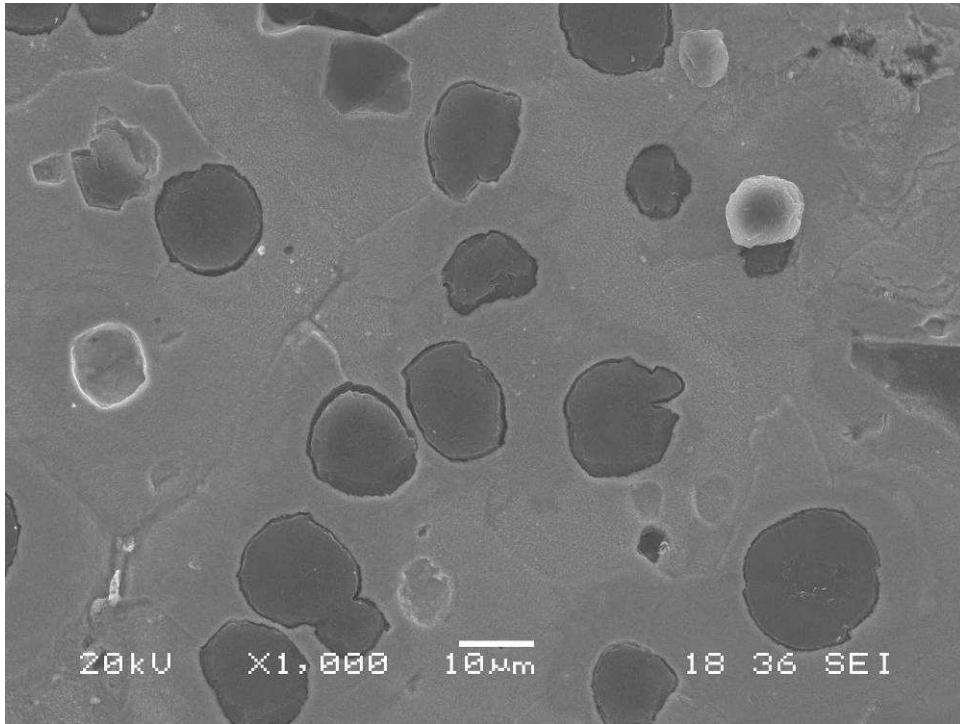


şekil 5.15. Vaxon ile aşılanmış 2mm kalınlığındaki numunenin SEM göröntüsü

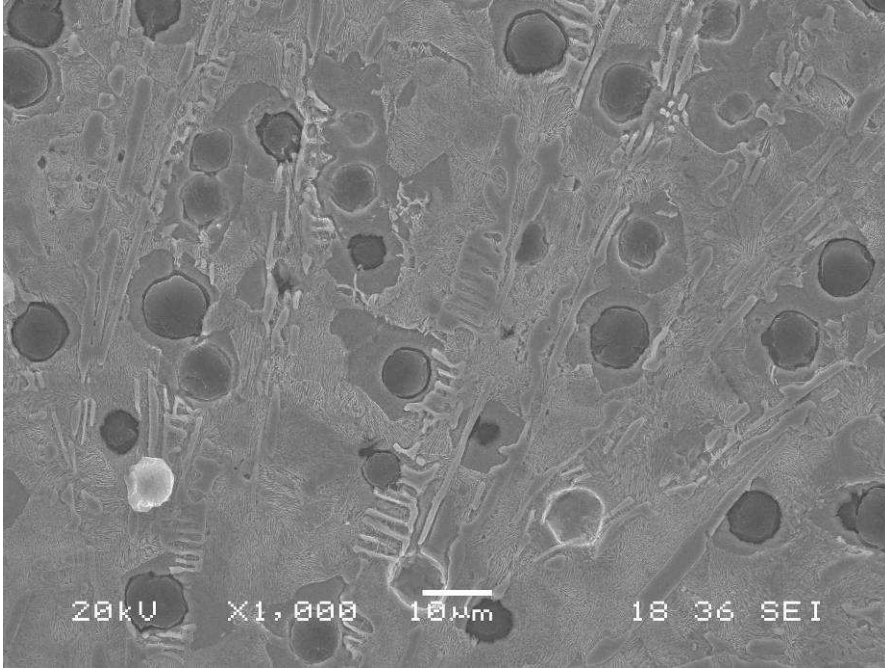




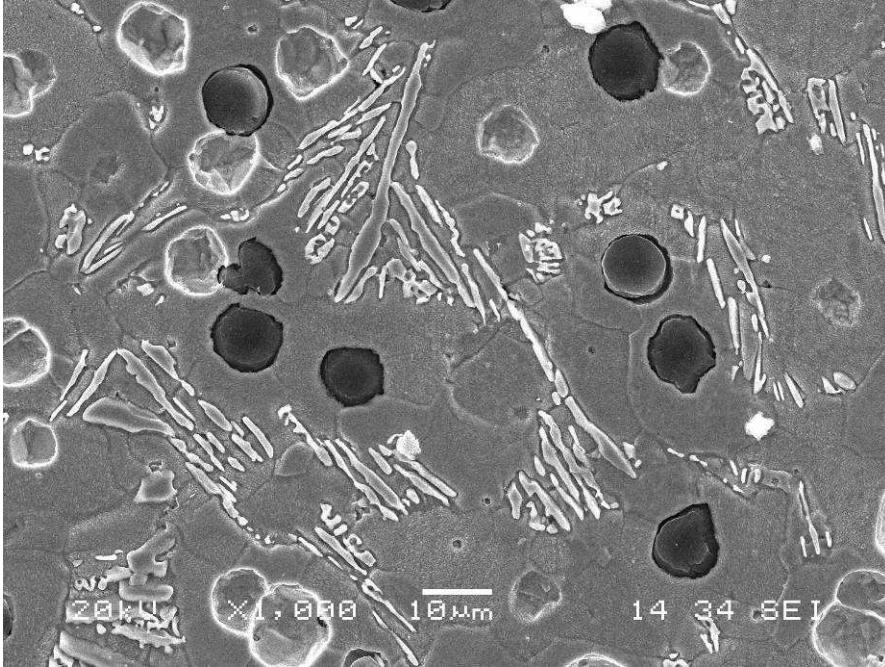
Şekil 5.16. Vaxon ile aşlanmış 2mm kalınlığındaki numunede bulunan ledeburitin SEM görüntüsü



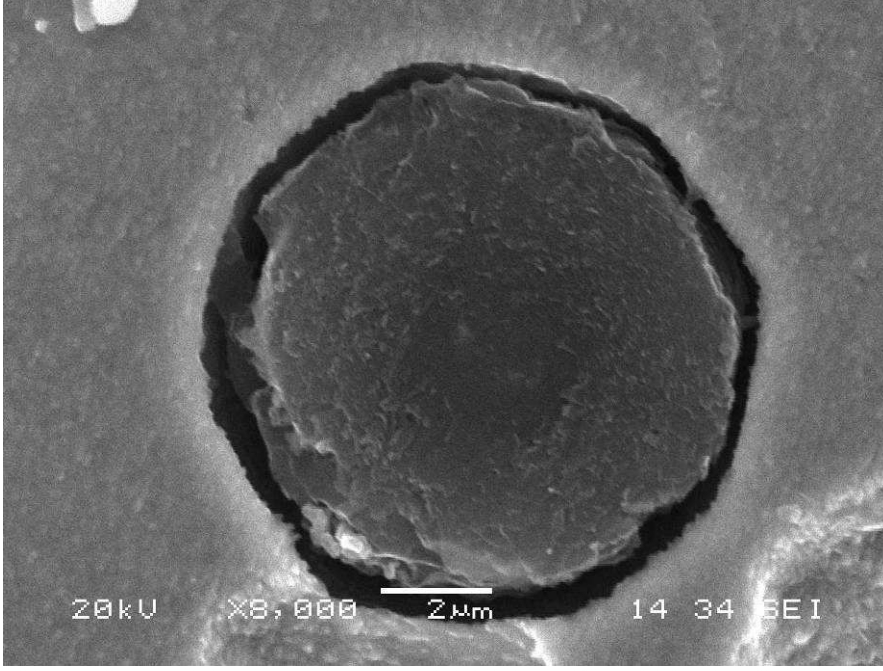
Şekil 5.17. Vaxon ile aşlanmış 3mm kalınlığındaki numunenin SEM görüntüsü



Şekil 5.18. Barinoc ile aşlanmış 2 mm kalınlığındaki numunenin SEM görüntüsü



Şekil 5.19. Ultraseed ile aşlanmış 2mm kalınlığındaki numunenin SEM görüntüsü



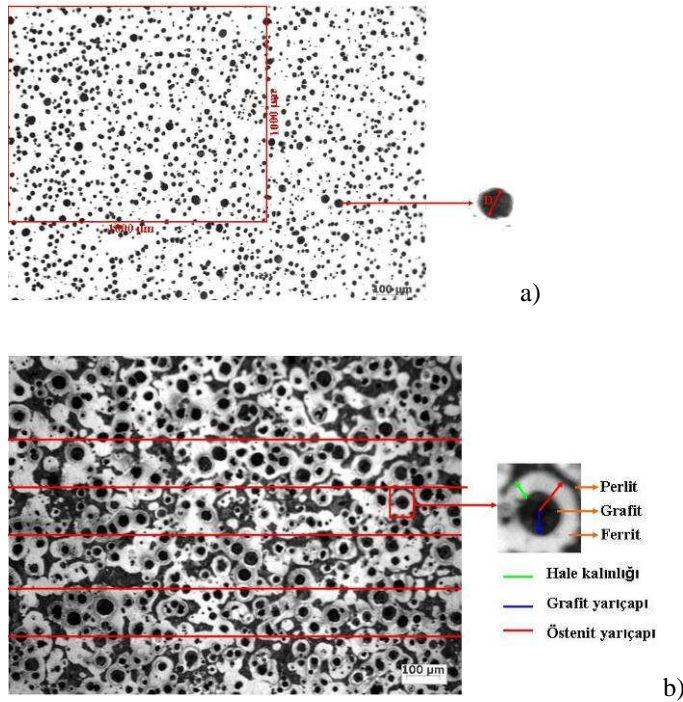
Şekil 5.20.Ultraseed ile aşılansmış 2mm kalınlığındaki numunedeki grafit küresi

Derin dağlanmış numelerin SEM cihazı ile metalografik incelenmesi sonucu her üç aşılaryıcı ile aşılansan malzemelerin 2mm kalınlığındaki numelerinde sementit oluşumuna rastlanmıştır. 2mm kalınlığındaki numuneler içerisinde en fazla sementit oluşumuna Barinoc ile aşılansan numunede rastlanmıştır. Şekil 5.15-5.19’da 2mm ve 3mm kalınlığındaki numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Vaxon ile aşılansan 3mm kalınlığındaki numunede sementit oluşumuna rastlanmamıştır. Şekil 5.20’de Ultraseed ile aşılansmış 2mm kalınlığındaki numunenin mikroyapısında bulunan grafit küresinin SEM görüntüsü verilmiştir.

#### 5.4. Döküm Numunelerinin Mikroyapı Karakterizasyonu

Dağlanmamış numunelerin mikroyapı fotoğraflarından yaralanılarak Şekil 5.21.a'da görüldüğü gibi ortalama küre sayısı bulunmuştur. Şekil 5.21. b' de görüldüğü üzere faz yüzdeleri (ferrit, perlit, grafit, sementit) saptayabilmek için çizgi metodu kullanılmıştır. Bir adet çizgi üzerine düşen faz uzunlukları teker teker ölçülerek yüzde değerleri bulunmuştur. 5 çizgi içinde bulunan bu değerlerin ortalamaları alınarak gerçek değerlere ulaşılmıştır (ferrit %73, perlit %14, grafit %13.).

$\gamma$  hale kalınlığı ve ostenit yarıçapının grafit yarıçapına ( $r^{\gamma}/r^g$ ) oranı dağlamalı resimlerden ölçülebilir. Ölçüm sistemi Şekil 5.21.b' de gösterilmiştir. Bu ölçümler en az 10 adet yapı için tekrarlanır ve bulunan sonuçların ortalaması alınarak gerçek değerler saptanır ( $\gamma$ hale kalınlığı = 21  $\mu\text{m}$ ,  $r^{\gamma}/r^g = 2,14$ ).



Şekil 5.21. Mikroyapı karakterizasyonu

- Dağlanmamış düktil demir numunesi ve ölçümler
- Dağlanmış düktil demir numunesi ve ölçümler

Bütün döküm numunelerinden elde edilmiş ferrit, perlit, grafit, sementit yüzdeleri, küresellik yüzdesi, küre sayısı ve ortalama grafit çapı Tablo 5.1-5.3'de verilmiştir. Ölçüm sonuçlarına göre çizilmiş grafikler sırasıyla Şekil 5.22-5.26'da verilmiştir.

Tablo 5.1. Vaxon aşılacağı kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri

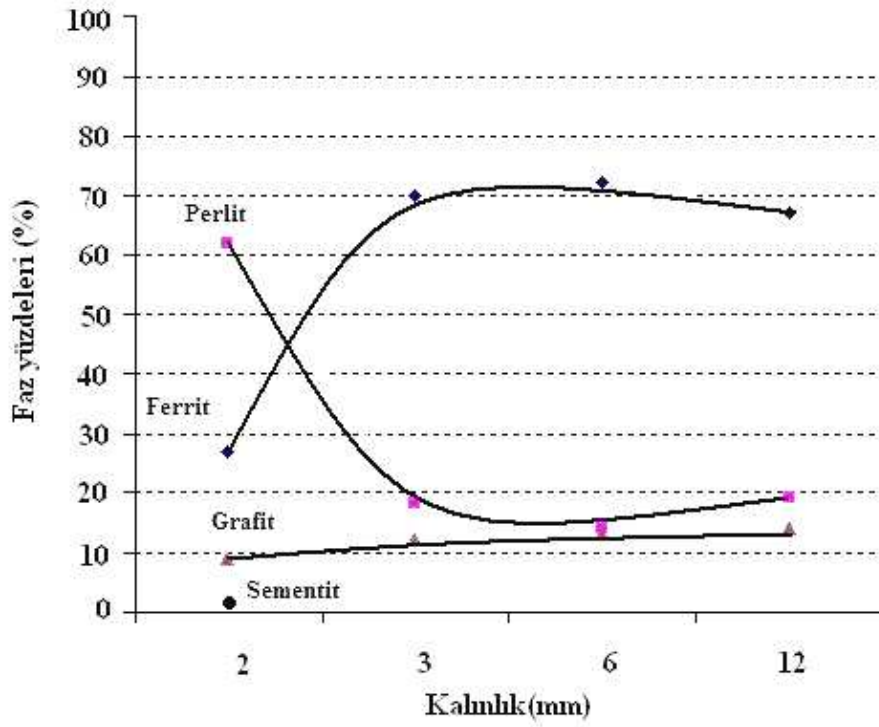
Kalınlık (mm)	Ferrit (%)	Perlit (%)	Grafit (%)	Sementit (%)	Küresellik (%)	Ortalama grafit çapı (µm)	Küre sayısı (küre/mm <sup>2</sup> )	γ (hale) kalınlığı (µm)	$\Gamma/\Gamma_g$
2	27	62	9	2	94	7	919	5	1.25
3	70	18	12	-	93	8	721	9	1.66
6	72	14	13	-	93	14	623	17	1.86
12	67	19	14	-	92	18	496	24	2.07

Tablo 5.2. Barınoç aşılacağı kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri

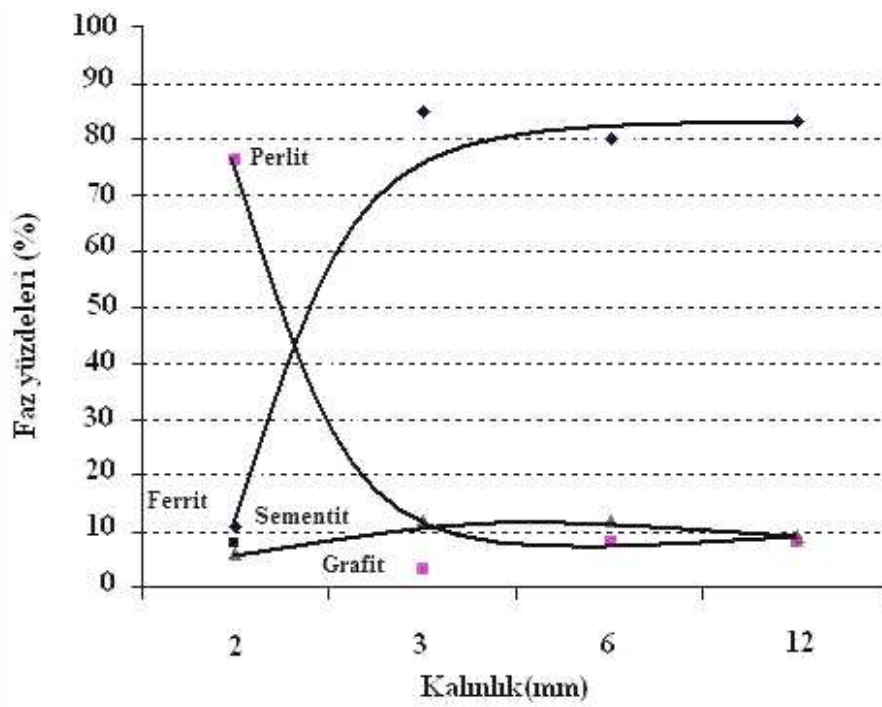
Kalınlık (mm)	Ferrit (%)	Perlit (%)	Grafit (%)	Sementit (%)	Küresellik (%)	Ortalama grafit çapı (µm)	Küre sayısı (küre/mm <sup>2</sup> )	γ (hale) kalınlığı (µm)	$\Gamma/\Gamma_g$
2	11	75	6	8	95	6	1415	4	1.14
3	85	3	12	-	95	8	1189	10	1.92
6	80	8	12	-	93	10	679	21	2.18
12	83	8	9	-	91	15	411	27	2.25

Tablo 5.3. UltraSeed aşılacağı kullanılan döküm numunelerinin faz yüzdeleri ve grafit özellikleri

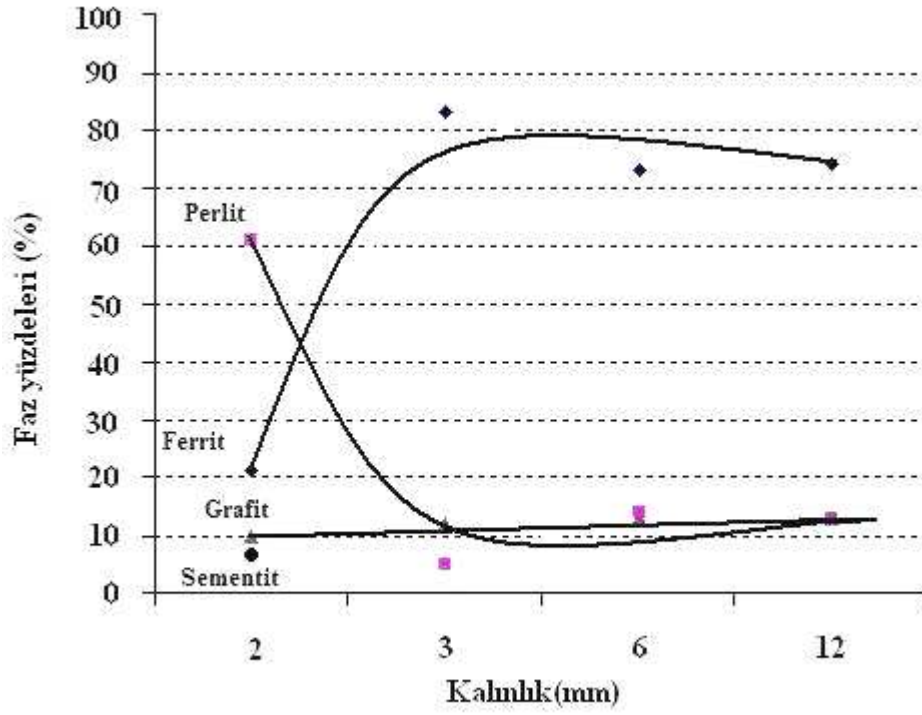
Kalınlık (mm)	Ferrit (%)	Perlit (%)	Grafit (%)	Sementit (%)	Küresellik (%)	Ortalama grafit çapı (µm)	Küre sayısı (küre/mm <sup>2</sup> )	γ (hale) kalınlığı (µm)	$\Gamma/\Gamma_g$
2	21	62	10	7	95	8	1368	6	1.18
3	83	5	12	-	94	10	838	14	2.0
6	73	14	13	-	92	17	472	21	2.14
12	74	13	13	-	90	19	298	25	2.17



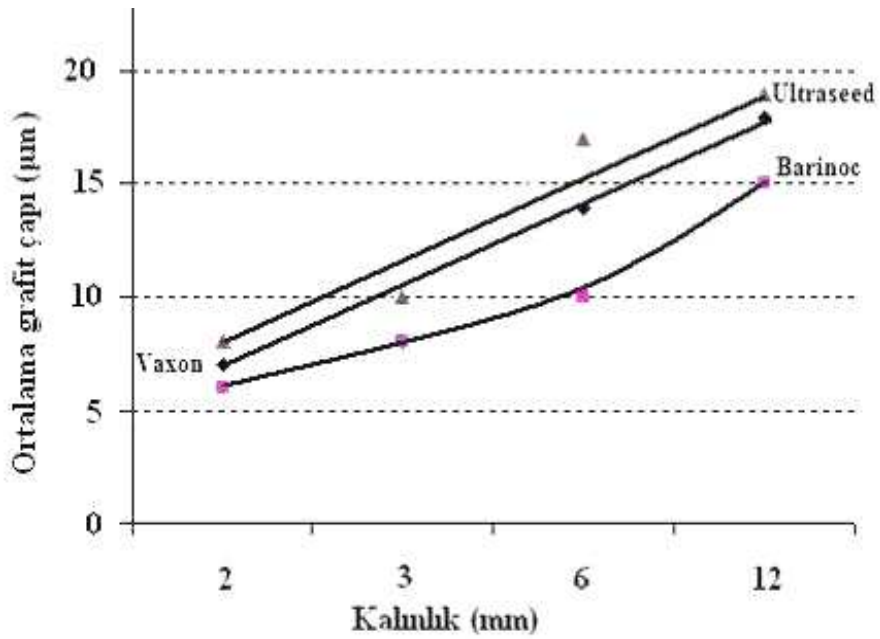
Şekil 5.22. Vaxon ile aşlanmış numunelerin ferrit, perlit ve grafit yüzdelere göre kalınlıkla değişimini gösteren grafik



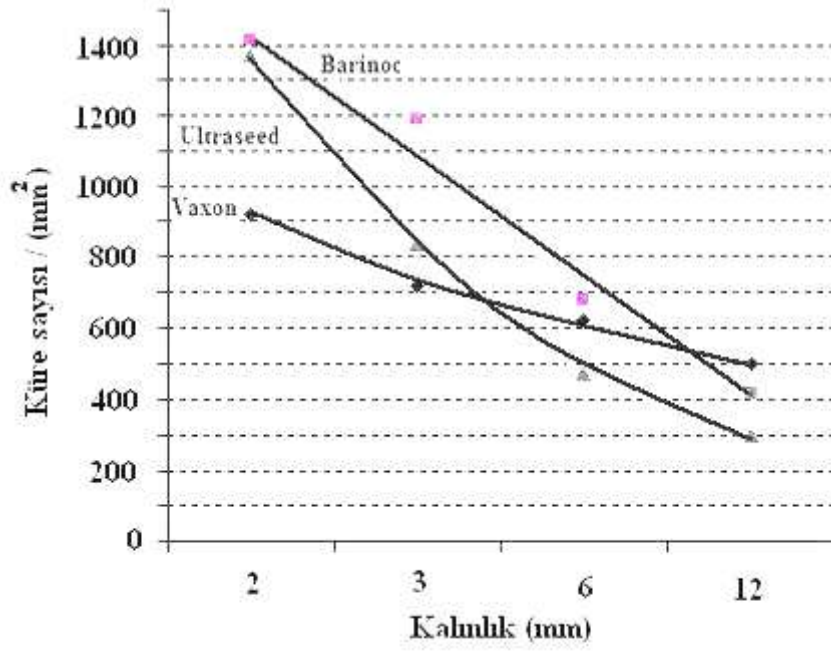
Şekil 5.23. Barinoc ile aşlanmış numunelerin ferrit, perlit ve grafit yüzdelere göre kalınlıkla değişimini gösteren grafik



Şekil 5.24. UltraSeed ile aşınmış numunelerin ferrit, perlit ve grafit yüzdelерinin şematik olarak gösterimi



Şekil 5.25. Vaxon, Barinoc ve UltraSeed ile aşınmış numunelerin ortalama grafit çaplarının şematik gösterimi



Şekil 5.26. Kalınlık değişimi ile küresayısı değişiminin şematik gösterimi

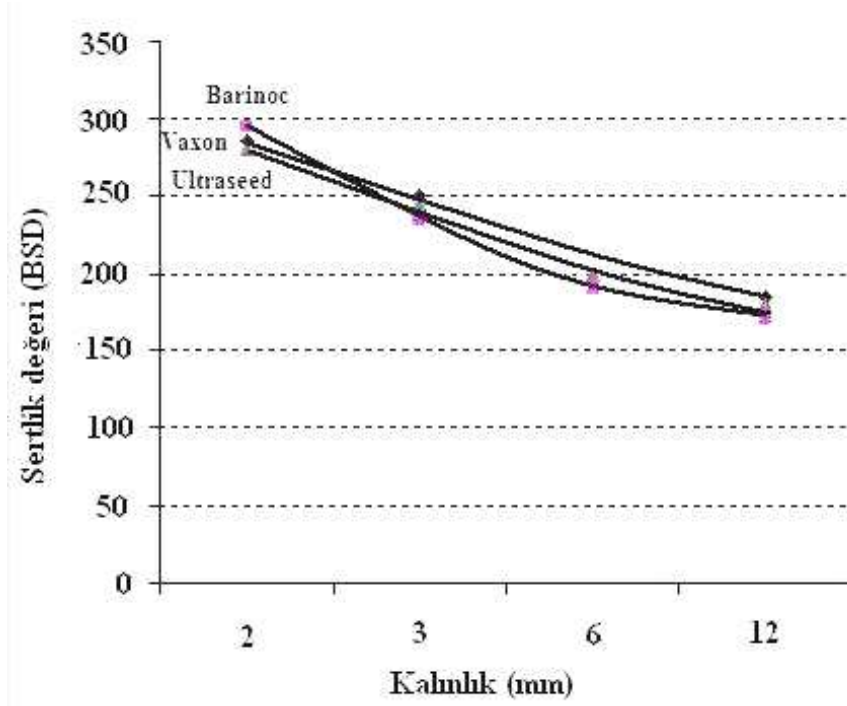
### 5.5. Sertlik (BSD) Deneyleleri

3 farklı aşılama ile aşılama parçalarının sertlik değerleri genel eğilim olarak kalınlık artışı ile düşmüştür. Elde edilen sertlik değerleri Tablo 5.4'te ,kalınlık değişimi ile sertliğin değişim grafiği ise Şekil 5.27'de verilmiştir. Küre sayısına bağlı olarak sertlik değişimi ise Şekil 5.28'de verilmiştir.

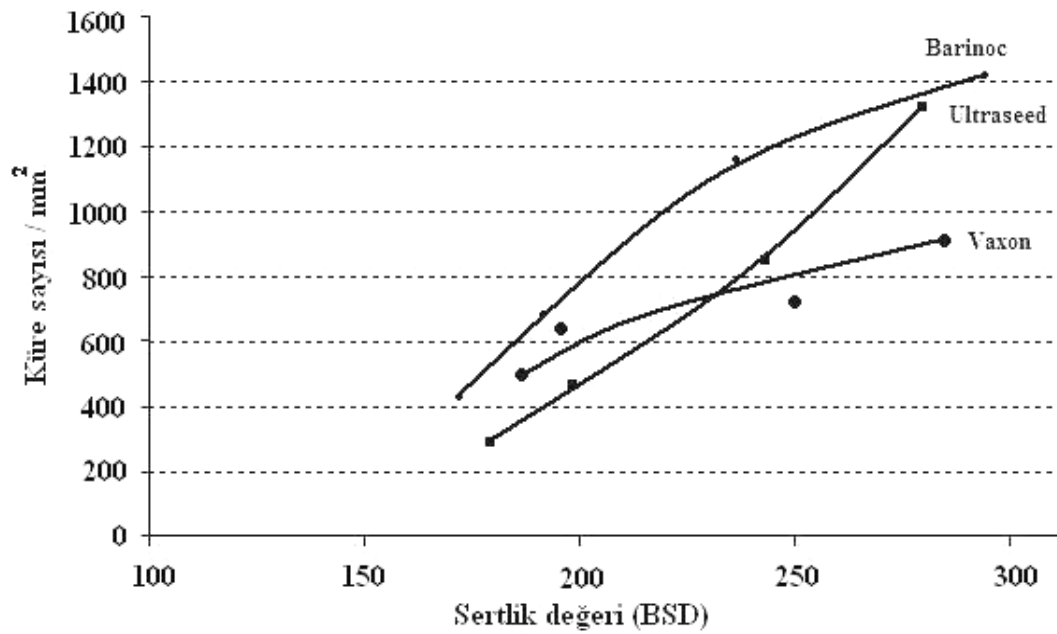
Tablo 5.4. Vaxon,Barinoc ve UltraSeed ile aşılama döküm numunelerinin sertlik değerleri (BSD)

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





Şekil 5.27. Kalınlık değişimi ile numunelerin sertlik değerlerinin şematik gösterimi



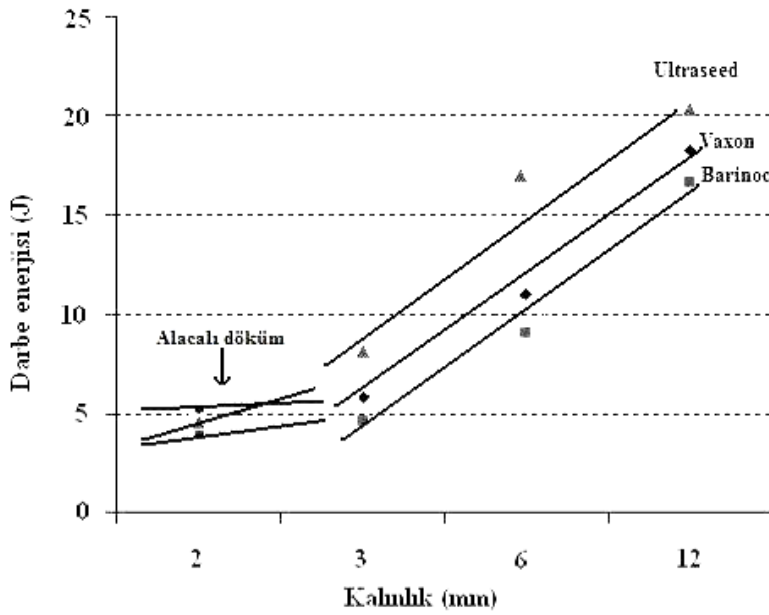
Şekil 5.28. Küre sayısına bağlı olarak sertlik değerinin değişiminin şematik gösterimi

## 5.6. Darbe Deneylemleri

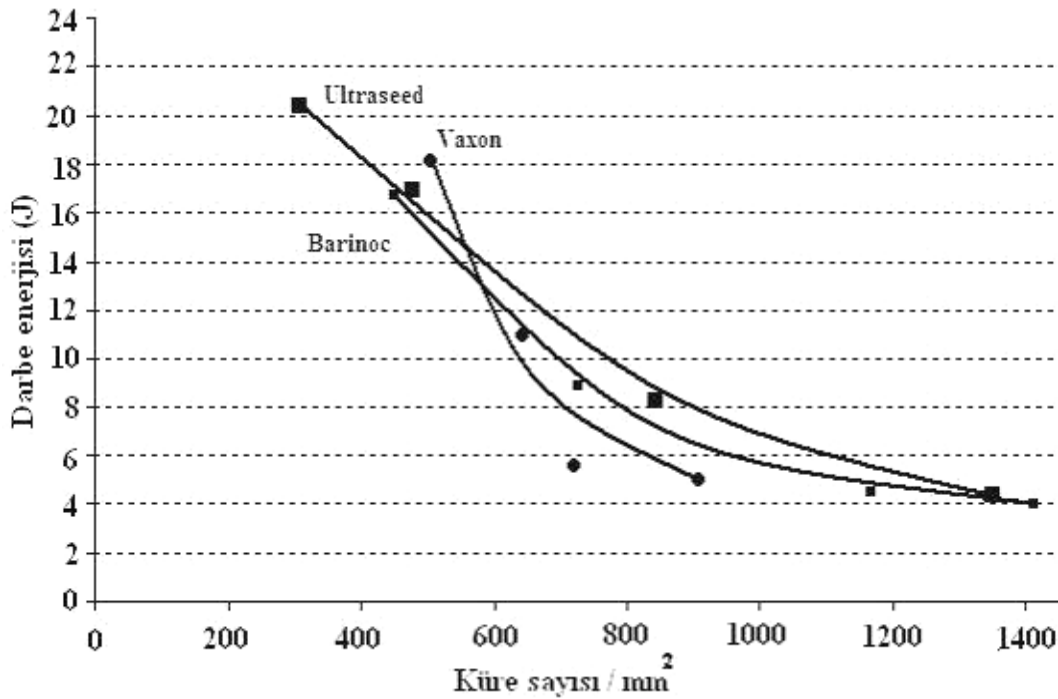
Vaxon, Barinoc ve UltraSeed aşıluyıcıları ile üretilmiş dökümlerden alınan 2mm, 3mm ,6mm ve 12mm kalınlığındaki numunelerin darbe enerjisi değlerleri aşağıdaki gibidir (Tablo 5.5). Şekil 5.29 ve 5.30 kalınlık ve küre sayısına göre darbe enerjisi değışimini vermektedir.

Tablo 5.5. Vaxon, Barinoc ve UltraSeed ile aşıluyıcı kullanılmış numunelerin kalınlık değışimi ile darbe enerjisinin değışimi

Kalınlık	Darbe Enerjisi(J)/cm <sup>2</sup> Vaxon aşıluyıcı kullanılmış	Darbe Enerjisi(J)/cm <sup>2</sup> Barinoc aşıluyıcı kullanılmış	Darbe Enerjisi(J)/cm <sup>2</sup> UltraSeed aşıluyıcı kullanılmış
12mm	18.2	16.6	20.3
6mm	11.0	9.1	16.7
3mm	5.8	4.6	8.1
2mm	5.1	4.0	4.5



Şekil 5.29. Vaxon, Barinoc ve UltraSeed aşıluyıcılar kullanılarak üretilmiş dökümlerden alınan numunelerin darbe enerjisi değlerinin şematik gösterimi



Şekil 5.30. Küre sayısına bağlı olarak darbe enerjisinin değişimi

### 5.7. Sonuçların İrdelenmesi

Vaxon, Barinoc ve UltraSeed aşılama cihazları kullanılarak üretilen dökümlerde sabit kimyasal kompozisyon, sabit ortam şartları ve eşit tane boyutunda aşılama ortamı sağlanmıştır. Farklı kesit kalınlıklarının yapı ve mekanik özelliklerde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir. Değişimlerin daha iyi anlaşılabilmesi için numuneler üzerinde metalografik ölçümler yapılmış ve mekanik testler ile ilişkilendirilmiştir.

Deneyde kullanılan üç aşılama cihazı içerisinde Si, Al ve Ca elementleri ortak element olup bileşimdeki miktarları da birbirine çok yakındır. Aşılama cihazları arasındaki farkı oluşturan Barinoc aşılama cihazının içerdiği %2-3 Ba ve UltraSeed aşılama cihazının içerdiği %0.75-1.25 Ce elementleridir.

Yapılan metalografik incelemeler sonucu en yüksek küre sayısı Ba elementi içeren Barinoc aşıluyıcısı ile aşılunan numulerde tespit edilmiştir. Daha sonra sırasıyla UltraSeed ve Vaxon aşıluyıcıları kullanılan numuneler gelmektedir.

Kalınlığın azalmasıyla birlikte küre sayısı, perlit oranı ve sertlik artmıştır. Numuneler kalından inceye doğru tek tek değerlendirildiğinde, ortalama grafit çapında küçülme olduğu görülmüştür. Kalınlık (veya modül) azaldıkça soğuma daha kısa sürede gerçekleşmekte yani malzeme daha hızlı katılaşmaktadır. Bu sebeple test edilen numunelerde kalınlık azaldıkça ortalama grafit çapında da küçülme gerçekleşmiştir. Ayrıca küre sayısı arttıkça küresellikte artmaktadır.

Mempey ve Xu [28] tarafından yapılan çalışmada 3mm kalınlığında küresel grafitli dökme demir yapısını sementit oluşumu meydana gelmeden üretebilmek için mm<sup>2</sup>'de 1000 küreden daha fazla küre olması gerektiğini belirtmişlerdir.

C. Labrecque ve M.Gagne [28] tarafından yapılan çalışmada aşılmanın iyi yapılması durumunda mm<sup>2</sup>'de 500- 700 küre bulunması durumunda dökümlerde sementit oluşumu meydana gelmemektedir.

P. David ve arkadaşlarının [29] ince cidarlı düktil demirlerin'nin mekanik özellikleri-karbon eşdeğerliği ve grafit dağılımının etkisi ile ilgili yaptığı çalışmada 5mm altındaki kalınlıklarda düktil dökme için ötektiküstü bileşime sahip şarj kullanılması gerektiğini belirtmiştir. CE değerinin 4.6-4.9 civarında olması vurgulanmıştır. Literatürde verilen sonuçlar mevcut çalışma sonuçları ile örtüşmektedir.

Borrajo ve arkadaşlarının [30] ince cidarlı düktil demirlerde serbest grafit tanelerinin sayısı ve şekli ile ilgili yaptığı çalışmada grafit küre sayısı arttıkça küreselliğinde arttığını belirtmiştir. Elde ettiğimiz sonuçlarımız bu literatür bilgisi ile uyumludur.

A. Javaid ve arkadaşları [31] tarafından ince cidarlı küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini etkileyen mikroyapısal faktörlerin değerlendirilmesi ile ilgili yapılan çalışmada artan kalınlıkla beraber ferrit oranının ve ortalama grafit çapının arttığı, kalınlığın azalmasıyla küre sayısının ve sementit miktarının arttığı belirtilmiştir. 1,5mm kalınlığındaki numunede  $\text{mm}^2$ 'de ortalama 2500, 2mm kalınlığındaki numunede 2200, 3mm kalınlığındaki numunede ortalama 1300 küre olduğu belirtilmiştir. Elde ettiğimiz sonuçlarımız bu literatür bilgisi ile uyumludur.

E. Fras ve arkadaşlarının [32] küre sayıları ile ilgili yaptıkları çalışmalar döküm plaka kalınlığı ile küre sayısı arasında sistematik bir ilişki vermiştir. 6mm kalınlığındaki plakada  $\text{mm}^2$ ' de 270 küre bulmuştur. Doğal olarak aynı şarj için artan plaka kalınlığıyla küre sayısı düşmektedir. Örneğin 22mm kalınlıkta küre sayısı  $\text{mm}^2$ ' de 104'e düşmüştür.

R.C. Dommarco ve arkadaşları [33] tarafından yapılan farklı matris mikroyapılarına sahip yüksek küre sayılı küresel grafitli dökme demirlerin aşınma direnci ile ilgili yaptıkları çalışmada 3mm kalınlıktaki numunede  $\text{mm}^2$ ' de ortalama 1150-1450 küre olduğu belirtilmiştir.

Her üç aşılama ile aşılama numuneler içinde ortalama grafit çapı en yüksek Ultraseed aşılama (Ce) kullanılan numunede çıkmıştır.(Şekil 5.25)

Numunelerde yapılan sertlik testi sonuçlarına bakıldığında kalınlık azaldıkça (veya modül) sertliğin arttığı gözlenmiştir. Kalınlık azaldıkça oluşan perlit daha ince ve sıkı yapılı olmakta ve malzemenin sertliğinin artmasına yol açmaktadır. Sertliğin artmasına neden olan diğer bir etki kalınlık azaldıkça oluşan sementittir.

Vaxon, Barinoc ve UltraSeed aşılama cihazları kullanılarak üretilen dökümlerin 2mm, 3mm, 6mm ve 12mm kalınlığındaki parçalarından hazırlanan darbe numunelerine uygulanan darbe testi sonuçlarına bakıldığında kalınlık azaldıkça darbe enerjisi değerinin düştüğü gözlemlenmiştir.

Literatürde [34] artan grafit küre sayısının darbe direncini düşürdüğü belirtilmiştir. 2mm, 3mm, 6mm ve 12mm kalınlığındaki üç farklı aşılama cihazı ile üretilen dökümlerden hazırlanan darbe numunelerine uygulanan darbe testi neticesinde en düşük küre sayısına sahip 12mm kalınlığındaki UltraSeed aşılama cihazı ile aşılanmış numunenin darbe direnci en yüksek çıkmıştır.

Vaxon, Barinoc ve UltraSeed aşılama cihazı ile aşılanarak üretilen düktil numunelerine uygulanan darbe testi neticesinde küre sayısı arttıkça darbe enerjisinin düştüğü tespit edilmiştir (Şekil 5.30). Bu sebepten dolayı Barinoc aşılama cihazı ile aşılanarak üretilen 2mm kalınlığındaki düktil demir numunesinin darbe enerjisi hem yüksek küre sayısından hemde sementitli yapıya sahip olduğundan dolayı diğerlerine göre daha düşük çıkmıştır. (4 J)

Vaxon, Barinoc ve UltraSeed aşılama cihazı ile aşılanarak üretilen düktil demir numunelerde sementit miktarı ile ters orantılı olarak darbe direncinde değişim göstermiştir. En fazla sementit (%8) miktarı Barinoc ile aşılanan 2mm'lik numunede tespit edilmiştir. Sementit miktarının yüksekliği nedeni ile en düşük darbe direnci bu numuneye aittir.

Kalın kesitli dökümlerde, uzun bölgesel katılma zamanı, ötektik grafitten önce çekirdeklenmiş olan kürelerin büyümesine daha fazla imkan tanımaktadır. Buna karşılık ince kesitlerde, hızlı katılma ötektik grafitin çekirdeklenmesini kolaylaştırmaktadır. Bu da grafit küreleri arasındaki farklı çekirdeklenme zamanını

azaltmakta ve yüksek küre sayısı ile birlikte uniform küre dağılımını temin etmektedir.

İnce kesitli düktil demirler teknik olarak önem kazanmaktadır. İnce kesit boru döküm, ince kesit rüzgar değirmeni gövde ve kanatları ve çeşitli ince otomotiv parçaları (ostemperlenmişler de dahil) büyüyen alanlardır.

## KAYNAKLAR

- [1] Ductile Iron, ASM Metals Handbook 9th Edition, Vol. 15 ,sf.21-24 ,1993.
- [2] GÜL, F., Küresel grafitli dökme demirde malzeme ve proses parametrelerinin küre dağılımına etkisi, sf.4-8, ANKARA, 1989.
- [3] MATTER, D., Roundup of ductile iron technology, AFS Modern Castings, Vol 33, 1958.
- [4] FORREST, R.D. Some factors affecting the mechanical properties of ductile iron , BCIRA report 1755, 2005.
- [5] GILBERT, G.N.J., An Introduction to the mechanical properties of nodular cast iron, BCIRA report 1649, 2003.
- [6] Effects of manganese in nodular (SG) iron, BCIRA Broadsheet, sf 211, 2006.
- [7] Küresel grafitli dökme demirin tipik özellikleri ve kullanım yerleri , TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası ve KOSGEB ortak yayını , 2006.
- [8] SKALAND, T., Nucleation mechanisms in ductile iron, Elkem foundry products, Kristiansand, Norway, 2005.
- [9] HEİNE, R.W., LOPER, C.R., ROSENTHAL, P.C., Principles of metal casting, Newyork, 1967.
- [10] ŞEN, Ö., Dökme demirlerde ısıl analiz yöntemiyle yapı belirlenmesi, Doktora tezi, Sf 48, Yıldız Teknik Üniversitesi, 2004.
- [11] SKALAND, T., Chill and shrinkage control in ladle treated ductile iron, Eklem foundry products, Norway. 2004.
- [12] BROWN, J.R., Foseco ferrous foundryman's handbook , sf 70-84, Butterworth Heinemann Yayını, 2000.
- [13] CREWS, D.L., CARLON, R., GOUDZWOARD, J., AFS molten metal processing, USA, 1974.
- [14] LABRECQUE, C., GAGNE, M., Review ductile iron: fifty years of continuous development , Canadian metallurgical quarterly, No.5., 1998.



- [15] BROWN, J.R., *Foseco ferrous foundryman's handbook* , sf 70-84. Butterworth Heinemann Yayını, 2000.
- [16] ERSAN, Z., *Lamel grafitli dökme demirlerde aşılaiıcı etkisi*, Lisans Tezi, SAÜ, Fen bilimleri enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı , 1989.
- [17] SERGEANT, G.F., FULLER, G., *The effect upon mechanic properties of variation in graphite form in drons having varying amounts of carbide in the matrix structure and the use of nondestructive tests in the assesment of mechanical properties of such irons*, BCIRA-Foundry Technology, Source Book, AFS, , sf 331-360, 1990.
- [18] OKUMUŞ, C., *Gri dökme demirlerde aşılamanın sertliğe etkisi*, Lisans Tezi, SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 1989.
- [19] İZGİZ, S., *KGDD üretimi, yolluk besleyici tasarımı, ısıl işlemleri ve özellikleri*, SEGEM, ANKARA, 1988.
- [20] YILMAZ, F., *İçme - Atık su ve gaz dağıtım şebekelerinde, dökme demirler ve düktil demir uygulamaları*, İSKİ Yayını, İSTANBUL, 2003.
- [21] ECOB, C.M., HARTUNG, C., *An alternative route for the production of compacted graphite Irons*, ASA, Eklem , Norway, 2004.
- [22] OLSEN, S.O., HARTUNG, C. *Recovery of mg in a ductile iron process* Elkem Foundry Products, Kristiansand, Norway, 2003.
- [23] *Metals Handbook, Nondestructive evaluation and quality control*, Sintercast yayını, sf 231-236, 2006.
- [24] 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.
- [25] MULAZİMOĞLU, M. H., YANG, Y. M., WALLACE, J. F., *Solidification studies of spiking and large-small nodule formation in ductile cast iron proced by the In-the-mold process*, AFS Transactions, sf 627-650, 1985.
- [26] [www.allbusiness.com/periodicals/issue/87671-1-2.html](http://www.allbusiness.com/periodicals/issue/87671-1-2.html), *A review of ductile iron process technology*, Foundry Trade Journal, June 2001.
- [27] SPENGLER, A.F., BRİGGGS, H.K., *The ductile iron process*, Miller and Company Service Handbook, Compendium 4, 1972.
- [28] MEMPEY, F. XU, Z.A., *Mould filling and solidification of a Thin-Wall ductile iron casting*, AFS Transactions, 1994.

- [29] DAVID, P., MASSONE, J., BOERİ and SİKİRO, J.A., Mechanical properties of thin wall ductile iron-influence of carbon equivalent and graphite distribution, ISIJ International, Vol. 44, No.7, 2004.
- [30] BORRAJO, J.M., MARTİNEZ, R.A., BOERİ, R.E. and SİKİRO, J.A., Shape and count of free graphite particles in thin wall ductile iron castings, ISIJ International, Vol. 42, No.3, 2002.
- [31] JAVAİD, A., and DAVİS, K.G., Evaluation of Microstructural Factors Affecting the mechanical properties of thin-wall ductile iron castings, Microscopy Society of America, 2002.
- [32] FRAS E., WIENCEK K., GORNY, M. and LOPEZ, H.F., Nodule count in ductile iron: theoretical model based on weibull statistics, International Journal Of Cast Metals Research, Vol.18, Number 3, 2005.
- [33] DOMMARCO, R.C., SOUSA, M.E. and SİKORA, J.A., Abrasion resistance of high nodule count ductile iron with different matrix microstructures, wear 257, 2004.
- [34] HENYCH, I., Trends in melting and magnesium treatment of ductile iron melt, The Ductile Iron Society's 1998 Keith D. Millis World Symposium on Ductile Iron, 1998.
- [35] [http://elektroteknoloji.com/Elektrik\\_Elektronik/Temel\\_Eletronik/İndüksiyon\\_Yolu\\_ile\\_isitma\\_Yöntemi.html](http://elektroteknoloji.com/Elektrik_Elektronik/Temel_Eletronik/İndüksiyon_Yolu_ile_isitma_Yöntemi.html), 2009.
- [36] ÇAVUŞOĞLU, N.E., Döküm Teknolojisi , İTÜ Kimya-Metalurji Fakültesi, İstanbul, 1992.
- [37] KARSAY, S.I, Ductile iron production, 3rd edition., Quebec iron and titanium corporation, Canada, 1985.

## ÖZGEÇMİŞ

Ercan EKİNCİ, 05.04.1984 de Osmancık' da doğdu. İlkokulu Arifiye ilköğretim okulunda, orta ve lise eğitimini Figen Sakallıoğlu Anadolu Lisesin'de tamamladı. 2002 yılında başladığı SAÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği bölümünden 2006 yılında mezun oldu. 2007 Ocak ayında askerlik görevini tamamladı. 2007-2008 yılları arasında Ankara Sincan Organize Sanayisinde bulunan AND Döküm Fabrikasında üretim mühendisi olarak çalıştı. 2008 Temmuz ayından beri Düzce Organize Sanayi Bölgesinde bulunan TEKNOROT OTOMOTİV Fabrikasında Kalite Kontrol ve Güvence Mühendisi olarak çalışmaktadır.