



**VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ
VE ISI İLETKENLİĞİNİN ÜRETİM ŞARTLARINA BAĞLI OLARAK
DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ**

Berkay KARATAY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2019

Berkay KARATAY tarafından hazırlanan “VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE ISI İLETKENLİĞİNİN ÜRETİM ŞARTLARINA BAĞLI OLARAK DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Hasan HASIRCI

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

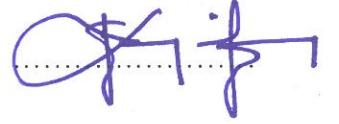
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Kubilay KARACİF

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Hitit Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Necati YALÇIN

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 23/07/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

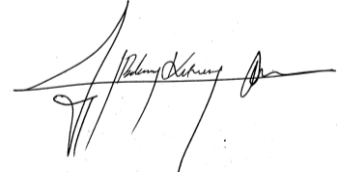
.....
Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.



Berkay KARATAY

23/07/2019

VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ VE ISI
İLETKENLİĞİNİN ÜRETİM ŞARTLARINA BAĞLI OLARAK DEĞİŞİMİNİN
İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Berkay KARATAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2019

ÖZET

Geleneksel vermiküler grafitli dökme demir üretim yönteminden farklı olarak bu tez çalışmasında; küresel grafitli dökme demir (KGDD) temel alınarak alaşımlama, aşılama ve vermikülerleştirici ilave edilmiştir. Elde edilen numunelerin ısı iletim katsayıları, mikroyapı görüntüleri ve mekanik sonuçları analiz edilmiştir. Vermikülerleşebilme miktarının, ısı iletim katsayısının artmasında önemli bir rol oynadığı tespit edilmiş ancak sadece vermikülerleşmenin mekanik dayanım açısından yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Böylece uygun değer vermikülerleştirici miktarı üzerine farklı kombinasyonlarda aşılama ve saf Cu eklenerek sonuçlar irdelenmiştir. Ayrıca elde edilen tüm numunelerin SEM görüntülerinden grafitte oluşan değişimler gözlemlenmiştir. Grafitin katılaşmasının sona erdiği grafit matris arası noktalara EDS analizi uygulanmıştır. Isı iletimi ve mekanik dayanım açısından en yüksek özellik sergileyen malzemenin uygun değer kabul edilmiş oranlarda vermikülerleştirici, aşılama ve Cu ile muamele edilen örnek olduğu görülmüştür. Böylece ısının hızlı bir şekilde uzaklaştırılması gereken durumlar için hem yüksek dayanım sergileyebilen hem de ısıyı hızlı ileten bir vermiküler grafitli dökme demire ulaşılmıştır. Her bir özelliği farklı incelemek yerine tüm sonuçlardan elde edilen verileri bir bütün olarak ele alınmış ve nihai sonuç olarak hem ısı iletim katsayısı hem de mekanik dayanımı yüksek bir malzeme hedef alınmıştır.

Bilim Kodu	:	91518
Anahtar Kelimeler	:	Vermiküler, Döküm, Alaşımlama, Yapısal Özellikler, Mekanik özellikler, Isıl İletim
Sayfa Adedi	:	95
Danışman	:	Dr. Öğr. Üyesi Hasan HASIRCI

INVESTIGATION OF CHANGES IN MECHANICAL PROPERTIES AND THERMAL
CONDUCTIVITY OF THE VERMICULAR GRAPHITE CAST IRON DUE TO ITS
PRODUCTION CONDITIONS

(M. Sc. Thesis)

Berkay KARATAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2019

ABSTRACT

In this thesis, unlike traditional compacted graphite cast iron production methods a different modification is utilized. A base spheroidal graphite cast iron was produced and treated by alloying, inoculation and graphite modification additions. Thermal conduction, microstructure and mechanical results of the samples have been analyzed. It was proved that the amount of vermicularity plays an important role in contributing to the thermal conduction. It is observed that merely vermiculation modification is not satisfying as much as inoculation and alloying on enhancing the mechanical strength. Thereby, the appropriate value of the vermicularization is determined. Thus, in an aim of examining the effects, different combinations of inoculation and alloying (Pure Cu) was added gradually. Besides, SEM images are supported with EDS analysis on the areas where the graphite solidification ends to observe the changes in structure. It is observed that the material which exhibits the highest properties in terms of thermal conduction and mechanical strength together is the one treated by optimum values of vermicular, inoculant and pure Cu. So, a cast iron was investigated wherein heat should be removed quickly together with high strength properties. Eventually, a high and acceptable thermal conductivity together with improved mechanical strength have been reached.

Science Code	:	91518
Key Words	:	Vermicular, Casting, Alloying, Structural Properties, Mechanical Properties, Thermal Conduction
Page Number	:	95
Supervisor	:	Assist. Prof. Dr. Hasan HASIRCI

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması sırasında, alanla ilgili bilgi ve deneyimlerini paylaşan ve tezin ortaya çıkarılmasında baştan sona kadar desteğini esirgemeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hasan HASIRCI'ya gösterdiği sabır ve desteği için teşekkür ederim.

Yüksek Lisans eğitimim boyunca kendimi geliştirmemde payı olan tüm Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Öğretim Üyelerine teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca deney numunelerimizin hazırlanmasında katkısı olan başta Harun YEŞİLYURT'a ve Yeşilyurt Döküm ailesinden değerli üretim müdürü Şanser AKBULUT'a ve kalite kontrol müdürü Süleyman YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Son olarak yüksek lisans eğitimi süresince her koşulda yanımda olup sabrını ve desteğini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. DÖKME DEMİRLER.....	3
2.1. Dökme Demirlerde Sınıflandırma.....	5
2.2. Dökme Demirlerin Genel Özellikleri.....	7
2.3. Dökme Demirlerin Mikroyapı Farklılıkları	8
3. LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR.....	11
3.1. LGDD'in Özelliklerine Elementlerin Etkileri.....	14
3.2. Aşılama İşlemi ve Özelliklere Etkileri	15
4. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR.....	17
4.1. KGDD'lerin Özelliklerine Kimyasal Bileşimin Etkileri.....	18
4.2. Ötektik Katılma Farklılıkları ve Düzenleri	20
5. VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİR	25
5.1. VGDD Üretim Metotları	28
5.1.1 Kapsamlı desülfürizasyon	28
5.1.2 Azot ilavesi tekniği.....	29
5.1.3 Eksik işlem tekniği	29

	Sayfa
5.2. VGDD'in Kimyasal Bileşimi	30
6. MALZEMELERDE ISI İLETİMİ VE MEKANİZMALARI.....	33
6.1. Termal Enerji	33
6.2. Isı İletim Katsayısı (k).....	34
6.3. Dökme Demirlerde Isıl İletkenliği Etkileyen Faktörler	35
7. YAPI VE ÖZELLİK İLİŞKİLERİ.....	39
7.1. Tane Boyutu ve Matris Yapı ile Mekanik Özellik İlişkileri	39
7.2. Çekirdek Sayısı ve Soğuma Oranı	41
7.3. Matris Yapısı ile Isıl Özellik Değişimi	41
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
8.1. Döküm İşlemi ve Alaşım Hazırlama.....	45
8.2. Metalografik İşlemler ve Yapısal Analiz Süreçleri.....	49
8.3. Çekme Testleri	50
8.4. Sertlik Testleri.....	52
8.5. SEM-EDS Analiz İşlemleri.....	52
8.6. Isı İletim Ölçümü ve Analiz İşlemleri.....	53
9. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	57
9.1. Mikroyapı Analizleri.....	57
9.2. Metalografik Analizler	61
9.3. SEM-EDS Analizleri.....	66
9.4. Mekanik Analizler.....	73
9.5. Termal Analizler	82
10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	89
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	95

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Farklı tip dökme demirlerin mekanik özellikleri	8
Çizelge 3.1. Ticari tip gri dökme demirlerde karbon ve silisyum yüzdeleri	11
Çizelge 6.1. Çeşitli sıcaklıklarda dökme demirlerin termal iletkenlik katsayıları	36
Çizelge 7.1. Farklı fazların termal iletkenlik değerleri. Hekzegonal kafesin (a) C-eksen boyunca (prizmatik yüzey), (b) taban yüzey boyunca	42
Çizelge 7.2. KGDD için termal iletkenlik değerleri İngiliz BS2789 Ölçüleri	42
Çizelge 8.1. Sfero piki ve GGG-40 hurdası kimyasal bileşimleri	46
Çizelge 8.2. Küreselleştirici malzemesinin (FeSi-Mg) kimyasal bileşimi	47
Çizelge 8.3. Aşılama malzemesinin (FeSi) kimyasal bileşimi	47
Çizelge 8.4. Üretilen numunelerin kimyasal bileşimleri ve Karbon Eşdeğerliği (KE)	47
Çizelge 8.5. Üretilen numunelerin ilave miktarları	48

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Demir-Sementit (Fe_3C) Denge Diyagramı Örneği	4
Şekil 2.2. Demir-Karbon-Silisyum ($\text{Fe}-\% 2.5\text{Si}-\text{C}$) Denge Diyagramı	5
Şekil 2.3. Grafitleşme potansiyeline göre genel ticari dökme demir elde etmek için süreçler ve mikroyapıları.....	6
Şekil 2.4. (a)LGDD, (b)VGDD, (c)KGDD Mikroyapıları	9
Şekil 3.1. Gri dökme demirde grafit türlerinin X100 büyütme ile şematik gösterimi	13
Şekil 4.1. Küresel grafitli dökme demir mikroyapıları	17
Şekil 4.2. İlgili Fe-C-Si denge diyagramı ve katılaşma yolunun şematik gösterimi (a)Kompozisyon düzlemi üzerinde gösterilen sıvı yüzeyin izdüşümü, (b) Eş değer kesitin katılaşma yolu $w_{\text{Si}} = {}^{\circ}w_{\text{Si}}$	20
Şekil 4.3. Hipoötektik KGDD'in katılaşma düzeninin şematik gösterimi (a) Eş değer kesitin katılaşma yolu $w_{\text{Si}} = {}^{\circ}w_{\text{Si}}$, (b) Soğuma eğrisi.....	21
Şekil 4.4. Hiperötektik KGDD'in katılaşma düzeninin şematik gösterimi (a) Eş değer kesitin katılaşma yolu $w_{\text{Si}} = {}^{\circ}w_{\text{Si}}$, (b) Soğuma eğrisi	22
Şekil 4.5. KGDD ve LGDD'in grafit katılaşma biçimlerindeki yönlemsel farklılıklar.	23
Şekil 5.1. Döküm sonrası farklı kesit aralıklarında VGDD mikroyapıları (% 3,5 Nital ile dağlanmış)	25
Şekil 5.2. Hekzegonal grafit kafes latis parametreleri yüzey bölgeleri	26
Şekil 5.3. Aynı kompozisyondaki KG, LG, VG dökme demirlerin soğuma eğrilerinin termal analizi, (T_{EU}) En düşük ötektik sıcaklık (T_{ER}) En yüksek ötektik sıcaklık	27
Şekil 5.4. a) KGDD içerisindeki ötektik tanelerin büyüme yöneliminin şematik gösterimi, b) küresel grafitten vermiküler grafit dönüşüm mekanizmasının şematik gösterimi	27
Şekil 5.5. KGDD, LGDD, VGDD'lerin katılaşmalarında değişen soğuma eğrileri	28
Şekil 6.1. LGDD, KGDD, VGDD termal iletkenlikleri	35

Şekil	Sayfa
Şekil 7.1. (a) Ferrit, Perlit ve tüm matrisin, (b) düzleme dâhil olan ve düzleme dik olup dışına doğru izotropik durum sergileyen grafitin termal iletkenlikleri	43
Şekil 8.1. Y-blok ve numunelerin alındığı bölgeler (TS EN 1563)	45
Şekil 8.2. Isı iletim katsayısı ölçüm sisteminin şematik gösterimi	54
Şekil 9.1. Üretim şartlarına bağlı olarak grafit yapısının değişimi (X100 büyütme)	58
Şekil 9.2. Üretim şartlarına bağlı olarak oluşan vermiküler grafit oranları	59
Şekil 9.3. Üretim şartlarına bağlı olarak grafit boy/en oranlarının değişimi	60
Şekil 9.4. Üretim şartlarına bağlı olarak yapıdaki grafit oranlarının değişimi	61
Şekil 9.5. Üretim şartlarına bağlı olarak makro yapıdaki değişimle (X100 büyütme)....	62
Şekil 9.6. Üretim şartlarına bağlı olarak tane boyutunda meydana gelen değişimler.....	64
Şekil 9.7. Üretim şartlarına bağlı olarak grafit, ferrit ve perlit hacim oranlarının değişimi	64
Şekil 9.8. Aynı aşılaiıcı oranlarına sahip iki farklı grup numunede % 0.6 Cu ilavesinin mikroyapıya etkisi.....	65
Şekil 9.9. C1, C3 (Cu İlavesiz) ve D1, D3 (Cu ilaveli) numunelerin işaretlenmiş ferrit ve perlit matris bölgeleri.....	66
Şekil 9.10. A numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	67
Şekil 9.11. B1 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	67
Şekil 9.12. B2 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	68
Şekil 9.13. B3 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	69
Şekil 9.14. C1 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	69
Şekil 9.15. C2 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	70
Şekil 9.16. C3 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	70
Şekil 9.17. D1 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	71

Şekil	Sayfa
Şekil 9.18. D2 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	71
Şekil 9.19. D3 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu	72
Şekil 9.20. Üretim şartlarına bağlı olarak çekme dayanımının değişimi	75
Şekil 9.21. Üretim şartlarına bağlı olarak akma dayanımının değişimi.....	76
Şekil 9.22. Üretim şartlarına bağlı olarak elastik modülün değişimi.....	77
Şekil 9.23. Üretim şartlarına bağlı olarak uzamanın değişimi.....	78
Şekil 9.24. Üretim şartlarına bağlı olarak tokluğun değişimi	79
Şekil 9.25. Üretim şartlarına bağlı olarak sertliğin değişimi	81
Şekil 9.26. Üretim şartlarına bağlı olarak pürüzlü yüzeye sahip numunelerde ısı iletim katsayısı (k) ve grafit hacim oranına bağlı olarak oransal iletkenliğin (k/% Grafit oranı) değişimi.....	83
Şekil 9.27. Üretim şartlarına bağlı olarak pürüzsüz yüzeye sahip numunelerde ısı iletim katsayısı (k) ve grafit hacim oranına bağlı olarak oransal iletkenliğin (k/%Grafit oranı) değişimi.....	85
Şekil 9.28. Puan değerlendirmesi sonucu istatistiksel olarak oluşturmuş grafik gösterimi.....	86

RESİMLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Resim 8.1. TS EN 1563 Kalıpların üst ve yan görünüşleri.....	45
Resim 8.2. 1000 kg Kapasiteli ergitme indüksiyon ocağı	46
Resim 8.3. Tundish tipi işlem potasında yapılan küreselleştirme işlemi	46
Resim 8.4. Vermikülerleştirme amaçlı ilaveler, karıştırma ve döküm işlemleri	48
Resim 8.5. Y-Bloklardan alınan ve metalografik inceleme için hazırlanan numuneler.....	50
Resim 8.6. Çekme numunelerinin ölçüleri	50
Resim 8.7. Test sonrası çekme numuneleri	51
Resim 8.8. INSTRON 3369 Çekme Cihazı	51
Resim 8.9. EMCO Test Duravision 2000 Cihazı.....	52
Resim 8.10. “PA HİLTON Heat Conduction Unit H920” Isıl İletim Ünitesi	53
Resim 8.11. Termal ölçüm için hazırlanan numuneler ve ölçüleri	54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu tezde kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
σ_{AK}	Akma Dayanımı
$\emptyset$	Çap İşareti
$^{\circ}\text{C}$	Derece Santigrat
T_{EU}	En düşük ötektik sıcaklık
T_{ER}	En yüksek ötektik sıcaklık
σ_0	Hall-Petch Denklemi için malzemeye özgü değişken
$k_{(y)}$	Hall-Petch Denklemi için malzemeye özgü değişken
d	Hall-Petch Denklemi için Ortalama Tane Çapı
S_V	Her birim hacim için tane sınırlarının yüzey alanı
Q	Isı Akısı
β	İletim Hızı
k	İletim Katsayısı
J	Joule
K	Kelvin
m	Kütle
Δx	Mesafe Farkı
μm	Mikron metre
N	Newton
$\bar{l}$	Ortalama Tane Sayısı
R_a	Ortalama yüzey Pürüzlülüğü (Aritmetik)
N_L	Santim başına kesişen ortalama tane sayısı
ΔT	Sıcaklık Farkı
w_{Si}	Silisyum İçeriği
W	Watt
A	Yüzey Alanı

Kısaltmalar	Açıklamalar
BDD	Beyaz Dökme Demir
HB	Brinell Sertlik Değeri Sembolü
Fe₃P	Demir Fosfat
Fe₃C	Demir Karbür (Sementit)
DD	Dökme Demir
EDS	Enerji Dağılım Spektrometre Analizinin
FeSi	Ferro-Silisyum (Silisyum Demir Bileşiği)
GPa	Gigapascal
G_r	Grafit
L/d	Grafit boy/en oranı
GDD	Gri Dökme Demir
KGDD	Küresel Grafitli Dökme Demir
LGDD	Lamel Grafitli Dökme Demir
MPa	Megapascal
SEM	Taramalı Elektron Mikroskopunun
GGG	Ticari KGDD Standart Başlığı
GG	Ticari LGDD Standart Başlığı
GVJ	Ticari VGDD Standart Başlığı
VGDD	Vermiküler Grafitli Dökme Demir
VER-MAT	Vermikülerleştirici İlave Karışımın

1. GİRİŞ

Dökme demir, çeliklerde olduğu gibi temelde demir ve karbondan oluşur. Lamel Grafitli dökme Demir (LGDD), bu ailenin bilinen en eski üyesidir. İçerdiği karbon grafit, lamelli yapıdadır. Genel olarak LGDD'in tercih edilme sebebi maliyetinin düşük olmasıdır. LGDD'in çekme özellikleri düşük olmasına rağmen, yüksek basma mukavemeti ile birlikte mükemmel sönümleme kapasitesine sahiptir.

Ancak bulunduğu zamandan bu yana bazı çelik bileşenlerin yerini, yüksek çekme mukavemeti ve uzaması ile Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) almıştır. KGDD'in içerisindeki karbon, küresel grafit şeklindedir ve matris içerisindeki grafit sürekliliği, LGDD'e kıyasla daha fazladır. Bu yüzden LGDD ile kıyaslandığında daha üstün mekanik özellikler gözlemlenmektedir.

Dökme demir ailesinin bir başka üyesi ise olan Vermiküler Dökme Demir (VGDD)'in grafiti ise solucanımsı yapı olarak adlandırılan kısa, kalın, daha yuvarlanmış köşelere sahip bir yapıdadır ve bu dökme demir tipi aynı zamanda Kompakt Grafitli Dökme Demir olarak da bilinmektedir. VGDD, başlarda küresel grafitli dökme demirin yüksek tonajlı dökümü esnasında yanlışlıkla keşfedilmiş ve değeri düşük bir demir döküm ürünü olarak öngörülmüştür. Daha sonrasında bazı benzersiz özellikleri nedeniyle, ilgi çekmeye başlamış ve üretimine yönelinmeye başlanılmıştır (Este's ve Scheidewind, 1955). Daha sonradan farklı ülkelerde bu dökme demir tipinin çeşitli üretim yöntemleri, fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılmasına devam edilmiştir [1].

Bu tez çalışması, endüstriyel KGDD'e belirli oranlarda vermikülerleştirici, aşılایıcı ve bakır ilave edilerek hızlı tren fren diskleri için yeni ve benzersiz bir malzeme geliştirmeyi amaçlamaktadır. Tezin deneysel sürecinde küresel grafitli yapıdan, vermikülerleştirme işlemi sonucunda üretilen vermiküler grafit yapıdaki farklı malzemelerin, mikro ve makro boyuttaki yapısal değişimi, bunun ısı iletkenliğine ve mekanik özelliklerine etkileri gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada kontrollü deneyler yolu ile KGDD'e eklenen ilavelerin etkilerinin optimum sonuçlara ulaşması beklenmiştir. Bu amaç doğrultusunda yapılan deneylerde temel

düzeyde Ar-Ge tabanlı bir sistem izlenmiştir. En uygun ilave kombinasyonları bulunarak elde edilen etkiler incelenmiş, ihtiyacı karşılamak için kullanılacak en uygun malzemeyi tespit etmek hedeflenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sonuçlardan hangisi veya hangilerinin hedef parça için uygun olduğunun belirlenmesi endüstriyel hedef olarak belirlenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda; vermikülerleştirilen numunelerin, KGDD ile kıyaslanması, mikroyapıda meydana gelen değişikliklerin ısı iletkenlik üzerindeki etkisi ve mekanik özelliklerin üstünlüğünü gözlemek amaçlanmıştır. Isıl İletkenlik test sonuçları Fourier Isı İletim Kanunu esasları temel alınarak ölçölüp hesaplanmış ve her numunenin “W/mK” cinsinden ısı iletkenlik katsayıları tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen diğer mekanik test sonuçları literatür tabanlı mekanik veriler ile karşılaştırılarak, elde edilen yapının hangi dönüşümden daha verimli sonuç elde edildiği gözlemlenmeye çalışılmıştır. Bu değerler birbirleri ile karşılaştırılmış ve sonuç olarak bu tezin amacı olan vermikülerleştirici, aşılmalı ve bakır ilavesinin ısı iletkenliği ve mekanik özellikleri ne yönde etkilediği gözlemlenmiştir.

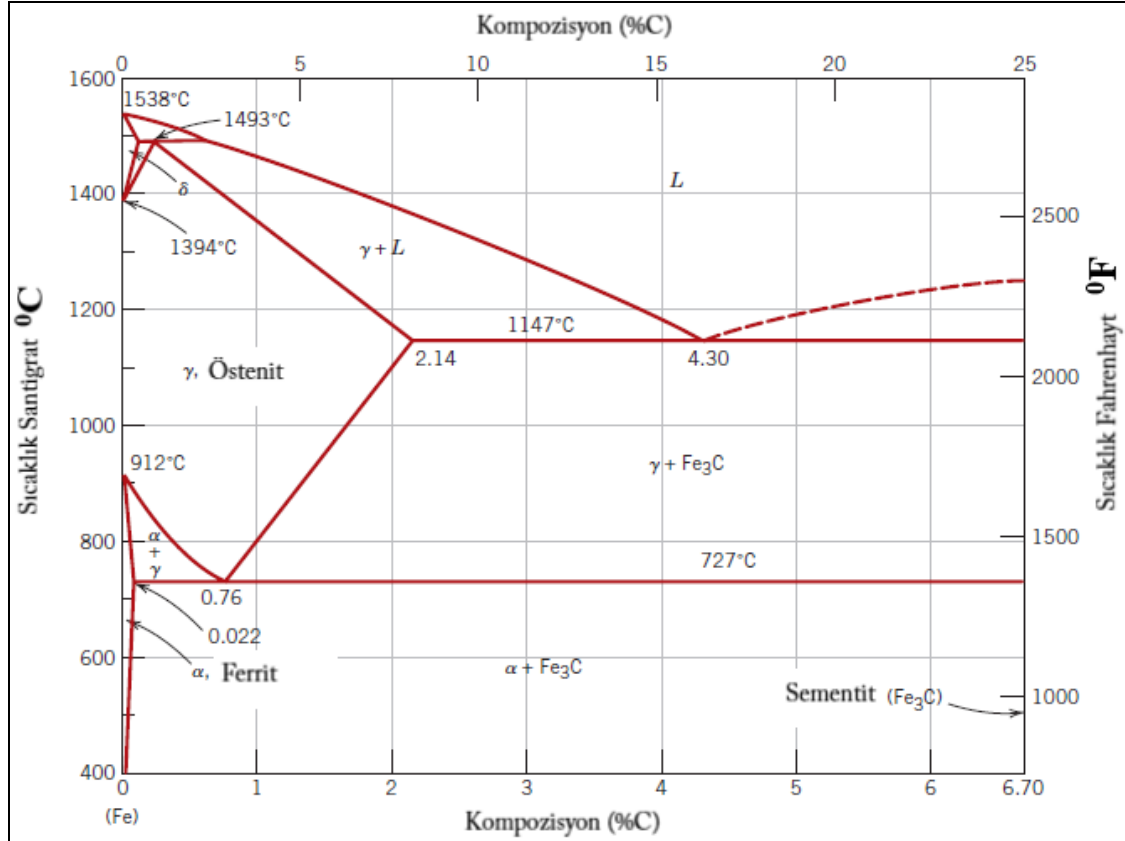
2. DÖKME DEMİRLER

Ticari pratikte genel olarak % 3 - 4,3 arasında karbon içeriğine sahip olan dökme demirler, çeşitli özellikler ve üretimde kolaylığın sağlanması adına bazı alaşım elementleri içermektedir. Demir-sementit diyagramı göz önünde bulundurulduğunda bu karbon içeriği aralığındaki demir alaşımlarının yaklaşık olarak 1150 - 1300°C arasında sıvı halde olduğu görülmektedir. Bazı dökme demir türlerinin gösterdiği yüksek gevreklik sebebiyle döküm yöntemi, bu tür alaşımlarda parça üretimi için en uygun yöntem olarak dikkat çekmektedir.

Bu alaşımlarda ve türevlerinde genel olarak dengede olan ikinci faz, literatürde karbür fazı olarak geçmektedir. Şekil 2.1’de diyagramda görülen karbür fazı kararlı değildir, metallerearası bir bileşiktir ve yapısında bileşen olarak α -ferrit ve seментitten (Fe_3C) oluşan bir fazı temsil etmektedir. Bu alaşımın faz dönüşümlerini temsil eden tüm diyagramlarda solda saf demir gösterilerken, sağ tarafa doğru gidildikçe seментitce (Fe_3C) veya karbonca (C), (diyagramın türüne göre değişmektedir) zenginleşmektedir. Seментitin, grafit ve ferrite ayrışma olarak bilinen grafitleşme eğilimini, alaşımın kimyasal kompozisyonu ve soğuma hızının değişken parametreleri tarafından etkilenmektedir. Sonuç olarak, katılaşma durumunda fazlara ve dökme demirlerin özelliklerine etki eden tüm elementler, demir için kısıtladığı veya iyileştirdiği durumlar ile özelliklere etki etmektedir. Ancak, genel olarak silisyum elementi belli bir miktarın üzerinde bulunduğunda grafitleşmeyi teşvik edici rol oynayan başlıca elementlerden biridir. Şekil 2.2’de silisyumun da dengede olduğu bir örnek diyagram görülmektedir. Silisyuma bir de yavaş soğuma hızları eklendiğinde, grafitleşme süreci daha da kolay hale gelmektedir [2].

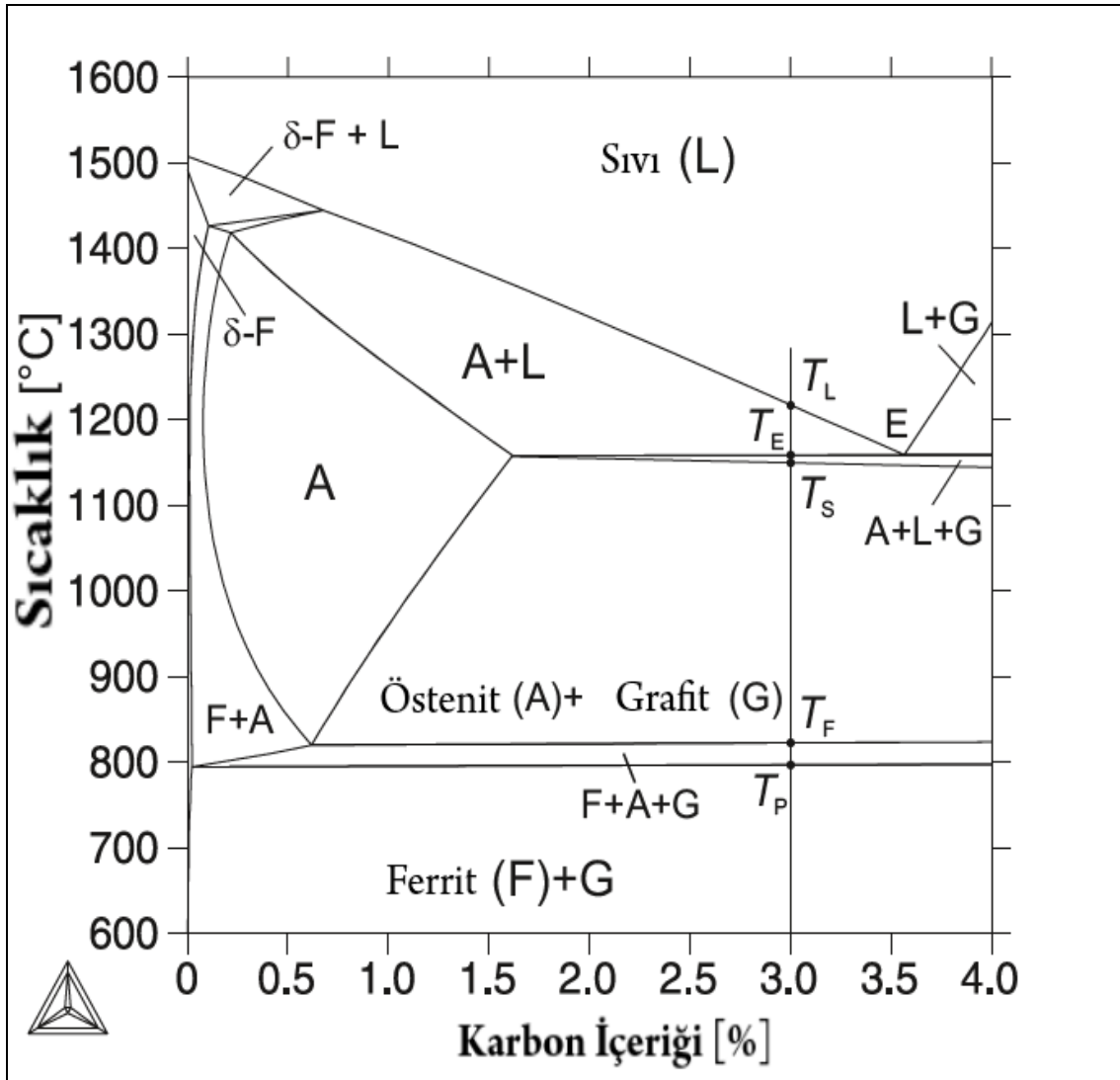
Dökme demir, çeliklerde olduğu gibi geniş bir demir alaşımı ailesini tanımlamak için kullanılan terimdir. Fe- Fe_3C diyagramında ötektik noktanın altında bulunan, birden çok bileşenli ve özellikli demir alaşımları bulunmaktadır. Esas olarak demir, karbon, silisyum elementleri içerir, sıklıkla (>% 0,1) esas alaşım ve bazı durumlarda (<% 0,1) ikincil alaşım elementi eklenmesi söz konusudur. Çeliğe kıyasla karbon ve silisyum içeriği daha yüksektir. Karbon içeriğinin yüksek olması sebebiyle, dökme demirlerin yapısı çeliğe kıyasla karbonca daha zengin bir faz sergiler. Öncelikli olarak kompozisyon, soğuma oranı ve sıvı hal uygulamalarına dayanarak, termodinamik kanunlar çerçevesinde “Fe- Fe_3C ” sisteminde yarı-kararlı veya “demir-grafit” sistemindeki gibi kararlı bir şekilde katılaşır.

Eğer yarı-kararlı sistemin yolu izlenirse, ötektik içerisindeki karbonca zengin fazı demir – karbür oluşturur. Kararlı sistemin yolu izlenirse, karbonca zengin faz grafitir. Fe- Fe₃C veya Fe- G_r ikili sistemi referans alınır, dökme demir; % 2’den yüksek karbon eşdeğerliğine (CE) sahip demir-karbon alaşımı olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.1. Demir-sementit (Fe₃C) denge diyagramı örneği

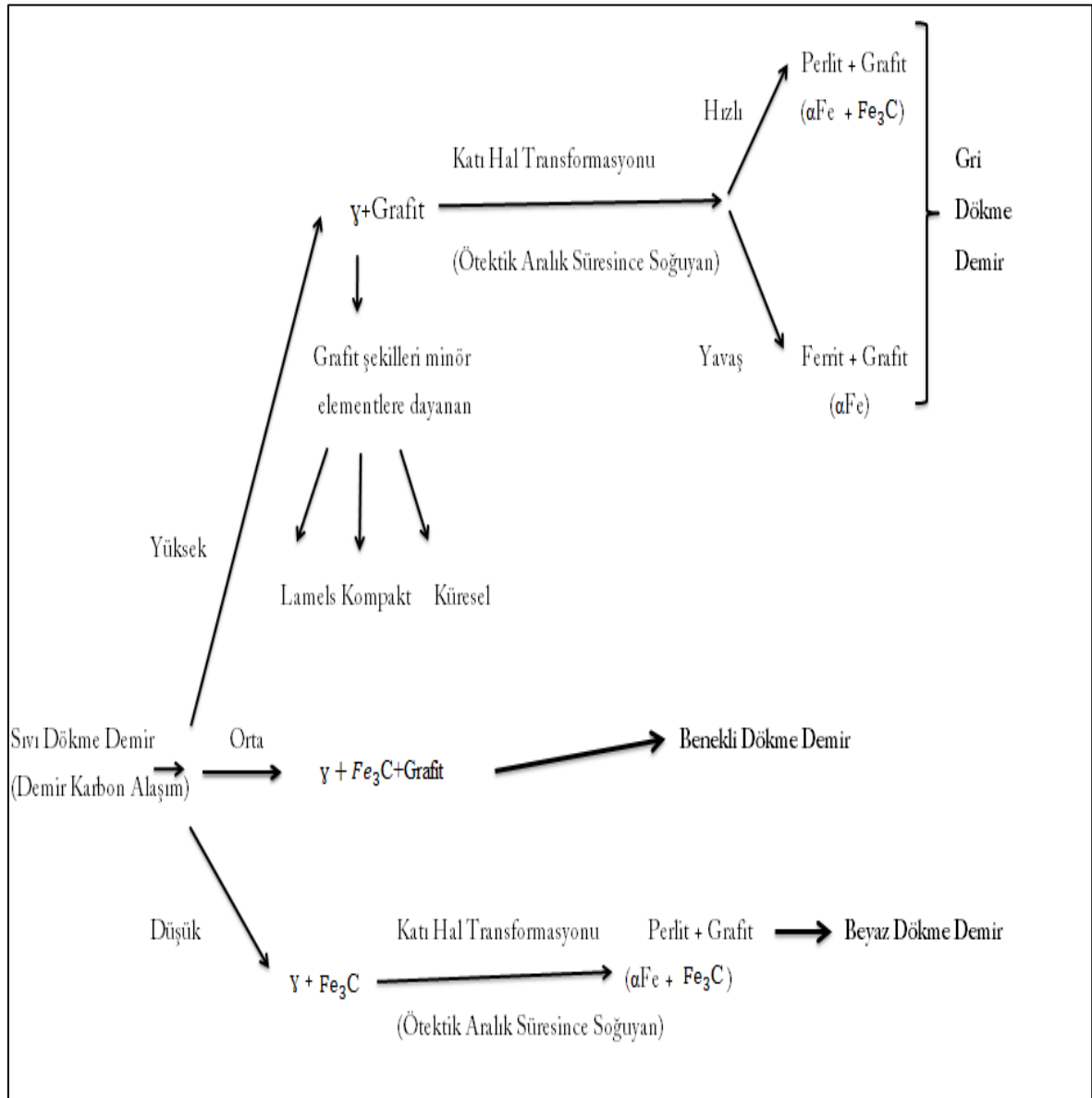
Genel olarak yapının niteliğini karbonca zengin fazlar belirlediği için, aslında çelik ile birçok özelliği benzerlik gösteren dökme demirler, çelikte olduğu gibi alaşım elementi miktarına göre kategorize edilme söz konusu değildir. Dökme demirler daha çok ikili demir-karbon alaşımı olarak ön plana çıktıklarından dolayı yapıları hakkındaki yorumların oluşturulmasında “Demir-karbon Denge Diyagramı” kullanılmaktadır (Şekil 2.1). Ancak dökme demirlerde silisyum miktarı ve karbon içeriğinin fark edilir oranda yüksek olması sebebiyle genellikle Fe-C-Si üçlü alaşım olarak değerlendirilir. Bu durum Fe-Fe₃C denge diyagramını bozmakta ve Fe-Fe₃C-Si (Şekil 2.2) denge diyagramında olduğu gibi fazların bölgelerinin belirleyen sıcaklık değerlerinde değişime sebep olmaktadır [3].



Şekil 2.2. Demir-karbon (Fe-2.5 %Si-C) denge diyagramı [4]

2.1. Dökme Demirlerde Sınıflandırma

İlk dökme demir sınıflandırılması, kırılma görüntüleri temel alınarak yapılmıştır. Bu sınıflandırma şeklinde başlangıç olarak sadece iki çeşidin farkına varılmıştır. Bunlardan ilki beyaz demirin kristalografik kırılma yüzeyinde demir karbon tabakaları boyunca beyaz bir kırılma sergilemesidir; bu durum yarı kararlı katılaşmanın (Fe_3C ötektik) bir sonucudur. Gri dökme demir ise kırılma yüzeyinde kırılmanın grafit (Ötektik G_r) tabakası boyunca gri bir ton sergilemesidir. Bu ise kararlı bir katılaşmanın sonucudur [3].



Şekil 2.3. Grafitleşme potansiyeline göre genel ticari dökme demir elde etmek için süreçler ve mikroyapıları [3]

Metalografinin ilerlemesi ve dökme demir ile ilgili bilgi hazinesinin genişlemesi ile mikroyapı özellikleri ve daha detaylı sınıflandırmalar mümkün hale gelmiştir. Grafit şekline göre: Lamelli grafit (LG), Küresel Grafit (KG), Kompakt Grafit (KG), ve Temper Grafit (TG) olarak sınıflandırılmıştır. Temel olarak, buradaki temper grafit, katı-hal reaksiyonu (temperleme) işlemi sonucunda meydana gelmektedir. Şekil 2.3'te de görüldüğü üzere matris türüne göre ise, Ferritik, Perlitik, Östenitik, Martenzitik ve Beynitik (östemperleşmiş) şeklinde ifade edilmektedir [3].

Bir başka genel sınıflandırma şeması da dökme demirleri dört ayrı çeşitte toplamaktadır: Beyaz Dökme Demir (BDD), Lamel Grafitli Dökme Demir (LGDD), Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) ve Temper Demir (TD) olarak isimlendirilmektedir. BDD ve LGDD kırılma yüzeyi sebebiyle bu şekilde adlandırılır. Duktıl(Sünek) yani İngilizcedeki karşılığı “DUCTILE” demir tipi olan KGDD ise dökümden hemen sonra ölçülebilir süneklik sergilemesi sebebiyle bu şekilde adlandırılmıştır. LGDD ve BDD, KGDD’in aksine standart çekme testlerinde önemli sayılabilecek bir süneklik göstermemiştir. TD ise BDD olarak döküldükten sonra, ısıtıl işlem (temperleme) uygulanarak süneklik kazandırılmasıyla oluşan bir demir tipidir. Isıtıl işlem uygulanmadığı takdirde gevrek davranış sergiler [3].

2.2. Dökme Demirlerin Genel Özellikleri

Çelik ile kıyaslandığında dökme demirlerin iyi bilinen birkaç üretim ve mühendislik avantajı bulunmaktadır. Bunlar; % 30-40 daha düşük üretim maliyeti (dökme çeliğe), daha geçerli performans karakteristiği, daha iyi aşınma direnci ve titreşim sönümleme kapasitesi olarak sıralanabilir. Dökme demirlerin çelikler karşısında sağladığı bu avantajlar, bu malzemelerin bazı metalurjik karakteristik özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Birincil özellik, dökme demirlerin ergime sıcaklıkları ve dolayısıyla döküm sıcaklıklarının, dökme çeliğe göre 300°C - 350°C daha düşük olmasıdır. İkincil olarak ise serbest karbonun geniş yoğunluğu ve yüksek silisyum içeriğinden kaynaklanan özellikle LGDD ve KGDD’de, diğer metal alaşımlara kıyasla çok daha iyi akıcılığa ve düşük katılaşma çekmesine sahip olmasıdır. Ayrıca çeliğe oranla işlenebilirliği daha yüksektir. Grafitin, kendinden yağlayıcı bir sistem gibi davranması sebebiyle aşınma dayanımı da daha yüksektir. Grafit aynı zamanda ses ve mekanik titreşimi söndürmesi, dökme demirleri birçok mekanik uygulamada daha uygun kılmaktadır.

Yüksek karbon yoğunluğu her ne kadar dökme demirinin birkaç fiziksel özelliğine ve üretim süreçlerini kolaylaşmasına sebep olsa da maalesef aynı zamanda sünekliğin ve kırılma tokluğunun azalmasından da sorumludur. Genellikle grafit olarak ortaya çıkan karbon, oldukça düşük gerinim seviyelerinde yorulma ve kırılma süreçlerinin çekirdeklenmesine olanak sağlamaktadır. Bu yüzden dökme demirler, çelikle

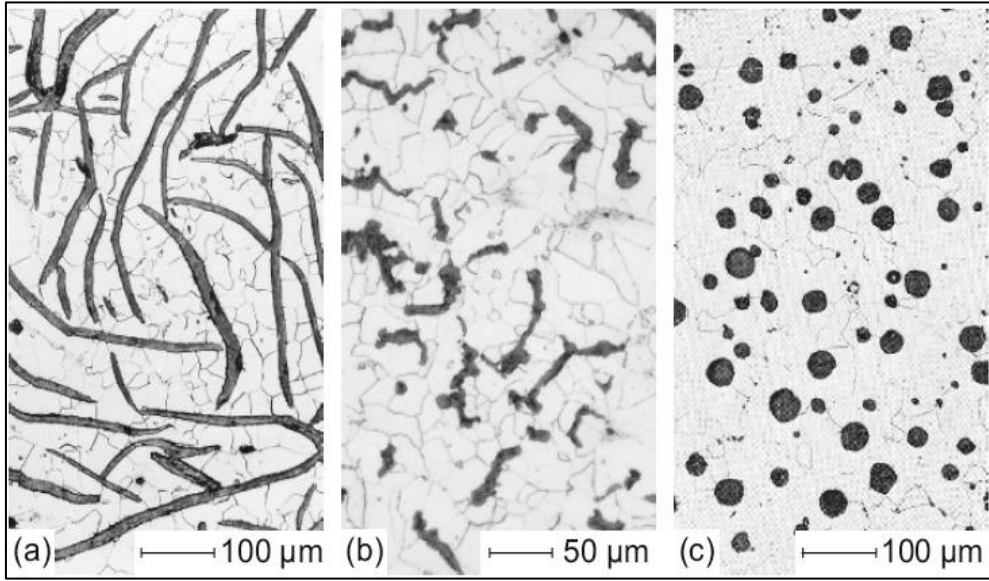
kıyaslandığında belirgin bir şekilde yorulma ve kırılma direnci göstermektedirler (Çizelge 2.1) [3].

Çizelge 2.1. Farklı tip dökme demirlerin mekanik özellikleri [1]

Özellik	LGDD	VGDD	KGDD
Çekme Dayanımı (MPa)	150-400	350-650	400-800
Akma Dayanımı (MPa)	-	270-300	250-400
% Uzama	-	3-10	5-20
Sertlik (BHN)	120-145	130-180	200-250
Elastikiyet Modülü MPa X 10 ³	80-140	140-160	160-185
Çentikli darbe dayanımı (kgm)	0.15-0.18	0.22-0.31 Lamel tabanlı demir için 0.32-0.38 Küresel tabanlı demir için	0.40-0.45

2.3. Dökme Demirlerin Mikroyapı Farklılıkları

Faz diyagramları, metalik materyallerin oluşum tipini ve faz miktarını termodinamik denge içerisinde açıklayarak göstermektedir. Ancak bu diyagramlar, bileşenlerin görünümü ve boyutsal dağılımı hakkında herhangi bir bilgi vermemektedir. Bu bilgi ancak morfolojik bakış açısı ile mikroyapı teriminin altında toplanan ifade ile anlaşılabilir. Mikroyapı, bir arada bulunan farklı fazların oluşturduğu yapı taşlarını temsil eder. Bu yapı taşları birbiri ile ara yüzeyler üzerinden birleşir. Düzensizlik içerdiklerinden dolayı anizotropiktirler [4].



Şekil 2.4. (a)LGDD, (b)VGDD, (c)KGDD Mikroyapıları [4]

Dökme demirlerde, minör elementlerin katılaşma düzenine etkisi ile üç farklı grafit tipi çekirdeklenir. Sırasıyla lamel yapı olarak adlandırılan LGDD, VGDD ve KGDD Şekil 2.4'teki gibidir. Yansıttığı ışığa göre farklı renk alan ve Şekil 2.4'te beyaz renkte görülen grafit dışındaki yapı matris olarak adlandırılmaktadır. Bu durumda matris ferritik yapıdadır ve mikroskoptan gelen ışığı güçlü bir şekilde yansıttığından beyaz olarak algılanmaktadır. Şekil 2.4'te matris içerisinde görünen ince siyah çizgiler ise dağlanma işlemi sonucu ortaya çıkan tane sınırlarıdır. Tane sınırları Nital gibi güçlü asitlerin seyreltilmiş solüsyonları ile dağlanması sonucu ortaya çıkmaktadır.

3. LAMEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (LGDD)

LGDD olarak bilinen demir türü, lamelli grafit mikroyapısı ile özdeşleşen bir karakteristiğe sahiptir. Bu malzeme türü genelde % 2,5- 4 arasında karbon ve % 1-3 arasında silisyum içermektedir. Ferritik yapı elde etmek için % 0,1 gibi düşük miktarda, perlitik yapılarda ise % 1,2'e kadar yüksek içeriklerde Mangan içerebilmektedir. Kükürt ve fosfor ise % 0,0015-0,002 kadar aşırı düşük miktarlarda kalıntı element olarak bulunabilir [3].

Ingot kalıplarda üretilen gri dökme demirler “hematit” türünde derecelendirilmektedir, yüksek karbon ve düşük fosfor içeriğine sahiplerdir, bu yüzden termal şoka dirençli olurlar. Ancak yükselen karbon içeriği ve buna bağlı olarak artan karbon eşdeğerliliği, heterojen bir yapı (segregasyon) oluşturarak, dayanımı düşürmektedir [5].

Kompozisyon açısından değerlendirildiğinde, daha net ve basit bir şekilde anlamak adına LGDD'in kimyasal analizi üç başlık altında toplanabilir. Ana elementler, düşük seviyelerde olan ve demirin katılaşmasında kritik bir biçimde etki yaratan ikincil elementler ve son olarak mikroyapıya ve malzemenin özelliklerine etki eden eser elementlerdir. LGDD için ana elementler karbon, silisyum ve demirdir. Ticari dökme demirlerde karbon ve silisyum seviyeleri Çizelge 3.1'de belirtilen aralıklara tekabül etmektedir [3].

Çizelge 3.1. Ticari tip gri dökme demirlerde karbon ve silisyum yüzdeleri [3]

Demir Tipi	% Toplam Karbon	% Silisyum
Sınıf 20	3,40-3,60	2,30-2,50
Sınıf 30	3,10-3,30	2,10-2,30
Sınıf 40	2,95-3,15	1,70-2,00
Sınıf 50	2,70-3,00	1,70-2,00
Sınıf 60	2,50-2,85	1,90-2,10

LGDD'lerin, küresel grafitli dökme demir ve özel kategorilerde alaşımlı demirlerin üretiminin gelişmesi sebebiyle, büyük bir bölümünün üretim aralığı % 3,0-3,5 toplam karbon içeriği arasında sahiptir. Normal silisyum seviyeleri % 1,8-2,4 arasındadır.

LGDD'ler için ikincil elementlerin birisi fosfor, diğeri ikisi ise birbirleri ile ilişkilendirilmiş elementler olan mangan ve sülfürdür. Bu elementler aynı karbon ve silisyum gibi, LGDD'in metalurjisinde önemli rol oynamaktadır. Tutarlı ve standartlara uygun bir üretimin sağlanması açısından bu elementlerin miktarlarının hassas bir biçimde kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bu elementlerin mutlak seviyelerinin ayarlanması, döküm süreçleri ve uygulamalara göre değişkenlik göstermektedir.

Fosfor, LGDD'lerin tümünde eser miktarda bulunmaktadır. Bilinçli bir biçimde eklenmesi nadiren söz konusudur. Genelde pik demir veya hurdada mevcut olduğu için sıvı metale bu ilavelerden geçmektedir. Belirli bir seviyeye kadar demirin akıcılığını arttırmaktadır. Fosfor, LGDD'in içinde düşük ergimeli fosfat fazı veya fazları oluşturur ve genel olarak bu faz stedit (doymuş Fe_3P) olarak adlandırılır.

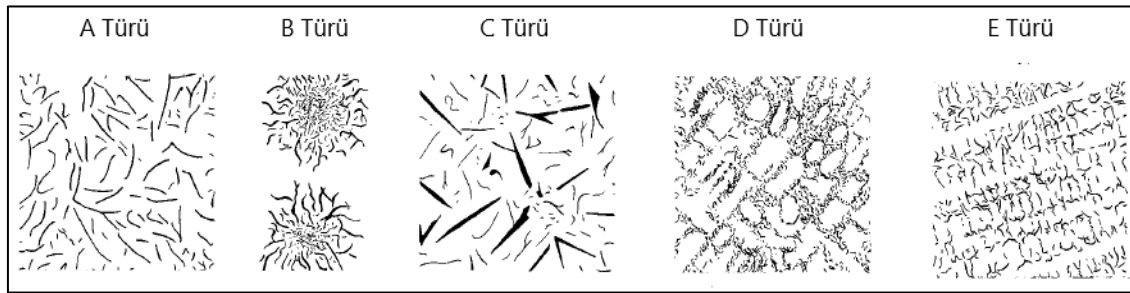
Kükürt seviyesi LGDD'lerde çok önemli bir rol oynamaktadır ve belli bir ölçüde teknik karmaşıklıklar yaratan bir alandır. Birçok araştırmacı, kükürtün LGDD'in çekirdeklenmesinde önemli bir rol oynadığını belirtmiştir. Yaklaşık olarak LGDD'deki kükürt seviye aralığı, en uygun sonuçlar için % 0,05 ila 0,12 gibi bir aralıkta bulunmaktadır. Magnezyum sülfatın oluşumunu teşvik etmek adına LGDD'lerde sülfürün magnezyum ile dengelenmesi önemlidir. Eser elementler ise, mikroyapıya genellikle belli yapıların teşvik edilmesi ve kısıtlanması amacıyla eklenmektedir [3].

Grafit morfolojisi bakımdan incelendiğinde LGDD'in mekanik ve fiziksel özellikleri grafit lamellerinin şekli, boyutu, miktarı ve dağılımı ile doğrudan alakalıdır. Beş ayrı grafit dağılımı söz konusudur (Şekil 3.1). Bunlar;

- A tipi grafit; Demir matrisi içerisinde grafit lamelleri rastgele dağılım ve oryantasyon gösterir. Bu tip grafit içeren demirler, genelde minimum alt soğuma ile katılaşır, en uygun mekanik özelliklerin oluşması için istenen bir yapı şeklindedir.
- B tipi grafit; A tipi grafitten daha yüksek alt soğuma gerektiren ötektik kompozisyona yakın katılaşan yapıdır. Kısmen ince kesitli bölgelerde ve kalın kesitli bölgelerin yüzeyinde B tipi grafit yaygındır.
- C tipi grafit; yüksek karbon içerikli hiperötektik demirlerde meydana gelmektedir. Demirin ilk katılaşmaya başladığı anda C tipi grafit çöker. Sıklıkla kış grafit olarak

anılır. Düz ve kaba plakalar olarak görülür. Demirin mekanik özelliklerini büyük ölçüde düşürür ve işleme yüzeyinde kaba bir görünüm ortaya koyar. Ancak yüksek sıcaklıklarda ve ısı transferi gereken özel uygulamalarda kullanılması uygun bir grafit şeklidir.

- D ve E tipi; Alt soğuma miktarının yüksek, karbür oluşumunun ise yeterli olmadığı durumlarda oluşur. İkisi de dendritler-arası bölgelerde bulunur. E tipi grafitler istenen oryantasyondayken, D tipi grafitler rastgele dağılım gösterirler. Oryantasyondaki değişikliklerindeki farklılıklar grafit lamellerin, parlatılan yüzeyle kesişip kesişmemesi ile alakalı olabilmektedir. Titanyum ve alüminyum, alt soğumuş grafit yapılarının oluşumunu teşvik eder. Demirin alt soğumuş grafit ile ilişkilendirilen matrisi ferrittir. İnce ve aşırı dallanmış lamellerin oluşmasıyla karbon difüzyon mesafesi azalır ve böylece düşük karbonlu bir matris meydana gelir [3].



Şekil 3.1. Gri dökme demirde grafit türlerinin X100 büyütme ile şematik gösterimi [3]

Geniş lameller, Karbon Eşdeğerliliği (KE) yüksek olan ve yavaş soğuma oranlarına sahip demirlerle ilişkilendirilir. Fazlasıyla hipoötektik ve ani katılaşmanın söz konusu olan demirlerde genelde küçük ve kısa lameller görünür. Geniş lameller, yüksek termal iletkenlik ve sönümleme kapasitesi istenen uygulamalar için uygundur. Küçük lameller ise, daha düşük ölçeklerde matriste bozulmaya sebep olduğu için maksimum çekme özelliği ve bitiş yüzeyinin düzgün olması gereken durumlarda tercih edilmektedir.

Matris yapısı ele alındığında genel olarak demirlerde üç faz bulunur; ferrit, sementit ve perlit.

Ferrit; yumuşak, düşük karbonlu α -demir fazıdır. Düşük çekme dayanımı ancak, yüksek süneklik sergilemektedir. Bu fazın oluşumunda, kesit kalınlığının artması kadar silisyum

gibi grafitleştiriciler de etkili olmaktadır. Ferrit ve grafit, genellikle yüksek oranda alt soğumuş bölgelerde bitişik veya birleşik şekilde bulunmaktadır.

Sementit veya ötektik karbür; demir ve karbonun sert, gevrek bir metalik bileşiğidir. Ani soğumanın olduğu döküm bölgelerinde, yani ince kesitli bölgelerde, köşelerde ve dökümün dış yüzeylerinde özellikle oluşan bir fazdır. Düşük silisyum içeriği ve düşük karbon eşdeğerliliğine sahip demirlerin sementit içermesi kuvvetle muhtemeldir.

Perlit; ötektoid dönüşüm ürünüdür ve LGDD’de ferrit ve sementitten meydana gelen lamel plakalardan oluşur. Ferritten daha yüksek sertlik ve çekme dayanımı gösterir fakat sünekliği daha düşüktür. Perlitte sertlik ve çekme dayanımının daha yüksek, birincil olarak tabakalar arası boşluk ile ilişkilidir. Lameller arası boşluğun daha ince olduğu, daha hızlı soğuma oranlarına ve daha yüksek alaşım element içeriğine sahip perlitlerde, sertlik ve çekme dayanımının daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir [3].

Mekanik özellikleri bakımından irdelendiğinde grafit morfolojisi ve matris karakteristiği, LGDD’in fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Geniş lameller, yüksek karbon eşdeğerliliği ile geniş kesitli dökümlerde iyi sönümleme kapasitesi ve daha yüksek boyutsal kararlılık, termal şoka direnç ve işlenebilirlikte artış gibi özellikler katmaktadır. Düşük karbon eşdeğerliliği ve daha hızlı soğuma oranlarının teşviki sayesinde meydana gelen küçük lameller ise yüksek çekme dayanımı, yüksek elastite modülü, çatlak oluşumuna direnç ve düzgün işlenme yüzeyleri elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Lamelli yapılarda perlit inceltir ve istikrarlı hale getirilirse bu durum sertliğin, çekme dayanımının ve aşınma dayanımının da artması ile sonuçlanmaktadır [3].

LGDD’de grafit lamelleri katılırken, karbon atomları grafitin kristal kafesin prizmatik yüzeyine eklenir. Bu yüzden lamelli yapı formları birbirine ötektik hücre veya tanede bağlı bir şekilde büyümeye devam eder. Bu formda grafit ve östenit bir ötektik ikili olarak lamel şeklinde eriyik ile temas halinde büyür, belli bir noktaya kadar östenit grafitin büyümesine öncülük eder. Bu durum, hücre boyunca birbiri ile temas halinde olan grafit lamelleri üretir. Alt soğumuş grafit için de durum aynıdır. Aradaki fark, lamellerin daha ince ve burkulmuş halde oluşmasıdır [6].

3.1. LGDD'in Özelliklerine Elementlerin Etkileri

Az miktarlarda eklenen (yaklaşık % 0,5-0,75) krom, LGDD'in dayanımını önemli miktarda arttırmaktadır. Perlitik matrisi teşvik ederek, sertliğin artmasında da rol oynamaktadır. Ayrıca, krom karbür oluşumunu da tetiklediği için kalın kesitli bölgelerde olduğu gibi aşırı miktarda eklenmesi halinde de çil oluşumuna sebep olabilmektedir.

Bakır, perlitik matrisi teşvik ettiğinden çekme dayanımını artırır. Genel olarak, % 0,25 - 0,5 oranları arasında olumlu etkide bulunmaktadır. Yüksek miktarda eklenmesi durumunda oluşan etkiler çok belirgin değildir. Bakır, hafif grafitleştirici etkiye sahiptir ve bu sebepten ince kesitli bölgelerde grafit oluşumunu teşvik etmemektedir. Kurşun gibi bağlayıcı elementler ile karşılaşp bağlanmaması adına bakır, yüksek saflıkta eklenmesi gereken bir malzemedir [3].

Nikel, % 2'ye kadar olan içeriklerde az miktarda çekme dayanımını artırır. Nikel karbür oluşumunu teşvik etmez, ayrıca grafitleştirici etkisi çok düşüktür. Element olarak eklenir ve çözünmesi ile ilgili şimdiye kadar bir problem görülmemiştir [3].

Molibden, % 0,25 - 0,75 oralarında dahi ilave edildiğinde LGDD'in çekme dayanımını artırır. Anlaşıldığı kadarıyla bu artışın sebebi perlit lamelleri arasındaki mesafeyi azaltmasından ötürü lamellerin incelenmesi ve matrisin güçlenmesinden kaynaklanmaktadır. Molibden, karbür oluşumunu teşvik etmemektedir [3].

Kalay, % 0,025 - 0,1 oranlarında ilave edildiğinde güçlü bir perlit dengeleyicidir. Diğer bir değiş ile perlitin ayrışmasına izin vermemektedir. Tam perlitik bir LGDD'de çekme dayanımına görünen direk bir etkisi olmasa da, ferritik demirlerde az miktarda çekme dayanımını arttırmaktadır. Perlit dengelemek için kullanılan seviyenin aşılmasının engellenmesi durumunda gevrekleşmenin de önüne geçilmiş olur. Normalde kalay ticari saf kalay olarak eklenir. Bismut, kurşun ve antimon gibi elementler ile oluşacak kirliliği önlemek adına dikkatli bir şekilde ele alınması gereken bir elementtir [3].

3.2. Aşılama İşlemi ve Özelliklere Etkileri

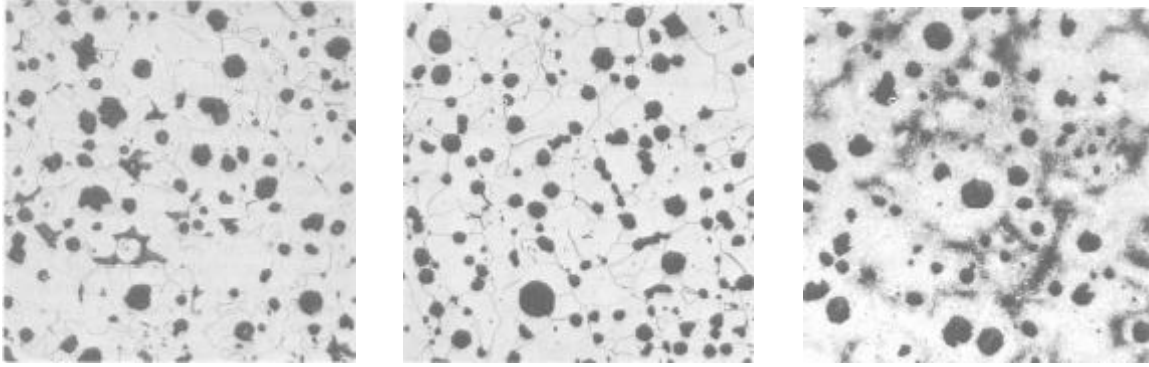
Aşılama olarak tanımlanan Ferrosilisyum (FeSi) alaşımları, sıvı haldeki demire ilave edilerek, grafit dağılımı ve soğuma koşulları kontrol edilir. Böylece mekanik özelliklerin iyileştirilmesi sağlanarak, istenilen özelliklerde dökme demir üretimi mümkün kılınır. Yalnız, bu durumları silisyum kaynaklı oluşan kompozisyon değişiklikleri ile açıklamak pek mümkün olamamaktadır. Sadece grafitin tek başına ya da FeSi ile birlikte eklenmesi de demirin kimyasını pek değiştirmeden aynı ölçüde benzer değişimleri sağlamaktadır. Aynı kompozisyona sahip olduğu belirgin bir biçimde görülen iki demir ele alındığında; aşılانmış olan ve olmayanın aralarında gözle görülür bir biçimde farklı mikroyapı ve dolayısıyla özellik farkları olmaktadır. Aşılamanın arkasındaki mekanizmaların nasıl olduğunu izah etmek adına birçok çalışma yapılmıştır. Ancak, çok sayıda teori olmasına rağmen olası mekanizmalar hakkında pek bir sonuç elde edilememiştir [3].

Aşılamadaki amaç sıvı demir içerisindeki çekirdek sayısını arttırmak, böylece ötektik katılaşmadaki, özellikle grafitin çökmesini, minimum alt soğuma ile başlamasını sağlamaktır. Alt soğuma en düşük seviyelere çekildiği durumlarda, çil olarak adlandırılan ötektik karbür veya BDD oluşturma eğiliminde de aynı oranda azalma görülmektedir. Bu yapının yerine daha eş dağılımlı küçük A Tipi grafit lamelleri barındıran bir mikroyapı elde edilir. Mikroyapıdaki bu değişim işlenebilirlik ve mekanik özelliklerde iyileşmeyle sonuçlanabilmektedir.

Demirlere birkaç sebepten dolayı aşılama uygulanmaktadır. En önemli sebep, ince kesitli bölümlerde, köşeler ve uçlar boyunca dökümün soğuma bölgelerinde oluşan ani katılaşmaları kontrol altına almak olarak öngörülebilir. Aşılama sayesinde çekme dayanımı da arttırılabilmektedir. Bu durum, düşük KE'ne sahip demirler için kısmi olarak geçerlidir. Ancak, düşük KE'ne sahip LGDD gibi demir türleri karbür oluşumuna en yatkın dökme demirlerdir. Aşılama, demirin çil oluşumu eğilimini minimuma indirerek, ince kesitli bölgelerde dökülürken oluşan problemleri ortadan kaldırabilmektedir [3].

4. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (KGDD)

Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) mikroyapısında Şekil 4.1’de belirgin bir şekilde görülmekte olan küre şeklindeki grafitlerden ismini almıştır. KGDD, katılaşma esnasında, ötektik grafitin aynı LGDD’de olduğu gibi, sıvı demirden ayrışması (neo-ötektik katılaşma) ile oluşur. Ancak, döküm sırasında sıvı halde yapılan ilave ve işlemlerin etkisi ile LGDD’de görülen iğnemsil lamel yapı yerine, grafit küresel bir şekilde büyümektedir. Temper veya LGDD’den daha yüksek uzama değerlerine sahip olması ve dayanımının daha iyi olması, küresel grafit içermesinden kaynaklanmaktadır. İçinde oluşan bu doğal kompozit yapı KGDD’e eşsiz özellikler kazandırmaktadır.



Şekil 4.1. Küresel grafitli dökme demir mikroyapıları [3]

Birçok yapısal uygulamada dayanım ve tokluk açısından KGDD, LGDD ve temper demire kıyasla avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, KGDD’in grafit kürelerinin üretiminde aşılama ve ısıtıl işlem süreçleri gerektirmesine rağmen, Temper D.D. olduğu gibi (temper karbon kürelerinin üretiminde gereken) herhangi bir ısıtıl işlem gerektirmemesi de bu malzemeyi avantajlı hale getirmektedir.

Genel olarak karakteristiği ele alındığında kompozisyon olarak alaşımsız KGDD, Temper ve LGDD’den farklıdır. KGDD için kullanılan ham madde saflığının daha yüksek olması gerekmektedir. Sıvı haldeyken, yüksek akışkanlığa, mükemmel dökülebilirliğe, fakat aynı zamanda yüksek yüzey gerilmelerine sahiptir. KGDD için kullanılan kumlar ve döküm ekipmanları yüksek rijitlik ve kuvvetli sıcaklık transferi sağlamalıdır [3].

Grafitin küreselleştirici olarak sayılabilecek başlıca üç tip farklı ilave malzemesi söz konusudur. Bunlar; saf magnezyum, magnezyum içeren ferrosilisyum ve nikel-bazlı küreselleştiricilerdir. Alaşımsız magnezyum metali tel, ingotlar veya pelletler olarak sıvı demire ilave edilmektedir. Ayrıca sünger demir ile beraber peletler ile kombine edilmiş birketler halinde, granürlü kireçle beraber peletler ile kombine edilerek veya metalurjik kokun hücresel gözeneklerinin içinde ilave edilir. Magnezyum içeren alaşımlarda, açık pota veya örtülü pota olarak magnezyum alaşımları sıvı haldeki demire karıştırılabilmektedir. Bu yöntemlerde ya alaşım potanın dibine yerleştirilip sıvı haldeki demir bu potanın üzerine dökülür ya da basınçlı bir konteyner ters çevirilerek demirin magnezyum üzerine akması sağlanır. Bir diğer şekliyle magnezyum basınçlı bir potanın dibine daldırılabilir. Her yöntemde magnezyum buharlaşır ve buharlaşan magnezyum sıvı demirin içerisinde dolaşmaya başlar. Bu dolaşma sayesinde kükürt içeriği düşer ve küresel grafit oluşumu teşvik edilmiş olur.

KGDD'in özellikleri öncelikle kimyasal bileşime bağlıdır. Aynı bileşimdeki sıvıdan dökülen her bir dökümün, diğer dökümlerin kimyasal bileşimleri ile aynı olması gerekir. Bütün elementler var olan özelliklere etki etmektedir. Fakat azami önemle etki edenler, matris yapısında güçlü etki yaratanlar veya grafit kürelerinin şekline veya dağılımına etkide bulunanlar olarak değerlendirilebilir [3].

4.1. KGDD'lerin Özelliklerine Kimyasal Bileşimin Etkileri

Karbon, döküm metallerinde hem sıvı metalin akıcılığını hem de büzülme karakteristiğini etkiler. Aşırı miktarda karbon çözelti haline gelemmez ve süspansiyon halinde sıvı metalin içerisine hapsolursa akıcılığı düşürür. Grafitin hacmi aynı ağırlıktaki demirden 3,5 kat daha büyüktür. KGDD katılaşıırken çözünmüş karbon, grafit olarak çökelir ve demirin içerisinde genişmeye sebep olur. Belli bir miktar üzerindeki karbon içeriği yorulma dayanımı ve çekme dayanımının düşmesine sebep olabilmektedir. Karbon miktarı, grafit çekirdeği sayısı ve aşılama seçimi, katılma esnasında oluşacak küreciklerin boyutuna ve sayısına etki eder.

Standartlara uygun miktarda grafit içeren KGDD, aynı kesit alanına sahip çelik ile kıyaslandığında % 10 daha az ağırlığa sahiptir. Aynı zamanda grafitin kayması sebebiyle oluşan sürtünmelerde yağlayıcılık sağlar ve bu düşük sürtünme katsayıları, takımların daha

verimli çalışmasına imkân verir. Kullanım ya da talaşlı imalat esnasında yağlayıcı kaybı gibi durumlarda, kavrama ve tutunma gibi sürtünme oluşturacak durumlara engel teşkil eder. Yapısındaki ferrit matris ağırlıklı olan KGDD’lerde daha yüksek işlenebilirlik sağlanabilmektedir. Ayrıca, ileride yüksek mukavemet ve aşınma dayanımı üretmek adına ısıtıl işlem uygulanarak tekrar çözünebilir hale getirmek mümkündür.

Silisyum, güçlü bir grafit oluşturunca elementtir. Normal kimyasal bileşim limitleri dâhilinde, silisyum miktarındaki artış, yapıda kademeli olarak daha fazla miktarda ferrit oluşmasını teşvik eder. İlave olarak, ferritin çözünme direncine ve sertliğine katkı sağlamaktadır. Ferrit miktarındaki artış akma ve çekme dayanımını düşürmekte, fakat uzamayı ve darbe dayanımını arttırmaktadır. Ayrıca silisyum, perlitik KGDD’de grafit kürelerinin etrafını sarmaladığından akma dayanımını düşürmesine karşın, uzama, darbe dayanımı ve yorulma direncini iyileştirmektedir. Ferritik KGDD’lerde silisyum hem döküm sonrasında hem de kritik sıcaklık altı tavından sonra ele alındığında darbe dayanımını düşürür. Oda sıcaklığında -40°C ’ye kadar oluşacak çatlak dayanıma maksimum direncin sağlanması için; fosfor içeriği % 0,02’nin altında ise silisyum % 2,75’in, fosfor içeriği % 0,05 ise silisyum içeriği % 2,55 ile sınırlanmalıdır [3].

Mangan, genel olarak KGDD’in mekanik özelliklerini geliştirmek için ilave edilen tüm elementlerin arasında perlit stabilizörü olarak görev yapmakta ve dayanımı arttırmaktadır. Yalnız, bu durum, işlenebilirliği ve sünekliği düşürmektedir. Aynı zamanda tane sınırlarında segregasyona teşvik ettiğinden dolayı, Östemperlenmiş KGDD yapımında mangan sınırlanmalıdır.

Nikel, sık sık ince perlit oluşumunu teşvik ederek dayanımı ve sertleşebilirliği arttırmak için tercih edilir. Özellikle, Östemperlenmiş KGDD’in üretiminde yüzey sertleştirme uygulamalarında kullanılır [3].

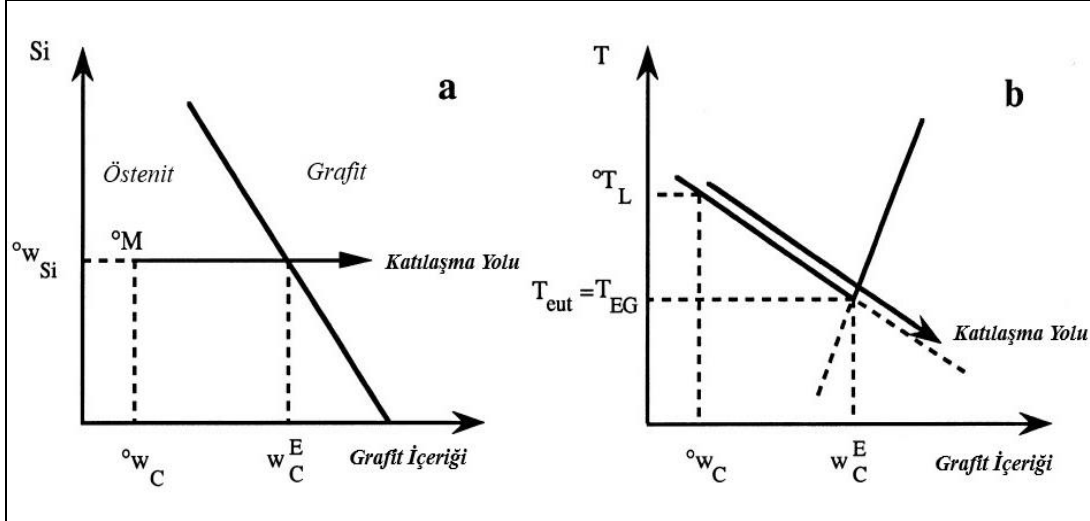
Bakır, yüksek dayanım ile beraber yüksek tokluk ve işlenebilirlik için perlit oluşturunca olarak kullanılmaktadır [3].

Molibden, yüksek dayanım ile beraber yüksek tokluk ve işlenebilirlik için perlit oluşturunca olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, Östemperlenmiş KGDD’in kalın kesitlerinde sertleşebilirlik arttırmak amacıyla da kullanılmaktadır. Kararlı karbürler gibi tane

sınırlarında segregasyona uğrama eğilimi olduğundan Mo miktarı kontrol altında tutulmalıdır [3].

4.2. Ötektik Katılaşma Farklılıkları ve Düzenleri

Grafik üzerinde başlangıç kimyasal bileşimin izdüşümünde, kararlı faz diyagramı olarak adlandırılan östenit ve grafit ile sıvı metal yüzeyin kesişen noktalarının şematik gösterimi Şekil 4.2.(a)'da görülmektedir. $^{\circ}M$ noktasına tekabül eden başlangıç kimyasal bileşimleri ($^{\circ}w_C$, $^{\circ}w_{Si}$) sırasıyla karbon ve silisyumun içeriğini ifade etmektedir. Katılaşma esnasında kalan sıvı metalin kimyasal bileşimini göstermektedir. Sıvı metalin kimyasal bileşimini ($^{\circ}w_C$, $^{\circ}w_{Si}$) değerlerindeki değişimin oluşturduğu bu alan katılaşma yolu olarak adlandırılmaktadır. Silisyum, katılaşmanın ötektik öncesi evresinde ilk fazın grafit veya östenit olması fark etmeksizin belirgin bir segregasyon sergilememektedir. Dolayısıyla ilgili alandaki w_{Si} içeriğine bağlı eğrinin karbon içeriği eksenine paralel olması doğru bir ifadedir [7].

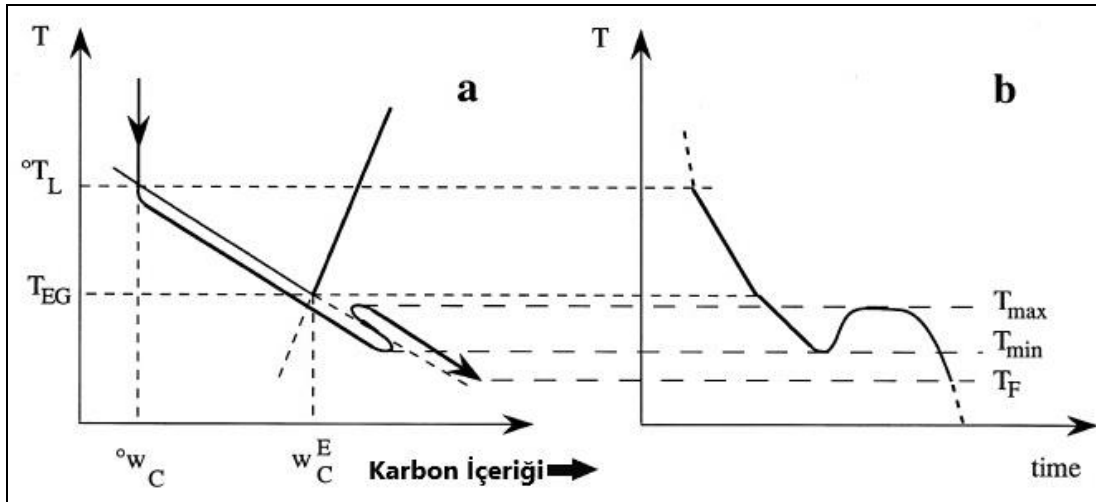


Şekil 4.2. İlgili Fe-C-Si denge diyagramı ve katılaşma yolunun şematik gösterimi (a) Kompozisyon düzlemi üzerinde gösterilen sıvı yüzeyin izdüşümü, (b) Eş değer kesitin katılaşma yolu $w_{Si} = ^{\circ}w_{Si}$ [7]

Aynı zamanda katılaşma yolu, başlangıç silisyum içeriği olan " w_{Si} ", ($w_{Si} = ^{\circ}w_{Si}$) olarak kabul edilerek, Fe-C-Si üçlü diyagramında sıvı metalin yüzeyinin eş değer kesiti olan (T , w_C) diyagramı olarak da izah edilebilir (Şekil 4.2.b). Bu şekilde görünen T_{eut} ikinci faz (Hipoötektik bir alaşımın gösterimi olan Şekil 4.2'deki diyagramlarda olduğu gibi, bu

faz grafit fazıdır.) çekirdeklenerek büyüebilmektedir. Böylece, “ w_{Si} ” silisyum içeren bir dökme demirin katılaşmasında, “ $T_{eut} = T_{ET}$ ” sıcaklığının sıvı $\rightarrow$ östenit + grafit reaksiyonu başladığı sıcaklık olarak nitelendirilebilir [7].

KGDD gibi alaşımlı metallerde şekilde görünen ötektik çizgi °M noktasına Şekil 4.2.(a)’daki gibi olan pozisyonuna göre hipoötektik, ötektik veya hiperötektik olarak üçe ayrılmaktadır. Bu durumda Şekil 4.3’deki hipoötektik alaşımın katılaşma düzenini ifade etmektedir. Sıcaklığın T_L nominal sıvı sıcaklığının altına inmeye başlar başlamaz, çekirdeklenme ve büyüme için benzer önemli bir bariyer olmadığından sıvı metalin içerisindeki östenit dendritlerin katılaşması belirgin hale gelmesi varsayılacaktır. Katılaşma esnasında Şekil 4.3.(a)’da görüldüğü gibi γ dendritleri büyür ve sıvı kimyasal bileşimi, östenitin sıvılaşma eğrisine bağlı kalır. “ T_{EG} ” sıcaklığına erişildiği andan itibaren grafit çekirdeklenmesi başlamaktadır. Östenit kabuk tarafından sarılincaya kadar kısa bir süre boyunca sıvı metal içinde grafit parçacıkları serbestçe büyümeye devam eder. Ötektik kürelerin devam eden büyümesi, östenit kabuk üzerinden olacak şekilde, sıvı metalden grafit küreciğine doğru karbonun difüzyonu tarafından kontrol edilir [7].

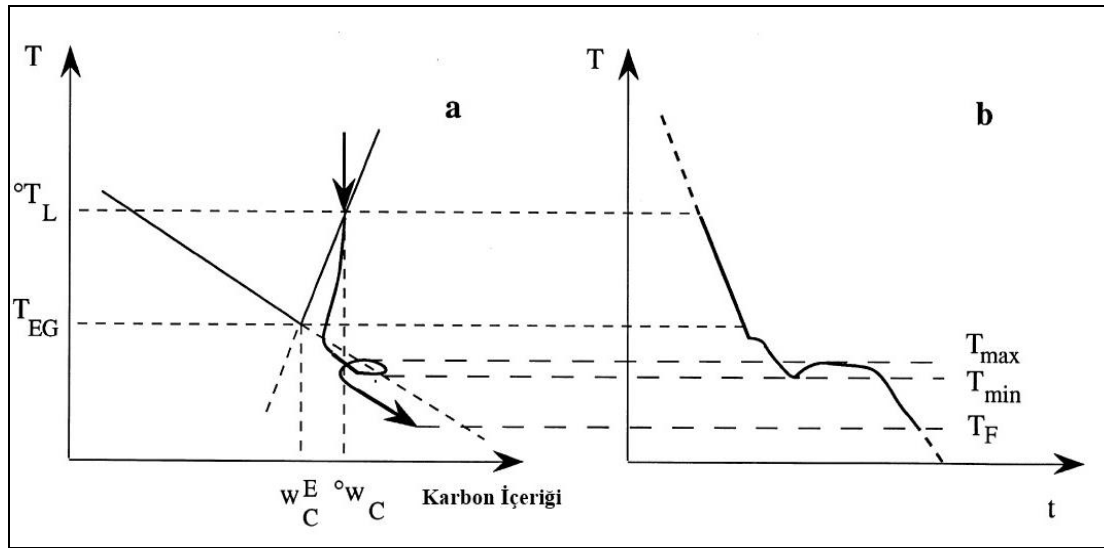


Şekil 4.3. Hipoötektik KGDD'in katılaşma düzeninin şematik gösterimi (a) Eş değer kesitin katılaşma yolu $w_{Si} = °w_{Si}$, (b) Soğuma eğrisi [7]

Bu büyüme kalan sıvının, grafit sıvılaşma eğrisinde de gözüktüğü gibi giderek daha da aşırı doymuş hale gelmesi ile devam eder. Katılaşan metal östenit eğrisinde gözüken “ T_{EG} ” sıcaklığının altına kadar γ dendritleri gelişmeye devam eder. “ T_{EG} ” sıcaklığının altında bulunan “ T_{min} ” sıcaklığı civarına gelindiğinde, ötektik küreciklerin sayısı ve büyümeleri

için gereken itici kuvvetin, artık ötektik reaksiyonun baştanbaşa daha hızlı gerçekleşebilmesi için yeterince yükseldiği anlamına gelmektedir. Bu durum ötektik reaksiyonun etkili bir sebebidir. Sıklıkla da " T_{max} " sıcaklığına yeniden ısınma için yetecek kadar da yoğundur. Şekil 4.3.(b)'de grafikte de görüldüğü gibi, bu durumda termal analiz esnasında ötektik duraksama olarak adlandırılan duruma öncülük eder. Katılaşmanın tamamlanması, genelde " T_{min} " sıcaklığının altında bulunan " T_F " sıcaklığı civarlarında tamamlanır [7].

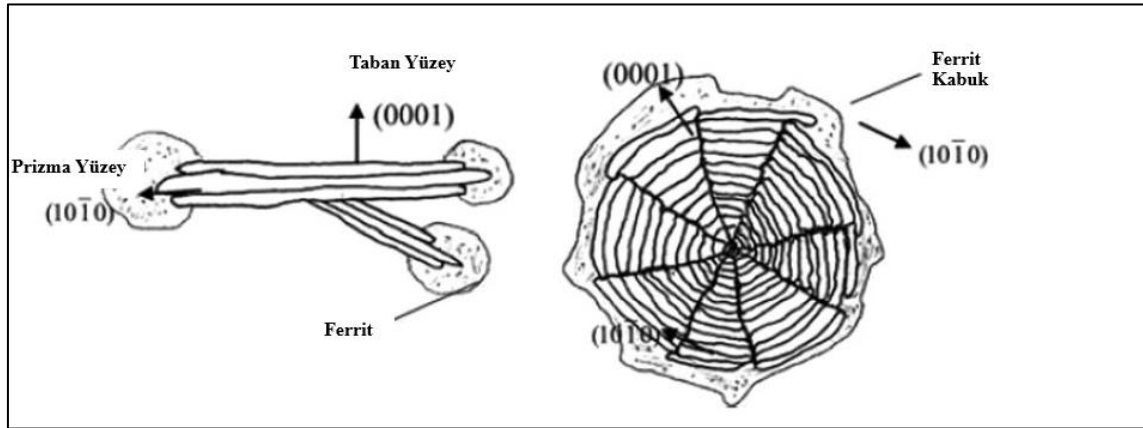
Dökme demirler için hiperötektik katılaşma düzeninin şematik gösterimi Şekil 4.4'de gösterildiği gibidir. Sıvı metaldeki grafit parçacıklarının çekirdeklenmesi ve serbest bir şekilde büyümesi ile başlar. Bu iki süreç zor ve denge durumundan ayrıışan bir şekilde ilerlemektedir. Bu nedenle katılaşma yolu, grafit eğrisinin altında bir bölgede bulunan grafitin proötektik çökmesi ile alakalıdır ve Şekil 4.4.(a)'da gösterilmiştir. Tam pozisyonu ise sıvı metalin hazırlanması (işlem ve aşılama) ve soğuma oranına bağlıdır. İlgili grafitin miktarının çok düşük olması sebebiyle termal analiz esnasında grafitin çökmesi, soğuma eğrilerinde genelde görülememektedir [7].



Şekil 4.4. Hiperötektik KGDD'in katılaşma düzeninin şematik gösterimi (a) Eş değer kesitin katılaşma yolu $w_{Si} = °w_{Si}$, (b) Soğuma eğrisi [7]

Katılaşma yolu yarı-kararlı östenit sıvılaşma eğrisi ile kesişir kesişmez, yığın halindeki sıvıdan östenitin çekirdeklenmesi gerçekleşmektedir. Bu sebeple katılaşmanın ilerleme koşulunun, hipoötektik dökme demirler için katılaşma yolunun östenit eğrisine bağlı kaldığı bölgede olduğu düşünülmektedir. Ötektik kürelerin sayısının az olması veya

büyüme için gereken itici kuvvetin küçük olması durumunda yalnızca kitlesel ötektik reaksiyonun gecikmesine sebep olabilmektedir. Sonrasında Şekil 4.4.(b)'de görüldüğü gibi metal soğumaya devam ederek, yeniden ısınmanın başladığı " T_{min} " sıcaklığına inebilir. LGDD katılaşmasında lamelli grafit, az veya çok küresel şekle sahip olabilen ötektik hücrelerin oluşması ile katılaşır. Her ötektik hücrenin çekirdeklenme ile oluştuğu düşünülmüştür. Bu hücreler, birbiri ile bağlantılı lamel grafit tabakaların östenit ile sarılmasıyla oluşur. Hücre içerisindeki grafitin dallanma derecesi alt soğumaya bağlıdır, grafitlerin daha dallanmış durumda olması, alt soğumanın yüksek olmasının sonucudur. Ötektik büyüme esnasında öncülük eden faz grafitir. Grafit boşluklarına etki eden parametreler, sıradan ötektik parametreleri ile aynıdır, yüzeyin kararsızlığı dallanmanın oluşmasına sebep olur. Sırasıyla yüzey kararsızlığına sebep olan etmenler; kompozisyondaki, taşınım akımlarındaki, kristalografik oryantasyonun ısı çıkış yönlerine göre değişimindeki ve sıcaklık gardiyanındaki yerel değişimlerdir [7].



Şekil 4.5. KGDD ve LGDD'in grafit katılaşma biçimlerindeki yönlemsel farklılıklar [8]

Elde edilen teorilerin çıkarımları doğrultusunda küresel grafitin grafit-sıvı yüzey enerjisi, lamel grafitte göre daha yüksektir. Grafitin hata üzerinden büyüme teorisi KGDD'in grafit gibi façetalı kristal büyüme mekanizmaları ile oluştuğunu göstermektedir. Bu mekanizmalar iki boyutlu çekirdeklenme, burma sınır basamağı ve vida dislokasyonu olarak değerlendirilebilir. İlk iki mekanizma (1010) yüzeyine uygulanan üstel kanunlar çerçevesinde, grafit kristalinin üçüncü mekanizma ise (0001) yüzeyine parabolik kanunlar çerçevesinde yönetilmektedir.

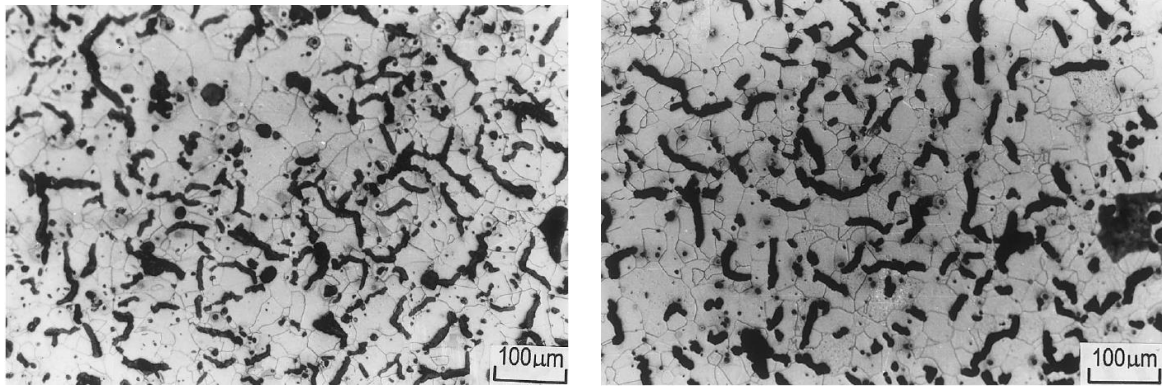
Sıvı metale, kükürt gibi zayıf ve reaktif safsızlıkların eklenmesi sonucunda kirlenmiş bir çevre ortaya çıkar. Bu elementler basamakların köşe enerjilerini değiştirir, ilgili bölgedeki kompozisyonu ve büyüme oranlarının etkilenmesine sebep olur [7].

Özetle saf çevreye sahip grafit kristalinde en yüksek büyüme oranı (0001) yönündedir ve bu yönde oluşan büyüme dallanmayan tek kristallerin oluşması ile sonuçlanmaktadır. Kükürt ve oksijen gibi elementler kirlenmiş çevrede yüksek enerjiye sahip (10 $\bar{1}$ 0) düzlemi tarafından absorbe edilir çünkü bu düzlemde elverişli bağ sayısı daha azdır. Sonrasında Şekil 4.5’de görüldüğü gibi (10 $\bar{1}$ 0) düzlemi, (0001) düzlemine kıyasla daha düşük yüzey enerjisine ulaşır ve büyüme (10 $\bar{1}$ 0) yönü üzerinde etkin hale gelir. Bu durum sonucunda lamel yapıda grafit oluşur.

KGDD açısından yapılacak değerlendirmede reaktif safsızlıklar (Mg, Ce, La), sıvı metaldeki yüzey-aktif elementleri (S, ikili halde O, Pb, Sb, Ti vb.) ile bağ yaparak nötr hale getirirler. Ayrıca (10 $\bar{1}$ 0) prizmatik yüzeyindeki büyümeyi engeller. Böylece polikristal bir küresel grafit oluşmuş olur [3].

5. VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (VGDD)

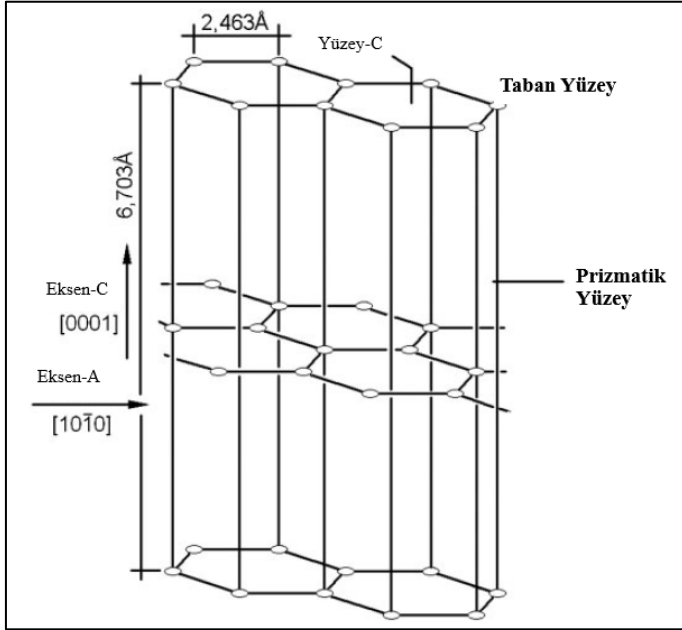
Vermiküler grafitli dökme demir (VGDD), grafit morfolojisi bakımından ele alındığında grafit şeklinin, KGDD ve LGDD'lerin her ikisinden de benzer özellikler aldığı görülmektedir. LGDD'in grafit morfolojisi keskin hatlara sahiptir ve lameller birbiri ile bağlantılıdır. KGDD'de ise grafit, bağımsız ve küresel bir şekle sahiptir. VGDD ise; optik mikroskop altında incelendiğinde Şekil 5.1'deki gibi lamelli bir yapıya benzer bir görüntü ortaya çıkmakta, fakat bu lamellerin farkı keskin hatlı grafitler yerine daha kavisli, yuvarlanmış uçlu (solucanımsı) grafitlere sahip olduğu görülmektedir. VGDD grafitleri, aynı LGDD'deki gibi birbiri ile bağlantılıdır. Fakat grafitlerin uçları küresele benzerlik göstermektedir. Grafit şekli kategorize edilirken uzunluk-genişliğe oranlanmaktadır (L/d). Bu (L/d) oran VGDD'de 2-20 arasında değişmekteyken, LGDD'de ise bu oran 50'nin üzerindedir. KGDD için bu oran 1 civarı olduğundan VGDD, KGDD'den yüksek fakat LGDD'den düşük bir orana sahiptir [6].



Şekil 5.1. Döküm sonrası farklı kesit aralıklarında VGDD mikroyapıları (% 3,5 Nital ile dağlanmış) [10]

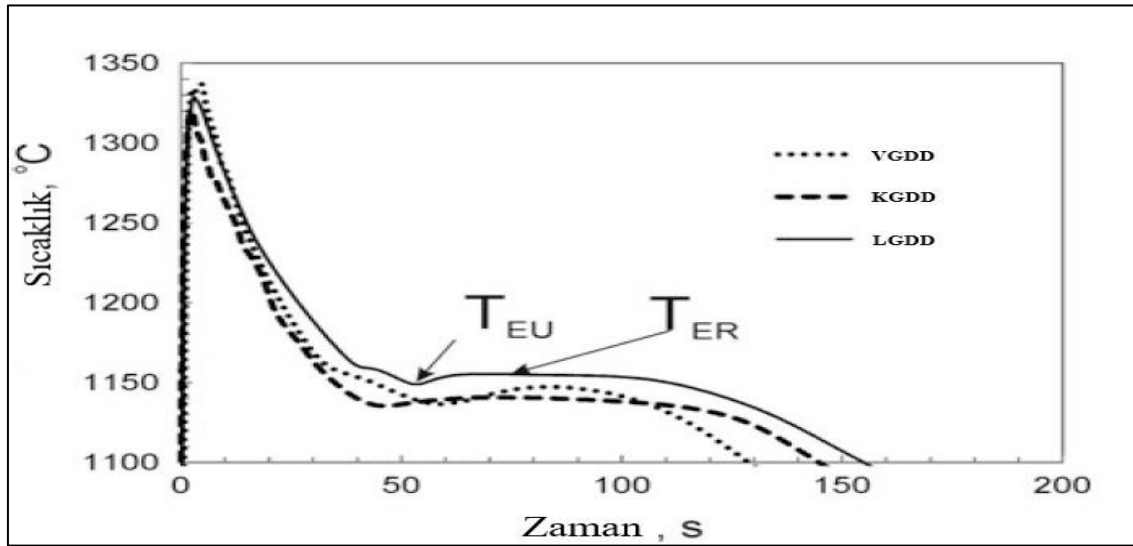
Bu demirlerin katılaşma mekanizmasından bahsetmek gerekirse, ele alınması gereken ilk olgu grafitin katılaşma mekanizmasıdır. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi grafit hekzagonal bir kristal yapıya sahiptir. Bu kafes incelendiğinde 6 adet prizma ve 2 adet taban yüzey olduğu görülür. Hekzagonal olan bu kafesin katmanlı bölgelerinde sürekli ağ oluşturmuş taban yüzeylerindeki karbon atomları birbiri ile kafes içerisinde kuvvetli bir bağ yapmaktadır. Bu taban katmanları oluşturan karbon atomları arası bağ 100- 200 kcal/mol arasında bir bağ enerjisine sahipken, örtüşen yüzeylerinde (kenar yüzeylerinde) ancak 1-2 kcal/mol bağ enerjisi oluşmaktadır. Bu bağ enerjisi farkı, taban yüzeyler üzerinden birleşen kafeslerin,

prizmatik yüzeyler üzerinden birleşen kafeslere göre çok daha zayıf kalmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak, prizma yüzeyleri daha yüksek enerjiye sahip olmaktadır. Prizmatik yüzeyler, safsızlıkların absorbe edilebilmesine daha yatkın ve yerleşmelerine daha elverişli olduğu için bu yüzeyler dökme demirlerin katılaşmasında önemli rol oynamaktadır [8,11,12].



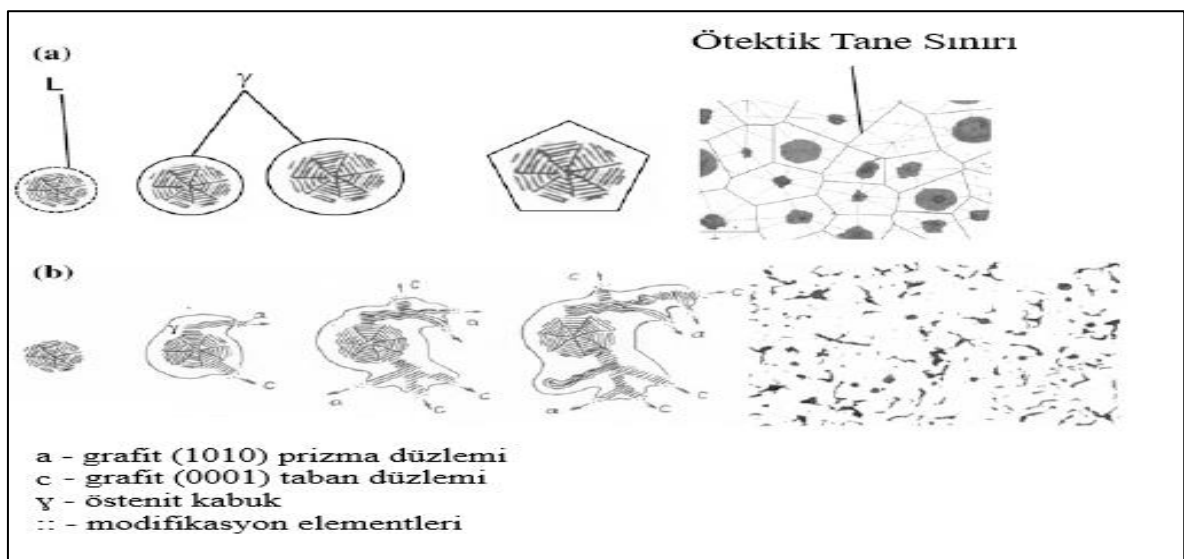
Şekil 5.2. Hekzagonal grafit kafes latis parametreleri yüzey bölgeleri [8]

Bu etki şu şekilde açıklanabilir; üzere, kükürt ve oksijen gibi küreselleştirici elementlerin, yüzeyde absorbe edilerek ortamdan uzaklaştırılması, A-ekseni üzerinde daha sıkı hale gelmiş spiral bir şekilde büyümeyi teşvik eder, C-ekseni boyunca ise atomik anlamda, daha kolay bir büyümeye yol açar [13]. Şekil 5.4'te görüldüğü üzere vermiküler grafit, büyüme davranışı olarak her ikisinden de izler taşımaktadır ve ikisinin arasında bir büyüme mekanizmasına sahiptir. Lamel grafit düşük bir alt soğuma gerektirir ve grafitler birbiri ile bağlantılı durumdadır. Büyüme mekanizmasının, neredeyse östenit fazına benzer prizma yüzeylerinin façetasız bir düzende olduğu söylenebilir. Bu durum zayıf bağlantılı halde ötektik hücre büyümesine yol açmaktadır.



Şekil 5.3. Aynı kompozisyondaki KG, LG, VG dökme demirlerin soğuma eğrilerinin termal analizi, (T_{EU}) En düşük ötektik sıcaklık (T_{ER}) En yüksek ötektik sıcaklık [9]

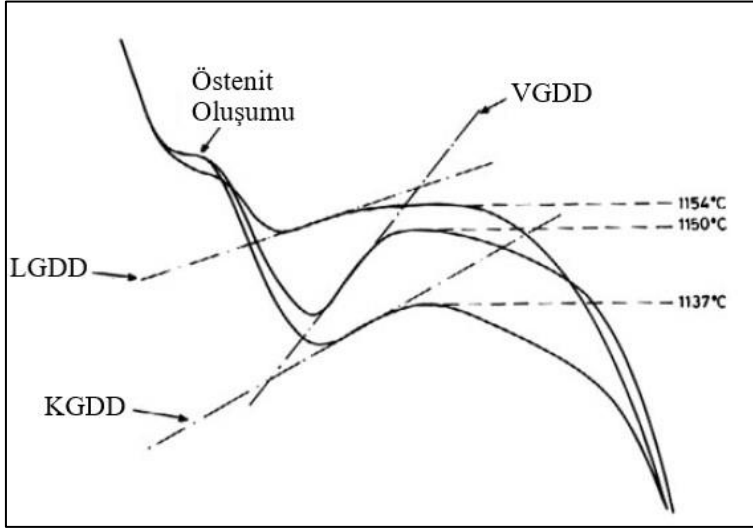
Küresel grafit ise Şekil 5.3 ve Şekil 5.5'te görüldüğü gibi, tam tersi yüksek alt soğumaya sahip olduğu ve büyüme esnasında belirgin engeller olduğu belirlenmiştir. Taban yüzeylerde östenitin ortaya çıkmadığı ve grafitin birbiri ile bağlı, façetalı bir şekilde büyüme gerçekleştiği görülmüştür. Böylece her küresel grafit bağımsız bir biçimde çekirdeklenirken, sıvı metal içerisinde bağımsız büyüyen küreler oluşmaktadır (neo-ötektik katılaşma) [11].



Şekil 5.4. a) KGDD içerisindeki ötektik tanelerin büyüme yöneliminin şematik gösterimi, b) küresel grafitten vermiküler grafit dönüşüm mekanizmasının şematik gösterimi [9]

Vermiküler grafit ise, her ikisinin ortasında bir alt soğuma sergiler ve büyüme mekanizması prizma yüzeylerde olduğu kadar taban yüzeylerde de gerçekleşmektedir. Termodinamik ve kinetik çıkarımların ışığında elde edilen birkaç hipotez üzerinden değerlendirildiğinde, kükürt ve oksijen gibi belli başlı safsızlıkların küçük miktarlarda sıvı metalde bulunması, sınırlı alt soğuma ile prizma yüzeylerde büyümeyi teşvik etmektedir.

Bu safsızlıkların uzaklaştırılması ise prizma yüzeylerde engel teşkil ederek taban yüzeylerde büyümeye teşvik etmektedir. Bu teşvik sayesinde büyüme küresel grafitin mekanizmasına doğru şekillenmektedir [6,11].



Şekil 5.5. KGDD, LGDD, VGDD'lerin katılaşmalarında değişen soğuma eğrileri [8]

5.1. VGDD Üretim Metotları

VGDD üretim metotları yıllardan bu yana gelişen yeni yöntemler sayesinde hem üretim tekniği, hem de kalite bakımından ticari olarak daha da gelişmiştir. Bu metotlar aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

5.1.1 Kapsamlı desülfürizasyon

Kapsamlı desülfürizasyon olarak adlandırılan bu metotta vermiküler grafit oluşturmak için düşük dayanım sahibi demirlere kalsiyum karbür püskürtülür. Desülfürizasyon derecesi yükseldikçe grafit lamelleri daha kısa ve yoğun bir hal almaktadır. Kalsiyum karbür

püskürtülmesi magnezyum oksit ve nadir elementlerle veya kalsiyum karbür ve nadir elementlerin oksitleri ile beraber eklenmesi ile farklı başarılar elde edilmiş, üretilen bu demirlerin dayanım değerleri lamel grafitli dökme demirin üzerinde bir değere ulaşmıştır. Ayrıca, saf Fe-C-Si alaşım sistemlerinde, keskin bir desülfürizasyon ve takip eden hızlı soğuma (112°C/dak) koşulları altında grafit şekli, köşeleri yuvarlanmış daha kısa ve kalın bir biçim almaktadır.

5.1.2 Azot ilavesi tekniği

Bu yöntem, azot içeriği kontrol altına alınarak uygulanmaktadır. Genel olarak, tüm dökme demirlere sunulan ve grafit yapısını etkilediği kanıtlanmış olan azotun istenen alt soğuma değerini yaratmasıdır. Azotun ilerleyen katı ara yüzeyin önüne geçen sıvıda segregasyona uğraması ve eklenen sıvı atomlara karşı bir difüzyon bariyeri oluşturması ile istenen alt soğumaya sebep olduğuna inanılmaktadır. Böylece kontrollü miktarlarda verilen azotun farklı biçimlerde grafit oluşturması mümkündür. Bu metottaki tek problem azot dengesinin kontrolünün hassas ve kesin bir biçimde hesaplanması gerekliliğidir. Aksi takdirde gaz miktarındaki artış gaz boşlukları ve benzer hatalara sebebiyet verebilmektedir [1].

5.1.3 Eksik işlem tekniği

Diğer bir metot ise bilinçli bir biçimde uygulanan eksik işlemdir. Bu metotta eklentiler ile işlemin tamamlanması engellenir. KGDD üretiminde magnezyum içeriği hedefi kalıntı olarak % 0,05-0,06 iken, VGDD üretiminde tamamen küreselleşme oluşturmayacak miktarda (% 0,01-0,02) yani dar bir aralıkta etkili olan, eksik besleme (ilave) esasına dayanmaktadır. Bir başka deyişle, Magnezyum miktarının bilinçli olarak eksik bırakılması sıvı metaldeki reaksiyonun sadece başlamasına yetecek kadar olduğu için küresel grafitin tamamen oluşmasına yetmez. Tamamlanamayan bu grafit yapısı vermiküler grafit yapısını oluşturur [1].

Ancak, bu üretim metodu geniş üretimler için benimsenmesi zor bir işlemdir. Magnezyumun sıvı metal içerisinde rahat bir şekilde difüze olabilmesi, düşük ergime noktası ve yüksek uçuculuğa sahip olması bu duruma sebep olarak gösterilebilir. Fakat sönümlenme süresi düşüktür. Nadir toprak elementleri ise, yüksek kaynama noktası ve

düşük uçuculuğa sahip olduğu için sönmelenmeye daha az yatkınlık gösterirler ve kalıntı durumunda kalma olasılıkları daha muhtemeldir [1].

Bu teknik, magnezyum ile birlikte nadir elementlerin veya yalnız nadir elementlerin doğrudan eklenmesi ile uygulanabilir. Nadir elementler aynı zamanda impürimleri bağlayıcı görev üstlenir ve sıvı metalin akıcılığını arttırır [1].

Bu metottun benimsenmesi durumunda ferrit ve perlit oranının kontrolü dikkatli irdelenmelidir. Çünkü VGDD için perlit /ferrit oranını etkileyen başlıca elementler, Si ve Mg olduğu için; Si/Mg oranı, perlit içeriğini belirleyen faktör de kontrol edilebilir bir hale gelecektir [13].

Genel olarak bu yöntemler tek tek veya birbirleri ile kombine edilerek kullanılmaktadır. Kombine yöntemlerden birine örnek olarak basitçe şu durum örnek verilebilir: Ergiyik demir önce magnezyum ile işleme tabi tutulur, daha sonra anti-küreselleştirici elementler düşük miktarda eklenir ki genel olarak bu elementler alüminyum veya titanyum olarak seçilmektedir. Küreselleştirmeyi bozucu elementler istenilen bozulma miktarı ile orantılı olarak eklenmektedir. Bu tarz kombine metotlar üretimin koşulları ve istenilen yapının özelliklerine göre uygulandığında diğer metotlara kıyasla kontrolü daha rahat koşullar sağlanabilmektedir [1].

5.2. VGDD'in Kimyasal Bileşimi

VGDD'ler kimyasal kompozisyon bakımından ele alındığında kabul gören karbon ve silisyum içeriği aralığı oldukça geniştir. KE, hipötektikten (KE=3,7) hiperötektığe (KE=4,7) kadar uzanmaktadır. VGDD'in karbon eşdeğeri (KE), karbon oranı % 3,1- 4 ve silisyum oranı % 1,7-3'e kadar uzanan bir aralığı temsil etmektedir. KE, kesit kalınlığına bağlı bir fonksiyon olarak değerlendirilebilir. Sabit silisyum içeriği temel alındığında soğuma eğilimi, azalan KE sebebiyle yavaşça artarak küreselliği düşürmektedir. Ancak, aynı zamanda tam ters olarak irdelendiğinde ve KE sabit tutulduğunda silisyum miktarının artması küreselleşmeyi arttırmaktadır. Yüksek KE, karbon yüzmesine sebep olacağı gibi (KGDD olduğu gibi), düşük KE de soğuma eğiliminde artışa sebep olmaktadır. İstenen yapının ferritik ya da perlitik seçimine göre Mangan içeriği % 0,1-0,6 arasında değişkenlik gösterebilir. Matris içerisindeki maksimum

sünekliği elde etmek için % 0,06 altında tutulmalıdır. Her ne kadar yüksek kükürt seviyelerinde VGDD üretimi şu an mümkün olsa dahi, başlangıç kükürt seviyesi % 0,025'in altında tutulmalıdır. Farklı tipte ve eser miktarda elementlerin, son demir elde etme amaçlı sıvıya eklenmesi ile grafit morfolojisindeki lamel grafitin, kompakt grafitte dönüşümü gerçekleşir. Bu elementler Mg, nadir toprak elementleri, kalsiyum, titanyum ve alüminyumdur. Sıvı işlem sırasında uygulanan metottaki ilave element miktarı ve kombinasyonları, kükürt içeriği ve kesit kalınlığının bir fonksiyonudur. Silisyum içeriğinin yükselmesi ve silisyumun ferrit matrisini güçlendirmesi sebebi ile VGDD'de güçlü bir ferritleşme eğilimi söz konusudur. Bu nedenle; bakır, kalay, molibden ve alüminyum, perlit/ferrit oranını arttırma amaçlı kullanılabilir. Belli bir matris yapısının elde edilmesi için en uygun miktarda kullanılacak bu elementler genelde kesit büyüklüğünün bir fonksiyonu olarak değişim göstermektedir.

VGDD üretimi esnasında iyi kalite elde etmek için tüm üretim aşamalarının hassas ve dikkatli bir biçimde kontrol edilmesi gerekmektedir. Özellikle, kükürt içeriği olmak üzere, kimyasal bileşim esnetilemeyen daha katı sınırlar ile kontrol altında tutulmalıdır. Kükürt içeriği sıvı işlemde önce % 0,001 oranında veya daha düşük seviyede olduğu netleştirilmelidir. Çünkü düşük kükürt içeriği, demirin fazla küreselleşmesine sebep olabilirken; yüksek kükürt içeriği, eksik işlem tekniğinin aşırı oranda gerçekleşmesine sebep olmaktadır. Bu aşamada kızılötesi takip metotlarının kükürt içeriğinin belirlenmesi için kullanımı tavsiye edilmektedir. Ayrıca karbür kararlaştırıcı elementlerin kompozisyonunun doğru bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Kontrolün sağlanamadığı durumlarda VGDD'in mevcut durumda zaten yüksek olan soğuma eğilimi daha da yükselebilmektedir [3].

Her ne kadar vermiküler grafitli dökme demir saf demirden daha yüksek kükürt içeriği sağlanarak yani %0,07-0,12 'ye kadar üretiliyor olsa da, sıvı işleme tabi tutulmadan önce kükürt gidererek bu oranı % 0,01-0,025 arasına çekmek daha ekonomik ve mantıklıdır. Kükürt oranı ne kadar yüksek olursa ergitme işlemi için daha fazla alaşım gerekecektir. Ayrıca, kompozisyonun kaçırılma riski de yükselecektir çünkü kalıntı giderme işlemindeki elementler, kalıntı kükürt ile dengelenmelidir. Genellikle, kükürt giderdikten sonraki kalıntı kükürt miktarı % 0,01-0,02 arasında bulunmalıdır.

Mangan içeriği yapının ferritik veya perlitik olması durumları çerçevesinde % 0,1-0,6 arasında değişmektedir. Fosfor içeriği ise malzemenin sünekliğini koruma amacıyla % 0,06'den düşük olmalıdır.

LGDD morfolojisinden demir morfolojisine, daha sonrasında Vermiküler Grafitli Dökme Demir'in morfolojisine dönüşüm, farklı minör elementlerin eklenmesi ile uygulanan sıvı işlem esnasında sağlanır. Bu elementler Magnezyum, nadir toprak elementler (Seryum, Lantan gibi), Kalsiyum, Titanyum ve Alüminyumdur.

Bakır, kalay, molibden hatta alüminyum ham döküm matrisindeki vermiküler grafitli dökme demirin yapısını ferritten perlite çevirme amaçlı kullanılabilir. Kalay bu elementler arasında perlitik fazın oranının artmasında en başarılı element olarak görölmektedir. Fakat perlitik yapıya ulaşmak için olağan miktarların üzerine çıkmak veya birden fazla alaşım elementi kombinasyonu ile eklemek gerekmektedir [3].

6. MALZEMELERDE ISI İLETİMİ VE MEKANİZMALARI

6.1. Termal Enerji

Isı ya da termodinamik ifadeyle termal(ısı) enerji; enerjinin bir şekli olup, mühendislik alanında genelde transfer mekanizmaları, sönümlenme yetenekleri, kayıp durumları ve özellikle malzeme bilimi açısından faz dönüşümleri ile ikili sistemlerin reaksiyon dengelerine etkileri açısından incelenmektedir. Tam anlamıyla ısı, sıcaklık farkı sebebiyle iki sistem arasında belli bir sıcaklık gradyanının olduğu durumlarda, bir sistemden diğerine aktarılan enerji türü olarak değerlendirilebilir. Sistemler bir denge durumuna ulaşana kadar aktarılan enerjinin hızının tespiti konusunu ele alan dala ısı aktarımı (iletimi) denmektedir. Isı akışı yüksek sıcaklığa sahip ortamdan düşük sıcaklığa sahip ortama doğru olmaktadır. İki ortam da aynı sıcaklıkta dengeye geldiği durumda ısı iletimi sona ermektedir. Isı aktarımı üç farklı yol ile gerçekleşir. Bunlar iletim(kondüksiyon), taşınım(konveksiyon) ve ışıdır(radyasyon). Bu tez çalışmasında iletim (kondüksiyon) ele alınmaktadır.

İletim (kondüksiyon), bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıkların ardı sıra gelen ve etkileşim halinde olduğu daha düşük enerjili olan parçacıklarına enerji aktarması olarak tanımlanmaktadır. Bir başka deyişle, maddelerde temas halinde meydana gelen enerji aktarım türüdür. İletim olarak adlandırılan bu enerji aktarım türü maddenin olmadığı ortamda (boşlukta) yayılmamaktadır. İletim maddenin katı, sıvı veya gaz halinde sağlanabilmektedir. Gazlarda ve sıvılarda moleküllerin gelişigüzel hareketleri sırasında çarpışmaları ve yayılma gerçekleşirken, katılarda ise kafeslerdeki moleküllerin titreşimleri ve serbest elektronlar ile iletim söz konusudur.

Bir ortamda ısı iletiminin hızı, malzeme boyunca oluşan sıcaklık gradyanının yanı sıra malzemenin geometrisi, kalınlığı ve malzeme cinsi ile de ilişkilendirilmektedir.

Kalınlığı Δx , yüzey alanı A olan bir malzeme için denklem aşağıdaki şekilde yazılabilir;

$$\dot{Q}_{\text{iletim}} = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \quad (6.1)$$

Bu denklemdeki k sabiti ısı iletkenlik çerçevesinde bir malzemenin ısıyı iletme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. $\Delta x \rightarrow 0$ limit durumunda

$$\dot{Q}_{\text{iletim}} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (6.2)$$

olarak indirgenir. İlk kez J.Fourier tarafından ifade edildiği için bilimsel kaynaklarda Fourier ısı iletim kanunu olarak bilinmektedir. Bu denklemdeki $\Delta T/\Delta x$, sıcaklık gradyanı olarak adlandırılmakta ve T sıcaklığının x 'e göre değişim hızını ifade etmektedir. Burada k iletim katsayısı dışarı alındığında denklem aşağıdaki gibi olacaktır [9].

$$k = - \frac{\dot{Q}_{\text{iletim}}}{A} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (6.3)$$

6.2. Isı İletim Katsayısı (k)

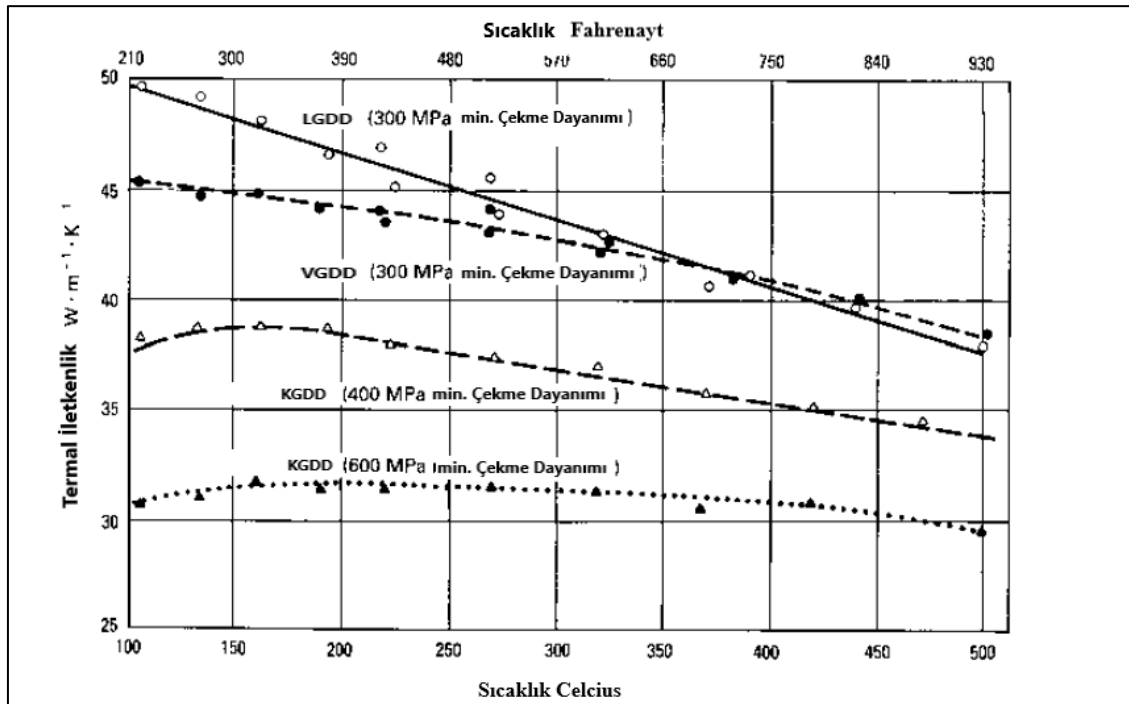
Farklı malzemelerin ısıyı farklı miktarlarda depolama kabiliyeti aynı malzemelerin ısıyı iletme kabiliyetleri ile karşılaştırılmamalıdır. Depolama kabiliyeti özgül ısı olarak değerlendirilebildiği için oda sıcaklığındaki su için özgül ısı (c_p) değeri $4.18 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ iken demir özgül ısı $0.45 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ 'dir. Buradan yapılacak çıkarıma göre oda sıcaklığındaki suyun enerji depolayabilme kabiliyeti demirinkinden on kat daha fazladır. Ancak ısı iletkenlik katsayısı ve malzemenin ısıyı aktarma kabiliyeti olarak değerlendirilen " k " aynı malzemeler için farklılık gösterecektir. Yeniden oda sıcaklığı koşulu altında su ve demir incelenirse, su için k değeri 0.607 W/mK iken demir için 80 W/mK 'dir. Sonuç olarak, oda sıcaklığında demir sudan on kat daha az ısı depolarken, suya kıyasla ısıyı yüz kat daha fazla hızlı iletmektedir.

Aynı koşullar altında iletim ısı transferi için geçerli Fourier ısı iletim kanunu ısı iletkenliği (k) de tanımlamak için kullanılmaktadır. Denklem esas alındığında " k " malzemenin bir birim kalınlığından, birim alan ve birim sıcaklık farkı başına olan ısı transfer hızı olarak tanımlanabilir. Elde edilen " k " değerleri sonucunda yüksek " k " değerine sahip malzemeler ısı anlamda iyi iletken ve düşük değere sahip olanlar ise ısı anlamda kötü iletken veya yalıtkan olarak tanımlanabilmektedir.

“k” değerini sözcüklerle ifade etmek gerekirse $k = \beta \text{ W/mK}$ olan bir malzeme için bir metre kalınlık temel alındığında ısıyı her K° sıcaklık farkı ve m^2 alan başına “ β ” W’lık hızla ileteceği anlaşılmaktadır [14].

6.3. Dökme Demirlerde Isıl İletkenliği Etkileyen Faktörler

Dökme demirlerde ısı iletkenliği etkileyen başlıca faktörler; grafit morfolojisi, mikroyapı, alaşım elementi ilaveleri ve sıcaklık olarak sıralanabilir. Dökme demirlerde ısı iletkenliğe etki eden en önemli faktör grafitin şeklidir. Gelişmiş grafit lamellerine sahip bir LGDD, çelik ile kıyaslandığında daha yüksek termal iletkenliğe ve daha düşük elektrik iletkenliğine sahiptir. Grafit şekli tam lamelden tam küresele doğru giderken, ısı iletkenliği düşmeye başlar. KGDD’ler LGDD ile kıyaslandığında daha düşük ısı iletkenliğe sahipken, elektrik iletkenliği açısından değerlendirildiğinde KGDD’ler daha yüksek değerler sergilemektedir [3].



Şekil 6.1. LGDD, KGDD, VGDD termal iletkenlikleri [3]

Grafit şeklinin yanı sıra, ısı iletkenliğe etki eden bir diğer faktör mikroyapıdır. Grafit, dökme demirlerdeki fazlar içerisinde en yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Ferritik yapıdaki dökme demir türleri, perlitik yapıdaki türevleri ile kıyaslandığında daha yüksek termal

iletkenlik gösterir. En düşük termal iletkenlik sergileyen dökme demir tipi BDD'dir. Kimyasal bileşim de termal iletkenlik üzerinde oldukça etkili bir faktördür. Silisyum, nikel ve alüminyum ısı iletkenliğe önemli derecede olumsuz etkisi bulunmaktadır. Fosfor ve mangan nispeten negatif etki oluşturur. Ancak, miktar arttıkça etkisinin de doğru orantılı bir biçimde arttığı söylenemez. Molibden, Vanadyum ve Krom gibi karbür yapıcı elementlerin etkisi net bir şekilde ifade edilememektedir, bazı araştırmalarda bu elementlerin ısı iletkenliği artırıcı etkisi olduğu söylenirken, bazı araştırmalarda ise azalttıkları rapor edilmektedir [3].

LGDD'ler için serbest karbon miktarı arttıkça ve lameller daha kabalaştıkça ısı iletkenlikte artış görülmektedir. Şekil 6.1'daki grafikte görüldüğü gibi LGDD'ler, KGDD'lere kıyasla daha yüksek termal iletkenlik değerlerine sahiptir.

Çoğunlukla ferritik matrise sahip olan KGDD'ler, perlitik türevlerine göre daha yüksek termal iletkenlik gösterirler. Temperlenmiş ve su verilmiş KGDD'lerde ise bu değerler ferritik ve perlitik yapının verdiği değerlerin ortasında yer almaktadır. 20°-50°C sıcaklık aralığında ferritik yapının iletim katsayısı 36 W/mK iken, aynı sıcaklık aralığında perlitik yapının ölçülen iletim katsayısının % 20 daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Çizelge 6.1. Çeşitli sıcaklıklarda dökme demirlerin termal iletkenlik katsayıları [3]

Grafit Şekli	Karbon Eşdeğerliği	Termal İletkenlik, W/mK				
		100 C°	200 C°	300 C°	400 C°	500 C°
Lamel	3.8	50.24	48.99	45.22	41.87	38.52
	4.8	53.39	50.66	47.31	43.12	38.94
Vermiküler	3.9	38.10	41	39.40	37.30	35.20
	4.1	43.54	43.12	40.19	37.68	35.17
Küresel	4.2	32.34	34.75	33.08	31.40	29.31

VGDD'nin, diğer dökme demirler ile farklı sıcaklıklarda elde edilen termal iletkenlik değerleri Çizelge 6.1'de karşılaştırılmıştır. VGDD'in termal iletkenliği LGDD'den düşük fakat KGDD'lerden yüksektir. Bu özellik, lamel grafitte olduğu gibi birbiriyle bağlantılı

grafit yapıya sahip olması ile açıklanmaktadır. Artan karbon eşdeğerliği ve grafit hacim oranı termal iletkenliğin artmasına sebep olmaktadır. Veriler incelendiğinde; 200°C civarı bir sıcaklığa gelindiğinde termal iletkenlik maksimuma ulaşmaktadır. Bu özellik VGDD ve KGDD’de benzer eğilimde olurken, LGDD için aynı durum söz konusu değildir. Ancak tüm veriler genel olarak değerlendirildiğinde, sıcaklığın artmasına bağlı olarak iletim katsayısı azalmaktadır [3].

7. YAPI VE ÖZELLİK İLİŞKİLERİ

7.1. Tane Boyutu ve Matris Yapı ile Mekanik Özellik İlişkileri

Tane boyutunun veya ortalama tane çapının çok kristalli metallerde mekanik özellikler üzerinde etkisi büyüktür. Tanelerin birbirinden farklı yönlenmelere sahip olması ortak tane sınırlarının açılı olmasına sebep olmaktadır. Kayma ve dislokasyon hareketleri, plastik deformasyon anında ilerlerken bu geometrik yönlenme farklılığı iki sebepten dolayı engel teşkil etmektedir. İlk olarak, iki tanenin farklı kristal yönlenmeye sahip olması, geçiş yapan dislokasyonun hareket yönünü değiştirmeye zorlar. Taneler arasındaki bu yönlenme farkı arttıkça, bu hareketlerin gerçekleşmesi daha da zorlaşmaktadır. Ayrıca tane sınırlarındaki atomsal düzensizlik, bir taneden diğerine geçişte kayma düzlemlerinde süreksizliğe yol açacaktır.

Büyük açılı tane sınırlarında dislokasyonların tane sınırını geçememesi, tane sınırlarında yığılmaya sebep olur. Dislokasyonların bu “yığılma” hareketi, bitişik tanede yeni dislokasyonlar üretecek olan gerilme yığılmalarına (kayma düzlemlerinin önünde oluşan) sebep olmaktadır.

İnce taneli bir malzemede dislokasyonları engelleyen toplam tane sınırı alanı kaba taneli yapıya göre daha fazla olduğundan, sertliği ve dayanımı daha yüksek olmaktadır. Akma dayanımı σ_{AK} olan ile tane boyutu arasındaki ilişki şu denklem ile gösterilebilir.

$$\sigma_{AK} = \sigma_0 + k_{(y)} d^{(-1/2)} \quad (7.1)$$

Hall-Petch denklemi adı verilen bu denklemde d , ortalama çapı σ_0 ve $k_{(y)}$ ise malzemeye özgü sabitlerdir. Bu denklem aşırı büyük veya aşırı ince taneler için geçersiz sayılmaktadır. Tane boyutu, katılaşma hızı kontrolü veya plastik deformasyon sonrası uygun bir ısıtım işlemi ile değiştirilebilir. Tane boyutu küçüldüğünde birçok alaşım için sadece dayanım değil, aynı zamanda tokluğunun da arttığı bilinmektedir [2].

Saf veya tek fazlı metallerin çoklu kristal kümelerinde ortalama bir kristalin büyüklüğü çok önemli bir yapısal parametredir. Ancak bu tam anlamıyla tespiti mümkün olmayan bir

değişkendir. Tanenin üç boyutlu şekli çok karmaşık yapıdadır. Bazı durumlarda neredeyse eşit gibi görünen iki boyutlu mikroyapılarda dahi taneler çok geniş bir aralıkta farklılık göstermektedir. Her ne kadar birçok metalografik yapıda düzlemsel kesitlerde ve lineer ölçümler ile belli yüzeylerde gözlemlense de, genel olarak bu yöntemlerle tam anlamıyla tane çapı ölçülememektedir. Çünkü tam anlamıyla ölçüm, ancak üç boyutlu analizler ile mümkündür. Her ne kadar gerçek bu olsa da, kaynaklarda ortalama tane çapını ölçen birkaç ölçüm yöntemi bulunmaktadır.

Ortalama tane çapının tespiti için en çok kullanılan yöntem, “ $\bar{l}$ ” lineer kesişme metodudur. Bu metot, ortalama tane kesimi olarak adlandırılmakta ve mikroyapı görüntüsü üzerindeki bir çizgi boyunca tane sınırlarının arasındaki ortalama uzaklığı ifade etmektedir. Bu ölçüm yapılırken 10 cm uzunluğunda bir çizgi çizilmekte ve yukardan aşağıya tane sayılmaktadır. Rastgele bir düzen çerçevesinde birkaç defa tekrar edilir ve toplam kesişim sayısı, toplam çizgi uzunluğuna bölünür. Sonrasında elde edilen sonuç büyütme oranı ile çarpılır. Elde edilen sonuç “ $\overline{N_L}$ ” her santim için kesişen ortalama tane sayısını simgeler. Ortalama tane sayısı “ $\bar{l}$ ” eşitliği şu şekilde tanımlanabilir.

$$\bar{l} = 1/\overline{N_L} \quad (7.2)$$

Her ne kadar geometrik olarak “ $\bar{l}$ ” ile ortalama tane çapı (d) arasında bir ilişki bulunmasa da, yaygın olarak tane çapını belirtmek adına kullanılmamaktadır. Bu bağlamda, ancak tüm tane sınırlarının aynı şekile ve boyuta sahip olması durumunda benzer bir ilişkiden bahsedilebilir. Nitel metalografide, tane sınırları yüzeylerinin her bir hacim için miktarını, aşağıdaki eşitlik ile açıklamak mümkündür.

$$S_V = 2\overline{N_L} \quad (7.3)$$

Bu eşitlikte bulunan “ S_V ” her bir birim hacim için tane sınırlarının yüzey alanı ifade etmektedir. Bu şekilde ele alındığında “ $\bar{l}$ ” değerinin belirlenmesi durumunda her bir birim için tane sınırlarının yüzey alanı da belirlenmiş olacaktır [15].

7.2. Çekirdek Sayısı ve Soğuma Oranı

Küresel ve vermiküler grafit sayısı veya ötektik hücre sayısı, sıvı metalin grafit çekirdeklenme potansiyeli ile ilişkilendirilebilir. Genel olarak bu ötektik tanelerin sayısının artması; KGDD veya VGDD’lerde soğuma eğiliminde azalmaya, ön çekme genişmesinde artmaya, segregasyonda azalmaya ve bunlara bağlı belli özellik değişikliklerine sebep olmaktadır. Bu yüzden ötektik hücre sayısının, döküm uygulamalarında kullanılan farklı türlerdeki teknolojilerde büyük etkisi olduğu açıkça görülmektedir.

Yüksek soğuma hızları, dökme demir yapısında grafit yumrularının sayısında önemli oranda artışa sebep olmaktadır. Soğuma oranında oluşan artış, grafit yumrularının sayısını arttırmakta ve yumruların birbirleri arasındaki mesafeyi azaltmaktadır. Karbonun difüzyon yolunun kısaltmasının bir sonucu olarak matristeki ferrit oranı artar. Bununla birlikte yükselen soğuma hızları, östenit tanesi sayısının artması ile matris yapısının perlitte dönüşmesini teşvik etmektedir. Soğuma eğrileri aynı zamanda grafit morfolojisine de etki etmektedir. Azalan kesit kalınlığı ile daha yüksek nitelikli küresel grafit elde etmek kolaylaşır, böylece anti-küreselleştirici element ihtiyacı azalmaktadır.

Çekme dayanımı açısından değerlendirildiğinde, grafit sayısı çok olan mikroyapılar az olanlara göre daha çok tercih edilmektedir. Bu nedenle çekme dayanımının yüksek olması, ötektik tane sayısının yüksek olması ile ilişkilendirilmektedir. Bu durum tüm dökme demirler için geçerlidir [9].

7.3. Matris Yapısı ile Isıl Özellik Değişimi

Dökme demirler homojen yapıya sahip olmayan malzemelerdir. Bu sebeple, özelliklerine etki eden faktörler arasında mikroyapı farklılıkları da bulunmaktadır. Termal ve elektrik iletkenliğine etki eden önemli faktörlerden biri, farklı metalik fazlardır. Çizelge 7.1’de görüldüğü üzere her fazın termal iletkenlik değeri bir diğerinden farklıdır.

Çizelge 7.1. Farklı fazların termal iletkenlik değerleri. Hekzegonal kafesin (a) C-eksen boyunca (prizmatik yüzey), (b) taban yüzey boyunca [3]

Faz	Termal İletkenlik (W/mK)
Ferrit	70-80
Östenit	-
Perlit	50
Sementit	7
Martenzit	-
Grafit	80-85(a) 285-425(b)

Grafit morfolojisi, alaşım ilaveleri ve sıcaklığın yanı sıra mikroyapıda bulunan fazlar da dökme demirin termal iletkenliğine etki etmektedir. Tabloda da görüldüğü gibi ferritik yapıya sahip tüm dökme demirler, perlitik yapıya sahip olanlara göre daha yüksek termal iletkenlik sergilemektedir [3,16].

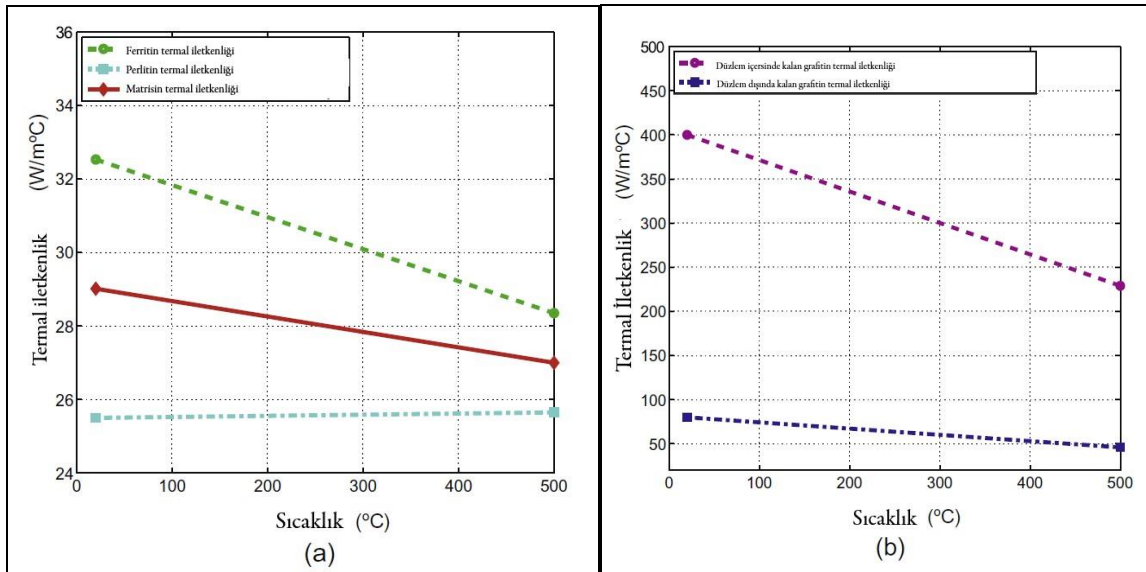
Çizelge 7.2. KGDD için termal iletkenlik değerleri İngiliz BS2789 Ölçüleri [3]

Yapı türü	Termal İletkenlik (W/mK)
Ferritik Yapıda	
350/22;350/22L40	36.5
400/18;400/18L20	36.5
420/12	36.5
Ara Yapıda	
450/10	36.5
500/7	36.5
600/3	32.8
Perlitik döküm sonrası ve Normalize Yapıda	
700/2	31.4
800/2	31.4
900/2	31.4
Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş Yapıda	
700/2	33.5
800/2	33.5
900/2	33.5

Çizelge 7.2’de belirgin bir şekilde görüldüğü gibi termal iletkenlik açısından ferritik yapıya sahip tüm dökme demir çeşitleri, perlitik yapıya sahip olanlara kıyasla daha üstün değere sahip olmaktadır.

LGDD için serbest grafit arttıkça, grafit lamelleri kabalaştıkça ve uzadıkça termal iletkenlik değeri (k) artmaktadır. Ferritik matrise sahip KGDD’ler perlitik, su verilmiş veya temperlenmiş yapılardakine göre daha yüksek termal iletkenlik sergilemektedir. VGDD’ler ise gri dökme demire yakın termal davranışa sahiptir. Tüm grafit çeşitlerine göre dökme demirlerin farklı termal iletkenlikleri Çizelge 6.1’de belirtilmiştir [3].

Belli bir bölgesinde veya kısmında çok üstün performans gösteren malzemeler genelde heterojen yapıdadır. İki ya da daha fazla bileşen içeren malzemeler farklı özellikler sergilerler. Mikroyapının anlaşılması bu gibi durumlar için son derece önemlidir. Yayındaki içerik ve yaklaşımlar ile değerlendirildiğinde; dökme demirler izotropik ve/veya anizotropik grafit fazları ile genellikle ferrit ve perlit gibi farklı iki faz barındıran izotropik bir metal matris olarak değerlendirilebilir [16]. Alt grafikte, matris yapısına göre ısı iletkenliğinin değişimi Şekil 7.1.(a)’da, grafitin hücre düzlemi içerisinde enine izotropik veya Şekil 7.1.(b)’de dikine izotropik olması durumunda, termal iletkenliklerdeki değişimi görülmektedir [17].



Şekil 7.1. (a) Ferrit, Perlit ve tüm matrisin, (b) düzleme dâhil olan ve düzleme dik olup dışına doğru izotropik durum sergileyen grafitin termal iletkenlikleri [17]

Şekiller incelendiğinde ferritin yüksek iletkenliğine karşı perlitin kısıtlı iletkenliği nedeniyle matris ısı iletkenli bir miktar azalma göstermektedir. Sementit tabakaları ısı iletimini güçleştirdiğinden ısı iletimi azalmaktadır. Değerlendirme yayınında belirttiği gibi yüksek miktarda perlit içeren yapıların, düşük termal iletkenlik değerlerine sahip olması daha muhtemeldir [14]. Diğer yandan [0001] düzleminde grafitin iletkenliği çok yüksektir. Bu düzleme dik olan durumda ise iletim daha zor olduğundan dolayı ısı iletimi azalmaktadır. Bu sebeple, grafitin dökme demirin içerisindeki yönlenmesine bağlı olarak ısı iletim özelliği anizotropik bir durum sergilemektedir. Isının akış yönü [0001] düzlemine ne kadar paralel ise iletim o kadar fazla olacaktır. Ancak grafit fazındaki yönlenme gelişi güzel olduğu için iletimde grafitin etkisi sınırlanmaktadır. Ancak her durumda grafit, metalik (ferrit ve perlit) matristen daha iyi ilettime sahip olduğu için grafit hacminin artması ısı iletimi olumlu yönde etkiler [17].

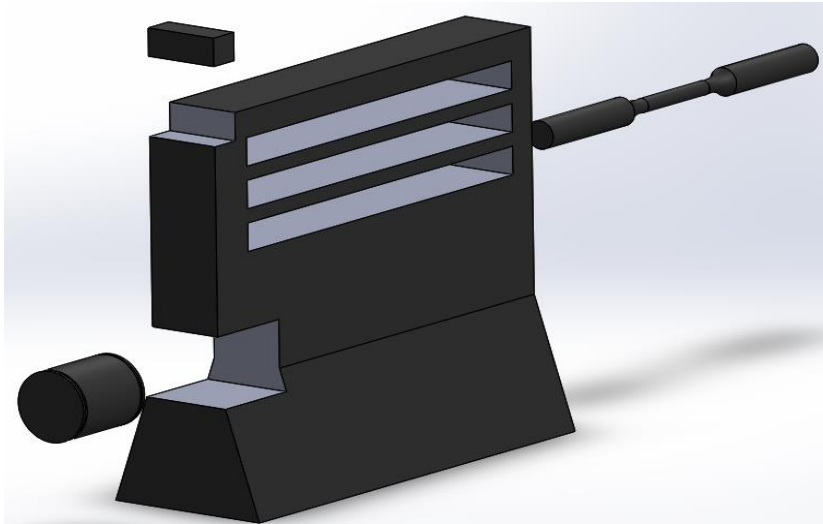
8. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

8.1. Döküm İşlemi ve Alaşım Hazırlama

Dökümün yapıldığı kalıp tasarımı TS EN 1563’de belirtilen Y-bloklardan, Y2 tipine uygun olarak hazırlanmıştır ve gösterilen bölgelerden numuneler alınmıştır (Şekil 8.1). Hazırlanan Y-Bloklar dökülüp, numaralandırılarak sınıflandırılmış ve görüntüleri Resim 8.1’de verilmiştir. Ergitme işlemi 1000 kg orta frekanslı ergitme tipi indüksiyon ocağı (Resim 8.2) kullanılarak yapılmıştır. Şarj malzemesi olarak kullanılan sfero piki ve GGG-40 hurdasının kimyasal analizleri Çizelge 8.1’de verilmiştir.



Resim 8.1. TS EN 1563 kalıpların üst ve yan görünüşleri



Şekil 8.1. Y-blok ve numunelerin alındığı bölgeler (TS EN 1563)

Ergitilmiş olan metal, döküm sıcaklığına ulaştıktan sonra (~1450 °C) standart küreselleştirme ve aşılama işlemleri yapılmıştır. Küreselleştirme işlemi Tundish tipi işlem potasında (Resim 8.3), aşılama işlemi ise döküm potasında gerçekleştirilmiştir. Küreselleştirme işlemi için FeSi-Mg malzemesi kullanılmış ve bileşimi Çizelge 8.2’de

verilmiştir. Aşılama işlemi için FeSi malzemesi kullanılmıştır ve bileşimi Çizelge 8.3’de belirtilmiştir.



Resim 8.2. 1000 kg Kapasiteli Ergitme İndüksiyon Ocağı

İşlem potasından alınan sıvı metal, aynı şartlarda üretim yapmak amacıyla tek kalıpta 2 adet Y-blok olacak şekilde yaş kum kalıplara döküldükten sonra oda sıcaklığına soğumaya bırakılmıştır. Numunelerin kimyasal bileşiminin tespiti için ayrıca spektral analiz numuneleri dökülmüş. Spektral analizden elde edilen sonuçlar Çizelge 8.4’de verilmiştir.



Resim 8.3. Tundish tipi işlem potasında yapılan küreselleştirme işlemi

Çizelge 8.1. Sfero piki ve GGG-40 hurdası kimyasal bileşimleri

Element (%)	C	Si	Mn	S	P	Cu	Fe
Sfero piki	4.1	0.277	0.04	0.004	0.011	0.001	Kalan
GGG-40 hurdası	3.5	2.86	0.46	0.004	0.033	0.0015	Kalan

Çizelge 8.2. Küreselleştirici malzemesinin (FeSi-Mg) kimyasal bileşimi

% Si (min.)	% Mg	% Al	% C
43 – 48	6 – 7	0.5 – 1	3 – 3.5

Toplam on farklı malzeme üretilmiştir. Küreselleştirme işleminde FeSi-Mg malzemesi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, ilk olarak küresel grafitli dökme demir üretimi (numune A) ile tamamlanmıştır.

Çizelge 8.3. Aşılama malzemesinin (FeSi) kimyasal bileşimi

% Si (min.)	% Al (maks.)	% P (maks.)	% S (maks.)
75	2	0.03	0.03

Deneysel çalışmalarda, ilk olarak küresel grafitli dökme demir üretimi (numune A) tamamlanmış, daha sonra bu küresel grafitli dökme demir malzeme vermikülerleştirme işlemi ile istenilen vermiküler grafitli dökme demir numunelerinin (B1, B2 ve B3) üretiminin yapılabilirliği denenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, bu çalışma için hazırlanmış vermikülerleştirici malzeme karışımına “VER-MAT” adı verilmiştir.

Çizelge 8.4. Üretilen numunelerin kimyasal bileşimleri ve Karbon Eşdeğerliği (KE)

Numune kodu	KE	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Cu	% Fe
A, B1, B2, B3, C1, C2, C3	4.36	3.5	2.6	0.164	0.026	0.007	-	Kalan
D1, D2, D3	4.36	3.5	2.6	0.164	0.026	0.007	0.5	Kalan

Elde edilen başarılı sonuçlardaki ilave VER-MAT oranıyla (% 0,5) ve tane boyutunun değiştirilebilmesi amacıyla üçü de farklı miktarda aşılaiıcı (Resim 8.4) ilavesiyle vermiküler grafitli dökme demir numunelerinin (C1, C2 ve C3) üretimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra aynı vermikülerleştirici ve aşılaiıcı oranlarına ilaveten % 0.6 Cu ilavesi yapılarak ferrit + perlit matris ve aynı zamanda 3 farklı tane boyutuna sahip VGDD numuneleri (D1, D2 ve D3) üretilmiştir. Aşılama işlemleri; standart FeSi malzemesi kullanılarak iki aşamada gerçekleştirilmiştir.



Resim 8.4. Vermikülerleştirme amaçlı ilaveler, karıştırma ve döküm işlemleri

İlk aşılama Tundish potasında % 0.3 ilave yapıldıktan sonra bir numune alınmış, ardından döküm potası tabanına önce % 0.5 ve sonra ise % 0.8 oranında yerleştirilerek numuneler dökülmüştür. Vermikülerleştirici “VER-MAT” malzemesi granül halinde döküm potasında, pota tabanına % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranlarında konularak reaksiyona girmesi sağlanmış, Resim 8.4’te görüldüğü gibi karıştırma yapılmış ve ~2 dakika bekletildikten sonra kalıplara dökülmüştür.

Üretilen numunelerin işlem özetleri Çizelge 8.5’de verilmiştir. Numuneler: A numunesi (KGDD), herhangi bir ilave olmadan üretilmiştir ve diğer numunelerin temelini oluşturmuştur. B1-B3 numunelerinde, FeSi ilavesi % 0,3’te sabit tutularak bileşim, vermikülerleştirme yapılmıştır (% 0.3, 0.5 ve 0.8 VER-MAT). C1-C3 numuneleri, bu çalışma için ideal VER-MAT ilave oranı olan % 0.5’te sabit tutularak vermikülerleştirilmiş ve farklı oranlarda aşılaiıcı ilavesiyle (% 0.3, 0.5 ve 0.8 FeSi) üretilmiştir. D1-D3 numuneleri ise yine bu çalışma için ideal kabul edilen % 0.5 VER-MAT ilavesi ve farklı oranlarda aşılaiıcı (% 0.3, 0.5 ve 0.8 FeSi) ilavelerine ek olarak, her üç numuneye de % 0.6 oranında bakır ilave edilerek üretilmiştir.

Çizelge 8.5. Üretilen numunelerin ilave miktarları

Numune Kodu	Dökme Demir Tipi	Vermikülerleştirici İlave Miktarı	Aşılmalı İlave Miktarı	Bakır İlave Miktarı
A	KGDD	-	% 0.3	-
B1	VGDD	% 0.3	% 0.3	-
B2	VGDD	% 0.5	% 0.3	-
B3	VGDD	% 0.8	% 0.3	-
C1	VGDD	% 0.5	% 0.3	-
C2	VGDD	% 0.5	% 0.5	-
C3	VGDD	% 0.5	% 0.8	-
D1	VGDD	% 0.5	% 0.3	% 0.6
D2	VGDD	% 0.5	% 0.5	% 0.6
D3	VGDD	% 0.5	% 0.8	% 0.6

8.2. Metalografik İşlemler ve Yapısal Analiz Süreçleri

Y-Bloklardan Şekil 8.1’de gösterilen bölgelerden alınan numuneler, bakalit içerisine alınmıştır. C1, C2, C3 ve bakır ilaveli numuneler olan D1, D2, D3, 220-1200 mesh zımparalama ve 3 µm elmas solüsyonlu keçelerde parlatma işlemleri tamamlanmıştır. Daha sonra “Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metalografi Laboratuvarı” içerisinde bulunan “LEICA DM 4000M Metal Optik Mikroskop” kullanılarak numunelerin farklı yakınlaştırmalar ile görüntüleri alınmıştır. Her numune için kritik bölgeler belirlenmiş ve yorumlanmak için kaydedilmiştir.

Birim alana (mm²) düşen küresel ve vermiküler grafit sayılarının ölçümü, dağlanmamış numune yüzeyinden X100 büyütme ile 10 ayrı bölgeden elde edilen görüntüler kullanılarak Image-J görüntü analiz programı ile tespit edilmiştir. Ayrıca, bu sırada vermikülerleşme ile ilgili ölçümler de yapılmıştır. Vermikülerleşme grafit boy/en oranı ile belirlenmektedir. Bu oran, 2 ve üzerinde ise vermiküler grafit olarak kabul edilmektedir.

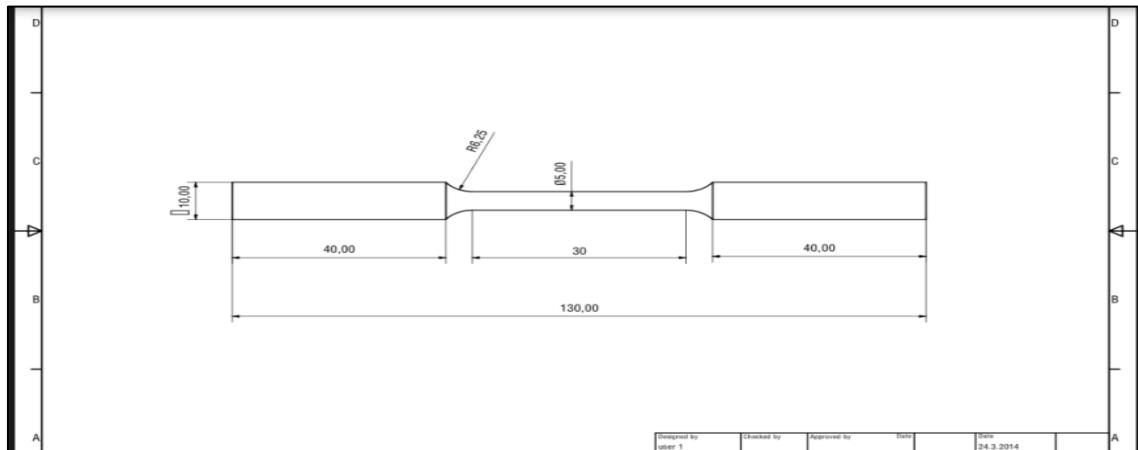
Faz hacim oranlarının ölçümü, % 2 Nital ile dağlanmış numune yüzeyinden X100 büyütmede 10 ayrı bölgeden elde edilen görüntüler üzerinden Image-J görüntü analiz programı ile belirlenmiştir. Sonuçlar arasındaki değişim ± 2.1 oranındadır.



Resim 8.5. Y-Bloklardan alınan ve metalografik inceleme için hazırlanan numuneler

8.3. Çekme Testleri

Y-bloklardan kesilerek alınan numuneler, Resim 8.6’da belirtilen ölçülere getirilmiş ve cihaza uygun şekilde işlenmiştir (Resim 8.7). Çekme deneyi “INSTRON 3369 Çekme Cihazı” (Resim 8.8) cihazında oda sıcaklığında 1 mm/sn hızda gerçekleştirilmiştir. Gerilim ve yüzde uzama değerleri deney sırasında grafik olarak kaydedilmiştir. Aynı seriden en az üç numune çekme deneyine tabi tutulmuş ve sonuçlar bölümünde ortalaması verilmiştir. Sonuçların istatistiksel değişimi ortalama $\pm 3,6$ oranındadır.



Resim 8.6. Çekme numunelerinin ölçüleri



Resim 8.7. Test sonrası çekme numuneleri



Resim 8.8. INSTRON 3369 Çekme Cihazı

8.4. Sertlik Testleri

Sertlik testleri Resim 8.9’da görünen “EMCO Test Duravision 2000” sertlik cihazında Brinell olarak ölçülmüştür. Bu amaçla, 2.5 mm çapında çelik bilye uç ve 147 N yük uygulaması yapılmıştır. Her bir numune için 10 farklı ölçüm yapılmış ve sonuçlar bölümünde ortalaması verilmiştir. Sonuçların istatistiksel değişimi ortalama $\pm 2,3$ oranındadır.



Resim 8.9. EMCO Test Duravision 2000 Cihazı

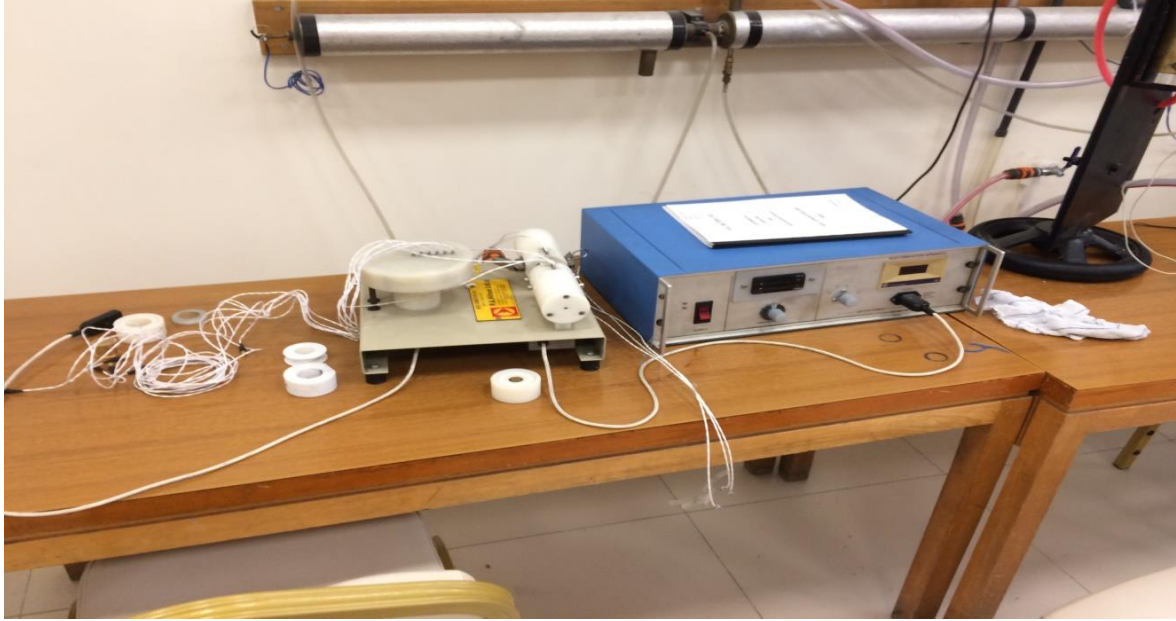
8.5. SEM-EDS Analiz İşlemleri

SEM görüntüleri Gazi Üniversitesi SEM Laboratuvarı bünyesinde bulunan “JEOL JEM 6060 LV Tarama Elektron Mikroskobu” ile gerçekleştirilmiştir. Optik mikroskoptan alınan görüntüleri teyit etme amacıyla öncelikle X25 büyütme ile daha sonra X500 büyütme ile görüntüler alınmış ve incelenmiştir. Mikroyapı en son X3000 büyütme ile görüntülenmiş ve nokta element dağılımını tespit etmek için EDS analizleri bu büyütmede gerçekleştirilmiştir.

8.6. Isı İletim Ölçümü ve Analiz İşlemleri

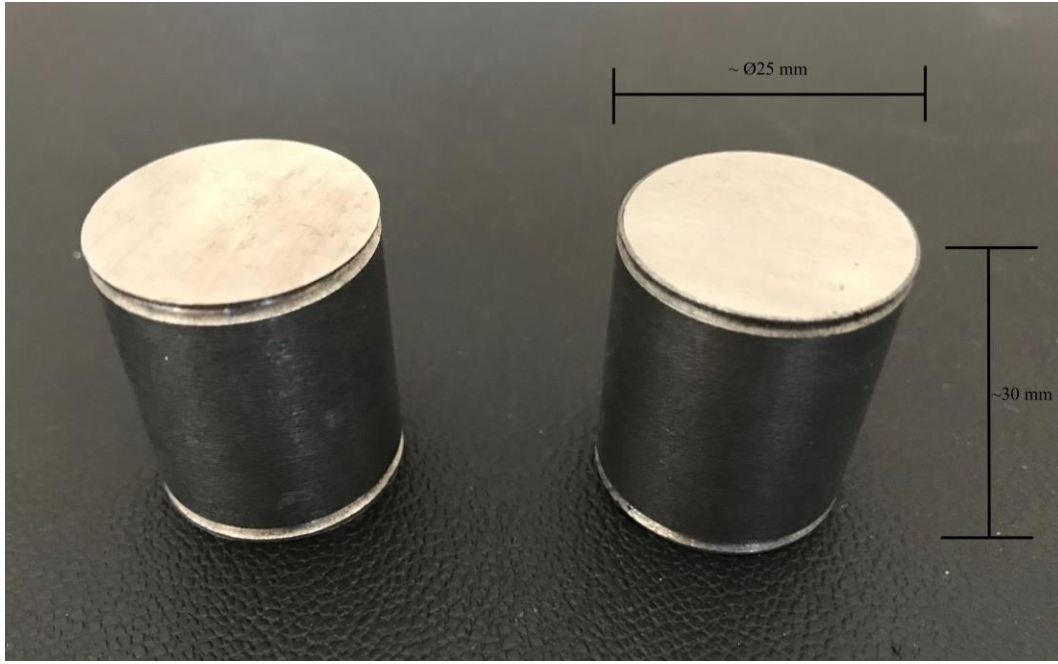
Termal ölçümler Resim 8.10’da görülen “PA HILTON Heat Conduction Unit H920” kullanılarak ölçülmüştür. Resim 8.11’de resimleri bulunan ısı iletkenlik ölçümü için gereken numunelerin resmi ve ölçüleri, makinenin aktarım noktasındaki boşluğa göre hazırlanmıştır. Hazırlanma aşamasında malzemelerin kusurlu sayılabilecek noktaları belirlenmiş, numuneler en az kusurlu bölgelerinden torna edilmiştir. Ölçümler için $\varnothing 25 \times 30$ mm ölçülerinde numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yüzey kalitesinin, ısı iletimine etkisini tespit etmek için silindirik numuneler önce tormalanmış (pürüzlü) şekilde, sonra taşlanmış (pürüzsüz) yüzeyleri ile ölçülmüştür. Ölçümlerin sabitlenmesi ve doğrulanması amacıyla, her güç birimi (Watt) için üç adet ölçüm uygulaması yapılmıştır.



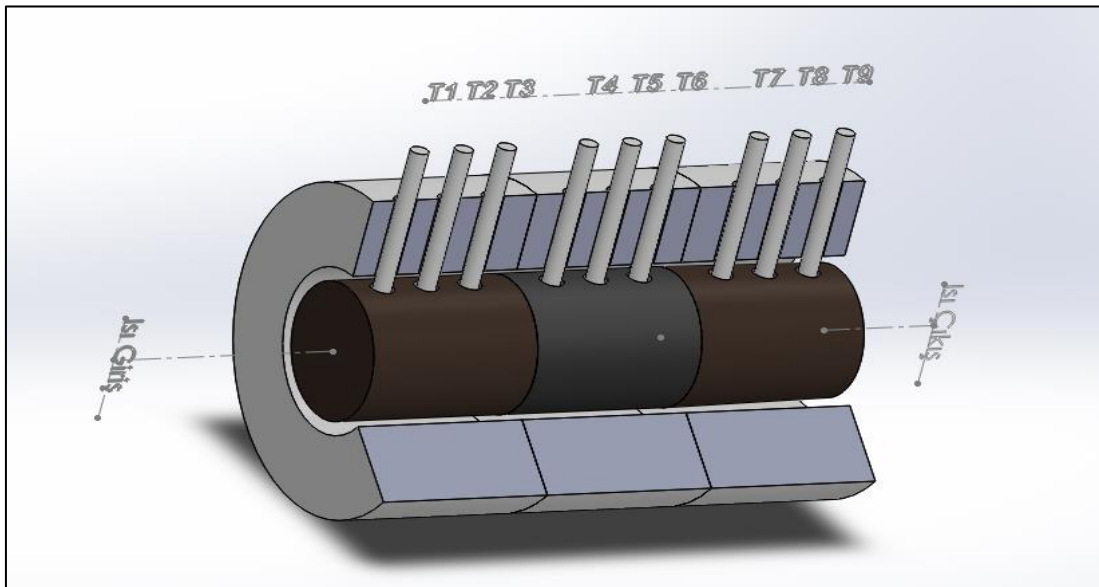
Resim 8.10. “PA HILTON Heat Conduction Unit H920” Isıl İletim Ünitesi

Isıl çiftlerden okunan veriler sıcaklık gradyanı biçiminde irdelenmiş ve alınan sonuçlar Fourier Isıl İletim Kanunu formülü çerçevesince analiz edilerek “k” ısı iletim katsayısı W/mK cinsinden hesaplanmıştır. Isıl iletim cihazı, temel olarak W (Watt) cinsinden verilen elektrik enerjisi ile içerisinde direnç olan pirinç bloğu ısıtarak, enerjiyi ortada bulunan numune üzerinden karşı tarafındaki pirinç bloğa aktarmaktadır. Soğuk referans numunesi üzerine sürekli olarak oda sıcaklığında su verilerek ısı akışı, bu yöne doğru sağlanmaktadır. Bu ısının giriş kaynağından çıkışa kadar geçen sürede, hem ölçümü yapılan numunenin hem de referans alınan sıcak ve soğuk pirinç numunelerin sıcaklık değerleri, ısı iletim çiftleri ile °C cinsinden ölçülmektedir. Isıl çiftlerin bulunduğu noktalar Şekil 8.2’de şematik olarak gösterilmiştir. Ölçümü yapılan numunede üç, sıcak ve soğuk pirinç bölgelerde ise üçer adet olmak üzere toplamda dokuz adet eşit aralığa sahip ölçüm noktası bulunmaktadır.



Resim 8.11. Termal ölçüm için hazırlanan numuneler ve ölçüleri

Ölçümler bir sıcaklık değişimi (gradyanı) ile başlamış, sıcak pirinç numunenin direnç tarafındaki birinci sıcaklık değeri sabitlenene kadar devam etmiştir. Sıcaklık sabitlendiğinde, dokuz adet ısı çiftten alınan sıcaklık değerleri okunup kaydedilmiştir. Bu işlem her 10W-15W-20W için tekrar tekrar istikrarlı hale getirilmiş ve her numune için teker teker aynı şekilde tekrarlanmıştır. Böylece tüm numunelerin farklı gerilim değerlerinde de ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır.



Şekil 8.2. Isı iletim katsayısı ölçüm sisteminin şematik gösterimi

On farklı numune kullanılarak, iki farklı güç değerinde (10 ve 15 Watt) uygulanmış ve iki farklı yüzey kalitesi kullanılarak toplam dört farklı şartta ısı iletim katsayıları tespit edilmiştir.

Grafitin ısı iletim üzerindeki büyük etkisini göstermek amacıyla, oransal iletkenlik hesaplanarak sonuçlar kısmında verilmiş, aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$\text{Oransal iletkenlik} = \frac{\text{Isı iletim katsayısı (k)}}{\text{Grafit hacim oranı (\%)}} \quad (8.1)$$

9. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

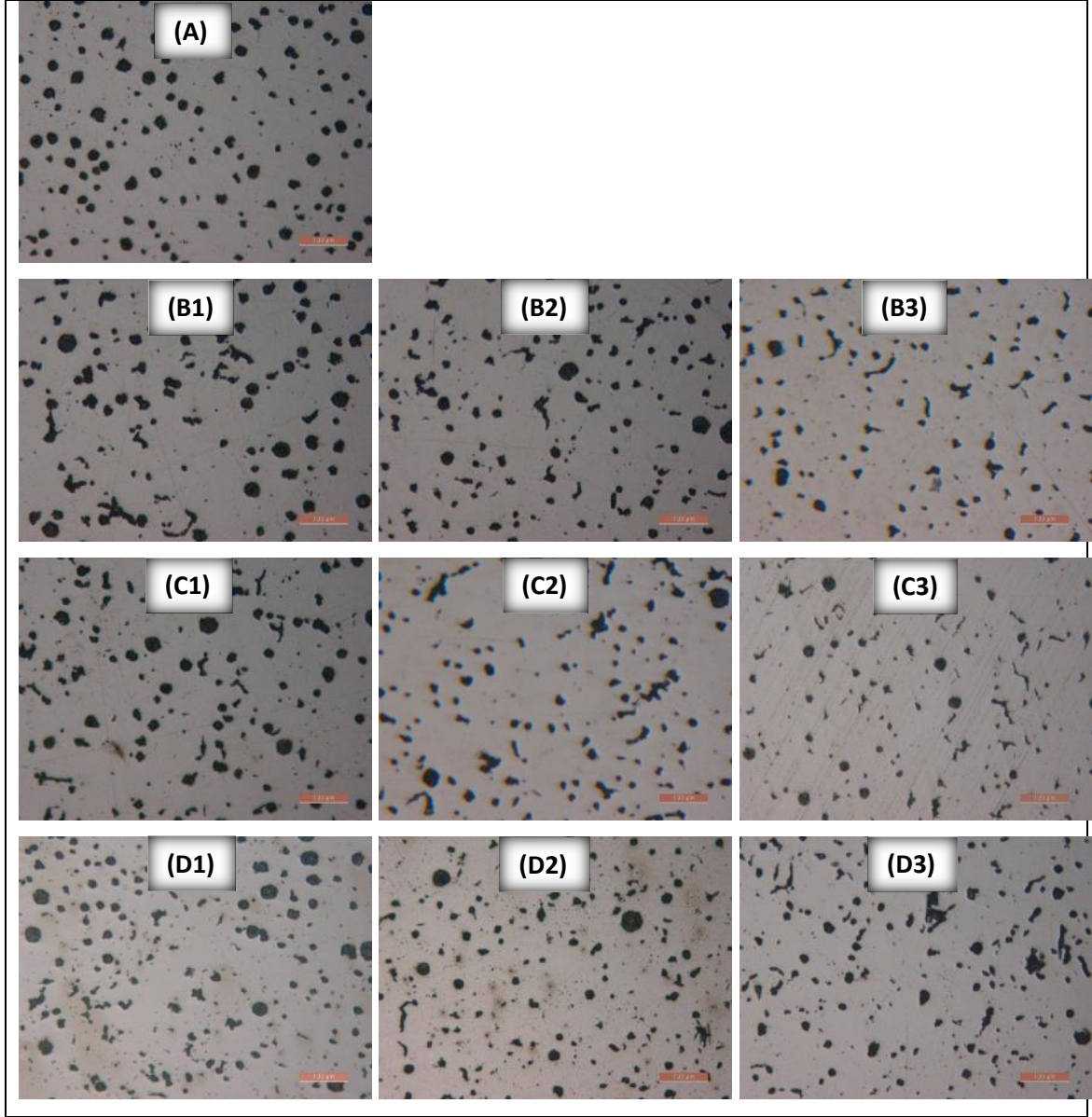
9.1. Mikroyapı Analizleri

Dökme demirlerde grafit yapısı incelemeleri, ASTM standardı olarak dağlanmamış yüzeyden alınan X100 büyütmedeki görüntüler üzerinden yapılmaktadır. Grafit sayısı ve şekli ile ilgili incelemeler için elde edilen görüntüler toplu halde Şekil 9.1.A, B1-B3, C1-C3 ve D1-D3'te verilmiştir. ImageJ görüntü analizi programı ile elde edilmiş bu numunelere ait yüzde grafit oranı Şekil 9.2'de, grafit boy/en oranı Şekil 9.3'te ve yüzde grafit/matris hacim oranları ise Şekil 9.4'te verilmiştir.

Görüntüler incelendiğinde Şekil 9.1'deki A numunesinin tamamen küresel şekilli grafitlerden meydana geldiği ve dolayısıyla KGDD malzeme olduğu görülmektedir. Yapılan analizlerde küreselleşme oranının % 90 olduğu tespit edilmiştir. B1, B2 ve B3'te verilen malzemeler vermikülerleştirici VER-MAT malzeme ilavesinin etkilerinin belirlendiği numunelerdir (Şekil 9.1). Vermikülerleştirici miktarı sırasıyla % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranlarındadır. Bu numuneler incelendiğinde; % 0.3 ilave oranında % 20 olan vermiküler şekilli grafit miktarının, vermikülerleştirici malzeme ilave oranının artmasıyla birlikte % 65'e kadar çıktığı tespit edilmiştir (Şekil 9.2). Bu numuneler için grafit boy/en oranının ise 3'ten 9'ye yükseldiği görülmektedir. Ayrıca bu numunelerde, başlangıçta % 11.4 olan matristeki grafit oranının vermikülerleştirici ilavesindeki artışa bağlı olarak azaldığı ve % 10'a kadar düştüğü görülmektedir. Elde edilen bu sonuçlar değerlendirildiğinde; VER-MAT ilavesinin artmasıyla doğal olarak vermikülerleşmenin arttığı, aynı zamanda iyi bir vermiküler grafit olma ölçütü olan boy/en oranının da yükseldiği, ilave edilen VER-MAT bileşimindeki elementlerin bir kısmının etkisiyle matris içerisinde ayrıışan grafit miktarının ise azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 9.1'deki C1-C3 numuneleri % 0.5 vermikülerleştirici ilavesine ek olarak sırasıyla % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranında aşılavıcı ilavesi ile üretilmiştir. Ölçümler ve analizler sonucunda bu numunelerde, hedeflendiği gibi vermiküler şekilli grafit oranının (Şekil 9.2) % 45-46 oranında olduğu görülmektedir. Bu çalışmanın sonunda elde edilecek malzemenin hızlı tren fren diskinde kullanılması hedeflendiğinden, dayanım ve tokluk gibi özelliklerin KGDD'e yaklaşması ve ısı iletiminin de çok düşük olmaması için % 40-50 vermiküler

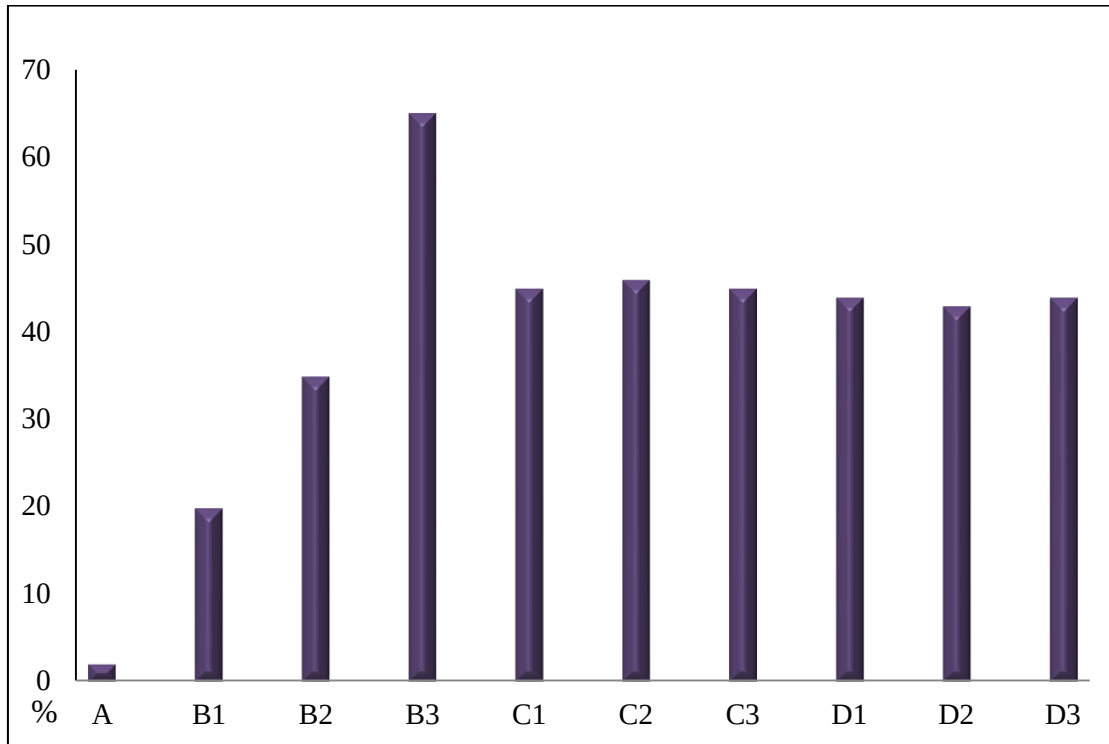
şekilli grafit yapıları bir dökme demir olması gerekmektedir. VGDD’lerde dayanımın artması için özellikle perlitik matris tercih edilmektedir.



Şekil 9.1. Üretim şartlarına bağlı olarak grafit yapısının değişimi (100 µm).

Isı iletimi kısmında da anlatılacağı üzere ısı iletim özelliklerini olumsuz etkileyen bir durumdur. Bu nedenle dayanımın sadece grafit yapının kontrolü ile sağlanması en güvenilir yol olmaktadır. İşte bu nedenle bu malzemelerde küresel ve vermiküler grafit yapıları birlikte üretilmiştir. Aşılmalı miktarının artması grafit boy/en oranının değişmesine sebep olmuştur (Şekil 9.3). Ölçümler sadece vermiküler şekilli grafitler üzerinden yapılmıştır. Çünkü küresel grafitlerde bu oran genellikle 1-1.2 arasındadır. Aşılmalı

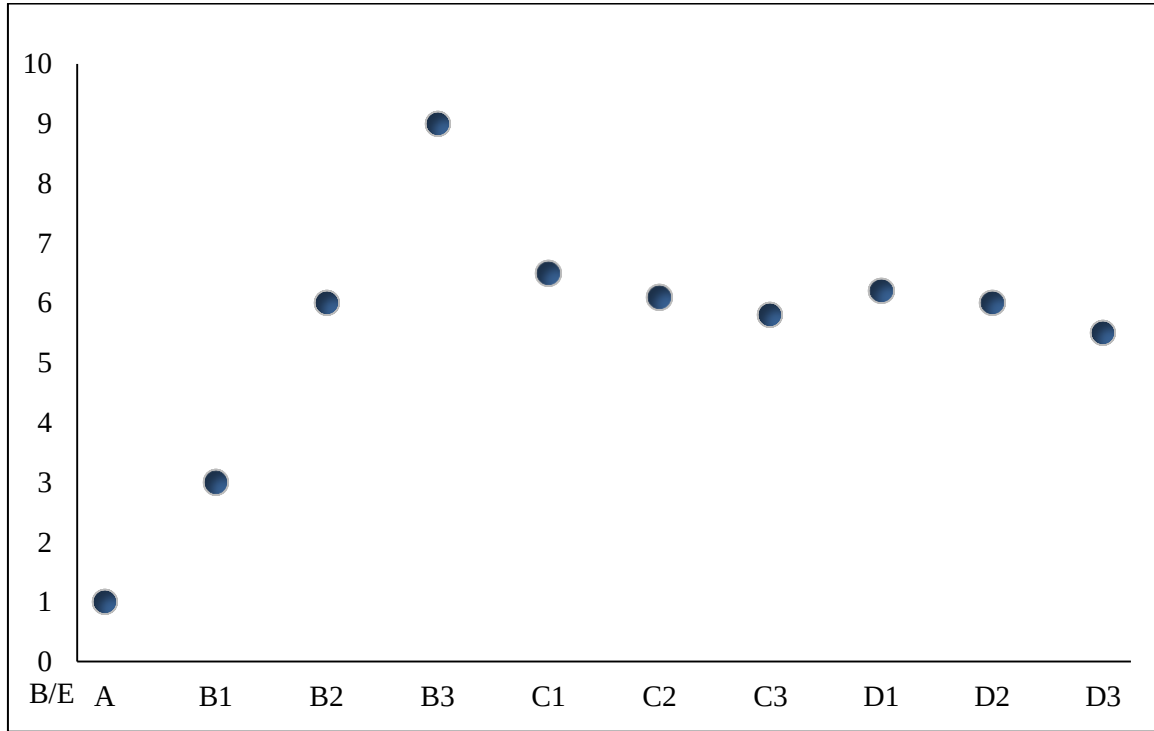
miktarı % 0.3 olduğunda bu oran 3.2 olurken, aşılavıcı miktarı % 0.8'e yükseldiğinde boy/en oranı 5.8'e kadar artmıştır. Her üç numunede de grafit boy/en oranı standartlara uygundur. Bu numunelerde, başlangıçta % 10.5 olan matristeki grafit oranının vermikülerleştirici ilavesindeki artışa bağlı olarak azaldığı ve % 10'a kadar düştüğü görülmektedir. Ancak bu değişim çok düşük bir oran olduğundan sınırlı etkisi olmaktadır. Sonuçlar değerlendirildiğinde; VER-MAT miktarının artmasıyla iyi bir vermiküler grafit olma ölçütü olan boy/en oranının da yükseldiği, VER-MAT bileşimindeki elementlerin bir kısmının etkisiyle matris içerisinde ayrılan grafit miktarının ise sınırlı da olsa azaldığı tespit edilmiştir.



Şekil 9.2. Üretim şartlarına bağlı olarak oluşan vermiküler grafit oranları

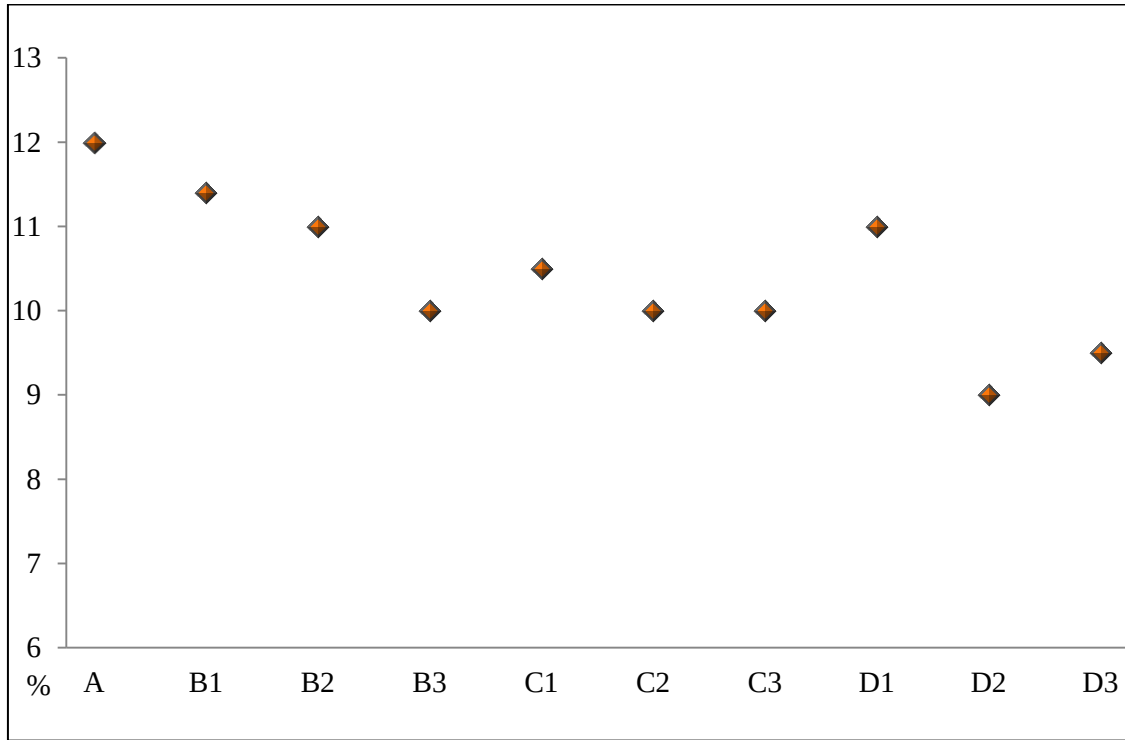
Şekil 9.1'deki D1-D3 numuneleri incelendiğinde ise; bu numunelerin de C grubu numunelerdeki gibi % 0.5 sabit oranda vermikülerleştirici ve % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranında aşılavıcı oranı ile üretildikleri, ancak % 0.6 oranında Cu elementi ilavesi yapıldığı görülmektedir. Cu ilavesi matris yapısının değişiminin etkilerini incelemek amacıyla yapılmıştır. D1-D3 numunelerde de, bu çalışma için hedeflenen standartlar (% 40-50 vermiküler grafit oranı) içerisinde olan % 43-44 oranında (Şekil 9.2) vermiküler grafit yapısının elde edilmiştir. D1-D3 numunelerinde grafit boy/en oranı (Şekil 9.3) C grubu numunelere göre % 10 azalarak 3.1-4.4 aralığında olmuştur. İlave edilen saf Cu

elementi grafitleşmeyi teşvik etmezken, matris içerisindeki sementit oluşumunu desteklemiştir (Bölüm 9). Bir başka deyişle burada vermiküler grafitlerde boy ölçüsünde artış olmamış tersine azalmış ve grafitin eni de incelmıştır. Bunun şu şekilde açıklanabilir; aşılama ilavesi neo-ötektik katılma sırasında çok sayıda grafit çekirdeklenmesine yol açarken, aynı zamanda özellikle Cu ilavesinin daha hızlı katılmaya sebep olması nedeniyle grafitin kalınlaşmasını da kısıtlamıştır. Bu numunelerde aynı zamanda grafitleşme de azalmıştır (ancak D1 numunesinde sağlıklı bir sonuç elde edilememiştir) (Şekil 9.4). Böylelikle grafitleşme azalmasına rağmen, boy/en oranı daha az oranda etkilenmiştir (Şekil 9.3).



Şekil 9.3. Üretim şartlarına bağlı olarak grafit boy/en oranlarının değişimi

Grafit yapısı, boy/en oranı ve matris/grafit hacim oranlarının değişiminin incelendiği bu bölümde; vermikülerleştirme işlemi ile hedeflenen oranda vermiküler grafit oluşturulabildiği, aşılama miktarının artışıyla grafit boy/en oranının istenen ölçüde kontrol edilebildiği görülmektedir. Ayrıca Cu ilavesi ile grafitleşme sınırlandırılabilirdiğinden, sınırlanan difüzyona bağlı olarak grafitleşme sürecinin kontrol edilebildiği tespit edilmiştir.



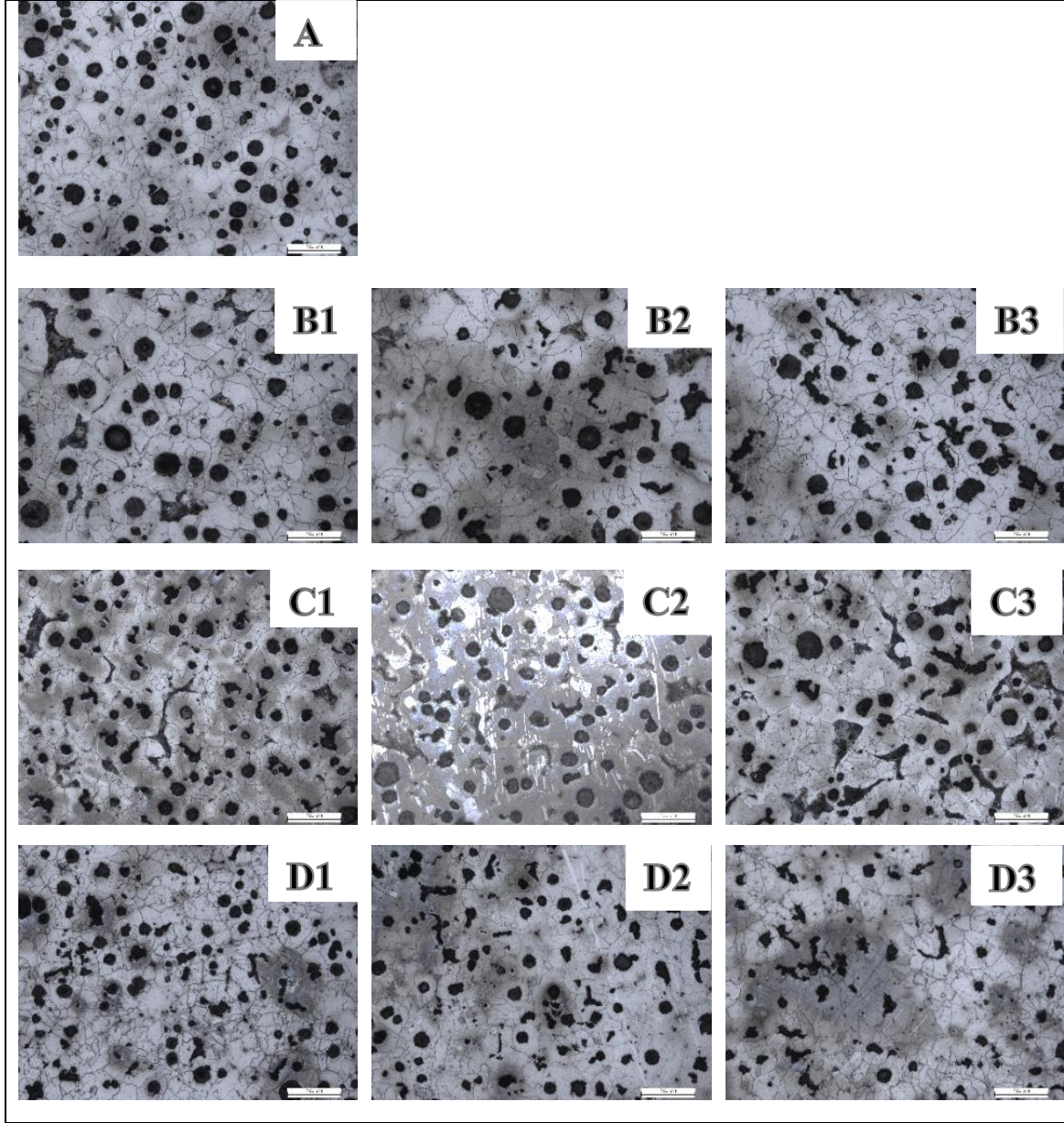
Şekil 9.4. Üretim şartlarına bağlı olarak yapıdaki grafit oranlarının değişimi

9.2. Metalografik Analizler

Gri dökme demirlerin döküm durumundaki mikroyapı genel olarak; G (grafit) + ferrit, G (grafit) + perlit ve G (grafit) + ferrit + perlit olmaktadır. Bunun yanında; karbür yapıcı elementler de kısmen bulunuyorsa (Mo, Cr, W, V vb.) yukarıda ifade edilen yapılara ilave olarak alaşım karbürleri de ihtiva eden matrisler meydana gelebilmektedir. Aynı zamanda yapılan işlemlere (aşılama-çekirdeklendirme-tane inceltme) ve alaşım elementlerine bağlı olarak ince veya kaba olarak nitelendirilen yapısal özellikler değişmektedir. Çalışmanın bu bölümünde yapılan işlemler neticesinde, yukarıda ifade edilen mikro ve makro yapısal oluşumların değişimi ve sebepleri değerlendirilecektir. Çalışma dört ana grupta planlanmış ve yürütülmüştür.

Bu çalışma için aşılama, vermikülerleştirme ve bakır ilavesinin etkilerinin daha net gösterilebilmesi bakımından G (grafit) + ferrit matris olması tercih edilmiştir. Bu amaçla ergitme ve sıvı metal hazırlama işlemleri planlanmış ve yürütülmüştür. Birinci grupta, perlit ve/veya karbür oluşturuucu ilave ve işlemlerden kaçınılmış ve bunun sonucunda % 98.6 oranda G (grafit) + ferrit yapıda KGDD üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir (Şekil 9.5.A). Bu malzeme matrisinde % 1.4 perlitik alanlar olduğu tespit edilmiştir. Böylece

başlangıç malzeme bileşimi sağlanmıştır. Ayrıca % 0.3 aşı yapılarak ortalama 32.5 μm boyutlarında (Şekil 9.6) eş aksenel taneler elde edilmiştir.



Şekil 9.5. Üretim şartlarına bağlı olarak makro yapıdaki değişimler (X100 büyütme)

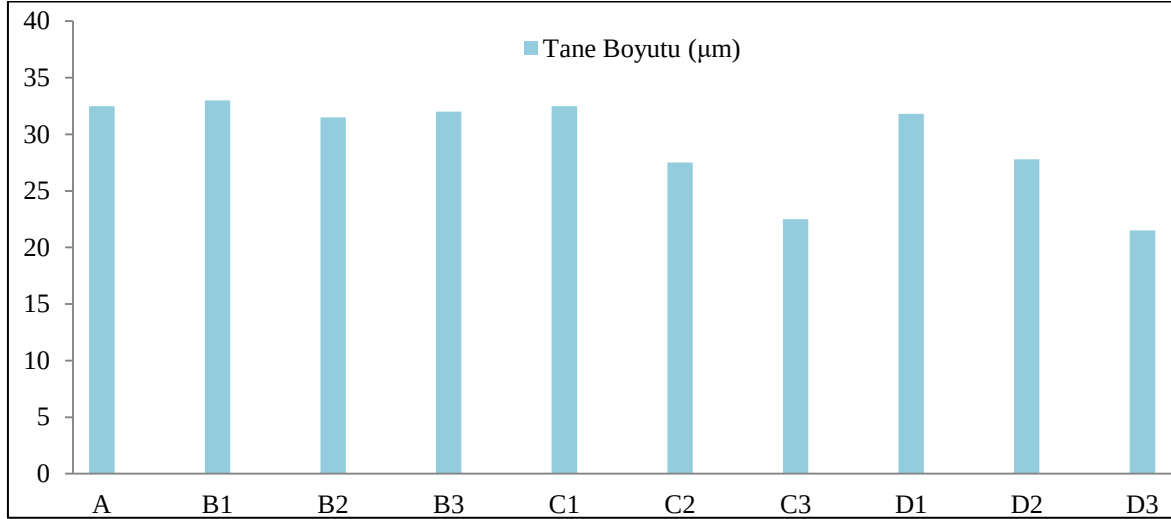
İkinci grupta, vermikülerleştirici ilaveleri yapılarak meydana gelen değişimler incelenmiştir (Şekil 9.5. B1-B3). Bu numunelere de % 0.3 oranında aşılایıcı ilavesi yapılarak benzer tane boyutu üretimi sağlanmaya çalışılmış ve sonunda ortalama 31.5-33 μm aralığında tane boyutuna (Şekil 9.6) sahip eş aksenel makro yapı malzeme üretilmiştir. Bu malzemelerin matris yapıları incelendiğinde % 91.1-90.2 oranında G (grafit) + ferrit ve ortalama % 8.9-9.8 oranlarında perlitten oluştuğu görülmüştür (Şekil

9.7). Vermikülerleştirici olarak ilave edilen VER-MAT malzemesinin içeriğinde sementit oluşumunu teşvik eden bazı elementler bulunmaktadır. Bu elementlerin etkisiyle B1, B2 ve B3 numunelerinde sementit oluşumu arttığından perlit miktarı sırasıyla % 8.9, 9.5 ve 9.8 oranlarına ulaşmıştır. Bu durum ileride tartışılacak mekanik ve ısı özellikleri de etkileyecektir.

Üçüncü grupta; ikinci grupta % 45-50 vermikülerleşmenin sağlandığı tespit edilmiş ve % 0.5 vermikülerleştirici ilavesinin yapıldığı şartlar temel kabul edilerek aşılama miktarındaki artışın etkileri incelenmiştir. % 0.5 vermikülerleştirici içeren sıvı metale sırasıyla % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranlarında aşılama ilavesi yapılmış ve özellikle tane sayısındaki değişim incelenmek üzere C1, C2 ve C3 numuneleri üretilmiştir (Şekil 9.5. C1-C3). Yapılan analiz ve incelemeler sonucunda; tane sayısının aşılama miktarındaki artışa bağlı olarak arttığı ve buna bağlı olarak tane boyutunun ise 32.5 μm 'dan 22.8 μm 'a kadar azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 9.6). Çalışma sonuçları; aşılama miktarındaki $\cong$ % 166 artışa bağlı olarak, tane boyutunun $\cong$ % 44 oranında küçültülebildiğini göstermektedir. Ayrıca bu numunelere ait matris yapısındaki değişimler de incelendiğinde, beklendiği gibi B grubu numunelere yakın % 90.4-90.2 oranında G (grafit) + ferrit ve ortalama % 9.6-9.8 oranlarında perlitten oluştuğu görülmüştür (Şekil 9.7). Bu sonuçlar aşılamanın perlit oluşumuna etkisinin yok denilecek kadar düşük olduğunu göstermektedir. Bu nedenle de grafit faz hacim oranı da neredeyse sabit kalmıştır.

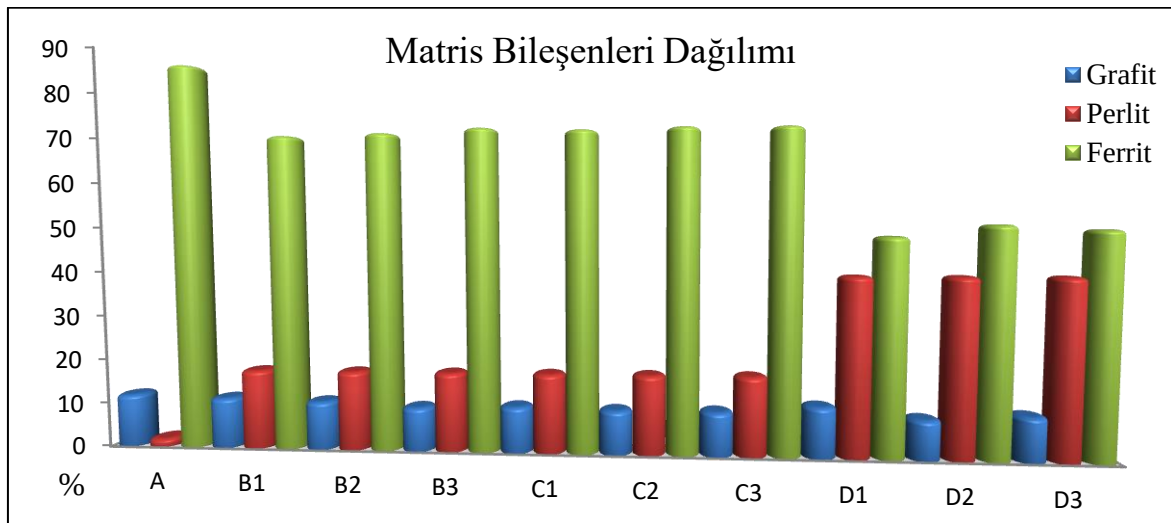
Dördüncü grupta ise; ikinci ve üçüncü gruplardan elde edilen en uygun şartlar olarak belirlenmiş % 0.5 VER-MAT ilavesiyle sağlanan % 45-50 vermikülerleşme ve sırasıyla % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranlarında aşılama ile elde edilen tane inceltmedeki başarıya ilave olarak % 0.6 Cu ilavesi yapılmış ve perlit oranındaki değişimler incelenmiştir. Bu amaçla; C1, C2 ve C3 numunelerine (Şekil 9.5. C1-C3) sırasıyla her birine % 0.6 Cu aşılama ilavesi yapılmış ve özellikle perlit miktarındaki değişim incelenmek üzere D1, D2 ve D3 numuneleri üretilmiştir (Şekil 9.5. D1-D3). Yapılan analiz ve incelemeler sonucunda; yukarıda da belirtildiği üzere tane sayısındaki artışın yanında, tane boyutunun da 33 μm 'dan 21.5 μm 'a kadar azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 9.6). Çalışma sonuçları; aşılama miktarındaki artış ile birlikte, tane boyutunun $\cong$ % 53 oranında küçültülebildiğini göstermektedir. Sadece aşılama etkisiyle $\cong$ % 44 küçülen tane boyutunun Cu ilavesi ile bir miktar daha arttığı tespit edilmiştir. Buna ilaveten, matristeki grafit oranı $\cong$ % 10'a yakın

azalmıştır. Ayrıca bu numunelere ait matris yapısındaki değişimler de incelendiğinde, beklendiği gibi C grubu numunelerin aksine G (grafit) + ferrit bileşeni azalarak % 58-59 oranına düşerken, bakırın etkisiyle mevcut perlitik matrisin ise artarak % 39-40 oranlarına kadar arttığı görülmüştür (Şekil 9.7).



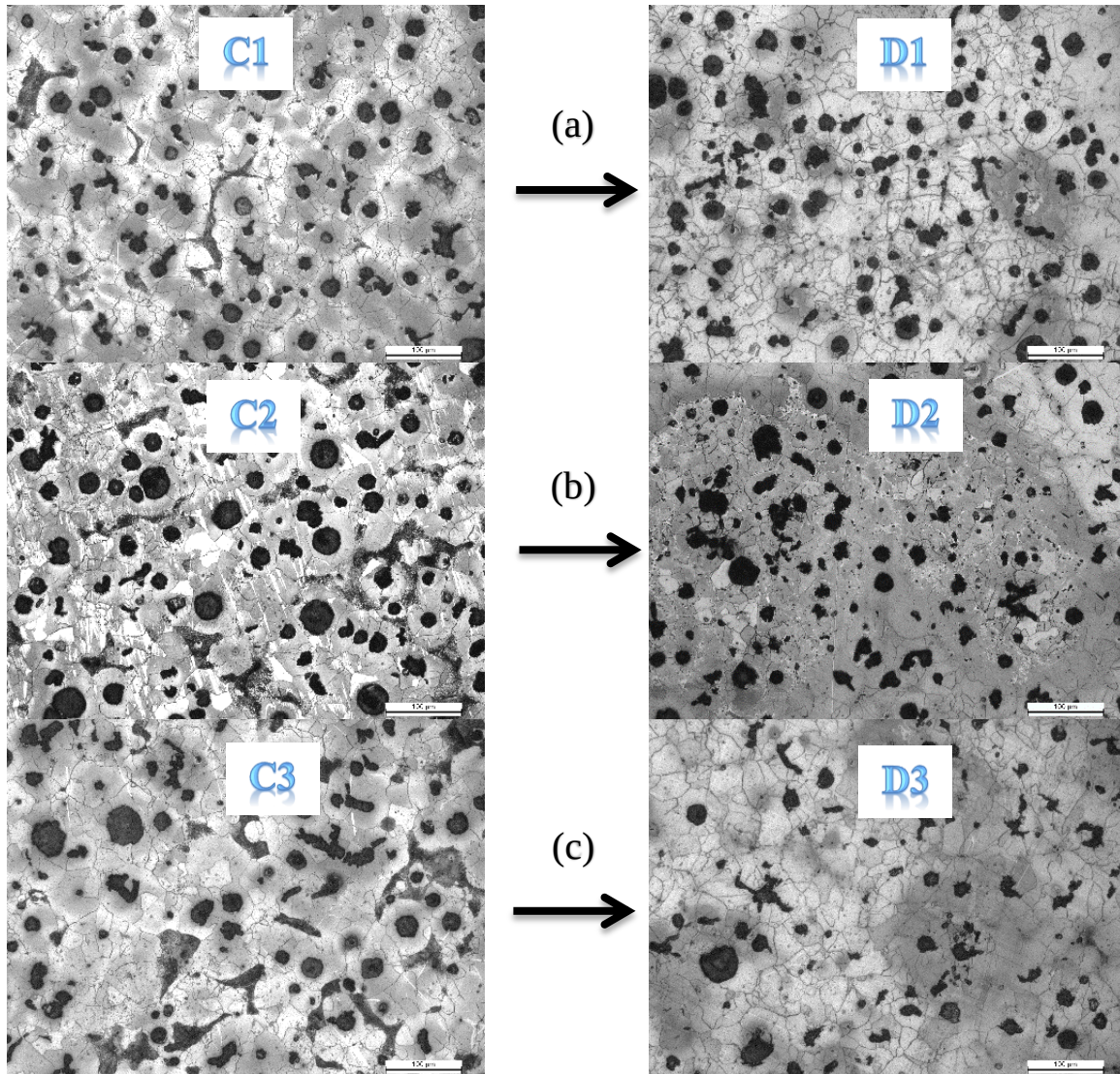
Şekil 9.6. Üretim şartlarına bağlı olarak tane boyutunda meydana gelen değişimler

Bu artış Cu elementinin güçlü bir sementit oluşturu element olmasından kaynaklanmıştır böylece perlit miktarında artış gerçekleştirmiştir. Bu sonuçlar aşılamanın perlit oluşumuna etkisinin yok denilecek kadar sınırlı olduğunu, ancak beklendiği gibi Cu ilavesinin ise perlit oluşumuna yüksek oranda katkı sağladığını göstermektedir. Bu nedenle de grafit faz hacim oranı da azalmıştır.



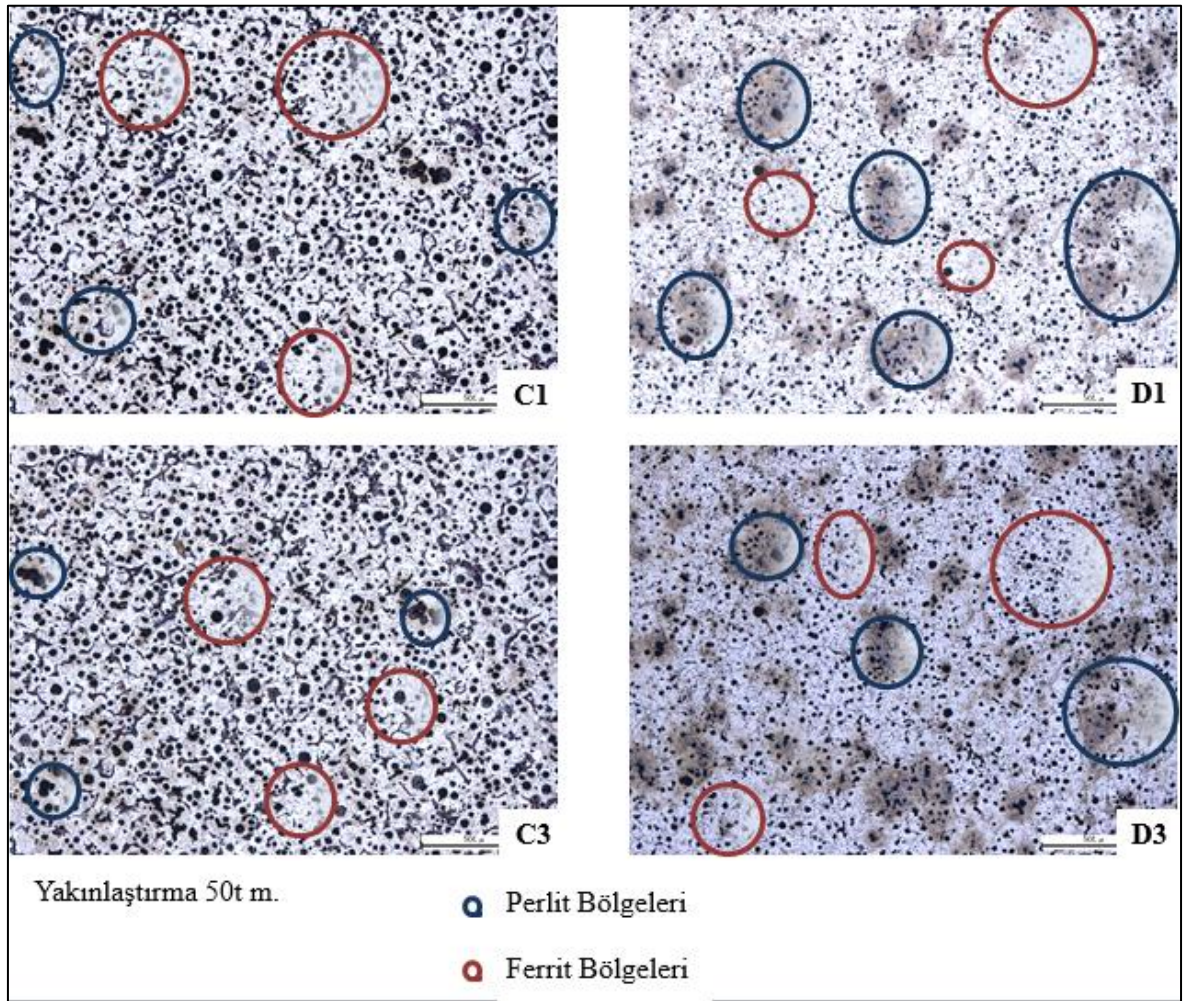
Şekil 9.7. Üretim şartlarına bağlı olarak grafit, ferrit ve perlit hacim oranlarının değişimi

Bu çalışma kapsamında C ve D grubu numunelerde tane boyutundaki değişimler Şekil 9.6'da ve matris bileşenlerindeki değişim ise Şekil 9.8'da ayrıca gösterilmiştir. Diğer şartlar aynı (% 0.5 vermikülerleştirici) tutulduğunda; ancak aşılama miktarının artırılmasıyla, tane sayısının $\cong$ % 44 oranında küçültülebilmemesine ilave olarak Cu ilavesiyle $\cong$ % 5-8 kadar daha fazla küçültülebildiği tespit edilmiştir. Bakırın perlitik yapıyı teşvik etmesi bilinen bir durumdur. Perlit oluşumunu teşvik eden diğer elementler gibi tane sınırlarında daha fazla yer alan Cu da tane büyümesi için gereken difüzyonu sınırlandırarak, tane büyümesini bir miktar sınırladığıdır.



Şekil 9.8. Aynı aşılama oranlarına sahip iki farklı grup numunede % 0.6 Cu ilavesinin mikroyapıya etkisi

Cu ilavesinin perlit oluşumuna etkisi Şekil 9.9'da çok daha net görülmektedir. Cu ilave edilmediğinde bir miktar bulunan perlitin, C grubu numunelere kıyasla % 0.6 Cu ilave edilen numunelerde perlitik matris oranı $\cong$ % 39-40'a kadar yükselmiştir. Bakırın perlitik yapıyı teşvik etmesi bilinen bir durumdur. Perlit oluşumunu teşvik eden diğer elementler gibi, tane sınırlarında daha fazla yer alan bakır da grafit oluşumu için gereken difüzyonu sınırlandırarak sementit oluşmasına ve dolayısıyla perlit miktarının artmasına neden olmuştur.

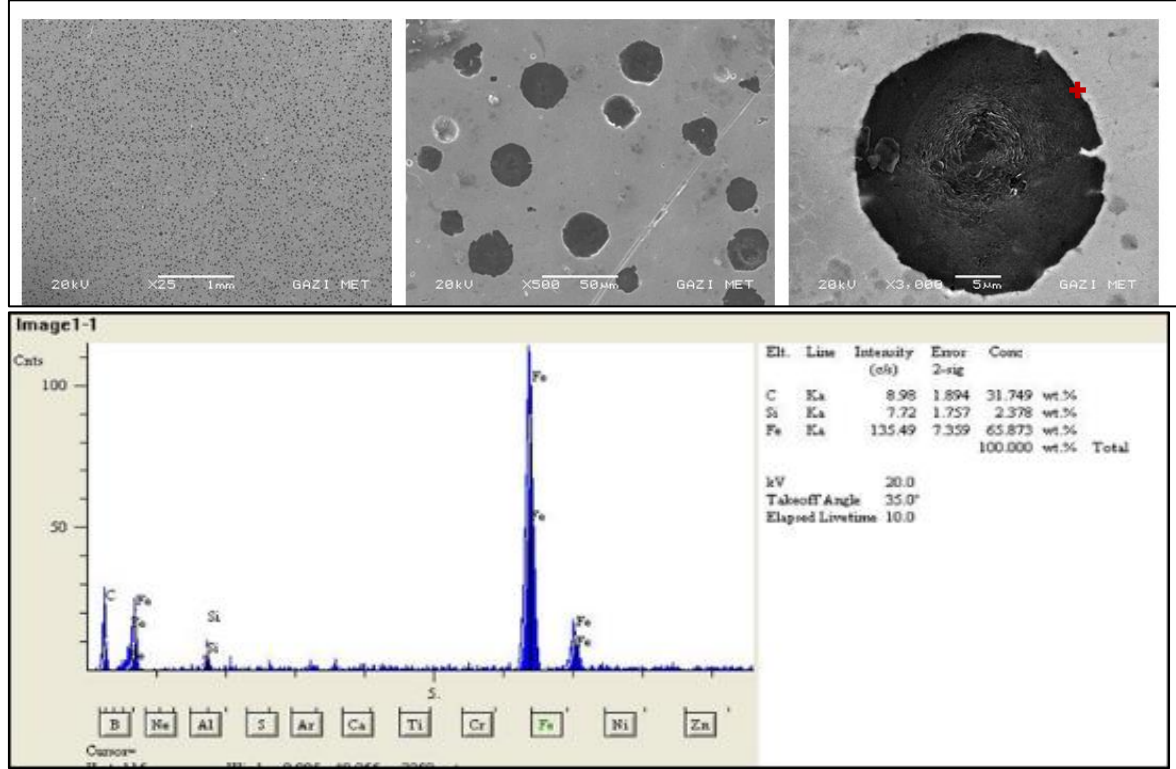


Şekil 9.9. C1, C3 (Cu İlavesiz) ve D1, D3 (Cu ilaveli) numunelerin işaretlenmiş ferrit ve perlit matris bölgeleri

9.3. SEM-EDS Analizleri

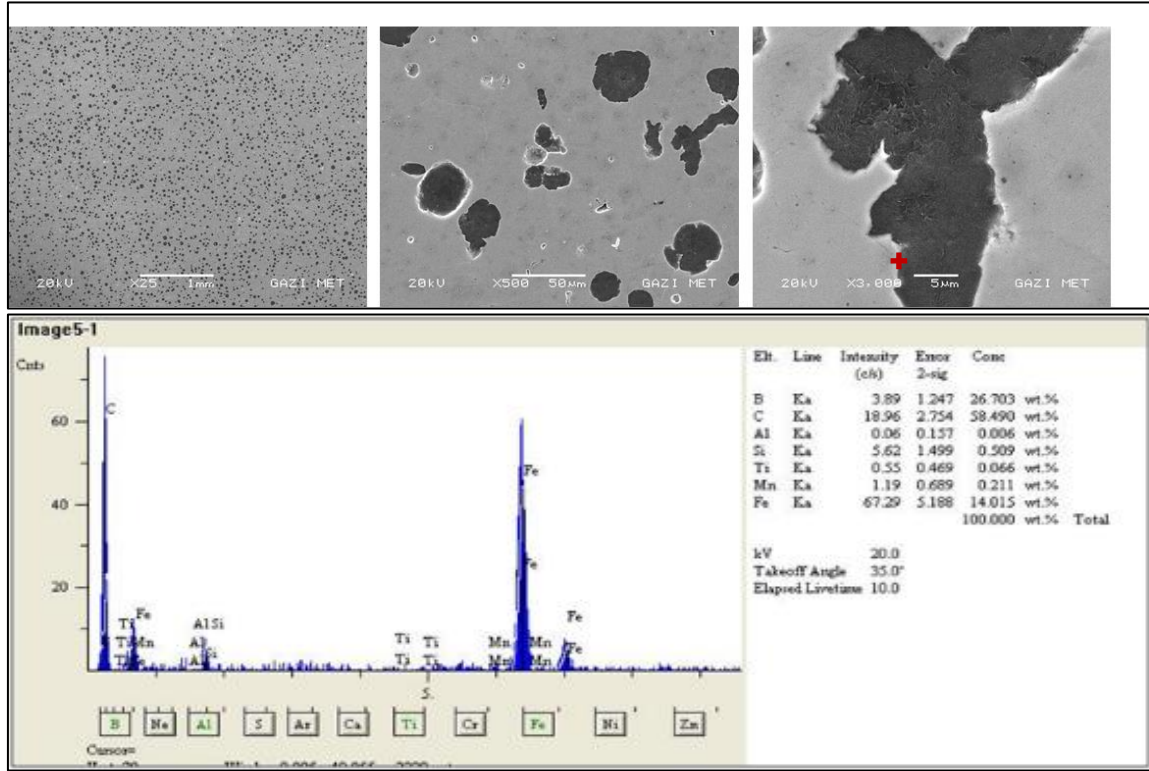
Bu bölümde yukarıda ifade edilmeye çalışılan konuların daha iyi değerlendirilebilmesi için SEM-EDS incelemeleri de yapılarak Şekil 9.10-19'da verilmiştir.

Bu veriler incelendiğinde; A numunesinde (Şekil 9.10) G + ferrit matrisli, grafit şeklinin $\cong$ % 97-98 küresel olduğu görülmüştür. Özellikle grafitte yakın matristen yapılan EDS analizlerinde ana elementler olan C, Fe ve Si elementlerinin varlığı ferrit oluşumunun kanıtlarından biridir. Grafit çevresinde bol miktarda silisyumun varlığı ise bu elementin grafitleşmeye etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 9.10. A numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu

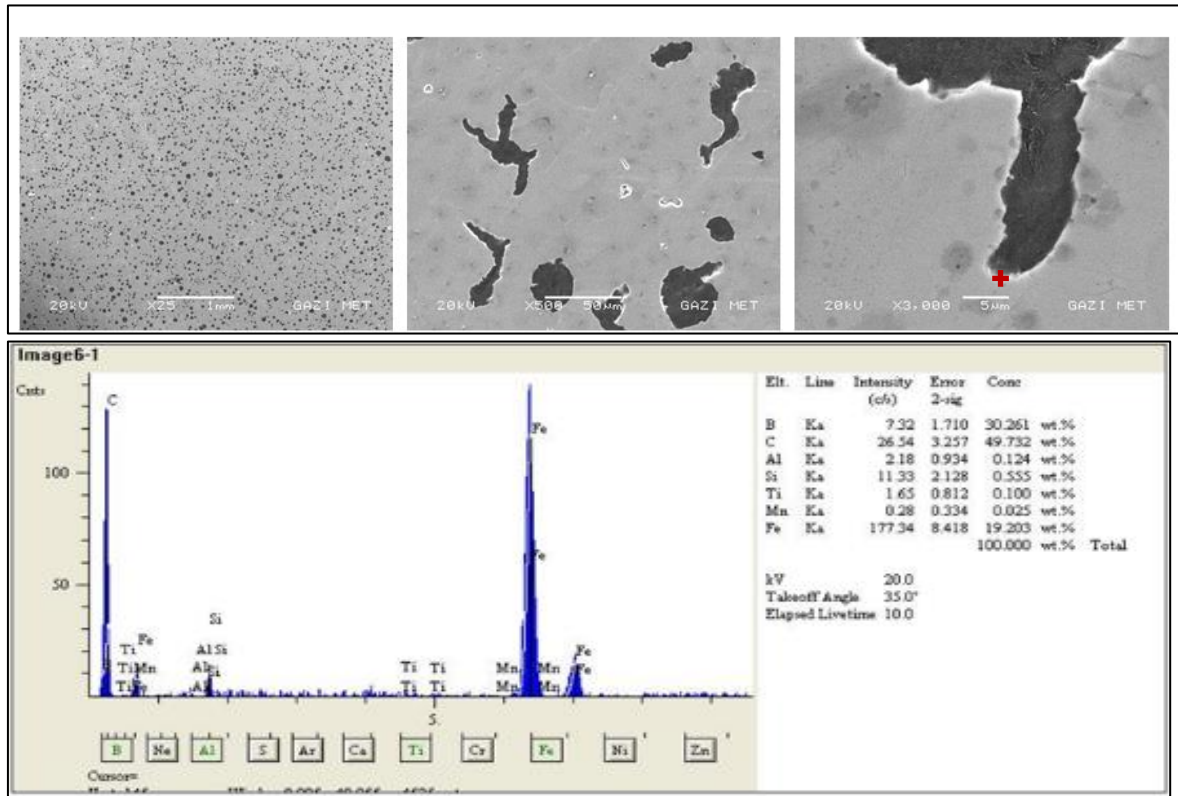
Uygun temel kimyasal bileşime sahip sıvı malzeme üzerinde vermikülerleşmenin etkisinin tespiti daha kolay olacağından, bu bileşimdeki malzeme % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranlarda VER-MAT ilavesiyle vermikülerleştirilmiştir (B1-B3 numuneleri). Vermikülerleştirici ilavesindeki artışa bağlı olarak grafit şeklinin küreselden solucanımsı (vermiküler) hale dönüştüğü (Şekil 9.11-13), EDS analizlerinde ise bunu teşvik eden B, Ti, Al gibi elementlerin grafitte yakın matriste arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar vermikülerleşme için kullanılan kimyasal karışımın bu işlem için yeterli olduğunu göstermektedir.



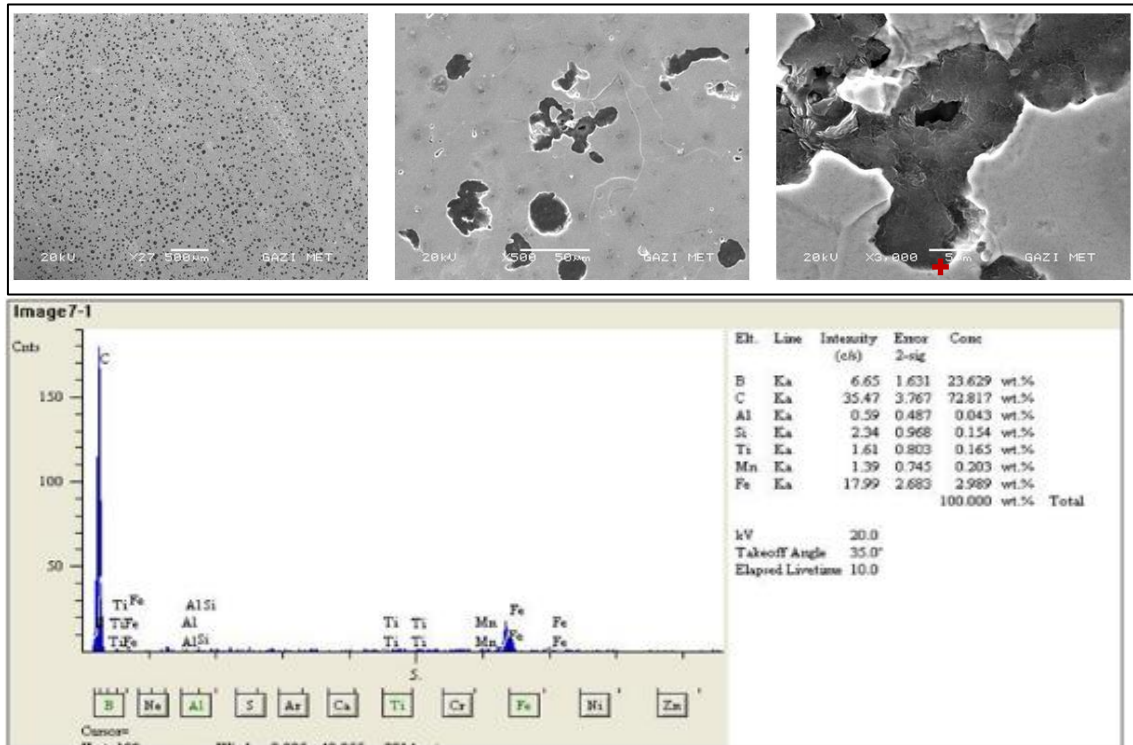
Şekil 9.11. B1 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu

Ayrıca bu elementlerin, küreselleşmede en etkin olan aynı zamanda bir gösterge olan kalıntı Mg miktarını % 0.045-0.05 aralığından % 0.030-0.035 aralığına inmesine sebep olduğu ve Mg elementinin etkinliğinin de sınırlandırılmasına sebep olduğunu göstermektedir. Bu nedenle yeterli ve kararlı küresel bir gaz boşluğu meydana gelememekte ya da küre şeklini koruyamamaktadır. Bunun sonucunda sıvıdan ayrışmaya başlayan grafitin şekli küresel değil vermiküler (solucanımsı) olmaktadır.

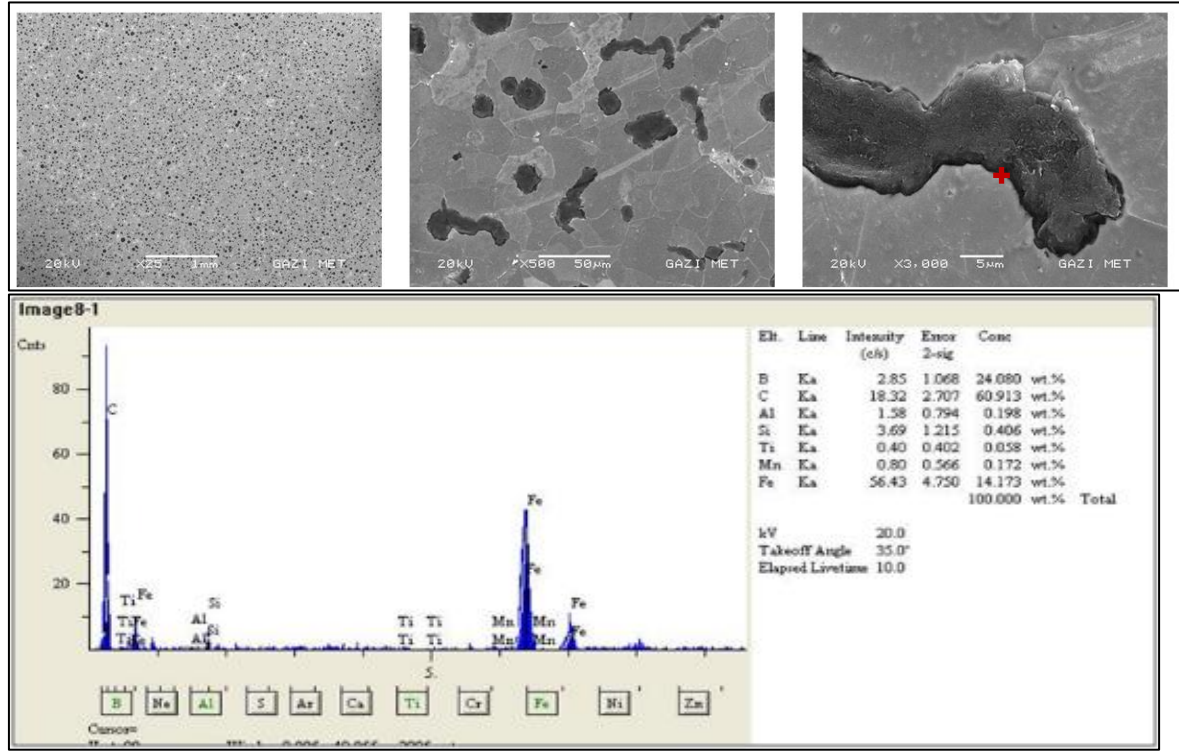
Daha sonra hedefler bakımından ideal miktarda vermikülerleşmiş grafit yapısının üretildiği % 0.5 VER-MAT ilaveli malzemeye tane boyutunu küçültmek amacıyla sırasıyla % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranlarında Fe-Si aşılایıcı ilaveleri yapılarak C1, C2 ve C3 numuneleri üretilmiş ve SEM-EDS analizleri uygulanmıştır (Şekil 9.14-16). Bu numunelere ait görüntü ve analiz sonuçlarının incelenmesi neticesinde, vermikülerleştirici ilavesi neticesinde % 40-45 oranında grafit şeklinin küreselden solucanımsı (vermiküler) hale dönüştüğü, EDS analizlerinde ise bunu teşvik eden B, Ti, Al gibi elementlerin grafitte yakın matriste arttığı tespit edilmiştir. Ancak bu numunelerde önemli olan diğer durum tane boyutunun değişimi olduğundan görüntüler incelendiğinde tanelerin incelendiği yapılan diğer incelemelerle birlikte daha net görülmektedir.



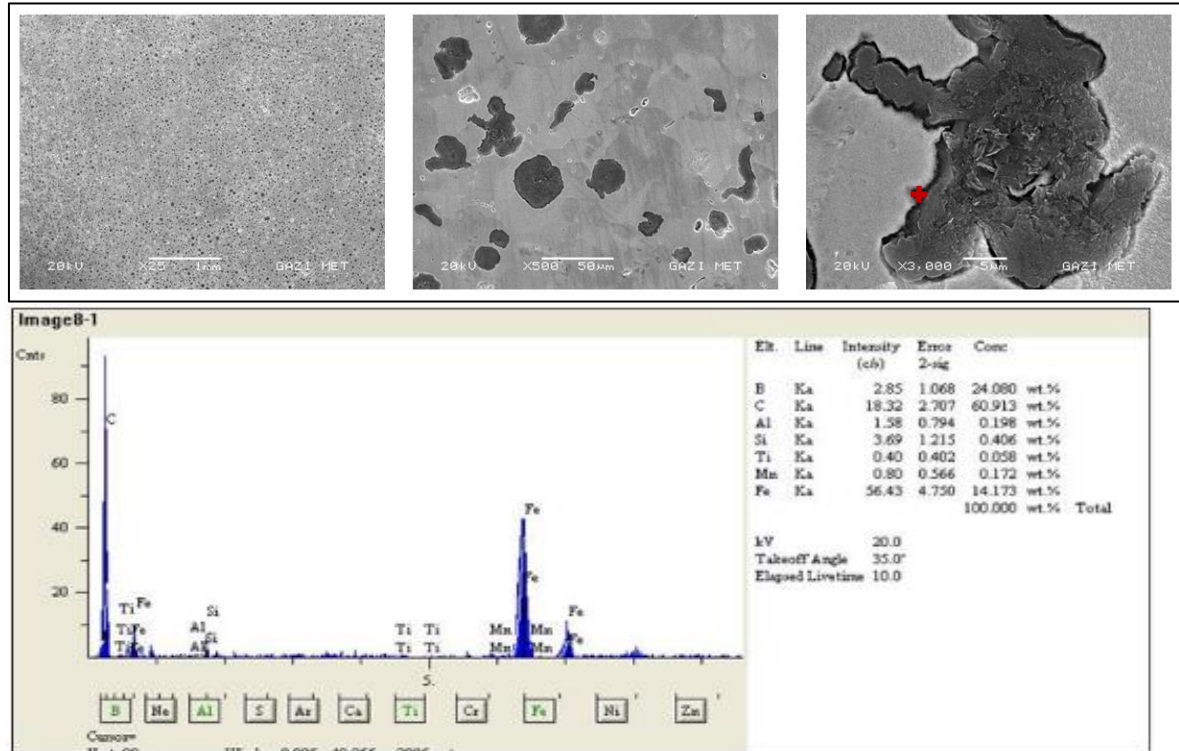
Şekil 9.12. B2 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu



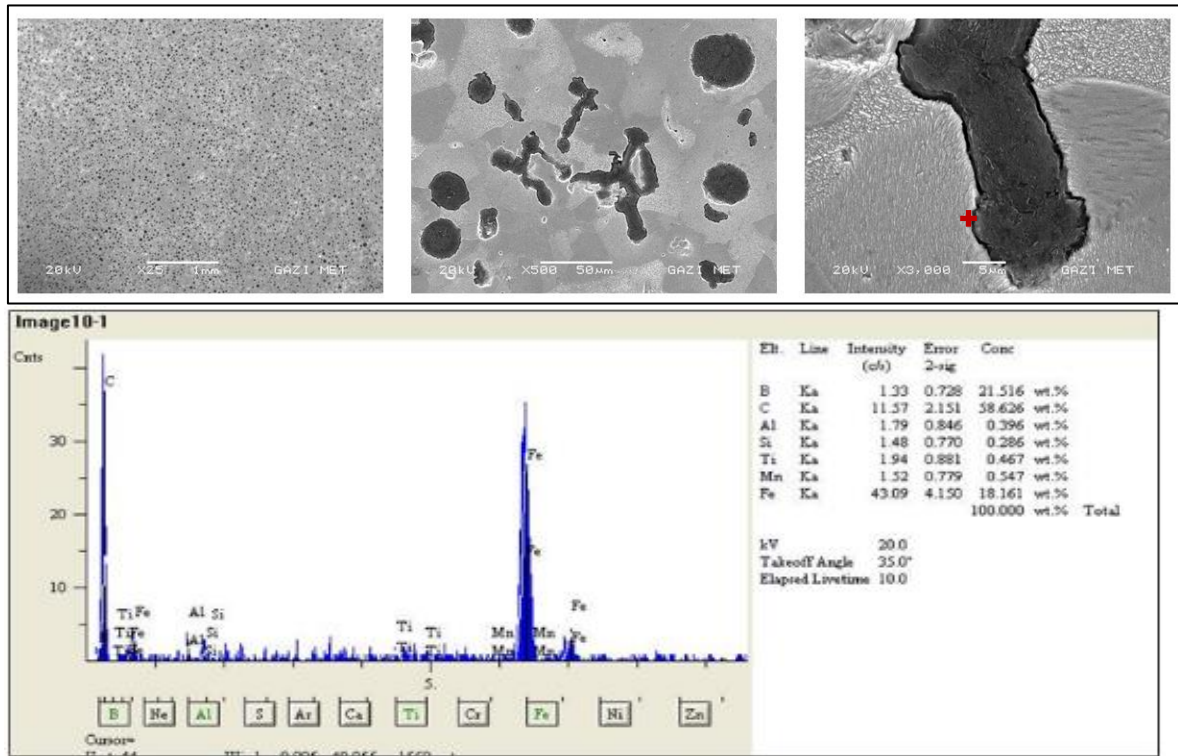
Şekil 9.13. B3 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu



Şekil 9.14. C1 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu

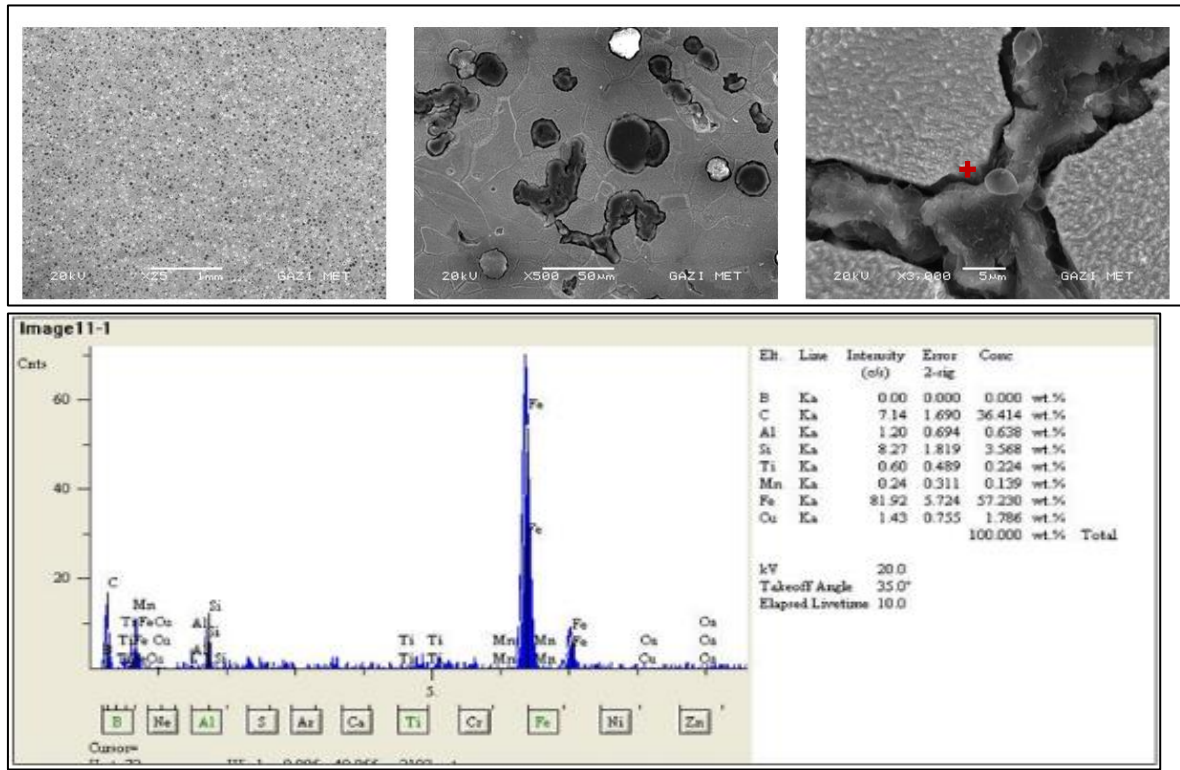


Şekil 9.15. C2 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu

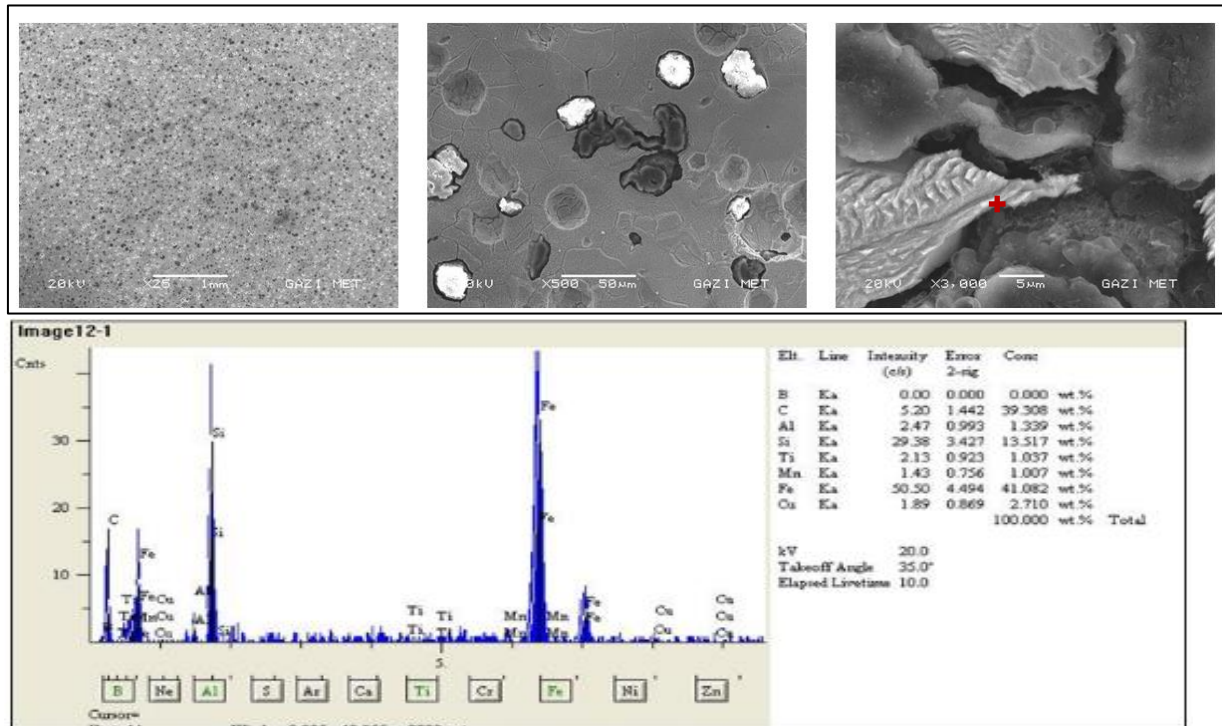


Şekil 9.16. C3 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu

Son olarak; hedefleri bakımından ideal miktarda vermikülerleşmiş grafit yapısının üretildiği % 0.5 VER-MAT ilaveli ve % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranlarında aşılama sonucunda ideal tane boyutlarının elde edilebildiği C grubu malzemelere % 0.6 Cu ilavesiyle D1, D2 ve D3 numuneleri üretilmiş ve SEM-EDS analizleri uygulanmıştır (Şekil 9.17-19).



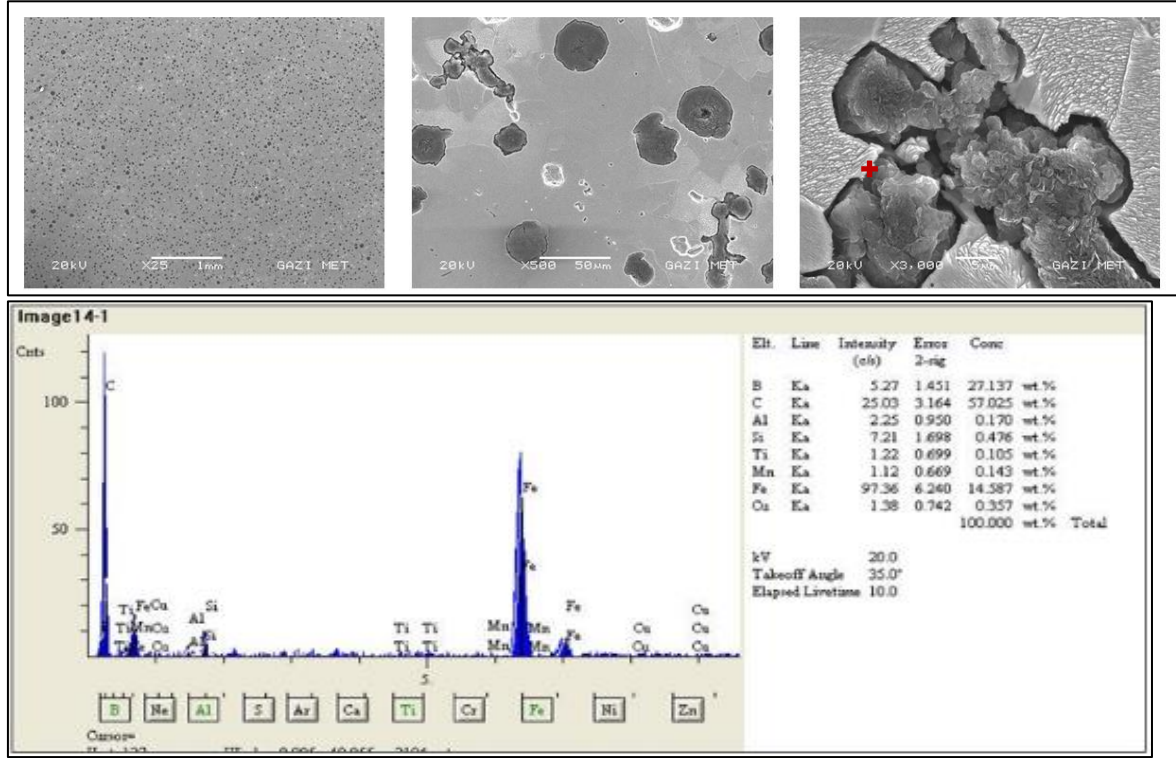
Şekil 9.17. D1 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu



Şekil 9.18. D2 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu

Görüntü ve analiz sonuçlarının incelenmesi neticesinde, benzer oranlarda vermiküler grafit yapısının üretilebildiği, EDS analizlerinde ise bunu teşvik eden B, Ti, Al gibi elementlerin

grafite yakın matriste arttığı tespit edilmiştir. Ancak bu numunelerde EDS analizlerinden de görüleceği üzere Cu varlığı nedeniyle perlit ve sementit tabakaları bariz bir biçimde görülmektedir.



Şekil 9.19. D3 numunesi SEM görüntüsü ve nokta EDS element tablosu

9.4. Mekanik Analizler

Başlangıç olarak KGDD ve devamında farklı üretim şartları kullanılarak üretilmiş VGDD'lerin mekanik testleri yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 9.20'den Şekil 9.25'e kadar sergilenmiştir. Dökme demirler değerlendirilirken mekanik özellikler önemli bir yer tutmaktadır. Çünkü demir esaslı malzeme olsa dahi, kendine has özellikler sergileyen bir malzemelerdir. Bu nedenle ana hedefi hızlı tren fren diskleri için ideal malzemeyi geliştirmek olan bu çalışmada elde edilen sonuçlar bu bakımdan da değerlendirilecektir. Adı geçen parçadan beklenen özelliklerin karşılanması asıl başarı ölçütü olacaktır.

Gri Dökme Demir'ler (GDD) çok farklı ve iyi mekanik ve yapısal özellikleri nedeniyle çok geniş ve yaygın kullanım alanına sahiptirler. Bu nedenle hemen her sektörde yapısal malzeme olarak kullanılmaktadırlar. Özellikle Küresel Grafitli Dökme Demir'ler (KGDD)

hem döküm hem de ısıtım işlem uygulamasıyla birlikte çok üstün özelliklere sahip olabildiklerinden dolayı en fazla tercih edilen türdür. Lamel Grafitli Dökme Demir'ler (LGDD) ise özellikle basma dayanımları ve ısıtım iletkenlikleri nedeniyle tercih edilmektedir. KGDD ve LGDD'in grafit yapısı bakımından ara türü olan VGDD'ler ise mekanik ve termal özellikler bakımından her iki dökme demirin ara bir formudur. Bu nedenlerle çok tercih edilen yapısal malzemelerdendir. Son yıllarda özellikle dökme demir dizel motor parçaları, manifoldlar, fren diskleri vb. sıcak ortamda çalışan veya çalışma sırasında ısınan parçaların imalatında sıkça kullanılmaktadır. Bu malzemeler çalışma sırasında üzerlerine etkiyen ya da oluşan ısıyı mekanik ve yapısal özelliklerinin bozulmaması için hızlıca uzaklaştırmaları gerekmektedir. Bu nedenlerle hem mekanik hem de ısıtım iletimlerinin olabildiğince yüksek olması gerekmektedir [18-31].

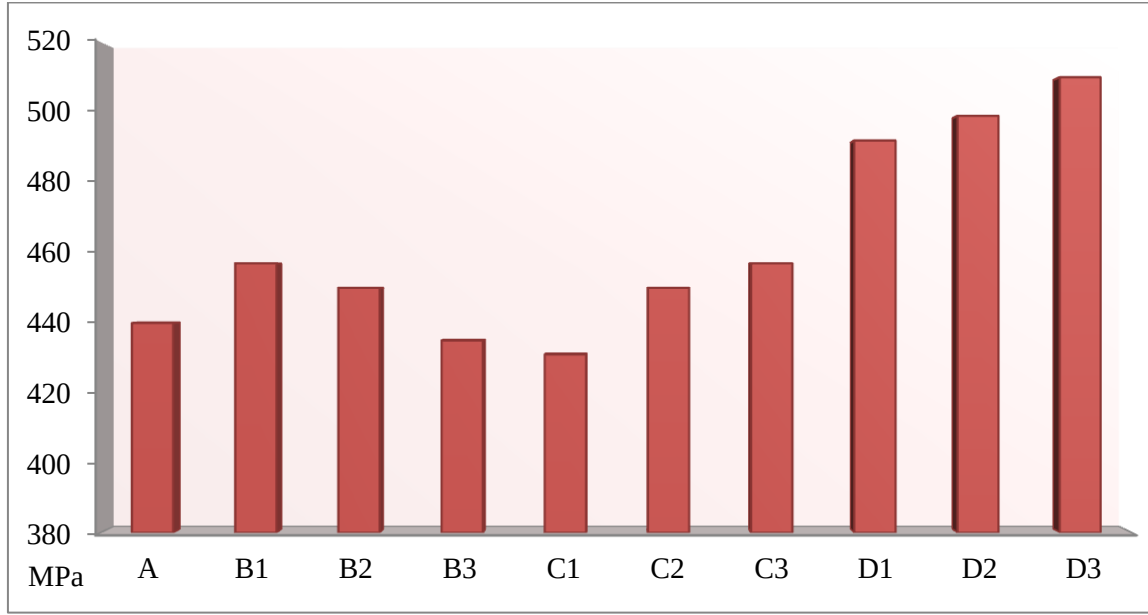
Bu özellikleri sağlayan asıl unsurlar; matris yapı (çoğunlukla ferrit, ferrit + perlit ve çoğunlukla perlit) ile vermiküler grafit miktarı ve şeklidir. Bir dökme demirin tam olarak VGDD olarak kabul edilmesi için vermikülerleşme oranının genellikle % 80-90 olması gerektiği ifade edilmektedir [19,22]. Ancak bu gereksinimin hangi şartlar için olacağı veya başka bir ifadeyle nasıl ve ne gibi özelliklerde bir parça için kabul edildiği açık değildir. Örneğin motor gövdesi, kampana ve fren diski için farklı özellikler istendiğine göre bu parçaların üretileceği malzeme standardının da farklı olması doğaldır. Bu nedenle VGDD malzemenin de birçok çeşidi (ISO 16112 standardına göre; GJV300, GJV350, GJV400, GJV450, GJV500) mevcuttur. Bunların matris yapıları ferritik (GJV300), ferrit + perlit (GJV350-450) ve perlitik (GJV500) olarak değişmektedir. Bu matris yapılarına bağlı olarak mekanik ve fiziksel özellikleri de değişim göstermektedir [32-40]. Matris yapıyı çoğunlukla perlitik yapmadan, özellikle dayanım özelliklerinin geliştirilmesi için küresel grafit oranının % 40-45 oranında olması faydalı olacaktır.

Grafit şeklinin küreselden vermiküler veya lamele dönüşmesine bağlı olarak, gerilimlerin grafitin sivri uç noktalarında birikmesi (toplanması) nedeniyle deformasyon kabiliyeti azalan malzemedeki kırılabilirlik ya da gevreklik arttığından, çekme yüklerine karşı özellikleri olumsuz yönde etkilenmektedir. Ancak bu tez çalışmasında durum farklı olmuş ve çekme özellikleri kısmen de olsa iyileşmiştir. Uygulanan vermikülerleştirme işlemi sırasında ilave edilen VER-MAT malzemesi içerisinde bulunan bazı elementlerin KGDD'de % 1.8 olan perlit miktarını ortalama $\cong$ % 9.4'a kadar artırması, dayanımı etkileyen ana neden

olmuştur. Bu nedenle çekme ve akma dayanımları vermikülerleşme ile birlikte artmıştır. Bilindiği gibi perlitik yapılar, pekleşmeyi artırarak malzemelerin çekme yüklerine karşı direncini geliştirmekte, buna bağlı olarak çekme ve akma dayanımları da iyileşmektedir [19,20].

B1 numunesinde vermikülerleşme ile dayanımda artma olduğu açıkça görülmektedir. Ancak B2 ve B3 numunelerinde vermikülerleştirici miktarının daha da artması çekme ve akma dayanımı özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Çünkü artan vermikülerleştirici malzeme miktarı küresel grafit oranını azaltmış ve vermiküler grafit miktarını artırmıştır. Gri dökme demirlerde çekme ve akma dayanımına etki eden en önemli faktör grafit şekli olduğundan [3] vermikülerleşen grafit miktarı arttıkça bu özellikler de azalmıştır. Hatta en yüksek vermiküler grafit oranına sahip B3 numunesinde çekme ve akma dayanımları KGDD malzemeden de daha düşüktür. Bu sonuçların doğruluğu yukarıda ifade edilen yapı-özellik ilişkileri kurulduğunda kolaylıkla anlaşılabacaktır.

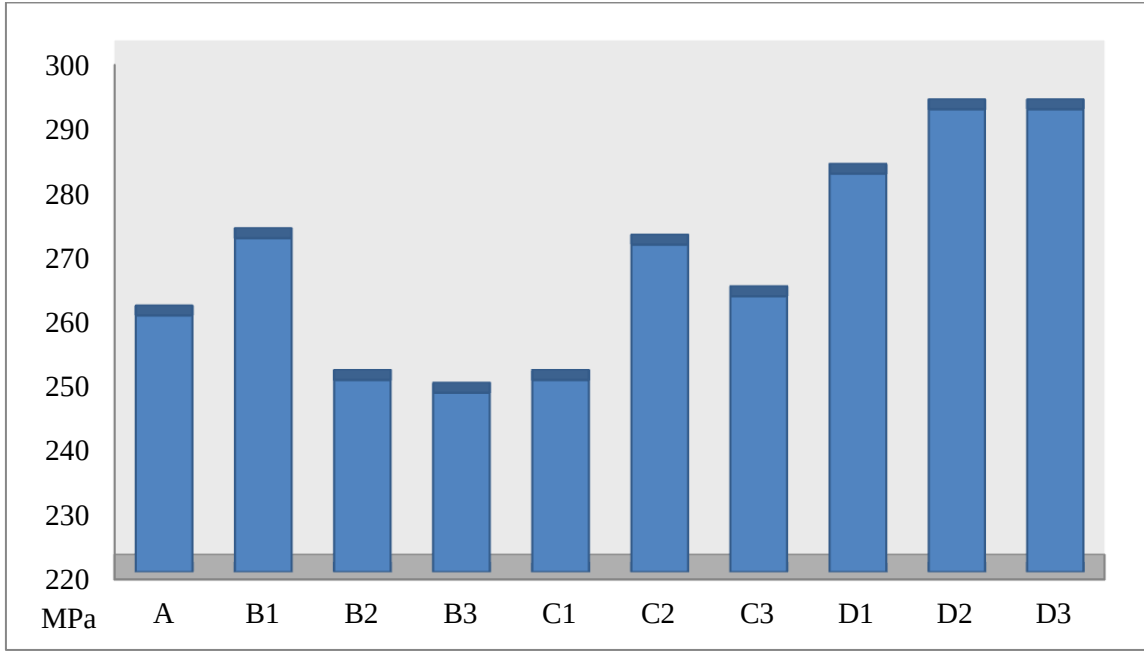
Bu nedenle yaklaşık % 42-48 aralığında olan % 0.5 vermikülerleştirici ilave edilmiş B2 numunesinin üretim şartları esas alınarak C ve D grubu numunelerin üretimi planlanmıştır. C grubu numuneler aşılama miktarının artırılması ile üretilmiştir. Perlitik matrisin oranı B grubu numunelere yakın bir değerde ortalama $\cong$ % 9.5 oranında meydana gelmiştir. Artan aşılama miktarı tane sayısının artmasına ve boyutunun azalmasına neden olmaktadır. Azalan tane boyutu çekme testi sırasında meydana gelen deformasyon sürecinde Hall-Petch yasası gereğince pekleşmeyi artırmakta ve bu da özellikle oda sıcaklığında çekme özelliklerinin gelişmesine yol açmaktadır. Azalan tane boyutu nedeniyle, çekme dayanımı ve akma dayanımı ise az miktarda gelişmiştir. Bu sonuçlar aşılama miktarının artırılması ile çekme özelliklerinin başarıyla geliştirilebileceğini göstermiştir. Genel olarak; aşılama ve Cu ilavesi işlemleri çekme dayanımını beklenileceği gibi artırırken, vermikülerleştirme ise azaltıcı bir etki yapmıştır.



Şekil 9.20. Üretim şartlarına bağlı olarak çekme dayanımının değişimi

Elde edilen bu sonuçlardan hareketle matris yapısındaki perlit miktarındaki artışın etkisinin de inceleme ihtiyacı doğmuştur. Çünkü bu matris gri dökme demirlerde oluşabilen bir yapı türüdür. Bu nedenle D grubu numunelerde perlit oluşunu teşvik eden ancak başka fark edilebilir bir değişikliğe yol açmayan Cu elementinin ilave edilmesi uygulanmıştır. Bu çalışma için uygun kabul edilen vermikülerleştirici oranı % 0.5 ve üç farklı aşılama oranına ek olarak % 0.6 Cu ilavesi yapılan D grubu numuneler üretilmiştir.

Bu numuneler incelendiğinde ise; Cu ilavesi sonucunda artan perlit miktarına bağlı olarak, Cu ilave edilmemiş olan en yakın C grubu numuneye göre çekme dayanımı $\cong$ % 14 ve akma dayanımı ise $\cong$ % 12.8 oranında artmıştır. Daha önce de ifade edildiği üzere perlitik yapılar deformasyona karşı dirençleri yüksek olmaları nedeniyle çekme özelliklerinin geliştirilmesinde katkıları da yüksek olmaktadır. Bu nedenle aynı miktarda aşılama yapılmış malzemeye Cu ilave edildiğinde çekme özellikleri geliştirilebilmektedir. Genel olarak; aşılama ve Cu ilavesi işlemleri akma dayanımını artırırken, vermikülerleştirme ise azaltıcı bir etki yapmıştır.

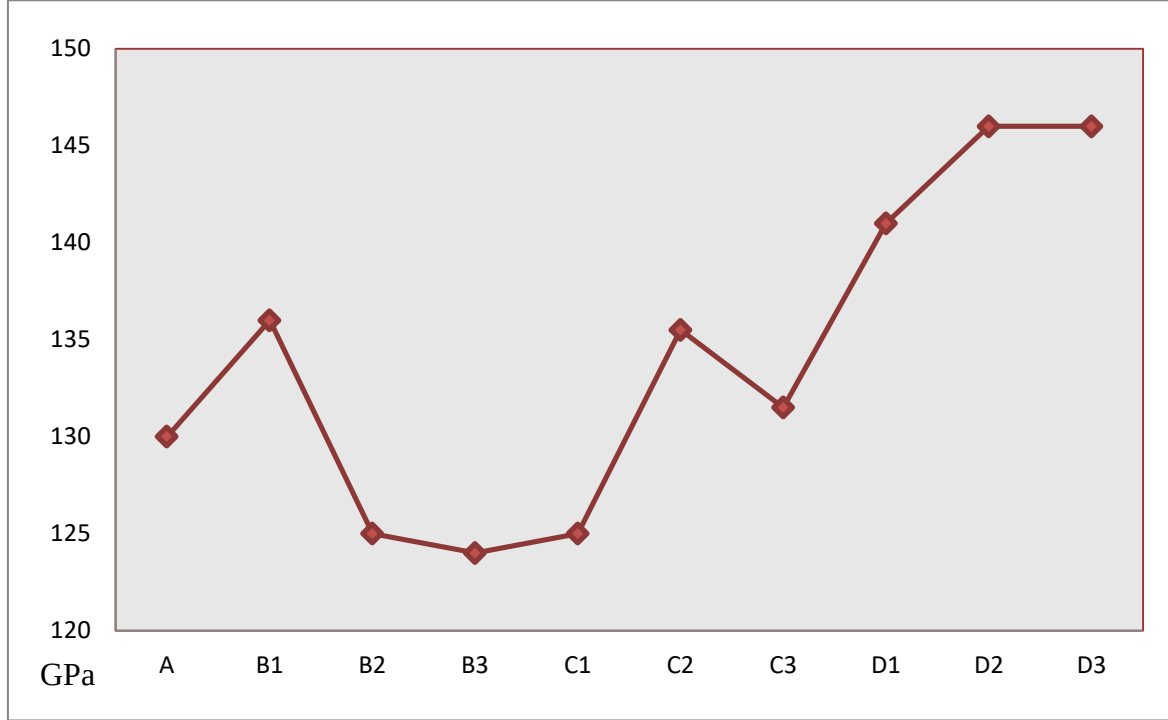


Şekil 9.21. Üretim şartlarına bağlı olarak akma dayanımının değişimi

Elastik modül malzemelerin karakterizasyonunda önemli parametredir. Çünkü malzemenin kalıcı şekil değişimine kadar olan bölgedeki eğilim ifade etmektedir. Uygulanan yüklerle birlikte malzemedeki direnç değişimi ile şekil değişimin oranlanması ile elde edilen bir değerdir. Malzemelerin gerilim-gerinim davranış modeli onun zorlamalar karşısındaki durumunun anlaşılmasında kullanılabilecek en önemli verilerden biridir. Dolayısıyla malzemelerde bu özelliğin de değerlendirilmesi gerekmektedir. Elastik modülü yüksek olan malzemeler uygulanan yüklere karşı kopmadan dayanım gösterirken şekil değiştirebilme kabiliyetlerini de ifade etmektedir [41]. Bu nedenle yüksek elastik modüle sahip malzemeler her zaman tercih edilmektedir.

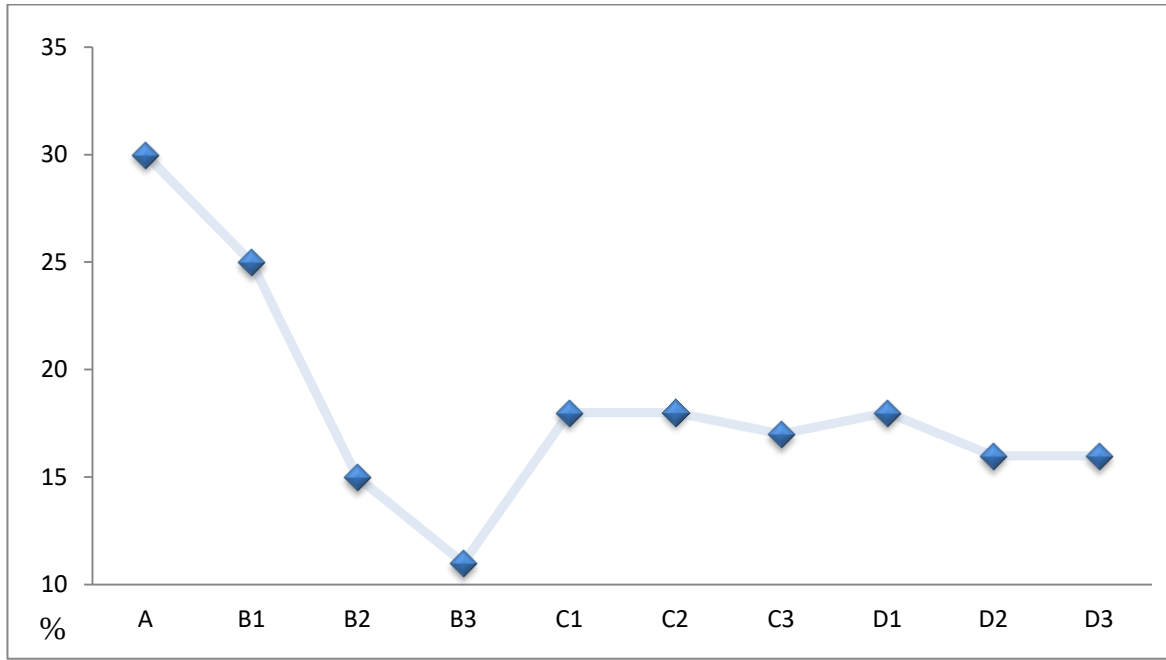
Üretim şartlarına bağlı olarak elastik modüldeki değişim Şekil 9.22’de gösterilmiştir. Küresel şekle sahip grafit yapısına sahip KGDD malzemelerde iyi bir elastik davranış elde edilmektedir. A numunesindeki elastik modülün bir miktar az olmasının nedeni neredeyse tamamen G + ferrit matrise sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Kürelerin bozulması bu özelliği kötüleştirmektedir (B grubu numuneler). Vermikülerleştirme işlemiyle azalan küresellik elastik modülü de kötüleştirmiştir. Bu malzemeye aşılmalı ilave edildiğinde (C grubu numuneler) tane boyutundaki azalmaya bağlı olarak artan pekleşme nedeniyle malzemelerde deformasyon kabiliyeti de artmış ve böylelikle elastik modül de artış göstermiştir. En son olarak iyileşen C grubu numunelere % 0.6 oranında Cu ilave

edildiğinde de dayanımdaki artışa bağlı olarak elastik modülün de geliştiği tespit edilmiştir. Genel olarak; aşılama ve Cu ilavesi işlemleri elastik modülü beklenileceği gibi artırırken, vermikülerleştirme ise azaltıcı bir etki yapmıştır.



Şekil 9.22. Üretim şartlarına bağlı olarak elastik modülün değişimi

Malzemelerde kalıcı şekil değişiminin ölçüsü genellikle yüzde uzama ile ifade edilmektedir. Malzemelerde dayanım yanında sünekliğin (şekil değiştirme kabiliyetleri) de iyi olması beklenen davranışlardandır. Dökme demir malzemelerde bu özellik genellikle grafitin küre şekli, matris yapı ve tane boyutuna bağlı olarak değişim göstermektedir [3,18]. Tane sayısı ve perlit miktarındaki artış pekleşme nedeniyle malzemenin dayanımını artırırken, sünekliğini (yüzde uzama) kötüleştirir. Çünkü direnci artan malzemelerin göreceli olarak esneklikleri azalmaktadır. Grafit şekli küreselden lamele dönüştüğünde uygulanan yükler karşısında malzemenin yapısında grafitin uç kısımlarında gerilim birikmesi olur. Bu gerilim birikmesi çatlak başlaması için potansiyel noktaları meydana getirir. Azalan küreselliğe bağlı olarak dökme demirlerde kırılma artar ve süneklik azalır.

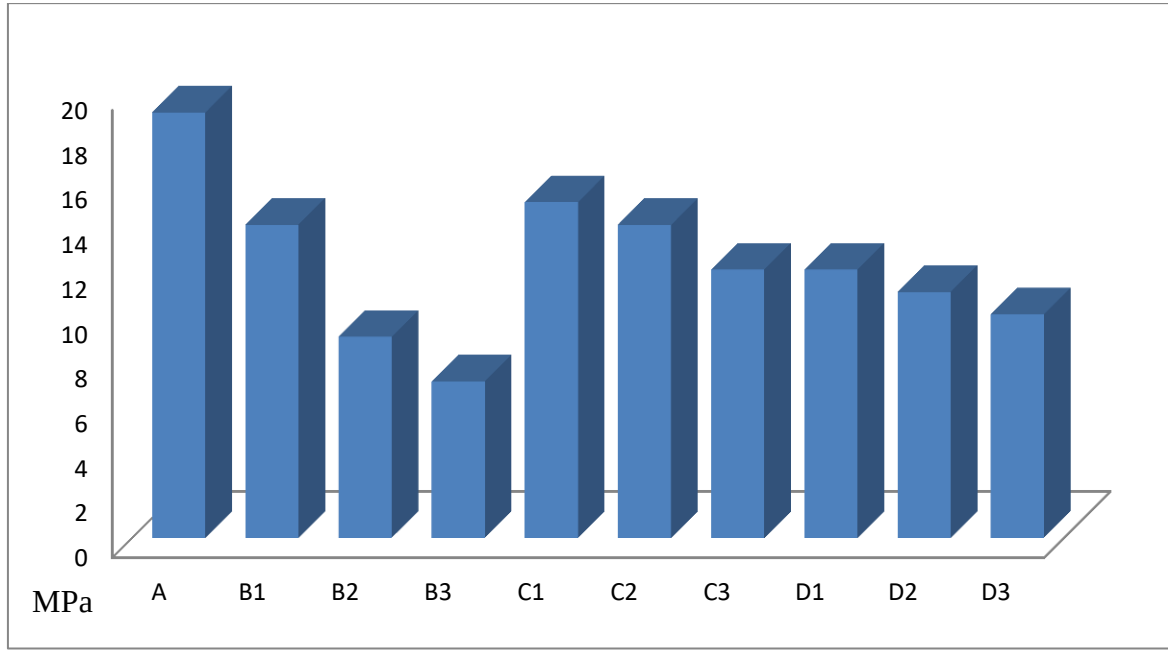


Şekil 9.23. Üretim şartlarına bağlı olarak uzamanın değişimi

Vermikülerleştirilen, tane sayısı artan ve Cu ilavesiyle perlit miktarı da artan B, C ve D grubu numunelerde neredeyse tamamı G + ferrit olan matris ve küresel grafit barındırmanın etkisiyle yüzde uzama açısından küresel kontrol numunesine kıyasla düşük değerler sergilemişlerdir (Şekil 9.23). Diğer bir ifadeyle C ve D gruplarında uygulanan işlem ve ilaveler uzamayı olumsuz etkilemiştir. Ancak hedef parça için seçilen % 40-45 vermikülerleşmiş grafit yapısının orta değerinde bir süneklik sağlaması, bu azalma eğilimini durdurmuş ve lineer bir ekseninde sabitlenmesini sağlamıştır. Hedef parça hızlı trende özellikle ani duruşlarda çok daha önemli olduğundan, uzamadan ziyade dayanım özelliklerinin daha iyi olması bu kötü durumu göz ardı edilebilir kılmaktadır. Süneklik üzerine tane boyutu ve perlitik matrise kıyasla grafit şeklinin etkisi daha fazla olmaktadır [42]. Genel olarak beklenileceği gibi, özellikle vermikülerleştirme ilavesinin sünekliğe olumsuz yönde bir etkisi olmuş, aşılama ilavesindeki artışın ise bir etkisi olmamıştır.

Tokluk; malzemelerin ani yüklere karşı enerjiyi absorbe etme ya da sönümleyebilme kabiliyetidir. Bu nedenle önemli bir özelliktir. Dayanımı yüksek ancak sünekliği düşük malzemeler genellikle kırılğan ve tokluğu düşük malzemelerdir. Dökme demirlerin tokluğu süneklikleri ile paralellik arz etmektedir. Sünekliği yüksek malzemelerin toklukları da genellikle yüksektir. Tokluğu, dökme demirin grafit şeklinin küreselliği, tane boyutu ve matristeki perlit oranı gibi faktörler doğrudan etkilemektedir. Elde edilen sonuçlar

incelendiğinde; perlit miktarının artması dayanımı artırırken, azalan küresellik ve süneklik nedeniyle tokluk azalmaktadır. Bu tez çalışması için seçilen üretim şartları tokluğu orta derecede azaltmıştır (Şekil 9.24). Fakat hedef parça üzerine ani darbe kuvvetleri yerine özellikle sabit hızda sıkıştırma kuvvetleri etkili olacağından bu tokluk değerleri yeterli olacaktır. Tokluk üzerinde tane boyutuna kıyasla, grafit şekli ve matris yapısı çok daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Ancak yüksek tokluk istenildiği durumlarda perlitik matris oluşumundan olabildiğince kaçınılmalıdır.



Şekil 9.24. Üretim şartlarına bağlı olarak tokluğun değişimi

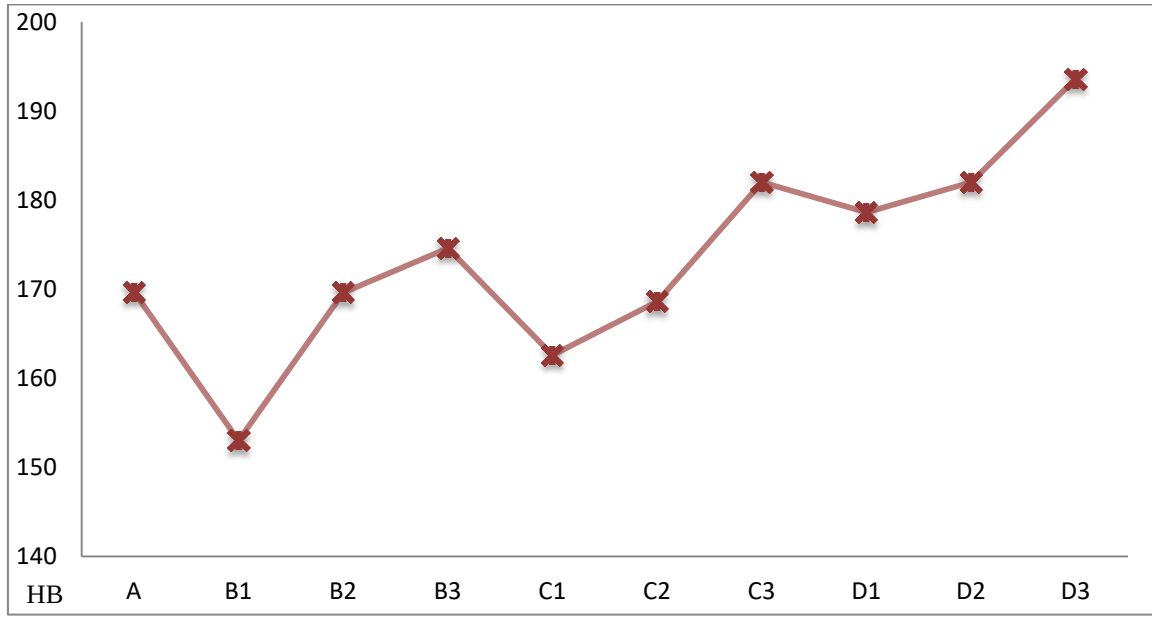
Tokluktaki değişim sayısal olarak değerlendirildiğinde; en yüksek vermikülerleştirme değerinde $\cong$ % 63, % 45-50 vermikülerleştirme yapıldığında, $\cong$ % 52 oranında ve diğer işlemler (aşılama ve Cu ilavesi) de eklendiğinde ise ortalama $\cong$ % 30-57 aralığında değişim meydana gelmiştir. Genel olarak beklenen ile paralel, vermikülerleştirme, aşılama ve Cu ilavesi miktarı arttıkça tokluğu azaltıcı bir etki yapmıştır.

Sertlik; bir malzeme yüzeyine batmaya çalışan bir yüke ya da başka malzemenin batmasına karşı gösterilen direncin bir ölçüsüdür. Bu nedenle birbiri ile temas halinde çalışan malzemelerin batmasına karşı gösterdiği direncin de yüksek olması istenilir. Dökme demirlerde sertliği etkileyen en önemli faktörler matris yapısı ve tane boyutudur.

Grafit küreselliği de tüm yapının deformasyon kabiliyetini artırdığından pekleşme nedeniyle bir miktar sertliği artırabilmektedir [19,21]

Sertlik sonuçları (Şekil 9.25) incelendiğinde; başlangıçta KGDD'in sahip olduğu sertlik değeri B grubu numunelerde % 0.3 oranında vermikülerleştirici ilave ile bir miktar azalmış, ancak ilave miktarı (% 0.8) arttıkça sertlik değeri başlangıca göre $\cong$ % 2.4 oranında yükselmiştir. Sertlikteki bu artışa perlit miktarındaki kısmi artışın neden olduğu düşünülmektedir. C grubu numunelere bakıldığında, C1 numunesinde $\cong$ 162 HB olan sertlik değeri $\cong$ % 12 oranında artmıştır. Oysa C grubu numunelerde de B grubu numuneler benzer oranlarda perlitik yapı bulunmaktadır. Fakat C grubu numunelere % 0.3, 0.5 ve 0.8 oranlarında aşılama ilavesi yapılmıştır. Aşılama işlemi bir çeşit tane inceltme yöntemidir. Aşılama ile ilgili olarak küçülen tane boyutu nedeniyle toplam tane sınırı artmış, artan tane sınırları malzeme içerisinde gerilim artmasına ve dolayısıyla batmaya karşı direncin de artmasına sebep olmuştur. Bu artış aşılama miktarıyla paralellik arz etmektedir. Son olarak; D grubu numunelerde Cu ilavesine bağlı olarak perlit miktarı da artmıştır. Bilindiği gibi perlitik yapı içerisinde sert ve gevrek olan sementit fazı bulunmaktadır. Artan perlit sementit miktarının da artmasına sebep olmuştur.

D1 numunesindeki $\cong$ 178 olan sertlik değeri hem aşılamanın hem de Cu ilavesinin etkisiyle $\cong$ % 64 oranında artmıştır. C grubu numunelerde aşılama işlemine ek olarak yapılan Cu ilavesi D grubu numunelerin sertlik değerlerini $\cong$ % 8.5 oranında geliştirmiştir. Yapılan işlemler sonucunda ise toplamada sertlikteki değişim $\cong$ % 13.5 olmuştur. Genel olarak beklenen sonuçlara paralel şekilde vermikülerleştirme, aşılama ve Cu ilavesi işlemleri sertlikte artırıcı bir etki yapmıştır.



Şekil 9.25. Üretim şartlarına bağlı olarak sertliğin değişimi

9.5. Termal Analizler

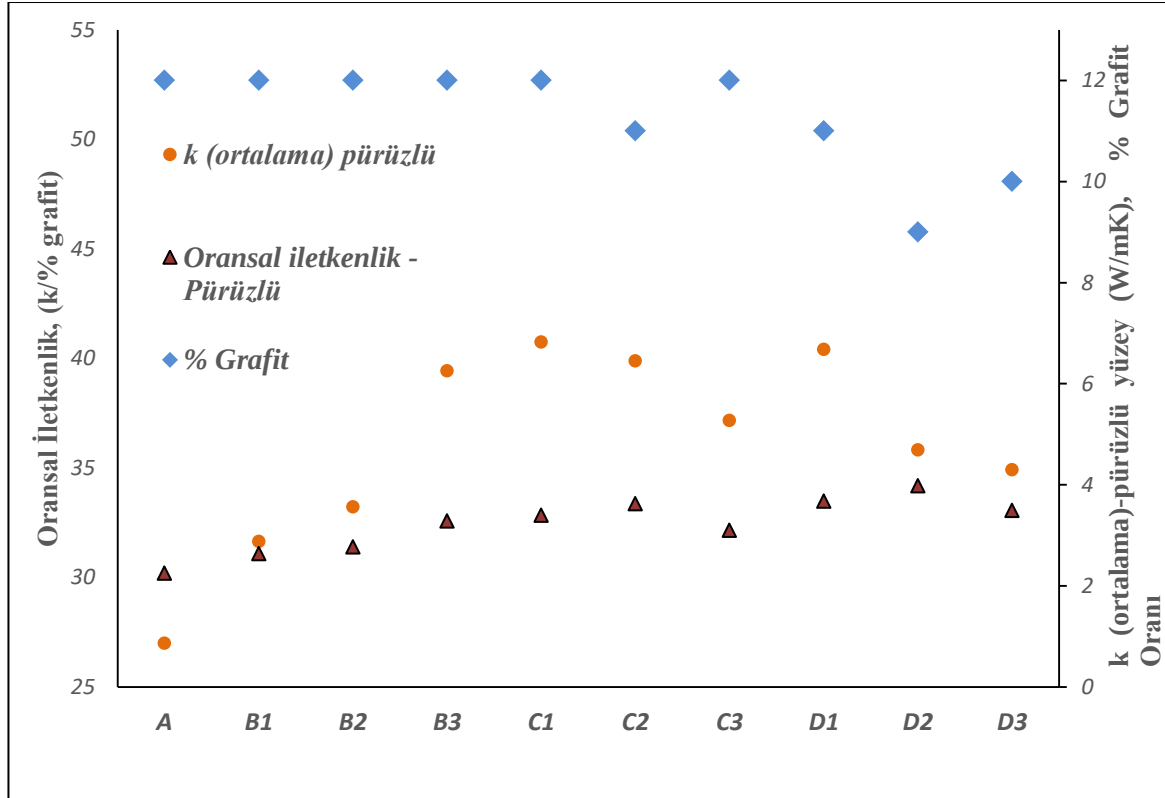
VGDD'ler farklı üretim metot ve malzemeleri kullanılarak üretilmektedir. Bu malzemelerden bazıları; BJOMET, LAMET ve en yaygınlarından biri olan COMPACTMAG ticari isimlidir. En başarılı ve yaygın yöntemler ise; tel tretman, in-mold ve pota olmak üzere temelde üç farklı uygulama şeklinde yapılmaktadır. Vermikülerleştirme işlemi küreselleştirmeden sonra tersine mühendislik mantığıyla yapılabildiği gibi, doğrudan vermikülerleştirme şeklinde de yapılabilmektedir [28-37,43-45]. Vermiküler grafit oranı arttıkça mekanik özellikler bir miktar azalırken, ısı iletimi gibi bazı fiziksel özellikler gelişmektedir. Bu nedenle küresel/vermiküler grafit oranı iyi bir şekilde ayarlanmalıdır. Aynı zamanda mekanik ve fiziksel özellikler matris yapısı ve tane boyutuna da bağlıdır. Matriste perlit miktarının artması ve tane boyutunun azalması ile birçok mekanik ve fiziksel özellik geliştirilebilir. Isıl iletkenlik de matris yapı ve tane boyutuna da bağlı değişebilecek bir olgudur. VGDD'lerin ısı iletkenlikleri ile ilgili çalışmalar [18,22-25,33-37,3-40] incelendiğinde; bunların genellikle KGDD ile VGDD malzemelerinin karşılaştırılması ve uygulanan sıcaklığa bağlı değişimlerinin olduğu görülmektedir. Özellikle matris yapı (ferritik→perlitik), grafit boy/en oranı, grafit/matris oranı, tane boyutu, küreselleşme oranı gibi değişkenlere bağlı ısı iletkenliğinin değişimi inceleme konusu yapılmadığı görülmektedir.

VGDD uzun yıllardan bu yana bilinmesine ve çeşitli araştırmalar yapılmış olmasına rağmen [22-26,38-43], yukarıda da ifade edildiği gibi VGDD'in bazı özellikleri KGDD ve LGDD'ler kadar iyi bilinmemektedir. Bu tezde hızlı tren fren disklerinde kullanılmak üzere standartların dışında özelliklere sahip ve kendi geliştirdiğimiz özel malzeme karışımı kullanılarak VGDD üretimi gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır. Hedeflenen amaca uygun olarak yapılan çalışmaların ilk aşaması, malzeme üretim ve yapısal karakterizasyon çalışmalarını içermektedir (Bölüm 9.1-3). İkinci aşama olarak mekanik özellikler incelenmiştir (Bölüm 9.4).

Üçüncü olarak; uygulanan işlem ve ilavelerin malzeme yapısı üzerinde yaptığı değişimlerin ısı iletim karakteristiklerine etkileri incelenmiştir. Isı iletkenlik ölçümleri, numune yüzeyleri pürüzlü (tornalama yapılmış halde) ve pürüzsüz (taşlanmış) olarak iki yüzey kalitesinde gerçekleştirilmiştir. Yüzey kalitesi ısı iletimini etkileyen fiziksel faktörlerden birisidir. Isı iletim ölçümlerinde sıcak yüzey ile iletimi yapılacak yüzey tam temas (conduction) halinde olmak zorundadır. Bu ısı iletim ölçümlerinde bir gerekliliktir. Bu tez çalışmasında da yapılan deneysel çalışmalarda ısı kaynağından alınan sıcaklık, ölçümü yapılan numuneye tam temas halinde ısı iletimleri ölçülmüştür. Buradan hareketle iki yüzeyin tam temas etmesi bazı faktörlere bağlıdır. Bunların başında da yüzey kalitesi gelmektedir. Genel olarak tornalanmış pürüzlü yüzey (R_a , 2-3 μm) ve taşlanmış olan pürüzsüz yüzey (R_a , 0.2-05 μm) kaliteleri tercih edilmiştir. İki yüzey arasında yaklaşık % 400 oranında fark vardır. Piyasada her iki yüzey işlemi de kullanıldığından bu kaliteler seçilmiştir. Yüzeyde pürüzlülüğün artması iki yüzey arasında boşluk oluşmasına ve dolayısıyla hava bulunmasına neden olmaktadır. Havanın ısı iletim katsayısı ($\cong 0.03 \text{ W/mK}$) demir esaslı malzemedan çok daha düşüktür. Bu nedenle, yüzey pürüzsüzlük farkının ısı iletimine etkilerini göstermek gereklidir. Ayrıca üretilen numunelerin matrisinde bulunan grafit yapısının ısı iletimine olan etkisinin de gösterilmesi gerekmektedir. Çünkü bu malzemelerde en önemli iletim unsuru grafitir. Bu nedenle ısı iletim katsayısının (k) grafit hacmi (% grafit hacmi) ile oranlanmasından elde edilen oransal iletkenlik ($k/\%\text{grafit hacmi}$) değerlerinin de incelenmesinde faydalar bulunmaktadır. Bu nedenle sonuçlarımızda bu değer de verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar Şekil 9.26 (pürüzlü yüzey) ve Şekil 9.27 (pürüzsüz yüzey)'de verilmiştir.

Öncelikle daha pürüzlü olan yüzey ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde; genel olarak vermiküler grafit oranı arttıkça ısı iletimi iyileştiği görülmektedir. KGDD’de (A numunesi) 27 W/mK olan iletim katsayısı (k), vermiküler grafit oranının artmasıyla (B1-B3 numuneleri) $\cong 38.4$ W/mK değerine kadar ulaşmıştır. Bu beklenen bir durumdur. Çünkü VGDD’lerin KGDD’lere göre en önemli avantajlarından birisi ısı iletimlerinin daha yüksek olmasıdır.

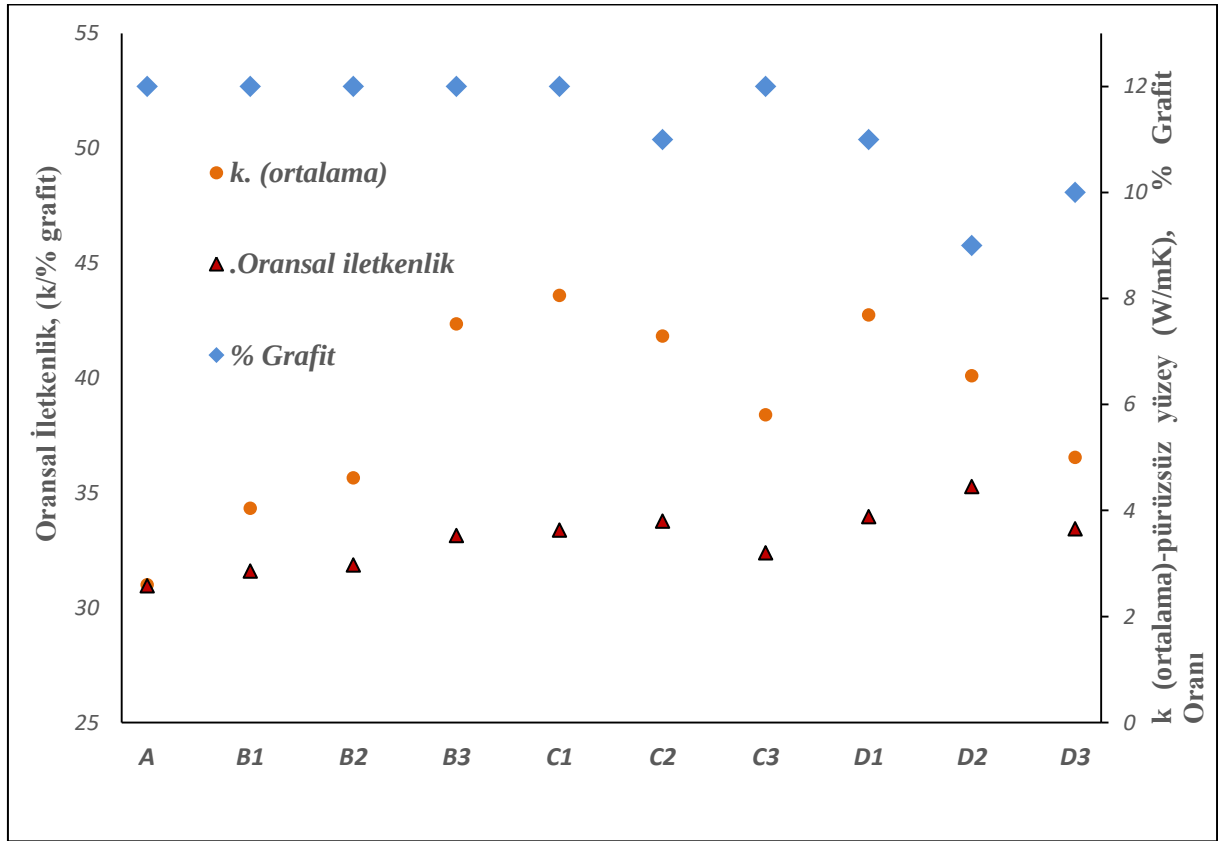
Daha sonra yapılan aşılama işlemi neticesinde (C1-C3 numuneleri) tane boyutu küçültülmüştür. Tane boyutundaki azalmaya bağlı olarak önce C1 numunesinde artan (40.7 W/mK) ısı iletimi, daha fazla tane incelmeye bağlı olarak azalmış ve en sonunda C3 numunesinde $\cong 37.2$ W/mK’ya kadar düşmüştür. Artan tane sayısına bağlı olarak, toplam tane sınırı da artmaktadır. Tane sınırları kristal düzensizlik ve süreksizliklerin bulunduğu yerlerdir. İletim ise süreklilik gerektirmektedir. Çünkü süreksizlikler yoğunluğu da azaltan unsurlardandır. Bu nedenle artan tane sınırları ısı iletiminde süreksizliğe neden olmakta ve ısı iletimini azaltıcı yönde bir etki yapmaktadırlar.



Şekil 9.26. Üretim şartlarına bağlı olarak pürüzlü yüzeye sahip numunelerde ısı iletim katsayısı (k) ve grafit hacim oranına bağlı olarak oransal iletkenliğin (k/% Grafit oranı) değişimi.

C grubu numunelere Cu elementinin ilavesi ile üretilen D grubu numuneler incelendiğinde ise; aşılmalı miktarındaki artışa bağlı olarak sırasıyla % 0.8, 11.3 ve 6.5 oranlarında azaldığı tespit edilmiştir. Bu numunelerde etkili olan iki önemli faktör vardır. Bunlar aşılmalıya bağlı tane sayısındaki ve Cu ilavesiyle birlikte perlit içeren matris oluşmasıdır. Cu ilavesine bağlı olarak matrisin ortalama % 40'a yakın kısmı perlitten meydana gelmektedir. Perlit yapının kaba bir yaklaşımla yaklaşık % 60'ı ferrit ve % 40'ı ise sementitten ($k \cong 7 \text{ W/mK}$) meydana geldiğini kabul ettiğimizde, bu yapının ısı iletimi % 45-50 daha az olacaktır. Matris yapıyı oluşturan grafit + ferrit + perlitin ortalama ısıl iletkenlikleri sırasıyla $\cong 165, 75$ ve 35 W/mK olarak bilinmektedir. Buradan hareketle matristeki yüzde perlit hacmi 9'dan 40'a yükseldiğinde yaklaşık % 345 oranında artmış olacaktır. Bu nedenle ısı iletimi azalmaya ortam oluşturmaktadır. Bu matris yapısına bir de artan tane sınırı sayısı ilave edildiğinde, iletim daha da azalma göstermiştir. Aynı şartlarda üretilen bazı numunelerde ısıl iletimin aynı oranda değişmediği görülmektedir. Bu durum, iyi bir iletim kabiliyeti olan grafit fazının, bahsi geçen numunelerde daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır.

Pürüzsüz ya da başka bir ifadeyle daha az yüzey pürüzlülüğüne sahip numuneler incelendiğinde (Şekil 9.27); benzer eğilimlerin olduğu görülmektedir. Öncelikle vermikülerleşmenin ısıl iletimi artırdığı, diğer yandan tane sayısı ve perlit miktarının artmasının ise tersine iletimi azalttığı görülmektedir. Grafit hacminin de sınırlı etkisi görülmektedir.

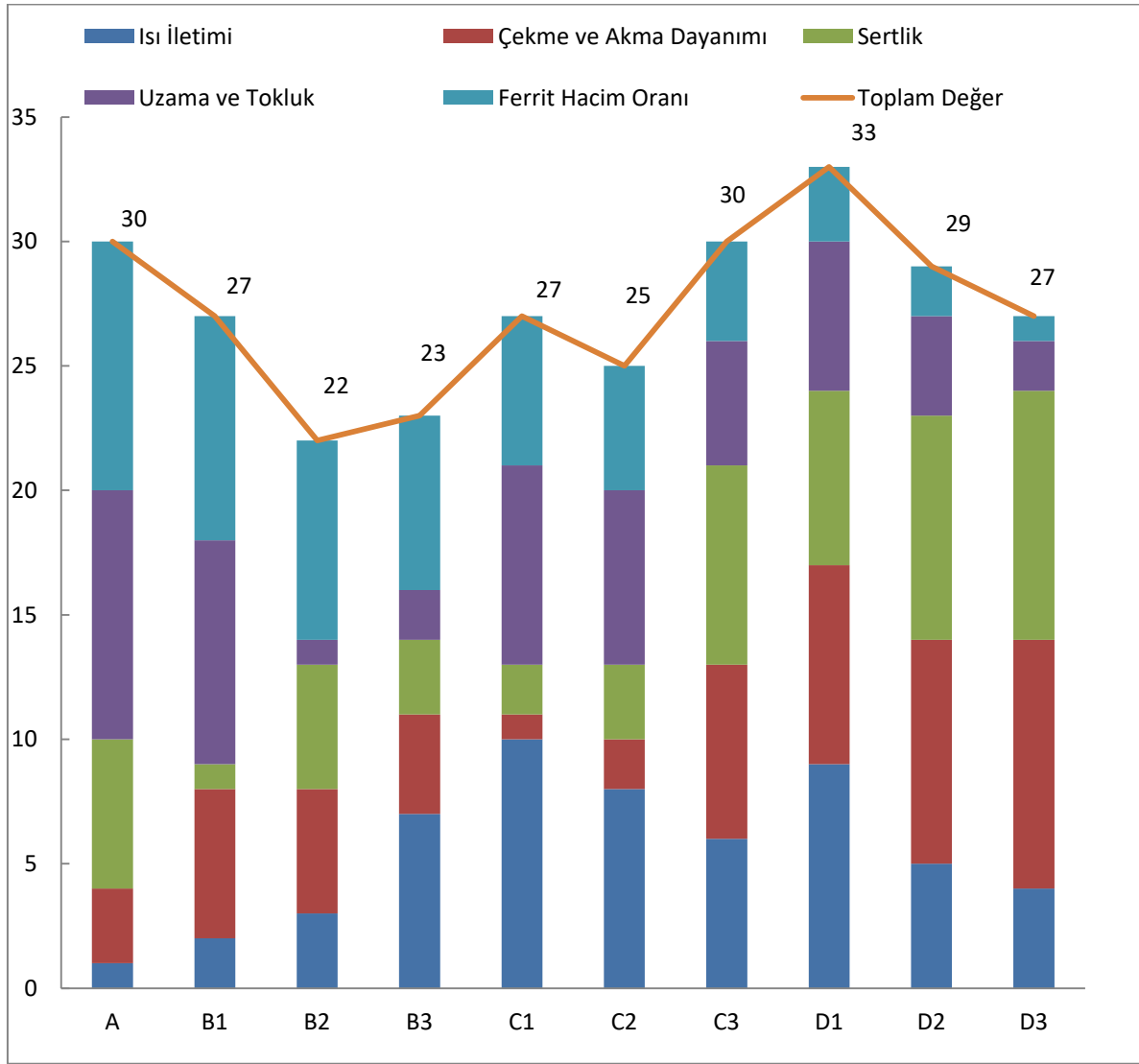


Şekil 9.27. Üretim şartlarına bağlı olarak pürüzsüz yüzeye sahip numunelerde ısı iletim katsayısı (k) ve grafit hacim oranına bağlı olarak oransal iletkenliğin (k/%Grafit oranı) değişimi.

Fakat yüzey kalitesinin artması, ısı kaynağı ile iletici (test numunesi) ara yüzeyinde boşluk kalmaması veya daha az olması, teması arttırmış ve böylece ısı iletimini de iyileştirmiştir. Artan yüzey kalitesi KGDD'de $\cong$ % 18.5 oranında ısı iletiminin iyileşmesine katkı sağlamıştır. Vermikülerleştirilmiş B grubu numunelerde ise % 7-10 oranında artış meydana gelmiştir.

Aşılacağı ve Cu ilave edilmiş numuneler de yüzey kalitesindeki değişim bakımından karşılaştırıldığında; ortalama % 8-12 oranında artış tespit edilmiştir. Bu sonuçlar; diğer unsurların sabit kalması şartıyla, sadece yüzey kalitesinin artırılması sonucunda ısı iletimde ortama % 10-12 oranında gelişme sağlanabileceğini göstermiştir.

Çalışma sonuçları; ısı iletimi, çekme ve akma dayanımı, uzama ve tokluk, sertlik ve ferrit hacim oranları bakımından 1 (en kötü numune) ile 10 (en iyi numune) arasında bir değer verilerek oransal bir istatistiksel karşılaştırma yapılmıştır (Şekil 9.28). Her bir numuneye verilen puanların toplamaları birikimli çizgisel ifade ile gösterilmiştir.



Şekil 9.28. Puan değerlendirmesi sonucu istatistiksel olarak oluşturmuş grafik gösterimi

Bu analize göre en yüksekte düşüğe doğru puan sıralaması; D1, C3, A, D2, D3, C1, B1, C2, B3 ve B1 şeklinde olmuştur. Ancak burada en önemli konulardan birincisi ısı iletimi ve dayanım özellikleri olduğundan sıralama yeniden yapılırsa D1, C1, C3, D2, C2, D3 ve diğerleri şeklinde devam etmektedir.

Bu sonuçlar; orta derecede vermikülerleşme, düşük ve orta derecede aşılama ile Cu ilave edilmiş malzemenin hedeflenen fren diskinin üretiminde kullanılabilecek VGDD olduğunu işaret etmektedir. Hızlı tren fren disklerinde tam bir standardı olmasa da; çekme dayanımı 430-450 MPa, ısı iletim katsayısı 35-45 W/mK, tokluğu 5-10 J, uzaması % 7-10, sertliğinin 198-200 HB değerleri uygundur. Ayrıca ısı iletimin yüksek olabilmesi için,

olabildiğince ferritik matrisli ve serbest grafit hacminin % 9-11 olması uygun olan değer aralıklarıdır. Dolayısıyla en uygun numunelerin D1, C3 ve D2 olduğu tespit edilmiştir.

10. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Farklı oranlarda vermikülerleştirme ve aşılama ile sabit oranda Cu ilavesi yapılarak üretilen numunelerin yapısal, mekanik ve ısı özelliklerinin incelenmesi sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Başlangıçta KGDD olarak üretilebilen sıvı malzemeye vermikülerleştirici ilave edilerek başarılı bir şekilde VGDD üretilebilmiştir.
- Farklı oranlarda (% 0.3-0.8) vermikülerleştirici ilave edildiğinde farklı oranlarda (% 20-65) vermiküler şekilli grafit yapısının elde edilmiştir.
- Üretim şartlarındaki kimyasal bileşime bağlı olarak $\cong$ % 9-12 aralığında oranlarda matris/grafit hacmi oranının sağlanmış.
- Özellikle Cu ilavesi ve kısmen de aşılama işlemi ile perlit miktarın artması bağlı olarak grafit hacminin $\cong$ % 10 oranında azalmıştır.
- Özellikle vermikülerleştirici ve kısmen de aşılama malzeme miktarının artması, ayrıca Cu ilave edilmesiyle birlikte vermiküler grafit boy/en oranının iyileştirilmiştir.
- Aşılama malzeme miktarının artırılması neticesinde tane sayısının arttığı böylece tane boyutu küçültmenin başarıyla sonuçlandığı görülmüştür.
- İlk kimyasal analize bakıldığında G + ferrit olan matrisin, vermikülerleştirme ile G + ferrit + bir miktar perlite dönüştüğü gözlemlenmiştir.
- Perlit oluşumunun aşılama ile daha da arttığı gözlemlenmiştir.
- Cu ilavesi ile ferrit oranına yakın % 40-42 gibi yüksek oranda perlitik yapının elde edilmiştir.
- Aşılama ve saf Cu ilavesinin çekme, akma dayanımı ve sertlik yüksek oranda artırılabilmiş, tokluk ve uzama ise azalmıştır.
- Elde edilen grafit ve matris yapıya bağlı olarak çekme dayanımının, akma dayanımının, sertliğinin artırılabilirdi fakat tokluğun ve uzamanın ise azaldığı gözlemlenmiştir.
- Yapılan SEM-EDS analizlerinde içerisinde var olan elementlerin matriste vermiküler grafit yakınında yer alması nedeniyle VER-MAT malzemesinin vermikülerleştirme işlemlerinde kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.
- Vermikülerleştirme işlemi ile ısı iletkenliğinin önemli ölçüde artış sağlanmıştır.
- Artan ısı iletiminin aşılama ve saf Cu ilaveleriyle % 10-15 oranlarında azalmıştır.

- Yüzey pürüzlülüğünün ısı iletiminde önemli bir etken olduğu ve sadece malzeme yüzeyinin taşlanmasıyla ısı iletimin ~% 10 oranında geliştirilebildiği tespit edilmiştir.
- Uygun ısı iletiminin ağırlıkça ferrit matrisli ve özellikle düşük ve orta derecede aşılma uygulanmış numunelerde elde edilebildiği görülmüştür.

Yapılan çalışmalar neticesinde ileride yapılabilecek bazı çalışma önerileri aşağıda verilmiştir. Bunlar;

- En uygun olarak görülen şartlar sabit kabul edilip, ısı iletimi en çok etkileyen faktör grafit hacmi olduğundan gri dökme demirlerde karbon eşdeğerliğinin değiştirilmesi ve buna bağlı olarak serbest grafit hacmi değişiminin ısı iletime etkisi incelenebilir.
- En uygun şartlardaki malzemelerle fren diski üretimi yapıp, gerçek şartlarda ya da benzetim yapılabilecek bir test ile gerçek şartlardaki davranışları belirlenebilir.
- Perlit hacmi daha az, ancak ideal şartlara yakın malzemelerde bir miktar karbür oluşturulup dayanım ve sertlik özelliklerin geliştirilmesi ve ısı iletime etkilerinin incelenmesi olarak ifade edilebilir.

KAYNAKLAR

1. Murthy, V. S., Kishore, Seshan, S. (1985). Vermicular graphite cast iron—current state of the art. *Sadhana*, 8(4), 361-372.
2. Callister, William D. (2015). *Malzeme Bilimi ve Mühendisliği (Çev. Prof.Kenan Genel)*, İstanbul, Nobel Akademik Yayıncılık, 212-399.
3. Davis, J. R., Henry, S. D. (1999). *Cast irons*. Materials Park: ASM International, 1-460.
4. Berns, H., Theisen, W. (2008). *Ferrous materials steels and cast iron*. Berlin: Springer, 31.
5. Borghigiani, E., & Marinari, C. (1982). Compacted Graphite Iron Ingot Molds. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 90, 529-549.
6. J. Y. Su, C. T. Chow, J.F. Wallace. (1982). Solidification behavior of compacted graphite. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 90, 565-574.
7. Lesoult, G., Castro, M., Lacaze, J. (1998). Solidification of spheroidal graphite cast irons—I. physical modelling. *Acta Materialia*. Doi:10.1016/s1359-6454(97)00281-4
8. König, M., (2010). Literature review of microstructure formation in compacted graphite Iron. *International Journal of Cast Metals Research*. 23(3), 185-192.
9. Holtzer, M., Górný, M., Danko, R. (2015). *Microstructure and properties of ductile iron and compacted graphite iron castings: The effects of mold sand/metal interface phenomena*. Berlin: Springer, 112-118.
10. Shy, Y., Hsu, C., Lee, S., Hou, C. (2000). Effects of titanium addition and section size on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron. *Materials Science and Engineering: A*. Doi:10.1016/s0921-5093(99)00599-7
11. Liu, J., Ding, N.X., Mercer J. L., Wallace J. F. (1985). Effect of Type and Amount of Treatment Alloy on Compacted Graphite Produced by the Flotret Process. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 93, 675-688.
12. Subramanian, S. V., Kay, D. A. R., Purdy G.R.. (1982). Compacted Graphite Morphology Control, *Transactions of American Foundrymen's Society*, 90, 589-603.
13. J. P. Hrusovsky, J. P. Wallace. (1985). Effect of Composition on Solidification of Compacted Graphite Iron, *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 93, 55-72.
14. Çengel, Y. A., Boles, M. A. (2013). *Termodinamik Mühendislik Yaklaşımıyla*, Kadıköy: Palme Yayıncılık, 92-97.
15. Abbaschian, R., Reed-Hill, R. E..(2008). *Physical Metallurgy Principles*. Stamford: Cengage Learning, 178-180.

16. Holmgren, D. (2005). Review of thermal conductivity of cast iron. *International Journal of Cast Metals Research*. Doi:10.1179/136404605225023153
17. Pina, J., Kouznetsova, V., Geers, M. (2015). Thermo-mechanical analyses of heterogeneous materials with a strongly anisotropic phase: The case of cast iron. *International Journal of Solids and Structures*. Doi:10.1016/j.ijsolstr.2015.02.048
18. Subramanian, S. V., & Genualdi, A. J. (1996). Optimization of damping capacity and strength in hypereutectic gray cast iron. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 104, 995-1001.
19. Zych, J., Żyrek, A. (2013). Vermicular cast iron production in the “Inmold” technology (in the Metalpol casting house) and the assessment of its thermal fatigue resistance. *Archives of Foundry Engineering*, 11 (3), 255–260.
20. Riposan, I., Chisamera, M., Stan, S., Skaland, T. (2008). Surface Graphite Degeneration in Ductile Iron Castings for Resin Molds. *Tsinghua Science and Technology*, 13 (2), 157-163.
21. Gen, Z., Wanhua, L. (2008). Production technique of vermicular graphite iron cylinder head of vehicle diesel engine-Special Review. *China Foundry*, 5 (3), 153-161.
22. Craig, D.B., Hornung, M.J., McCluhan, T.K. (1988). Grey Iron. *ASM Metals Handbook*, 9 (15), 644-655.
23. Blackmore, P.A., Morton, K. (1982). Structure-property relationships in graphite cast irons. *International Journal of Fatigue*, 3(4), 149-155.
24. Gorny, M., Kawalec, M. (2013). Effects of Titanium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Thin-Walled Compacted Graphite Iron Castings. *The Journal of Materials Engineering and Performance*, 5 (22), 1519–1524.
25. Soiński, M.S., Jakubus, A., Stradomski, G. (2013). The Influence of Aluminium on the Spheroidization of Cast Iron Assessed on the Basis of Wedge Test. *Archives of Foundry Engineering*, 13 (2), 163–168.
26. Imasogie B.I., (2003). Microstructural Features and Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron Treated With Calcium-Magnesium Based Masteralloy. *The Journal of Materials Engineering and Performance*, 3 (12), 239-243.
27. Erfan, O. M., Elmabrouk, O. (2014). Influence of Section Thickness on the Thermal Conductivity of Compacted Graphite Cast Iron at Elevated Temperatures, *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, 3 (7), 29-33.
28. Dawson, S. (1999). *Compacted Graphite Iron: Mechanical and Physical Properties for Engine Design*, Werkstoff und Automobilantrieb (Materials in Powertrain VDI (Verein Deutscher Ingenieure). Germany: Dresden 28-29 October.

29. Indra, F., Tholl, M. (1995). Compacted graphite iron (CGI) - A new material for internal combustion engines. *Fifth Aachen Colloquium on Vehicles and Automobile Technology*, 331-350.
30. Hughes, I.C.H., Powell, J. (1984). Compacted Graphite Irons - High quality engineering materials in the cast iron family. *SAE Transactions*, 4 (93), 1-15.
31. Altstetter, J.D. and Nowicki, R.M. (1982). Compacted Graphite Iron - Its properties and automotive applications. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 90, 959-970.
32. Loper, C.R., Lulich, M.J., Park, H.K., Gyarmaty, A.M. (1980). The relationship of microstructure to mechanical properties in compacted graphite irons. *Transactions of the American Foundrymen's Society*, 88, 313-330.
33. Stefanescu, D.M. Hummer, R., Nechtelberger, E. (1988). *Compacted Graphite Irons Metals Handbook (Ninth Edition)*, Materials Park: ASM International, 667-678
34. Okamoto, T., Kagawa, A., Kamei, K., Matsumoto, H. (1983). Effect of graphite shape on thermal conductivity, electrical resistivity, damping capacity and Young's modulus of cast iron below 500°C, *Journal of Japan Foundrymen's Society*, 2 (55), 107-112.
35. Tanaka, Y., Saito, H., Ikawa, K. (1981). Relation between graphite structure and physical and mechanical properties of compacted/vermicular graphite cast iron. *Journal of Japan Foundrymen's Society*, 4 (53), 187-192.
36. Gu, Y. (1997). Engine cylinder block, Ford Motor Company Ltd. *European Patent Application EP 0 769 615 A1*.
37. Ruff, G.F. (1981). Mechanical properties of compacted graphite cast iron. *SAE Transactions*, 90, 921-937.
38. Popov, P.I., Sizov I.G. (2006). Effect of Alloying Elements on the Structure and Properties of Iron with Vermicular Graphite. *Metal Science and Heat Treatment, Springer*, 5 (48), 272-275.
39. Fourlakidis, V., Diószegi, A. (2014). A generic model to predict the ultimate tensile strength in pearlitic lamellar graphite iron. *Materials Science and Engineering*, Doi:10.1016/j.msea.2014.08.061
40. Kováčiková, P., Bezdedová, R., Vavro, J., Vavro, J. (2016). Comparison of Numerical Analysis of Stress-Strain States of Cast Iron with Vermicular Graphite Shape and Globular Graphite Shape. *Procedia Engineering*. Doi:10.1016/j.proeng.2016.01.169
41. Metzloff, K., Loper, C. (2003). The effect of metallurgical factors and heat treatment on the elastic modulus and damping in ductile and compacted graphite irons. *International Journal of Cast Metals Research*. Doi:10.1080/13640461.2003.11819589
42. Imasogie, B. I., Wendt, U. (2004). Characterization of Graphite Particle Shape in Spheroidal Graphite Iron Using A Computer-Based Image Analyzer. *Journal of*

Minerals and Materials Characterization and Engineering.
Doi:10.4236/jmmce.2004.31001

43. Guessser, W., Masiero, I., Melleras, E., Cabezas, C. S. (2005). Thermal Conductivity of Gray Iron and Compacted Graphite Iron Used for Cylinder Heads. *Revista Matéria*, 2 (10), 265-272.
44. Geier, G., Bauer, W., McKay, B., Schumacher, P. (2005). Microstructure transition from lamellar to compacted graphite using different modification agents. *Materials Science and Engineering*. Doi:10.1016/j.msea.2005.08.159
45. Elbel, T., Hampl, J. (2009). Influence of Al and Ti on Microstructure and Quality of Compacted Graphite Iron Castings. *METALURGIJA*, 48(4), 243-247

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : Karatay Berkay
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 01.07.1990, Ankara
 Medeni hali : Bekâr
 Telefon : 0 (537) 951 95 06
 e-mail : karatay.berkay@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Karabük Üniversitesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	2015
Lise	Sokullu Mehmet Paşa Lisesi	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-2018	ANÇAĞSAN Hidrolik	Satış Danışmanı

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. B. Karatay, H. Hasırcı, (2018). Üretim Koşullarının Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Mikro Ve Makro Yapısal Özelliklerine Etkileri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 6(4), 887-897

Hobiler

Yüzme, Basketbol, Tenis, Felsefe



GAZİ GELECEKTİR..