

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (CGI) İLE ÜRETİLEN MOTOR
BLOKLARIN ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN ALTERNATİF
DÖKME DEMİRLER İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Erkan BULUT

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

ARALIK 2021

BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ❖ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (CGI) İLE ÜRETİLEN MOTOR
BLOKLARIN ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN ALTERNATİF
DÖKME DEMİRLER İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Erkan BULUT
19212874011**

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Muhammet ULUDAĞ

ARALIK 2021

BTÜ, Lisans üstü Eğitim Enstitüsü'nün 19212874011 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Erkan BULUT, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (CGI) İLE ÜRETİLEN MOTOR BLOKLARIN ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN ALTERNATİF DÖKME DEMİRLER İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç.Dr. Muhammet ULUDAĞ**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç.Dr. Cem Kahruman**
Bursa Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Çağlar Yüksel**
Atatürk Üniversitesi

Teslim Tarihi :
Savunma Tarihi : 13.01.2022



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Bu tez, ... numaralı projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Erkan BULUT

İmzası :



Eşime ve kızıma,

Bu süreçte bana en başından beri destek olan hayatımın en değerlilerine...

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenim süresi boyunca her zaman yanımda olan ve değerli katkılarıyla bu tezin tamamlanmasına destek veren danışmanım Sayın Doç. Dr. Muhammet ULUDAĞ hocama ve emeği geçen Bursa Teknik Üniversitesi (BTÜ) akademik ve idari personeline şükranlarımı ve teşekkürlerimi sunarım. Yüksek lisans yapma konusunda beni teşvik eden ve tez çalışmama sağladıkları akademik desteklerinden dolayı değerli meslektaşım Sn. Bülent ŞİRİN'e, deneysel çalışmalardaki desteklerinden dolayı meslektaşım Sn. Hakan ZÜMRÜT'e ve deneme döküm ve testlerin gerçekleştirilmesine imkan sağlayarak akademik çalışmalarını destekleyen Türkiye'nin öncü döküm fabrikası olan DÖKTAŞ DÖKÜMCÜLÜK A.Ş. yönetimine de teşekkürlerimi borç bilirim.

Covid 19 zorlu pandemi sürecinde yüksek lisans ders ve tez çalışmalarında bana göstermiş oldukları destek ve teşviklerinden dolayı da aileme ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2021

Erkan BULUT
(Metalurji Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xii
ÇİZELGE LİSTESİ	xiv
ŞEKİL LİSTESİ	xvi
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxii
1. GİRİŞ	1
1.1 Vermiküler grafitli dökme demirlerin üretimi	3
1.1.1 Eksik tretman yöntemi ile vermiküler grafitli dökme demir üretimi	6
1.1.2 Sintercast yöntemi ile vermiküler grafitli dökme demir (CGI) üretimi ..	6
1.1.3 Titanyum ilavesi ile vermiküler grafitli dökme demir üretimi (CGI)	9
1.1.4 Azot ilavesi ile vermiküler grafitli dökme demir (CGI) üretimi	10
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	11
2.1 DÖKME DEMİRLER	11
2.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	11
2.3 Gri (Lamel Grafitli) Dökme Demirler	13
2.4 Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demirler	15
2.5 Beyaz Dökme Demirler	17
2.6 Temper Dökme Demirler	18
2.7 Vermiküler (kompakt) grafitli dökme demirler (CGI)	19
2.7.1 Vermiküler grafitli dökme demirin (CGI) grafit morfolojisi	21
2.7.2 Vermiküler grafitli dökme demirin (CGI) kimyasal kompozisyonu	22
2.7.2.1 Mangan ve Fosfor içeriği	23
2.7.2.2 Kükürt içeriği	24
2.7.2.3 Tretman elementleri içeriği	25
2.7.2.4 Diğer alaşım elementleri	27
2.7.3 Dökülebilirlik parametreleri	31
2.7.3.1 Çekinti karakteristikleri	31
2.7.4 Mekanik özellikler	32
2.7.4.1 Sertlik ve çekme özellikleri	34
2.7.4.2 Darbe özellikleri	45
2.7.4.3 Yorulma Özellikleri	46
2.7.4.4 Sonik ve ultrasonik özellikler	48
2.7.4.5 Korozyon dayanımı	49
2.7.4.6 Aşınma dayanımı	51
2.7.5 Fiziksel özellikler	52
2.7.5.1 Mikro bileşenlerin etkileri	52

2.7.5.2 Yoğunluk.....	52
2.7.5.3 Termal genleşme	53
2.7.5.4 Termal İletkenlik	55
2.7.5.5 Sönümleme Kapasitesi	57
2.7.6 Vermiküler grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği	59
2.7.7 Vermiküler grafitli dökme demirlerin (CGI) uygulama alanları	59
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	61
3.1 DeneySEL Çalışmaların Planlanması	61
3.2 Motor Blokların Kalıplanması.....	61
3.3 Sıvı Metalin Ergitilmesi	63
3.3.1 Vermiküler grafitli dökme demir (CGI) üretimi için tretman yapılması ..	64
3.3.2 Küresel grafitli dökme demir (sfero) için treatman yapılması	65
3.4 Döküm İşlemi	66
3.5 LABORATUVAR TESTLERİ	68
3.5.1 Laboratuvar Testlerinde Kullanılan Cihazlar.....	68
3.5.1.1 Boyutsal ölçüm kontrolü	68
3.5.1.2 Küresellik Mikroyapı Numunelerinin Alınması	68
3.5.1.3 Çekme Testi	69
3.5.1.4 Sertlik Testi	69
3.5.1.5 Kimyasal analiz ölçümü	70
3.5.1.6 Karbon - kükürt analizi	70
3.5.1.7 Ses hızı ölçümü	71
3.5.1.8 Radyoskopik muayene	71
3.5.1.9 Mikroyapı analizi ve küresellik kontrolü	72
3.5.2 Mekanik Testlerin Gerçekleştirilmesi	73
3.5.2.1 Çekme testi.....	73
3.5.2.2 Sertlik testi	74
3.5.2.3 Ses hızı ölçümü	74
3.5.2.4 Boyutsal ölçüm kontrolü	75
3.5.2.5 Kimyasal analiz	75
3.5.2.6 Radyoskopik muayene	76
3.5.2.7 Termal iletkenlik	77
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	78
4.1 Mekanik Test Sonuçları.....	78
4.1.1 Çekme Test Sonuçları	78
4.1.2 Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	82
4.2 Kimyasal Analiz Sonuçları.....	83
4.3 X-Ray Kontrol Sonuçları.....	83
4.3.1 Vermiküler Grafitli Dökme Demir Üretimi Motor Bloğun Xray Kontrolü	84
4.3.2 Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimi Motor Bloğun X ray Kontrolü..	85
4.3.3 Gri Dökme Demir (DDL-200) Üretimi Motor Bloğun X ray Kontrolü ...	87
4.3.4 Gri Dökme Demir (DDL-210) ile Dökülen Motor Bloğun X ray Kontrolü	88
4.4 Termal İletkenlik	90
4.5 Ultrasonik Ses Hızı Ölçüm Sonuçları	92
4.6 Boyutsal Ölçüm Sonucu	95
4.7 Mikroyapı Analiz Sonuçları	96
4.7.1 Lamel Grafitli Dökme Demir ile Dökülen Parçanın Mikroyapı incelemesi	96

4.7.2 Lamel Grafitli Dökme Demir ile Dökülen Parçanın Mikroyapı İncelemesi	96
4.7.3 Vermiküler Grafitli Dökme Demir Parçanın Mikroyapı İncelemesi	97
4.7.4 Küresel Grfaitle Dökme Demir ile Dökülen Parçanın Mikroyapı incelemesi	99
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	100
5.1 Sonuçlar.....	100
5.2 Öneriler.....	102
KAYNAKLAR	104
ÖZGEÇMİŞ.....	109



KISALTMALAR

ADI	: Austempered Ductile Iron – Östemperlenmiş Sfero Dökme Demir
BID	: Brinell Impression Diameter
CBN	: Cubic Boron Nitride
CE	: Carbon Equivalent – Karbon Eşdeğeri
CG	: Compacted Graphite – Vermiküler Grafit
CGI	: Compacted Graphite Iron – Vermiküler Grafitli Dökme Demir
CTE	: Coefficient of Thermal Expansion
FG	: Flake Graphite – Lamel Grafit
FGI	: Flake Graphite Iron – Lamel Grafitli Dökme Demir
FMEA	: Failure Mode and Effects Analysis
PCBN	: Polycrystalline Cubic Boron Nitride
SG	: Spheroidal Graphite
SGI	: Spheroidal Graphite Iron – Sfero Dökme Demir
UTS	: Ultimate Tensile Strength
X-Ray	: X ışını
VGDD	: Vermiküler Grafitli Dökme Demir
KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu

SEMBOLLER

Al	: Alüminyum
C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
Ce	: Seryum
CeMM	: Seryum mischmetal
cm	: Santimetre
Cu	: Bakır
Fe₃C	: Sementit
FeSi	: Ferrosilis
FeSiMg	: Ferrosilis magnezyum
GPa	: Gigapascal
HB	: Brinell sertliği
Hz	: Hertz
J	: Joule
km	: Kilometre
ksi	: İnç kareye düşen kilopound
Mg	: Magnezyum
mm	: Milimetre
Mn	: Mangan
MnS	: Mangan sülfür
MPa	: Megapascal
Ni	: Nikel
P	: Fosfor
rpm	: Dakikadaki devir sayısı
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
Sn	: Kalay
Ti	: Titanyum
TiC	: Titanyum karbür

TiCN	: Titanyum karbonitrür
αFe	: Ferrit
γ	: Östenit
μm	: Mikron
°C	: Celsius
°K	: Kelvin
Ø	: Çap
CE	: Karbon eşdeğeri



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Dökme demirlerin ticari isimlerine, mikroyapılarına ve kırılma yüzeylerine göre sınıflandırılması [6]	12
Çizelge 2.2 : Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan dökme demir türlerinin genel kimyasal bileşim aralıkları [9].....	16
Çizelge 2.3 : %10 küresellik içeren bir vermiküler grafitli dökme demirin farklı sıcaklıklarda ve matris yapılarında mekanik ve fiziksel özellikleri [10]	20
Çizelge 2.4 : %20'ye kadar küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demir için tipik kimyasal aralıklar [10]	23
Çizelge 2.5 : Seryum treatmentı yapılmış vermiküler grafitli dökme demirin özelliklerinin gri dökme demir, yüksek dayanımlı gri dökme demir ve küresel grafitli dökme demir ile karşılaştırılması [36]	33
Çizelge 2.6 : ASTM A 842 standardına göre CGI'nin özellikleri [6]	34
Çizelge 2.7 : Oda sıcaklığındaki farklı vermiküler grafitli dökme demirlere ait çekme, sertlik ve termal iletkenlik özellikleri [35]	35
Çizelge 2.8 : Perlitik matrisli vermiküler grafitli dökme demirlerin 25 °C sıcaklıkta mekanik ve fiziksel özelliklerinin küresellik oranı ile ilişkisi [10].....	42
Çizelge 2.9 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde ısıtıl işlemin ve nikel ile alaşımlamanın mekanik özelliklere etkisi [6]	43
Çizelge 2.10 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde küreselliğin çekme dayanımına, uzamaya, termal iletkenliğe ve çekinti yüzdesine etkileri [6].....	43
Çizelge 2.11 : Seryum ve magnezyum-titanyumla treatment işlemi uygulanmış vermiküler grafitli dökme demirlerin darbe toklukları [35].....	46
Çizelge 2.12 : Farklı yapılarıdaki vermiküler grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımı ve dayanma oranı [35].....	47
Çizelge 2.13 : Dökme demirlerde korozyon hızına sıcaklığın ve matrisin etkisi [6]	50
Çizelge 2.14 : Dökme demirlerdeki mikro bileşenlerin yoğunluğu ve termal iletkenliği [6].....	52
Çizelge 2.15 : Farklı dökme demir türleri için oda sıcaklığındaki yoğunluk değerleri [45].....	53
Çizelge 2.16 : Farklı sıcaklıklarda dökme demirlerin termal iletkenlik değerleri [14]	56
Çizelge 2.17 : Bazı yaygın dökme demirlerin ve metal alaşımlarının sönümleme kapasiteleri [47].....	58
Çizelge 3.1 : Döktaş Dökümcülük Hat 7 kalıplama hattı özellikleri	61
Çizelge 3.2 : Hurda sac kimyasal analizi	63
Çizelge 3.3 : Şarjda kullanılan pikin kimyasal analizi	64
Çizelge 3.4 : CompactMag kimyasal analizi	64
Çizelge 3.5 : Topseed kimyasal analizi ve tane boyutu. Error! Bookmark not defined.	
Çizelge 3.6 : FeSiMg 6510 kimyasal analizi	65

Çizelge 3.7 : DIN 50125 standardına göre çekme çubukları ölçüleri.....	73
Çizelge 4.1 : Farklı döküm tipleriyle dökülen motor bloklarının test sonuçlarının ortalama değerleri	78
Çizelge 4.2 : Dökülen parçaların çekme testi sonuçları ortalamaları	79
Çizelge 4.3 : Sertlik test sonuçları	82
Çizelge 4.4 : Kimyasal analiz sonuçları	83
Çizelge 4.5 : Radyoskopik muayene sonuçları.....	83
Çizelge 4.6 : Farklı dökme demir tipleriyle dökülen motor bloklarının termal iletkenlik ve çekme test sonuçları	90
Çizelge 4.7 : Ultrasonik ses hızı ölçümü sonuçları ortalamaları	92
Çizelge 4.8 : Farklı dökme tiplerinin ses hızı, küresellik ve çekme test sonuç tablosu	94
Çizelge 4.9 : Dökülen parçaların ölçü kontrol sonuçları	95
Çizelge 4.10 : DDV – 450 mikroyapı analizi	98
Çizelge 4.11 : DDK – F mikroyapı analizi	99

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Kararlı vermiküler grafitli dökme demir aralığı [6]	4
Şekil 1.2 : %0,08 oranındaki aşılama ilavesi, vermiküler grafitli dökme demirin küreselliğine etkisi. (a) treatment işleminden sonraki < %5 küresellik, (b) %0,08 oranındaki aşılama ilavesinden sonraki < %30 küresellik [6]	5
Şekil 1.3 : Dökme demirin mikroyapısına aşılama ve modifikasyonun etkileri [7]....	5
Şekil 1.4 : Üretim yöntemi ve proses kontrolü ihtiyacı, mikroyapı spesifikasyonunun darlığına, yıllık üretim hacmine ve geometrik karmaşıklığı bağlıdır [11]	6
Şekil 1.5 : SinterCast yöntemi ile vermiküler grafitli dökme demir üretim aşamaları [1, 6]	7
Şekil 1.6 : Treatment işlemindeki değişkenliklerin muhtemel nedenleri [1].....	9
Şekil 1.7 : Vermiküler grafitli dökme demir elde etmek için gerekli olan titanyum miktarları [9]	10
Şekil 2.1 : Ticari dökme demirlere ait kimyasal bileşim aralığı ve farklı ısı işlemleri ile elde edilen mikroyapıların şematik olarak gösterimi. G_f , lamel grafit; G_r , temper grafit; G_n , küresel grafit; P , perlit; α , ferrit [12]	13
Şekil 2.2 : (a) Çelik (b) gri dökme demirin titreşim sönümlenme kapasitelerinin karşılaştırılması [12]	14
Şekil 2.3 : Perlitik matrisli gri dökme demirin optik mikroskopla çekilmiş mikroyapı fotoğrafı [13]	14
Şekil 2.4 : Grade 80-55-06 perlitik küresel grafitli dökme demir. Grafit nodüllerinin etrafı ferrit fazı tarafından sarılmış. (%3 nital dağlayıcı, 100x büyütme) [14]..	15
Şekil 2.5 : Ferritik matrisli küresel grafitli dökme demirin optik mikroskopta çekilmiş mikroyapı fotoğrafı [12]	16
Şekil 2.6 : Küresel grafitli dökme demirin çeşitli ısı işlemleriyle değişen mekanik özellikleri [14].....	17
Şekil 2.7 : Beyaz dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı. Açık renkli bölgeler sementit, koyu renkli bölgeler ise perlit [12]	18
Şekil 2.8 : İki aşamalı tavlama (4 saat 954 °C’de tutma ve 6 saatte 704 °C’ye soğutma) ile üretilen ferritik matrisli temper grafitli dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı.....	19
Şekil 2.9 : <%5 küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirin optik mikroskopta çekilmiş mikroyapı fotoğrafı [6]	21
Şekil 2.10 : %10 küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirin optik mikroskopta çekilmiş mikroyapı fotoğrafı [15]	21
Şekil 2.11 : Vermiküler grafitli dökme demirin taramalı elektron mikroskopunda çekilmiş mikroyapı fotoğrafları (395x büyütme) [11]	22
Şekil 2.12 : CGI için optimum karbon ve silisyum aralıkları [19]	23
Şekil 2.13 : CGI üretimi için kullanılan elementlerin ve miktarının bir fonksiyonu olarak optimum başlangıç kükürt seviyesi aralığı. Tablo; %3,5 C, %2,1 Si,	

%0,75 Mn ve %0,03 ile %0,08 arası fosfor içeren bir demir alaşımadaki farklı küreleştiricilerle CGI oluşumu için gerekli kükürt aralığını göstermektedir [11]	24
Şekil 2.14 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde magnezyum miktarının farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi [21]	25
Şekil 2.15 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde magnezyum miktarının farklı et kalınlıklarında küreselliğe, perlit oranına ve mekanik özelliklere etkisi [21]....	26
Şekil 2.16 : 25 mm et kalınlığındaki vermiküler grafitli ve küresel grafitli dökme demirlerde bakır, nikel ve kalayın matris üzerine etkisi [11]	26
Şekil 2.17 : Kalay ilavesinin 25 mm et kalınlığındaki vermiküler grafitli dökme demirin perlit miktarına ve mekanik özelliklerine etkisi [11].....	27
Şekil 2.18 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde bakır miktarının farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi [21].....	28
Şekil 2.19 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde bakır miktarının farklı et kalınlıklarında küreselliğe, perlit oranına ve mekanik özelliklere etkisi [21]....	28
Şekil 2.20 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde kalay miktarının farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi [21].....	29
Şekil 2.21 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde kalay miktarının farklı et kalınlıklarında küreselliğe, perlit oranına ve mekanik özelliklere etkisi [21]....	29
Şekil 2.22 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde silisyum miktarının farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi [21].....	30
Şekil 2.23 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde silisyum miktarının farklı et kalınlıklarında küreselliğe, perlit oranına ve mekanik özelliklere etkisi [21]....	31
Şekil 2.24 : Vermiküler grafitli dökme demirlerin sertlik ve çekme dayanımı arasındaki ilişki [39].....	36
Şekil 2.25 : %10'a kadar küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirin farklı sıcaklıklardaki akma ve çekme dayanımına perlit oranının etkisi [40]	37
Şekil 2.26 : %10'a kadar küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirin sertliğinin perlite oranı ile ilişkisi [40].....	37
Şekil 2.27 : Vermiküler grafitli dökme demirler için tipik çekme diyagramı. Perlitik CGI 410 MPa çekme dayanımına ve %1 uzamaya; ferritik CGI 320 MPa çekme dayanımına ve %3,5 uzamaya sahip [41].....	38
Şekil 2.28 : Küresel grafitli, lamel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerin çekme dayanımı ve sertliğinin karşılaştırılması [18]	39
Şekil 2.29 : Vermiküler grafitli ve küresel grafitli dökme demirlerde akma dayanımı ve uzama değerleri arasındaki ilişki [39]	39
Şekil 2.30 : 30 mm çapında çubuklar şeklinde dökülen lamel grafitli, küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerde karbon eşdeğerliğinin çekme dayanımına etkisi [17].....	40
Şekil 2.31 : Vermiküler grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerine Silisyum'un etkisi. Karbon eşdeğerliği 4,33 – 4,45 aralığındadır [18]	40
Şekil 2.32 : %85 – 100 oranında perlit içeren dökme demirlerin farklı sıcaklıklardaki akma ve çekme dayanımının küresellik oranı ile ilişkisi [40]	41
Şekil 2.33 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde (a) bakır ve (b) molibdenin çekme özelliklerine etkisi [22]	42
Şekil 2.34 : Ferritik matrisli vermiküler grafitli dökme demirlerde küresellik ve uzama ilişkisi [11].....	44
Şekil 2.35 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde et kalınlığının mikroyapıya etkisi (100x büyütme) [11]	44

Şekil 2.36 : Lamel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerde et kalınlığının çekme dayanımına etkisi [11]	45
Şekil 2.37 : Küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerin 21 °C sıcaklıktaki darbe dayanımlarına perlit oranının etkisi [18]	45
Şekil 2.38 : Farklı yapılarıdaki vermiküler grafitli dökme demirlerin yorulma eğrileri [11]	47
Şekil 2.39 : Dökme demirlerde küresellik miktarı ile ultrasonik ses hızı arasındaki ilişki [22]	48
Şekil 2.40 : Farklı dökme demirlerin çekme dayanımının ultrasonik ses hızı ve rezonans frekansı ile ilişkisi [17]	49
Şekil 2.41 : (a) sıcaklığın ve (b) çekme dayanımının dökme demirlerde korozyon davranışı üzerine etkisi [11]	50
Şekil 2.42 : Kalay ilavesi bulunmayan vermiküler grafitli dökme demirin (a) 500 büyütme ve (b) 1000 büyütmede aşınma yüzeyleri, sarı ok aşınma yönünü göstermektedir [46]	51
Şekil 2.43 : Kalay ilavesi edilen vermiküler grafitli dökme demirin (a) 500 büyütme ve (b) 1000 büyütmede aşınma yüzeyleri, sarı ok aşınma yönünü göstermektedir [46]	51
Şekil 2.44 : Dökme demirlerin ve sade karbonlu çeliğin termal genleşme katsayıları [47]	54
Şekil 2.45 : Lamel grafitli, küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerin doğrusal termal genleşmeleri [11]	54
Şekil 2.46 : Dökme demirlerde grafit şeklinin termal iletkenliğe ve elektrik iletkenliğine etkisi ve bunların çelik ile göreceli olarak karşılaştırması [11]	55
Şekil 2.47 : Dökme demirlerin farklı sıcaklıklardaki termal iletkenlikleri [11]	57
Şekil 2.48 : Dökme demirlerde sönümlenme kapasitesinin küresellik ve perlit miktarıyla olan ilişkisi [40]	58
Şekil 2.49 : Scania V8 vermiküler grafitli dökme demir motor bloğu (solda) ve motoru (sağda) [52]	59
Şekil 3.1 : Motor blok üst modeli	62
Şekil 3.2 : Alt derecenin maça yerleştirilmeden önceki görüntüsü	62
Şekil 3.3 : 14 ton kapasiteli indüksiyon ocağı	63
Şekil 3.4 : Şarj malzemesi olarak kullanılan DKP sac (solda) ve sfero piki	63
Şekil 3.5 : Sandviç tipi döküm potası	64
Şekil 3.6 : Küreleştirici ve aşıl原因ıcı konulan sandviç tipi döküm potası, forklift ile indüksiyon ocağının önüne konulur ve üzerine sıvı metal dökülür ve treatment başlamış olur.	65
Şekil 3.7 : Cüruf temizleme istasyonu	66
Şekil 3.8 : Döküm arabası ile üst derecedeki havşadan döküm yapılıyor	66
Şekil 3.9 : Kalıp bozma sonrası	67
Şekil 3.10 : Temizleme işlemi sonrası	67
Şekil 3.11 : Coord 3 CMM cihazı	68
Şekil 3.12 : Küresellik numunesi maçaları	68
Şekil 3.13 : Çekme testi cihazı	69
Şekil 3.14 : Brinell Sertlik testi cihazı	69
Şekil 3.15 : Optik Spektrometre	70
Şekil 3.16 : LECO CS 744 karbon – kükürt analiz cihazı	70
Şekil 3.17 : KrautKramer USM 35 UT cihazı ile ses hızı ölçümü	71
Şekil 3.18 : X-Ray cihazı	71
Şekil 3.19 : Küresellik numuneleri	72

Şekil 3.20 : Nikon optik mikroskop.....	72
Şekil 3.21 : Buehler optik mikroskop.....	72
Şekil 3.22 : Parçadan çekme test numune alma bölgeleri	73
Şekil 3.23 : Çekme çubukları teknik resmi.....	73
Şekil 3.24 : Parçadan numune alma ve sertlik ölçüm bölgeleri.....	74
Şekil 3.25 : Deneme dökülen motor bloklarından ses hızı ölçümü	75
Şekil 3.26 : Parçaların testere ile kesilmesi	76
Şekil 3.27 : Dilimlenmiş motor blok	76
Şekil 3.28 : Termal iletkenlik numuneleri	77
Şekil 4.1 : Farklı dökme demir tiplerinin kopma mukavemet değişimi	79
Şekil 4.2 : VGDD üretiminde %küresellik ve kopma mukavemet değişim grafiği ..	80
Şekil 4.3 : Farklı dökme demir tiplerinin akma mukavemet değişimi	80
Şekil 4.4 : Farklı dökme demir tiplerinin %uzama değişimi	81
Şekil 4.5 : İşaretli kesitlerde kafa bağlama deliklerinden uzakta yaklaşık 130 mm derinlikte sızdırmaya neden olmayacak konumda (kep yağlama kanalından uzak) CC3 ve CC4 seviyeli çekintiye rastlanmıştır.	84
Şekil 4.6 : İşaretli kesitlerde kafa bağlama deliğinden uzakta yaklaşık 130 mm derinlikte sızdırmaya neden olmayacak konumda (kep yağlarından uzak) CC2 seviyeli mikro gözenekli çekintiye rastlanmıştır. Diğer kesitlerde hataya rastlanmamıştır.	84
Şekil 4.7 : İşaretli üst derece bölgesinde seri üretim parçalarda görülmeyen CC3 seviye çekinti hatası	85
Şekil 4.8 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak ve kesin sızdıracak konumdaki CC4, CC5 ve CC6 seviyeli çekintiler	85
Şekil 4.9 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak ve kesin sızdıracak konumdaki CC4 ve CC5 seviyeli çekintiler	86
Şekil 4.10 : İşaretli bölgelerde seri üretim parçalarda görülmeyen CC3 ve CC5 seviyeli çekintiler	86
Şekil 4.11 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak konumda CC3 ve CC4 seviyeli çekintiler	86
Şekil 4.12 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak konumda CC3 ve CC4 seviyeli çekintiler	87
Şekil 4.13 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak konumda CC3 ve CC4 seviyeli çekintiler	87
Şekil 4.14 : DDL – 200 madeni ile dökülen parçadaki gaz hataları	88
Şekil 4.15 : DDL – 210 madeni ile dökülen parçada 1 ve 2 numaralı silindirler arasında mikro çekintiler.....	88
Şekil 4.16 : Farklı dökme demir tiplerindeki termal iletkenlik değerlerinin karşılaştırması	91
Şekil 4.17 : %Küresellik ile termal iletkenlik ilişki grafiği	91
Şekil 4.18 : Farklı dökme demir tiplerinin ses hızı değerlerinin karşılaştırılması.....	92
Şekil 4.19 : % Küresellik ve ses hızı ilişkisi.....	93
Şekil 4.20 : Motor bloğu parçalarda ölçüm yapılan bölge.....	95
Şekil 4.21 : DDL – 200 dağlanmamış (solda) ve dağlanmış (sağda) mikroyapı fotoğrafı (100X büyütme)	96
Şekil 4.22 : DDL – 210 dağlanmamış (solda) ve dağlanmış (sağda) mikroyapı fotoğrafı (100X büyütme)	97
Şekil 4.23 : DDV – 450 dağlanmamış (solda)ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafı (100X büyütme)	97

Şekil 4.24 : Farklı dökme demir tiplerindeki %küresellik değerlerinin karşılaştırılması	98
Şekil 4.25 : DDK – F Dağlanmamış (solda) ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafları (100X büyütme)	99



VERMİKÜLER GRAFİTLİ DÖKME DEMİR (CGI) İLE ÜRETİLEN MOTOR BLOKLARIN ÖZELLİKLERİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN ALTERNATİF DÖKME DEMİRLER İLE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

ÖZET

Dökme demirler ailesinin yeni üyesi olan vermiküler grafitli dökme demirler başta otomotiv sanayi olmak üzere son yıllarda artan tonajlarda kullanılmaktadır. Bu dökme demir tipi mühendislik özellikleri olarak gri dökme demirler ile sfero dökme demirler arasında yer almakta olup her iki dökme demir tipinin iyi mühendislik özelliklerini tek bir malzemede toplamaktadır. Otomotiv sanayinde başta motor blok ve kafalar olmak üzere birçok döküm parçanın imalatında kullanılmaktadır.

Bu çalışmada vermiküler grafitli dökme demirler ile üretilmiş motor blokların özelliklerini etkileyen faktörlerin alternatif dökme demirler ile karşılaştırması yapılmıştır. Farklı analiz ve mikroyapıya sahip gri ve sfero dökme demirlerden motor bloklar dökülerek, bu motor bloklardan mekanik testler, ses hızı ölçümleri, mikroyapı incelemeleri ve iç sağlamlık kontrolleri yapılmıştır. Mekanik testlerde kopma ve akma mukavemeti, %uzama değeri ve sertlik sonuçları değerlendirilmiştir. Mikroyapı incelemesinde ise %küresellik ve matrikste %ferrit, perlit oranları incelenmiştir. Deneysel çalışma sonuçlarına göre vermiküler grafitli dökme demirden üretilen parçaların malzeme özelliklerinin gri ve sfero döküm özelliklerinin arasında olduğu tespit edilmiştir. Vermiküler grafitli dökme demirlerin mukavemet özelliklerinin gri dökümlere kıyasla oldukça yüksek olduğu görülmüştür. Gevrek olan gri döküme kıyasla nispeten sünek olmakla birlikte sferoya göre süneklik miktarı nispeten düşüktür. Vermiküler grafitli dökme demirlerde %küresellik değeri arttıkça mukavemet ve %uzama değerlerinin de arttığı ve diğer malzeme özelliklerinin de sfero dökme demire doğru yaklaştığı görülmüştür. İç sağlamlık için yapılan X-ray kontrollerinde ise hem sayıca hem de boyut olarak en düşük süreksizliğe sahip parçaların gri dökme demir malzeme ile dökülen, adet ve boyutsal olarak en fazla süreksizliğe sahip motor bloğun ise sfero dökme demir ile dökülen parça olduğu tespit edilmiştir. Vermiküler grafitli motor bloğun iç süreksizlik seviyesi ise diğer malzeme özelliklerinde olduğu üzere gri döküm ile sfero döküm arasında olduğu görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Motor blok, vermiküler grafit, gri dökme demir, sfero dökme demir

COMPARATIVE ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING PROPERTIES OF ENGINE BLOCKS POURED WITH VERMICULAR GRAPHITE CAST IRON (CGI) WITH ALTERNATIVE CAST IRON TYPES

SUMMARY

New member of cast iron family, compacted graphite iron has been used with an increasing volume especially in automotive industry in recent years. It has material properties varying between gray and ductile iron grades and is a hybrid material which collects good material properties of both grades in a single material. It is used in the production of many casting parts, especially engine blocks and heads in automotive industry.

In this study, the factors affecting the properties of engine blocks produced with compacted graphite cast iron were compared with alternative cast iron types. Engine blocks were cast from gray and ductile cast iron with different analysis and microstructures, and then mechanical tests, sound velocity measurements, microstructure examinations and internal soundness controls were performed from these engine blocks. Tensile and yield strength, % elongation value and hardness results were evaluated in mechanical tests. In microstructural analysis, nodularity and ferrite and pearlite distribution ratios in the matrix were examined. According to the experimental study results, it has been determined that all material properties of the parts produced from compacted graphite cast iron are between the gray and ductile cast irons' material properties. It has been observed that the strength properties of compacted graphite cast irons are considerably higher than gray cast iron. It is relatively ductile compared to the brittle gray cast iron but has lower ductility than ductile iron. It has been observed that as the nodularity increases in compacted graphite cast iron, the strength and the elongation values also increase and the material properties approach towards ductile cast iron properties. In X-ray controls performed for internal soundness it was determined that the parts poured with gray cast iron have the lowest discontinuity in terms of both number and defect size, while the engine blocks poured with ductile cast iron have the highest number and defect size.

Keywords: Engine block, compacted graphite, gray cast iron, ductile iron

1. GİRİŞ

Günümüzde tüm endüstri dalları enerjinin daha verimli kullanılması üzerine çalışmalarını yoğunlaştırmıştır. Petrolün dünyamızda en fazla 30 yıllık bir ömrünün kaldığının belirtilmesi özellikle otomotiv endüstrisinin bu konudaki araştırma çalışmalarını hızlandırmasına neden olmuştur. Bir aracın ağırlığının önemli bir miktarını döküm ve çelik parçalar oluşturmaktadır. Otomotiv sanayi, güvenlik gerekçeleri ile çelik konstrüksiyonlardan vazgeçememekte, öncelikle döküm parçaların ağırlıklarını azaltma yoluna gitmektedir. Bu noktada hem daha güçlü hem de daha az yakıt yakan araçlar istendiğinde, motor blok ve kafaların kesit kalınlıkları azaltılamamaktadır. Çünkü klasik lamel grafitli dökme demirlerle yapılan dökümlerde istenilen mukavemet elde edilememektedir. Bu da daha üstün özelliklere sahip motor blok malzemelerinin kullanılması gerekliliğini doğurmaktadır [1].

Özellikle küresel grafitli dökme demirler hem döküm hem de ısıtma işlemi uygulamasıyla birlikte çok üstün özelliklere sahip olduklarından en çok tercih edilen malzemedir. Lamel grafitli dökme demirler ise özellikle basma dayanımları ve ısıtma iletkenlikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Küresel grafitli ve lamel grafitli dökme demirlerin grafit yapısı bakımından ara türü olan vermiküler grafitli dökme demirler ise mekanik ve termal özellikler bakımından her iki dökme demirin ara bir formudur [2]. Bu nedenle lamel grafitli dökme demirden daha üstün mukavemet özelliklerine sahip ve onun kadar da titreşim sönümleme özelliği iyi olan vermiküler grafitli dökme demir malzemeler ön plana çıkmaktadır [1]. Vermiküler grafitli dökme demir üretim teknolojisi günümüzde tüm dünyada hızlı bir şekilde yaygınlaşmaktadır. Lamel ve küresel grafitli dökme demirler arasında özelliklere sahip olan bu vermiküler grafitli dökme demir çeşidi, sahip olduğu yüksek mukavemet ile motor bloğu ve motor kafası üretiminde istenen özellikleri tamamen sağlayabilmesi nedeniyle tercih edilen malzemelerin başında gelmektedir [3]. Fakat burada en önemli nokta vermiküler grafitli dökme demir ile üretilen parçalarda mekanik özelliklerin ve mikroyapı özelliklerinin dar bir aralıkta tutulması gerekliliğidir. Bu nedenle kullanılan

hammadeden başlayarak tüm üretim parametrelerinin dar limitlerde en iyi şekilde yönetimi şarttır [1, 3, 4].

Gri dökme demir bir motor bloğun kep bağlantı bölgelerinde en fazla 250 -300 N/mm² kopma mukavemetine ulaşabilir ve en fazla 300 buhar beygiri gücünde bir kamyon motoru üretebilir [1]. Çünkü bu bloğun kafası da gri dökme demirdendir ve kesit kalınlıkları da o bloğa göre hesaplanmıştır. Bu noktada daha yüksek güç ve performans isteniliyorsa önümüzde iki yol bulunmaktadır. Bunlar kesitleri arttırmak ya da blok ve kafa malzemesini değiştirmektir. Yani aynı mühendislik özelliklerine sahip başka bir dökme demir cinsi kullanmaktır [1]. Son yıllarda vermiküler grafitli dökme demir (kompakt grafitli dökme demir) malzemeden blok ve kafa üretimleri yaygınlaşmıştır [1, 3]. Özellikle kamyon, çekici ve SUV üreticileri bu malzemeden (CGI) üretilmiş motor blokları kullanmaktadırlar [1].

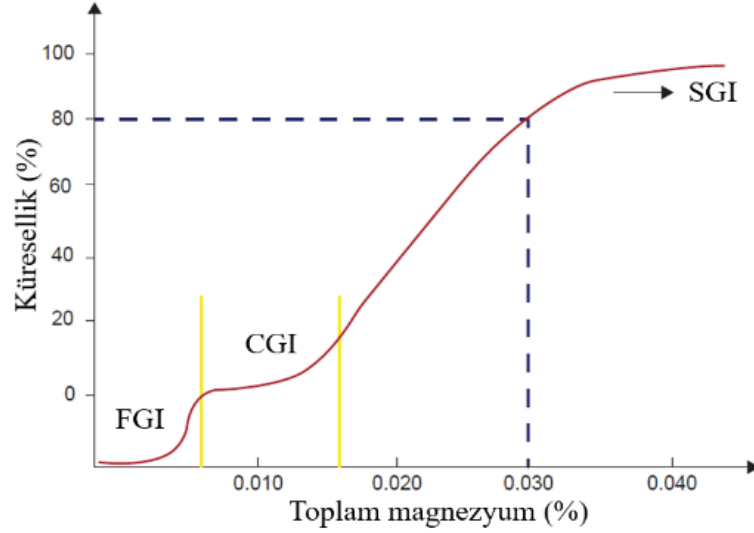
1.1 Vermiküler grafitli dökme demirlerin üretimi

2000’li yılların başına kadar vermiküler grafitli dökme demirlerin endüstriyel üretimi sınırlıydı. Gelişen teknolojiyle birlikte modern ölçüm ve kontrol teknolojileri, vermiküler grafitli dökme demiri yüksek hacimli seri üretim için uygun bir malzeme haline getirmiştir [5].

Küresel grafitli dökme demirlerde de olduğu gibi, vermiküler grafitli dökme demirler sıvı metale magnezyum eklenerek üretilir. Karbon içeriği, katılaşma sırasında akışkanlığı ve grafit yayılmasını artırmak için küresel grafitli dökme demire benzerdir. Perlit genellikle bakır ve/veya kalay ilavesiyle oluşturulur. Yüksek sıcaklıktaki mukavemeti, aşınma direncini ya da diğer özellikleri geliştirmek için başka alaşım elementleri de ilave edilebilir. Vermiküler grafitli dökme demirlerden üretilen egzoz manifoldları silisyum ve molibden ile alaşımlanırken; vermiküler grafitli dökme demirden üretilen silindir gömlekleri fosfor, nikel ya da krom ile alaşımlandırılabilir. Genel olarak karbür oluşturan elementler için sınır, küresel grafitli dökme demirler ile aynıdır [5].

Geleneksel olarak, dökme demirlerin mikroyapı kontrolü kimyasal analiz yoluyla elde edilmiştir. Ancak, bir spektrometre tarafından sağlanan kimyasal analizler sadece her bir elementin toplam miktarını gösterir ve grafit çekirdeklenmesi ya da büyümesi hakkında doğrudan bilgi veremez. Bu nedenle kimyasal analizler, vermiküler grafitli dökme demirin katılaşma davranışı ve mikroyapısı hakkında sınırlı bilgi verir [5].

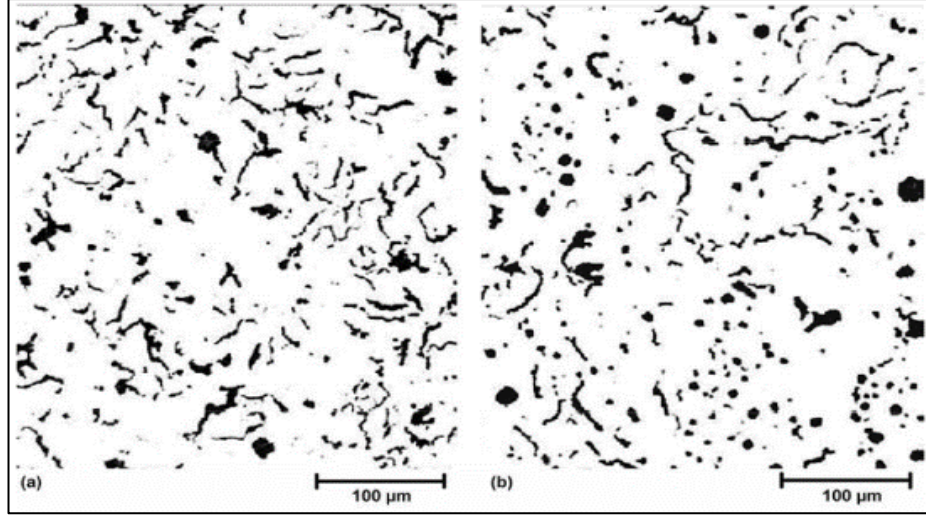
Kararlı bir vermiküler grafitli dökme demir üretmek için gerekli olan aralık her parça için farklı olsa da genellikle Şekil 1.1’de gösterildiği gibi yaklaşık %0,008 Mg aralığını kapsar. Ancak pratikte, kullanılabilir magnezyum aralığı daha da azdır. Sıvı metaldeki aktif magnezyum her beş dakikada bir yaklaşık %0,001 oranında azaldığından dolayı, ilk başlangıç noktası kararlı vermiküler grafitli dökme demir aralığının alçak tarafındaki gri dökme demir geçiş bölgesinden uzakta olmalıdır. Döküm işlemi bitmeden magnezyumun etkisini kaybetmesi lamel grafitli dökme demir oluşturacağından buna dikkat edilmelidir. Bunlara ek olarak, çekinti kusurlarını ve hızlı soğuyan ince kesitli bölgelerde küresel grafit oluşumunu önlemek için, başlangıç noktası aralığın sağ tarafına çok yakın olmamalıdır [5].



Şekil 1.1 : Kararlı vermiküler grafitli dökme demir aralığı [6]

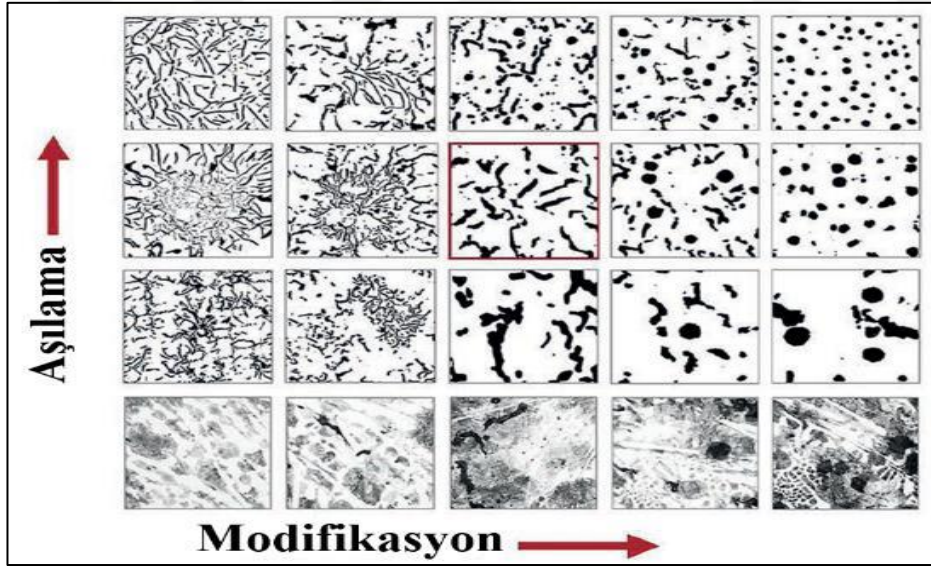
Vermiküler grafitli dökme demir üretimi zordur çünkü kararlı CGI aralığı oldukça dardır. Ayrıca bu kararlı CGI aralığının konumu da sabit değildir. Sıvı metaldeki aktif oksijen ve/veya kükürt içerikleri yüksek ise bu elementler magnezyumu tüketecektir ve bu da tüm aralığı daha yüksek bir magnezyum seviyesine yükseltecektir. Eğer sıvı metaldeki oksijen ve kükürt içeriği düşükse, CGI aralığı da sola doğru kayacaktır. Bu nedenlerden dolayı şarj malzemelerinin temizliği, oksidasyonu, nemi, ocakta bekletme süresi, sıvı metalin ocakta bekletilme süresi ve sıcaklığı, vermiküler grafitli dökme demirler için sabit bir kimyasal kompozisyon tanımlanmasını imkansız hale getirir [5].

Vermiküler grafitli dökme demir aralığı, aşılایıcılar karşı da hassastır. Yüksek seviyede aşılایıcı ilavesi küresellik oluşumunu teşvik eder. Ocağın aşırı ısınması, bekletme süresi, şarj bileşimi, aşılایıcının türü ve miktarı bu nedenle vermiküler grafitli dökme demir aralığını etkiler [5]. Şekil 1.2’de vermiküler grafitli dökme demirin mikroyapısına aşılamanın etkisi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere 1 tonluk potaya ilave edilen 80 gram aşılایıcı, 25 mm çapındaki test çubuğundaki küresellik oranını %5’ten, % 30’a çıkarmıştır.



Şekil 1.2 : %0,08 oranındaki aşılama ilavesi, vermiküler grafitli dökme demirin küreselliğine etkisi. (a) treatment işleminden sonraki < %5 küresellik, (b) %0,08 oranındaki aşılama ilavesinden sonraki < %30 küresellik [6]

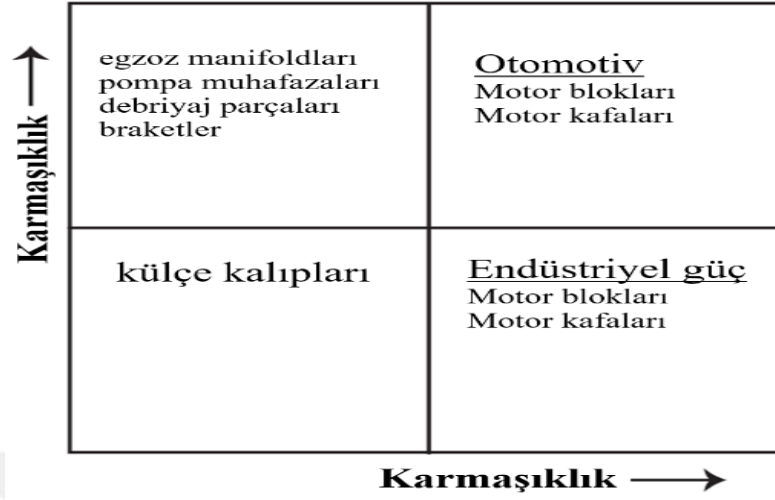
Şekil 1.3'deki mikroyapılardan görüldüğü üzere aşılama ve modifikasyon elementleri vermiküler grafitli dökme demirlerde oldukça önemlidir. Kararlı vermiküler grafitli dökme demir aralığında kalmak için aşılama ve modifikasyon aynı anda kontrol edilmelidir.



Şekil 1.3 : Dökme demirin mikroyapısına aşılama ve modifikasyonun etkileri [7]

Vermiküler grafitli dökme demirlerin üretiminde, üretim hacmine, parçanın karmaşıklığına ve mikroyapı spesifikasyonunun darlığına göre proses kontrolüne ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 1.4'de görüldüğü üzere, külçe kalıpları gibi basit ve düşük hacimli parçalar genellikle standart kimyasal kontrol ile üretilebilir.

Egzoz manifoldları, debriyaj bileşenleri ve braketler gibi yüksek hacimli parçalarda ise proses kontrolünün uygulanması daha uygundur [5].



Şekil 1.4 : Üretim yöntemi ve proses kontrolü ihtiyacı, mikroyapı spesifikasyonunun darlığına, yıllık üretim hacmine ve geometrik karmaşıklığı bağlıdır [11]

1.1.1 Eksik tretman yöntemi ile vermiküler grafitli dökme demir üretimi

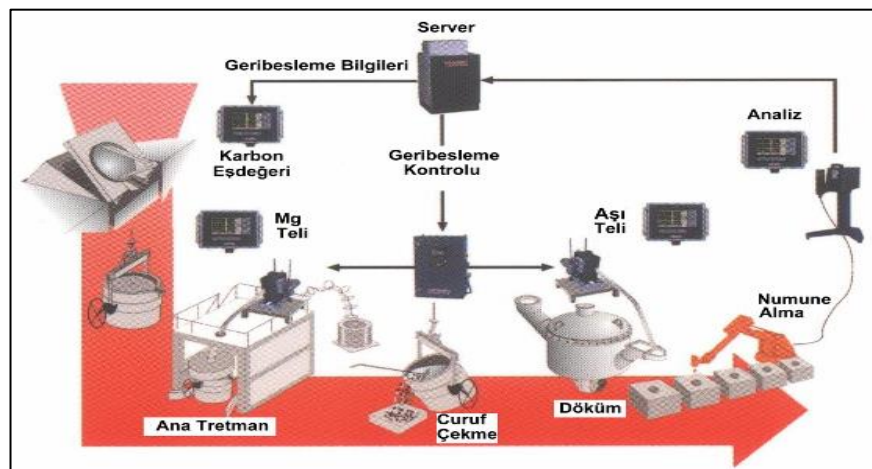
Eksik tretman metodu tretman işlemi sırasında magnezyum içeriğinin bilinçli olarak eksik bırakılması esasına dayanır. Sıvı metaldeki reaksiyon tam olarak gerçekleşmez ve küresel grafitler yerine vermiküler grafitler oluşur [2, 8].

Genel olarak küresel grafitli dökme demir üretiminde hedef kalıntı magnezyum oranı %0,05-%0,06 civarındadır. Vermiküler grafitli dökme demirin üretimindeki hedef kalıntı magnezyum oranı ise %0,01-%0,02 civarındadır. Vermiküler (CGI) grafitli dökme demirdeki bu hedef kalıntı magnezyum oranına ulaşmak için eksik tretman yöntemi kullanılır. Bu yöntemde magnezyum ile beraber nadir elementler de ilave edilebilir [2, 8].

1.1.2 Sintercast yöntemi ile vermiküler grafitli dökme demir (CGI) üretimi

Gri dökme demirler %3,3 - %3,5 karbon ve %1,80 - %2,20 silisyum içeren bir sıvı metalin tutma ocağından alınırken aşılması (Genellikle %75 silisyum içeren eden 1-10 mm boyutlarına sahip FeSi ile) sonrasında kum kalıba dökümü ile üretilirken; küresel grafitli dökme demirlerde ise ergimiş metal, tutma ocağından alındıktan sonra FeSiMg, Mg taşıyıcı diğer ferroalaşımlar veya Mg teli ile bir işleme tabi tutularak elde

Vermiküler grafitli dökme demir üretiminde ise durum biraz daha karışıktır. %3,60 – %3,80 karbon ve yaklaşık %2 silisyum içeren sıvı metal ergitme ocağında ergitildikten sonra ergitme ocağının önünde veya başka bir treatment istasyonunda %6-%8 Mg içeren FeSiMg ile treatmenta tabi tutulur. Fakat kullanılan FeSiMg miktarı küresel grafitli dökme demir üretimindeki miktarın 1/3 ile 1/4’ü arasındadır. Treatment sonrası bu sıvı metalden numune alınarak özel metal kupa ve özel bir yazılım kullanılarak termal analizi yapılır. Buradan cihaz aşılama ve modifikasyon değerlerini çıkarır. Cihazın veri tabanında yüklü hedef değerlerle bu elde edilen değerler karşılaştırılır ve cihaz eğer gerekli ise Mg teli ve aşılama teli miktarı bilgilerini tel besleme ünitesine gönderir. Bunlardan yalnızca birisi de gerekebilir. Mutlaka iki tel de her potaya ilave edilecek şeklinde bir kural bulunmamaktadır. Sistem treatment olmuş metal Mg’a ihtiyaç duyuyor ise Mg teli, eğer aşılama ihtiyacı varsa da aşı teli verir. Daha sonra potanın cürufu temizlenir ve döküm hattına verilir. Vermiküler grafitli dökme demir üretiminde çıkan cürufun hacmi, küresel grafitli dökme demir üretimi ile karşılaştırıldığında, oldukça azdır. Burada önemli bir nokta ise gri dökme demir ve küresel grafitli dökme demir üretiminde kalıp içinde yapılan aşılama (veya akan metale aşı) uygulamasının vermiküler grafitli dökme demir üretiminde yapılmamasıdır. Sintercast yöntemi ile vermiküler grafitli dökme demir üretiminin işlem sıraları Şekil 1.5’de gösterilmiştir [1].



7

Sintercast yöntemi ile vermiküler grafitli dökme demir üretim prosesinde, ocaktan alınan sıvı metalin tretmanı son derece önemlidir. Buradan çıkan ürün ne kadar kararlı ise prosesin kontrol edilebilirliği de o derece kolay olur. Ancak Şekil 1.6'da bu prosesin kararlılığını etkileyen parametreler bir grafik şeklinde verilmiştir. Dökümhaneden dökümhaneye bu değişkenliklerin nedeni veya önem dereceleri değişebilir. Sayıları da artabilir veya azalabilir. Bu nedenle her dökümhane vermiküler (CGI) grafitli dökme demir üretim prosesi için hata türü ve etkileri analizini (FMEA) kendi üretim şartlarını ve değişkenliklerini göz önünde bulundurarak yapmalıdır [1].

Sintercast üretim yöntemi ile vermiküler grafitli dökme demir üretiminde en önemli nokta ise (aslında tüm vermiküler grafitli dökme demir üretim proseslerinde) parçaya özgü ayarların ve kalibrasyonların başlangıçta yapılmasıdır. Çünkü döküm potasında tek bir küresellik değerine sahip metal varken, bu metal kalıba döküldüğünde farklı kesit kalınlıklarında farklı soğuma hızları nedeniyle farklı küresellik değerleri elde edilecektir. Bu nedenle Sintercast prosesinde her bir parça için ayrı birer aşılama ve modifikasyon indeksleri tanımlanır. Bunlara göre her bir parçanın ayrı hedef değerleri önceden bilinir. Bu çalışma her bir parçanın devreye alınması aşamasında, farklı özelliklerde dökülen sıvı metallere denk gelen parçaların farklı kesit kalınlıkları üzerinde yapılan mikroyapı çalışmaları ile ortaya konur. Örneğin bir motor blok üretilecek ise; motor bloğun silindirleri arasından, ince duvar kesitlerinden ve kep bağlantı bölgelerinden numuneler alınarak o parçanın modifikasyon ve aşılama indekslerinin ne olması gerektiğine karar verilir. Bu parça eğer bir motor kafası ise; ince ve kalın kesitli üst ve alt bölgelerden numuneler çıkarılarak modifikasyon ve aşılama indekslerinin kalibrasyonu yapılır. Her parça için üretim sonrası, parçaların çekinti karakteristiklerini tespit etmek amacıyla kesilmeleri ve tahribatsız muayene yöntemleri ile kontrol edilmeleri şarttır. Küreselliğin artışı ile ince-kalın kesit birleşme bölgelerinde çekme boşluklarına rastlanabilir. Bunların kontrolü de modifikasyon ve aşılama indekslerinin kalibrasyonu ile veya çözülemezler ise besleyici kullanımı ile olur [1].



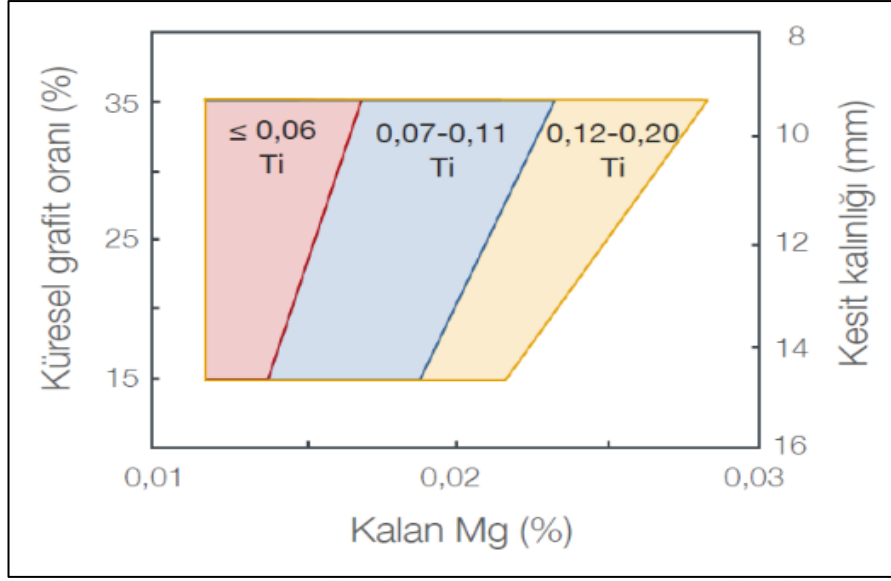
Şekil 1.6 : Treatman işlemindeki değişkenliklerin muhtemel nedenleri [1]

1.1.3 Titanyum ilavesi ile vermiküler grafitli dökme demir üretimi (CGI)

Dökme demirlerde küreselleşmeyi azaltan elementlerden biri olan titanyum ile vermiküler grafitli dökme demir üretilebilir.

Vermiküler grafitli dökme demirlerde küresellik oranı %20'yi geçmemelidir. Fakat ince kesitli parçalarda yüksek soğuma hızları nedeniyle küresellik oranı %20'yi geçebilmektedir. Kalıcı magnezyum değeri %0,01 civarında olan durumlarda bile özellikle 4 mm'den daha ince kesitlerde küresel grafit oranı oldukça yüksek olabilmektedir. İnce kesitlerdeki küresellik oranının %20'nin altında olması isteniyorsa titanyum takviyesi ile bu değere ulaşılabilir [9].

Titanyum, ince kesitli parçaların üretiminde bir avantaj sağlasa da çok fazla titanyum kullanımından kaçınılmalıdır. Bunun nedenlerinden biri, titanyumun sıvıda birikme eğiliminde olan bir element olmasıdır. Titanyum, sıvı metal içinde kaldığı zaman sert TiC ve TiCN parçacıklarını oluşturur. Bu parçacıklar malzemenin sertliğini artırırken sünekliği önemli ölçüde düşürmektedir. Şekil 1.7'de vermiküler grafitli dökme demir üretmek için gerekli olan titanyum miktarları verilmiştir [9].



Şekil 1.7 : Vermiküler grafitli dökme demir elde etmek için gerekli olan titanyum miktarları [9]

1.1.4 Azot ilavesi ile vermiküler grafitli dökme demir (CGI) üretimi

Azot, sıvı metalde segregasyona uğrar ve sıvı atomlara karşı bir difüzyon bariyeri oluşturarak aşırı soğumaya neden olur. Böylece, kontrollü oranlarda eklenen azot ilavesi farklı şekillerde grafitler oluşturabilir. Bu yöntemde azot miktarı kesin olarak hesaplanmalıdır. Azot miktarındaki artış gaz hatalarına neden olabilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 DÖKME DEMİRLER

Dökme demirler, katılaşma sırasında ötektik reaksiyona uğrayan ve içeriğinde genellikle %2-4 arasında karbon ve %0,5 -3 arasında silisyum içeren demir-karbon-silisyum alaşımlarıdır [10].

Dökme demirler öncelikle bileşime, soğuma hızına ve ergitme işlemine bağlı olarak yarı kararlı demir-sementit sistemine göre ya da kararlı demir-grafit sistemine göre katılaşabilir. Yarı kararlı katılaşma sistemi izlendiğinde, ötektikteki zengin karbon fazı demir karbürdür (sementit -Fe₃C). Kararlı katılaşma sistemi izlendiğinde ise zengin karbon fazı grafitir [11].

2.2 Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Tarihsel olarak, dökme demirlere ait ilk sınıflandırma, dökme demirin kırılmasına dayandırılmıştır:

Beyaz dökme demir; beyaz, kristalin bir kırılma yüzeyi gösterir çünkü kırılma demir karbür plakarı boyunca meydana gelir. Bu yarı kararlı katılaşmanın bir sonucudur.

Gri dökme demir, grafit lamelleri boyunca kırılma meydana geldiği için gri bir kırılma yüzeyi sergiler. Bu durum kararlı katılaşmanın bir sonucudur.

Metalografinin ortaya çıkmasıyla ve dökme demirler hakkındaki bilgi birikiminin artmasıyla beraber, mikroyapısal özelliklere bağlı olan diğer sınıflandırmalar mümkün hale gelmiştir.

Grafit şekli: Lamel grafit, küresel grafit, vermiküler grafit ve temper grafit.

Matris yapısı: Ferritik, perlitik, östenitik, martensitik ve beynitik (östemperlenmiş)

Başka bir yaygın sınıflandırma şeması, dökme demirleri beş temel türe ayırır. Bunlar; beyaz dökme demir, gri dökme demir, sünek dökme demir (küresel grafitli dökme

demir, sfero), temper dökme demir ve kompakt grafitli (vermiküler) dökme demirdir. Daha önce de belirtildiği gibi beyaz dökme demir ve gri dökme demir, isimlerini kırılma yüzeylerinden alırlar. Sünek dökme demir ise ölçülebilir derecede süneklik sergilemesinden dolayı bu adı almıştır. Beyaz dökme demir ve gri dökme demir ise bir çekme testinde önemli derecede süneklik sergileyememektedir. Temper dökme demir ise beyaz dökme demir olarak dökülür ve ısıtılma işleminden geçirilir. Vermiküler (kompakt) grafitli dökme demirdeki grafit yapısı ise gri dökme demir ve küresel grafitli dökme demirin yapıları arasındadır.

Bu beş temel dökme demir sınıflandırmasının yanı sıra, özel isimlerin kullandığı başka dökme demir formları da vardır:

Çil uygulanmış dökme demir, katılaşma sıcaklık aralığında çok hızlı soğutulmuş üretilen beyaz dökme demirdir.

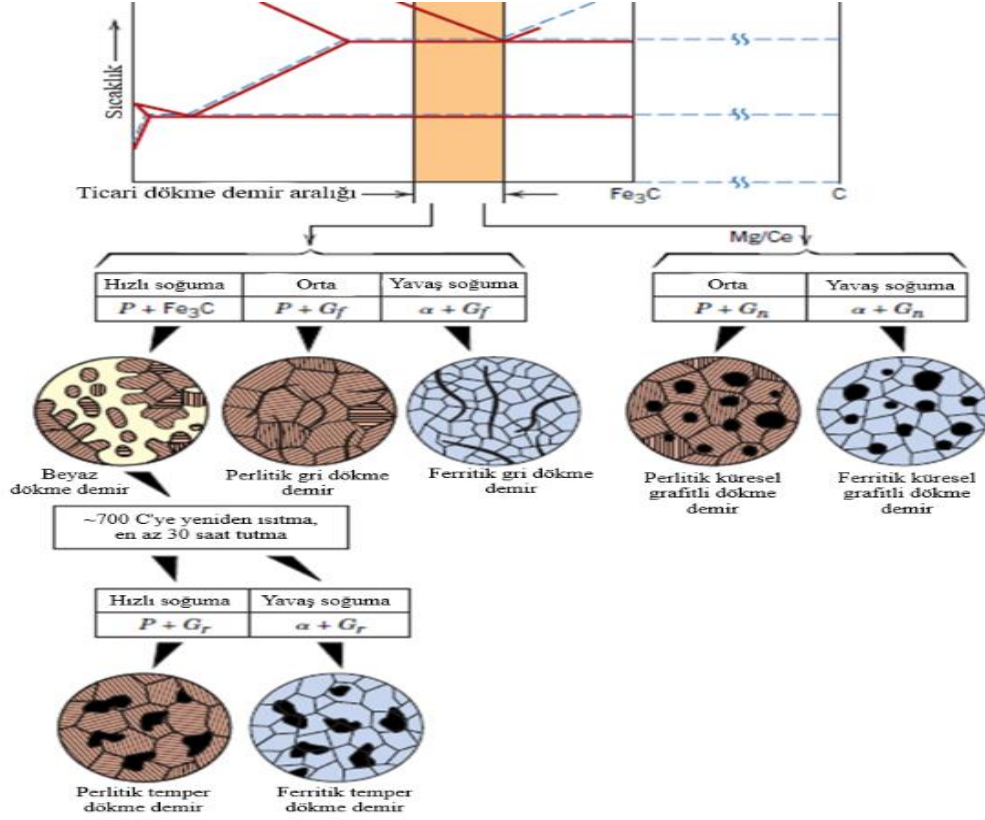
Benekli (alacalı-mottled) dökme demir, soğuma hızına bağlı olarak beyaz dökme demir ve gri dökme demirin yapılarının beraber görüldüğü dökme demirlerdir.

Yüksek alaşımlı grafit dökme demirler, mukavemet ve yüksek oksidasyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılır. Lamel grafitli ya da küresel grafitli olabilir. [11]

Çizelge 2.1 : Dökme demirlerin ticari isimlerine, mikroyapılarına ve kırılma yüzeylerine göre sınıflandırılması [11]

Ticari İsim	Karbon Bakımından Zengin Faz	Matriks	Kırık Yüzeyi	Nihai Yapı
Gri Dökme Demir	Lamel grafit	Perlitik	Gri	Katılaşma sonrası
Sfero Dökme Demir	Küresel grafit	Feritik, perlitik, ostenitik	Gümüş gri	Katılaşma veya ısıtılma işlem sonrası
Vermiküler Grafitli Dökme Demir	Yumru (kompakt) grafit	Feritik, perlitik	Gri	Katılaşma sonrası
Beyaz Dökme Demir	Fe ₃ C	Perlitik, martenzitik	Beyaz	Katılaşma veya ısıtılma işlem sonrası*
Benekli Dökme Demir	Lamel grafit + Fe ₃ C	Perlitik	Benekli	Katılaşma sonrası
Temper Dökme Demir	Temper grafit	Feritik, perlitik	Gümüş gri	Isıl işlem sonrası
Osterlenmiş sfero Dökme Demir	Küresel grafit	Östemperlenmiş (beynit)	Gümüş gri	Isıl işlem sonrası

* Gerilim giderme ve ostenitik dönüşüm haricinde beyaz dökme demirlere ısıtılma işlemi genelde uygulanmamaktadır.



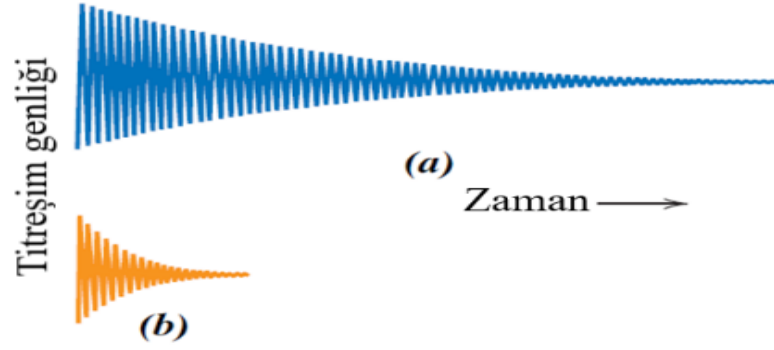
Şekil 2.1 : Ticari dökme demirlere ait kimyasal bileşim aralığı ve farklı ısıt işlemler ile elde edilen mikroyapıların şematik olarak gösterimi. G_f , lamel grafit; G_r , temper grafit; G_n , küresel grafit; P , perlit; α , ferrit [12]

2.3 Gri (Lamel Grafitli) Dökme Demirler

Gri dökme demirlerdeki karbon oranı ağırlıkça %2,5-4 ve silisyum oranı da %1-3 arasındadır. Alaşımdaki karbon, östenitte çözünebilen miktarı aştığında grafitler lamel olarak çökeler. Bundan dolayı lamel grafitli dökme demirler olarak da adlandırılır. Grafit lamelleri, ferrit ve perlit matris içinde gömülü haldedir.

Gri dökme demirler, mekanik özellikler bakımından çekme gerilmeleri altında zayıf ve gevrek davranış gösterir. Bunun sebebi, çekme gerilmeleri uygulandığı zaman grafit lamellerinin keskin uçlarında gerilme yığılmaları oluşmasıdır. Bu malzemeler basma zorlamaları altında daha dayanıklıdır ve sünek davranış gösterirler. Gri dökme demirler, sahip oldukları bazı üstün özellikleri nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Gri dökme demirlerin aşınma dayanımları oldukça iyidir. Yüksek akışkanlıkları nedeniyle, ince kesitli parçaların döküm yoluyla üretilmesine avantaj sağlar. Döküm sonrasında katılaşma sırasında çekinti oluşması da nispeten azdır.

Şekil 2.2’den de görüleceği üzere gri dökme demirler titreşim enerjisini çok iyi sönümlenmektedirler. Titreşime maruz kalan ağır makine ve takım tezgahlarının gövdeleri ve şasileri gri dökme demirden yapılır. Bunlara ek olarak gri dökme demirler en ekonomik dökme demir türüdür [12].



Şekil 2.2 : (a) Çelik (b) gri dökme demirin titreşim sönümlenme kapasitelerinin karşılaştırılması [12]

Gri dökme demirlerde Şekil 2.1’de gösterildiği gibi farklı mikroyapıların elde edilmesi mümkündür. Kimyasal bileşim ve soğuma hızı, dökme demirin mikroyapısında önemli rol oynar. Örnek olarak silisyum miktarının azaltılması ve soğuma hızının artırılması, Fe_3C ’nin tam olarak grafitleşmesini önler. Böylece, Şekil 2.3’de görüldüğü gibi Fe_3C , levhalar halinde perlit yapısını oluşturur ve grafit lamelleri perlitik matrise gömülü olarak bulunur. [12]

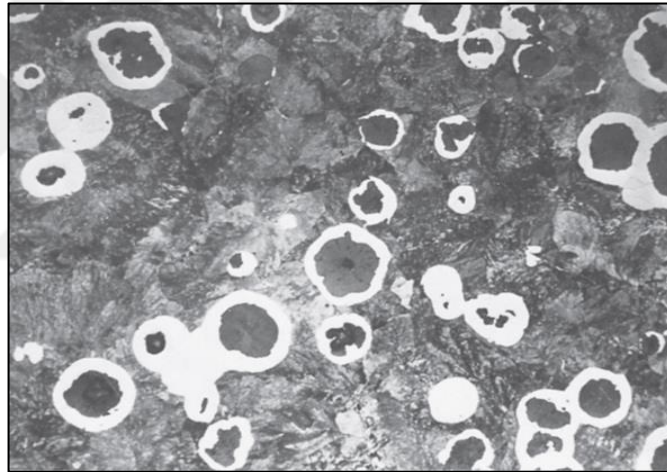


Şekil 2.3 : Perlitik matrisli gri dökme demirin optik mikroskopla çekilmiş mikroyapı fotoğrafı [13]

2.4 Küresel Grafitli (Sfero) Dökme Demirler

Küresel grafitli dökme demir (bazen sfero ya da sünek demir olarak da adlandırılır), gri dökme demirin proses avantajlarını çeliğin mühendislik avantajlarıyla birleştiren dökme demir türüdür. Küresel grafitli dökme demirler, iyi akışkanlığa ve dökülebilirliğe, mükemmel işlenebilirliğe ve iyi aşınma direncine sahiptir. Bunlara ek olarak küresel grafitli dökme demirler yüksek mukavemet, süneklik, tokluk, sertleştirilebilirlik ve sıcak işlenebilirlik gibi çeliklere benzer birtakım özelliklere sahiptir [14].

Küresel grafitli dökme demirlerin bu özellikleri, Şekil 2.4'deki mikroyapı fotoğrafında gösterildiği gibi, iç yapısındaki küre şeklindeki grafit nodüllerinden kaynaklanmaktadır [14].



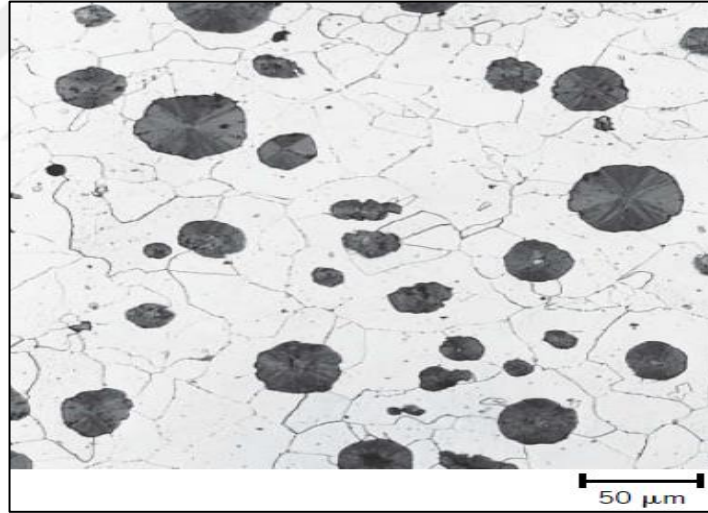
Şekil 2.4 : Grade 80-55-06 perlitik küresel grafitli dökme demir. Grafit nodüllerinin etrafı ferrit fazı tarafından sarılmış. (%3 nital dağlayıcı, 100x büyütme) [14]

Alaşımsız küresel grafitli dökme demirin bileşimi, karbon ve silisyum bakımından gri dökme demire benzer. Çizelge 2.2'de listelendiği gibi, küresel grafitli dökme demirin karbon içeriği %3-%4 arasında, silisyum içeriği ise %1,8-%2,8 arasında değişir. Yüksek kaliteli bir küresel grafitli dökme demir için kükürt ve fosfor seviyeleri, gri dökme demir için olan maksimum seviyelerden yaklaşık 10 kat daha düşük olan maksimum %0,03 S ve %0,1 P değerinde tutulmalıdır. Diğer impürite elementleri de grafitlerin küreselliğine etki ettiği için düşük miktarda bulunmalıdır. [14]

Çizelge 2.2 : Endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan dökme demir türlerinin genel kimyasal bileşim aralıkları [14]

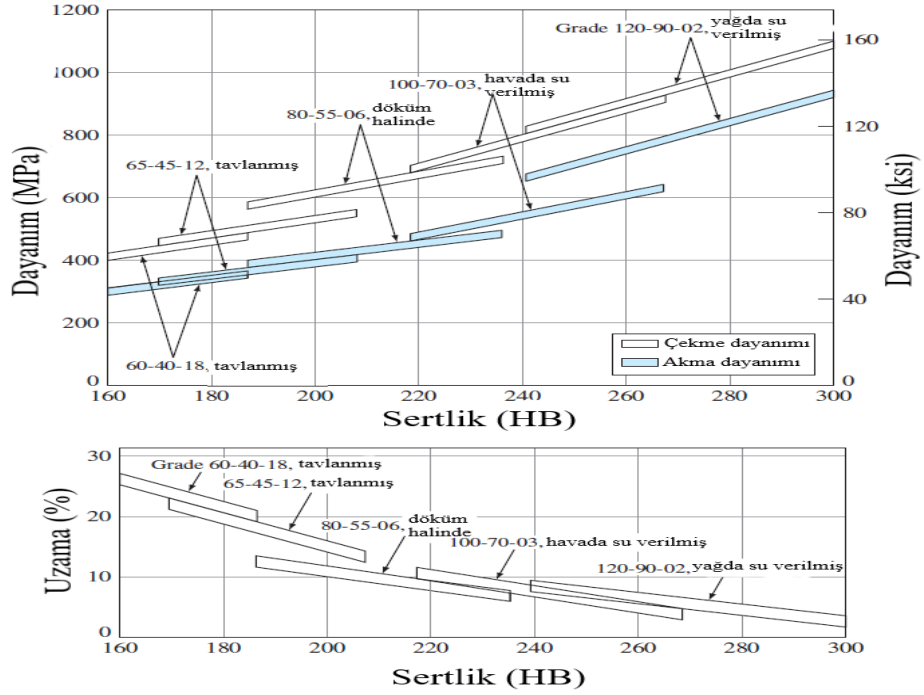
Element	Gri Dökme Demir (%)	Beyaz Dökme Demir (%)	Temper Dökme Demir (%)	Küresel Grafitli Dökme Demir (%)
Karbon	2,5-4,0	1,8-3,6	2,0-2,60	3,0-4,0
Silisyum	1,0-3,0	0,5-1,9	1,10-1,60	1,8-2,8
Mangan	0,25-1,0	0,25-0,80	0,20-1,0	0,10-1,0
Kükürt	0,02-0,25	0,06-0,20	0,04-0,18	0,03 max.
Fosfor	0,05-1,0	0,06-0,18	0,18 max.	0,10 max.

Küresel grafitli dökme demirdeki grafitler katılaşma sırasında oluşur. Dökümden hemen önce, sıvı metale magnezyum ilave edilir ve alaşımdaki kükürt ve oksijen miktarı çok düşük seviyelere indirilir. Magnezyum, sülfür ve oksijenle reaksiyona girerek bu elementlerin küresel grafitlerin oluşumuna müdahale etmesinin önüne geçer [14]. Bu işleme magnezyum tretmanı adı verilir.



Şekil 2.5 : Ferritik matrisli küresel grafitli dökme demirin optik mikroskopta çekilmiş mikroyapı fotoğrafı [12]

Alaşımsız küresel dökme demirin mikroyapısı genellikle Şekil 2.4’de gösterildiği gibidir. Bu yapıda, perlitik matris içinde gömülü olan ve çevreleri ferrit fazı tarafından sarılmış küresel grafitler görülmektedir. Tamamen ferritik (Şekil 2.5) ya da tamamen perlitik matrisli yapılara ise çeşitli alaşım ilaveleri ve soğuma hızının değiştirilmesiyle ulaşılabilir. Şekil 2.6’da gösterilen ısıt işlemler ile de mikroyapı ve dolayısıyla da mekanik özellikler değiştirilebilir.



Şekil 2.6 : Küresel grafitli dökme demirin çeşitli ısııl işlemlerle değişen mekanik özellikleri [14]

2.5 Beyaz Dökme Demirler

Bileşimlerinde ağırlıkça %1'den daha az silisyum içeren dökme demirler ve yüksek soğuma hızlarında Şekil 2.1'de gösterildiği gibi, karbon grafit formunda ayrışamaz ve Fe_3C 'in içinde kalır. Şekil 2.7'de beyaz dökme demire ait bir mikroyapı fotoğrafı gösterilmiştir. Kalın kesitli parçalarda hızlı soğuma yüzeyde ve yüzeye yakın bölgelerde gerçekleştiği için parçanın yüzeyi ve yüzeye yakın bölgeleri beyaz dökme demir; içerideki bölgeler ise soğuma hızı daha yavaş olduğundan gri dökme demir yapısına sahiptir. Bu şekildeki dış yüzeyi sert beyaz dökme demir, iç bölgeleri ise yumuşak gri dökme demirlere sahip döküm parçalara çil döküm adı verilir [12].



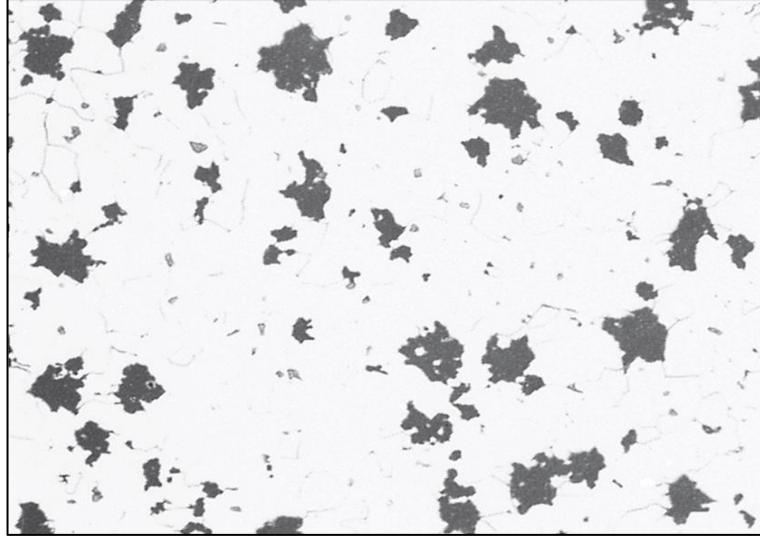
Şekil 2.7 : Beyaz dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı. Açık renkli bölgeler sementit, koyu renkli bölgeler ise perlit [12]

Beyaz dökme demirler, içlerinde yüksek miktarda Fe_3C içerdiğinden dolayı çok serttir ve gevrek özellik gösterir. Bundan dolayı işlenebilirlik açısından çok zayıftırlar. Sünekliğin gerekmediği, yüksek sertlik ve aşınma dayanımı istenen parçalarda kullanılırlar. Beyaz dökme demirler, temper dökme demir için hammadde görevi de görür [12, 14].

2.6 Temper Dökme Demirler

Temper dökme demirler önce içeriğinde çok miktarda demir karbür (Fe_3C) içeren ve grafit içermeyen beyaz dökme demir olarak dökülür. Bundan dolayı temper dökme demirlerin kimyasal bileşimi, beyaz dökme demiri oluşturan bileşimle sınırlıdır. Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi, temper dökme demirler %2-%2,6 arasında karbon, %1,1 - %1,6 arasında silisyum içerir [14].

Temper dökme demir üretmek için, beyaz dökme demirler, içerdiği demir karbürü grafit ve demire ayırmak için ısıtılıp işleminden geçirilir. Temper dökme demirdeki grafitler, temper grafit adı verilen patlamış mısır görünümündedir [14]. Şekil 2.8’de ferritik matrisli temper grafitli dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Ferritik matrisli temper dökme demirler, mekanik özellikler açısından gri dökme demirlere göre daha dayanıklı ve sünektir [12].



Şekil 2.8 : İki aşamalı tavlama (4 saat 954 °C’de tutma ve 6 saatte 704 °C’ye soğutma) ile üretilen ferritik matrisli temper grafitli dökme demire ait mikroyapı fotoğrafı.

Beyaz bölgeler ferrit fazı, koyu bölgeler ise temper grafitler. (Dağlayıcı %2 nital, 100x büyütme) [14]

2.7 Vermiküler (kompakt) grafitli dökme demirler (CGI)

Vermiküler grafitli dökme demirler (kompakt dökme demir ya da CGI olarak da adlandırılır), dökme demir ailesinin en yeni üyesidir. Vermiküler grafitli dökme demirler, küresel grafitli dökme demir üretmek için yapılan tretman işleminde yetersiz magnezyum ve seryum kullanım miktarlarının bir sonucu olarak yanlışlıkla üretilmiştir. Genel olarak vermiküler grafitli dökme demirlerin mekanik ve fiziksel özellikleri, gri ve küresel grafitli dökme demirlerin arasında yer alır [11]. Son yıllarda başta motor blok ve motor kafası olmak üzere otomotiv parça üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır.

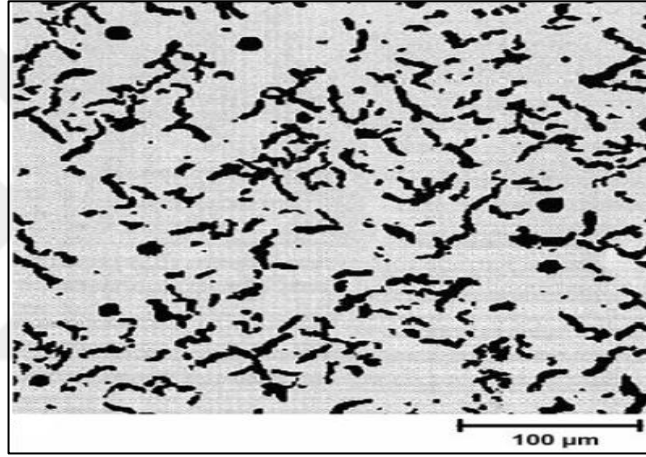
Çizelge 2.3’te %10 küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirlerin mekanik ve fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.3 : %10 küresellik içeren bir vermiküler grafitli dökme demirin farklı sıcaklıklarda ve matris yapılarında mekanik ve fiziksel özellikleri [15]

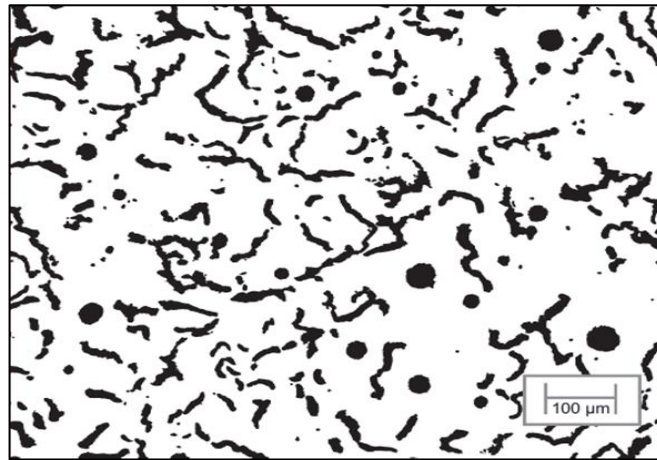
Özellik	Test Yöntemi	Sıcaklık (C)	%70 Perlit	%100 Perlit
Çekme dayanımı (MPa)	ASTME 8M (25 °C) ASTME 21 (100 C & 300 °C)	25	420	450
		100	415	430
		300	375	410
%0,2 Akma dayanımı (MPa)	ASTME 8M (25 °C) ASTME 21 (100 C & 300 °C)	25	315	370
		100	295	335
		300	284	320
Elastik modül (GPa)	ASTME 8M (25 °C) ASTME 21 (100 C & 300 °C)	25	145	145
		100	140	140
		300	130	130
Uzama (%)	ASTME 8M (25 °C) ASTME 21 (100 C & 300 °C)	25	1,5	1,0
		100	1,5	1,0
		300	1,0	1,0
Çentiksiz yorulma dayanımı	Döner-eğilmeli test 3000 rpm	25	195	210
		100	185	190
		300	165	175
Dayanma oranı	Yorulma sınırı/Çekme dayanımı	25	0,46	0,44
		100	0,45	0,44
		300	0,44	0,43
Termal İletkenlik (W/mC)	ASTME 1225	25	37	36
		100	37	36
		300	36	35
Poisson Oranı	ASTME 132	25	0,26	0,26
		100	0,26	0,26
		300	0,27	0,27
Yoğunluk (g/cc)	750x25x25 mm	25	7,0-7,1	7,0-7,1
Sertlik (HB)	10 mm çap, 3000 kg yük	25	183-235	207-255
Termal genleşme katsayısı (µm/m C)	DIN 51 045	25	11,0	11,0
		100	11,5	11,5
		300	12,0	12,0

2.7.1 Vermiküler grafitli dökme demirin (CGI) grafit morfolojisi

Vermiküler grafitli dökme demirdeki grafit yapıları kurtçuk şeklinde parçacıklar olarak görülür. Bu grafit parçacıkları, aynı gri dökme demirde olduğu gibi rastgele yönelmiş ve uzamıştır ancak bu grafitler gri dökme demirdeki lamel grafitlere kıyasla daha kısa, kalın ve yuvarlak kenarlıdır. Standartlara göre kabul edilebilir bir vermiküler grafitli dökme demir, yapısında lamel grafit bulundurmamalı ve küresel grafit miktarı en fazla %20 olmalıdır, yani tüm grafitlerin en az %80'i vermiküler grafit olmalıdır (ASTM A247, type IV). Vermiküler grafitli dökme demire ait farklı küresellikteki mikroyapı Şekil 2.9'da ve Şekil 2.10'da gösterilmektedir [5, 6, 11, 15].

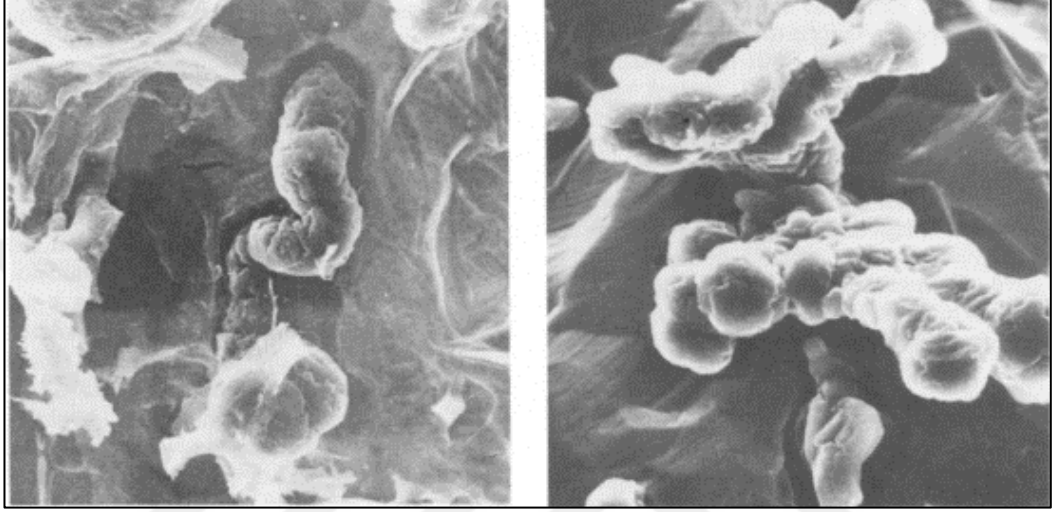


Şekil 2.9 : <%5 küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirin optik mikroskopta çekilmiş mikroyapı fotoğrafı [6]



Şekil 2.10 : %10 küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirin optik mikroskopta çekilmiş mikroyapı fotoğrafı [15]

Şekil 2.11'deki üç boyutlu SEM mikroyapıları incelendiğinde, vermiküler grafitlerin ötektik hücre içinde birbirine bağlı olduğu görülmektedir. Bu grafit morfolojisi, lamel grafit içeren gri dökme demirlere kıyasla çatlak başlangıcını ve büyümesini engelleyerek daha yüksek mukavemet ve süneklik sağlar. Birbirine bağlı olan vermiküler grafit morfolojisi, küresel grafitte göre daha iyi termal iletkenlik ve sönümleme kapasitesi sağlar [11].

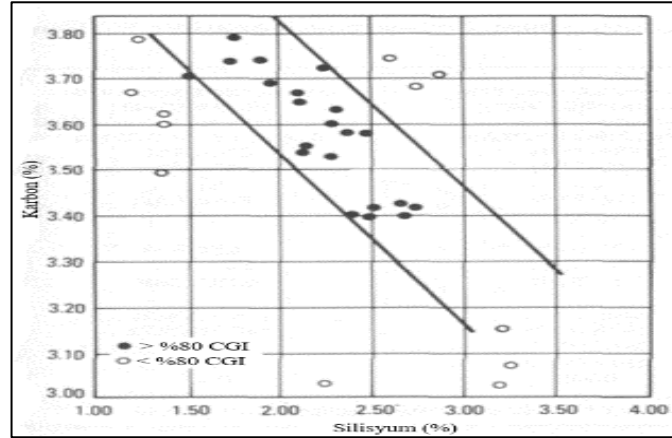


Şekil 2.11 : Vermiküler grafitli dökme demirin taramalı elektron mikroskopunda çekilmiş mikroyapı fotoğrafları (395x büyütme) [11]

2.7.2 Vermiküler grafitli dökme demirin (CGI) kimyasal kompozisyonu

Vermiküler grafitli dökme demirlerin karakteristik özellikleri, hipoötektikten ($CE=3,7$) hiperötektiğe ($CE=4,7$) uzanan, %3,1 ile %4,0 oranında karbon içeriği ve %1,7 ile %3,0 oranında silisyum içeriği ile oldukça geniş bir aralıkta kendini gösterir [11, 16-18]. Sabit silisyum seviyelerinde, daha düşük bir karbon eşdeğeri soğuma eğilimini biraz artırır ve daha düşük küresellik ile sonuçlanır. Sabit karbon eşdeğerinde, daha yüksek silisyum miktarı ise küresellik oranını artırır [11, 19]. Optimum seviyedeki karbon eşdeğeri, parça boyutunun bir fonksiyonu olarak seçilmelidir.

Optimum seviyedeki karbon ve silisyum içerikleri Şekil 2.12’de görülebilir.



Şekil 2.12 : CGI için optimum karbon ve silisyum aralıkları [19]

Belirli bir boyut için, çok yüksek orandaki karbon eşdeğeri grafit yüzmesine neden olurken çok düşük orandaki karbon eşdeğeri çil oluşumuna neden olabilir. 10 mm ile 40 mm arasında değişen et kalınlıklarında optimum döküm özelliklerini elde etmek için karbon eşdeğerliğinin ötektik bileşimde ($CE = 4,3\%$) olması önerilir [11]. Vermiküler grafitli dökme demirler için tipik bir kimyasal analiz Çizelge 2.4’te verilmiştir.

Çizelge 2.4 : %20’ye kadar küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demir için tipik kimyasal aralıklar [15]

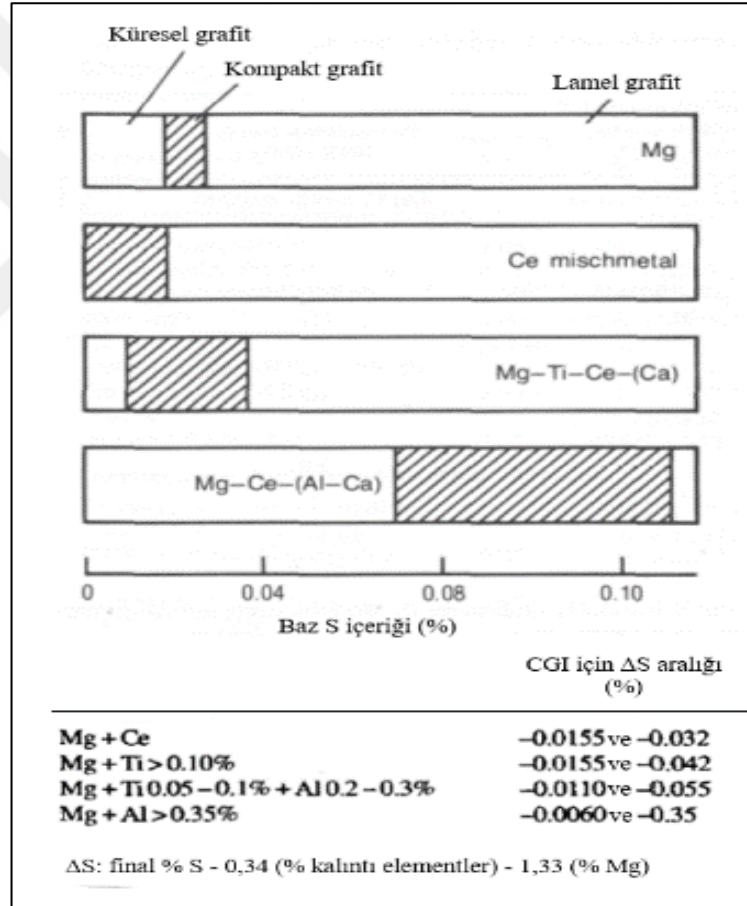
Matriks Yapısı	Kimyasal Analiz (%)								
	C	Si	CE	Mn	S	Mg	CeMM	Cu	Sn
70% perlitik	3,6-3,8	2,1-2,5	4,4-4,7	0,2-0,4	0,005-0,022	0,006-0,014	0,01-0,03	0,3-0,6	0,03-0,05
100% perlitik	3,6-3,8	2,1-2,5	4,4-4,7	0,2-0,4	0,005-0,022	0,006-0,014	0,01-0,03	0,6-0,9	0,08-0,10

2.7.2.1 Mangan ve Fosfor içeriği

Vermiküler grafitli dökme demirin (CGI) mangan içeriği, mikroyapıda ferritik ya da perlitik yapının istenmesine bağlı olarak %0,1 ile %0,6 arasında değişebilir. Matristen maksimum süneklik isteniyorsa fosfor içeriği %0,06’dan az olmalıdır [11].

2.7.2.2 Kükürt içeriği

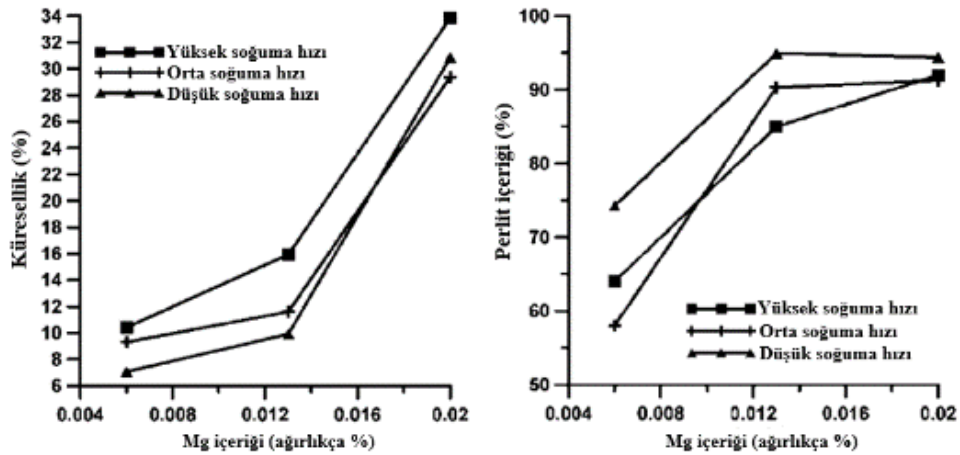
Vermiküler grafitli dökme demirin (CGI), kükürt içeriği %0,07 ile %0,12 arasındaki sıvıdemirden üretilebilir olmasına rağmen [20], treatment işleminden önce kükürt miktarını %0,012 ile %0,025 düzeyine düşürmek hem ekonomik açıdan hemde proses kalitesi açısından çok daha uygun olacaktır. Alaşımdaki kükürt miktarı ne kadar yüksek ise tretman işlemi için o kadar fazla alaşım kullanılması gerekecektir. Ayrıca, CGI için gerekli olan hedef bileşim aralığını tutturamama ihtimali de artacaktır. Çünkü kalıntı treatment elementlerinin kalıntı kükürt ile dengelenmesi gerekmektedir. Treatment işleminden sonra olması gereken kalıntı kükürt miktarı %0,01 ile %0,02'dir [11, 18].



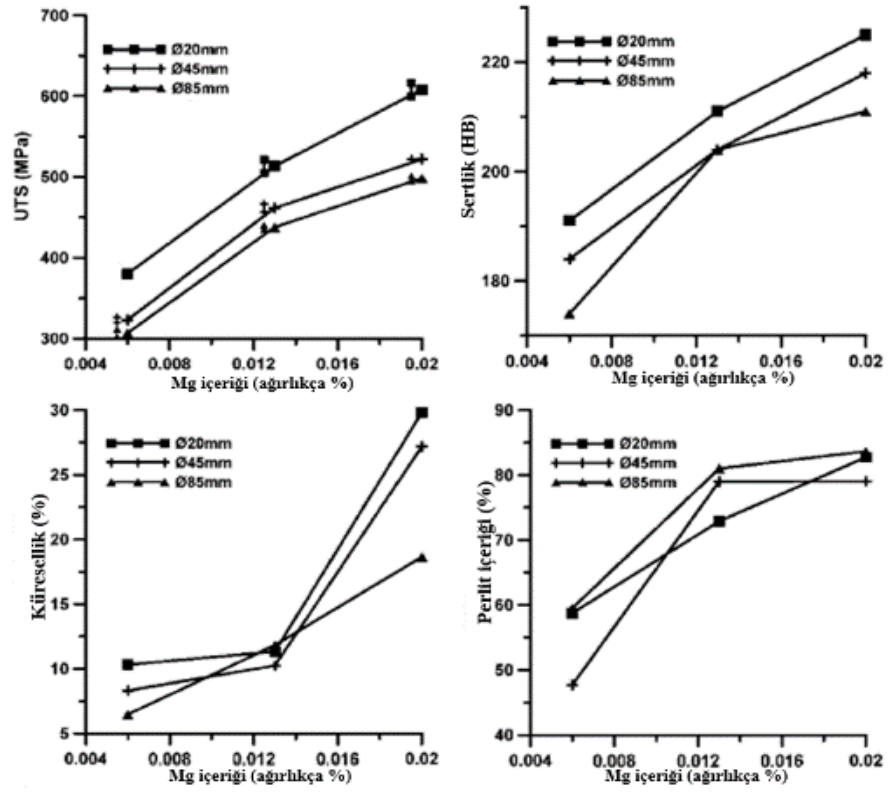
Şekil 2.13 : CGI üretimi için kullanılan elementlerin ve miktarının bir fonksiyonu olarak optimum başlangıç kükürt seviyesi aralığı. Tablo; %3,5 C, %2,1 Si, %0,75 Mn ve %0,03 ile %0,08 arası fosfor içeren bir demir alaşımındaki farklı küreleştiricilerle CGI oluşumu için gerekli kükürt aralığını göstermektedir [11]

2.7.2.3 Tretman elementleri içeriği

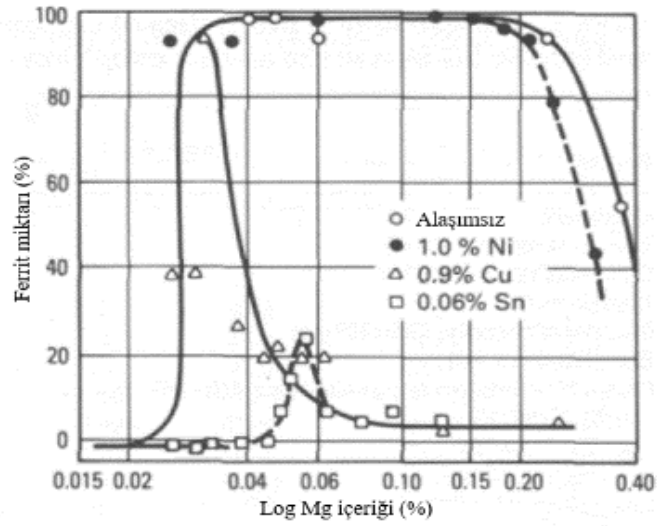
Sıvı metalden vermiküler grafit morfolojisi, farklı elementlerle tretman işlemi yapılarak elde edilir. Tretman işleminde kullanılan elementler bunlardan bir veya birkaçını içerebilir: magnezyum, seryum, kalsiyum, titanyum ve alüminyum. Kullanılacak element miktarları ve kombinasyonları, tretman yönteminin, kükürt miktarının ve parça et kalınlığının bir fonksiyonudur. Şekil 2.13’de, verniküler grafitli dökme demir üretimi için kullanılan tretman yöntemi, başlangıçtaki kükürt seviyesi ve grafit şekli arasındaki ilişki gösterilmiştir [11]. Şekil 2.14’de magnezyum içeriğinin farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi, Şekil 2.15’de magnezyum içeriğinin farklı et kalınlıklarında küreselliğe, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.14 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde magnezyum miktarının farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi [21]



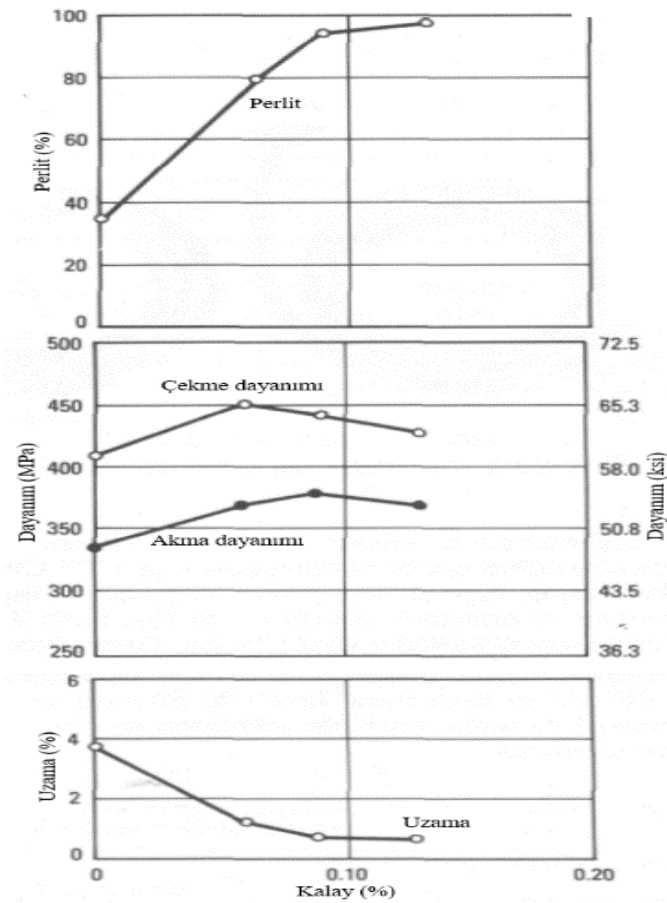
Şekil 2.15 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde magnezyum miktarının farklı et kalınlıklarında küreselliğe, perlit oranına ve mekanik özelliklere etkisi [21]



Şekil 2.16 : 25 mm et kalınlığındaki vermiküler grafitli ve küresel grafitli dökme demirlerde bakır, nikel ve kalayın matris üzerine etkisi [11]

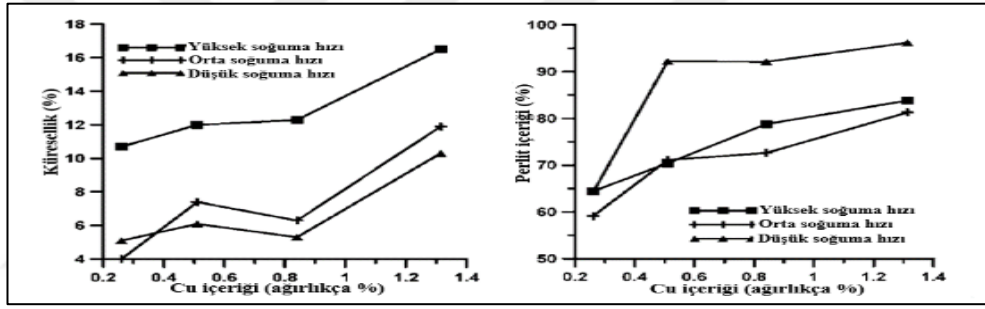
2.7.2.4 Diğer alaşım elementleri

Bakır, kalay, molibden ve alüminyum gibi alaşım elementleri, vermiküler grafitli dökme demirin matrisini ferritik yapıdan perlitik yapıya dönüştürmek için kullanılabilir. Genel aralıklar; %0,48 Cu ya da %0,033 Sn [22], %0,5 - %1 Mo [23] ve %4,55'e kadar Al'dur [24, 25]. şekil 2.16'da bakır ve kalay gibi güçlü perlitleştirici elementlerin bile CGI'da az etki gösterdiği görölmektedir [25]. Aynı durum seryum-mischmetal için de geçerlidir. Yüksek saflıkta şarj malzemeleri kullanıldığında %1,7 bakır miktarında bile tamamen perlitik yapı elde edilememiştir. Bunların aksine kalay, perlitleştirme için oldukça etkilidir. şekil 2.17'de görüldüğü üzere %0,13 Sn ile %95 seviyelerinde perlitik yapı gözlemlenmiştir. Bunlar dikkate alındığında, perlitik bir matris elde etmek için normal seviyelerden yüksek miktarda alaşım elementi ilavesi yapmak ya da birden fazla element ilavesi yapmak gerekebilir [11].

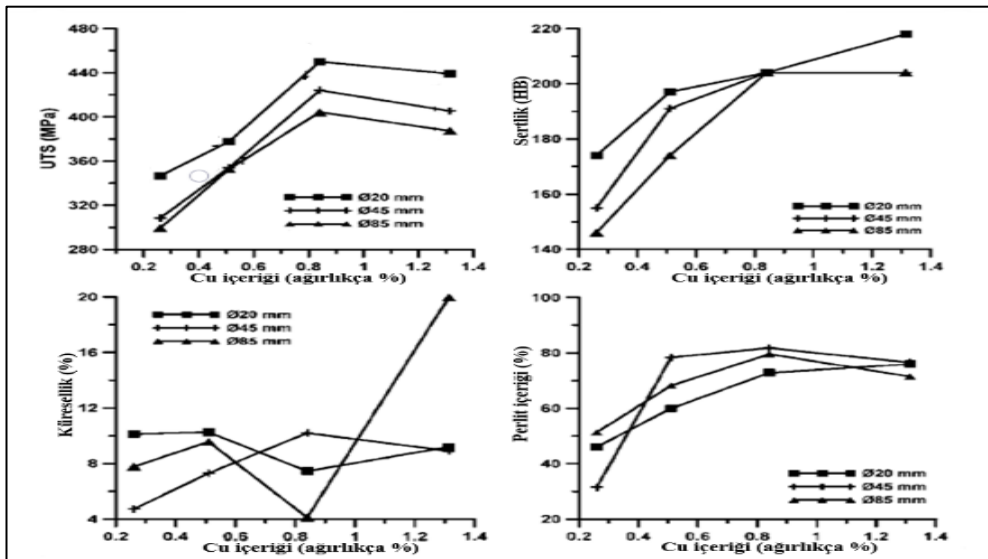


şekil 2.17 : Kalay ilavesinin 25 mm et kalınlığındaki vermiküler grafitli dökme demirin perlit miktarına ve mekanik özelliklerine etkisi [11]

Bakır, perlit oluşumunu teşvik etmek ve böylece mekanik özellikleri iyileştirmek için dökme demirlerde yaygın olarak kullanılan alaşım elementlerindendir. Bakır, grafit yüzeyinde bir difüzyon bariyeri oluşturarak ferrit oluşumu için gerekli olan karbon difüzyonu prosesinin oluşumunu engeller ve böylece perlit oluşur. Bunlara ek olarak bakır, ferrit fazının katı çözelti mukavemetlendirmesiyle de mekanik özellikleri iyileştirir. Ayrıca bakır, karbür oluşumunu da engeller, bu durum artan bakır içeriğiyle beraber artan kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklık aralığıyla ilgilidir. Vermiküler grafitli dökme demirlerin grafit morfolojisi de bakır ilavesinden etkilenir ve artan bakır içeriğiyle beraber grafitlerin küreselliği biraz artar. Şekil 2.18’de bakır içeriğinin farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit miktarına etkisi, Şekil 2.19’da bakır içeriğinin farklı et kalınlıklarında küreselliğe, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi gösterilmiştir [21, 26 – 30].

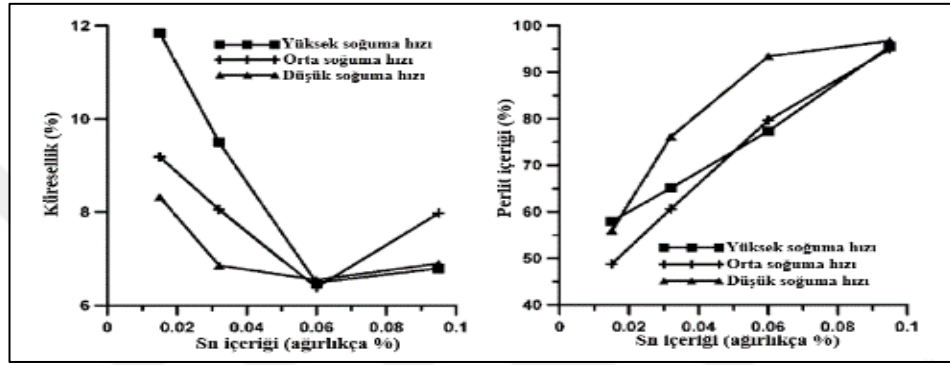


Şekil 2.18 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde bakır miktarının farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi [21]

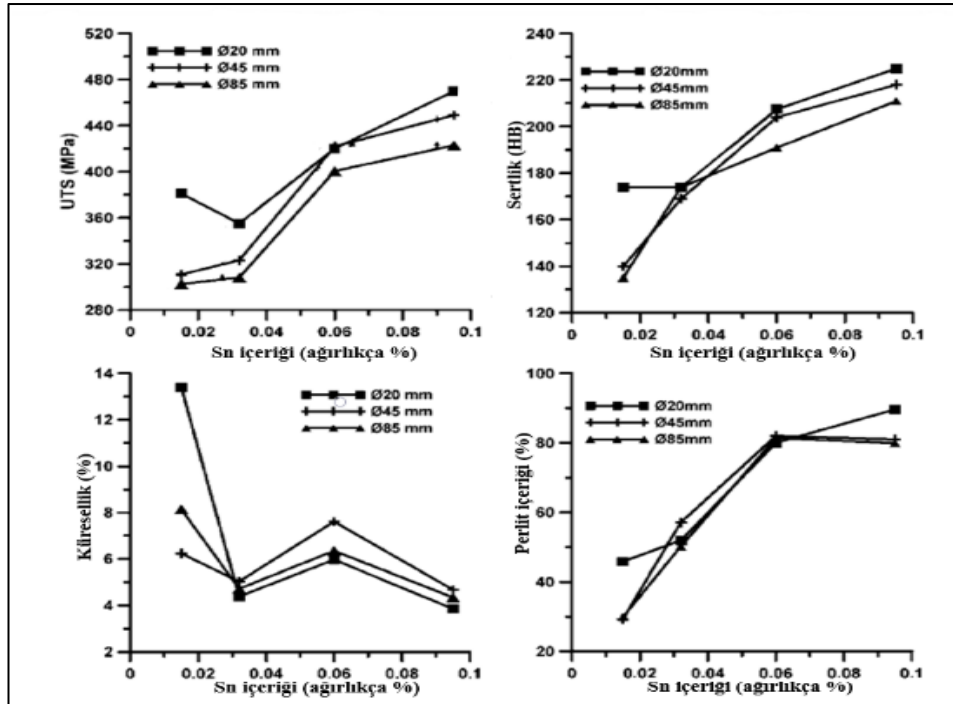


Şekil 2.19 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde bakır miktarının farklı et kalınlıklarında küreselliğe, perlit oranına ve mekanik özelliklere etkisi [21]

Kalay da perlit oluşumunu teşvik eden elementlerdendir. Bakır ile karşılaştırıldığında kalay, çok daha güçlü bir perlitizan elementtir. Kalayın perlitleştirme mekanizması, bakırinkine benzer şekildedir. Katılaşma sırasında kalay, karbür oluşumunu önler. Ayrıca kalay miktarının artması, vermiküler grafitli dökme demirlerde grafit parçacıklarının boyunu uzatır. Şekil 2.20’de kalay içeriğinin farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi, Şekil 2.21’de kalay içeriğinin farklı et kalınlıklarında küreselliğe, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi gösterilmiştir [21, 30].



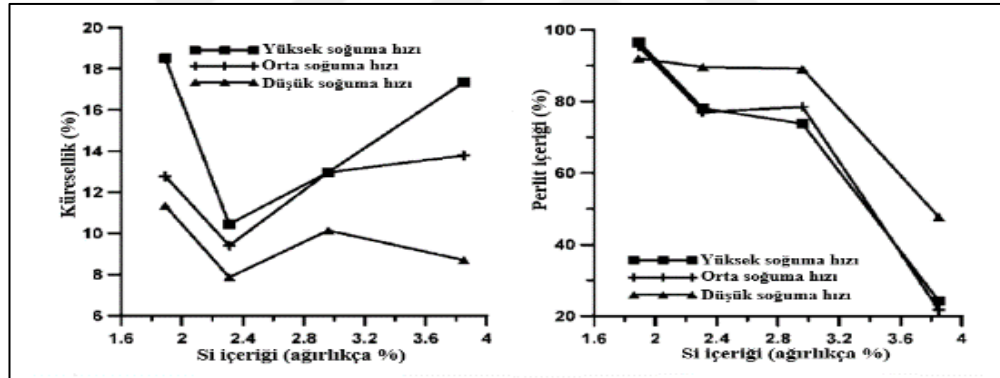
Şekil 2.20 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde kalay miktarının farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi [21]



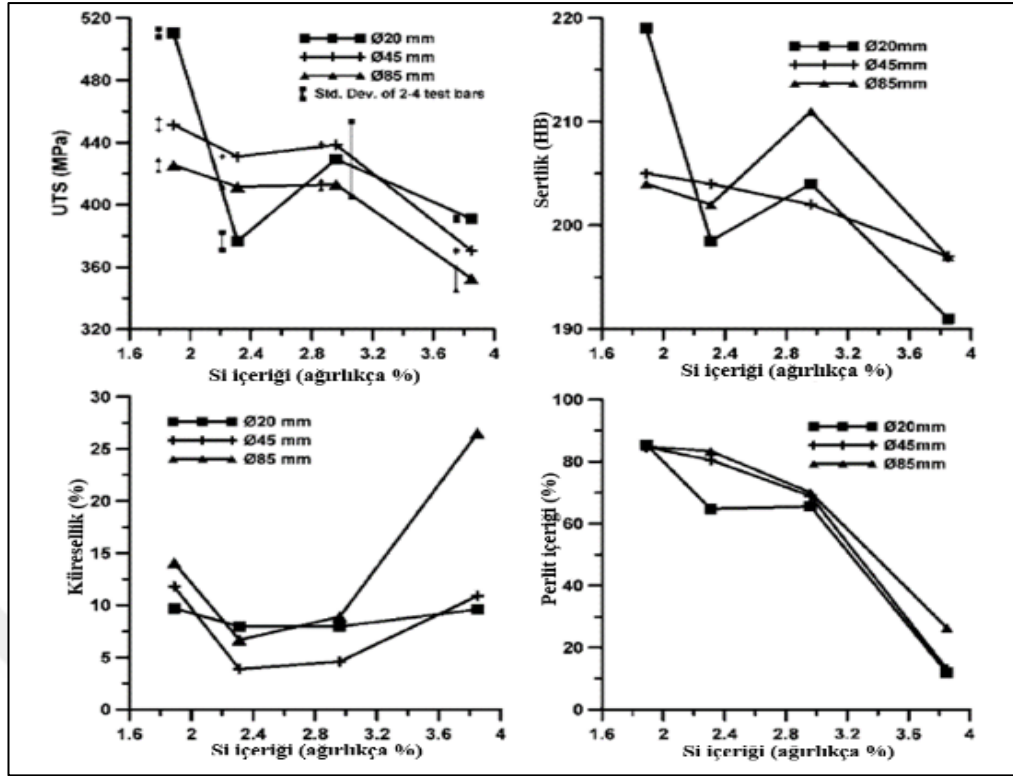
Şekil 2.21 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde kalay miktarının farklı et kalınlıklarında küreselliğe, perlit oranına ve mekanik özelliklere etkisi [21]

Silisyum, dökme demirlerdeki başlıca alaşım elementlerinden biridir. Karbon eşdeğerinin çok yüksek olmasından kaynaklanan karbon yüzmesini ve karbon eşdeğerinin çok düşük olmasından kaynaklanan aşırı çil oluşturma eğilimini önlemek için dökme demirlerde silisyum içeriği %1,5 ve %3,0 aralığında olmalıdır. Silisyum, kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıkların aralığını genişleterek dökme demirlerde çil oluşturma eğilimini azaltmaktadır. Ayrıca silisyum, bir çok ticari aşılایıcıda yaygın olarak kullanılır ve bu da çil oluşturma eğilimini azaltır. Silisyum ferrit oluşumunu teşvik eder. Tamamen ferritik bir matrise silisyum ilavesi katı çözelti mukavemeti ile matrisin sertliğini artırır.

Şekil 2.22’de silisyum içeriğinin farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi, Şekil 2.23’de silisyum içeriğinin farklı et kalınlıklarında küreselliğe, mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi gösterilmiştir [21, 31 – 34].



Şekil 2.22 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde silisyum miktarının farklı soğuma hızlarında küreselliğe ve perlit oranına etkisi [21]



Şekil 2.23 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde silisyum miktarının farklı et kalınlıklarında küreselliğe, perlit oranına ve mekanik özelliklere etkisi [21]

Mangan, krom ve molibden dökme demirlerde karbür oluşumunu teşvik eder. Krom, kararlı ve yarı kararlı ötektik dönüşük sıcaklık aralıklarını etkilediği için çil oluşturun elementlerdendir [21].

2.7.3 Dökülebilirlik parametreleri

Sıvı metalin akışkanlığı büyük oranda karbon ve silisyum miktarı ve sıcaklıkla ilişkilidir. Ayrıca katılaşma morfolojisi de akışkanlıkta rol oynar [35]. Gri dökme demirler en iyi akışkanlık özelliklerine sahiptirler. En kötü akışkanlık özelliğini ise küresel grafitli dökme demirler gösterir. Beklenildiği gibi vermiküler grafitli dökme demirler ise bunların arasında bir akışkanlık gösterir [11].

2.7.3.1 Çekinti karakteristikleri

Vermiküler grafitli dökme demirlerde dış ve iç çekinti olmayan sağlam döküm parça elde etmek, küresel grafitli dökme demirlere göre daha kolay, gri dökme demirlere göre daha zordur [11, 17].

Kum kalıplara dökülen ötektik bileşimli dökümlerde, çekinti hacmi gri dökme demirler için %4,1; vermiküler grafitli dökme demirler için %4,8 ve küresel grafitli dökme demirler için %7,0 olduğu saptanmıştır [36]. Vermiküler grafitli dökme demirlerin düşük çekinti oranı sayesinde bazı durumlarda besleyicisiz olarak dökülebirlirler.

Bu nedenle aynı parça gri dökme demir yerine vermiküler grafitli dökme demir döküleceği zaman pahalı model değişiklikleri gerekli değildir ve aynı yolluk ve besleyici sistemi kullanılabilir [11].

2.7.4 Mekanik özellikler

Birçok yapısal parçanın kullanım halindeki davranışı yalnızca mekanik özelliklerinin değil aynı zamanda deformasyon özelliklerinin de bir fonksiyonudur. Bu nedenle birçok döküm parçanın yetersiz mukavemet nedeniyle değil, düşük deformasyon kapasiteleri nedeniyle başarısız olması şaşırtıcı değildir. Bu durum özellikle hızlı yükleme ve/veya termal gerilim koşulları altında geçerlidir. Bu tarz yüklemelere karşı hassas olan döküm bölgeleri bazı hasarlar ve kesit kalınlığında ani değişiklikler içerebilir. Yüksek mukavemetli gri dökme demir ile elde edilebilen yaklaşık %1 değerindeki uzama değerleri, dizel silindir kafaları gibi belirli tipteki uygulamalar için yetersizdir [37]. Vermiküler grafitli dökme demirler, küresel grafitli dökme demirlerinkine yakın değerlerde mukavemet özelliklerine ve gri dökme demirlere göre daha yüksek uzama değerlerine ve ayrıca ortalama düzeyde ısı iletkenliklere sahiptir. Bunların sonucunda da bazı uygulamalarda diğer dökme demirleri rahatlıkla geride bırakabilirler [11].

Çizelge 2.5 : Seryum treatmentı yapılmış vermiküler grafitli dökme demirin özelliklerinin gri dökme demir, yüksek dayanımlı gri dökme demir ve küresel grafitli dökme demir ile karşılaştırılması [38]

Özellik	Yüksek dayanımlı perlitik FGI (%100 perlit, %100 FG) (a)	FGI (%100 perlit, %100 FG) (b)	Seryum treatmentlı CGI (>%95 ferrit, >%95 CG) (b)	SGI (%100 ferrit) (b)
Kimyasal kompozisyon (%)	3,10 C, 2,10 Si, 0,60 Mn	3,61 C, 2,49 Si, 0,05 Mn	3,61 C, 2,54 Si, 0,05 Mn	3,56 C, 2,72 Si, 0,05 Mn
Çekme dayanımı (MPa)	317	110	336	438
%0,2 Akma dayanımı	-	-	257	285
Uzama (%)	-	-	6,7	25,3
Elastik modül (GPa)	108	96,9	158	176
Sertlik (HB)	200	156	150	159
20 C Charpy V Çentik darbe tokluğu (J)	-	-	9,32	24,5
-20 C Charpy V Çentik darbe tokluğu (J)	-	-	6,57	9,81
-40 C Charpy V Çentik darbe tokluğu (J)	-	-	7,07	6,18
Döner çubuk yorulma dayanımı (MPa)	127,5	49,0	210,8	250,0
Termal iletkenlik (W/cmK)	0,419	0,423	0,356	0,327

Vermiküler grafitli, küresel grafitli ve lamel grafitli dökme demirlerin bazı özellikleri arasındaki karşılaştırma Çizelge 2.5'te verilmiştir. Hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda vermiküler grafitli dökme demirlerin mekanik ve fiziksel özelliklerini etkileyen ana faktörler: bileşim, yapı (küresellik ve matris) ve parça boyutudur. Bunlara ek olarak vermiküler grafitli dökme demirlerin yapısı; hammadde türü, sıvı metalin aşırı ısıtma, bekletme süresi, treatment işlemi gibi değişkenlerden de büyük ölçüde etkilenir [11].

Çizelge 2.6 : ASTM A 842 standardına göre VGDD (CGI) özellikleri [11]

Türler	Minimum Kopma Mukavemeti (MPa)	Minimum Akma Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Sertlik, HB	BID (b), mm
250 (c)	250	175	3	179 max.	4,50 min
300	300	210	1.5	143-207	5,0-4,2
350	350	245	1	163-229	4,7-4,0
400	400	280	1	197-255	4,3-3,8
450 (d)	450	315	1	207-269	4,2-3,7

(a) Metal tipleri kopma mukavemet değerlerine göre sınıflandırılmıştır. (b) BID , Brinell baskı çapı 3000 kg yükte 10 mm bilya baskı izinin çapıdır. (c) Grade 250 ferritik yapıda olup istenen mekanik özelliklere ve mikroapıya ulaşmak için ısıtıl işlem imalatçı için bir seçenek olacaktır. (d) Grade 450 ise perlitik tür olup ısıtıl işlem uygulanmaksızın bazı alaşım elementlerinin ilavesiyle matrisin önemli kısmında perlitik yapı elde edilir.

2.7.4.1 Sertlik ve çekme özellikleri

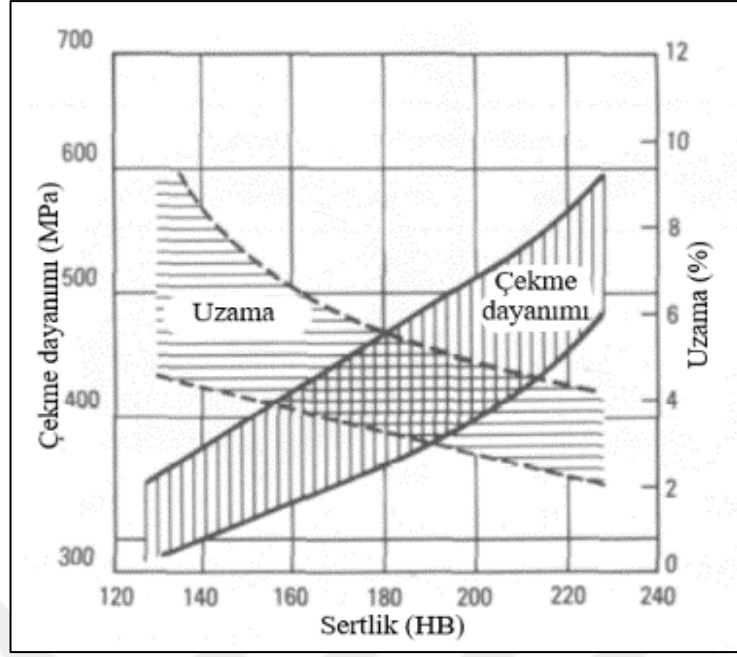
ASTM A 842 standardına göre vermiküler grafitli dökme demirlerin sahip olması gereken mekanik özellikler Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Farklı yöntemlerle üretilen vermiküler grafitli dökme demirlere ait çekme özellikleri Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7 : Oda sıcaklığındaki farklı vermiküler grafitli dökme demirlere ait çekme, sertlik ve termal iletkenlik özellikleri [37]

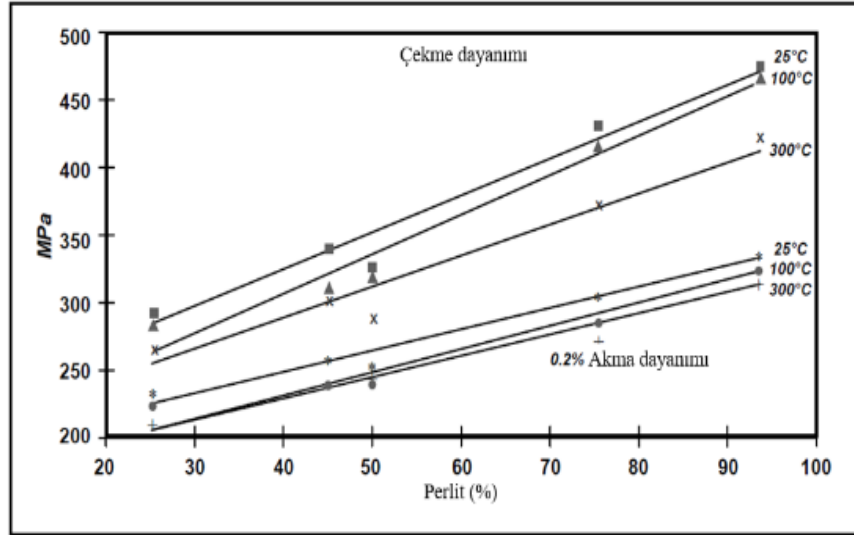
Yapısal Şartlar	Grafit Tipi	Çekme Dayanımı (MPa)	%0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
Ce ilavesi ile treatman				
Döküm halinde ferritik (> %95 F)	%95 CG, %5 SG	336	257	6,7
Ferritik-perlitik (%90 F, %10 P)	%95 CG, %5 SG	298	224	5,3
Döküm halinde ferritik (%90 F, %10 P)	%85 CG, %15 SG	371	267	5,5
%100 Ferritik	%85 CG, %15 SG	338	245	8,0
%100 Ferritik	CG	365 ± 63	278 ± 42	7,2 ± 4,5
Ferritik-perlitik (> %90 F, < %10 P)	> %90 CG	300 – 400	250 – 300	3 – 7
Ferritik-perlitik (%85 F)	%70 CG, %30 SG	320	242	3,5
Perlitik (%90 P, %10 F)	%90 CG	450 – 550	320 – 430	0,5 – 1,5
Perlitik (%95 P, %5 F)	%80 CG, %20 SG	410	338	1
Mg + Ti + Ce ilavesi ile treatman				
Döküm halinde ferritik (%0,04 Ce, <%0,01 Mg, %0,28 Ti)	%95 CG, %5 SG	319	264	4
%100 Ferritik (tavlanmış) (%0,018 Mg, %0,089 Ti, %0,032 As)	CG	292	225	6
Döküm halinde ferritik (%0,017 Mg, %0,062 Ti, %0,036 As)	CG	380	272	2
Döküm halinde ferritik (%0,024 Mg, %0,084 Ti, %0,030 As)	CG	388	276	2,5
Döküm halinde perlit (%0,016 Mg, %0,094 Ti, %0,074 As)	CG	414	297	2
Döküm halinde perlit (%0,026 Mg, %0,083 Ti, %0,074 As)	CG + SG	473	335	2
Döküm halinde perlit (%70 P, %30 F)	CG	386	378	2

F: Ferrit, P: Perlit

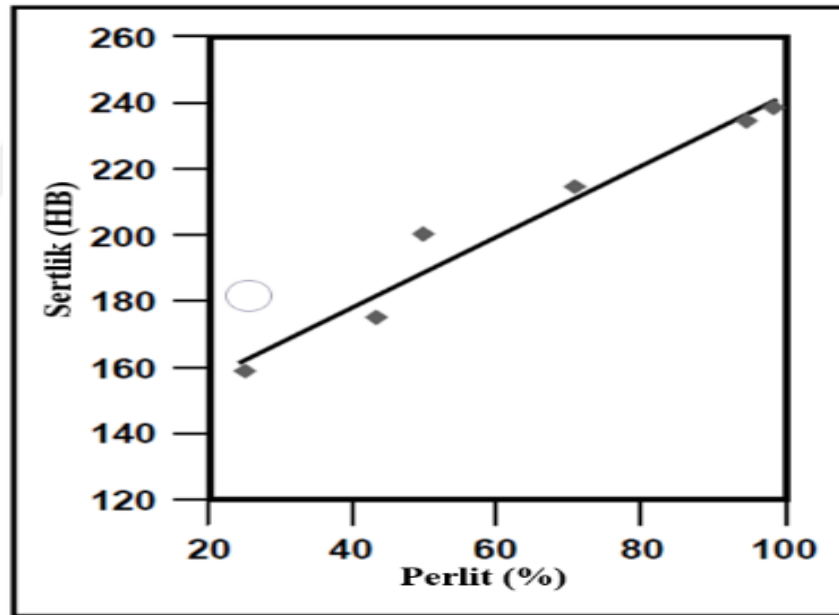


Şekil 2.24 : Vermiküler grafitli dökme demirlerin sertlik ve çekme dayanımı arasındaki ilişki [39]

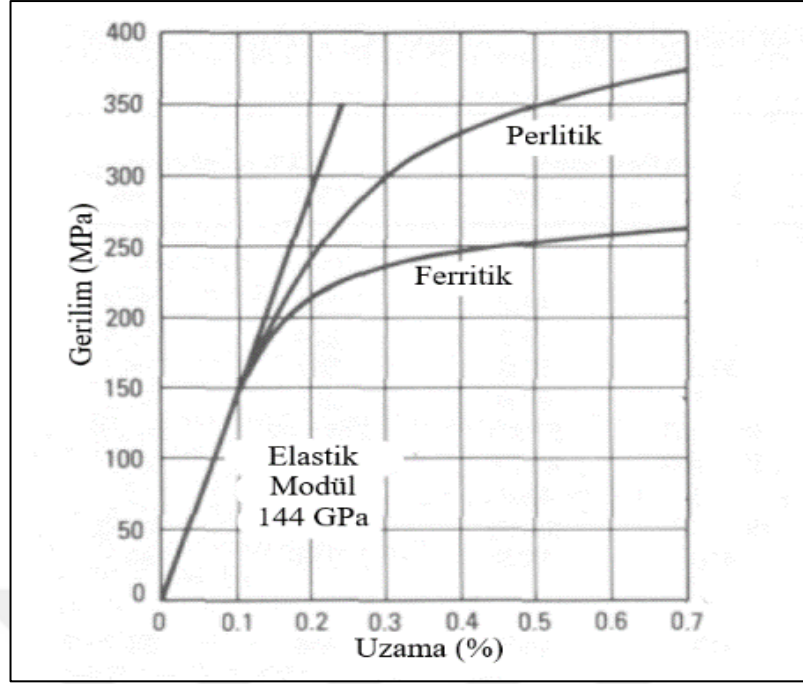
Diğer dökme demirlerde olduğu gibi vermiküler grafitli dökme demirlerde de sertlik arttıkça çekme mukavemeti artar ancak uzama azalır (Şekil 2.24). Perlitik ve ferritik matrisli vermiküler grafitli dökme demirler için çekme diyagramı Şekil 2.27’de verilmiştir. Küresel grafitli, lamel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerin sertlik ve mukavemetinin karşılaştırması Şekil 2.28’deki grafikte gösterilmiştir. Lamel grafitli dökme demirler için çekme mukavemetinin sertliğe oranı 1,3’tür, bu oran vermiküler grafitli dökme demirler için 2,08 ve küresel grafitli dökme demirler için 2,75’tir. Vermiküler grafitli dökme demirlerin bu ara davranışı ve kükürt içeriğinin etkisi kayda değerdir. Genel olarak vermiküler grafitli dökme demirlerin yapısındaki yüksek ferrit miktarından dolayı, eşit mukavemete sahip lamel grafitli dökme demirden daha düşük sertliğe sahiptir. Şekil 2.29’da gösterildiği gibi aynı uzama değerinde vermiküler grafitli dökme demirler, küresel grafitli dökme demirlerden daha az akma dayanımına sahiptirler [11]. Şekil 2.25’de %10’a kadar küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirlerin akma ve çekme dayanımının perlit oranıyla ilişkisi, Şekil 2.26’da %10’a kadar küresellik içeren alaşımsız vermiküler grafitli dökme demirlerin sertliğinin perlit oranıyla ilişkisi verilmiştir.



Şekil 2.25 : %10'a kadar küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirin farklı sıcaklıklardaki akma ve çekme dayanımına perlit oranının etkisi [40]



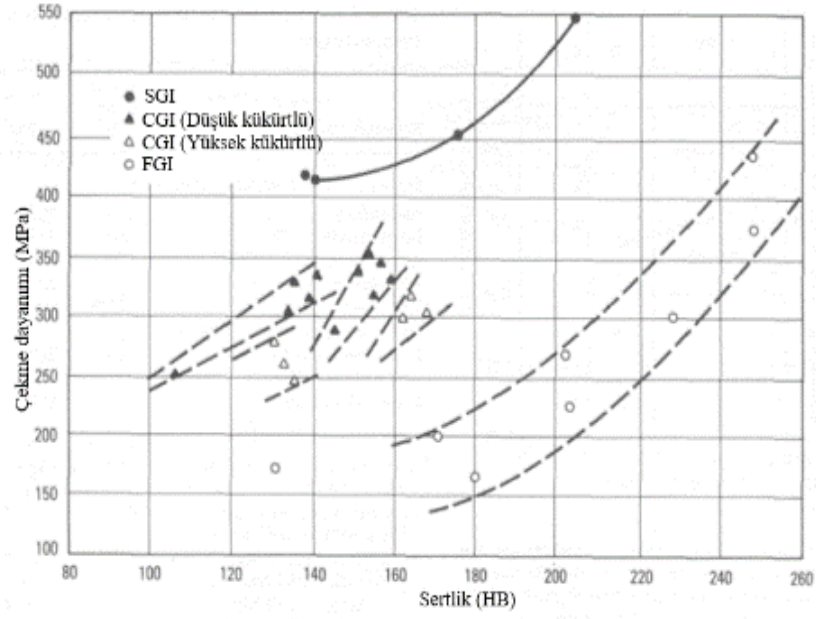
Şekil 2.26 : %10'a kadar küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirin sertliğinin perlitte oranı ile ilişkisi [40]



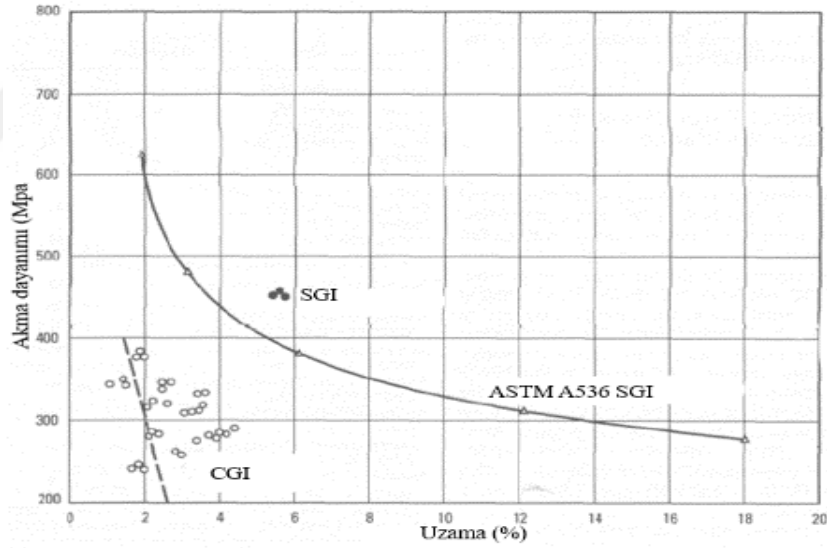
Şekil 2.27 : Vermiküler grafitli dökme demirler için tipik çekme diyagramı. Perlitik CGI 410 MPa çekme dayanımına ve %1 uzamaya; ferritik CGI 320 MPa çekme dayanımına ve %3,5 uzamaya sahip [41]

Vermiküler grafitli dökme demirlerin çekme özellikleri, karbon eşdeğerindeki değişikliklere karşı gri dökme demirlere göre çok daha az hassastır. %4,3 ötektik değerine yakın karbon eşdeğerinde bile, hem perlitik CGI hem de ferritik CGI düşük karbon eşdeğerine sahip alaşımsız gri dökme demirlerden daha yüksek mukavemet değerlerine sahiptir (Şekil 2.30) [11].

Silisyum içeriğinde %2,6'ya kadar olan artış, hem döküm hem de tavlanmış koşullarda mukavemet ve sertlik sağlar (Şekil 2.31). Bu durum, matris ferritik olsa bile geçerlidir çünkü silisyum ferriti güçlendirir. Aynı durum döküm halindeki uzama durumunda da geçerlidir çünkü silisyum miktarındaki artışla beraber perlit oranında azalma görülür ancak tavlanmış durumda uzama değeri azalır [18]. Fosfor içeriğinin artması da mukavemeti bir miktar iyileştirmesine rağmen, düşük süneklik ve düşük darbe dayanımından kaçınmak için maksimum %0,04 fosfor içeriği önerilir [11].

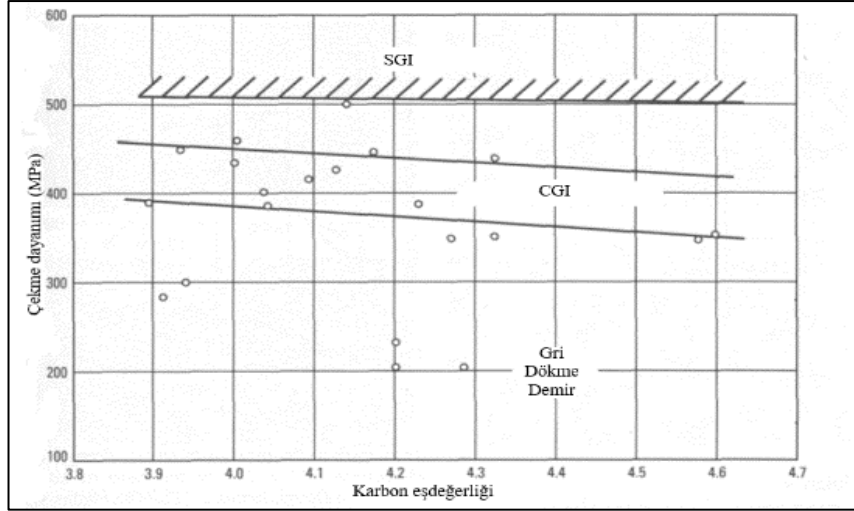


Şekil 2.28 : Küresel grafitli, lamel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerin çekme dayanımı ve sertliğinin karşılaştırılması [18]



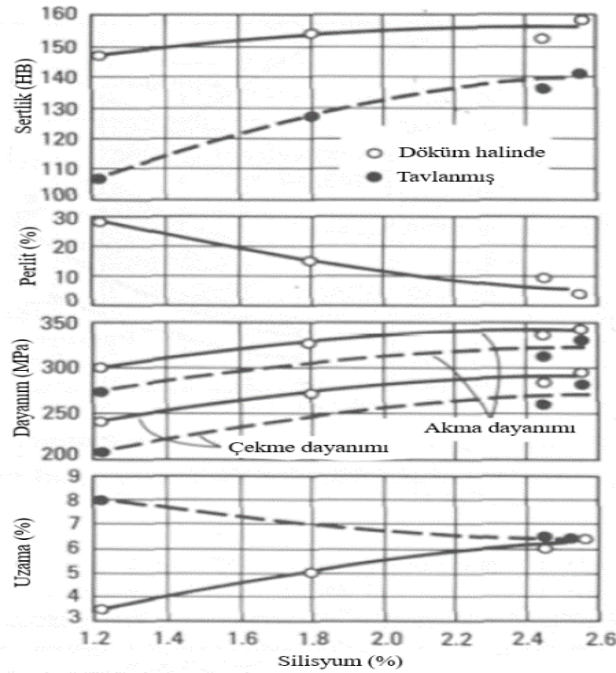
Şekil 2.29 : Vermiküler grafitli ve küresel grafitli dökme demirlerde akma dayanımı ve uzama değerleri arasındaki ilişki [39]

Vermiküler grafitli dökme demirlerde bakır, nikel, molibden, mangan, kalay, arsenik, vanadyum ve alüminyum gibi alaşım elementleri kullanılarak perlit/ferrit oranı artırılabilir ve dolayısıyla mukavemet ve sertlik artırılabilir [22, 23, 25, 42, 43].

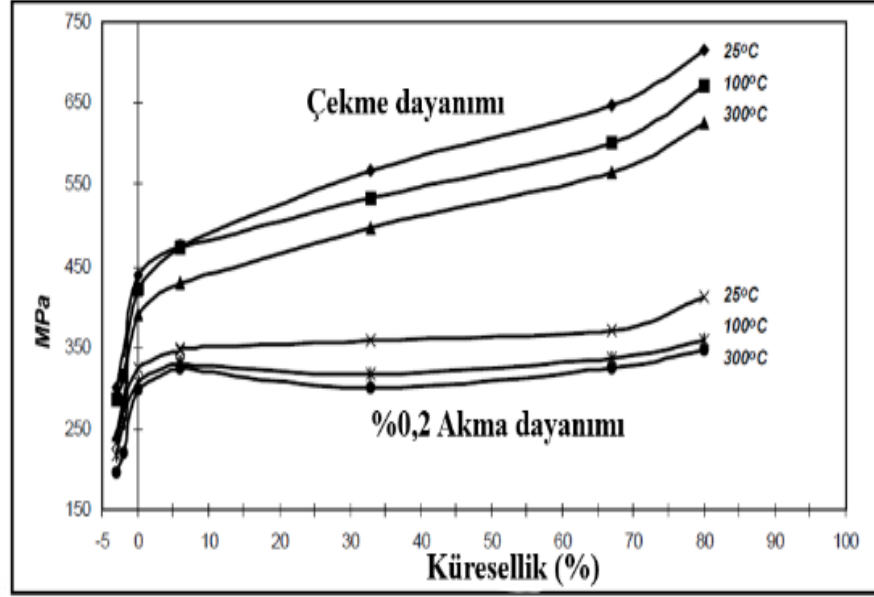


Şekil 2.30 : 30 mm çapında çubuklar şeklinde dökülen lamel grafitli, küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerde karbon eşdeğerliğinin çekme dayanımına etkisi [17]

Bakır ve molibdenin vermiküler grafitli dökme demirlerin çekme özelliklerine etkisi Şekil 2.33’de gösterilmektedir. Vermiküler grafitli dökme demirleri tamamen ferritik bir yapıya tavlandıktan sonra %1,5 nikel kullanımı ile akma noktasını %24 artırmak mümkündür (Çizelge 2.9). Bunun nedeni katı çözeltilerin nikel ile güçlendirilmesidir [18]. Bunlara ek olarak bakır, nikel ve molibden ilaveleri küreselliği artırabilir [37].



Şekil 2.31 : Vermiküler grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerine Silisyum’un etkisi. Karbon eşdeğerliği 4,33 – 4,45 aralığındadır [18]

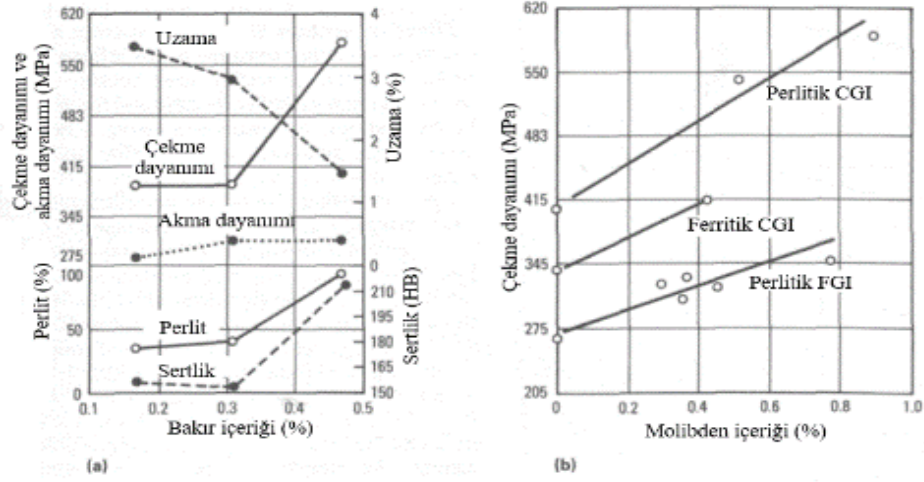


Şekil 2.32 : %85 – 100 oranında perlit içeren dökme demirlerin farklı sıcaklıklardaki akma ve çekme dayanımının küresellik oranı ile ilişkisi [40]

Vermiküler grafitli dökme demirlerin çekme özelliklerini etkileyen en önemli değişkenlerden biri de küreselliktir. Çizelge 2.10 ve Şekil 2.34’de görüldüğü gibi yapıdaki küresellik arttıkça daha yüksek mukavemet ve uzama beklenir. Ancak vermiküler grafitli dökme demirin standartlara uygun olabilmesi için küresellik oranının en fazla %20 olması gerekmektedir. Bunlara ek olarak et kalınlığı küreselliği etkileyen önemli etmenlerdendir. Yüksek soğuma hızları, küresel grafit oluşumuna ve ince perlit oluşumuna neden olabilir. Kalın kesitlerde (> 6 mm) %10 küresellik içeren bir vermiküler grafitli dökme demir parçası, yolluk sistemi ve parça tasarımına bağlı olarak ince kesitli bölgelerde (< 4 mm) %30-60 arası küresellik sergileyebilir. Bu durum bazı durumlarda avantaj sağlayabilir. Örnek olarak motor bloklarındaki su ceket ve karter yuvaları gibi ince kesitli bölgelerde yüksek küresellik oranı daha fazla sertlik ve mukavemet sağlar ve bu durum parçanın yararına olabilir. Çizelge 2.8’de ve Şekil 2.32’de perlitik matrisli vermiküler grafitli dökme demirlerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin küresellik oranı ile ilişkisi verilmiştir [11, 15].

Çizelge 2.8 : Perlitik matrisli vermiküler grafitli dökme demirlerin 25 °C sıcaklıkta mekanik ve fiziksel özelliklerinin küresellik oranı ile ilişkisi [15]

Özellik (25 °C)	(%) Küresellik				
	10	30	50	70	90
Kopma Mukavemeti (MPa)	450	520	590	640	700
%0.2 Akma Mukavemeti (MPa)	370	390	410	440	490
Yorulma Dayanımı (MPa)	210	220	230	240	255
Elastik Modül (GPa)	145	150	155	155	160
Uzama (%)	1-2	1-3	2-4	2-5	3-6
Isıl Genleşme ($\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$)	11	11	11	11.5	12
Termal iletkenlik ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$)	36	33	31	30	28



Şekil 2.33 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde (a) bakır ve (b) molibdenin çekme özelliklerine etkisi [22]

Daha önce de bahsedildiği gibi perlit/ferrit oranı çeşitli alaşım elementleri kullanılarak artırılabilir. Bu oranı artırmanın ya da azaltmanın başka bir yolu da ısıl işlemdir. %20 küresellik içeren vermiküler grafitli dökme demirlerde ısıl işlemin mekanik özelliklere etkisi Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde ısıt işlemin ve nikel ile alaşımlamanın mekanik özelliklere etkisi [11]

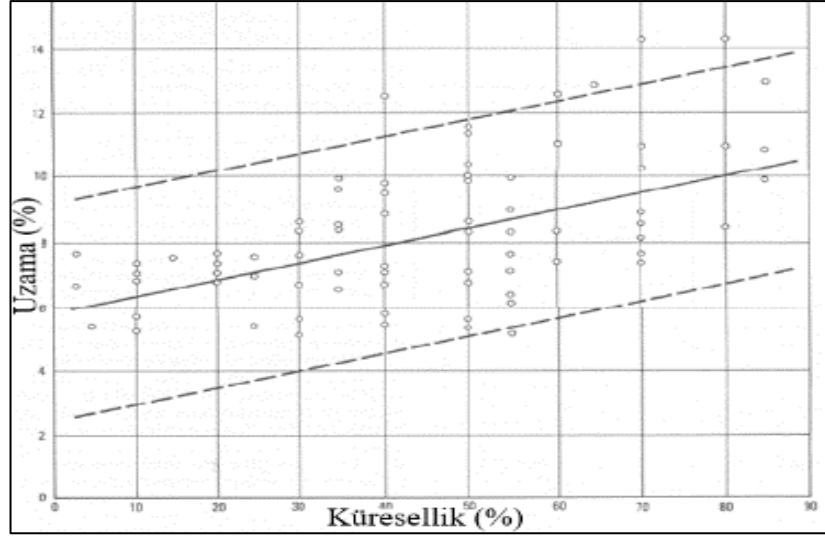
Isıl İşlem	Matriks	Kopma Muk. (MPa)	Akma Muk. (MPa)	% Uzama	Sertlik (HB)	% Nikel
Ham döküm	%60 F	325	263	2,8	153	0
Tavlanmış (b)	%100 F	294	231	5,5	121	0
Normalize tavlı (c)	%90 P	423	307	2,5	207	0
Ham döküm		427	328	2,5	196	1,53
Tavlanmış (b)	%100 F	333	287	6	137	1,53
Normalize tavlı (c)	%90 P	503	375	2	235	1,53

(a) F , ferrit ; P, perlit (b) Tavlanmış ; 900 °C de 2 saat tavlanmış , 690 °C ocakta soğutulduktan sonra , 12 saat havada soğutulmuştur. (c) 900 °C de 2 saat normalizasyon tavlı uygulanmış olup havada soğutulmuştur.

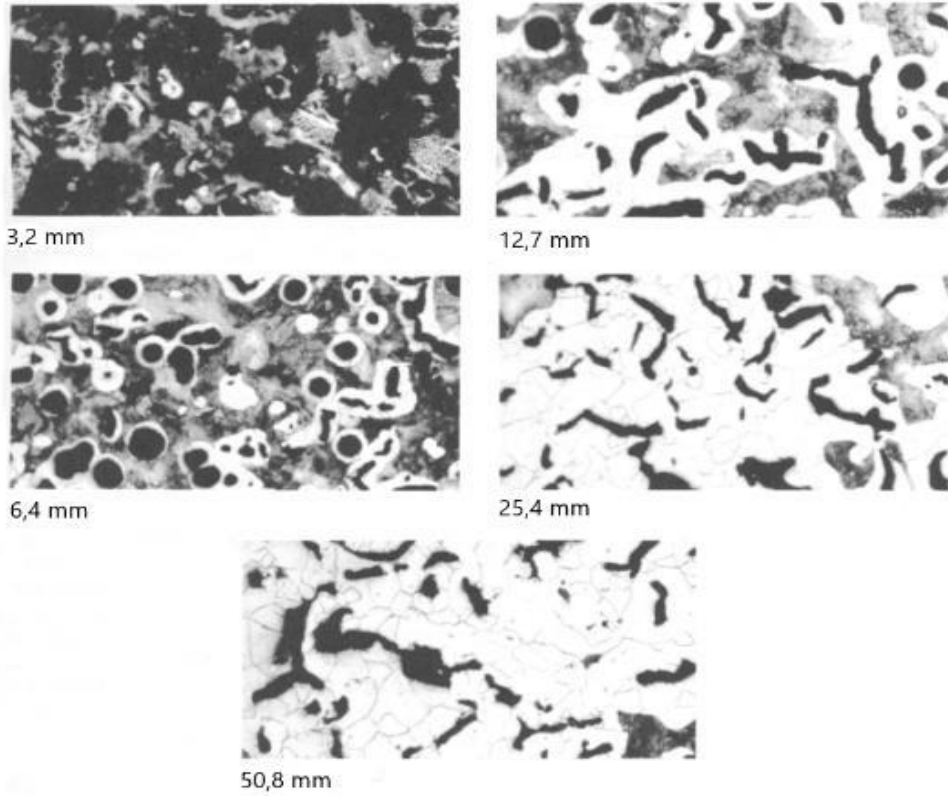
Çizelge 2.10 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde küreselliğin çekme dayanımına, uzamaya, termal iletkenliğe ve çekinti yüzdesine etkileri [11]

% Küresellik	Kopma Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Termal İletkenlik W / (m.K)	% Çekinti
10-20	320-380	2-5	50-52	1,8-2,2
20-30	380-450	2-6	48-50	2,0-2,6
40-50	450-500	3-6	38-42	3,2-4,6

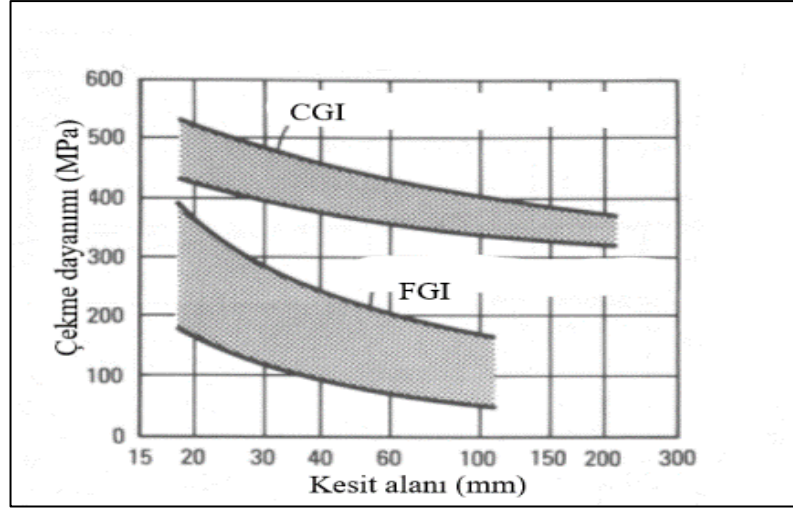
Diğer tüm dökme demirler gibi, vermiküler grafitli dökme demirler de hem perlit/ferrit oranını hem de grafit morfolojisini etkilediği için soğuma hızının etkisine (yani et kalınlığına) karşı oldukça hassastır. Yüksek soğuma hızları daha fazla perlit oranı ve artan küresellik oranı sağlar. Et kalınlığının vermiküler grafitli dökme demirin mikroyapısı üzerindeki etkisi Şekil 2.35’de gösterilmiştir. Vermiküler grafitli dökme demirler, et kalınlığına gri dökme demirden daha az duyarlı olmasına rağmen (Şekil 2.36) soğuma hızının etkisi oldukça önemli olabilir. Et kalınlığı 10 mm’nin altına düştüğünde artan küresellik ve çil oluşturma eğilimi dikkate alınmalıdır. Isıl işleme beraber çil oluşumundan kaynaklanan karbürlerin elimine edilmesi mümkün olsa da grafit morfolojisini değiştirmek imkansızdır [11].



Şekil 2.34 : Ferritik matrisli vermiküler grafitli dökme demirlerde küresellik ve uzama ilişkisi [11]



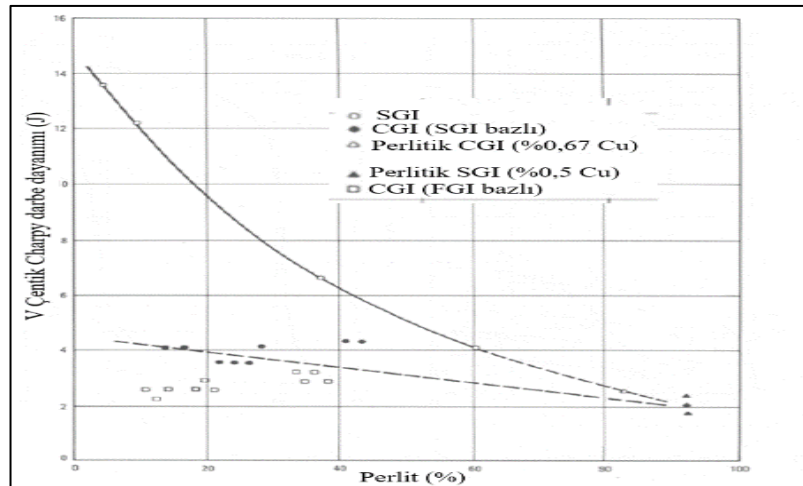
Şekil 2.35 : Vermiküler grafitli dökme demirlerde et kalınlığının mikroyapıya etkisi (100x büyütme) [11]



Şekil 2.36 : Lamel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerde et kalınlığının çekme dayanımına etkisi [11]

2.7.4.2 Darbe özellikleri

Küresel grafitli dökme demirler, düşük perlit içeriklerinde önemli derecede yüksek tokluk sergilerken, perlitik vermiküler grafitli dökme demirler, küresel grafitli dökme demirlerinkine yakın derecede darbe dayanımları sergiler (Şekil 2.37). 21 °C ve -41 °C sıcaklıklarda yapılan Charpy darbe deneyi ölçümlerinde, vermiküler grafitli dökme demirlerin, gri dökme demirlerden daha fazla enerji absorbe ettiği görülmüştür [23]. Vermiküler grafitli dökme demirlerin darbe dayanımı genellikle karbon eşdeğeri ile artar; artan perlit içeriği ve artan fosfor içeriği ile azalır [11].



Şekil 2.37 : Küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerin 21 °C sıcaklıktaki darbe dayanımlarına perlit oranının etkisi [18]

Çizelge 2.11’de görüldüğü üzere, seryum ile tretman işlemi yapılmış vermiküler grafitli dökme demirler, magnezyum-titanyumla tretman işlemi yapılmış vermiküler grafitli dökme demirlerden daha yüksek bir darbe enerjisi sergilemektedir. Bunun nedeni, magnezyum-titanyumla tretman işlemi yapılan vermiküler grafitli dökme demirlerin matrisinde bulunan TiC ve TiCN inklüzyonlarıdır [37].

Çizelge 2.11 : Seryum ve magnezyum-titanyumla tretman işlemi uygulanmış vermiküler grafitli dökme demirlerin darbe toklukları [37]

Treatman elementi	Yapı	Test Sıcaklığı (C)	Çentiksiz Charpy darbe tokluğu (J)	Çentikli Charpy darbe tokluğu (J)
Seryum	> %95 ferrit (döküm halinde); %95 CG, %5 SG	20	32,1	6,5
		-20	26,5	4,6
		-40	26,7	5,0
Magnezyum (%0,018) ve titanyum (%0,089)	%100 ferrit (tavlanmış); CG	20	13,5 – 19	5,4
Magnezyum (%0,017) ve titanyum (%0,062)	Ferritik (döküm halinde); CG	20	6,8 – 10,2	3,4

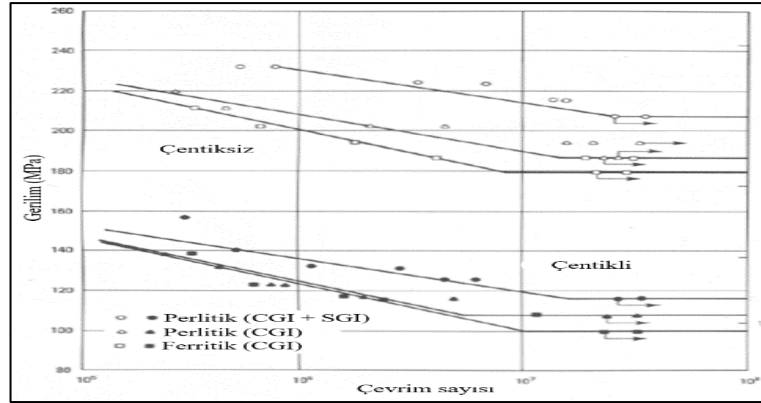
2.7.4.3 Yorulma Özellikleri

Vermiküler grafitli dökme demirdeki çentik etkisi, grafit yapısından dolayı gri dökme demirden oldukça düşük olduğu için vermiküler grafitli dökme demirler daha yüksek yorulma dayanımına sahiptir (Çizelge 2.5). Çizelge 2.12’de farklı yapılarıdaki vermiküler grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımları listelenmiştir. 150 Brinell sertliğindeki ferritik matrisli (> %95 ferrit) vermiküler grafitli dökme demir en yüksek yorulma dayanımına ve en yüksek dayanma oranına (yorulma dayanımının çekme dayanımına oranı) sahiptir. Farklı yapılarıdaki vermiküler grafitli dökme demirlerin yorulma eğrileri Şekil 2.38’de gösterilmiştir. Perlitik yapılı, yüksek küresellik içeren ve çentiksiz numunelerin daha iyi yorulma dayanımı sağladığı açıktır [11].

Çizelge 2.12 : Farklı yapılardaki vermiküler grafitli dökme demirlerin yorulma dayanımı ve dayanma oranı [37]

Matris Yapısı	Grafit Tipi	Kopma Mukavemeti (Mpa)	Yorulma Dayanımı (Mpa)	Yorulma Dayanımı Oranı	Sertlik (HB)
Ham döküm ferritik (>%95 ferrit)	%95 CG	336	211	0,63	150
Ham döküm ferritik	CG	338	178	0,46	184
Ham döküm perlitik	CG	414	185	0,45	205
Ham döküm perlitik	CG + SG	473	208	0,44	217
Ham döküm perlitik (%70 perlitik)	CG	386	186	0,48	197

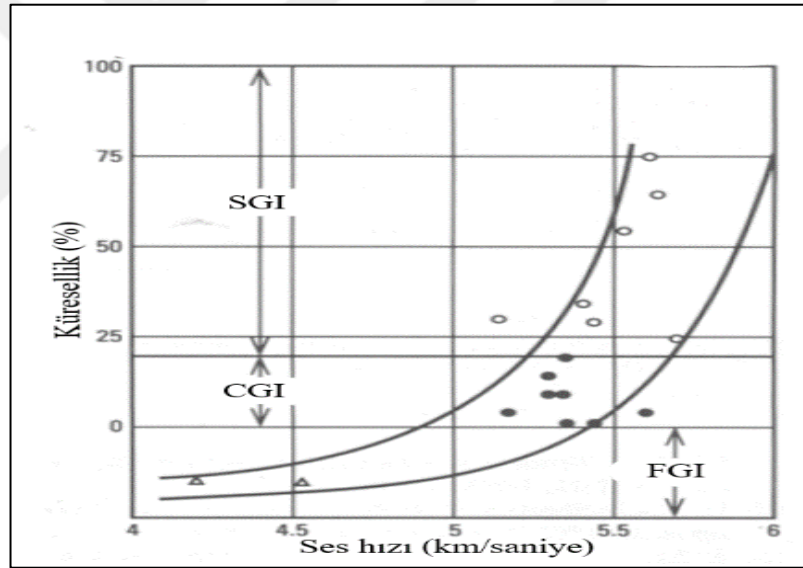
Yorulma dayanım oranı, ferritik matrisli bir vermiküler grafitli dökme demir için 0,46; perlitik matrisli vermiküler grafit için 0,45 ve yüksek küresellik içeren perlitik matrisli vermiküler grafitli dökme demir için 0,44 olarak bulunmuştur [11]. Vermiküler grafitli dökme demirlerin yorulma çentik faktörü (çentiksiz yorulma dayanımının çentikli yorulma dayanımına oranı) 1,71-1,79 arasındadır ve bu değere göre vermiküler grafitli dökme demirler neredeyse küresel grafitli dökme demirler (>1,85) kadar çentik hassasiyeti vardır. Gri dökme demirler ise 1,5'tan az yorulma çentik faktörüne sahiptir ve çentik hassasiyeti diğer dökme demirlere göre daha azdır [37].



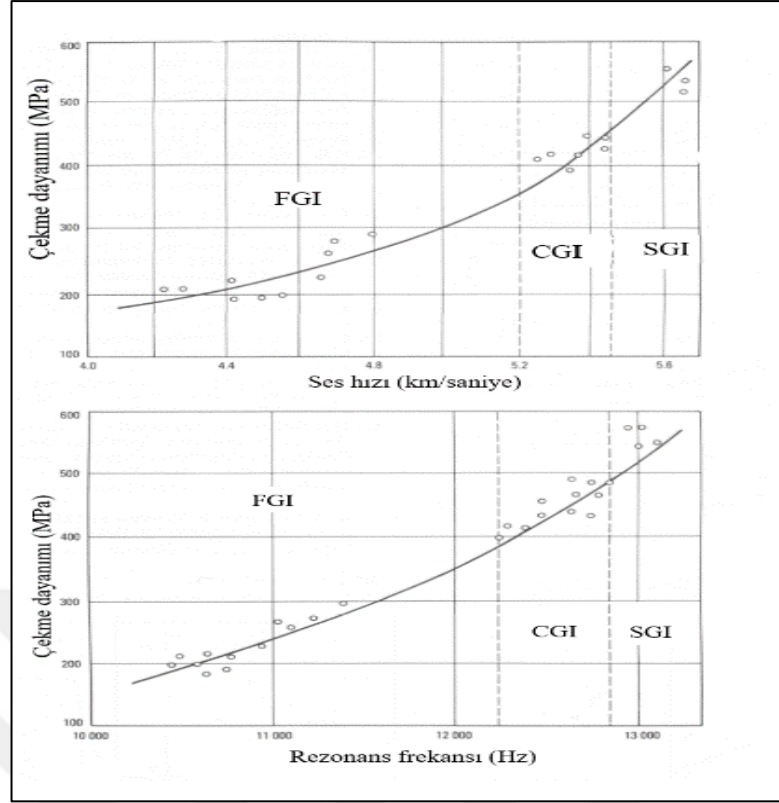
Şekil 2.38 : Farklı yapılardaki vermiküler grafitli dökme demirlerin yorulma eğrileri [11]

2.7.4.4 Sonik ve ultrasonik özellikler

Rezonans frekansı (sonik test) ve ultrasonik ses hızı ölçümleri, döküm parçaların yapısını ve özelliklerini doğrulamak için kullanılan güvenilir yöntemlerdendir. Şekil 2.39’da görüldüğü gibi, ultrasonik ses hızı, küresellik ile doğrudan ilişkilidir. Küresellik oranı arttıkça ses hızı da artmaktadır. En yüksek ses hızı küresel grafitli dökme demirlerde görülürken, en düşük ses hızı gri dökme demirlerde görülür. Vermiküler grafitli dökme demirler ise bunların arasında ses hızına sahiptir. Ne yazık ki vermiküler grafitli dökme demirler ve düşük küresellik içeren küresel grafitli dökme demirler arasında ayırım yapmak oldukça zordur. Ultrasonik ses hızı çekme dayanımıyla da ilişkilidir. Şekil 2.40’da 30 mm çapındaki test numuneleri için çekme dayanımı ile ultrasonik ses hızı ya da rezonans frekansı arasındaki ilişki gösterilmiştir [11].



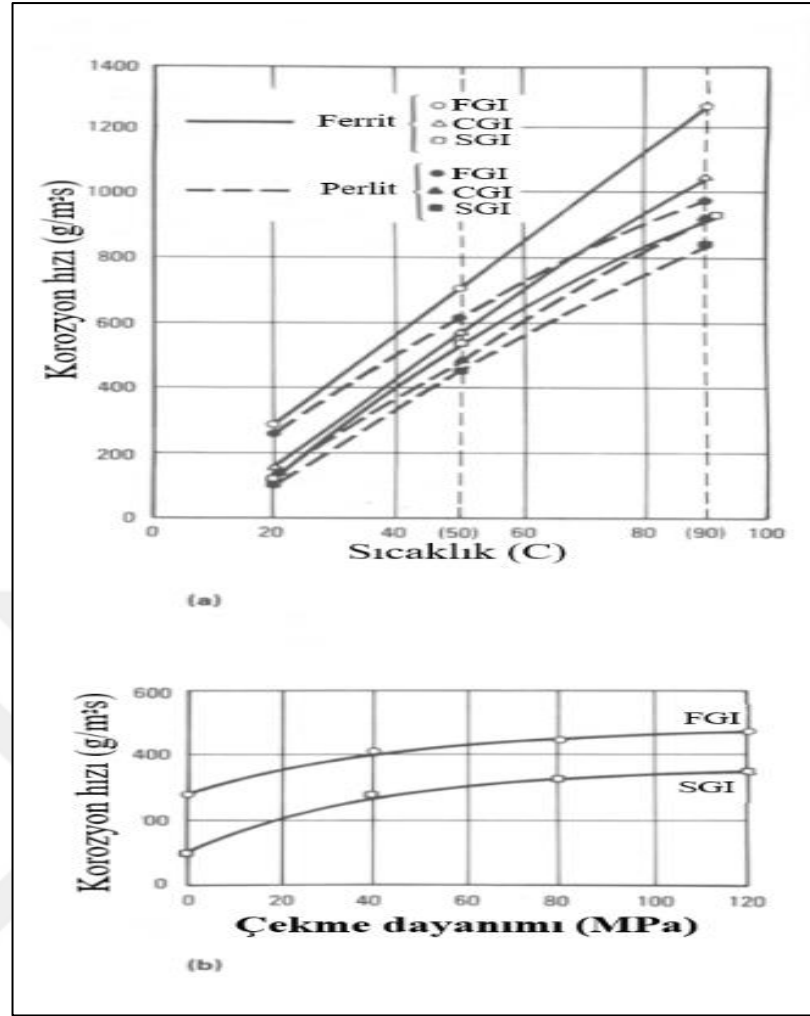
Şekil 2.39 Dökme demirlerde küresellik miktarı ile ultrasonik ses hızı arasındaki ilişki [22]



Şekil 2.40 : Farklı dökme demirlerin çekme dayanımının ultrasonik ses hızı ve rezonans frekansı ile ilişkisi [17]

2.7.4.5 Korozyon dayanımı

Vermiküler grafitli dökme demirlerin oda sıcaklığında %5 sülfürik asit içindeki korozyon hızı, lamel grafitli dökme demirlerin neredeyse yarısıdır ancak küresel grafitli dökme demirlerden daha yüksektir (Şekil 2.41 ve Çizelge 2.13). Artan sıcaklıklarla aradaki fark küçülür. Perlitik matris, ferritik matristen daha iyi korozyon direncine sahiptir. Gerilme uygulandığında korozyon hızlanır [11].



Şekil 2.41 : (a) sıcaklığın ve (b) çekme dayanımının dökme demirlerde korozyon davranışı üzerine etkisi [11]

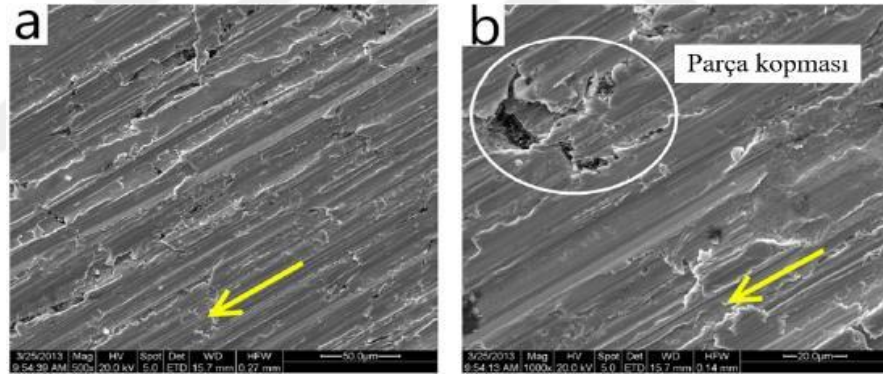
Çizelge 2.13 : Dökme demirlerde korozyon hızına sıcaklığın ve matrisin etkisi [11]

Dökme Demir Tipi	Matriks	Korozyon Hızı (g/m²saat)		
		20 °C	50 °C	90 °C
Gri dökme demir	Ferritik	280	587	1280
	Perlitik	262	590	980
Vermiküler grafitli dökme demir	Ferritik	142	563	1037
	Perlitik	139	478	920
Sfero dökme demir	Ferritik	123	536	923
	Perlitik	99	480	842

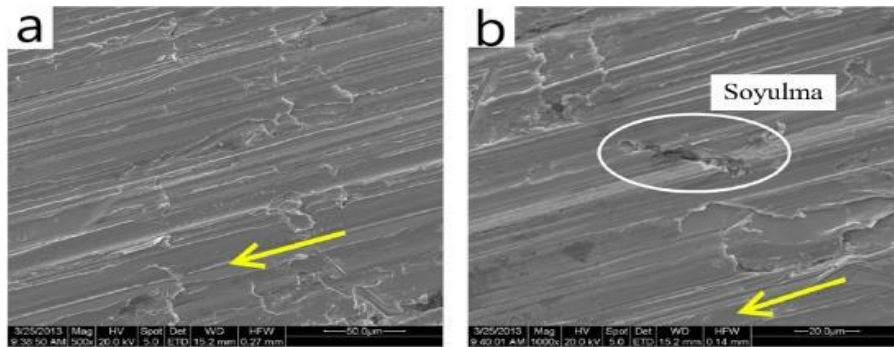
2.7.4.6 Aşınma dayanımı

Genel olarak vermiküler grafitli dökme demirler aşınmaya maruz kaldığı durumlarda gri dökme demirlerin yaklaşık yarısı kadar aşınma gösterir. Vermiküler grafitli dökme demirlerin, gri dökme demire kıyasla gösterdiği bu üstün aşınma dayanımı ile beraber vermiküler grafitli dökme demirlerin silindir gömleği gibi aşınmaya maruz kalan parçalarda kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır [40, 44, 45].

Vermiküler grafitli dökme demirlerin aşınma özellikleri kalay ilavesi ile iyileştirilebilir. Kalay ilavesi ile grafitlerin boyutları küçülür ve matristeki perlit oranı artar. Kalay ilave edilen ve ilave edilmeyen vermiküler grafitli dökme demirlerin aşınma testi ile Şekil 2.42 ve Şekil 2.43'deki sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 2.42 ve Şekil 2.43'de de görüldüğü üzere kalay ilave edilmemiş numunenin aşınması sırasında numuneden parça koptuğu gözlemlenmiş; kalay ilave edilmiş numunede ise parça kopması yerine soyulma görülmüştür.



Şekil 2.42 : Kalay ilavesi bulunmayan vermiküler grafitli dökme demirin (a) 500 büyütme ve (b) 1000 büyütmede aşınma yüzeyleri, sarı ok aşınma yönünü göstermektedir [46]



Şekil 2.43 : Kalay ilavesi edilen vermiküler grafitli dökme demirin (a) 500 büyütme ve (b) 1000 büyütmede aşınma yüzeyleri, sarı ok aşınma yönünü göstermektedir [46]

2.7.5 Fiziksel özellikler

Dökme demirlerin başarılı bir şekilde üretilmesi için önemli olan fiziksel özellikler arasında yoğunluk, ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenlik, spesifik ısı, manyetik özellikler, elektriksel direnç ve titreşim sönümleme kapasitesi gibi özellikler bulunmaktadır [11].

2.7.5.1 Mikro bileşenlerin etkileri

Vermiküler grafitli dökme demirlerin fiziksel özelliklerinden olan yoğunluk, termal iletkenlik ve elektriksel iletkenlik, yapının içinde bulunan bileşenlerden ve özellikle de grafit şekli ve dağılımından önemli ölçüde etkilenir [11]. Çizelge 2.14’de, dökme demirlerdeki temel bileşenlerin yoğunlukları ve termal iletkenlikleri listelenmiştir.

Çizelge 2.14 : Dökme demirlerdeki mikro bileşenlerin yoğunluğu ve termal iletkenliği [11]

	Yoğunluk (a) (g / cm ³)	Termal İletkenlik (b) (W/mK)
Ferrit	7,86	70-80
Östenit	7,84	
Perlit	7,78	50
Sementit	7,66	7
Martenzit	7,63	
Fosfor Ötektiği	7,32	
Grafit	2,25	80-85 (c)

(a) 20 °C’de (b) 0’dan 100 °C’ye kadar (c) C eksenini boyunca

2.7.5.2 Yoğunluk

Yoğunluk terimi, katı bir malzemenin birim hacmi başına kütlesini ifade eder ve genellikle g/cm³ olarak gösterilir. Dökme demirlerde yoğunluk değeri, yapıdaki mikro bileşenlere, kimyasal bileşime ve sıcaklığa bağlıdır. Oda sıcaklığında dökme demirlerde oluşan çeşitli fazların ve yapıların yoğunluğu Çizelge 2.14’de listelenmiştir. Kimyasal bileşim, mevcut mikro bileşenlerin miktarının yanı sıra yoğunluğu da etkilemektedir. Grafitlerin yoğunluğu düşüktür ve bundan dolayı bir dökme demirde ne kadar çok miktarda grafit varsa yoğunluk da o kadar düşük olur. Bileşimdeki silisyum da yoğunluğu düşürmektedir [11].

Çizelge 2.15’de gösterildiği gibi vermiküler grafitli dökme demirlerin yoğunluğu, lamel grafitli ve küresel grafitli dökme demirlerin yoğunluğuna yakındır.

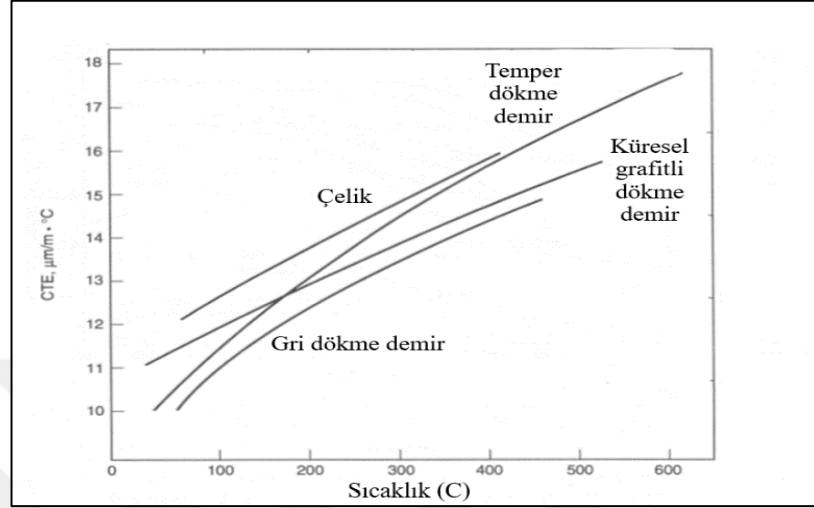
Çizelge 2.15 : Farklı dökme demir türleri için oda sıcaklığındaki yoğunluk değerleri [47]

Dökme demir türü	Yoğunluk (g/cm ³)
Yüksek karbonlu ferritik gri dökme demir	6,80
Orta karbonlu gri dökme demir (ferritik ve perlitik)	7,05
Düşük karbonlu gri (perlitik)	7,28 – 7,40
Yüksek karbonlu sfero dökme demir (ferritik)	7,10
Yüksek karbonlu sfero dökme demir (perlitik)	7,15
Temper dökme demir (ferritik)	7,27
Vermiküler grafitli dökme demir (ferritik)	7,0 – 7,20
Temper dökme demir (perlitik)	7,29 – 7,33
Alaşımız beyaz dökme demir	7,6 – 7,8
Yüksek silisyumlu gri dökme demir	6,8 – 7,2
Yüksek silisyumlu sfero dökme demir	7,10
Yüksek nikelli östenitik gri dökme demir	7,4 – 7,6
Östenitik nicrosilal	7,2 – 7,40
Yüksek kromlu beyaz dökme demir	7,3 – 7,5
Yüksek alüminyumlu gri dökme demir	5,5 – 6,4

2.7.5.3 Termal genleşme

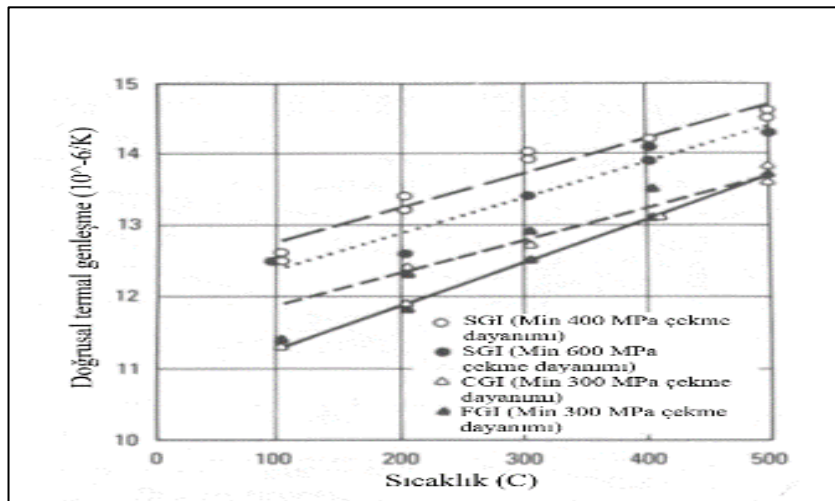
Termal genleşme katsayısı, belirli bir sıcaklıkta birim sıcaklık değişikliğine eşlik eden uzunluk (ya da hacim) birimindeki değişiktir. Dökme demirlerde ısı genleşme katsayısı genel olarak matris yapısına bağlıdır. Ancak az da olsa sıcaklık, grafit yapısı ve kimyasal bileşimden de etkilenir [11].

Şekil 2.44’de bazı dökme demir türlerinin ve sade karbonlu çeliğin termal genleşme katsayısı kıyaslanmıştır.



Şekil 2.44 : Dökme demirlerin ve sade karbonlu çeliğin termal genleşme katsayıları [47]

Ferritik ya da martensitik matrisli dökme demirlerin termal genleşme katsayısı, perlitik matrisli dökme demirlerin termal genleşme katsayısından genellikle bir miktar yüksektir [43]. Gri dökme demirdeki grafit tipleri, termal genleşme katsayısına önemli bir etki etmez. Vermiküler grafitli dökme demirlerin termal genleşme katsayısı genellikle gri dökme demir ve küresel grafitli dökme demir arasındadır (Şekil 2.45) [11].



Şekil 2.45 : Lamel grafitli, küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerin doğrusal termal genleşmeleri [11]

2.7.5.4 Termal İletkenlik

Çeliğe kıyasla termal iletkenlik ve elektrik iletkenliği

termal iletkenlik

Çelik

Elektrik iletkenliği

Küresel

Grafit tipi

Lamel

SGI

Dökme demir türü

FGI

Çizelge 2.14’de görüldüğü üzere, mikroyapı da termal iletkenliği etkileyen faktörlerdendir. Grafit, dökme demirlerdeki tüm mikro bileşenler arasında en yüksek termal iletkenliği sergiler. Ferritik matrisli gri, temper, küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirler, perlitik matrisli halinden daha yüksek termal iletkenliğe

sahiptir. Beyaz dökme demirlerde ise artan karbon içeriğiyle beraber termal iletkenlik hızla düşer [47].

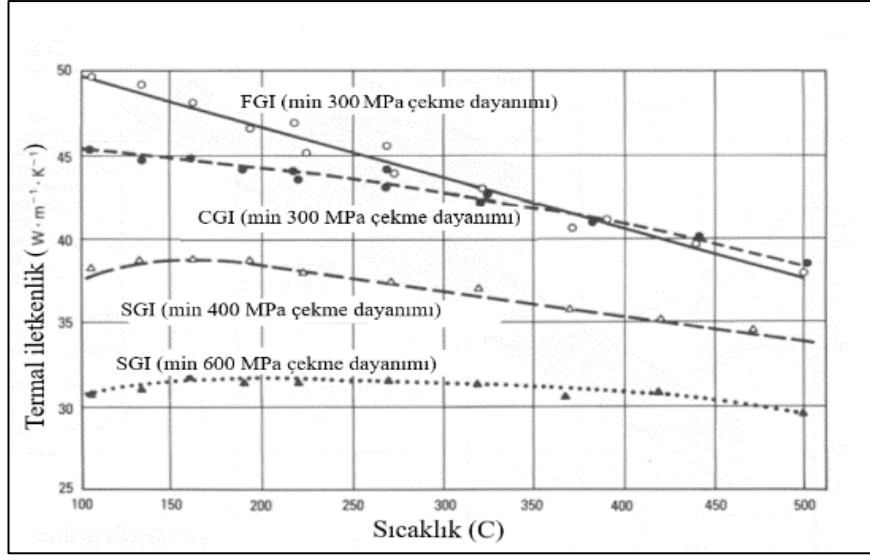
Lamel grafitli, küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerin termal iletkenliği, kimyasal bileşimden de önemli ölçüde etkilenmektedir. Silisyum, nikel ve alüminyum termal iletkenliği düşürür. Fosfor ve mangan termal iletkenliği biraz azaltır, ancak yüksek miktarlarda ilavesi düşük etki gösterir ya da hiç etki etmez [48]. Artan sıcaklıkla beraber dökme demirler termal iletkenliği azalır [11].

Şekil 2.47 ve Çizelge 2.16’da lamel grafitli, küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demirlerin termal iletkenlikleri karşılaştırılmıştır. Bu verilerden de görüleceği üzere gri dökme demirler tüm sıcaklıklarda küresel grafitli dökme demirlerden daha iyi termal iletkenlik değerine sahiptir.

Çizelge 2.16 : Farklı sıcaklıklarda dökme demirlerin termal iletkenlik değerleri [17]

Grafit Tipi	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
Lamel	4,8	53,39	50,66	47,31	43,12	38,94
Vermiküler	3,9	38,10	41,0	39,40	37,30	35,20
Vermiküler	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

Lamel grafitli dökme demirlerde termal iletkenlik serbest grafit arttıkça, grafit boyu uzadıkça ve grafitler kalınlaştıkça artar. Ferritik matrisli küresel grafitli dökme demirler, perlitik matrisli küresel grafitli dökme demirlerden daha iyi termal iletkenliğe sahiptir [11].



Şekil 2.47 : Dökme demirlerin farklı sıcaklıklardaki termal iletkenlikleri [11]

Vermiküler grafitli dökme demirlerin termal iletkenliğinin gri dökme demire yakın, küresel grafitli dökme demirlerden daha iyi olduğu Şekil 2.47’de görülmektedir. Vermiküler grafitli dökme demirlerdeki bu davranış, aynı lamel grafitlerde olduğu gibi grafitlerin matriste birbirine bağlı olmasıyla açıklanmaktadır [11].

2.7.5.5 Sönümleme Kapasitesi

Bir malzemenin titreşimi absorbe etme yeteneği, sönümleme kapasitesi olarak bilinir. Mekanik enerjiyi ısıya dönüştürerek titreşimi bastırmak, yapılarda ve hareketli parçalar içeren cihazlarda önemlidir. Yüksek sönümleme kapasitesine sahip malzemelerden yapılmış parçalar gürültüleri azaltabilir ve uygulanan gerilme seviyesini en aza indirebilir. Titreşim, bazı makinelerde kritik öneme sahiptir ve yetersiz çalışmaya hatta arızaya neden olabilir. Aşırı titreşim, hassas makinelerde hatalı çalışmaya ve makinenin bazı parçalarında aşırı derecede aşınmaya neden olabilir [11].

Gri dökme demirlerin yüksek sönümleme kapasiteleri, bu malzemelerin en önemli özelliklerinden biridir. Makine tabanları ve destekleri, motor blokları ve fren parçaları için oldukça idealdir. Gri dökme demirlerin sönümleme kapasiteleri çelik ve diğer dökme demir türlerine kıyasla önemli ölçüde fazladır. Bu davranış, gri dökme demirin grafit yapısından kaynaklanmaktadır. Gri dökme demirlerin titreşim sönümleme kapasitesi mukavemet arttıkça azalır. Daha büyük kesit kalınlıkları sönümleme

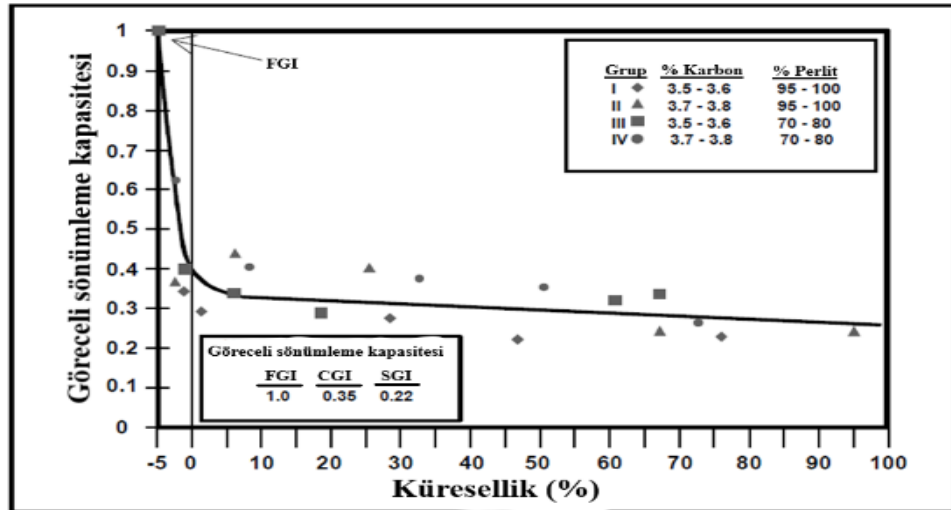
kapasitesini artırır, aşılama ise sönümlleme kapasitesini azaltır. Küresel grafitli dökme demirlerin sönümlleme kapasitesi, gri dökme demirlerden daha azdır. Küresellik oranı arttıkça dökme demirin titreşim sönümlleme kapasitesi azalır. Vermiküler grafitli dökme demirlerin titreşim sönümlleme kapasitesi, gri dökme demirlerin ve küresel grafitli dökme demirlerin arasındadır [11].

Çizelge 2.17’de bazı dökme demirlerin ve metallerin sönümlleme kapasiteleri karşılaştırılmıştır..

Çizelge 2.17 : Bazı yaygın dökme demirlerin ve metal alaşımlarının sönümlleme kapasiteleri [49]

Malzeme	Göreceli Sönümlleme Kapasitesi
Gri dökme demir, kalın lamel	100 – 500
Gri dökme demir, ince lamel	20 – 500
Temper dökme demir	8 – 15
Küresel grafitli dökme demir	5 – 20
Saf demir	5
Ötektoid çelik	4
Beyaz dökme demir	2 – 4
Alüminyum	0,4

Şekil 2.48’de dökme demirlerde sönümlleme kapasitesinin küresellik ve perlit miktarıyla olan ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 2.48 : Dökme demirlerde sönümlleme kapasitesinin küresellik ve perlit miktarıyla olan ilişkisi [40]

2.7.6 Vermiküler grafitli dökme demirlerin işlenebilirliği

Vermiküler grafitli dökme demirlerin işlenebilirlik özellikleri, grafit şekli, ferrit-perlit oranı ve kimyasal bileşimden etkilenmektedir. Vermiküler grafitli dökme demirlerin gri dökme demirlere göre çekme mukavemeti en az %75 oranında daha fazla, elastik modülü %40 daha fazla olup, gri dökme demirin yaklaşık iki katı yorulma ömrüne sahiptir. Bu özellikler sayesinde vermiküler grafitli dökme demirler, dizel motor tasarımında günümüzdeki ve gelecekteki gereksinimleri karşılamak için oldukça uygundur. Bununla birlikte vermiküler grafitli dökme demirlerin yaygın bir motor blok malzemesi olarak kabul görmesi için işlenebilirlik özelliklerinin de gri dökme demire yakın olması gerekmektedir [50, 51].

2.7.7 Vermiküler grafitli dökme demirlerin (CGI) uygulama alanları

Gri dökme demirin mukavemetinin yetersiz olduğu durumlarda ve küresel grafitli dökme demirin elverişsiz dökülebilirlik özellikleri nedeniyle istenmeyen durumlar olduğu zamanlarda vermiküler grafitli dökme demirler bu dökme demirlerin yerine kullanılabilir [11].

Vermiküler grafitli dökme demirin en çok kullanıldığı parçalar; dizel motor blok ve kafalar, yağ karterleri, dişli kutuları, turbo gövdeleri, yatak braketleri, dişli çarkları ve eksantrik dişlilerdir [11].

Şekil 2.49’da vermiküler grafitli dökme demirden üretilen V8 Scania motor bloğu ve motoru görülmektedir.



Şekil 2.49 : Scania V8 vermiküler grafitli dökme demir motor bloğu (solda) ve motoru (sağda) [52]

Vermiküler grafitli dökme demirlerin ısı iletkenliği, küresel grafitli dökme demirlerin ısı iletkenliğinden yüksek olduğu için, yüksek sıcaklıkta ve ısı ıorulma koşulları altında çalışan parçalarda vermiküler grafitli dökme demir tercih edilir. Bu uygulamalar arasında motor kafaları, egzoz manifoldları ve fren diskleri bulunur [11].

Motor kafalarını alaşımlı gri dökme demir yerine ferritik vermiküler grafitli dökme demirden üretmek motor verimini %50'ye kadar artırabilir. Motor kafaları için belirlenen minimum değerler genellikle 300 MPa çekme dayanımı, 240 MPa akma dayanımı ve %2 uzamadır [11].

Modern otomobil ve kamyon motorlarında manifoldların 500 °C sıcaklıklarda çalışması gerekmektedir. Bu sıcaklıklarda gri dökme demirden yapılan manifoldlar çatlamaya eğilimliyken, küresel grafitli dökme demirden yapılan manifoldlar ise çarpılmaya eğilimlidir. Vermiküler grafitli dökme demirden üretilen manifoldların ise çarpılma eğilimi ve oksidasyona uğrama eğilimi daha azdır. Bu nedenle vermiküler grafitli dökme demirden üretilen manifoldlar diğ er dökme demirlerden üretilen manifoldlara göre daha uzun ömürlüdür [11].

Gri dökme demir yerine vermiküler grafitli dökme demir kullanımı, daha fazla performans ve dayanıklılık sağlamak için binek araç motorlarında ve motor sporları uygulamalarında da yaygındır [5]. 2010 yılından beri tüm NASCAR araçlarının motorları vermiküler grafitli dökme demirden üretilmektedir [53].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Deneysel Çalışmaların Planlanması

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalara ilk önce vermiküler grafitli dökme demir ile karşılaştırması yapılacak olan dökme demir tiplerine ve kimyasal analizlerine karar verilmiştir. Daha sonra deney tasarımı yapılarak incelenecek olan proses ve malzeme parametreleri belirlenmiştir. Deney tasarımına uygun olacak şekilde farklı analiz ve mikroyapı özelliklerine sahip dökme demirler ile toplam 8 adet motor bloğun dökümü yapılmıştır. Dökülen motor bloklardan numuneler alınarak çekme testi, sertlik ölçümü, mikroyapı incelemeleri, iç sağlamlık kontrolleri, boyutsal ölçümler, kimyasal analiz, ses hızı ölçümleri, termal iletkenlik ölçümleri yapılmış ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

3.2 Motor Blokların Kalıplanması

9 litre motor bloklarının kalıplama işlemi Döktaş Hat 7 nolu otomatik kalıplama makinesi ile yapılmıştır. Hat 7 özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Kalıp kumu olarak silis kumu kullanılmıştır. Kalıp kumunda su, bentonit ve kömür tozu da bulunmaktadır.

Çizelge 3.1 : Döktaş Dökümcülük Hat 7 kalıplama hattı özellikleri

HAT 7	
Marka ve model	HWS / EFA-S-7,5
Üretim yılı	1996
Hat hızı	40 kalıp / saat
Kalıp boyutu	1260 x 1960 x 400 / 400 mm
Soğuma süresi	240 dakika

Kalıplama işleminin için alt ve üst derece olmak üzere 2 adet model kullanılmıştır . Kalıp boşluğundaki gerekli yerlere kalminex, besleyici, soğutucu, filtre ve supportlar yerleştirilmiş, ardından motor blok maçası yerleştirilmiştir. Motor blok maçası üzerinde gerekli yerlere supportlar yerleştirilmiştir.



Şekil 3.1 : Motor blok üst modeli

Kalıba yerleştirilen motor bloğu maçası 13 adet maçadan oluşmaktadır. Bu maçalar Döktaş Maça Üretim Merkezindeki çeşitli cold-box maça preslerinde üretilmiştir. Maçalarda silis ve kromit kumu kullanılmıştır. Kumda bağlayıcı olarak reçine, katalizör olarak da dimetiletilamin kullanılmıştır. Maçalar, parçada iyi bir yüzey kalitesi oluşması için maça boylarıyla boyanmıştır.



Şekil 3.2 : Alt derecenin maça yerleştirilmeden önceki görüntüsü

Kalıp kapatılmadan önce içinde toz, pislik vb. kalmaması için basınçlı hava ile temizlenmiştir. Ardından kapama ünitesinde üst derece ve alt derece birleştirilip kalıp kapatılmıştır ve döküme hazır hale getirilmiştir.

3.3 Sıvı Metalin Ergitilmesi

Ergitme işlemi 14000 kg kapasiteli, 8 MW güçte orta frekanslı ergitme tipi indüksiyon ocağı kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.3). Şarj malzemesi olarak sfero piki, otomotiv hurdası DKP sac ve (geri döngü) yolluk kullanılmıştır (Şekil 3.4). Şarj malzeme reçetesinde 4 ton sfero piki, 6 ton DKP sac ve 4 ton yolluk kullanılmıştır. Şarjda kullanılan hurda sacın kimyasal analizi Çizelge 3.2’de, sfero pikinin kimyasal analizi ise Çizelge 3.3’te verilmiştir.



Şekil 3.3 : 14 ton kapasiteli indüksiyon ocağı

Çizelge 3.2 : Hurda sac kimyasal analizi

C (%)	S (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	Cr (%)	Cu (%)	Sn (%)	Ti (%)
0,004	0,009	0,002	0,09	0,011	0,025	0,021	0,000	0,025



Şekil 3.4 : Şarj malzemesi olarak kullanılan DKP sac (solda) ve sfero piki

Ergitilen metal, döküm sıcaklığına ulaştıktan sonra küreleştirme ve aşılama işlemleri yapılmıştır. Bu işlemler sandviç tipi döküm potasında (Şekil 3.5) gerçekleştirilmiştir. Gri dökme demir üretimi için tretman işlemi yapılmamıştır.

Çizelge 3.3 : Şarjda kullanılan pikin kimyasal analizi

C (%)	S (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	P (%)	Ti (%)	Cu (%)	Sn (%)	Al (%)
4,24	0,012	0,38	0,052	0,004	0,021	0,01	0,000	0,00	0,001

3.3.1 Vermiküler grafitli dökme demir (CGI) üretimi için tretman yapılması

Vermiküler grafitli dökme demirden motor bloğu üretimi için yapılan tretman işleminde küreleştirici olarak 1 ton metale 4,2 kg Elkem CompactMag kullanılmış olup, kimyasal analizi Çizelge 3.4 de verilmiştir.



Şekil 3.5 : Sandviç tipi döküm potası

Çizelge 3.4 : CompactMag kimyasal analizi

CompactMag	
Element	% Ağırlık
Silisyum	44 – 48
Magnezyum	5,0 – 6,0
Kalsiyum	1,8 – 2,3
Nadir toprak elementleri*	5,5 – 6,5
Alüminyum	Maksimum %10
Demir	Kalan

*Nadir toprak elementleri yaklaşık %65 Ce, %35 La ve çok düşük oranlarda Nd, Pr ve diğer nadir toprak elementlerini içerir.

Aşılavıcı olarak ise 1,4 kg Elkem Topseed kullanılmıştır. Topseed aşılavıcısının kimyasal analizi ise Çizelge 3.5’te verilmiştir.

Çizelge 3.5 : Topseed kimyasal analizi ve tane boyutu

Si (%)	Ca (%)	Ba (%)	Al (%)	Fe (%)	Boyut (mm)
46,0 – 50,0	0,40 – 0,60	1,80 – 2,20	0,4 – 1,0	Kalan	0,5 – 6

Sandviç tipi potanın cep kısmına küreleştirici (CompactMag) ve aşılavıcı (Topseed) atıldıktan sonra üzeri işleme talaşı ile kapatılmıştır. Ardından 1350 kg sıvı metal indüksiyon ocağından potaya doldurulmuştur ve tretman işlemi başlamıştır. Bu üretim yöntemine eksik tretman (under treatment) adı verilmektedir ve Şekil 3.6’da gösterilmektedir.



Şekil 3.6 : Küreleştirici ve aşılavıcı konulan sandviç tipi döküm potası, forklift ile indüksiyon ocağının önüne konulur ve üzerine sıvı metal dökülür ve tretman başlamış olur.

3.3.2 Küresel grafitli dökme demir (sfero) için tretman yapılması

Küresel grafitli dökme demirden motor bloğu üretimi için yapılan tretman işleminde küreleştirici olarak pota başına 12,5 kg Elkem FeSiMg 6510 kullanılmıştır. Aşılavıcı olarak ise 4 kg Topseed kullanılmıştır. FeSiMg 6510 ‘un kimyasal analizi Çizelge 3.6’da verilmiştir.

Sandviç tipi potanın cep kısmına küreleştirici (FeSiMg 6510) ve aşılavıcı (Topseed) atıldıktan sonra üzeri işleme talaşı ile kapatılmıştır. Ardından 1250 kg sıvı metal indüksiyon ocağından potaya doldurulmuştur.

Çizelge 3.6 : FeSiMg 6510 kimyasal analizi

Si (%)		Mg (%)		Ca (%)		Al (%)		RE* (%)		Fe (%)
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
43	48	6,2	6,8	3	3,5	0	1	0,95	1,05	Kalan

*Nadir toprak elementleri

3.4 Döküm İşlemi

Döküm işlemine başlamadan önce sıvı metaldeki cürufun temizlenmesi için cüruf temizleme istasyonunda perlit kullanılarak potalardaki sıvı metalin cürufu temizlenmiştir. Ayrıca bu işlem sırasında termokupl ile sıcaklık ölçümü de yapılarak sıvı metal sıcaklığının uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Cüruf temizleme istasyonu Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 : Cüruf temizleme istasyonu

Cürufu temizlenen sıvı metal dolu potadan bir kepçe yardımıyla küresellik numunesi, karbon, kükürt numunesi ve spektro numunesi alınmıştır. Bu numuneler ile laboratuvarında mikroyapı küresellik kontrolü ve kimyasal analizler yapılmıştır. Numuneler alındıktan sonra pota, Şekil 3.8’de görüldüğü gibi döküm arabasına yerleştirilerek Hat 7’de döküm yapılmıştır.



Şekil 3.8 : Döküm arabası ile üst derecedeki havşadan döküm yapılıyor

Parçaların dökölüp katılaştıktan sonraki hali Şekil 3.9’da gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere parçaların yolluk sistemi ve besleyicileri henüz kesilmemiş, çapakları taşlanmamıştır.



Şekil 3.9 : Kalıp bozma sonrası



Şekil 3.10 : Temizleme işlemi sonrası

Kalıp bozulduktan sonra parçalar, Döktaş tamamlama bölümüne gönderilmiştir ve burada yolluk kırılarak parçadan ayrılmış, çapakları taşlanmıştır. Parçaların temizlenmiş haldeki görüntüsü Şekil 3.10’da verilmiştir. Parça bu hali ile laboratuvar testleri için hazır duruma gelmiştir.

3.5 LABORATUVAR TESTLERİ

3.5.1 Laboratuvar Testlerinde Kullanılan Cihazlar

3.5.1.1 Boyutsal ölçüm kontrolü

Temizlenen ve taşlanan deneme parçaların Coord 3 CMM cihazında ölçümleri yapılmıştır. Şekil 3.11’de Coord 3 tezgahı üzerindeki motor bloğu görülmektedir.



Şekil 3.11 : Coord 3 CMM cihazı

3.5.1.2 Küresellik Mikroyapı Numunelerinin Alınması

Küresellik oranını tespit etmek için alınan küresellik numunesi, dökümden hemen önce potadan kepçe ile numune maçasına alınmıştır. Şekil 3.12’de küresellik numune maçası görülmektedir. Gri dökme demirden dökülen motor bloğu için mikroyapıda küresel yapı olmadığından küresellik numunesi alınmamıştır.



Şekil 3.12: Küresellik numunesi maçaları

3.5.1.3 Çekme Testi

Çekme testlerinin gerçekleştirilmesi için Şekil 3.13’de görülen 250 kN gücünde, ekstansometreli Shimadzu markalı çekme cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz Trapezium-X ve DVE 2 yazılımları ile entegre çalışmaktadır. Test yapılacak olan numuneyi kavramak için alt ve üst çeneler bulunmaktadır. Numune çenelere bağlandıktan sonra cihaza çalışma komutu verilmekte ve çekme testi yapılmaktadır. Test raporu ise test sonrası çıktı olarak alınabilmektedir. Cihazın kalibrasyonu TSE Gebze tarafından yıllık olarak yapılmaktadır.



Şekil 3.13 : Çekme testi cihazı

3.5.1.4 Sertlik Testi

Sertlik ölçümleri, 3 ton yük kapasiteli ve 10 mm çapa sahip bilyanın 10 sn boyunca parçaya batırılması ve daha sonra bu iz çapının okunarak, iz çapına karşı gelen değerin Brinell türünden saptanması esasına dayanmaktadır. Şekil 3.14 ’de sertlik testlerinin yapıldığı cihaz görülmektedir. Cihazın kalibrasyonu TSE Gebze tarafından yıllık olarak yapılmaktadır.



Şekil 3.14 Brinell Sertlik testi cihazı

3.5.1.5 Kimyasal analiz ölçümü

Dökümden hemen önce alınan spektro numunelerinden ARL 4460 optik emisyon spektrometresi ile kimyasal analizi yapılmıştır. Şekil 3.15’de kimyasal analizlerin yapıldığı optik emisyon spektrometresi görülmektedir. Cihazın ölçüm doğrulaması günlük yapılmakta olup, Alisan firması tarafından da yıllık bakım ve kalibrasyonu yapılmaktadır.



Şekil 3.15 : Optik Spektrometre

3.5.1.6 Karbon - kükürt analizi

Dökümden hemen önce alınan karbon-kükürt numunelerinden LECO CS 744 marka C/S cihazı ile karbon-kükürt analizi yapılmıştır. Şekil 3.16’da karbon-kükürt analizlerinin yapıldığı cihaz görülmektedir. Cihazın ölçüm doğrulaması günlük yapılmaktadır.



Şekil 3.16 : LECO CS 744 karbon – kükürt analiz cihazı

3.5.1.7 Ses hızı ölçümü

Dökülen parçaların yolluk kırma ve taşlama işlemleri tamamlandıktan sonra USM 35 Krautkramer marka ultrasonik cihazıyla ses hızları ölçülmüştür.



Şekil 3.17 : KrautKramer USM 35 UT cihazı ile ses hızı ölçümü

3.5.1.8 Radyoskopik muayene

Deneme dökülen motor blokların iç sağlamlık kontrolü 450 kV güce sahip Yxlon MCN 451 marka radyoskopi cihazı ile yapılmıştır. Şekil 3.18’de X-ray cihazı görülmektedir.



Şekil 3.18 : X-Ray cihazı

3.5.1.9 Mikroyapı analizi ve küresellik kontrolü

Vermiküler ve küresel grafitli dökme demir tipi ile dökülen motor bloklarının küresellik kontrolü için gereken küresellik numunesi dökümden hemen önce alınmıştır. Şekil 3.19’da küresellik numuneleri görülmektedir.



Şekil 3.19 : Küresellik numuneleri

Deneme dökülen parça üzerinden alınan mikroyapı numuneleri sırasıyla Grid 240 ve 1000 nolu zımpara kağıdı ile zımpara yapıldıktan sonra alüminyum oksit solüsyonu ile parlatılmışlardır. Daha sonra %4’lük nitrik asit ile 30 sn kadar dağlanmıştır. Hazırlanan numuneler mikroskop altında x100 büyütmede incelenmiştir. Yapılan görüntülemelerde grafitlerin yapısı, %küresellik değeri, ana matriksteki ferrit ve perlit oranları incelenmiştir. Mikroyapı analizleri, Döktaş Fizik Laboratuvarında bulunan Nikon ve Clemex Image Analyzer programlı Buehler marka optik mikroskoplar ile yapılmıştır. Şekil 3.20’de Nikon optik mikroskop, 3.21’de ise Buehler optik mikroskop görülmektedir.



Şekil 3.20 : Nikon optik mikroskop

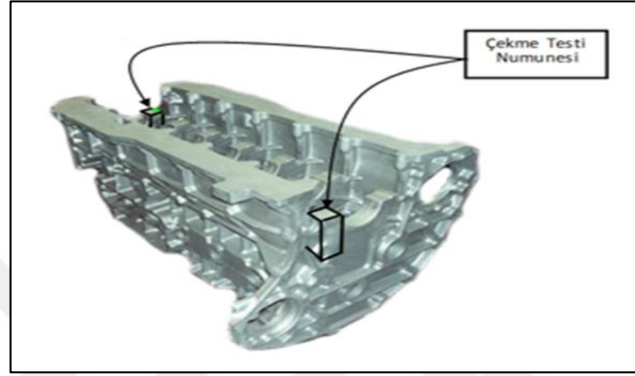


Şekil 3.21 : Buehler optik mikroskop

3.5.2 Mekanik Testlerin Gerçekleştirilmesi

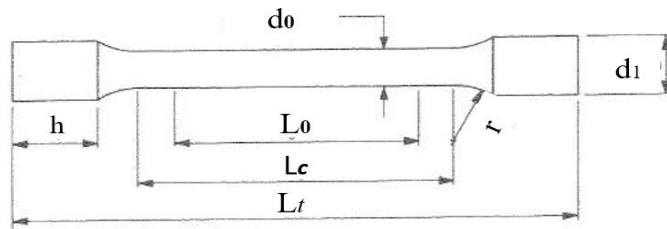
3.5.2.1 Çekme testi

Çekme testi malzemelerin mühendislik uygulamalarında yük altında dayanımlarını ölçmeye yarayan en önemli test metodudur. Çekme testi ile malzemenin kopma ve akma mukavemeti, elastisite modülü, %uzama ve kesit daralması gibi özellikleri elde edilir.



Şekil 3.22 : Parçadan çekme test numune alma bölgeleri

Şekil 3.22’de verilen numune alma işlem talimatına göre motor bloğun kep bölgelerinden kesilerek çıkarılan çekme test numuneleri, DIN 50125 standardına uygun ölçülerde tornada işlenmiştir. Çekme çubuklarının teknik resmi Şekil 3.23’de, ölçüleri ise Çizelge 3.7’de verilmiştir. İşlenen çekme çubukları 250 kN kapasiteli Shimadzu marka ekstansometreli çekme testi cihazı ile EN 10002-1:1990 standardına uygun olarak çekilmiştir.



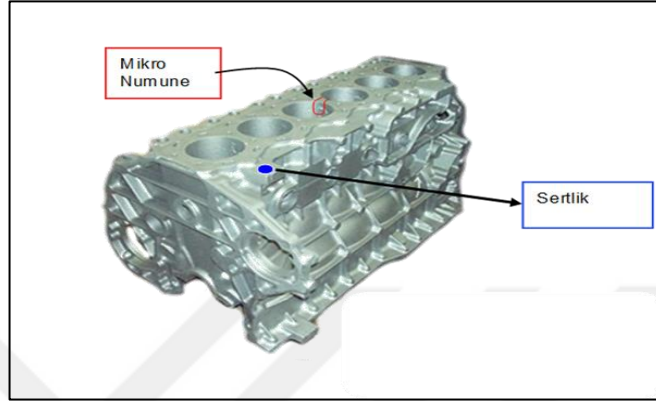
Şekil 3.23 : Çekme çubukları teknik resmi

Çizelge 3.7 : DIN 50125 standardına göre çekme çubukları ölçüleri

d_0	L_0	d_1	r min	h min	L_c min	L_t min
12 mm	60 mm	15 mm	9 mm	40 mm	72 mm	162 mm

3.5.2.2 Sertlik testi

Numunelerin sertlik değerleri Brinell sertlik metodu ile ölçölmüştür. Yapılan sertlik ölçömleri motor kafası bağlama yüzeyinden gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.24’de sertlik ölçömlerinin yapıldığı bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 3.24 : Parçadan numune alma ve sertlik ölçüm bölgeleri

Sertlik ölçme yöntemi; 10 mm çapındaki bilya ucun, 3000 kg yük ile 10-15 sn arası malzemeye tatbik edilmesi esasına dayanmaktadır. Malzeme üzerinde oluşan izin çapına karşılık gelen değer de malzemenin Brinell cinsinden sertlik değeri olup HB ile gösterilmektedir. Malzemenin sertliği iz çapı ve derinliğiyle ters orantılıdır. Yani iz çapı ve derinliği artar ise malzemenin sertliği düşmektedir. Sertlik ölçömleri ASTM E10-96 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

3.5.2.3 Ses hızı ölçümü

Malzemelerin ses hızı değerleri farklılıklar göstermekte olup, malzemelerin ayırt edici bir özelliği olarak karşımıza çıkmaktadır. Dökme demirlerde ses hızı griden sferoya doğru gittikçe artmaktadır. Ses hızı ölçümü yaparak tahribatsız olarak malzemelerin küresellikleri hakkında karar verilebilir. Bu nedenle ses hızı ölçümü vermiküler grafitli dökme demir üretiminde prosesin bir parçası olup, parçadan numune kesilmesine gerek kalmadan parçaların küreselliği hakkında fikir vermektedir. Dökülen parçaların yolluk kırma ve taşlama işlemleri tamamlandıktan sonra USM 35 Krautkramer marka ultrasonik ses hızı ölçüm cihazıyla parçaların aynı bölgesinden olmak üzere ses hızları ölçölmüştür.

Şekil 3.25’de vermiküler grafitli dökme demir ile üretilmiş motor blok parçadan ultasonik ses hızı ölçümü gösterilmiştir.



Şekil 3.25 : Deneme dökülen motor bloklarından ses hızı ölçümü

3.5.2.4 Boyutsal ölçüm kontrolü

Farklı dökme demir tiplerinde dökülen deneme motor blokların taşlama işlemi sonrasında Döktaş ölçü kontrol bölümünde bulunan Coord 3, üç boyutlu ölçüm cihazıyla boyutsal ölçümleri yapılmıştır. Motor blok üzerinde X koordinatındaki boyutsal ölçümü yapılarak farklı dökme demir tiplerindeki boyutsal çekme miktarı karşılaştırılmıştır.

3.5.2.5 Kimyasal analiz

Deneme dökülen motor blokların deney tasarımına uygun analizde dökülüp dökülmediğini kontrol etmek amacıyla döküm esnasında potadaki sıvı metalden C/S analizi için çırpma talaş şeklinde, spektro analizi için ise özel metal numune kalıbına dökülerek spektro numuneleri alınmış ve kimyasal analizler yapılmıştır. Karbon ve kükürt ölçümleri Leco CS 744 cihazıyla ASTM E1019-18 e göre yapılırken, diğer elementlerin ölçümü ARL 4460 optik emisyon spektrometre cihazı ile ASTM E 1999-18’e göre yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarında dökme demir bileşiminde bulunan elementlerin ağırlıkça % değerleri tespit edilmiştir.

3.5.2.6 Radyoskopik muayene

X ray kontrolü döküm parçaların yüzey altı ve kesit içlerindeki süreksizlik ve hataların tespitinde yaygın olarak kullanılan tahribatsız test metodlarından biridir. Döktaş AŞ‘de bulunan 450 Kv’lık X ray tübü ile incelenebilecek maksimum kesit kalınlığı 40 mm olduğundan motor bloğun X ray kontrolü kalınlıktan dolayı mümkün değildir. Bu nedenle deneme dökülen motor bloklar radyoskopik muayene için Şekil 3.26’da gösterildiği üzere testere ile 30’ar mm kesit kalınlığında olacak şekilde kesilmiştir. Dilimlere ayrılmış parçalar Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.26 : Parçaların testere ile kesilmesi



Şekil 3.27 : Dilimlenmiş motor blok

X ray kontrolü ile döküm parçalarda başta çekinti hataları olmak üzere, gaz, cüruf, katmer, çatlak gibi döküm hatalarının tespiti yapılır. Farklı dökme demir tipleriyle dökülen motor bloklardan testerede kesilen dilimler daha sonra X-ray ünitesinde EN 12681 standardına uygun olacak şekilde radyoskopik muayene ile kontrol edilmiştir. Motor blok dilimlerinde tespit edilen çekinti hatalarının değerlendirilmesi ise Level II sertifikaya sahip operatörler tarafından ASTM E 192 nolu standarda uygun olarak yapılmıştır.

3.5.2.7 Termal iletkenlik

Vermiküler grafitli dökme demir hibrid bir malzeme olmasından dolayı küresel grafitli dökme demirlerin sahip olduğu üstün mukavemet özelliklerini taşıırken diğer yandan lamel grafitli dökme demirlerin yüksek termal iletkenlik ve titreşim sönümleme gibi üstün özelliklerine de sahiptirler. Motor blok ve kafasının soğuma ihtiyacından dolayı termal iletkenlik önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle termal iletkenlik ölçümleri de tez kapsamında yapılmıştır. Termal iletkenlik testleri Döktaş AŞ. bünyesinde yapılamadığından dolayı testlerin yapılması için İstanbul Teknik Üniversitesi ve Kırıkkale Üniversitesinden teknik yardım alınmıştır. Üniversiteler tarafından bildirilen ebatlara göre hazırlanan numuneler termal iletkenlik testleri için üniversite laboratuvarlarına gönderilmiştir.

Termal iletkenlik numuneleri 2,60 gram ağırlığında, 12,3 mm çapında ve 3,05 mm yüksekliğinde hazırlanmıştır.



Şekil 3.28 : Termal iletkenlik numuneleri

3.6 Minitab istatistiki veri analiz programı

Başta otomotiv sektörü olmak üzere işletmelerin yalın 6 sigma gibi kalite iyileştirme çalışmalarında kullanabilecekleri, istatistiksel araçların hızlı ve etkin kullanılmasını sağlayan Dünya'nın en çok kullanılan istatistiki yazılımlarından biridir. Minitab programı verileri hızlı ve etkin şekilde analiz ederek bilgiye dönüştürmekte ve bu bilgilerin doğru kullanılmasını sağlayarak en zorlu problemlerin dahi kolayca çözümüne yardımcı olmaktadır.

DeneySEL sonuçlardan elde edilen veriler, istatistiki bir yazılım olan Minitab programı yardımıyla analiz edilerek bulunan sonuçlar literatür sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Yapılan testlerden elde edilen genel sonuçlar Çizelge 4.1’de gösterilmiştir. Testlerde küresel grafitli dökme demir tipinde 2 adet (DDK- F), gri dökme demir tipinde ise 2 adedi DDL-210 standardında, 2 adedi de DDL-200 standardında olmak üzere 4 adet ve 2 adette vermiküler grafitli dökme demir tipinde (DDV-450) olmak üzere toplam 8 adet motor blok deneme olarak dökülmüş ve parçaların standart bölgelerinden numuneler alınarak, yapılan deney tasarımına uygun olacak şekilde testler yapılmıştır. Test sonuçları daha sonra Minitab istatistiki analiz programı kullanılarak analiz edilmiştir.

Çizelge 4.1 : Farklı döküm tipleriyle dökülen motor bloklarının test sonuçlarının ortalama değerleri

	DDL – 200	DDL – 210	DDV – 450	DDK – F
Kopma Dayanımı (MPa)	225,55	262,29	461,13	453,75
Akma Dayanımı (MPa)	-	-	328,03	288,21
Uzama (%)	-	-	2,37	10,31
Küresellik (%)	0	0	15,43	87
Ses Hızı (m/sn)	4801	4838	5260	5610
Sertlik (HB)	207 – 212	222 – 229	213 – 221	167 – 179
Perlit + Grafit (%)	98	100	97	14
Uzunluk (mm)	820,2	820	821,1	824
Min. Hata Seviyesi	0	CC2	CC2	CC3
Maks. Hata Seviyesi	0	CC2	CC4	CC6

4.1 Mekanik Test Sonuçları

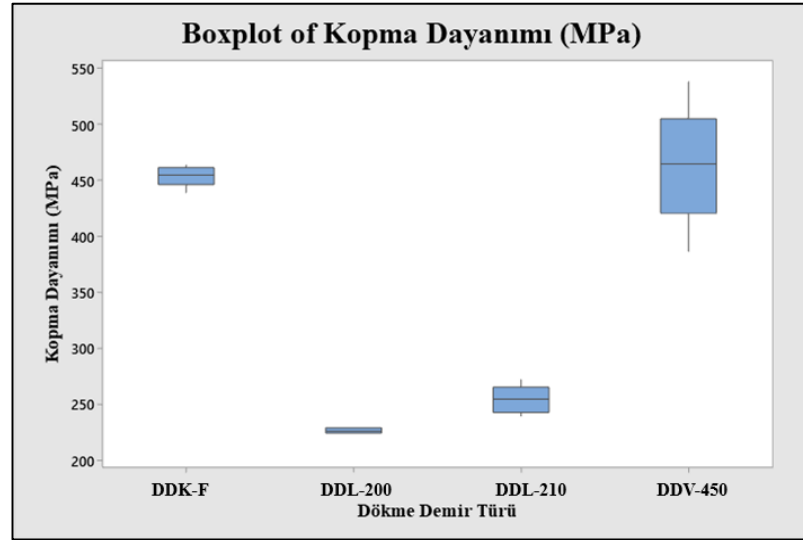
4.1.1 Çekme Test Sonuçları

Dört farklı dökme demir tipiyle dökülen motor bloklarının kep bölgelerinden alınan çekme test çubukları Döktaş AŞ. fizik laboratuvarında bulunan ekstansometreli Shimadzu marka çekme test cihazıyla test edilmiştir. Yapılan çekme testleriyle elde edilen sonuçların ortalaması Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

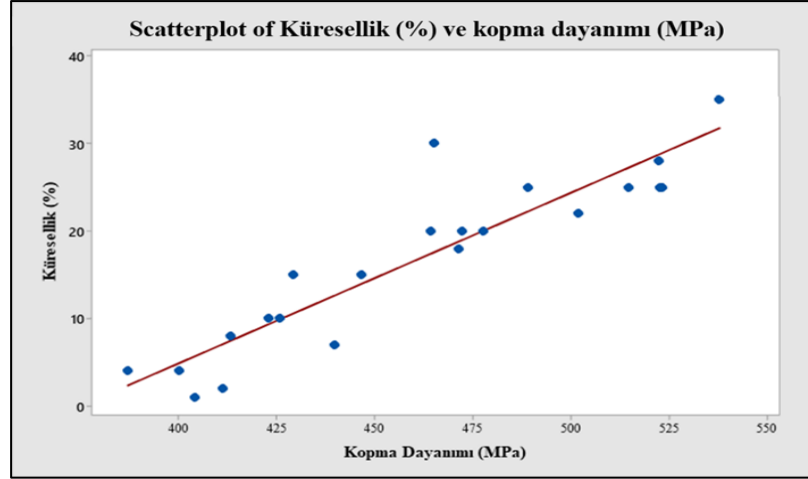
Çizelge 4.2 : Dökülen parçaların çekme testi sonuç ortalamaları

Dökme demir türü	Kopma mukavemeti (MPa)	Akma mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
DDK – F	453,75	288,21	10,31
DDL – 200	225,55	-	-
DDL – 210	262,29	-	-
DDV – 450	461,13	328,03	2,37

Dört farklı dökme demir malzemesi içinde en yüksek ortalama kopma mukavemeti 461,13 MPa ile DDV-450 malzemesinde elde edilmiştir. DDV-450 malzemesinde minimum 387 MPa, maksimum ise 538 MPa kopma mukavemet değeri elde edilmiştir. DDK-F malzemesinde ise kopma mukavemeti maksimum 463,5 MPa, minimum 439,3 MPa gelmiş olup ortalaması 453,75 MPa'dır. DDL-200 ve DDL-210 gri dökme demir tiplerinde ise sırasıyla 225,55 MPa ve 262,29 MPa ortalama kopma mukavemet değeri elde edilmiştir.

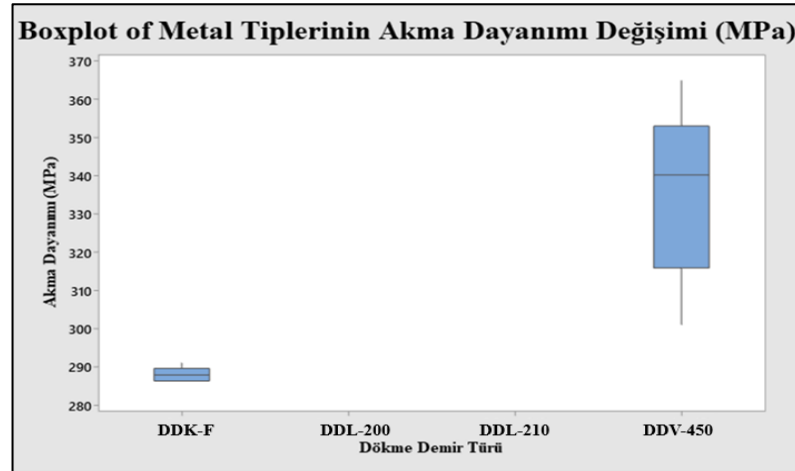


Şekil 4.1 : Farklı dökme demir tiplerinin kopma mukavemet değişimi



Şekil 4.2 : VGDD üretiminde %küresellik ve kopma mukavemet değişim grafiği

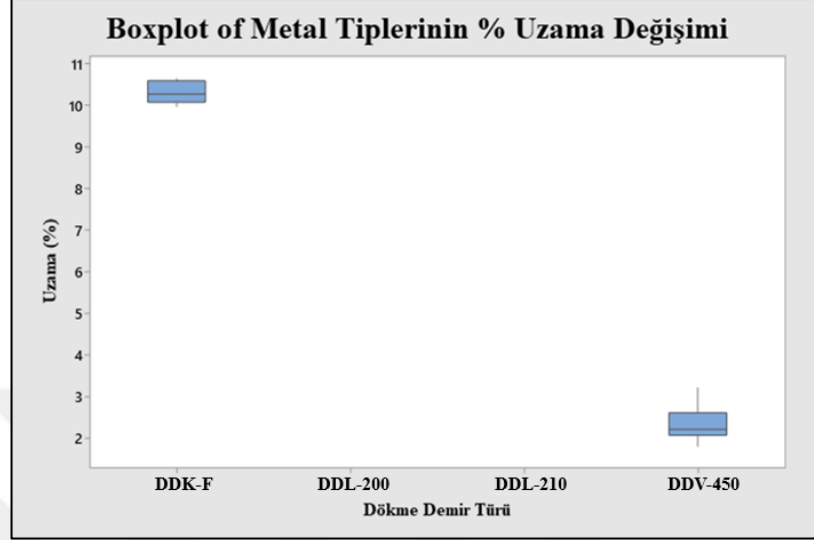
Gri dökme demir tipleri olan DDL 200 ve DDL 210 malzeme tiplerinde sünek özellik olmadığından akma mukavemet değeri bulunmamaktadır. Şekil 4.2 ‘den görüleceği üzere vermiküler grafitli dökme demirlerde %küresellik miktarının artışıyla mukavemet değerleri artmaktadır. Vermiküler grafitli dökme demir üretimi için özel üretim tekniği patentine sahip olan Sintercast firmasının bu konudaki uzman araştırmacısı Steve Dawson da [40] makalelerinde mikroyapıda artan % küresellik oranı ile vermiküler grafitli dökme demirlerin mukavemet ve % uzama değerlerinin arttığını belirtmiştir.



Şekil 4.3 : Farklı dökme demir tiplerinin akma mukavemet değişimi

DDV-450 standardında dökülen motor blokları arasında en yüksek akma dayanımı 363,26 MPa, en düşük akma dayanımı ise 301,19 MPa, ortalama akma dayanımı da 328,03 MPa olarak bulunmuştur. DDK-F malzemesinde ise 288 MPa ortalama akma mukavemeti elde edilmiştir. Deneme yapılan dört farklı malzeme tipi içinde en yüksek

akma mukavemet değeri DDV-450 malzeme tipinde elde edilmiştir. DDV-450 malzemesinin, yüksek kopma ve akma mukavemet değerine sahip olması matrikste DDK-F dökme demir tipine göre daha yüksek perlit fazı içermesi nedeniyledir.



Şekil 4.4 : Farklı dökme demir tiplerinin %uzama değişimi

DDV-450 standardında dökülen motor blokları arasında en yüksek uzama değeri %3,21, en düşük uzama değeri %1,82, ortalama uzama değeri ise %2,37 olarak bulunmuştur. Deneme yapılan dört farklı malzeme grubunda ise en yüksek uzama değeri %10,3 ile DDK-F malzemesinde elde edilmiştir. Yüksek küresellik ve yüksek ferrit oranından dolayı % uzama değeri en yüksek bu malzemede elde edilmiştir. DDL-200 ve DDL-210 malzemeleri ise gri dökme demirin karakteristik özelliğinden dolayı gevrek kırılmışlardır.

Vermiküler grafitli dökme demir malzemede küresellik ve ses hızı değeri arttıkça parçanın kopma ve akma mukavemet değerleri artmaktadır. Aynı zamanda küresellik değeri arttıkça uzama değeri de artış göstermektedir.

Ramos ve arkadaşlarına göre [55], gri dökme demirlerle karşılaştırıldığında vermicüler grafitli dökme demirlerin yüksek mekanik özelliklere sahip olmasında, vermicüler grafitli dökme demirlerin (VGDD) mikroyapısının sahip olduğu üstün özelliklerin etkisi olduğunu savunmaktadırlar. Zira VGDD'deki grafitler gri dökme demirlerdeki gibi mikroyapıda rastgele dağılmış ve uzanmış olsalar da, VGDD 'deki grafitler yuvarlak uçlu olup, daha kısa ve daha kalınlardır. Bu karakteristik özellikte,

grafitin matrikse daha güçlü bağlanarak, daha yüksek mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır.

4.1.2 Sertlik Ölçüm Sonuçları

Farklı dökme demir tipleriyle dökülen motor blokların sertlik ölçümleri kafa bağlama tarafı yüzeyinden gerçekleştirilmiştir.

Motor bloklarından yapılan sertlik ölçüm sonuçları Çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3 : Sertlik test sonuçları

Dökme demir türü	Sertlik aralığı (HB)
DDK – F	167 – 179
DDL – 200	207 – 212
DDL – 210	222 – 229
DDV – 450	213 – 221

DDV-450 standardında dökülen motor bloklarında sertlik değerleri 213 -221 HB arasında, DDL-210 standardında dökülen motor bloklarında ise sertlik değerleri 222 - 229 HB arasında, DDL-200 standardıyla dökülen parçalarda ise sertlik değerleri 207- 212 HB arasında gelmiştir. DDK-F standardında dökülen motor blokların sertlik değerleri ise 167-179 HB arasında değişmektedir.

Dolayısıyla en düşük sertliğe sahip parçalar DDK-F analizi ile dökülen parçalardır. Mikroyapıdaki yüksek ferrit oranı düşük sertliğe neden olmuştur. M.Ribeiro ve arkadaşlarına [58] göre, vermiküler dökme demir yapısındaki ferrit fazının azalmasıyla sertlik, kopma ve akma mukavemetlerinde artış olacağını belirtmiş olup tez kapsamında yapılan test sonuçları da bunu teyid etmiştir.

Sintercast firmasından Dr.Steve Dawson'a [40] göre de, vermiküler grafitli dökme demirler, lamel grafitli dökme demirlere kıyasla %10-15 daha yüksek sertliğe sahiptir. Benzer perlit oranına sahip DDV-450 ile DDL-200 dökümlerini karşılaştırdığımızda vermiküler grafitli dökme demirin yaklaşık %3 daha yüksek sertliğe sahip olduğu ölçüm sonuçlarında ortaya çıkmıştır.

4.2 Kimyasal Analiz Sonuçları

Dört farklı dökme demir türündeki motor bloklarının spektrometre ve karbon – kükürt cihazı ile yapılan kimyasal analizleri Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Kimyasal analiz sonuçları

	DDK – F	DDL – 200	DDL – 210	DDV – 450
C (%)	3,62	3,25	3,13	3,65 – 3,71
Si (%)	2,22	2,02	2,04	2,10 – 2,21
Mn (%)	0,23	0,85	0,95	0,23 – 0,28
P (%)	0,028	0,032	0,021	0,022 – 0,028
S (%)	0,01	0,084	0,077	0,012 – 0,014
Cr (%)	0,032	0,26	0,3	0,04 – 0,06
Ni (%)	0,013	0,019	0,023	0,010 – 0,014
Mo (%)	0,006	0,012	0,014	0,001
Cu (%)	0,042	0,67	0,87	0,66 – 0,72
Mg (%)	0,046	0,042	0,003	0,012 – 0,016
Sn (%)	0,011	0,082	0,097	0,077 – 0,080
Ti (%)	0,018	0,019	0,017	0,018 – 0,021

4.3 X-Ray Kontrol Sonuçları

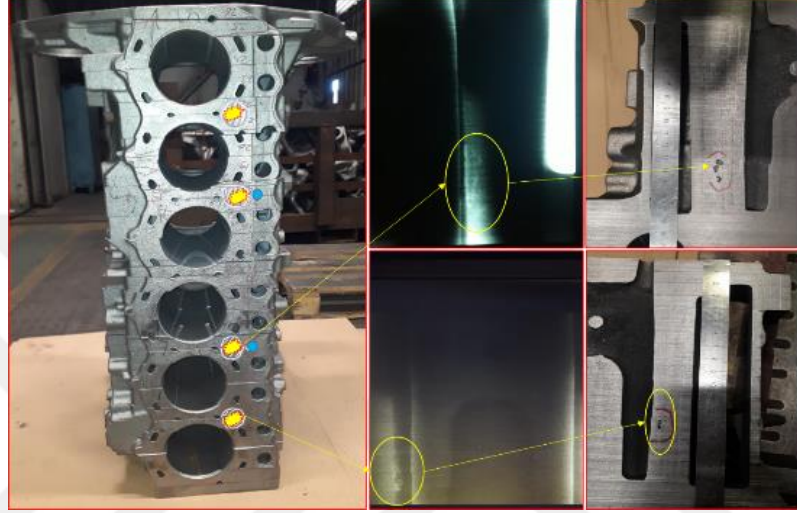
Radyoskopik muayene ile elde edilen sonuçlar Çizelge 4.5’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 : Radyoskopik muayene sonuçları

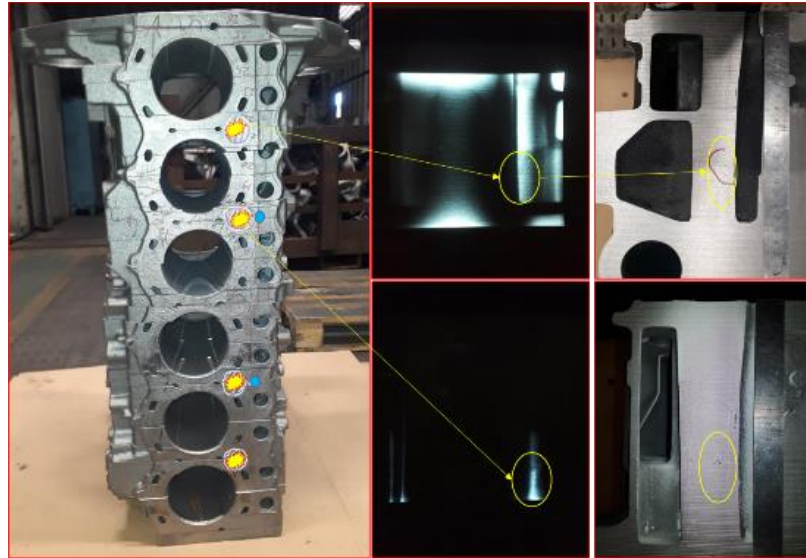
	DDL – 200	DDL – 210	DDK – F	DDV – 450
Kesit sayısı	20	20	20	20
Hatalı çıkan kesit sayısı	0	1	8	4
Min. hata seviyesi	0	CC2	CC3	CC2
Max. hata seviyesi	0	CC2	CC6	CC4
Hata alanı	0	2 cm ²	30 cm ²	11 cm ²

4.3.1 Vermiküler Grafitli Dökme Demir Üretimi Motor Bloğun Xray Kontrolü

DDV-450 analiziyle yani vermiküler grafitli dökme demir tipi ile üretimi yapılan seri üretim motor bloklarının kesitlerinde işleme sonrası CC3 ve CC4 seviyeli çekintilere rastlanmıştır. Bu çekinti sakatları Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görülmektedir.



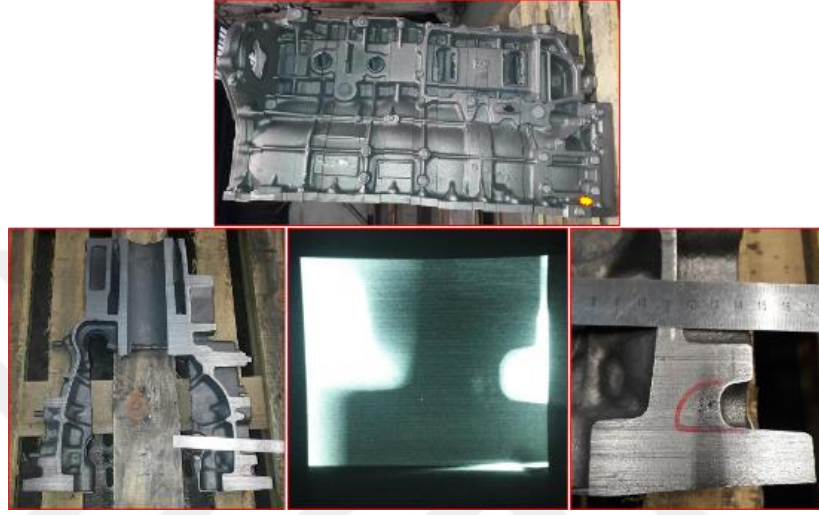
Şekil 4.5 : İşaretli kesitlerde kafa bağlama deliklerinden uzakta yaklaşık 130 mm derinlikte sızdırmaya neden olmayacak konumda (kep yağlama kanalından uzak) CC3 ve CC4 seviyeli çekintiye rastlanmıştır.



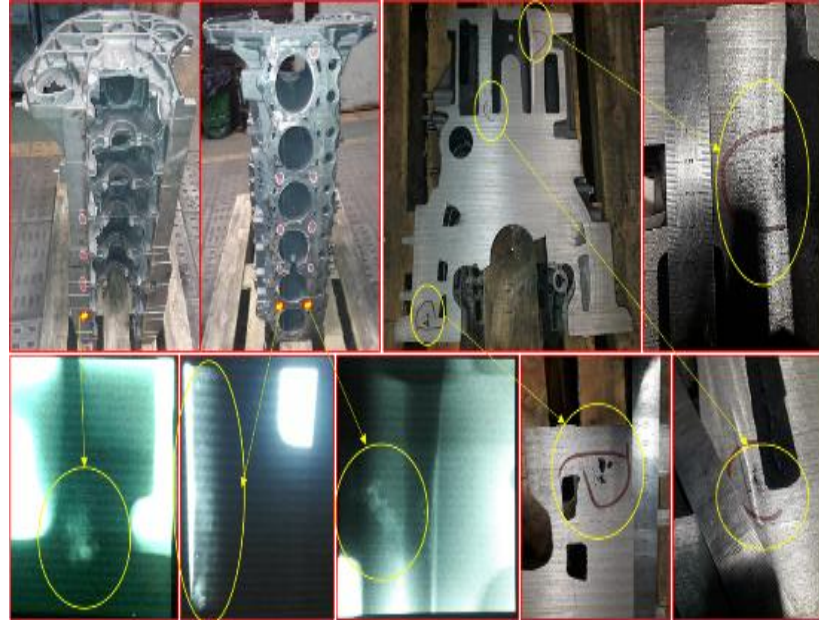
Şekil 4.6 : İşaretli kesitlerde kafa bağlama deliğinden uzakta yaklaşık 130 mm derinlikte sızdırmaya neden olmayacak konumda (kep yağlarından uzak) CC2 seviyeli mikro gözenekli çekintiye rastlanmıştır. Diğer kesitlerde hataya rastlanmamıştır.

4.3.2 Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimi Motor Bloğun X ray Kontrolü

DDK-F analizinde yani küresel grafitli dökme demir tipinde deneme üretimi yapılan motor bloğun kesitlerinde işleme sonrası sızdırmaya neden olacak CC3, CC4, CC5 ve CC6 seviyeli çekintilere rastlanmıştır. Bu çekinti hatalarına ait fotoğraflar Şekil 4.7-Şekil 4.13 arası görülmektedir.



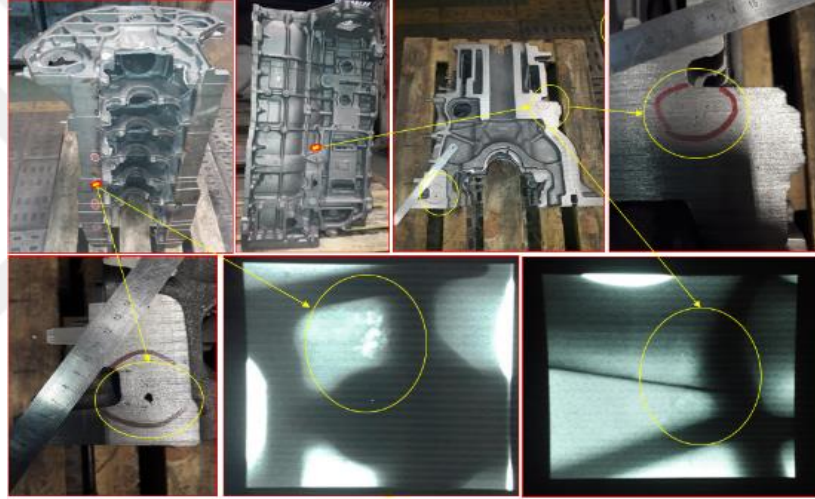
Şekil 4.7 : İşaretli üst derece bölgesinde seri üretim parçalarda görülmeyen CC3 seviye çekinti hatası



Şekil 4.8 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak ve kesin sızdıracak konumdaki CC4, CC5 ve CC6 seviyeli çekintiler



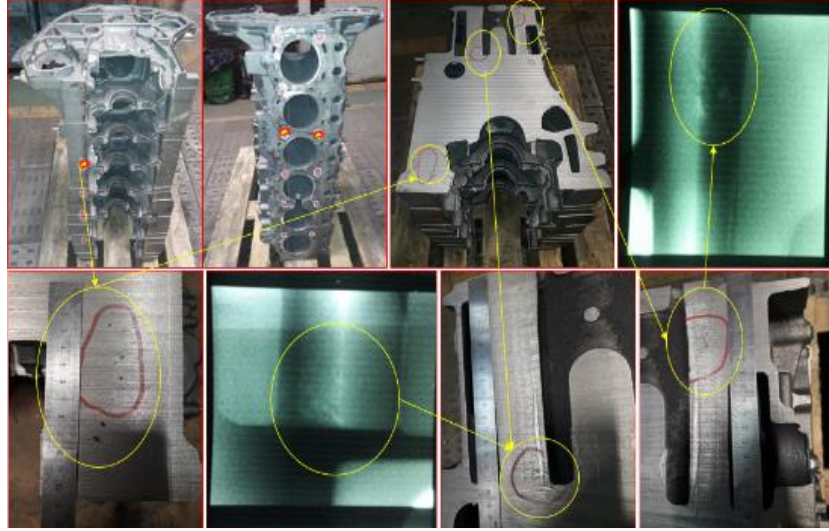
Şekil 4.9 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak ve kesin sızdıracak konumdaki CC4 ve CC5 seviyeli çekintiler



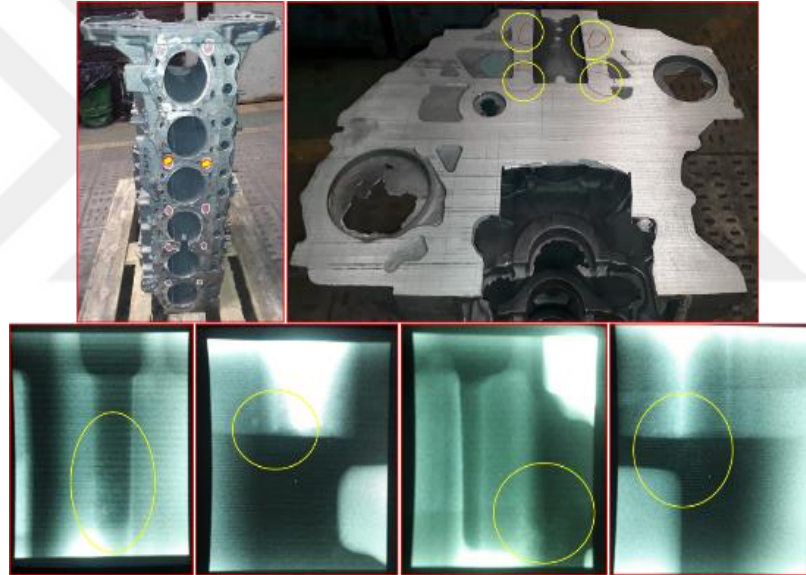
Şekil 4.10 : İşaretli bölgelerde seri üretim parçalarda görülmeyen CC3 ve CC5 seviyeli çekintiler



Şekil 4.11 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak konumda CC3 ve CC4 seviyeli çekintiler



Şekil 4.12 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak konumda CC3 ve CC4 seviyeli çekintiler



Şekil 4.13 : İşaretli bölgelerde kafa bağlama deliği delinince çıkacak konumda CC3 ve CC4 seviyeli çekintiler

4.3.3 Gri Dökme Demir (DDL-200) Üretimi Motor Bloğun X ray Kontrolü

DDL-200 lamel grafitli dökme demir analiz tipinde deneme üretimi yapılan motor bloğun X-ray kontrolleri sonucunda parçanın kafa bağlama deliği bölgelerinde ve diğer kesitlerde herhangi bir çekintiye rastlanmamıştır. Sadece yüzeysel gaz hatası tespit edilmiştir.



Şekil 4.14 : DDL – 200 madeni ile dökülen parçadaki gaz hataları

4.3.4 Gri Dökme Demir (DDL-210) ile Dökülen Motor Bloğun X ray Kontrolü

DDL-210 gri dökme demir tipi ile deneme üretimi yapılan motor bloğun X-ray kontrolleri sonucunda Şekil 4.15’te gösterilen 1 ve 2 numaralı silindirler arasında, kafa bağlama deliğinden uzak ve derin kesitte işleme sonrası sızdırmaya neden olmayacak konumda, CC2 seviyeli ve mat görünümlü mikro çekinti görülmüştür. Diğer kesitlerde ise herhangi bir hataya rastlanmamıştır.



Şekil 4.15 : DDL – 210 madeni ile dökülen parçada 1 ve 2 numaralı silindirler arasında mikro çekintiler

Farklı dökme demir tiplerinde deneme dökülen motor blokların iç sağlamlık kontrolleri Döктаş Dökümcülük AŞ bünyesinde bulunan X ray ünitesinde yapılmıştır. Dökülen parçalar X-Ray kontrolü için 20’şer kesit dilim olacak şekilde testerede kesilmiş ve sonrasında kesitler radyoskopi X ray cihazı ile kontrol edilmiştir. Yapılan kontrollerde DDL-200 analiziyle dökülen parçada hataya rastlanmamıştır. Hata sayısı

ve alanı olarak en fazla hata küresel grafitli dökme demirin bir alt türü olan DDK-F analiziyle dökülen parçalarda tespit edilmiştir. Bu durum küresel grafitli dökme demir parçanın yüksek Mg içeriği ve küreselliği nedeniyle çekmeye meyilli olması ve dolayısıyla daha çok sıvı metal beslemesine ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır.

Gri dökümde çekinti riski minimum iken sfero dökümlerde genel olarak çekinti ihtimali daha yüksektir. Gri döküm demir ile sfero dökme demir arasında ara bir malzeme türü olan VGDD malzemedede ise sferoya göre daha az çekinti hatası tespit edilmiştir. Ayrıca seri üretimlerde vermiküler grafitli dökme demir parçalarda küresellik değeri %20'lik hedef değerin üzerine çıkıp sferoya yaklaştıkça, iç hataların arttığı Döktaş tarafından tecrübe edilmiştir.

Liu-Jinchang [52], %0-20 küresellik değerine sahip vermiküler grafitli dökme demir malzemenin mukavemet, termal iletkenlik, işlenebilirlik, aşınma direnci ve dökülebilirlik açısından en iyi özellikte olduğunu uzun süreli tecrübelerine dayanarak belirtmiştir. Dünyanın önde gelen döküm simülasyon programı olan Magma firmasından C.Heisser de [56], yeni simülasyon programlarıyla yapılan sonuçlara göre, vermiküler grafitli dökme demirlerin % küresellik değerleriyle döküm parçadaki iç hatalar arasında yakın ilişki olduğunu belirtmektedir. Yine Sintercast firmasından Steve Dawson'a [5] göre de, silindir blok ve kafa gibi karmaşık şekilli döküm parçalarda yüksek küresellik oranı mutlaka porozite hatalarına neden olacaktır.

Düşük %Mg içeriğine sahip olan vermiküler grafitli dökme demirin küresel grafitli dökme demire göre dökülebilirliği çok daha iyidir. Bu da küresel grafitli dökme demir yerine vermiküler grafitli dökme demir kullanılan uygulamalarda eksik döküm, katmer, dros, filtre tıkanması gibi kalıp döküm hatalarının azalmasını yanında çekinti ve porozite gibi hataların da ciddi oranda azaltılmasını sağlamıştır. Ramos ve arkadaşlarına [55] göre de, %0.018'in üzerindeki Mg seviyelerinde küresellik değerinin arttığını ve yapmış olduğu denemelerde %35'in üzerindeki küresellik değerlerinde test numunelerinde çekinti porozitelerini tespit etmiştir. Kısaca vermiküler grafitli dökme demir ile üretilen parçaların mikroyapısındaki grafitlerin şekli griden sferoya doğru gittikçe çekinti kaynaklı döküm hataları artacaktır.

DDL-210 malzemesi de DDL-200 gibi lamel grafitli dökme demir ailesinden olmasına rağmen, çekinti seviyesi nispeten daha yüksektir. Zira kimyasal analizinde daha düşük

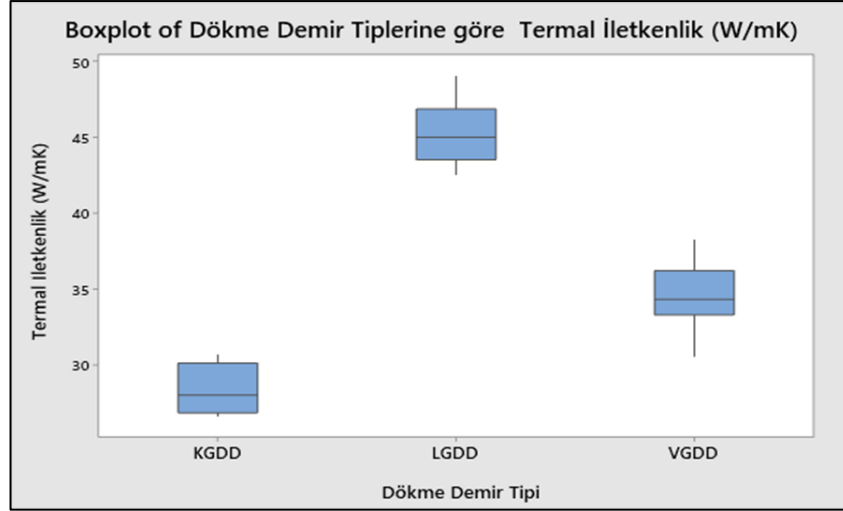
%C (karbon) değerine sahip olmasından dolayı çekintiye olan yatkınlık daha yüksektir. Katılaşma esnasında analizdeki grafitler genişmekte ve metaldeki büzülmeyi bir seviyeye kadar telafi etmektedir. Karbon içeriği ne kadar fazla olur ise metalin katılaşması esnasındaki büzülmeyi telafi etme miktarı da artmaktadır.

4.4 Termal İletkenlik

Vermiküler grafitli dökme demirden üretilen motor bloklarından yapılan termal iletkenlik ve çekme test sonuçları Çizelge 4.6’da verilmiştir.

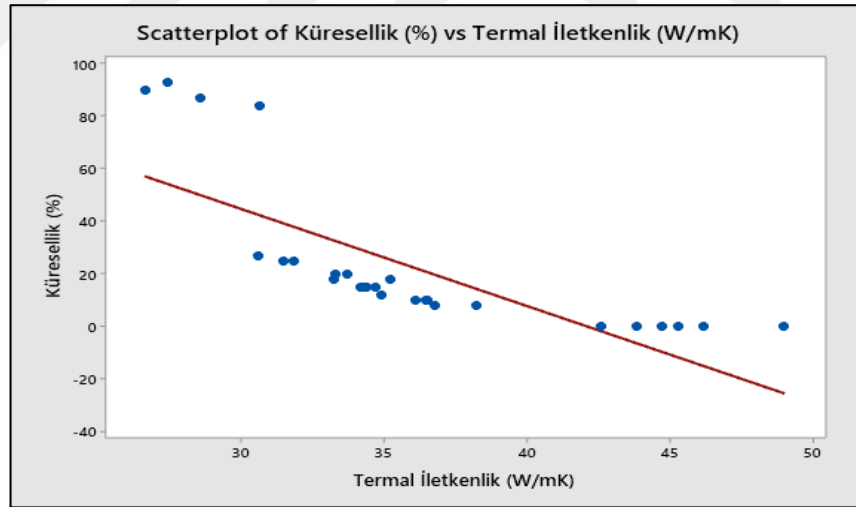
Çizelge 4.6 : Farklı dökme demir tipleriyle dökülen motor bloklarının termal iletkenlik ve çekme test sonuçları

Dökme Demir Tipi	Termal İletkenlik (W/mK)	Küresellik (%)	Akma mukavemeti (MPa)	Kopma mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
VGDD	34.25	15	426	522	1,42
VGDD	33.29	20	482	569	1,62
VGDD	38.22	8	440	517	1,17
VGDD	34.91	12	439	522	1,31
VGDD	35.2	18	445	544	1,7
VGDD	33.7	20	485	562	1,82
VGDD	33.24	18	486	562	1,21
VGDD	34.25	15	430	531	1,4
VGDD	34.37	15	447	554	1,5
VGDD	30.56	27	482	589	1,92
VGDD	36.44	10	409	503	1,29
VGDD	36.5	10	438	524	1,3
VGDD	36.77	8	404	504	1,1
VGDD	36.11	10	432	505	1,13
VGDD	34.17	15	442	527	1,23
VGDD	31.83	25	477	606	1,88
VGDD	31.45	25	463	572	1,83
VGDD	34.68	15	497	543	1,54
KGDD	27.4	93	289	452	15.2
KGDD	30.62	84	261	423	12.1
KGDD	28.57	87	277	441	13.9
KGDD	26.61	90	285	447	14.2
LGDD	49	0	-	229	-
LGDD	46.16	0	-	238	-
LGDD	43.84	0	-	244	-
LGDD	42.57	0	-	236	-
LGDD	45.29	0	-	241	-
LGDD	44.73	0	-	227	-



Şekil 4.16 : Farklı dökme demir tiplerindeki termal iletkenlik değerlerinin karşılaştırması

Vermiküler grafitli dökme demir malzemedan hazırlanmış termal iletkenlik numunelerinin ortalama termal iletkenlik değeri 34.4 W/mK olarak ölçülürken, lamel grafitli dökme demir numunelerden ölçülen değerlerin ortalaması 45.2 W/mK dir.



Şekil 4.17 : %Küresellik ile termal iletkenlik ilişki grafiği

Sintercast firmasından Steve Dawson ve Willson Guesser'e göre [5], vermiküler grafitli dökme demirin termal iletkenliği lamel grafitli dökme demire göre %20 daha düşüktür. Bu nedenle aşırı termal yüklenmelerin olduğu şartlarda çalışan vermiküler grafitli dökme demir parçalarda yüksek küresellikten kaçınılmasını tavsiye etmiştir. Yukarıdaki grafikten de görüleceği üzere artan %küresellik değerleriyle termal iletkenlik değerleri azalmaktadır.

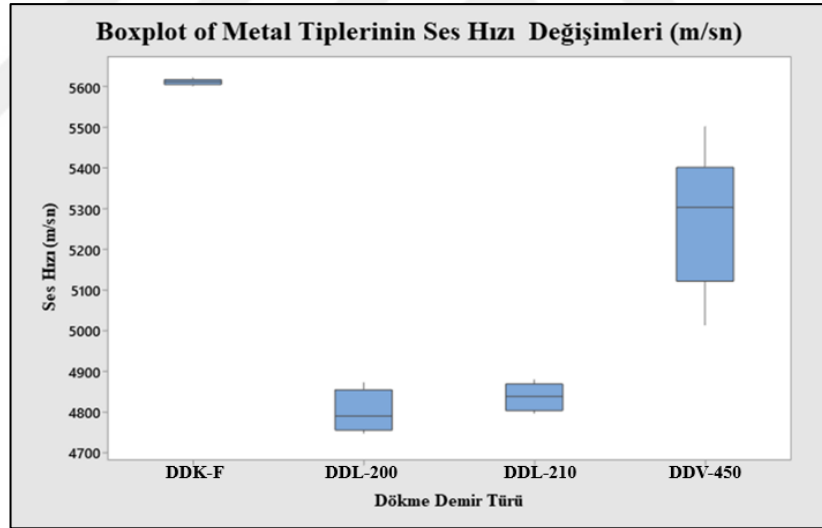
Marcin Gorny ve arkadaşlarına göre de [59], termal iletkenlik vermiküler grafitli dökme demir mikroyapısında vermikülerleşme oranıyla doğru orantılı iken, mikroyapıdaki küresel nodüllerin varlığı termal iletkenliği azaltmaktadır.

4.5 Ultrasonik Ses Hızı Ölçüm Sonuçları

Dört farklı dökme demir tipinde deneme dökülen motor blokların ultrasonik ses hızı sonuçlarının ortalaması Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Ultrasonik ses hızı ölçümü sonuçları ortalamaları

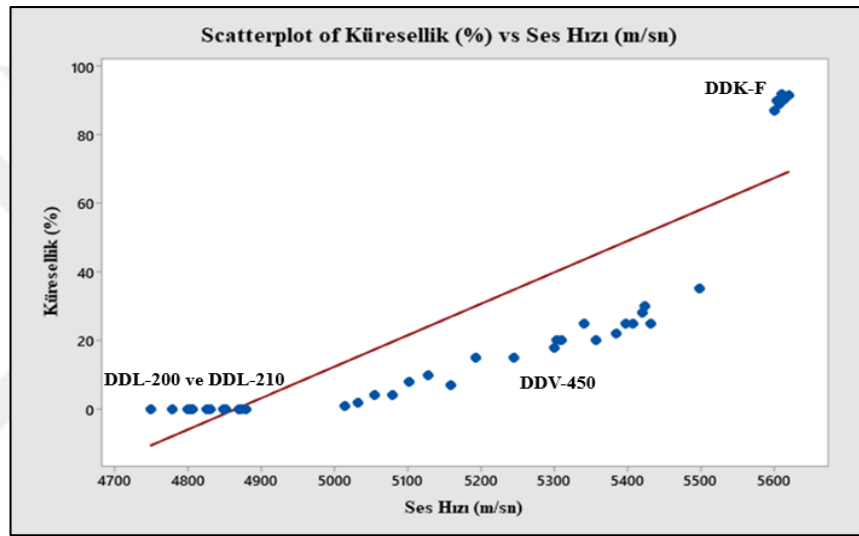
Dökme demir türü	Ultrasonik ses hızı (m/sn)
DDK – F (EN GJS – 400)	5610
DDL – 200 (EN GJL – 250)	4801
DDL – 210 (EN GJL – 300)	4838
DDV – 450 (EN GJV – 450)	5260



Şekil 4.18 : Farklı dökme demir tiplerinin ses hızı değerlerinin karşılaştırılması

DDV-450 standardında dökülen vermiküler grafitli dökme demirden üretilen motor blokları arasında en yüksek ses hızı 5500 m/sn, en düşük ses hızı 5015 m/sn, ortalama ses hızı ise 5260 m/sn olarak bulunmuştur. Şekil 4.18’den görüldüğü üzere en yüksek ses hızına sahip metal tipi küresel grafitli dökme demir tipi olan DDK-F’ dir (EN GJS-400). %90 ve üzeri küreselliğe sahip küresel grafitli dökme demir parçalarda 5600 m/sn ’nin üzerinde ses hızı vardır. 5500 m/sn ses hızına sahip parçalarda %75 civarında küresellik olması beklenmektedir. 5500 m/sn altı ses hızlarında küresel grafitli dökme demir parçaların küresellik değerleri de düşük olacaktır.

Deneme yapılan dört farklı malzeme içinde küreselliği en yüksek olan, DDK-F malzemesinde ses hızı minimum 5601 m/sn, maksimum 5621 m/sn, ortalaması ise 5612 m/sn olarak ölçülmüştür. Gri döküm parçaların ses hızları ise nispeten daha düşük olup 4800 m/sn civarında ölçülmüştür. Ses hızının bu ayırt edici özelliği sayesinde vermiküler grafitli dökme demir üretiminde, uygun küreselliğe sahip parça üretiminde ses hızı ölçümü oldukça yaygın kullanılan bir metottur. Vermiküler grafitli dökme demirler, küresel grafitli dökme demir ile gri dökme demir arasında bir tür olduğundan maksimum %20'ye kadar küresellik istenmektedir ve ses hızları da bu iki dökme demir tipinin arasındadır.



Şekil 4.19 : % Küresellik ve ses hızı ilişkisi

Şekil 4.19'dan görüldüğü üzere artan küresellik oranı ile ses hızı değeri de artmaktadır. Optimum mühendislik özelliklerinin elde edilebilmesi için vermiküler grafitli dökme demirlerde maksimum %20 küresellik değeri hedeflenmelidir. Küresellik kontrolü ise parçadan numune alınarak mikroyapı incelemesini gerektiren, tahribatlı bir yöntemdir. Bu nedenle ses hızı-küresellik ilişkisi kullanılarak parçalardan ultrasonik test cihazı ile ses hızı ölçümü yapılarak vermiküler grafitli dökme demir prosesinin kontrolü yapılabilmektedir.

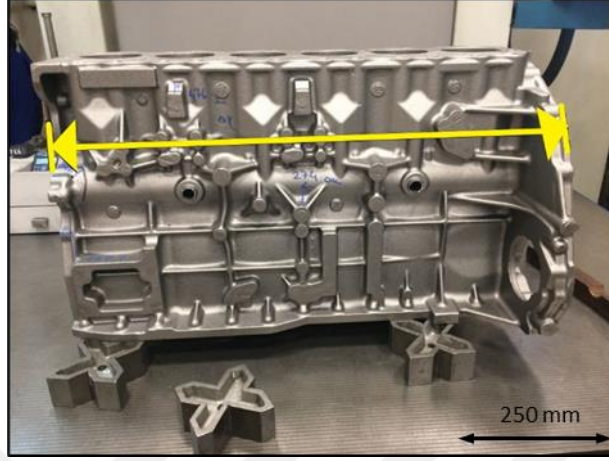
Sintercast firmasından Steve Dawson ve Willson Guesser'e göre [5], vermiküler grafitli dökme demirde ultrasonik ses hızı ölçümüyle düşük ses hızındaki flake grafit oluşum riski ile yüksek ses hızındaki yüksek küresellik nedeniyle artan porozite riski arasında net bir ayrım yapılması mümkündür. Bu nedenle, ses hızına göre en iyi çalışma aralığının 5150-5350 m/sn olduğunu belirtmektedir.

Çizelge 4.8 : Farklı dökme tiplerinin ses hızı, küresellik ve çekme test sonuç tablosu

Dökme Demir Türü	Küresellik (%)	Ses Hızı (m/sn)	Kopma Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
DDV – 450 (EN GJV 450)	1	5015	404.09	308.61	2.19
	4	5055	387.05	301.19	1.95
	7	5160	439.75	319.42	2.49
	2	5032	411.24	316.55	2.04
	4	5080	400.24	304.28	2.17
	8	5103	413.27	310.46	2.27
	30	5425	465.32	350.52	1.94
	10	5128	425.99	314.02	2.18
	10	5128	423.16	322.08	2.14
	15	5245	446.58	336.74	2.1
	20	5357	472.26	351.97	2.09
	18	5301	471.56	350.57	2.07
	15	5194	429.2	327.8	1.82
	22	5385	502.02	355.93	2.46
	25	5341	489.08	343.58	2.63
	35	5500	538.04	360.29	3.21
	28	5421	522.6	364.7	2.76
	25	5408	523.51	362	2.62
	25	5399	514.96	363.26	2.82
	25	5432	522.78	350.01	3.1
DDK – F	91	5612	463.55	286.94	10.1
	89	5601	439.31	286.42	9.98
	91	5621	460.92	289.25	10.57
(EN GJS – 400)	89	5605	452.6	291.07	10.34
	89	5609	448.9	286.45	10.2
	90	5614	457.2	289.1	10.64
DDL – 200	0	4804	226.84	-	-
	0	4749	224.25	-	-
(EN GJL – 250)	0	4779	225.71	-	-
	0	4873	230.12	-	-
DDL – 210	0	4825	259.3	-	-
	0	4880	272.11	-	-
	0	4830	269.82	-	-
	0	4806	243.54	-	-
	0	4870	264.19	-	-
	0	4871	259.51	-	-
(EN GJL – 300)	0	4801	243.65	-	-
	0	4799	241.21	-	-
	0	4849	240.06	-	-
	0	4851	250.76	-	-

4.6 Boyutsal Ölçüm Sonucu

Dört farklı dökme demir tipinde dökülen motor blokları Şekil 4.20 'de gösterildiği gibi Coord 3 CMM cihazında ölçülmüştür. Sonuçlar Çizelge 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.20 : Motor bloğu parçalarda ölçüm yapılan bölge

Çizelge 4.9 : Dökülen parçaların ölçü kontrol sonuçları

Dökme demir türü	Uzunluk (mm)
DDK – F	824.0
DDL – 200	820,2
DDL – 210	820.0
DDV – 450	821,1

Dört farklı dökme demir türüyle deneme dökülen motor bloklarının uzunlukları Coord 3 tezgahında ölçüldüğünde, en fazla uzunluk 824 mm ile DDK-F malzemesinde elde edilmiştir. DDK-F diğer deneme malzemelerine göre en sünek olan malzeme tipidir. En düşük uzunluk değeri yine gevrek karakterde olan gri dökme demir malzemelerinde (DDL-200 ve DDL-210) elde edilmiştir. Vermiküler grafitli dökme demir ve lamel grafitli dökme demir ile dökülen motor blokların ölçüm sonuçları arasında önemli fark bulunmamaktadır.

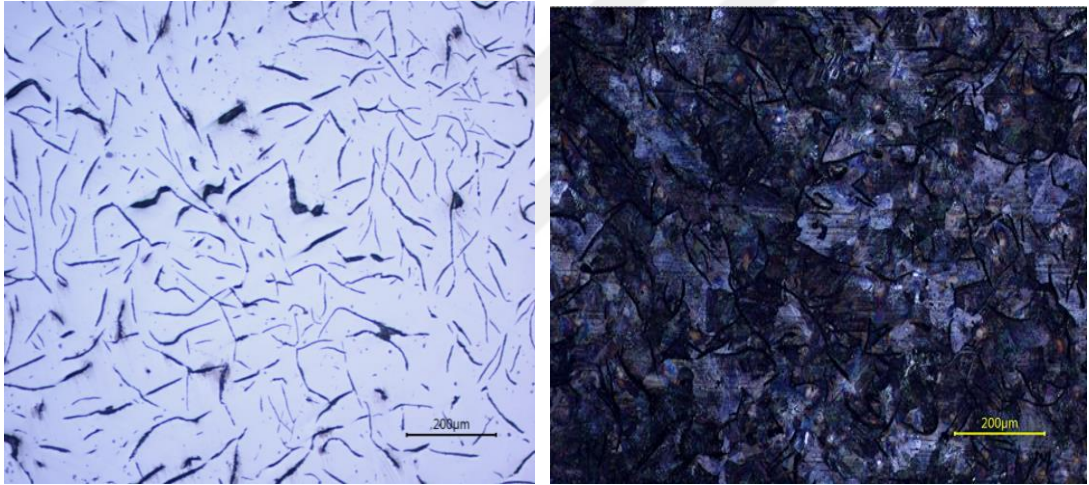
Liu Jincheng'e göre [52] lamel ve vermiküler grafitli dökme demir ile dökülen motor bloklardan yapılan boyutsal ölçüm sonuçları arasında çok az fark olduğu ve tüm sonuçların ölçüm toleransları içinde olduğunu belirtmiştir. Yine Cifunsa dökümhanesinde yapılan vermiküler grafitli dökme demir dökümler için C.R.Farias

ve arkadaşları tarafından [54] yapılan bildirimde göre de gri döküm model takımları ve maça paketiyle yapılan vermiküler grafitli dökme demir deneme dökümlerinde, ölçüsel olarak yapılan kontrollerde tüm ölçü değerlerinin toleranslar içinde olduğu ve birbirleri arasında çok az fark olduğu belirtilmektedir.

4.7 Mikroyapı Analiz Sonuçları

4.7.1 Lamel Grafitli Dökme Demir ile Dökülen Parçanın Mikroyapı İncelemesi

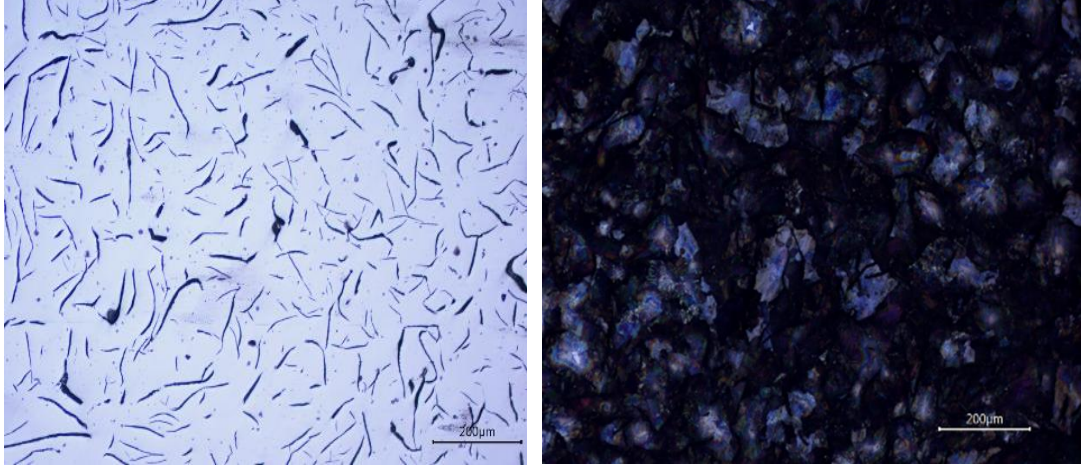
Şekil 4.21’de DDL-200 standardına göre üretilmiş motor bloğuna ait dağlanmamış ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafları görülmektedir. Şekil 4.21’de görüldüğü üzere mikroyapıda A tipi grafitler mevcut olup, matriks perlitik yapıdadır.



Şekil 4.21 : DDL – 200 dağlanmamış (solda) ve dağlanmış (sağda) mikroyapı fotoğrafı (100X büyütme)

4.7.2 Lamel Grafitli Dökme Demir ile Dökülen Parçanın Mikroyapı İncelemesi

Şekil 4.22’de DDL-210 lamel grafitli dökme demir standardına göre üretilmiş motor bloğuna ait dağlanmamış ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafı görülmektedir. Şekil 4.22’den de görüldüğü üzere mikroyapıda A tipi grafitler mevcut olup matriks perlitik yapıdan oluşmaktadır.

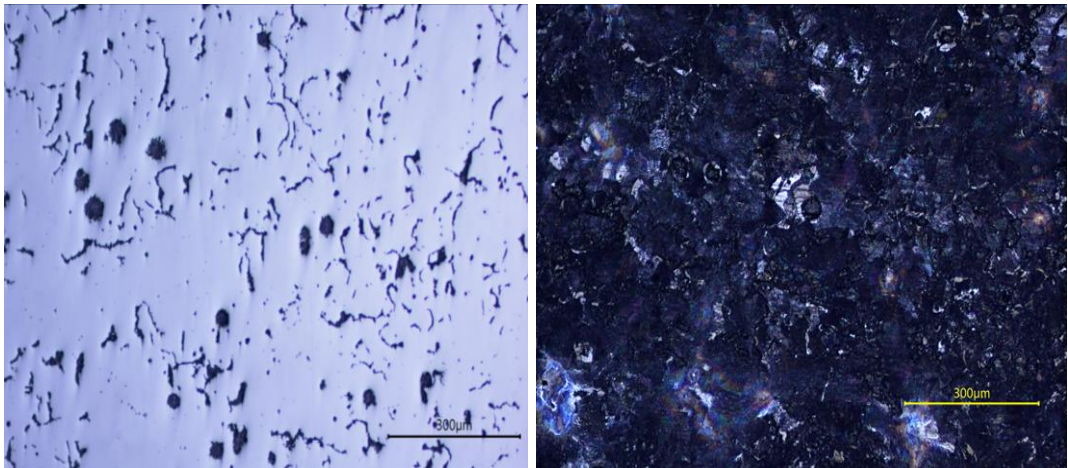


Şekil 4.22 : DDL – 210 dağlanmamış (solda) ve dağlanmış (sağda) mikroyapı fotoğrafı (100X büyütme)

4.7.3 Vermiküler Grafitli Dökme Demir Parçanın Mikroyapı İncelemesi

Şekil 4.23’de DDV-450 standardına göre üretilmiş, motor bloğuna ait dağlanmamış ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafları görülmektedir.

Şekil 4.23’den görüldüğü üzere kurtçuk (vermiküler) şeklindeki grafitler çoğunluktadır. Dağlanmış mikroyapı fotoğrafında ise mikroyapıda çoğunlukla perlit yapısının olduğu görülmektedir. Az miktarda ise ferrit fazı bulunmaktadır.

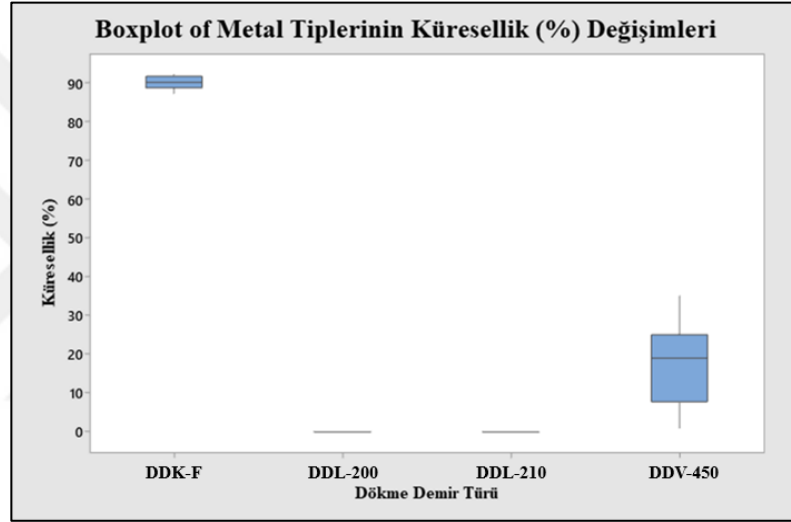


Şekil 4.23 : DDV – 450 dağlanmamış (solda)ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafı (100X büyütme)

Çizelge 4.10'da Clemex Image analyzer programı ile elde edilen mikroyapı analiz sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4.10 : DDV – 450 mikroyapı analizi

DDV – 450 (EN GJV 450)	
Taranan alan	10
Büyütme	100X
Küresellik	%15,43
Grafit	%9,96
Perlit	%88,23
Ferrit	%1,81



Şekil 4.24 : Farklı dökme demir tiplerindeki %küresellik değerlerinin karşılaştırılması

Tam sferolaşma prosesinden dolayı en yüksek küresellik değerine, %87 ile DDK-F malzemesinde ulaşılmıştır. Küresel grafitli dökme demirlerde uygun mekanik özellikler için mikroyapıda minimum %80 küresellik olmak zorundadır. DDV-450 malzemesinde ise vermikülerleşme prosesi gereği eksik tretman yapıldığından dolayı %15,43 küresellik değeri bulunmaktadır. Vermiküler grafitli dökme demirde maksimum %20 küresellik hedeflenmektedir.

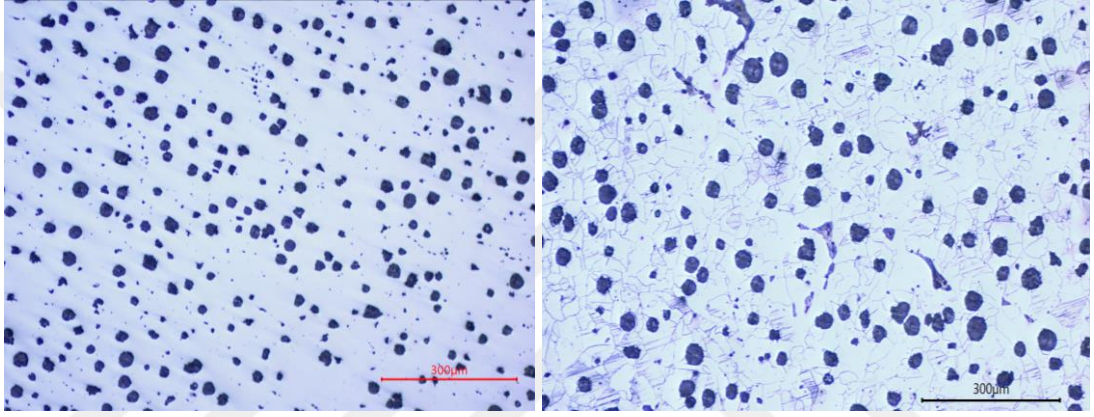
Liu-Jincheng [52] ve Steve Dawson'a [40] göre, 0-20% küresellik değerine sahip vermiküler grafitli dökme demir malzemenin mukavemet, termal iletkenlik, işlenebilirlik, aşınma direnci, iç sağlamlık ve dökülebilirlik açısından en iyi özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir.

Gri dökme demir tiplerinde ise (DDL-200 ve DDL-210) standardın gereği olarak grafitler küresel olmayıp lamel şeklindedir. Yani küresellik değeri %0' ır.

4.7.4 Küresel Grfaitli Dökme Demir ile Dökülen Parçanın Mikroyapı incelemesi

Şekil 4.25’de DDK-F standardına göre küresel grafitli dökme demirden üretilmiş motor bloğuna ait dağlanmamış ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafları görülmektedir.

Mikroyapıdaki grafitlerin küresel olduğu ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafında ise matrikste ağırlıklı olarak ferrit fazı olduğu görülmektedir. Az miktarda perlit yapısı da mevcuttur.



Şekil 4.25 : DDK – F Dağlanmamış (solda) ve dağlanmış mikroyapı fotoğrafları (100X büyütme)

Çizelge 4.11’de Clemex Image analyzer programı ile elde edilen mikroyapı analiz sonuçları görülmektedir.

Çizelge 4.11 : DDK- F mikroyapı analizi

DDK – F (EN GJS 400)	
Taranan alan	10
Büyütme	100X
Küresellik	%87,13
Grafit	%9,99
Perlit	%3,87
Ferrit	%86,14

Denemelerde kullanılan dört farklı malzeme içinde en düşük perlit oranına sahip malzeme DDK-F’dir. Buda mukavemet ve sertlik değerlerinin düşük, % uzama değerinin ise yüksek olmasına neden olmuştur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre vermiküler grafitli dökme demirin mekanik ve fiziksel özellikleri hibrid bir malzeme olmasından dolayı gri ve sfero dökme demir arasında olduğu analiz edilmiştir.

Yüksek mukavemet, %uzama, iç sağlamlık, işlenebilirlik, aşınma direnci, termal iletkenlik, titreşim sönümleme gibi mekanik ve fiziksel özelliklerin optimize edilmesi için %küresellik değeri maksimum %20 olmalıdır. Mikroyapı özelliklerinin özellikle %küresellik değerinin kritik önemde olduğu ve malzeme özelliklerini doğrudan etkilediği tespit edilmiştir. Bu nedenle VGDD (vermiküler grafitli dökme demir) üretimi hassas bir proses olup istenilen kalitede parça üretimi ancak dar limitlerde kontrollü üretim yapılmasına bağlıdır.

Dört farklı dökme demir tipiyle dökülen motor bloklardan yapılan mekanik testlerde VGDD ile dökülen motor blokların LGDD (lamel grafitli dökme demir) ile dökülen motor blokların (DDL-200 ve DDL-210) 2 katı kadar kopma mukavemetine sahip olduğu ve LGDD ile dökülenler gevrek kırılma özelliğinde iken VGDD'in %3'e kadar sünek olduğu tespit edilmiştir. VGDD ile LGDD arasındaki mekanik özelliklerin farklı olmasında grafitlerin şekli, dağılımı önemli faktörlerin başında gelmektedir. Vermiküler grafitli dökme demir malzemede küresellik ve ses hızı değeri arttıkça parçanın kopma ve akma mukavemet değerleri de artmaktadır. Aynı zamanda küresellik değeri arttıkça uzama değeri de artış göstermektedir.

Deneme yapılan dökme demir türleri içinde en yüksek % uzama değeri KGDD (küresel grafitli dökme demir) tipi olan DDK-F ile dökülen parçalarda elde edilmiştir. Yüksek küresellik ve ferrit oranı %uzama değerini artırmıştır. Fakat ferrit fazının

yumuşak olmasından dolayı sertlik değerleri en düşük olan motor bloklar da bu analizle dökülenlerdir.

Döküm malzemelerin küresellik oranı arttıkça ses hızı değerlerinde de artış olmaktadır. Optimum mühendislik özelliklerinin elde edilebilmesi için vermiküler grafitli dökme demirlerde maksimum %20 küresellik değeri hedeflenmelidir. Küresellik kontrolü ise parçadan numune alınarak mikroyapı incelemesini gerektiren tahribatlı bir yöntemdir. Bu nedenle ses hızı - küresellik ilişkisi kullanılarak UT cihazı ile ses hızı ölçümü yapılarak vermiküler grafitli dökme demir prosesinin kontrolü yapılabilmektedir. Uygun mukavemet ve fiziksel özellikler için VGDD ile üretilen parçadan ölçülen ses hızı değerinin 5150-5350 m/sn arasında olması tavsiye edilmektedir.

Dört farklı malzeme ile dökülen motor bloklarının uzunlukları Coord 3 tezgahında ölçüldüğünde VGDD ve LGDD ile dökülen motor bloklar arasında boyutsal olarak önemli bir fark olmadığı ve ölçüsel tolerans içinde olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla yeni döküm takımları imalatına gerek olmadan daha önce LGDD ile dökülen bir parça VGDD ile dökülebilir.

Farklı döküm tipleriyle deneme dökülen motor bloklarından yapılan iç sağlamlık kontrollerinde DDL-200 analiziyle dökülen parçada hataya rastlanmamıştır. Hem sayıca hemde büyüklük olarak en büyük hataların, KGDD ile yani DDK-F analiziyle dökülen parçalarda olduğu tespit edilmiştir. Bu durum küresel grafitli dökme demir parçanın yüksek Mg içeriği ve küreselliğe sahip olması nedeniyle çekintiye meyilli olması ve dolayısıyla daha çok sıvı metal beslemesine ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır.

Gri dökümde çekinti riski minimum iken sfero dökümlerde genel olarak çekinti ihtimali daha yüksektir. Gri dökme demir ile sfero dökme demir arasında ara bir malzeme türü olan VGDD malzemedede ise KGDD'e göre daha az çekinti hatası tespit edilmiştir. Ayrıca seri üretimlerde VGDD demir parçalarda küresellik değeri %20'lik hedef değerini üzerine çıkıp sferoya yaklaştıkça iç hataların arttığı tecrübe edilmiştir. Bu nedenle VGDD ile parça üretiminde LGDD'e göre ek besleyici konulması gerekebilir. Ek besleme ihtiyacı da parça üretim maliyetini artırıcı etki yapacaktır.

DDL-210 malzemesi de DDL-200 gibi LGDD ailesinden olmasına rağmen, çekinti seviyesi nispeten daha yüksektir. Zira kimyasal analizinde daha düşük %C (karbon) değerine sahip olmasından dolayı çekinti miktarı daha yüksektir. Katılaşma esnasında analizdeki grafitler genişmekte ve metaldeki büzülme bir seviyeye kadar telafi etmektedir. Karbon içeriği ne kadar fazla ise büzülme telafi miktarı da artmaktadır.

Termal iletkenlik ölçümlerinde en yüksek iletkenlik değerine sahip numuneler LGDD ile dökülenler olup ortalama değer 45.2 W/mK olurken, VGDD ile dökülen numunelerin ortalama iletkenlik değeri 34.4 W/mK'dır. Küresellik değeri arttıkça termal iletkenlik değeri azaldığından yoğun termal yüklemelerin olduğu uygulamalarda kullanılacak olan parçalarda yüksek küresellik değerinden kaçınılmalıdır.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışmasında vermiküler grafitli dökme demir ile üretilen motor blokların özelliklerini etkileyen faktörlerin alternatif dökme demir tipleriyle dökülen bloklarla karşılaştırılması için mekanik testler, iç sağlamlık kontrolleri, boyutsal ölçümler, mikroyapı kontrolleri, ses hızı ve termal iletkenlik ölçümleri yapılmış ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Farklı dökme demir tipleriyle dökülen motor blokların mekanik özelliklerinin bir çoğu incelenmiş olmasına rağmen aşınma ve yorulma dayanımı ölçümleri yapılamamıştır. Aşınma ve yorulma dayanımı özelliklerinin karşılaştırılması ayrıca incelenebilir.

Bunun yanında parça imalatında işlenebilirlik özelliği malzeme seçimi için belirleyici faktörlerden biri olmasından dolayı farklı dökme demir tiplerinin işlenebilirlik özellikleri de ayrıca incelenebilir.

Yine bu tez çalışmasında vermikülerleşme prosesinde parçanın mikroyapısında % küresellik değeri artıp malzeme sfero dökme demire yaklaştıkça çekinti kaynaklı iç hataların arttığı görülmüştür. Bu nedenle vermiküler grafitli ve diğer dökme demir tiplerinden dolum ve katılaşma simülasyon çalışmaları yapılarak, uygun besleyici ve yolluk konfigürasyon çalışması yapılabilir.

Vermiküler grafitli malzemenin mekanik özelliklerini artırmak için ısıtım işlem uygulaması ve özel bazı alaşımlar (Ni, Mo ve N ile) elementleri ilavesiyle mekanik özelliklerde olabilecek değışimler de ayrıca incelenebilir.

Vermikülerleşme prosesi için farklı üretim metodları ve seryum, FeSiMg bazlı farklı küreleştirici alaşımlar mevcut olduğundan seri imalat için maliyet ve kalite gerekliliğini sağlayan en uygun metod araştırılarak vermikülerleşme prosesinin yaygınlaşmasına katkı sağlanabilir.

Bu tez çalışmasında VGDD'lerin alternatif diğer dökme demirler ile olan karşılaştırması yapılmış olup, alüminyum ve kompozit malzemeler başta olmak üzere diğer alternatif mühendislik malzemeleriyle olan karşılaştırılması da yapılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Değirmenci, S., Şirin, B., Metan, İ. (2006). Ülkemizde ve Dünyada Döküm Sektöründe Genel Bir Bakış, Yeni Teknolojiler – CGI Teknolojisinin Dökümhanelerde Yönetimi ve Geleceği, 3. Ankiros Uluslararası Döküm Kongresi. İstanbul.
- [2] Hasırcı, H., & Karatay, B. (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.
- [3] Guesser, W., Duran, P., & Krause, W. (2004). Compacted Graphite Iron for Diesel Engine Blocks.
- [4] Suarez, O. M., Loper, C. R. (2001). Production of Compacted Graphite Irons Through Two-Step Treatment Method. *Metallurgical Science and Technology*. 19. 25-32
- [5] Dawson, S., & Guesser, W. (2017). Castability, Product Design, and Production of Compacted Graphite Irons, *ASM Handbook, Volume 1A, Cast Iron Science and Technology*.
- [6] Dawson, S. (2009). Process Control for the Production of Compacted Graphite Iron, *Indian Foundry Congress*. Pune.
- [7] Dawson, S., & Popelar, P. (2013) Thermal Analysis and Process Control for Compacted Graphite Iron and Ductile Iron, *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, American Foundry Society*.
- [8] Murthy, V. S., & Seshan, S. (1985). Vermicular graphite cast iron - current state of the art. *Sadhana*, 8(4), (p. 361-372.)
- [9] Çetin, A. (2016). Dökümcünün El Kitabı Serisi – 01 Vermiküler Grafitli Dökme Demir. Haziran.
- [10] Askeland, D. R., & Wright, W.J. (2015). The Science and Engineering of Materials (7th ed.). *Cengage Learning*.
- [11] Davis, J. R. (1996). Cast Irons, *ASM Speciality Handbook. ASM International*.
- [12] Callister, W. D., & Rethwisch D. G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction, (10th Edition). *Wiley*
- [13] Mola, R., Bucki, T., & Wcislo, K. (2014). Characterization of Coatings on Grey Cast Iron Fabricated by Hot-dipping in Pure Al, AlSi11 and AlTi5 Alloys. *Archives of Foundry Engineering*, (p. 14, 85-90).

- [14] **Smith, W., & Hashemi, J.** (2018). Foundations of Materials Science and Engineering (6th ed.) *McGraw-Hill Education*.
- [15] **Sintercast AB.** Compacted Graphite Iron – Material Data Sheet.
- [16] **Evans, E. R., Dawson, J. V., & Lalich M. J.** (1976). Compacted Graphite Cast Irons and Their Production by a Single Alloy Addition, *Trans. AFS*, Vol 84, 1976, (p. 215).
- [17] **Sergeant, G. F., & Evans, E. R.** (1978). The Production and Properties of Compacted Graphite Irons, *Br. Foundryman*, Vol 71, (p. 115).
- [18] **Cooper, K. P., & Loper, Jr. C. R.** (1978). A Critical Evaluation of the Production of Compacted Graphite Cast Iron, *Trans. AFS*, Vol 86, (p. 267).
- [19] **Cornell, H. H., & Loper, Jr. C. R.** (1985). Variables Involved in the Production of Compacted Graphite Cast Iron Using Rare Earth Containing Alloys, *Trans. AFS*, Vol 93, (p. 435).
- [20] **Ruff, G. F., & Vert, T. C.** (1979). Investigation of Compacted Graphite Iron Using a High Sulfur Gray Iron Base, *Trans. AFS*, Vol 87, (p. 459).
- [21] **König, M., & Wessen, M.** (2010) Influence of alloying elements on microstructure and mechanical properties of CGI, *International Journal of Cast Metals Research*, 23:2, 97-110.
- [22] **Stefanescu, D. M., Fowler, J., & Prucha, T.** (1984). Production of Ferritic and Pearlitic Grades of Compacted Graphite Cast Iron by the In-Mold Process, *Trans. AFS*, Vol 92, (p. 361).
- [23] **Ziegler, K. R., & Wallace, J. E.** (1984). The Effect of Matrix Structure and Alloying on the Properties of Compacted Graphite Iron, *Trans. AFS*, Vol 92, (p. 735).
- [24] **Nechtelberger, E., Hummer, R., & Thury, W.** (1970). Aluminum-Alloyed Cast Iron with Vermicular Graphite, *Giesserei-Pm.*, Vol 24, (p. 387).
- [25] **Stefanescu, D. M., & Martinez, F.** (1983). Properties of Compacted/Vermicular Graphite Cast Irons in the Fe-C-Al System Produced by Ladle and In-Mold Treatment, *Trans. AFS*, Vol 91, (p. 593).
- [26] **Pan, E. N., Lou, M. S., & Loper, Jr. C. R.** (1987). *AFS Trans*, (p. 95, 819–840).
- [27] **Jedrejczyk, D., & Podrzucki, C.** (1992). Prace komisji metalurgicznoodlewniczej, *Metalurgia*, (p. 42, 51–72).
- [28] **Murthy, V. S. R., & Seshan, S.** (1986). *Foundry Manage. Technol.*, 114, (7), (p. 50–52).
- [29] **Popov, P. I., & Sizov, I. G.** (2006). *Met. Sci. Heat Treat.*, 47, (5–6), (p. 272–275).

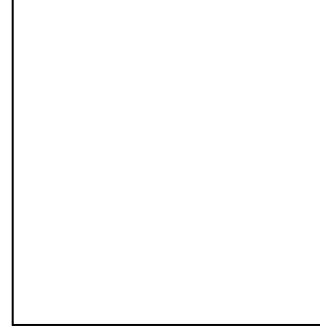
- [30] **Melnikova, L.** (2004). Bestimmung der Wirkung von Spurenelementen im Einsatzmaterial bei der Herstellung von Gusseisen mit vermiculargraphit, (Doktorarbeit). Technische Universität Bergakademie, Freiberg, Germany.
- [31] **Stefanescu, D. M.** (1990). Compacted graphite iron, *Metals handbook*, 10th edn., *ASM International*, (p. 56 – 70). Metals Park, OH.
- [32] **Carlberg, T., & Fredriksson, H.** (1977). Solidification and casting of metals, *The Metals Society*. (p. 115–124). Sheffield.
- [33] **Wessen, M.** (1977). On the mechanisms of structure formation in nodular cast iron, (Doktorarbeit). Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
- [34] **Larker, R.** (2008). Ductile cast iron, *Proc. 3rd Keith Millis Symp DIS/AFS*, (s. 169–177). Hilton Head Island, SC, USA, October
- [35] **Hummer, R.** (1987). unpublished research at the Austrian Foundry Research Institute, A.-Nr. 3 1.253.
- [36] **Nandori, G., & Dul, J.** (1978). Untersuchungen über den Abklingeffekt bei Gusseisen mit Kugelgraphit durch Messung der Längen- und Temperaturänderung während der Erstarrung, *Giesserei-Prax.*, No. 18, (p. 284).
- [37] **Nechtelberger, E.** (1980). The Properties of Cast Iron up to 500 °C, *Technicopy Ltd.*
- [38] **Sissener, J., Thury, W., Hummer, R., & Nechtelberger, E.** (1972). *AFS Cast Met. Res. J.*, (p. 178).
- [39] **Walton, C. F., & Opar, T. J.** (1981). Iron Castings Handbook, *Iron Casting Society Inc.*, (p. 381-397)
- [40] **Dawson, S. SinterCast AB.** (2014). Compacted Graphite Iron – Mechanical and Physical Properties for Engine Design.
- [41] **Nechtelberger, E., Puhr, H., von Nesselrode, J. B., & Nakayasu, A.** (1982). Cast Iron with Vermicular/Compacted Graphite-State of the Art Development, Production, Properties, Applications, paper presented at the *49th International Foundry Congress*. Chicago, April.
- [42] **Loper, C. R., Lulich, M. J., Park, H. K., & Gyarmaty, A. M.** (1979). Microstructure-Mechanical Property Relationship in Compacted/Vermicular Graphite Cast Iron, Paper 35, presented at the *46th International Foundry Congress*. Madrid.
- [43] **Aleksandrov, N. N., Milman, B. S., Ilicheva, L. V., Osada, M. G., & Andreev, V. V.** (1976). Production and Properties of High-Duty Iron with Compacted Graphite, *Russ. Cast. Prod.*, (p. 319).

- [44] **Bobylev, F. K., Glinkin, A. S., Aleksandrov, N. N., & Popov, V. I.** (1976). Compacted graphite iron for D50 cylinder liners, *Russian Castings Production*, (p. 445-446).
- [45] **Riposan, I., Chisamera, M., & Sofroni, L.** (1985). Contribution to the study of some technological and applicational properties of compacted graphite cast iron, *AFS Transactions*, 85-07, (p. 35-48).
- [46] **Lyu, Y.** (2019) Abrasive Wear of Compacted Graphite Cast Iron with Added Tin, *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 8, 67-71.
- [47] **Walton, C. F., & Opar, T. J.** (1981). Physical Properties, Iron Castings Handbook, *Iron Castings Society, Inc.*, (p 463-488).
- [48] **Angus, H. T.** (1976). Mechanical, Physical, and Electrical Properties of Cast Iron, *Cast Iron*, Butterworth, (p. 34-160). Butterworth.
- [49] **Walton, C. F., & Opar, T. J.** (1981). Mechanical Properties of Gray Iron, Iron Castings Handbook, *Iron Castings Society*.
- [50] **Sintercast AB.** (2014). The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron.
- [51] **Dawson, S., Hollinger, I., & Smiles, P.** (1998). The mechanical and physical properties of compacted graphite iron, *Global Powertrain Congress*, (p. 85-105).
- [52] **Jincheng, L.** (2014). A reliable and consistent production technology for high volume compacted graphite iron castings, *China Foundry*, 11 (4), 339-350.
- [53] **Leslie-Pelecky, D.** (2009). Materials at 200 mph: Making NASCAR Faster and Safer, *MRS Bull.*, Vol 34 (No. 8).
- [54] **Farias, C. R., Benavente, J., Schroeder, T., & Dawson, S.** (1998). Compacted graphite iron production at cifunsa using a process control system. *American Foundrymen's Society, Inc, Transactions of the American Foundrymen's Society*,, 105, 947-949.
- [55] **Ramos, A. K., Diószegi, A., Guesser, W. L., & Cabezas, C. S.** (2020). Microstructure of compacted graphite iron near critical shrinkage areas in cylinder blocks. *International Journal of Metalcasting*, 1-9.
- [56] **Heisser, C., & Sturm, J. C.** (2003). Casting process simulation of compacted graphite iron (03-025). In *Proceedings of the 107th Casting Congress*, Milwaukee, Wisconsin (pp. 685-692).
- [57] **Górny, M., & Kawalec, M.** (2013). Effects of titanium addition on microstructure and mechanical properties of thin-walled compacted graphite iron castings. *Journal of materials engineering and performance*, 22(5), 1519-1524.

- [58] **Ribeiro, B. C. M., Rocha, F. M., Andrade, B. M., Lopes, W., & Corrêa, E. C. S.** (2020). Influence of Different Concentrations of Silicon, Copper and Tin in the Microstructure and in the Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron. *Materials Research*, 23.
- [59] **Gorny, M, Lelito J., Kawalec M., Sikora G.** (2015). Thermal Conductivity of thin walled compacted graphite castings. *ISIJ international*, Vol 55



ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Erkan BULUT

Doğum Tarihi ve Yeri :

E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 1994, İTÜ, Kimya-Metalurji Fakültesi, Metalurji Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2021, Bursa Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İleri Teknolojiler Ana Bilim Dalı , Malzeme Bilimi

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Döktaş Dökümcülük AŞ – Lab.Sorumlusu
-

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

-
-
-

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

-
-