

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK UZAMALI SFERO DÖKME DEMİRİN (GGG 400-18) UYGUN ÜRETİM
ŞARTLARININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZAFER AY

TEZ DANIŞMANI
DOÇ. DR. FATİH APAYDIN

BİLECİK, 2025

10697697

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK UZAMALI SFERO DÖKME DEMİRİN (GGG 400-18) UYGUN ÜRETİM
ŞARTLARININ ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ZAFER AY

TEZ DANIŞMANI
DOŐ. DR. FATİH APAYDIN

BİLECİK, 2025

10697697

BEYAN

‘Yüksek Uzamalı Sfero Dökme Demirin (GGG 400-18) Uygun Üretim Şartlarının Araştırılması’ adlı yüksek lisans/doktora/sanatta yeterlik tezi/dönem projesinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Bu çalışmanın, Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP), TÜBİTAK veya benzeri kuruluşlarca desteklenmesi durumunda; projenin ve destekleyen kurumun adı proje numarası ile, ETİK KURUL onayı alınması durumunda ise ETİK KURUL tarih karar ve sayı bilgilerinin beyan edilmesi gerekmektedir.			
DESTEK ALINMIŞTIR		DESTEK ALINMAMIŞTIR	X
Destek alındı ise;			
Destekleyen kurum;			
Destegın Türü		Proje Numarası	
1- BAP (Bilimsel Araştırma Projesi)			
2- TÜBİTAK			
Diğer;.....			
ETİK KURUL onayı var			
ise;			
ETİK KURUL karar tarih/sayı:	/.....	

Zafer AY

..././2025

İmza

.....

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmamın yazılması esnasında, çalışmamı sahiplenerek takip eden danışmanım Sayın Doç. Dr. Fatih Apaydın Bey'e çok değerli katkı ve emekleri için sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam sırasında fabrika laboratuvar, proses ve ekipmanlarını kullanmamı sağlayan, hammadde ve ürünlerin kullanılmasına müsaade eden, 15 yıldır çalıştığım şirket DEMİSAŞ Döküm Emaye Mamulleri Sanayi Tic. A.Ş. Fabrikası'na,

Tüm eğitim hayatımda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman yanımda olduklarını bildiğim değerli babam Nurettin AY ve değerli annem Nebiha Ay'a tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Tez hazırlama sürecimde moralimi yüksek tutmaya çalışan, zor anlarımda yanımda olan, yardım ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen hayat arkadaşım Medine Ay'a ve çok sevdiğim oğlum Barış Ay'a çok teşekkür ederim.

Zafer AY

2025

ÖZET

YÜKSEK UZAMALI SFERO DÖKME DEMİRİN (GGG 400-18) UYGUN ÜRETİM ŞARTLARININ ARAŞTIRILMASI

EN-GJS-400-18 sfero döküm parçalar yüksek mukavemet, süneklik, tokluk, düşük ergime noktası, iyi akışkanlık ve iyi işlenebilirlik özellikleri nedeniyle otomotiv, inşaat, madencilik, metalurji ve makine imalat sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Seri üretim koşullarında her zaman aynı standartta üretim yapmanın çeşitli zorlukları vardır. Bu zorlukların en önemlisi aynı saflıkta hammadde bulunamamasıdır. Bu çalışmada, dökümhanelerde seri üretim pratiği açısından üretimi zor olan EN-GJS-400-18 sfero döküm malzemesinin seri koşullara uygun olarak üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla Si, karbür oluşturu elementlerden Cu ve Mo ile döküm malzemesi çapının EN-GJS-400-18 küresel grafitli dök demirin mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda %Si:3.10, %Mo:0.001, %Cu:0.03 içerikli 20 mm çaplı numunenin %22.38'lik en yüksek uzama değeri ile elde edildiği görülmüştür. Bu malzemenin mikro yapısındaki minimum ferrit oranının %80 ve mm² başına nodül sayısının 600 olduğu belirlenmiştir ki bu da üstün mekanik özellikler ortaya koyacaktır.

Anahtar kelimeler: Küresel Grafitli Dökme Demir, GGG, EN-GJS-400-18, % Ferrit

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SUITABLE PRODUCTION CONDITIONS OF HIGH EXTENSION CAST IRON (GGG 400-18)

EN-GJS-400-18 spherical cast iron materials are widely used in the automotive, construction, mining, metallurgy, and machinery manufacturing sectors due to their high strength, ductility, toughness, low melting point, good fluidity, and good machinability properties. There are various difficulties in always producing at the same standard under mass production conditions. The most important of these difficulties is the lack of availability of raw materials of the same purity. In this study, it is aimed to produce EN-GJS-400-18 ductile iron material, which is difficult to produce in terms of mass production practice in foundries, in accordance with serial conditions. For this purpose, the effects of Si, carbide-forming elements Cu and Mo, and casting material diameter on the microstructure and mechanical properties of EN-GJS-400-18 spherical graphite cast iron were examined. As a result of the experiments, it was seen that the 20 mm diameter sample with the content of %Si:3.10, %Mo:0.001, %Cu:0.03 was obtained with the highest elongation value of 22.38%. It has been determined that the minimum ferrite ratio in the microstructure of this material is 80% and the number of nodules per mm² is 600, which will reveal superior mechanical properties.

Keywords: Nodular Graphite Cast Iron, GGG, EN-GJS-400-18, % Ferrite

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ	ix
1 . GİRİŞ.....	1
2 . DÖKME DEMİRLER	3
2.1. Dökme Demirlerin Tanımı	3
2.2. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması	3
2.2.1 Lamel grafitli dökme demir	4
2.2.2 Küresel grafitli dökme demir.....	4
2.2.3 Beyaz dökme demir	7
2.2.4 Temper Dökme Demir	7
2.2.5 Silindirik Dökme Demir	8
2.3. Dökme Demirlerin Kullanım Alanları.....	9
2.4. Dökme Demirlerin Avantajları.....	9
2.5. Küresel (Sfero) Dökme Demirler	9
2.5.1 Küresel Grafitli Dökme Demirin Özellik ve Kullanım Yerleri	9
2.5.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kullanılan Standartlar	10
2.5.3 Sfero Dökme Demirlerde Kullanılan Ferro Alyajlar ve Elementlerin Etkileri	11
2.6. EN-GJS 400-18 (RT) Malzemeleri	14

2.6.1 Sfero döküm EN-GJS-400-18 uygulamaları.....	15
2.7. EN-GJS-400-18 Sfero Döküm Malzemesinin Üretimi.....	16
2.7.1 Şarj ve Ergitme Prosesi	16
2.7.2 Sfero Döküm Üretmede Kullanılan İndüksiyon Ocağı	17
2.7.3 Küreleştirme İşlemi	18
3 . Literatür araştırması	20
4 . MATERYAL VE METOT	23
4.1. Şarjın hazırlanması	23
4.2. Döküm kumu, modeli ve kalıbının hazırlanması.....	24
4.2.1 Döküm kumunun hazırlanması	24
4.2.2 Modelin hazırlanması	25
4.2.3 Döküm Kalıbının Hazırlanması	26
4.3. Ergitme ve döküm	26
4.4. Test ve analizler.....	28
4.4.1 Döküm kumu ve kalıplarının testleri	28
4.4.2 Döküm ürünlerinin test ve ölçümleri	31
5 . DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	34
5.1. Alaşım elementlerinin TS-EN-GJS-400-18'nin mekanik özelliklerine etkisi.....	34
5.2. Alaşım elementlerinin TS-EN-GJS-400-18'nin mikroyapısına etkisi	36
5.3. Malzeme çapının TS-EN-GJS-400-18'nin mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisi.....	38
6 . SONUÇLAR	40
7 . KAYNAKLAR.....	41

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirin Tipik Özellikleri ve Kullanım Yerleri.....	10
Tablo 2.2 Küresel grafitli dökme demirlerin ulusal standartları karşılaştırılması	11
Tablo 2.3 Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması	15
Tablo 4.1 TS-EN-GJS-400-18 alaşımının kimyasal bileşimi	23
Tablo 4.2 Brezilya Piki kimyasal analizi	23
Tablo 4.3 Sfero lama çelik hurdası kimyasal analizi	23
Tablo 4.4 Aşılmalı kimyasal analizi.....	24
Tablo 4.5 Döküm kumu karışım oranları.....	25
Tablo 4.6 Döküm kumundan elde edilen özellikler	25

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Fe-Fe ₃ C diyagramı	3
Şekil 2.2 Gri dökme demirde standart lamel boyutlarının gösterilişi (x100).....	4
Şekil 2.3 KGDD de standart grafit nodul boyutlarının x100 büyütmede gösterilişi.....	5
Şekil 2.4 Ferritik küresel grafitli dökme demir. Büyütme: x40. Nital ile dağlanmış.....	5
Şekil 2.5 Perlitik-ferritik küresel grafitli dökme demirin mikro yapısı	6
Şekil 2.6 Beyaz dökme demir mikro yapısının gösterilişi	7
Şekil 2.7 Temper dökme demir mikro yapısının gösterilişi	8
Şekil 2.8 Vermiküler grafitli dökme demir mikro yapısının gösterilişi	8
Şekil 2.9 Yüksek uzamalı parça örnekleri	16
Şekil 2.10 Üretim Süreci Akış Şeması (Demisaş Yönetim Sistemi, 2018).....	17
Şekil 2.11 İndüksiyon Ocağı Şematik Görünümü (Brown, 2000; Özdemir, 2007)	18
Şekil 2.12 Magnezyumun küreselleştirmeye etkisi.....	19
Şekil 4.1 Kum Mikseri	24
Şekil 4.2 Denemeler için hazırlanan numune modeli	25
Şekil 4.3 Loramendi Kalıplama Makinesi	26
Şekil 4.4 İndüksiyon ocağı.....	26
Şekil 4.5 Ocaktan tretman potasına sıvı metalin aktarılması	27
Şekil 4.6 Tretman potası.....	27
Şekil 4.7 OCC Döküm Ocağı.....	27
Şekil 4.8 Simpson Kompaktibilite Cihazı – Model 42100	28
Şekil 4.9 Ohaus mb90 Nem Cihazı.....	29
Şekil 4.10 Simpson Dijital Geçirgenlik Cihazı- Model 42105	29
Şekil 4.11 Simpson Yaş Çekme Mukavemeti Cihazı- Model 42112	29
Şekil 4.12 Simpson Universal Parçalanma, Yaş Basma, Kesme Cihazı	30

Şekil 4.13 Sel-horn r-8 Yanma Kaybı ve Uçucu madde Tayin Cihazı	30
Şekil 4.14 Simpson Elek Cihazı – Model 42106	30
Şekil 4.15 OBLF Spektrometre.....	31
Şekil 4.16 Nikon optik mikroskop	31
Şekil 4.17 Yxlon marka cihazıyla ölçülmüş X-Ray	32
Şekil 4.18 Zwick marka çekme cihazı	32
Şekil 4.19 EN-6892-1 Standardına uygun numune d:10 mm, Lo:50mm, Lc:60mm.....	32
Şekil 4.20 Brinell sertlik cihazı.....	33
Şekil 4.21 Sertlik ölçümünde kullanılan numuneler	33
Şekil 5.1 Si'nin küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerine etkisi	34
Şekil 5.2 Mo'nun küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerine etkisi	35
Şekil 5.3 Cu'nun küresel grafitli dökme demirin mekanik özelliklerine etkisi	36
Şekil 5.4 Nodül sayısı ve % ferrit miktarının hesaplanmasında kullanılan temsili mikroyapısı (a: dağlamasız nodül sayısı 612, b: %2 nital ile dağlanmış ferrit oranı %84,90).....	36
Şekil 5.5 Si'nin TS-EN-GJS-400-18'nin mikroyapısal özelliklerine etkisi.....	37
Şekil 5.6 Mo'nun TS-EN-GJS-400-18'nin mikroyapısal özelliklerine etkisi.....	37
Şekil 5.7 Cu'nun TS-EN-GJS-400-18'nin mikroyapısal özelliklerine etkisi.....	38
Şekil 5.8 Malzeme çapının TS-EN-GJS-400-18'nin mekanik özelliklerine etkisi	39
Şekil 5.9 Malzeme çapının TS-EN-GJS-400-18'nin mikroyapısal özelliklerine etkisi.....	39

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

Fe : Demir

Fe₃C : Demir Karbür (Sementit)

C : Karbon

P : Fosfor

S : Kükürt

Ni : Nikel

Cu : Bakır

Mo : Molibden

Si : Silisyum

Mn : Mangan

Ce : Seryum

C_{eş} : Karbon eşdeğeri

KGDD: Küresel grafitli dökme demir

DIN : Alman Norm Enstitüsü

INCO : International Nickel Company

ASTM: Amerikan Malzeme ve Testler Derneği

BCIRA: İngiliz Dökme Demir Araştırma Derneği

TSE : Türk Standartları Enstitüsü

1. GİRİŞ

Dökme demirlerin küresel, lamel, beyaz, temper, silindirik şeklinde sınıflandığı tüm dünyada bilinen bir gerçektir (Sevgi, 2019a). 1940'lı yıllarda BCIRA ile INCO kuruluşlarınca geliştirilen sfero döküm çok büyük ilerleme kaydederek dünyadaki döküm üretiminin %25'ine sahip hale gelmiştir (Ateş, 2019). Çeliklerdeki dayanım değerlerine erişebilen bu malzemenin en optimum özelliği de düşük sıcaklıklarda ergimesinin sağlanarak dökümhaneler için zaten enerji maliyetlerinin yüksek olduğu dönemlerde sağlayacağı maliyet faydasıdır. Burada indüksiyon enerjisinin düşük sıcaklıklarda daha düşük kw ile çalışabilmesi, ocağın normal çalışma anında ve tutma sıcaklıklarında da avantajlarını ortaya koyabilmektedir (Sevgi, 2019b). Sektörde çeşitli isimler ile anılabilen sfero dökme demirler, daha çok nodüler ve uzamasının diğer dökme demirlere oranla daha iyi olması nedenlerinden dolayı da metalurji dünyasında sünek dökme demirler olarak da bilinmektedirler. Kullanım, uygulama alanları, üstün mekanik davranışları, işlenebilme kabiliyet üstünlükleri de göz önüne alındığında; enerji üretim hatlarında, petrol ve gaz kaynaklarında, lokomotif uygulamalarında, otomotiv bileşen, komponent ve uygulamalarında, su, kanalizasyon, tarım v.b. alanlarda sorunsuz kullanılabilir (Çelikkalek, 2015).

Sfero demirler, %3,0-4,0 içeriğinde %C ve %1,7-3,5 içeriğinde de % Si' ye sahiptirler. Magnezyum ve Seryum ilaveleri sayesinde, uygun şarj besleme oranları, uygun sıcaklık ve kalıplama parametreleriyle beraber istenen spektlerde parçaların dökümleri sağlanmış olacaktır (Öztürk, 2019). Bu malzeme için TS- EN 1563 ve TS-EN 1564 standartları gereğince yapılan sınıflandırmalar uygun olmaktadır. %2-3 arasında Si içeren bu dökme demirler; sertlik, dayanım ve uzama gibi mekanik özelliklerini yapıda bulunan ferrit ve perlit oranlarından almaktadır. Çalışmamızda belirleyerek kullandığımız Malzemenin gösteriminde yer alan "GJS" malzemenin sfero olduğunu, 400 Mpa min. çekme mukavemetini, 18 ise min. %uzama değerini ifade etmektedir. Tüm yapının homojen olması gerekir ki spekt değerdeki mekanik özellik istenilen döküm açısından yakalanabilsin. Bir de ikinci nesil küresel grafitli dökme demirler vardır ki onlarda yapı tamamen ferritiktir. Çünkü çok yüksek silis içeriğine sahiptirler. Bu malzeme ile üretilen parçaların yüksek sıcaklık çalışma performansları yüksektir (Çetin, 2016).

Sfero ile ilgili günümüz son araştırmaları şöyledir; yeni alaşımların geliştirilmesi, (Jafar & Behnam, 2011); (Karaca, 2022); (Karadeniz, 2017); (Yalçın, 2019) döküm sırasında akışkanlık değerlerinin daha iyi hale getirilmesi (Coşar, 2022), korozyon direncinin artırılması, (Çelikkalek, 2015); (Pascual, 2008) ve ısıl işlemi (Ateş, 2019); (Hartung, 2020); (İlçin, 2022); (Öztürk, 2019); (Sevgi, 2019a); (Yalçın, 2019) üzerinedir.

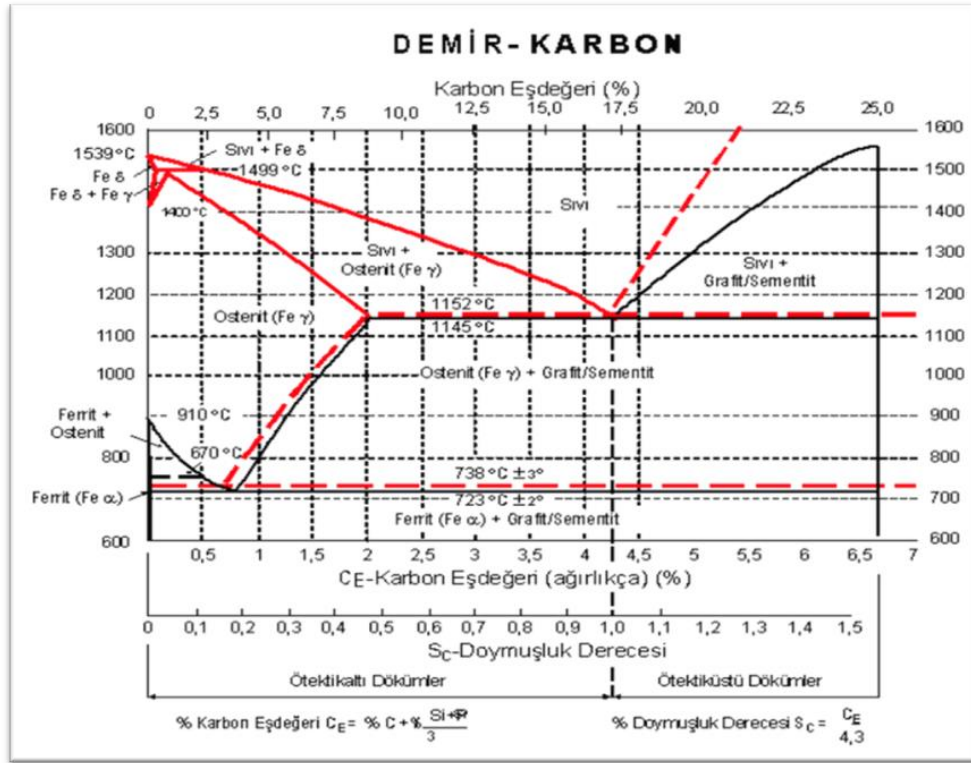
Bu tez çalışması sırasında dökümhane ortamında prototip model ve gerçek zamanlı prototip deneme dökümleri yapılmıştır. Proses süreleri boyunca dökümhanelerde seri üretim açısından üretilmesi zor olan 400/18 sfero döküm malzemesinin seri şartlara uygun olarak üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışmayı yaparken % Si, %Cu, %Mo ve dökülen parça çap değişkenliklerinin 400/18 kalite nodüler demirin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi deneysel açıdan incelenmiştir. Sonuç olarak, ocağa yüklenecek olan hammadde şarjlarında etkin analiz değerlerinin yakalanabilmesi için en efektif oranlar belirlenmeye çalışılmıştır.

2. DÖKME DEMİRLER

2.1. Dökme Demirlerin Tanımı

Demirin ergitilmesi sonucu elde edilen, %2'den fazla karbon ve çeşitli alaşım elementleri (Mn, Si, F, Cr, vb.) içeren Fe-C alaşımına pik denilmektedir. Pik, fırınlarda tekrar işlenip metalurjik bazı proseslerden geçirildikten sonra bir kalıba dökülerek katılaşır ve bu şekilde oluşan malzemeye dökme demir denir (Aytaçoğlu, 2012); (Kumruoğlu, 2003).

Dökme demirler, Fe-Fe₃C denge diyagramında %2 ile %6,67 arasında karbon içeriğine sahiptirler. Yüksek karbon oranı kırılabilirliğe neden olmaktadır. Pratikte dökme demirler genellikle %4,4'e kadar karbon ve %3,5'a kadar silisyum içeren bir Fe-C-Si alaşımı olarak bilinir. (Şekil 2.1).



Şekil 2.1 Fe-Fe₃C diyagramı

Kaynak: (Aytaçoğlu, 2012)

2.2. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Dökme demirler döküm mikroyapısına bağlı olarak sınıflandırılmaktadır. Dökme demirlerde mikroyapıyı etkileyen dört faktör bulunmaktadır:

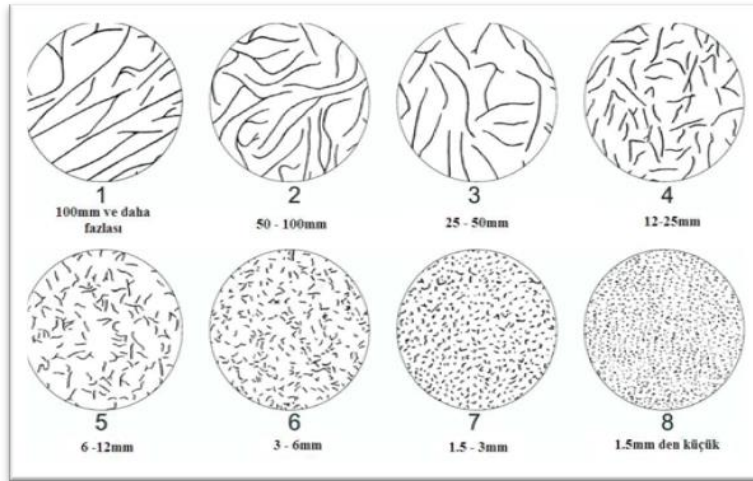
- Karbon (%C)
- Empürite miktarı,

- Katılma soğuma hızı,
- Döküm sonrası ısı işlemleridir.

Dökme demirlerde karbonun katılma sırasında ayrışması, yapıda ayrı bir eleman olarak görülür. Ortaya çıkan karbonun şekli ve biçimi, dökme demirin tipini belirler ve dolayısıyla özelliklerine de etki eder (Aytaçoğlu, 2012). Bu değişkenler karbon yapısı ve morfolojisini de kontrol ederler. Dökme demirler 5 gruba ayrılmaktadır. Bu gruplar şu şekilde tanımlanmıştır.

2.2.1 Lamel grafitli dökme demir

Katılmadan sonra içinde yer alan karbonun büyük bir kısmı serbest veya lameller şeklinde bulunan dökme demir tipine lamel grafitli ya da gri dökme demir denir. Gri dökme demirde kırık olan yüzey mat gri renkli olmakla beraber ve bunsan dolayı bu malzemeye gri dökme demir denmektedir. Lamel grafitli ya da gri dökme demirler, A, B, C, D ve E tipi grafitlere sahip olmakla beraber beş bölüme ayrılır. Lamel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasını birkaç kategoriye ayırmak mümkündür. Bunlardan biri **Şekil 2.2**'de gösterilen lamel uzunluklarına göre.



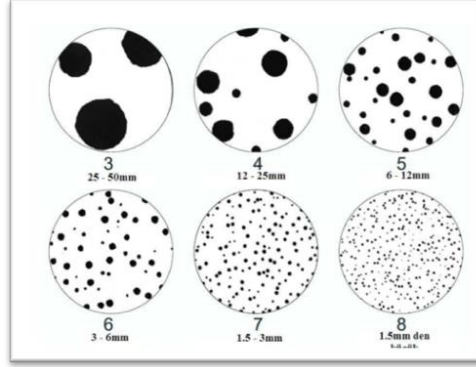
Şekil 2.2 Gri dökme demirde lamel boyutları (x100)

Kaynak: (Aytaçoğlu, 2012)

2.2.2 Küresel grafitli dökme demir

Sfero dökme demir de denilen bu malzemede, küreler lamel formdan küresel forma Magnezyum ve Seryum eklenerek getirilmektedir. Seryum ve Magnezyum yapıya ferro alyaj olarak verilmektedir. Grafit şeklinin küreler halinde olması dökme demire uzama kabiliyetini ve mukavemetini artırır. Bu üst seviyedeki mukavemet ve tokluk, ısı işlem şartı

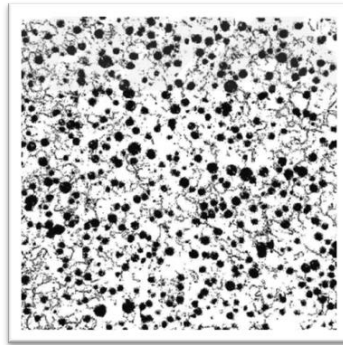
gerektirmeksizin küresel grafitli dökme demirin gri dökme demire göre daha avantajlı hale gelmesini sağlar. Küresel grafitli dökme demirler sfero, nodüler ve düktil gibi isimlerle de anılırlar (Stefanescu, 1990). Nodüllerin büyüklükleri itibarıyla 50 mm'den başlayıp 1.5 mm kadar uzanan bir yapı mevcuttur. **Şekil 2.3**'te görüldüğü gibi x100 büyütmede nodül boyutları arasındaki ilişki mevcuttur.



Şekil 2.3 KGDD de grafit nodül boyutlarının x100 büyütmede gösterilişi

Kaynak: (Aytaçoğlu, 2012)

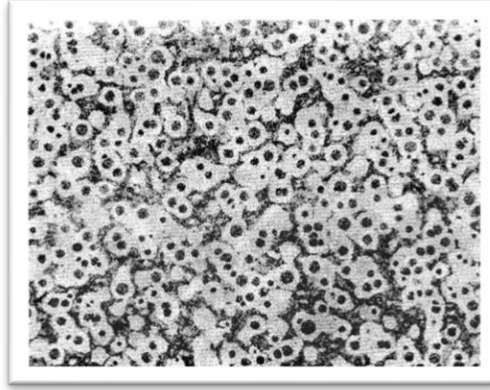
Ferritik küresel grafitli dökme demirler (GGG 40): Ostenit içerisinde çözülen karbon grafit kürelerine dönüşmeye vakit bulduğunda oluşacak mikro-yapı, ferritik bir matris ve bu matriste rasgele dağılmış halde küresel grafitten meydana gelmiş olur. **Şekil 2.4**'te ferritik küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı görülmektedir. Nodüler dökme demir üretiminde önemli bir bölümü kapsayan bu grup, süneklik, çentik darbe dayanımı ve çok iyi talaş kaldırma özelliklerine sahiptir. İnşaat iskelesi parçaları, fren komponentleri, tekerlekler, makina pistonları, potalar, ocak ve fırın kapakları, gibi yerlerde kullanılmaktadır (Albayrak, 2001).



Şekil 2.4 Ferritik dökme demir. (Büyütme: x40 Nital dağlayıcı)

Kaynak: (Aytaçoğlu, 2012)

Perlitik- Ferritik küresel grafitli dökme demirler (GGG 50-60): Ferrit perlit oranı aynı olan mikroyapıya sahip KGDD'ler **Şekil 2.5**'te gösterilmektedir. Bu yapıya sahip nodüler dökme demirlerin komple ferritik yapıya göre daha yüksek çekme değerine sahip oldukları bilinmektedir. Pistonlar, tekerlekler, pompa gövdeleri, dişli kutuları, traktör emniyet parçaları, tarım makinalarının parçaları, valf ekipmanları, dişliler, büyük haddeler, hidrolik kontrol alet yatakları ve uçak motor parçaları, vb. malzemeler Perlitik- Ferritik KGDD in kullanıldıkları alanlardır (Aytaçoğlu, 2012).



Şekil 2.5 Perlitik-ferritik nodüler yapıya sahip dökme demir mikro yapısı (x40 büyütme, nital ile dağlanmış)

Kaynak: (Albayrak, 2001)

Sfero, sünek döküm ve düktil küresel grafitli dökme demirlerin isimlerinden bazılarıdır. Küresel grafitli dökme demirler, sıvı metalin cepli potalarda magnezyum ya da seryum elementleri ile belirli oranda karıştırılması suretiyle üretilirler (Berns & Theisen, 2008). Dökümhane uygulamalarında Fe-Fe₃C denge diyagramı incelendiğinde en önemli noktanın 1150 °C'de ve %4,3 karbon oranında çakışarak ötektik noktada yer aldığı görülmektedir. Ötektik (%4,3C) karbon miktarının altındaki alaşımlar alt ötektik, üzerindeki ise üst ötektik olarak adlandırılmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerde ötektik noktayı direkt olarak en çok etkileyebilen element şüphesiz ki Silisyumdur. Silisyum ötektik noktadaki analizi daha düşük karbon miktarı ile yakalamaya yardımcı olur. Karbon eş değerliğinin hesaplanmasındaki (2.1)'de gösterilen formül şu şekildedir. Denklemden C_{eş} karbon eşdeğeridir (Schuman, 1974).

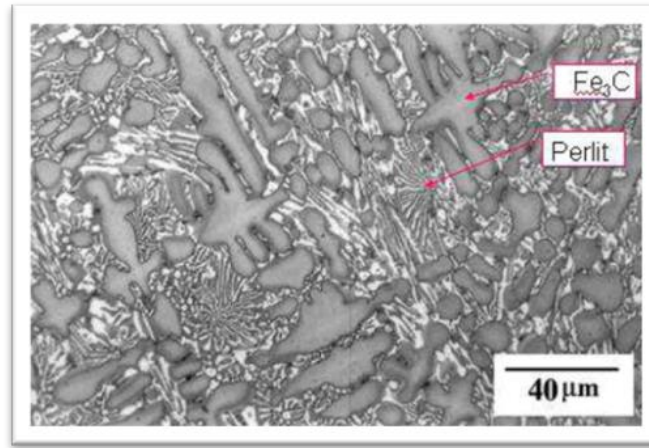
$$C_{eş} = \%C + \left(\frac{1}{3}Si + \frac{1}{3}\%P\right) \quad (2.1)$$

Gerekli hesaplamalarda alt ve üst ötektik alaşımlar hedeflenerek yapılmalıdır. Bu durumu soğuma hızı ve zaman bazlı değişimler etkili şekilde tetiklemektedir. Normalde bentonit bağlayıcılı kum dökümünde, 50 mm kalınlığa sahip parça için katılaşma denge durumuna

yakın olmasına rağmen, soğuk kalıplarda parça derinlerine doğru inildikçe (0,8-3,2 mm derinliğe ulaşıldığında) katılaşma denge durumundan uzaklaşmaktadır. Bu durumda 12 mm kesit kalınlığına kadar olan KGDD'lerde katılaşmanın denge durumu dışında olduğu gösterilmektedir. KGDD'lerin sonundaki rakamlar çekme mukavemetinin minimum değerini kg/mm^2 olarak göstermektedirler (Aydoğuş, 2019).

2.2.3 Beyaz dökme demir

Karbon sementit olarak bileşik halinde bulunmaktadır. Hızlı soğuma ile katılaşma sıcaklığında elde edilir. Beyaz dökme demirde yüksek miktarda sementit bulunmaktadır. Sementit yapı sert ve gevrek. Bu yüzden beyaz dökme demirlerin yapısı sert ve aşınmaya karşı dayanıklıdır (Aytaçoğlu, 2012); (Toptaş, 2009); (Varınlıoğlu, 2004). Beyaz dökme demirler ötektik altı yapıdadır. Mikroyapıları perlit ve sementitten oluşur (Şekil 2.6). Gevrek bir yapısı vardır ve işlenmesi zordur. Düşük darbe direnci ve işlenmesinin zor olması kullanım ve uygulama alanlarını sınırlamaktadır. Değirmen bilyeleri, tel çekme kalıp ekipmanları ve ekstrüzyon nozulları gibi uzama istenmeyen aşınma direnci gerektiren alanlarda kullanılmaktadır. Bunun dışında temper dökme demir üretebilmek için de beyaz dökme demir kullanılmaktadır. Alaşımız beyaz dökme demir mekanik özellikleri alttaki aralıklarda değişmektedir (Aytaçoğlu, 2012); (Toptaş, 2009); (Varınlıoğlu, 2004).

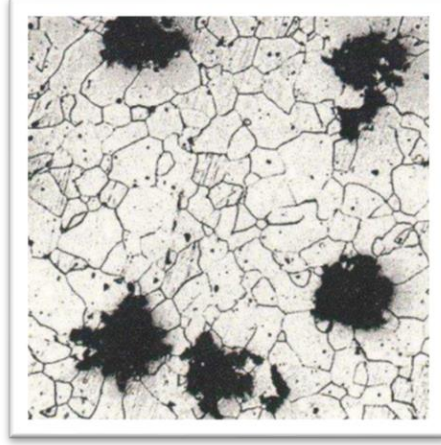


Şekil 2.6 Beyaz dökme demirin mikro yapısı

Kaynak: (Aytaçoğlu, 2012)

2.2.4 Temper Dökme Demir

Beyaz dökme demir ısı işleme tabi tutularak yapıdaki sementitin ve perlitin parçalanması ve yavaş soğuması ile karbonun rozet şeklini alması sağlanır ki buna temper karbon denmektedir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 Temper dökme demir mikroyapısı

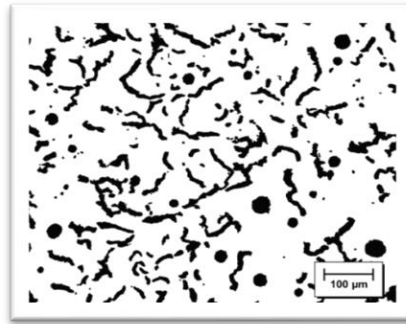
Kaynak: (Aytaçoğlu, 2012)

2.2.5 Silindirik Dökme Demir

Silindirik dökme demirlerin en çok kullanılanları vermiküler, kompakt, lamelimsi ve yüksek mukavemetli dökme demirlerdir.

Vermiküler olan dökme demirler, mekanik özellikler açısından nodüler ve lamel grafitli dökme demirlerin arasındadır. Vermiküler dökme demirler 1965 yılında magnezyum seviyesi az kullanılarak tesadüfen bulunmuştur. Mikroyapısına bakıldığında içerisinde lamel grafit yoktur, ortalama %20 oranında küresel grafit ve %80 oranında vermiküler grafit bulunmaktadır

Şekil 2.8), İletkenlikleri KGDD'den yüksek, gri dökme demirden düşüktür. Vermiküler grafitler lamel grafitlerden daha kalındırlar ve lamel uçları yuvarlatılmıştır (El-Mabrouk, 2007; Mavi & Korkut, 2010). İngot kütle kalıplarında, krank millerinde, silindir başlıkları, manifoldlar ve fren disklerinde kullanılabilirler.



Şekil 2.8 Vermiküler dökme demir mikroyapısı (Büyütme x 100)

Kaynak: (El-Mabrouk, 2007)

2.3. Dökme Demirlerin Kullanım Alanları

Dökme demirler, otomotiv krank milleri, diferansiyel kutuları, direksiyon dişli kutuları, ziraat makinaları transmisyon kutuları, ön tekerlek çatalları, makine sanayi hidrolik presleri, silindirler, dişliler, akslar, takım tezgâhları, ekstrüzyon silindirleri, vinç parçaları, beton karıştırma parçaları, madencilik ve metalurji sanayi cüruf potaları, kalıp derece ve ağırlıkları, sıcak hadde merdaneleri, ulaştırma sanayi volan parçaları ve çeşitli bağlantı elemanı komponentlerinde kullanılmaktadır.

2.4. Dökme Demirlerin Avantajları

Döküm endüstrisinde kapasitesinin büyük bölümü dökme demirlere aittir. Dökme demirler döküm ve mamul parça özellikleri bakımından bazı üstünlüklere sahiptirler. Bunlar şunlardır:

- Düşük ergime sıcaklığı. (1150 -1300 °C),
- İyi akışkanlık özelliği ile homojen yapı oluşumu.
- Kalıp şeklini alma kabiliyeti.
- Düşük ergime sıcaklığı nedeniyle düşük maliyet.
- Karmaşık yapıya sahip parçaların tek seferde üretilebilmesi.
- İşleme kolaylıkları.
- Titreşim sönümlemesinin iyi olması.
- Basma mukavemetinin yüksek olması.
- Aşınma dayanımının yüksek olması.
- Sertlik değerlerinin 120-600 HB arasında değişebilmesi.
- Mukavemet değerlerinin iyi olması.
- Gri dökme demirlerin mükemmel titreşim sönümleme kapasitesinin olması.
- Gerilimlerin daha az çarpılmaya neden olması (Albayrak, 2001).

2.5. Küresel (Sfero) Dökme Demirler

2.5.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özellik ve Kullanım Yerleri

GGG40-50-60-70-80 gibi ferritikten perlitike mikroyapı içeren küresel grafitli dökme demirlerde mekanik mukavemet değerleri, aşınma direnci, kırılma modülü, ısıl iletkenlik, doğrusal genişleme, elastik modülü, yorgunluk sınırı, basma dayanımı, darbe dayanımı, termal iletkenlik, termal genişleme gibi değerler kendi içinde değişkenlik göstermektedir. **Tablo 2.1**'de küresel grafitli dökme demirlerin kullanım alanları gösterilmiştir.

Tablo 2.1 Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özellik ve Kullanım Alanları

	MALZEMENİN CİNSİ (DIN 1693)			GGG 40	GGG 50	GGG 60	GGG 70	GGG 80	GGG 35.3	GGG 40.3
	MALZEME NUMARASI (DIN 17007)	Gösterim	Birim	0.7040	0.7050	0.7060	0.7070	0.7080	0.7033	0.7043
1	MİKROYAPI				Ferritik			Perlitik	Ferritik	
2	ÇEKME DAYANIMI	Rm	N/mm	400-550	500-650	600-750	700-850	800-1000	350-400	400-450
3	% 0.2 SINIRI	Rp 0.2	N/mm	250-350	320-420	380-480	440-600	500-750	220-280	250-300
4	KOPMA UZAMASI	A	%	27-15	18-7	8-3	6-2	4-2	30-22	27-18
5	KESİT DARALMASI	Z	%	30-15	20-2	8-3	6-2	4-2	35-20	32-17
6	BRİNEL SERTLİK (a)	HB 3Q		135-185	170-220	200-250	235-285	270-335	110-150	120-165
7	ELASTİK MODÜL	E	kN/mm	160-185						
8	POISSON ORANI	μ		0.28-0.29						
9	AŞINMA DİRENCİ		N/mm	> Rm		~ Rm		< Rm		> Rm
10	KIRILMA MODÜLÜ	G	kN/mm	0.4.Eo						
11	KIRILMA DİRENCİ		N/mm	0.9 Rm						
12	BURKULMA YORULMASI	bW	N/mm	~ (0.61-0.00026 Rm). Rm						
13	KIRILMA ENERJİSİ (b) (Çentiksiz)	A	J	98-196	59-118	39-78	19-49	9-29	-	-
14	KIRILMA ENERJİSİ (b) (V Çentikli)	A	J	10-19	3,5-10	-	-	-	19-25	14-18
15	YORULMA LİMİTİ (c)	zdW	N/mm	~(0.43-0.000192 Rm).Rm						
16	ÖZGÜL AĞIRLIK		kg/dm	7.1-7.3						
17	ISI İLETKENLİĞİ		W/(m.K)	25-42						
18	DOĞRUSAL GENLEŞME		10^-6m(m.K)	10-13						
BAŞLICA KULLANIM YERLERİ				Fittingsler	Komp. piston	Büyük dişliler	Kam milleri	Hadde silindiri		
(a) HB=3,36.Rm + 15				İnşaat iskele	tekerlek	Kağıt sanayi	Kazıcı uçlar	Krank milleri		
(b) Çalışma Sıcaklığı				parçaları	Pompa gövdesi	parçaları	uçlar	Piston kolları		
(c) Ters Çekme - Basma Gerilimleri Altında				Fren merkezleri	Dişli kutuları	Hidrolik kont.	Kavram a	Makine kılavuzu		
(d) Bu cinsler için ısıtım işlemi gerekmektedir				Büyük tekerlekler	Traktör parçaları	Aletler yatakları	Pistonlar	Palet makaraları		
(e) Bunların çentik darbe değerlerinin garanti edilmesi gerekmektedir.				Pnömatik mak.pistonları	Tarım makine parçaları	Uçak motor parçaları	Kalıplar	Tezgah parçaları	Küçük dişliler	Darbe Dayanımı Önemli Olan Dökümler
				Potalar	Valfler			Soğuk kalıplar		
				Fırın ve ocak kapakları						

Kaynak: (Metalurji Mühendisleri Odası, 2016)

2.5.2 Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Kullanılan Standartlar

Tablo 2.2'de küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılmasında kullanılan standartlar gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Küresel grafitli dökme demirlerin ulusal standartları karşılaştırılması

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR ULUSAL STANDARTLARI KARŞILAŞTIRMASI										
ÜLKE	STANDART VE YAYIN YILI	ÇEKME DAYANIMLARINA GÖRE TİPLER (Newton / mm)								
		DARBEYE DAYANIKLI TİPLER		NORMAL TİPLER						
		350	400	400	420	500	600	700	800	900
ABD	ASTM A 536 1984	-	-	60-40-18	60-42-10 65-45-12	70-50-05	80-55-06 80-60-03	100-70-03	120-90-02	-
ABD	SAE J 434 b US- Military 11466 A (ordnance)	-	-	D4018	D4512	-	D5506	D7003	DQ + T	-
ALMANYA	DIN 1693 1973	GGG35.3	GGG 40.3	GGG 40	-	GGG 50	GGG 60	GGG 70	GGG 80	-
AVUSTURALYA	AS 1831 1985	-	-	370-17	400-12	500-7	600-3	700-2	800-2	-
AVUSTURYA	M 3193 1980	-	GGG400K	GGG 400	-	GGG 500	GGG 600	GGG 700	-	-
BE LÇİKA	NBN 830-02 1970	-	-	FGN 38-17	FGN 42-12	FGN 50-7	FGN 60-2	FGN 70-2	FGN 80-2	-
BULGARİSTAN	BDS 6990 1984	350-22	-	400-15	450-10	500-7 500-2	600-3	700-2	800-2	900-2
ÇİN	GB 1348 1978	-	-	40-17	42-10	50-5	60-2	70-2	80-2	120-1
DANİMARKA	DS 11303 1971	-	-	0715 0716	-	0727	0707	0708	-	-
FİNLANDİYA	SFS 2113 1975	GRP 340	GRP 370	GRP 400	-	GRP 500	GRP 600	GRP 700	GRP 800	-
FRANSA	NF A32-201 1976	-	-	FGS 370-17	FGS 400-12	FGS 500-7	FGS 600-3	FGS 700-2	FGS 800-2	-
HOLLANDA	NEN 6002 D 1966	-	-	GN 38	GN 42	GN 50	GN 60	GN 70	-	-
I.S.O.	ISO 1083 1976	-	-	Grade 370-17	Grade 400-12	Grade 500-7	Grade 600-3	Grade 700-2	Grade 800-2	-

Kaynak: (Metalurji Mühendisleri Odası, 2016)

2.5.3 Sfero Dökme Demirlerde Kullanılan Ferro Alyajlar ve Elementlerin Etkileri

Sfero dökme demirlere eser elementlerin bazı etkileri vardır:

Karbon: KGDD'lerde karbon %3-4 arasındadır. Dökümhanelerde bu değerler, problemsiz parça üretebilmek için daha dar bir aralıkta çalışılmaktadır. Küre sayısı % karbondaki artışa oranla artış göstermektedir. Karbon değeri yükseldiğinde metalin akışkanlığı da artmakta ve böylelikle sıvı metal kalıba daha sorunsuz şekilde dolabilmektedir. Karbonun miktarı arttığında ise kürelerin sayısı artacağından parçada çekme ve çekinti diye tabir edilen problem azalmaktadır. Karbon eş değerinin % 4,3'ün üzerinde olmasıyla kürelerin sayısı ve büyüklüğü artar. Karbon eş değerinin % 4,6'nın üzerinde olmasıyla ise kalın kesitli parçalarda grafit yüzmesi meydana gelir (Aydoğuş, 2019); (Cantekinler, 2008).

Silisyum: Küresel grafitli dökme demirlerde en temel alaşım elementlerinden biridir. Silisyumun karbon eş değerline etkisi mukavemet, uzama, grafitleşme ve karbon segregasyonu üzerinedir. Silisyum ferritik yapıyı oluşturur (Aydoğuş, 2019); (Cantekinler, 2008); (Güzel & Dalı, n.d.).

Manganez: Belirlenen ideal miktarda eklendiğinde güçlü karbür oluşturur. Manganezin görevi, kükürdü bağlamaktır. Vermiküler dökme demirleri elde edebilmek için kükürt oranının düşük tutulması gerekmektedir. Yani kükürt oranının %0,02'den az olması gerekmektedir. (Aytaçoğlu, 2012); (Mavi, 2008).

Fosfor: Demir, demir fosfat bileşimini oluştururken fosfor ile birleşir. Bu bileşimin tanecik yapısı, kalın kesitli parçalarda iki katına çıkabilir ve kesit kalınlığı 25 mm'nin üstüne çıktığında fosfor miktarı 10 kata kadar artabilir. Demir fosfat, kırılğan ve çok sert bir yapıya sahiptir. Fosfor oranının %0,03'ten %0,06'ya çıkarılması, uzama değerini yarıya kadar düşürebilir. Ayrıca, silisyumun varlığı fosfor ile birleşerek malzemenin dayanımını düşürür (Aytaçoğlu, 2012); (Mavi, 2008).

Kükürt: Vermiküler döküm üretimi için, kükürdün belirli oranda kullanılması gereklidir. Eğer yapıda aşırı kükürt olursa, kükürt magnezyum sülfür oluşturmak üzere magnezyum ile tepkimeye girer.

Yapılan araştırma sonuçlarına göre yüksek kükürt içeren dökme demirden üretilen vermiküler grafitli dökme demirlerde, magnezyum ile küreselleştirme işleminin %0,004-0,005 kükürt oranları ile yapılması tercih edilen bir durumdur. Dökümde grafitin yapısının bozulmamasına magnezyum ve kükürt oranlarına hakim olarak dikkat edilmelidir. Yüksek kükürt ve yüksek magnezyum grafit yapısını bozar. “Yapılan bir çalışmada küresel grafitli dökme demirlerde kükürt oranını %0,023 ten %0,080 e çıkartarak grafit yapısındaki değişim incelenmiştir. % Kükürtün artmasıyla mukavemetin kötü yönde etkilenmiş olmasıyla beraber en boy oranı artarak grafit yapısının küresel grafitten lamel grafitte dönüştüğü görülmüştür” (Aytaçoğlu, 2012); (Bazdar et al., 2009); (Mavi, 2008).

Bakır: Bakırın perlitteki seviyesi arttığında Brinell sertlik değeri (BSD) de artar. Bakır yüksek oranda yapıya verildiğinde çekme mukavemeti de yüksek olmakla birlikte akma mukavemeti aynı şekilde tepki göstermemiştir. Çekme mukavemeti artarken uzama azalmıştır (Aytaçoğlu, 2012); (Mavi, 2008). Bakır bakıl tellerden, çelik hurdadan, pik demirden ve bazı demir dışı hurdalardan elde edilmektedir. Perlit oluştururken, mukavemet ve sertliği artırır, yapının perlitik olma eğilimini artırır. Yapıda 0.03'e kadar eser seviyede bulunabilir.

Kalay: Perlit oluşumunu hızlandırırken sementit oluşumuna bir etkisi olmaz. Ferritik olan küresel dökme demirlerde bulunmasına gerek yoktur. KGDD'lerde perlitin miktarı bakır, kalay ve manganın konsantrasyonda artmasıyla artmaktadır. Sertlik, çekme ve akma mukavemetleri de kalay miktarı ile artmaktadır. % Uzama değeri de bakır ve kalay konsantrasyonu sayesinde azalmaktadır. Kalay, lehim hurdalarından, çelik hurdadan, demir dışı metallere elde edilebilmektedir. Güçlü perlit oluşturuçu olan kalay, % 0.1'e kadar yapılan ilaveler ile perlitik yapıyı, %0.1'den fazla kullanılırsa, gevrek yapıyı oluşturur. Yani ferritik yapı oluşmasını önleyici bir görevi vardır. %0,15'e kadar eser seviyede yapıda bulunabilir.

Magnezyum: 650 °C ergime sıcaklığına sahip olan bu elementin yoğunluğu 1.73 g/cm³ tür. Dolayısı ile sıcaklığı düşük olan sıvı metalde bile rahatlıkla reaksiyona girebilir ve yapıda kolayca yayılabilir. Bu sayede homojen ve küre oluşturmaya müsait yapı oluşur. Sıvı demirin içinde oluşabilecek magnezyum miktarı %0,04'ten fazladır ve bu da oksijen ve kükürt ile bileşik halinde bulunabilmektedir. Daha az miktarlarda bulunduğunda ise grafitin vermiküler yapı kazanması imkânsız olur, bundan dolayı bu işlemler en başında kontrollü bir şekilde yapılarak magnezyum ilavesi yapması ve miktarının artırılması gerekmektedir. Magnezyumun saf olarak veya alaşım halinde iken sıvı metale katkısı olur. Grafitin küreler halinde oluşmasını sağlar.

Nikel: Nikel demirin içerisinde her oranda eriyebilmektedir ve α dönüşüm sıcaklığını indirmekte ve %1 Ni, Demir karbon ötektisinin karbon içeriği %0,06 civarında düşürebilmektedir. Yüksek nikel içeriğinde bu durum çok önemli olmaktadır. Nikel dökme demirin ergimesini 50°C kadar düşürmektedir ki bu da sıvı metalin akışkanlığını arttırmaktadır. Nikel güçlü bir grafitleştiricidir, ferrit içinde eriyebilir aynı zamanda fazın sertleşmesine neden olur. Yalnız başına kullanıldığı zaman silisyum miktarını düşürür. Bu sayede ince taneli grafit ve perlit oluşturur. (Aytaçoğlu, 2012). Nikel, pik demirlerde ve alaşımlı hurdalarda bulunmaktadır. Düşük nikel seviyelerinin etkisi yoktur.

Krom: Perlit yapıcı elementlerdendir. Gri dökme demirlerde çok düşük miktarlarda bile (örneğin %0,15) yapının tamamen perlite dönüşmesini sağlar. Serbest ferriti yok ederek mekanik özellikleri iyileştirir. Isıtma sırasında tufal oluşumunu önler, dökme demirin ısı direncini artırır. (Aytaçoğlu, 2012); (Kumruoğlu, 2003). Krom, alaşımlı hurda çelikten, paslanmaz hurdalardan ve pik malzemelerden elde edilebilir. Karbür oluşturma kabiliyetleri vardır ve kalın kesitli parçalarda tane sınırlarına yayılabilirler.

Seryum: Aşılaiıcılarđa, sfero tretmanında kullanılan alaşımlarđa ve misch metal ilavelerinde bulunabilir. Kalın kesitli parçaların karbon %'si yüksekse, temiz ham madde kullanılması durumunda chunky grafit diye adlandırılan türün oluşmasına neden olur. %0.01'den fazla bulunduğunda yapıda karbür oluşmasına neden olur.

Hidrojen (H): Islak refrakterler malzemelerinde, potalarda, kalıp boyalarında ve tüm ıslak katkı malzemelerinde bulunabilir. Döküm yüzey altında boşluk şeklinde uygunsuz yapılara neden olurlar.

Molibden (Mo): Bazı pik demirlerde ve alaşımlı hurdalarda bulunabilirler. Perlit oluşturma etkileri vardır.

Kurşun (Pb): Emayeli ve boyalı hurdalarda, çelik hurdalarda, demir dışı hurdalarda, lehimli tenekelerde, pik hurdalarında bulunabilir.

Azot (N): Kok malzemedede, karbon vericilerde, döküm bağlayıcılarında, ferro alyajlarda ve hurdalarda bulunabilmektedirler.

Titanyum (Ti): Pik demirlerde, çelik hurdada, emayeli ve boyalı hurdalarda bulunurlar. Alaşım olarak sıvı metale verilirler. Analiz içeriğinde seryum varsa küresel grafit oluşmasını önler, alüminyum varsa karınca boşluk hatasına neden olur.

Alüminyum (Al): Ferro alaşımlardan, aşılaiıcılarından, hurdadan gelebildiği gibi, saf alüminyum olarak sıvı metale de verilebilir. Hidrojen pinholü diye adlandırılan küçük boşluklara neden olabilir. Curuf ve oksit yapma etkisi de mevcuttur.

2.6. EN-GJS 400-18 (RT) Malzemeleri

EN-GJS 400-18 LT (GGG 40.3) kalite malzeme elde edebilmek ve gerekli mekanik mukavemet değerlerini sağlayabilmek için en temel esas ferritik yapının sağlanabilmesidir. Ferritik yapının sağlanabilmesi için en önemli etken zamandır. Yani karbonun tamamının küresel grafitte dönüşebilmesi için gerekli zamanın sağlanabilmesi gerekmektedir. Bu dönüşüm sonunda da ortaya çıkan malzemenin mikro yapısı, ferrit ve dolayısıyla da küresel grafitten oluşmuş olacaktır (Öker, n.d.).

Küresel grafitli dökme demirler, mekanik özelliklerine göre sınıflandırılırlar. Bu durumu açıklayan durum Tablo 2.3'te gösterilmiştir.

Tablo 2.3 KGDD'lerin sınıflandırılması

MALZEME	ÇEKME DAYANIMI N/mm ² (min)	AKMA SINIRI N/mm ² (min)	% UZAMA (min)	SERTLİK (HB)	DARBE DEĞERİ Joule (min)		YAPI
					3 Deney Ort.	1 Deney	
GGG 40	400	250	15	135-180	-	-	Daha çok Ferritik
GGG 50	500	320	7	170-230	-	-	Ferritik Perlitik
GGG 60	600	380	3	190-270	-	-	Perlitik Ferritik
GGG 70	700	440	2	225-305	-	-	Daha çok Perlitik
GGG 80	800	500	2	245-335	-	-	Perlitik
GGG 40.3	400	250	18	130-175	12	9	Ferritik

Kaynak: (Öker, n.d.)

Ferritik KGDD'lerde istenen çekme mukavemeti, uzama, darbe gibi bazı mekanik özelliklere ulaşabilmek için üretim ve kontrol parametrelerinde özel yöntemler kullanılması gerekmektedir. Bu prosesler şu şekildedir;

- Ergitme,
- Küreselleştirme,
- Döküm sıcaklık ayarlanması,
- Aşılama prosesi,
- Parçanın soğuma hızı,
- Kalite kontrolü ve sonuçların tespiti.

2.6.1 Sfero döküm EN-GJS-400-18 uygulamaları

Sfero dökme demir, karbonun grafit küreleri şeklinde bulunduğu bir dökme demir türüdür. Yüksek mukavemet, tokluk, aşınma direnci ve işlenebilirlik gibi üstün özelliklere sahip olunması istenen tüm ekipmanların bulunduğu kısımlarda kullanılır. Otomotiv, makine, inşaat, tarım ve diğer endüstrilerde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Muhafaza ekipmanlarında, otomotiv krank millerinde, fren gövde ve braketlerinde, tüm emniyet parçalarında kullanılmaktadır.

Bu malzeme aynı zamanda rüzgâr enerjisi, ormancılık, valfler, konsollar, ekran tankları, yüksek sistem ekipman muhafazaları ve soğutma bileşenleri için demir dökümlerin kullanımında da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu avantajları nedeniyle, sfero döküm, çeliğin yerini almış bulunmaktadır. EN-GJS-400-18 malzemesinin kullanıldığı parçalardan örnekler Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9 Yüksek uzamaya sahip parçalardan örnekler

Kaynak: (www.Yidecasting.Com, n.d.)

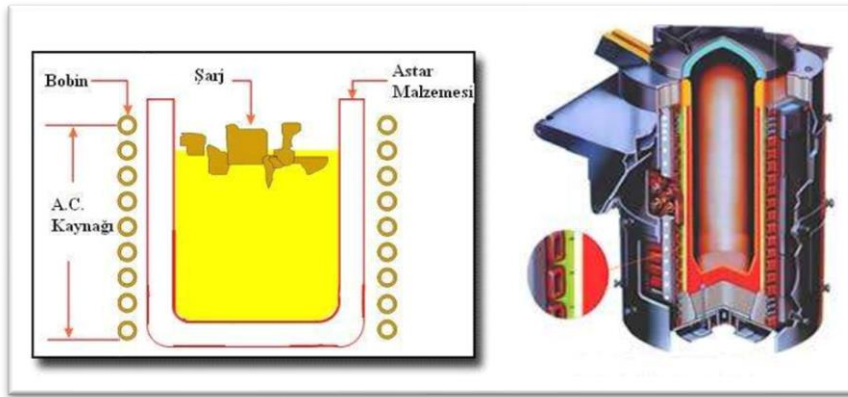
2.7. EN-GJS-400-18 Sfero Döküm Malzemesinin Üretimi

2.7.1 Şarj ve Ergitme Prosesi

Normalde metalik şarj hazırlanırken, ana hammadde olarak pik, çelik hurda ve yolluk elektromanyetik mıknatıslı vinç yardımı ile ocakların önlerinde yer alan taşıma arabalarına aktarım yapılmaktadır. Metal şarjı, %20-25 küresel grafitli dökme demir (sfero) piki, % 30-35 çelik hurda ve % 40-45 yolluk hurdasından oluşmaktadır. Katı şarjın ergitilmesinden sonra numune alınır ve analiz için spektrometreye gönderilir. Spektro sonucu uygun ise döküme devam edilir fakat uygun değilse analiz ayarlaması gerekli ilaveler yapılır.

Ancak, başlangıç referans verileri arasında görülen kimyasal analiz ve döküm sıcaklığı ve aşılama pratiği benzerliklerine bağlı olarak ilgili seçilen geçmiş döküm verilerinin başlangıç referans verileri olarak kullanılarak proje nihai amacına yönelik gerçekleştirilecek fiziki deneme dökümleri için modifiye edilmesine karar verilmiştir. Yapılan modifikasyonlarda temel karbür yapıcı etkileri yüksek olan “etken element %” değerlerinin düşürülmesi adına; tesis verimliliğinin düşürülmemesi ve projenin hızla sonuca ulaşabilmesi adına “döndü (yolluk, besleyici)” kullanımından kaçınılarak öncelikle tespit edilen kimyasal analizi elde etmeye yönelik olarak yalnız pik ve çelik ile ergitme şarjı yapılarak ergiyik metal doğrudan indüksiyon ocağından otomatik döküm ocağına alınmak suretiyle dökümler gerçekleştirilmiştir. Planlama Müdürlüğü tarafından indüksiyon ocaklarında sıvı metal üretimi için haftalık bazda iş emirleri açılır. Daha sonra talimata uygun şekilde gerekli miktardaki malzemeler ocağa yüklenir. Ardından talimatlara uygun şekilde belirli süreler ve belirli sıcaklık değerlerinde ocakta ergitme işlemi başlatılır. Sonra spektroya sıvı metalden alınan numune gönderilir ve istenen analiz değerleri sağlandığından emin olunur. Eğer sağlandıysa döküme başlanabilir. Sağlanmadıysa gereken ilaveler yapıldıktan sonra tekrar numune alınarak nihai analiz sağlanmaya çalışılır. Üretimin sfero veya gri olması durumuna göre metal IRT dediğimiz bekleme ocaklarına alınır

indüksiyon ocaklarında ergitme prosesi yapılmaktadır. Sıvıdaki karbon, silis miktarı ve çalışma sıcaklığı ocak astar ömrünü en fazla etkileyen parametrelerdendir (Özdemir, 2007)



Şekil 2.11 İndüksiyon Ocağı Görünümü

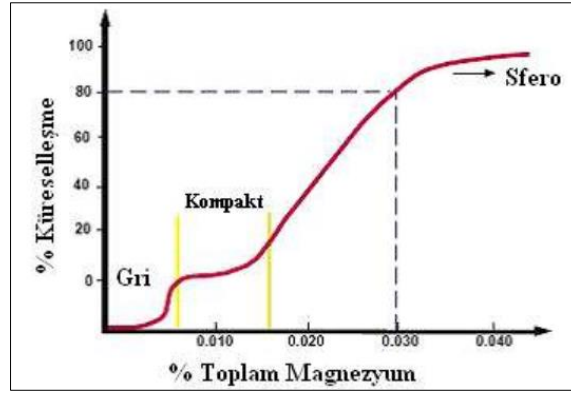
Kaynak: (Brown, 2000); (Özdemir, 2007)

Sfero dökme demir üretirken en çok orta frekanslı indüksiyon ocakları tercih edilir. Bu ocaklarda şarj işlemine soğuk olarak başlanır ve belirli sinterleme süresi sonunda ocak istenen rejime ve dayanıklılığa gelir. Bu ocaklarda sık sık analiz değişim kabiliyeti mevcuttur. Kupol ocaklarına oranla çevreyi daha az kirletirler, çevrecidirler. İşletme problemleri daha az olmakla birlikte çözümleri de daha basit seviyededir. Seri imalatta en iyi kalite ve ekonomik şartlar, indüksiyon ocağı ve bekletme ocakların beraber çalışmasıyla yakalanmaktadır. İndüksiyon ocak kapasite hesaplamalarında, ocak hacmi ile ergitme gücü/saat arasında bir ilişki bulunmaktadır (Brown, 2000). Bu ilişki denklem (2.2)'de belirtilmiştir. G_{min} asgari ocak miktarını (ton), D_{maks} ise azami ergitme gücünü (ton/saat) belirtmektedir.

$$G_{min} = 2,5xD_{maks} \quad (2.2)$$

2.7.3 Küreselleştirme İşlemi

Magnezyum, seryum, kalsiyum ve bazı toprak alkalileri ile birlikte küreselleştirme işleminde kullanılabilecek en optimum malzemedir. Dökme demirlerde küreleri oluşturabilmek için gerekli olan magnezyum miktarı, oksijen ve kükürt miktarlarına da bağlıdır. Tretman işleminde, sıvı dökme demirin sıcaklığı indüksiyon ocağında 1500-1560 °C civarında olup magnezyumun buharlaşma sıcaklığının çok üzerindedir. Dolayısıyla yüksek sıcaklıktaki sıvı metal ile temas haline geçen magnezyum çok hızlı bir şekilde buharlaşır. Bu reaksiyonun hızını azaltarak magnezyumun sıvıyla temasını yavaşlatmak için magnezyum genellikle, farklı elementlerle alaşımlandırılır. Şekil 2.12'de magnezyumun küre oluşmasına etkisi görülmektedir.



Şekil 2.12 Magnezyumun sferolaşmaya etkisi

Kaynak: (Ecob & Hartung, 2004); (Özdemir, 2007)

Sıvı metale ilave edilmesi gereken magnezyum miktarı için bazı formüller geliştirilmiştir;

$$\%Mg \text{ (ilave edilen)} = [(\text{İstenen Mg}\%) / \{(Mg \text{ verimi}\%) \times 0,01\}] - \text{Bileşim \%S} \quad (2.3)$$

Her dökümhanenin kendi şartlarını belirlemesinin daha uygun olacağı bir gerçektir. Ancak % Mg ilavesi ile ilgili olarak yazılan bu formülden de teknik olarak yararlanmak verimlilik açısından dökümhanelere büyük katkı sağlayacaktır. Fazla Magnezyum kullanımı maliyetleri yükselteceği gibi parçalarda çekinti eğilimi ve cüruf miktarını da artıracaktır. (Ecob & Hartung, 2004; Özdemir, 2007).

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Geçtiğimiz on yıllar boyunca, küresel dökme demirlerin mekanik davranışları ile ilgili yapılmış çok sayıda çalışma vardır.

Çelik, sfero dökme demirde ostemperleme ısıl işlemi sonucu beynit miktarına ve sertliğine Cu, N, ve Mo alaşımının etkilerini incelemiştir. Yaptığı çalışmada sinirsel ağ modeli ile deney sonuçlarını değerlendiren bir program yazmıştır. Yazmış olduğu bu model sayesinde beynit miktarını önceden tahmin etmeyi başarmıştır (Çelik, 1996).

Canzar ve arkadaşları EN-GJS-400-18-LT sfero dökme demirin yorulma ömrüne mikro yapının etkisini incelemiştir. Grafit nodüllerinin boyutunun, şeklinin ve dağılımının malzemenin döngüsel serleşmesinde önemli bir etkisinin olmamasına rağmen çatlak oluşumu ve ilerlemesi sürecinde büyük rol oynadığını belirtmişlerdir. Düzensiz şekilli büyük nodüllerin kırılma tokluğunu ve yorulma mukavemetini azalttığını söylemişlerdir (P. Čanžar et al., 2012).

Jafar Khalil ve arkadaşları kalıbın ön ısıtılması ve sfero dökme demirin Si içeriğinin karbür yüzdesi, grafit nodül sayısı ve hacimsel çekme üzerine etkilerini incelemiştir. Kalıbın ön ısıtılmasının karbür yüzdesi ve hacimsel çekme hacmini azalttığını tespit etmişlerdir (Jafar & Behnam, 2011).

Muharrem Yılmaz, imaj analiz tekniklerini kullanarak endüstriyel koşullarda dökülmüş sfero ve gri dökme demirlerde faz oranlarını nicel olarak ölçmeyi amaçlamıştır ve bu çalışmada malzeme yapısı ile ilgili olarak çalışan ve eğitimli dökümhane metod-mühendislik personeli bilgisayar program destekli analiz yazılım programları kullanarak numunelerinin içyapılarını incelemiş olup, uyguladıkları küreselleştirme ve aşılama işleminin uygunluğunu kontrol edebilecek aşamaya getirmiştir (Yıldız, 2014).

Aytaçoğlu çalışmasında dökme demirlerde grafitin şekli, sayısı ve dağılımlarını değiştirilerek ortaya çıkan karakteristik soğuma eğrilerini yorumlanmış ve bazı parametreleri incelemiştir. Ayrıca kullandığı matematiksel metotla termal analiz yazılımlarının dışında soğuma eğrilerinin oluşturulması için yeni bir yöntem geliştirmiştir (Aytaçoğlu, 2012).

Yılmaz, aşı malzemeleri ve aşılama oranlarının sfero dökme demirlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Araştırma sonuçlarına göre, farklı tip ve boyutlarda aşılama kullanarak üretilen termal analiz sonuçlarında yüksek oranda aşı kullanılması mikroyapıyı ferritik, daha az aşı kullanılması ise mikroyapıyı perlitik hale getirmiş olup, AlTiB (AlTiB 5/0,2- Ti % 5 – B % 0,2 / Al % 94,8) ile alaşımlandırma yapılan GGG40 dökümlerinde mikroyapı ve mekanik özelliklerin zayıfladığı görülmüştür (Yılmaz, 2019).

Ovacık, yeni nesil küresel grafitli dökme demirlerden olan EN-GJS-600-10 ile geleneksel dökme demirlerden olan EN-GJS-600-2 ve EN-GJS-600-3'ü mikroyapı ve mekanik özellikleri açısından karşılaştırmıştır. Ovacık bu karşılaştırma sonucunda yeni nesil küresel dökme demirin daha homojen yapıda olduğunu, sertliğinin daha düşük olduğunu söylemiştir. Bu sayede işleyici takım ucu ve taşlama taşı sarfiyatının düştüğünü belirtmiştir (Ovacık, 2023).

(Omale, 2020), dökme demirlerin mekanik performansını iyileştirmek için gereken perlit fazı içeriğini artırmak amacıyla kullanılan düşük ferro alaşım ilavesinin (daha düşük proses ve ürün maliyeti sunan) potansiyellerini değerlendirmek amacıyla düşük miktarlarda molibden, nikel, bakır ve krom ile alaşımlı dökme demirlerin yapısal özellikleri ve mekanik özelliklerini incelediler. KGDD'ler Mo, Ni, Cu ve Cr'nin her biri maksimum %0,2 oranında içermekte ve bir pota fırını kullanılarak üretilmiştir. Sonuçlar, mikro alaşım ilavelerinin perlit içeriğini %30,63'ten %59,38'e kadar önemli bir artışa neden olduğu gözlenmiştir. Mikro alaşım ilaveleriyle sertlikte %1,4-36,5 aralığında, çekme mukavemetinde ise %35,89-80,55 aralığında artış elde edilmiştir. Genel olarak, mekanik özelliklerin en iyi kombinasyonu, krom ve bakırın yanı sıra mikro alaşım katkıları olarak molibden, nikel ve krom içeren KGDD bileşimi için elde edilmiştir.

Demirlek, çalışmasında %2,4 Si içeren EN-GJS-500-7 ve %3,6 Si içeren EN-GJS-500-14 sınıfı küresel grafitli dökme demirleri kullanmış olup, silisin sfero dökme demirin sertlik, mikroyapı, çekme mukavemeti, darbe ve yorulma davranışı etkisini incelemiş ve şu sonuçları gözlemlemiştir. Mikroyapı sonuçları çalışıldığında, EN-GJS-500-7 kalite sfero dökme demirin %42 ferrit-%58 perlit içerdiği, EN-GJS-500-14 kalite sfero malzemenin ise yüksek miktarda silis etkisi ile %100 ferrit içerdiği görülmüştür. Son olarak ise EN-GJS-500-7 malzemenin kopma uzaması %11 ve EN-GJS-500-14 malzemenin kopma uzamasının da %21 olduğunu gözlemlenmiştir (Demirlek, 2013).

Ekinci çalışmasında, küresel grafitli dökme demirlerin aşılama ile karakteristik özelliklerinden bazılarının (ferrit, perlit, sementit, grafit, grafit çapı, küre sayısı, sertlik) değişimini deneyler ile incelemiştir. Araştırmada, küresel grafitli dökme demir aşılama işleminde kullanılan farklı bileşenlerin mikroyapı ve mekanik özelliklere olan etkileri incelenmiştir. Çalışmalarda ince cidarlı dökümlerde, Baryumlu aşılama ile küresellik oranının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kesit kalınlığı arttığında küre sayısının azaldığı, küre çapının ise darbe direncini arttırdığı, sertliğin düştüğü görülmüştür. Ayrıca artan küre sayısı ile darbe direncinin azaldığı, küreselleşme oranının ise arttığı tespit edilmiştir (Ekinci, 2009).

Arda, üç farklı küresel grafitli dökme demir alaşımının katılaşma sürecinde oluşan besleme mekanizmasını incelemiştir. Bu inceleme, iki farklı döküm simülasyon yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Alaşımlar, özel olarak hazırlanan kum kalıplara dökülmüş ve oluşan makro porozite değerleri, simülasyon programlarından elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada metal ergitme, kuma döküm, modelleme, tahribatsız muayene ve mikroskopik görüntüleme teknikleri kullanılmıştır. Arda, simülasyon ile gerçek dökümdeki gözenek dağılımları arasında bire bir uyum olduğunu ve kalıp dayanımının sınır şartlarının belirlenmesinde önemli olduğunu belirtmiştir (Arda, 2010).

4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, farklı çaplarda (Ø20-25-30mm) yuvarlak kesitli dökme kalıpları kullanılmıştır. EN-GJS-400-18 küresel dökme demirinde ağırlıkça %Si ve karbür yapıcı elementler Cu ve Mo'nun %uzama, çekme mukavemeti ve %ferrit oranı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

4.1. Şarjın hazırlanması

%50 pik (Brezilya) (Tablo 4.2) ve %50 çelik (DKP sac) (Tablo 4.3) kullanılarak

Tablo 4.1'de belirtilen TS-EN-GJS-400-18 alaşımı oluşturulmuştur. Her şarja, %0,2 VP216 aşılama eklenmiştir Tablo 4.4. Küresel grafitli dökme demirin yapısına %Si (2,90-2,95-3,00-3,05-3,10), %Mo (0,001-0,002-0,003-0,004-0,005) ve %Cu (0,03-0,06-0,09) oranlarında eklenmiştir. Bu sayede Si, Mo ve Cu'nun etkilerini, mekanik özelliklerini ve mikroyapının değişimini görmek amaçlanmıştır. Her defasında bir elementin oranı değiştirilerek 75 farklı şarj hazırlanmıştır. Her şarj için indüksiyon ocağına 6000 kg malzeme yüklenmiştir.

Tablo 4.1 TS-EN-GJS-400-18 kimyasal analizi

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ti	Mo	Mg	Al	Ce	Ni	V
350-3,60	Min.2,60	0,15 maks.	0,02 maks.	Min 0,04- 0,007 maks	0,035 maks	0,06 maks	0,001 maks	0,003 maks	0,38	0,015	0,002	0,003	0,004 maks

Tablo 4.2 Brezilya Piki kimyasal analizi

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ti	Mo	Sn	Mg	Al	Ni	W	Pb
4,370	0,550	0,058	0,048	0,023	0,011	0,010	0,010	0,001	0,001	0,010	0,001	0,027	0,002	0,001

Tablo 4.3 Sfero lama çelik hurdası kimyasal analizi

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ti	Mo	Sn	Al	Ce	Ni	Zn	Zr	B	W	Pb	S
0,074	0,014	0,211	0,011	0,013	0,036	0,059	0,009	0,004	0,006	0,047	0,160	0,037	0,013	0,010	0,000	0,005	0,006	0,066

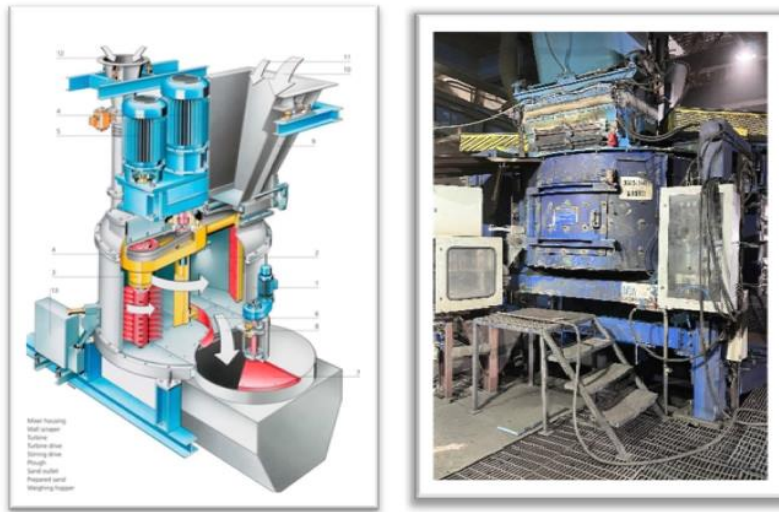
Tablo 4.4 Aşılaiıcı kimyasal analizi

Aşı Adı	% Silikon	% Alüminyum	% Kalsiyum
VP216	70	3,4	0,8

4.2. Döküm için kumun, modelin ve kum kalıbın hazırlanması

4.2.1 Döküm kumunun hazırlanması

Şekil 4.1'deki 2,5 ton kapasitesi George Fisher marka istenen reçetedeki malzemeleri kendisi alabilen otomatik kum hazırlama mikseri kullanılmış olup, **Tablo 4.5**'teki oranlarda silis kumu, bentonit, kömür tozu ve su eklenerek döküm kalıplama kumu hazırlanmıştır. Hazırlanan kumun fiziksel ve kimyasal özellikleri **Tablo 4.6**'da belirtilmiştir.



Şekil 4.1 Kum Mikseri

Tablo 4.5 Döküm kumu karışım oranları

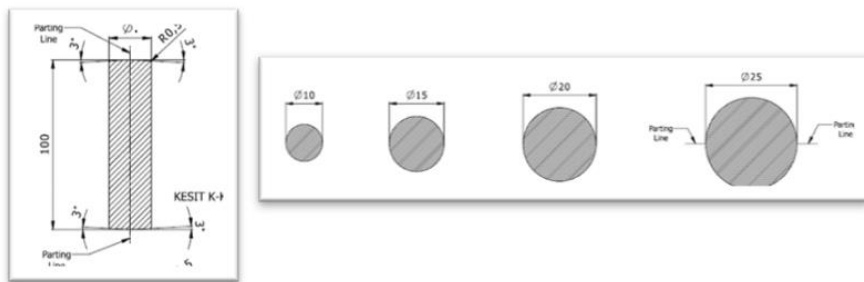
Malzeme	Miktar (kg)
Eski kum	2.000
Yeni kum	30
Kömür tozu	6
Bentonit	30
Su	Karışımın kompaktibilitesine bakılarak otomatik olarak veriliyor.

Tablo 4.6 Döküm kumundan elde edilen özellikler

Kompaktibilite	%38
Yaş Basma Mukavemeti	1950 gr/cm ²
Yaş Çekme Mukavemeti	0,35 psi
Tane Boyutu	69 AFS
Nem	%2,80
Geçirgenlik	%90
Aktif Bentonit	%8,5
Aktif Kil	%15
Yanma Kaybı	%6
Kil	%1
Elek	3-4

4.2.2 Modelin hazırlanması

Şekil 4.2'de gösterilen, çapları 20-25-30 mm ve uzunluğu 100 mm olan döküm modelleri CNC tezgahlarında işlenerek figürleri hazır hale getirilmiştir. Hazırlanan prototip figür modellerin modelhanede tesfiye ve pürüzsüzlük işlemleri yapılmıştır. CNC tezgahlarında dikey kalıplama Disa hatlarının ölçüsüne göre işlenen plakalara kasetleri ile beraber yerleştirildikten sonra önceden mühendislik ve modelhane ekibi tarafından hesaplanarak dizayn edilmiş olan yolluk sistemi prototip figürlerin ve plakanın bir bütün haline getirildiği yapıya monte edilmiştir. En son olarak her yönüyle hazırlanan modellerin temizlik ve tarih montaj işlemleri yapılmıştır. Ardından, bu modellerle hazırlanan kum kalıplara döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.2 Hazırlanan prototip numune modeli

4.2.3 Döküm Kalıbının Hazırlanması

Yaş kum, kum mikserinde o parçaya özgü olarak önceden hesaplanmış olan reçete ile hazırlandıktan sonra bant sistemi ile kalıplama hattının kum silolarına beslenmiştir. Kum silosunda toplanan yaş kum, Disa makinesinin piston ve kapak tarafına boşaltılarak Şekil 4.3'te gösterilen otomatik Loramendi e-VMM kalıplama makinesinde kalıplama işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.3 Loramendi Kalıplama Makinesi

4.3. Ergitme ve döküm

Önceden hazırlanmış olan şarj malzemeleri, 6 tonluk orta frekanslı indüksiyon ocaklarında 60 dakika boyunca ergitilmiştir (Şekil 4.4 Inductotherm İndüksiyon Ocağı). Ocaktan alınan 1500-1520 °C sıcaklıktaki ergimiş metal, önce 2,5 tonluk transfer potası (Şekil 4.5) ile IRT bekleme ocağına ve ardından Şekil 4.6'da gösterilen 1 tonluk tretman potasına aktarılmıştır. Tretman potasında Mg ile küreselleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Küreselleştirme işleminden sonra, maksimum 3 dakika içinde Şekil 4.7'de gösterilen otomatik döküm ocağına (OCC) alınarak sabit 1410°C'de kalıplara dökülmüştür. OCC içerisinde %Mg miktarının hızlı düşmemesi için azot gazı ile metal kabartılmıştır. Dökülen ürünler oda sıcaklığında soğutulmuştur.



Şekil 4.4 İndüksiyon ocağı



Şekil 4.5 Sıvı metalin indüksiyon ocağında tretmana aktarımı



Şekil 4.6 Tretman potası



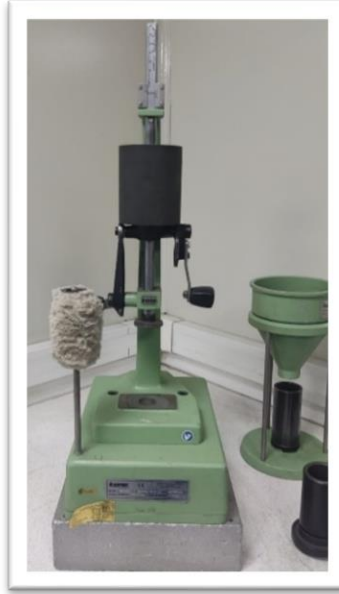
Şekil 4.7 OCC Döküm Ocağı

4.4. Test ve analizler

4.4.1 Döküm kumu ve kalıplarının testleri

Demisaş şirketinin sahip olduğu test ve ölçüm aletleri kullanılarak, döküm kumu ve kalıpların fiziksel ve mekanik özellikleri test edilmiştir.

Kompaktibilite testi, döküm sürecinin verimliliğini ve kalitesini artırmak için önemli bir yöntemdir. Bu test, kalıplama kumunun sıkışma özelliklerini belirleyerek döküm parçalarının kalite kontrolünü sağlar. Deneylerde kullanılan kompaktibilite cihazı **Şekil 4.8**'de gösterilmiştir. Cihaz, kum örneğini belirli bir basınç altında sıkıştırır. Bu sıkıştırma işlemi, kumun sıkışma kapasitesini belirlemek için yapılır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, cihaz kumun sıkışma oranını ölçer. Bu oran, kumun kompaktibilite değerini temsil eder. Ölçülen değerler, döküm kalitesi ve kalıp performansı açısından değerlendirilir. Yüksek kompaktibilite değerleri, kumun iyi sıkıştığını ve kalıp kalitesinin yüksek olduğunu gösterir. Düşük kompaktibilite değerleri ise, kumun yeterince sıkışmadığını ve kalıp kalitesinin düşük olabileceğini gösterir. Deneylerde -3 mm elek boyutunda 150 g döküm kumu 3 vuruşla standart bir ağırlıkla sıkıştırılıp kompaktibilite testine yerleştirilerek ölçüm gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8 Simpson Kompaktibilite Cihazı – Model 42100

Kalıbın nem miktarının ölçümü, 3 g kumun 105 °C'de 10 dakika ısıtılmasıyla, **Şekil 4.9**'da gösterilen Ohaus MB90 nem cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.9 Ohaus mb90 Nem Cihazı

Gaz geçirgenliği **Şekil 4.10**'da gösterilen Simpson dijital geçirgenlik cihazı kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 4.10 Simpson Dijital Geçirgenlik Cihazı- Model 42105

Yaş çekme değerleri **Şekil 4.11**'de gösterilen Simpson Yaş Çekme Mukavemeti Cihazı kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 4.11 Simpson Yaş Çekme Mukavemeti Cihazı- Model 42112

Yaş basma ve kesme mukavemetleri **Şekil 4.12**'de gösterilen Simpson Universal Parçalanma cihazı kullanılarak tespit edilmiştir.



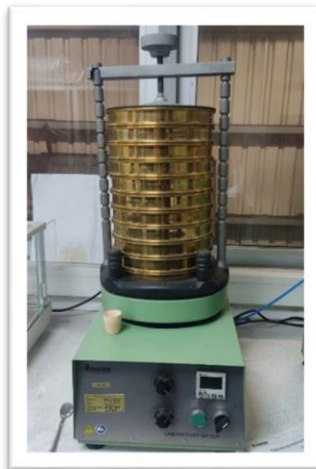
Şekil 4.12 Simpson Universal Parçalanma, Yaş Basma, Kesme Cihazı

Uçucu madde tayinleri **Şekil 4.13**'te gösterilen Uçucu madde Tayin Cihazı ile ölçülmüştür.



Şekil 4.13 Sel-horn r-8 Yanma Kaybı ve Uçucu madde Tayin Cihazı

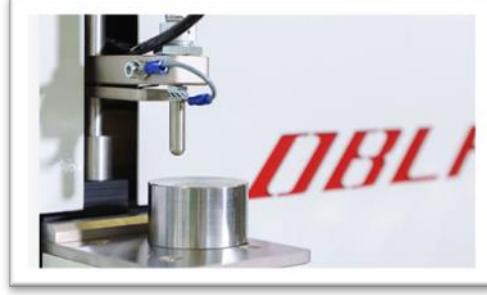
Tane inceliği **Şekil 4.14**'te gösterilen Simpson Elek Cihazı kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 4.14 Simpson Elek Cihazı – Model 42106

4.4.2 Döküm ürünlerinin test ve ölçümleri

Denemeler sonucunda elde edilmiş olan döküm ürünlerin kimyasal analizleri **Şekil 4.15**'teki OBLF marka optik emisyon spektrometresi ile ölçülmüştür.



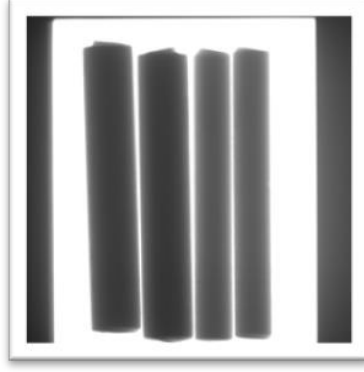
Şekil 4.15 OBLF Spektrometre

Metalografik olarak numune kesme ve parlatma işlemi sonrasında hazırlanan numunelerin mikroyapı çalışması önce dağlama yapılmadan Nikon marka optik mikroskop (**Şekil 4.16**) ile incelemiştir. Bu görüntüleme yöntemi neticesinde küresel grafitlerin oranı ve küresellik oranları tespit edilmiştir. Daha sonra %2 nital ile dağlanan numuneler ferrit/perlit oranlarının tespiti için Clemex Captiva Görüntü Analiz Yazılımında çalışılmıştır.



Şekil 4.16 Nikon optik mikroskop

Tüm numunelerin boşluk kontrolleri Yxlon marka X-Ray cihazında (**Şekil 4.17**) kontrol edilmiştir. Bu çalışmanın amacı ise yapılan prototip dökümlerde eğer çekinti boşluğu var ise parçanın çekme cihazında yapılan testlerde mukavemeti düşük çıkacaktır. Yine uzaması da hatalı çıkarak çalışmayı yanlış yönlendirme ihtimali vardır. Bu olasılığı elimine edebilmek adına X-ray cihazında boşluksuz sağlam parça tespiti yapılmıştır.

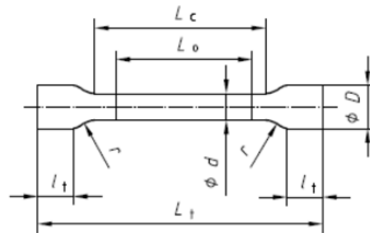


Şekil 4.17 Yxlon marka cihazıyla ölçülmüş X-Ray

Çekme test numunesi, EN-6892-1 standartlarına uygun olarak istenen ölçülerde teknik resme göre işlenerek hazırlanmıştır. Çekme testi, Zwick marka çekme cihazı (**Şekil 4.18**) kullanılarak DIN EN 10002-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Çekme testi numunesi, dökülen parçanın mekanik mukavemet sonuçlarını temsil etmektedir. Bu temsile dayanarak parçanın çekme mukavemeti değeri ölçülmüştür. **Şekil 4.19**'da EN-6892-1 standart numune teknik resmi ve gereken bilgileri verilmiştir.



Şekil 4.18 Zwick çekme cihazı

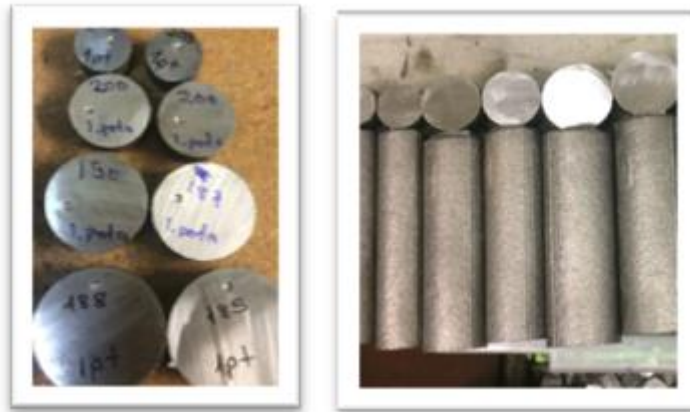


Şekil 4.19 EN-6892-1 Standardına uygun numune d:10 mm, Lo:50mm, Lc:60mm

Şekil 4.20'de gösterilen Brinell sertlik deney cihazı ile, 10 mm çapındaki bilyenin malzeme yüzeyine 3000 kg sabit yük 15 saniye boyunca uygulanarak iz oluşturulmuştur. Lens sistemi ile oluşturulan izin çapı ölçülerek, ISO 6506-ASTM E 10 standardına uygun olarak Brinell sertlik testi kaydedilmiştir. **Şekil 4.21**'de sertlik ölçümünde kullanılan numuneler gösterilmiştir.



Şekil 4.20 Brinell sertlik cihazı

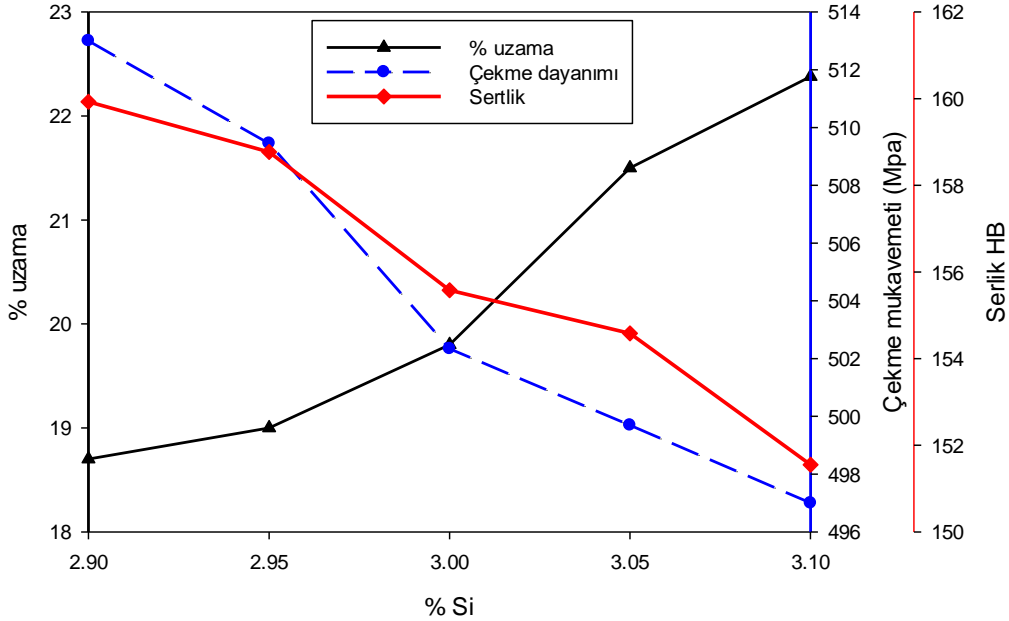


Şekil 4.21 Sertlik ölçümünde kullanılan numuneler

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Alaşım elementlerinin TS-EN-GJS-400-18 kalite malzemenin mekanik özelliklerine etkisi

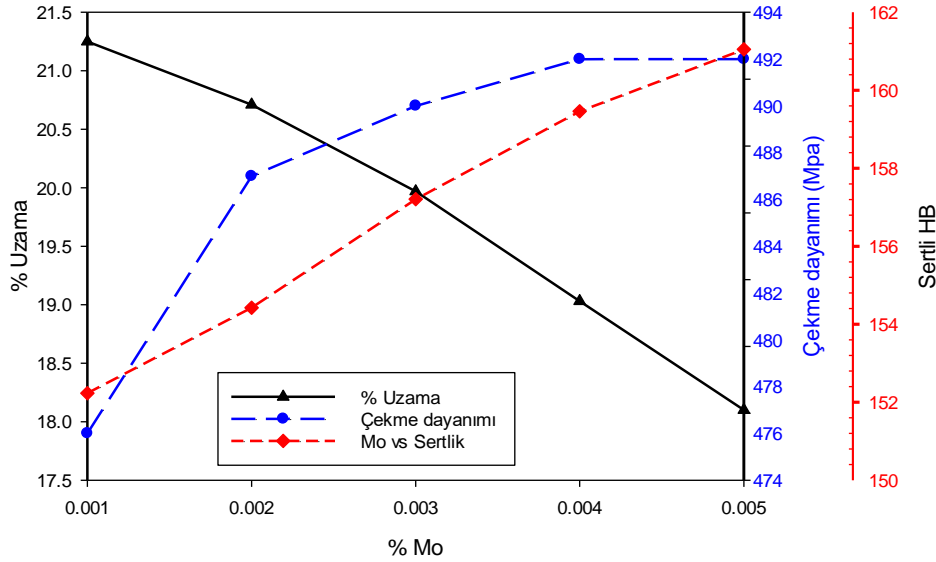
Silisyumun sfero döküm mekanik özelliklerini değiştiren bazı etkileri mevcuttur ve bunlar Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Burada, dökülen numune parça Ø20 mm ölçüsünde, Mo içeriği %0,001 ve %Cu içeriği %0,06 olarak sabitlenmiştir. %Si içeriği de %2,90 ile %3,10 arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. Döküm işlemi tamamlandıktan sonra ortaya çıkan numunenin içinde herhangi bir boşluk şüphesi ile mukavemet düşüklüğü olmaması açısından X-ray ile kontrol sağlanarak, sadece içinde boşluk olmayan numune dökümlerin mekanik mukavemet ölçümleri gerçekleştirilmiştir. %Si oranının %2,90'dan %3,10'a çıkarılmasının, 400/18 sfero malzemenin %uzama değerini %18,7'den %22,38'e yükselterek, çekme mukavemetini 513 MPa' dan 497 MPa' ya indirerek, sertliğini de 159,93 HB' den 151,55 HB' ye indirdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.1 Silisyumun sfero döküm mekanik özelliklerine etkileri

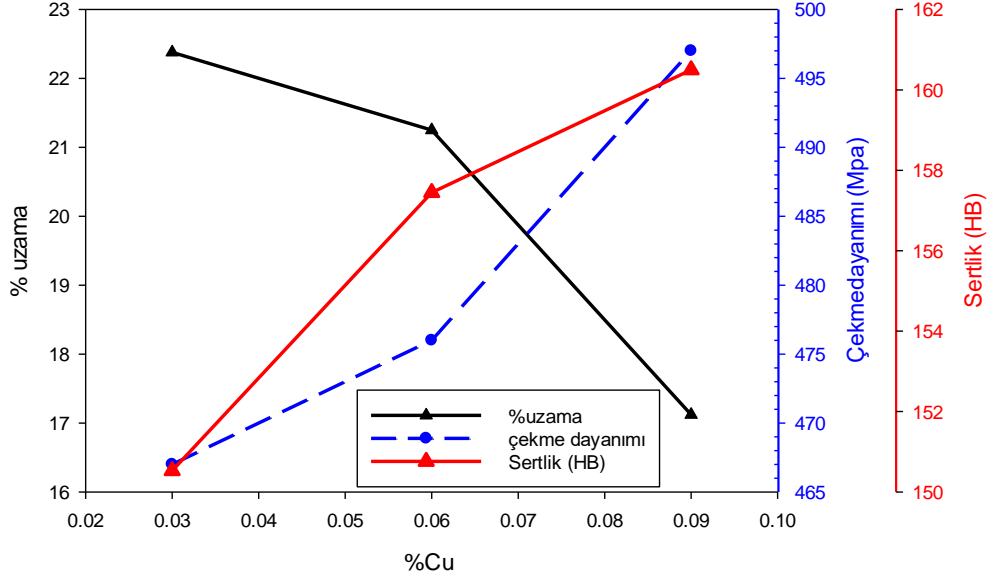
Molibdenin sfero döküm mekanik özelliklerini değiştiren bazı etkileri mevcuttur ve bunlar Şekil 5.2de gösterilmiştir. Burada dökülen parça Ø20 mm ölçüsünde, %Si içeriği %3,10 ve %Cu içeriği %0,06 olarak sabitlenmiştir. %Mo içeriği de %0,001 ile %0,005 arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. Yine döküm işlemi tamamlandıktan sonra ortaya çıkan numunenin içinde herhangi bir boşluk şüphesi ile mukavemet düşüklüğü olmaması açısından X-ray ile kontrol sağlanarak, sadece içinde boşluk olmayan numune dökümlerin mekanik

mukavemet ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Molibden miktarının %0,001'den %0,005'e yükseltilmesinin, 400-18 sfero malzemenin %uzama değerini %21,25' ten %18,10' a indirdiği, çekme mukavemetini 476 MPa' dan 492 MPa' ya yükselttiği ve sertliğini 152,23 HB' den 161,05 HB' ye yükselttiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.2 KGDD'lerde molibdenin mekanik mukavemete olası etkileri

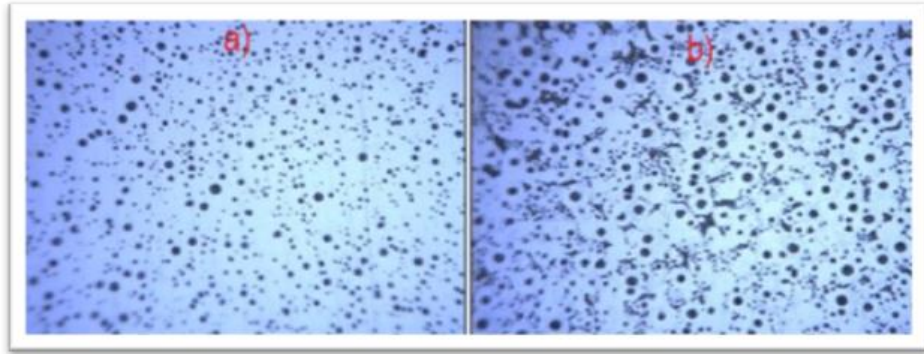
Bakırın sfero döküm mekanik özelliklerini değiştiren bazı etkileri mevcuttur ve bunlar **Şekil 5.3**'te gösterilmiştir. Burada, dökülen parça Ø20 mm ölçüsünde, %Si %3,10 ve %Mo içeriği %0,001 olarak sabitlenmiştir, %Cu içeriği ise %0,03 ile %0,09 arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. Döküm işlemi tamamlandıktan sonra ortaya çıkan numunenin içinde herhangi bir boşluk şüphesi ile mukavemet düşüklüğü olmaması açısından X-ray ile kontrol sağlanarak, sadece içinde boşluk olmayan numune dökümlerin mekanik mukavemet ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bakır miktarının %0,03' ten %0,09' a yükseltilmesinin, 400/18 sfero malzemenin %uzama değerini %22,38' den %17,12' ye indirdiği, çekme mukavemetini 467 MPa' dan 497 MPa' ya yükselttiği ve sertliğini 153,01 HB' den 160,05 HB' ye yükselttiği gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3 Bakırın küresel KGDD'in mekanik özelliklerine etkisi

5.2. Alaşım elementlerinin TS-EN-GJS-400-18 kalite malzemenin mikroyapısına etkisi

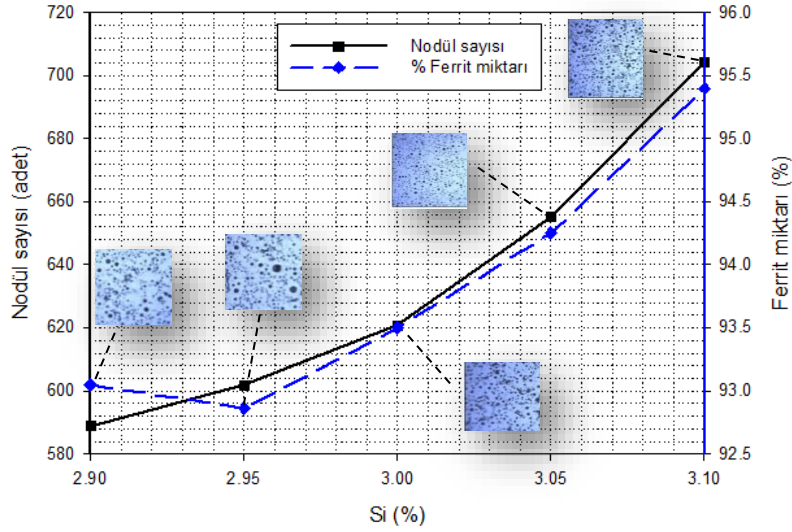
Elde edilen numunelerin mikroyapıları dağlanmış ve dağlanmamış olarak ayrı ayrı incelenmiş olup dağlama olmayan numunelerde nodül sayısı tespit edilirken, nital %2 kullanılarak dağlananlarda %ferrit oranları Clemex analizi ile ölçülerek Şekil 5.4'e kaydedilmiştir. Si, Cu ve Mo'nun 400/18 kalite malzemenin nodül sayısı ve % ferrite olan etkisi Şekil 5.5 - Şekil 5.7'de kaydedilmiştir.



Şekil 5.4 a) dağlanmamış nodül sayısı 612 b) dağlanmış ferrit %84,90)

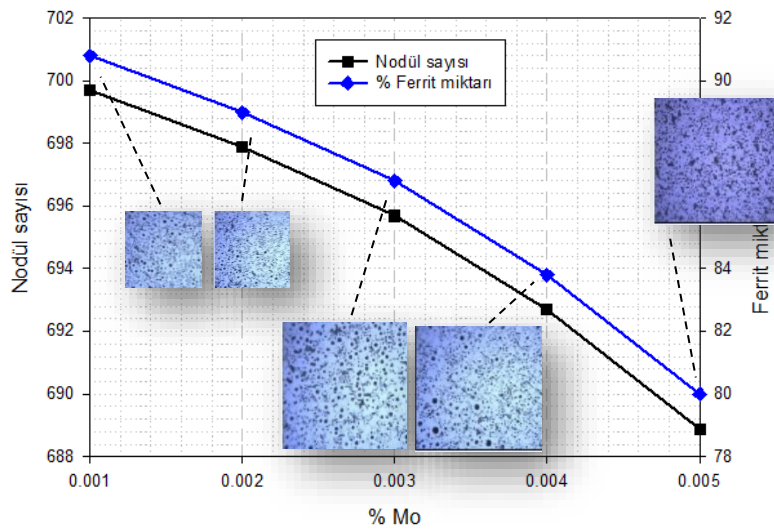
Silisyumun sfero döküm mikroyapı özelliklerini değiştiren bazı etkileri mevcuttur ve bunlar Şekil 5.5'te kaydedilmiştir. Ø20 mm numune ile %Mo içeriği %0,001 ve %Cu içeriği %0,06 olarak sabitlenmiş olup %Si içeriği ise %2,90 ile %3,10 arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. %Si miktarının %2,90'dan %3,10'a yükseltilmesinin 400/18 sfero

malzemesinin nodül sayısının 588,88' den 704,29' a çıktığı, ferritin ise %93,05' ten %95,10' a yükseldiği hesap edilmiştir.



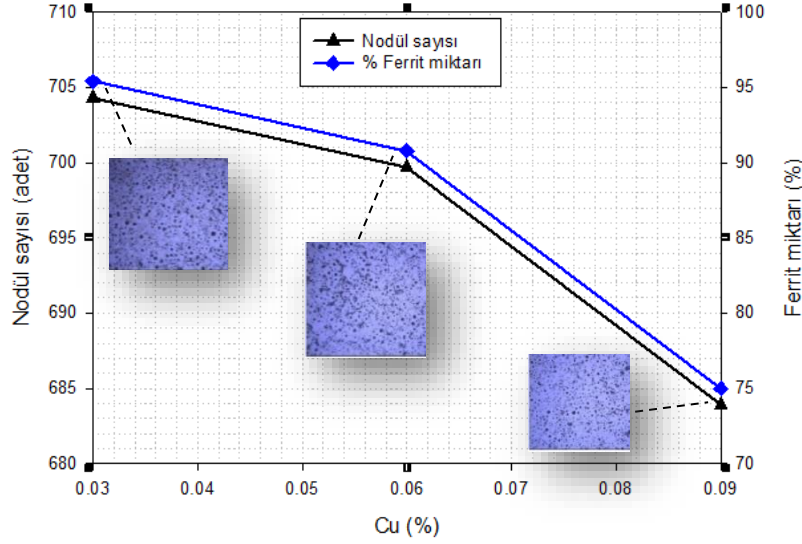
Şekil 5.5 Silisyumun TS-EN-GJS-400-18 kalite malzemenin mikroyapı özelliklerine etkisi

Molibdenin sfero döküm mikroyapı özelliklerini değiştiren bazı etkileri mevcuttur ve bunlar Şekil 5.6' da kaydedilmiştir. Ø20 mm numune ile, %Si içeriği %3,1 ve %Cu içeriği %0,06 olarak sabitlenmiş olup %Mo içeriği ise %0,001 ile %0,005 arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. %Mo miktarının %0,001'den %0,005'e yükselmesinin 400/18 sfero malzemesinin nodül sayısının 699,69' dan 688,89' a indiği, ferritin ise %90,8' den %80' e indiği hesaplanmıştır.



Şekil 5.6 Molibdenin TS-EN-GJS-400-18 kalite malzemenin mikroyapı özelliklerine etkisi

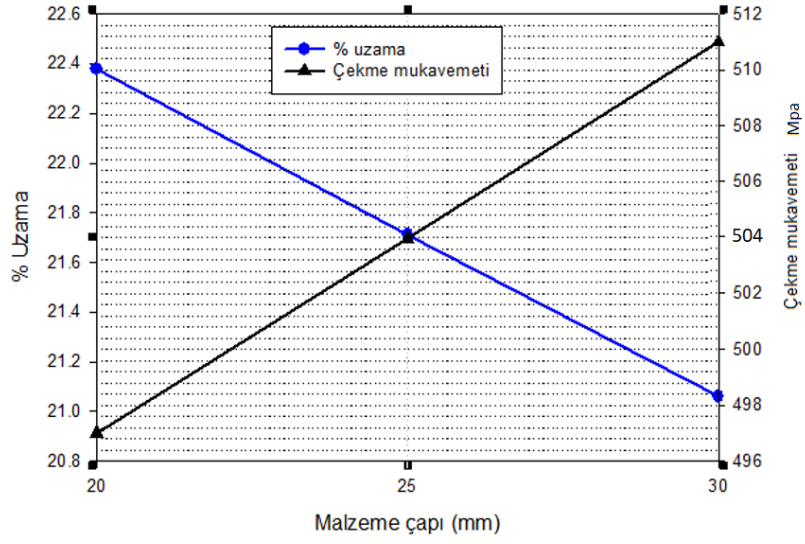
Şekil 5.7, küresel grafitli dökme demirin mikroyapısına Cu'nun etkisini göstermektedir. Ø20 mm numune ile, %Si içeriği %3,1 ve %Mo içeriği %0,001 olarak sabitlenmiş olup, %Cu içeriği ise %0,03 ile %0,09 arasında kademeli olarak değiştirilmiştir. % Cu içeriğinin %0,03' ten %0,09' a yükselmesiyle, 400/18 sfero malzemesinin nodül sayısının 704,29' dan 683,89' a, ferritin ise %95,4' ten %75' e indiği kaydedilmiştir.



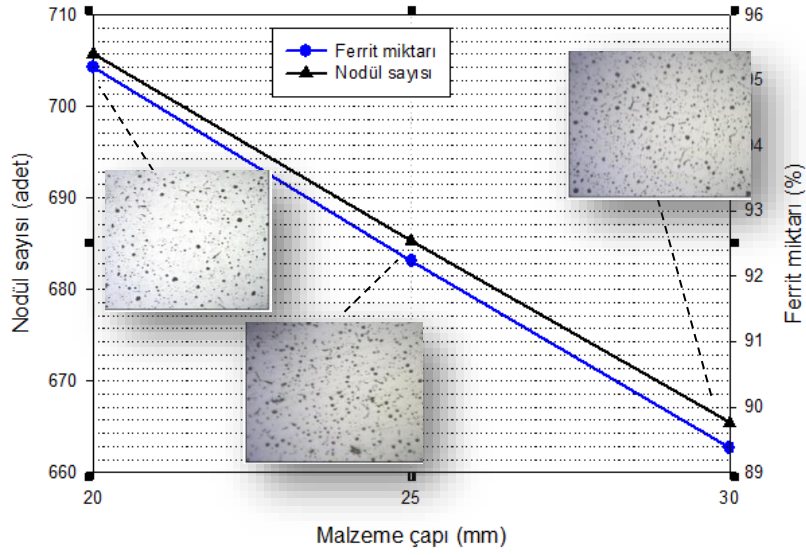
Şekil 5.7 Cu'nun TS-EN-GJS-400-18'nin mikroyapısal özelliklerine etkisi

5.3. Malzeme çapının TS-EN-GJS-400-18'nin mekanik ve mikroyapısal özelliklerine etkisi

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9, Ø20 mm, Ø25 mm ve Ø30 mm olan önceden hazırlanmış modellerin kalıplarına dökülerek, %3,10 Si içeriği, %0,001 Mo içeriği ve %0,06 Cu içeriğine haiz prototip numunelerin mekanik ve mikroyapısal özelliklerini göstermektedir. Malzeme çapı Ø20 mm' den Ø30 mm' ye arttıkça, %uzama değeri 22,38' den 21,06' ya inerken, çekme mukavemet değeri de 497 MPa' dan 511 MPa' ya yükselmiştir. Benzer durumda, çap değerinin artması ile nodül 704,29' dan 662,673' e, % ferrit ise 95,40' tan 89,7' ye inmiştir.



Şekil 5.8 Çap değerinin 400/18 sfero malzemenin mekanik özelliklerine etkisi



Şekil 5.9 Malzeme çapının TS-EN-GJS-400-18'nin mikroyapısal özelliklerine etkisi

6. SONUÇLAR

Bu çalışmanın amacı, dökümhanelerde seri üretimi zor olan GJS 400/18 malzemenin seri üretim koşullarına uygun olarak üretilmesini sağlamaktır. Bu bağlamda, ağırlıkça silisyum, bakır, molibdenin yanı sıra döküm malzemesi çapının, 400/18 sfero malzemenin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada elde edilen bulgular aşağıda kaydedilmiştir.

Silisyum (Si) oranının artmasının, küresel grafitli dökme demirin % uzamasını artırdığı, ancak çekme mukavemeti ve sertliğini azalttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, spektral analizde yer alan %Si değerinin %3,10' u geçmeyecek şekilde kontrol edilmesinin önemi değerlendirilmiştir.

Karbür yapıcı elementlerden molibden (Mo) ve bakır (Cu) miktarının artmasının, küresel grafitli dökme demirin % uzamasını azalttığı, ancak çekme mukavemeti ve sertliğini artırdığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, karbür yapıcı etken elementlerden; Cu: %0,006 ve Mo: %0,001–0,005 arasındaki en düşük değere yakın olmasında, dökülen parça isterleri doğrultusunda kriterlerin sağlanabilmesi için gerekli olduğu görülmüş ve vurgulanmıştır.

Ayrıca, silisyumun (Si) nodül ve ferrit miktarını artırdığı, molibden (Mo) ve bakırın (Cu) ise nodül ve ferrit miktarını azalttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, mikroyapıda % ferrit oranının en az %80 olması gerektiği ve 400/18 sfero malzemenin mekanik özellikleri açısından üretiminde mm² başına nodül sayısının min. 600 olmasının sağlanması kaydedilmiştir.

KAYNAKÇA

Albayrak, Ö. (2001). *Küresel grafitli dökme demirlerde porozite oluşumunun araştırılması*, Yüksek lisans tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Arda, İ. (2010). *Küresel grafitli dökme demirlerin katılaşma modellemesi ve gerçek dökümler ile karşılaştırılması*, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Ateş, B. (2019). *Katı çözeltili sertleşmesinin küresel grafitli dökme demirin dönел eğmeli yorulma davranışına etkisi*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aydoğuş, A. (2019). *Küresel grafitli dökme demirlerde aşıl原因ıcıların mekanik özellikler, mikroyapı ve kükürt üzerine etkisi*, Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Aytaçoğlu, L. C. (2012). *Dökme demirlerde termal analiz ve matematiksel yaklaşım*, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bazdar, M., Abbasi, H. R., Yaghtin, A. H., & Rassizadehghani, J. (2009). *Effect of sulfur on graphite aspect ratio and tensile properties in compact graphite irons*, Yüksek lisans tezi, Tahran Üniversitesi, Metalurji Enstitüsü.

Berns, H., & Theisen, W. (2008). *Ferrous materials, Steel and cast iron*, Springer Science & Business Media.

Brown, J. R. (2000). *Foseco ferrous foundryman's handbook*, Butterworth-Heinemann.

Cantekinler, A. (2008). *Ferritik küresel grafitli dökme demirlerde kaynak gücünün mekanik özelliklere etkilerinin araştırılması*, Yüksek lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çelik, O. N. (1996). *Küresel grafitli dökme demirlerde Cu, Ni ve Mo alaşım elementlerinin östemperleme sonucu beynit oluşumuna etkisinin incelenmesi ve sinirsel ağ modeli ile değerlendirilmesi*, Doktora tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çelikkilek, M. (2015). *EN-JS1020 Küresel grafitli dökme demirin delme işleminde yüzey pürüzlülüğünün istatistiksel değerlendirilmesi*, Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çetin, A. (2016). *Katı Çözeltiliyle Güçlendirilmiş Ferritik Sfero Dökme Demirler, Dökümcünün El Kitabı*.

Coşar, M. (2022). *Küresel grafitli dökme demir dökümünde dolun hızı, döküm sıcaklığı ve metalurji kalitesinin farklı kesit kalınlıkları üzerinde akıcılık özelliklerine etkisinin incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Gümüşhane Üniversitesi.

Demirlek, M. (2013). *Küresel grafitli dökme demirlerin yüksek çevrimli yorulma davranışına silisyum oranının etkisi*, Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Demisaş Yönetim Sistemi. (2018). *Üretim akış şeması*.

Ecob, C. M., & Hartung, C. (2004). An alternative route for the production of compacted graphite irons, *Indian Foundry Journal, Institute of Indian*.

Ekinci, E. (2009). *Düktül demirlerde aşıl原因ının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi*, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

El-Mabrouk, O. (2007). *An investigation of compacted graphite iron production by means of thermal analysis technique and other process control windows*, Yüksek lisans tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi, Doğa ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü.

Güzel, E., & Dalı, M. (n.d.). *Rüzgar tirübünü dökümlerinde değişkenlerin optimizasyonu*, Yüksek lisans tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Hartung, C. (2020). Research on Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron (SSFDI) Structure and Properties Using Different Treatment and Inoculation Materials, Article, *International Journal of Metal Casting*.

İlçin, F. (2022). *Molibden ve nikel içeren küresel grafitli dökme demirlerde östemperleme ısı işlemi ile mekanik özelliklerdeki değişimin araştırılması*, Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Jafar, K.-A., & Behnam, A.-A. (2011). Influence of mold preheating and silicon content on microstructure and casting properties of ductile iron in permanent mold, Article, *Journal of iron and steel research*.

Karaca, İ. (2022). *Küresel grafitli dökme demirlerin üretiminde metalurjik silisyum karbür ve ferro silis katkılarının malzeme üzerindeki etkilerinin araştırılması*, Yüksek lisans tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Karadeniz, E. (2017). GGG-60 Küresel grafitli dökme demir üretiminde aşılacağı türü ve miktarının iç yapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi, Araştırma, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, *Mühendislik Bilimleri Dergisi*.

Kumruoğlu, L. C. (2003). *Lamel grafitli ve küresel grafitli dökme demirlerde karbon eşdeğerinin mekanik özellikler ve mikroyapıya etkisinin incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Mavi, A. (2008). *Vermiküler grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğinin deneysel olarak araştırılması*, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Mavi, A., & Korkut, İ. (2010). Vermiküler grafitli dökme demirlerin işlenmesinde kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin regresyon analizi ile modellenmesi, Makale, *Journal of Politeknik*.

Metalurji Mühendisleri Odası. (2016). *Teknik bilgiler içeriği*.

Öker, H. (n.d.). 400-18 Malzemenin özellikleri, *Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Metalurji Mühendisleri Odası Dergisi*.

Omale, S. O. (2020). Structural Characterization and Mechanical Properties of Pearlite-Enhanced Micro-Alloyed Ductile Irons, Article, *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*.

Ovacık, K. (2023). *Yeni nesil sfero dökme demir kullanarak üretilen araç poryasının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması*, Yüksek lisans tezi, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özdemir, Ö. (2007). *Otomotiv sektöründe kullanılan küresel grafitli dökme demir üretimine etki eden parametrelerin teorik incelenmesi ultrasonik ses hızı yöntemiyle tahribatsız kontrolü ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması*, Yüksek lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Öztürk, E. (2019). *Östemperleme sıcaklığının küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi*, Yüksek lisans tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

P. Čanžar, Z. Tonković, & J. Kodvanj. (2012). Microstructure influence on fatigue behaviour of nodular cast iron, Article, *University of Zagreb, Institute of Applied Mechanics*.

Pascual, M. (2008). Analysis of the weldability of ductile iron, Article, *Science Direct*.

Schuman, H. M. (1974). *Kristallgeometrie*.

Sevgi, E. (2019a). *Küresel grafitli dökme demirlerin ısıtım şartlarının mekanik ve mikroyapı özelliklerine etkisinin incelenmesi*, Doktora-Yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sevgi, E. (2019b). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Isıtım Şartlarının Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Doktora-yüksek lisans tezi, Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Stefanescu, D. M. (1990). Classification and basic metallurgy of cast iron, Publication, *Metals Handbook*.

Toptaş, M. (2009). *Farklı ısıtım işlemlerinin küresel grafitli dökme demirin yorulma davranışına etkisi*, Yüksek lisans tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Varınlıoğlu, S. (2004). *Küresel grafitli dökme demirlerin üretimi*, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

www.yidecasting.com. (n.d.). *Made&Machine China Foundry*.

Yalçın, A. (2019). *Küresel grafitli dökme demirlerde termal analiz yöntemi ile karbon eşdeğerinin tayini, mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Atılım Üniversitesi, Fen ve Uygulamalı Bilimler Enstitüsü.

Yıldız, M. (2014). *Dökme demirlerde nicel faz analiz tekniklerinin incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yılmaz, A. Y. (2019). *Küresel grafitli dökme demirlerde termal analiz yöntemi ile karbon eşdeğerliğinin tayini, mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*, Yüksek lisans tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.