

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİ NESİL SFERO DÖKME DEMİR KULLANILARAK
ÜRETİLEN ARAÇ PORYASININ MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan
Kasım OVACIK**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bülent KURT**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

Aralık 2023

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YENİ NESİL SFERO DÖKME DEMİR KULLANILARAK
ÜRETİLEN ARAÇ PORYASININ MİKROYAPI VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Tezi Hazırlayan
Kasım OVACIK**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Bülent KURT**

**Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

Aralık 2023

Prof. Dr. Bülent KURT danışmanlığında Kasım OVACIK tarafından hazırlanan "**Yeni Nesil Sfero Dökme Demir Kullanılarak Üretilen Araç Poryasının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması**" başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji-Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

.../.../20..

JÜRİ

Başkan : Prof. Dr. Bülent KURT

Üye : Prof. Dr. Murat ESKİL

Üye : Dr. Öğretim Üyesi Serkan DAL

ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun.....tarih ve..... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.../.../20..

Prof. Dr. Cemal ÇARBOĞA
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam ve yüksek lisans eğitimim süresi içerisinde, bana her anlamda desteğini esirgemeyen, tecrübe ve bilgi birikimlerini benimle paylaőan kıymetli danışman hocam Profesör Doktor Bülent KURT hocama teőekkürlerimi sunarım. Araőtırma, ęrenme ve deneme çalıőmalarım süresince benimle iő birliği içerisinde olan MESA MAKİNA ve ekibine teşekkür ederim. Ayrıca tez araőtırma ve çalışma sürecimde bana destek ve yardımcı olan eőim Rabia OVACIK' a teşekkür ederim. Bugünlere gelmem için maddi ve manevi olarak katkıları olan, eğitim hayatım süresince desteklerini benden esirgemeyen aileme teşekkür ederim.



**YENİ NESİL SFERO DÖKME DEMİR KULLANILARAK ÜRETİLEN ARAÇ
PORYASININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
ARAŞTIRILMASI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Kasım OVACIK

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ**

Aralık 2023

ÖZET

Bu çalışmada, otomotiv sektöründe kullanılan ve porya olarak adlandırılan parçanın küresel rekabet ve ürün kalitesini artırmak için, malzeme olarak eski nesil küresel grafitli dökme demir yerine yeni nesil küresel grafitli dökme demirden imal edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Standartlara uygun yeni nesil sfero dökme demir malzemedan porya üretimini gerçekleştirebilmek için oluşturulan üç farklı kimyasal kompozisyonla ayrı ayrı döküm denemesi yapıldı. Üç farklı kimyasal kompozisyonlardan üretilen malzemeler üretimin uygunluğunu test etmek için sertliklerine, spektrometre analizlerine, çekme test sonuçlarına ve mikro yapılarına bakıldı. Test sonuçları karşılaştırılarak yeni nesil sfero dökme demir standartlarını en iyi şekilde karşılayan kimyasal kompozisyon ile porya dökümü yapıldı. Poryaların dökümü tamamlandıktan sonra her birinin imalat süreçleri, imalat sarfiyatları takip edilerek karşılaştırılma yapılabilmesi için incelendi. İmalatı biten ve montaja hazır haldeki poryalardan alınan numuneler üzerinden sertlik, çekme testi, kimyasal analiz ve mikroyapı analizi yapıldı. Yapılan çalışmalar neticesinde, yeni nesil sfero dökme demir malzemenin içyapısının homojenliği sayesinde taşlama ve talaşlı imalat gibi proseslerde çok daha iyi sonuçlar verdiği görüldü. Mekanik testler sonucunda ise yeni nesil sfero dökme demir, eski nesil sfero dökme demire göre çok daha üstün uzama ve akma dayanımı sergilediği ve bu sayede porya gibi kalın kesitli parçalarda parça kesitinin küçültülebileceği sonucuna varıldı.

Anahtar Kelimeler: Yeni nesil sfero dökme demir, Ferritik mikroyapı, Araç poryası

Tez Danışman: Prof. Dr. Bülent KURT

Sayfa Adeti: 56

**INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL
PROPERTIES OF VEHICLE HUB PRODUCED USING A NEW GENERATION
DUCTILE IRON (M. Sc. Thesis)**

Kasım OVACIK

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY GRADUATE SCHOOL OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCE**

December 2023

ABSTRACT

In this study, in order to improve the global competition and product quality of the part used in the automotive sector and called vehicle hub, it was manufactured and compared with the new generation of global graphite cast iron instead of the old generation global graphite cast iron as a material. Casting tests were carried out separately with three different chemical compositions created to realize the production of pores from a new generation ductile iron material in accordance with the standards. Materials produced from three different chemical compositions were examined for their hardness, spectrometer analysis, tensile test results and microstructure to test the suitability of production. By comparing the test results, vehicle hub casting was made with the chemical composition that best meets the new generation ductile iron standards. After the casting of the vehicle hub was completed, the manufacturing processes of each of them were examined in order to be compared by tracking the manufacturing costs. Hardness, tensile test, chemical analysis and microstructure analysis were performed on the samples taken from the finished and ready-to-assemble vehicle hub. As a result of the studies, it was seen that the new generation ductile iron material gives much better results in processes such as grinding and machining due to the homogeneity of its internal structure. As a result of mechanical tests, it was concluded that the new generation ductile cast iron exhibits much superior elongation and yield strength compared to the old generation ductile cast iron, and thus the part cross-section can be reduced in thick-section parts such as vehicle hub.

Keywords: New generation ductile cast iron, Ferritic microstructure, Vehicle hub

Thesis Supervisor: Prof. Dr. Bülent KURT

Page Number: 56

İÇİNDEKİLER

KABÜL VE ONAY SAYFASI	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
İÇİNDEKİLER	viii
TABLOLAR LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xii
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
2. BÖLÜM	
GENEL BİLGİLER	3
2.1. Dökme Demirlerin Tarihçesi.....	4
2.2. Dünya Döküm Üretiminin Ükelere Göre Dağılımı.....	4
2.3. Dökme Demirler.....	5
2.4. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.....	6
2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirler	7
2.5.1. Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısal özellikleri.....	8
2.5.2 Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri.....	10
2.5.3 Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini etkileyen diğer mikroyapısal etkenler	12
2.5.4 Küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal özellikleri	15
2.5.5. Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması.....	17

2.6.	Birinci Nesil Küresel Grafitli Dökme Demirler	19	
2.7.	İkinci (Yeni) Nesil Küresel Grafitli Dökme Demirler	19	
2.7.1.	Katı çözelti sertleşmesi.....	22	
2.7.2.	İkinci (Yeni) nesil küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması	25	
2.8.	Araç Poryası Hakkında Kısa Bilgi	25	
3. BÖLÜM			
MATERYAL ve YÖNTEMLER			27
3.1.	EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-700-2 Sfero Dökme Demir Malzemelerin Ocak Hazırlığı.....	27	
3.2.	EN-GJS-600-10 Yeni Nesil Sfero Dökme Demir Malzemenin Ocak Hazırlığı	31	
3.3.	Küreselleştirme ve Aşılama Prosesi.....	32	
3.4.	Döküm Kumu ve Maça Hazırlama Prosesi	33	
3.5.	Kum Kalıpların Hazırlanması ve Kalıp Bozma Prosesi.....	36	
3.6.	Kumlama, Kesim, Taşlama ve Boyama Prosesi	36	
3.7.	Talaşlı İmalat Prosesi	37	
3.8.	Çekme Testleri, Mikroyapı Analizleri ve Sertlik Ölçümleri.....	38	
4. BÖLÜM			
BULGULAR			40
4.1.	Çekme Testi Sonuçları ve Karşılaştırılması	40	
4.2.	Mikroyapı Fotoğrafları ve Karşılaştırılması.....	43	
4.3.	Üretim Sarfiyat ve Maliyetlerinin Karşılaştırılması.....	44	
5. BÖLÜM			
TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER.....			48
KAYNAKLAR			50
ÖZGEÇMİŞ			52

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 2.1.	Dökme demirlerin farklı türde sınıflandırılmalarını gösteren tablo	7
Tablo 2.2.	Küresel grafitli dökme demirlerin gerek dayanımı sağlayabilmesi için tavsiye edilen kimyasal analiz değer aralığı	17
Tablo 2.3.	EN 1563 Standardı küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması	18
Tablo 2.4.	EN 1563 Standardı yeni nesil küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması	25
Tablo 3.1.	GGG60 ve GGG70 serilerinin üretimi için, ocak şarjında kullanılan malzemelerin kimyasal analizi	28
Tablo 3.2.	Ocak ilaveleri için kullanılan ferroalyajların verimlilik oranları	31
Tablo 3.3.	GGG60 ve GGG70 malzemenin kimyasal kompozisyonları	31
Tablo 3.4.	EN-GJS-600-10 Serisi üretiminde kullanılan ocak şarjı girdi kimyasal analizi	31
Tablo 3.5.	EN-GJS-600-10 Malzeme kimyasal kompozisyon aralığı	32
Tablo 3.6.	Yaş kalıplama kumundan istenen değerler aralığı	35
Tablo 4.1.	Porya üretiminde kullanılan dökme demir malzemelerin kimyasal analizleri	40
Tablo 4.2.	Porya üretiminde kullanılan dökme demir malzemelerin mekanik mukavemetleri	41
Tablo 4.3.	Üretilen dökme demir serilerinin tokluğunun karşılaştırılması	42
Tablo 4.4.	Taşlama diski, parça sarfiyat tablosu	46
Tablo 4.5.	İşleme ucu sarfiyat tablosu	47
Tablo 4.6.	Ocak ferroalyaj ilaveleri birim maliyet karşılaştırması	48

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Dünya döküm üretiminin ülkelere göre dağılımını gösteren pasta dilimi grafiği 2018-AFS	4
Şekil 2.2.	Fe-C denge diyagramı, kesik çizgiler kararlı katılaşma kesiksiz çizgiler yarı kararlı katılaşma sistemi	6
Şekil 2.3.	<i>a</i> - Ferritik matris, <i>b</i> - Perlit / Ferrit karışık matris, <i>c</i> - Bainitik matriste küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapı fotoğrafları	8
Şekil 2.4.	Çekme testi sonucu oluşturulan çekme, akma ve uzama değerleri grafiği	11
Şekil 2.5.	Grafit küre biçimlerinin mikroskop altında incelenmesinin fotoğrafı	12
Şekil 2.6.	Perlitik bir yapıda küresellik ve karbür miktarının çekme dayanımına etkisi	13
Şekil 2.7.	A Küre sayısı yüksek – B küre sayısı düşük küresel grafitli dökme demir mikro yapısı	13
Şekil 2.8.	Perlitik bir yapıda akma dayanımına karbür ve küreselliğin etkisi	15
Şekil 2.9.	Yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir eldesi için gerekli karbon ve silisyum değerleri	16
Şekil 2.10.	Küresel grafitli dökme demirlerin dayanımlarının kıyaslanması	20
Şekil 2.11.	Yeni nesil dökme demirlerde Si yüzdesinin çekme, akma ve uzama değerlerine etkisi	21
Şekil 2.12.	Kırmızı renk ile belirtilen yarım sıra mavi sıralarla yer değiştirerek yukarı ve aşağı bölgelerin birbirlerine etkiyerek kaymalarını gerçekleştiriyor. Bu yarım sıranın aşağı bölümüne (ters 'T' ile gösterilen) dislokasyon çizgisi ismi veriliyor	22
Şekil 2.13.	Ferrit içinde çözünerek katı çözelti sertleşmesi oluşturan elementlerin akma dayanımına etkileri	23
Şekil 2.14.	Arayer ve yer alan katı çözeltilerinin temsili bulunma noktaları	24
Şekil 2.15.	Araç poryası ve montajı için gerekli diğer parçalar	26

Şekil 3.1.	Heraeus marka termal analiz cihazında telleryumlu termal analiz kabı ile ölçüm	28
Şekil 3.2.	<i>a</i> - Bakır çil numunesi kalıbı ve grafit numune alma kepçesi, <i>b</i> - Çil numunesi, <i>c</i> – Çil numunesinin yakın görseli, <i>d</i> - Çil numunesi mikroyapı görseli	29
Şekil 3.3.	Oxford Foundry Master Pro optik emisyon spektrometresi	30
Şekil 3.4.	FeSiMg alaşımı ile küreselleştirme işlemi uygulaması	33
Şekil 3.5.	50x50 mm ebatlarında yaş kum testleri için hazırlanmış numune	34
Şekil 3.6.	Simpson marka yaş kalıplama kumu test cihazları	34
Şekil 3.7.	Silis kumundan yapıma porya maçası	35
Şekil 3.8.	Porya modeli, üst derece, alt derece fotoğrafları	36
Şekil 3.9.	Kum kalıptan çıkmış porya, kumlama sonrası taşlanmış porya, boyama sonrası porya	37
Şekil 3.10.	Talaşlı imalat sonrası montaja hazır araç poryası	37
Şekil 3.11.	Çekme çubukları, ekstansometreli çekme testi, çekme testi cihazı	38
Şekil 3.12.	Poryadan mikroyapı, çekme testi, sertlik testi için numune alınan bölge, zımparalama ve parlatma cihazı, MA100 NİKON mikroskop	39
Şekil 3.13.	BMS-3000-OB brinell sertlik ölçüm cihazı	39
Şekil 4.1.	Üretilen GGG70 Malzeme çekme testi grafiği	42
Şekil 4.2.	Üretilen GGG60 Malzeme çekme testi grafiği	42
Şekil 4.3.	Üretilen yeni nesil dökme demir malzeme çekme testi grafiği	42
Şekil 4.4.	GGG60 poryadan alınan mikroyapı fotoğrafları	43
Şekil 4.5.	GGG70 poryadan alınan mikroyapı fotoğrafları	43
Şekil 4.6.	Yeni nesil dökme demir poryadan alınan mikroyapı fotoğrafları	43
Şekil 4.7.	Karbosan marka, dökme demir ile uyumlu taşlama diskleri	45
Şekil 4.8.	SECO marka, dökme demir ile uyumlu işleme uçları	46

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

MÖ	Milattan önce
MS	Milattan sonra
°C	Santigrat derece
KGDD	Küresel grafitli dökme demir
HMK	Hacim merkezli kübik
CE	Karbon eşdeğeri
MPA	Megapaskal
HB	Brinell sertlik birimi
Lt	Düşük sıcaklık
Rt	Oda sıcaklığı
EN-GJS	Sfero dökme demir standart gösterimi
SSF	Katı çözeltili sertleştirilmeli sfero dökme demir
ABS	Kilitlenme karşıtı frenleme sistemi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gelişen dünyamızda gün geçtikçe artan insan nüfusu ve bunun karşılığı olarak sürekli artan bir üretim ihtiyacı doğmaktadır. Bu artan üretim ihtiyacının karşılanabilmesi, gelişmiş teknoloji ile mümkün olmaktadır. Bu gelişen teknoloji hangi dalda olursa olsun yapıtaşı olarak malzeme kullanmak zorundadır. Malzeme üretimi ve geliştirilmesi insanlığın var oluşundan günümüze kadar gelmiştir. Malzemelerin geliştirilmesi ile sarfiyatın azaltılması, maliyetin düşürülmesi, kolay üretim ve bulunması gibi birçok yönden kolaylık sağlanmaktadır. Daha üstün özellikli malzemeler ile daha gelişmiş teknoloji ürünler, aletler, makineler, yapılar vb. üretilebilmektedir.

Günümüzde metalürji ve malzeme sektöründe, dökme demir olarak adlandırdığımız malzemenin kullanımı oldukça artmıştır. Dökme demirlerin kullanımının artmasında en önemli etkenler çeliğe çok yakın özellikler göstermesi, fakat daha kolay üretim ve daha düşük maliyetinin olmasıdır.

Dökme demirler iyi akışkanlık, kolay döküm, düşük çekme payı ve kalıp şeklini alma kabiliyetinin iyi olması, ergitme yöntemlerinin ucuzluğu ve kolaylığı, zorlu fiziksel şekillere sahip parçaların kolayca imal edilmesi, titreşimi sönümleme özelliğinin iyi seviyede olması, iyi işlenebilirliği, korozyon ve aşınmaya karşı mukavemetli olması gibi üst seviye özellikleri nedeniyle otomotiv sanayinde ve birçok yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir malzemedir. Dökme demirlerin kendi içinde farklı türleri bulunmaktadır.

Otomotiv sektöründe kullanılan parçaların büyük bir çoğunluğu titreşime maruz kalmaktadır. Dökme demirlerin titreşim sönümleme özelliği sayesinde otomotiv sektöründe tercih edilen bir malzeme haline gelmiştir. Dökme demirden üretilmiş parçaların titreşimi sönümleyerek metal yorgunluğuna karşı daha dirençli olduğu için kullanım ömrü daha uzun olmaktadır. Isıl iletimin gerekli olduğu yerlerde ise örneğin fren diski gibi gri dökme demir türü kullanılırken, daha yüksek mukavemet ve ısıl iletimin

önemsiz olduğu yerlerde ise örneğin porya gibi parçaların üretiminde ise küresel grafitli dökme demir türü kullanılmaktadır.

Küresel grafitli dökme demirler de kendi içinde birkaç farklı türde sınıflandırılmaktadır. Günümüzde ise araştırmalar sonucu yeni bir küresel grafitli dökme demir türü olan yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demir türü keşfedilmiştir. Küresel grafitli dökme demirlerde alaşımda perlit miktarını arttırıcı elementler ile mukavemet değeri arttırılmaktadır. Fakat bu yeni tür olan yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demir de ise perlit yapıcı elementleri kullanmadan sadece silisyum elementini alaşıma belirli miktar ilave ederek yüksek mukavemet değerlerinin sağlanabildiği ortaya çıkmıştır. Silisyumun bu mukavemet arttırıcı mekanizması katı çözelti sertleşmesi ile mümkün olmaktadır.

Gelişen otomotiv sektöründe rekabetin sağlanabilmesi için parça mukavemet değerleri aynı olmasına rağmen maliyetinde ve hacimde küçülmeye gidebilmek çok büyük avantaj sağlamaktadır. Bir diğer dolaylı yoldan avantajı ise porya gibi ağırlığı yüksek parçaların kilosunda azaltma yakıt tüketiminde de bir miktar iyileşmeye sebep olmaktadır. Diğer bir avantajı ise parçanın döküm ile üretimi yapılırken ocak tonajı aynı olmasına rağmen parça ağırlığı düşürüleceği için birim zamanda daha çok parça dökülebilecektir. Bu durum bize zamandan ve malzemedan çok büyük tasarruf sağlayacaktır.

Bu tez araştırmasında ikinci nesil küresel grafitli dökme demir serilerinden biri olan ve imalatı günümüzde yaygınlaşmamış olan EN-GJS-600-10 malzemenin kimyasal kompozisyonunu, standartta verilen mekanik test değerlerini karşılayacak şekilde üretmek ve daha sonra otomotiv sektöründe kullanılan porya parçasının, GGG60 ve GGG70 serilerinden üretilen poryalar ile EN-GJS-600-10 malzemedan üretilen poryanın mekanik özellikleri, üretim yöntemleri, maliyet farkları ve mikroyapılarının karşılaştırılması amaçlanmıştır.

BÖLÜM 2

GENEL BİLGİLER

2.1. Dökme Demirlerin Tarihçesi

Toplumların metaller ile tanışıp malzeme yapımında kullanmalarını MÖ 6000'lerden önceki dönemlere kadar gittiğine ait bulgulara dayanan varsayımlar yapılmaktadır. Bu dönemlerde, şekil verebilmenin kolay olmasından dolayı özellikle doğada nabit olarak bulunabilen gümüş ve altın gibi metallerin tercih edildiği; bu metallerden yalnızca kupa, tas, bardak gibi kolay eşyaların yapıldığı varsayımında bulunmaktadır. Metallerin keşif edilmesi ve kullanımları Babil, Mısır, Çin ve Hint kültürlerinde ilk kentlerinin oluşmasını böylelikle toplumların ilk defa tarım dışı işlerle ilgilenmeye başlamalarını sağlamıştır [1].

Metallerin ve demir çağı kültürlerinin oluşmaya başlamasıyla 'Küçük Asya' olarak da isimlendirilen Anadolu'da Hititler, göz ardı edilemeyecek derecede fazla demirden silah kullanan ilk kültürdür. Demir döküm yönteminin ise ilk defa MÖ 300 senelerinde Çin'de ortaya çıktığı varsayımında bulunmaktadır. Çin'de MÖ 200 ile MS 200 seneleri aralığında Khan Hanedanlığı çağında üretilmiş olan, 1.400°C üstündeki sıcaklıklara kadar ulaşabilen büyük demir maden ocağında, ergimiş demirin kalıplara dökülerek şekillendirilmesinde başarılı olduğu varsayımında bulunmaktadır [1].

İlk dökme demir türü olan gri dökme demirin imal edilmesiyle döküm sektöründe ciddi bir ilerleme kayıtlanmıştır [2].

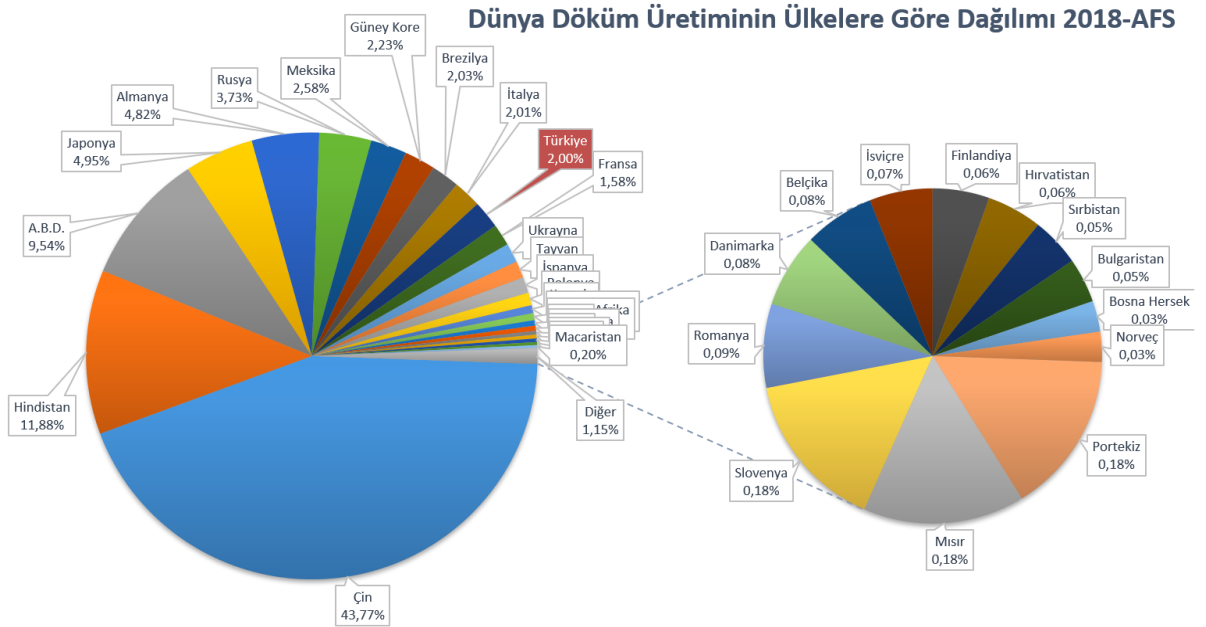
20. Yüzyılın ilk yarısını, özellikle iki büyük dünya savaşına sahne olması sebebiyle, lamel grafitli olarak da adlandırılan gri dökme demir ve temper dökme demir imal edilmesinde önemli gelişmelerin elde edildiği bir çağ olarak gösterilebilir. Savaş durumunda ülkelerin silahlanma kapasitesi ve doğal olarak askeri gücü, metalürji alanında yaptığı yatırım ve ilerlemelere bağlı olarak gelişiyor [3].

Küresel grafitli dökme demirin keşfi Keith Dwight Millis, tarafından 1940'lı senelerde krom eldesinde yaşanan sorun sebebiyle, aşınma direnci fazla dökme demir imal edebilmek için kromun yerine kullanılabileceği alternatif bir elementin arayışı ile ortaya çıkmıştır. Millis'in çalışmalarında amaç, magnezyum kullanarak beyaz dökme demir üretmektir. Magnezyum kükürt ve oksijeni kullandığı için karbür fazını, yani beyaz dökme demiri meydana çıkarabilen bir element fakat uygun miktarda kullanıldığı zamanda, grafit parçalarını küreselleştirebilen bir elementtir [3].

Günümüzde üretilen küresel grafitli dökme demir kimyasal analizi Millis'in ürettiği küresel grafitli dökme demirden farklı olsa da mekanik özellikleri çeliğe kıyaslandığında benzer özellik gösteren dökme demir türüdür.

2.2. Dünya Döküm Üretimine Ülkelere Göre Dağılımı

Amerikan Dökümcüler Derneği (AFS), 2018 yılı dünya döküm imalatı raporuna göre dünyada toplam döküm imalatı 113 milyon tona yakındır. Dünya döküm imalatında öncü ülkeler içinde Çin ilk sırada bulunurken, Amerika Birleşik Devletleri ikinci sırada bulunmaktadır. Türkiye 2,25 milyon tonluk döküm üretimiyle Avrupa'da ilk üçte dünyada ise ilk 11' de yerini almaktadır [4].



Şekil 2.1. Dünya döküm üretimine ülkelere göre dağılımını gösteren pasta dilimi grafiği 2018-AFS [4]

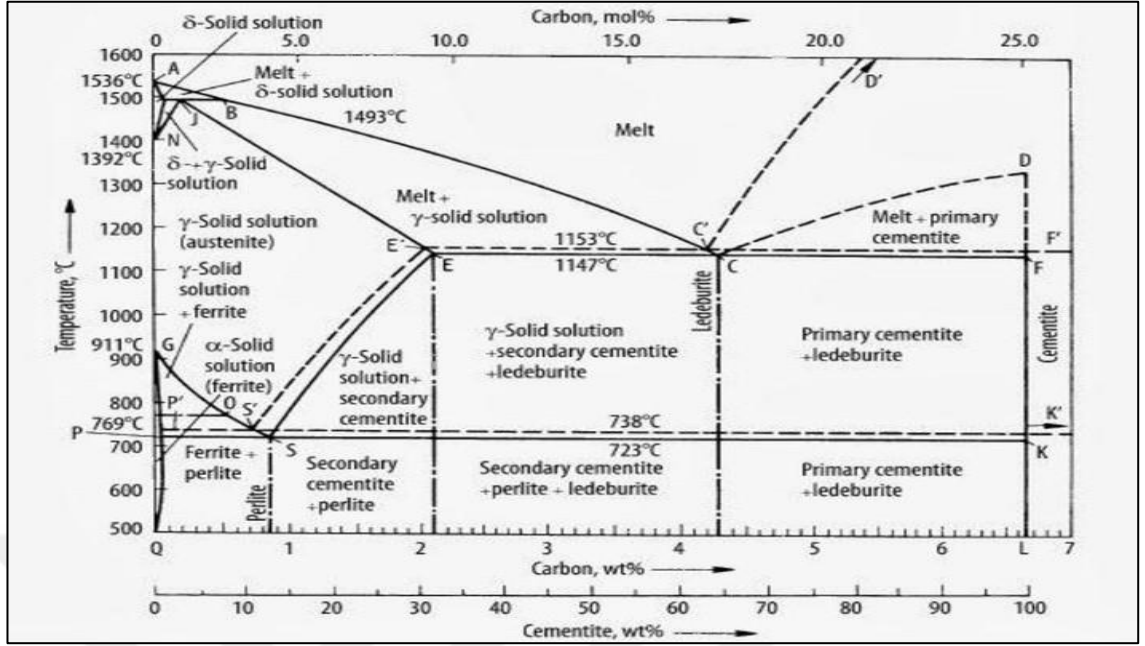
2.3. Dökme Demirler

Dökme demir, çoğunlukla yüksek fırında demir cevherinin indirgenmesi ve ergitilmesi ile imal edilen, içerisinde demir ve karbonun yanında diğer alaşım elementlerinin de bulunduğu bir Fe-C alaşımı olan pikin ergitilip, birtakım metalürjik proseslere tabi tutulduktan sonra kalıp içine dökülerek katılaşması ile şekil alarak ortaya çıkan bir malzeme türüdür [5].

Dökme demirler, birbirlerinden değişik demir bazı yoğunluklu geniş bir alaşım grubunu içermektedir. Bu grubu meydana getiren başlıca elementler karbon, silisyum ve demirdir. Çoğunlukla dökme demirler kompozisyonunda yaklaşık %3,5'e kadar silisyum ve %4'e kadar karbon içermektedirler. Bu elementlerin yanında dökme demirlerin kimyasal kompozisyonunda fosfor, kükürt ve manganezde bulunur. Ayrıca dökme demirin çeşidine göre eser miktarlarda molibden, krom, nikel, titanyum, bakır, alüminyum ve magnezyum gibi elementler de kimyasal kompozisyonda bulunabilir. Bazı durumlarda %2'den az karbon içeren kimyasal kompozisyona sahip dökme demirler, silisyum ve diğer alaşım elementlerinin östenitin karbon çözünürlüğünü etkilemesinden dolayı ötektik reaksiyonla katılaşabilir. Bu kimyasal kompozisyona sahip olan malzemeler de dökme demir olarak isimlendirilir [6,7].

Dökme demirler, Şekil 2.2'de verilen Fe-C ikili denge diyagramı baz alınarak, kimyasal kompozisyona, ergitme işlemine ve soğuma hızlarına bağlı bir şekilde termodinamik yönden kararlı Fe-C (grafit) veya yarı kararlı Fe-Fe₃C (sementit) sisteminde katılaşabilir [6].

Yarı kararlı sistemin prosesine göre soğuma gerçekleştirildiğinde ötektikteki serbest karbon fazı demir karbür, kararlı sistemin prosesine göre soğuma gerçekleştirildiğinde ise ötektikteki serbest karbon fazı grafitir. Yarı kararlı veya kararlı ötektiğin oluşması, soğuma hızı, kimyasal kompozisyon ve sıvının çekirdekleşme eğilimi gibi bir sıra şartlara bağlıdır. Kimyasal kompozisyon ve çekirdekleşme eğilimi aynı anda grafitleşme eğilimini de belirler. Yüksek grafitleşme eğilimi; yapıda bolca karbon fazı olarak, grafit ihtiva eden bir yapı oluşmasını sağlarken, düşük grafitleşme eğilimi ise yapıda bolca karbon fazı olarak demir karbür oluşmasına sebep olur. Bu iki ötektik tipi, mekanik özellikleri açısından birbirinden farklılık gösterirler [8].



Şekil 2.2. Fe-C denge diyagramı, kesik çizgiler kararlı katılaşma kesiksiz çizgiler yarı kararlı katılaşma sistemi [9]

Dökme demirin içeriğinde bulunan silisyum, fosfor ve karbon gibi alaşım elementlerinin seviyeleri, katılaşma ve sıvılaşma sıcaklığı, ötektik bileşimi gibi kriterleri değiştirmekte ve bu hal ise dökme demirin mekanik özelliklerini etkileyebilmektedir. Bu sebeple karbon eş değeri (CE) olarak bilinen parametre ile bu etkinin seviyesi kolayca bulunabilmektedir [5,6].

Karbon eşdeğeri hesaplamasının birkaç farklı formülü bulunmaktadır ancak en yaygın kullanılan formül aşağıdakidir.

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

Bu formül ile alaşımın ötektik altı, ötektik üstü veya ötektik bileşimde olup olmadığı test edilir. Karbon eş değerinin %4,25'ten fazla olması dökümün ötektik üstü, %4,25 olması ötektik, %4,25'ten az olması dökümün ötektik altı kompozisyonda bulunduğunu verir [5,6].

2.4. Dökme Demirlerin Sınıflandırılması

Dökme demirler katılaşma şekli, soğuma hızı, kimyasal kompozisyon ve mikroyapıdaki değişikliklere göre gruplandırılırlar. Dökme demirlerin tarihteki ilk gruplandırılması kırılma biçimine göre yapılmıştır. Bu yöntemle göre iki çeşit dökme demir vardır [7]:

1. Beyaz dökme demir: Kırılma, demir karbür (sementit) plakaları boyunca gerçekleştiği için kırılma yüzeyi kristalin ve beyaz olarak görülmektedir. Bu oluşum, yarı kararlı katılaşmanın (Fe_3C ötektiği) göstergesidir.

2. Gri dökme demir: Kırılma, grafit plakaları boyunca gerçekleştiği için kırılma yüzeyi gri renklidir. Bu oluşum, kararlı katılaşmanın (grafit ötektiği) göstergesidir.

Zamanla dökme demirler ve metalografi hakkında daha fazla çalışma yapılınca mikroyapısal özelliklere dayanan başka gruplandırmalar da oluşturulmuştur. Bunlardan en önemlisi grafit şekline ve matris oluşumuna göre yapılan gruplandırmalardır. Grafitler, küresel biçimde, lamel halinde, temperlenmiş halde veya yumru olarak gözlenebilir. Matris ise, östenitik, perlitik, ferritik, beynitik veya martenzit yapıda olabilmektedir. Tablo 2.1’de dökme demirlerin uygulanan nihai işleme, mikroyapısına ve ticari isimlerine göre sınıflandırması verilmiştir [7].

Tablo 2.1. Dökme demirlerin farklı türde sınıflandırılmalarını gösteren tablo

Ticari Adı (Dökme Demir)	Matris	Nihai İşlem	Karbonca Zengin Faz	Kırılma Görüntüsü
Temper	Perlit, Ferrit	Isıl işlem	Temperlenmiş grafit	Gri - Gümüş
Beyaz	Martensit, Perlit	Isıl işlem veya katılaşma	Sementit	Beyaz
Gri	Perlit	Katılaşma	Lamel grafit	Gri
Yumru grafitli	Perlit, Ferrit	Katılaşma	Yumru (vermiküler) grafit	Gri
Östemperlenmiş	Beynit	Isıl işlem	Küresel grafit	Gri - Gümüş
Sünek	Perlit, Östenit, Ferrit	Isıl işlem veya katılaşma	Küresel grafit	Gri - Gümüş
Benekli	Perlit	Katılaşma	Sementit + lamel grafit	Benekli

2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirler

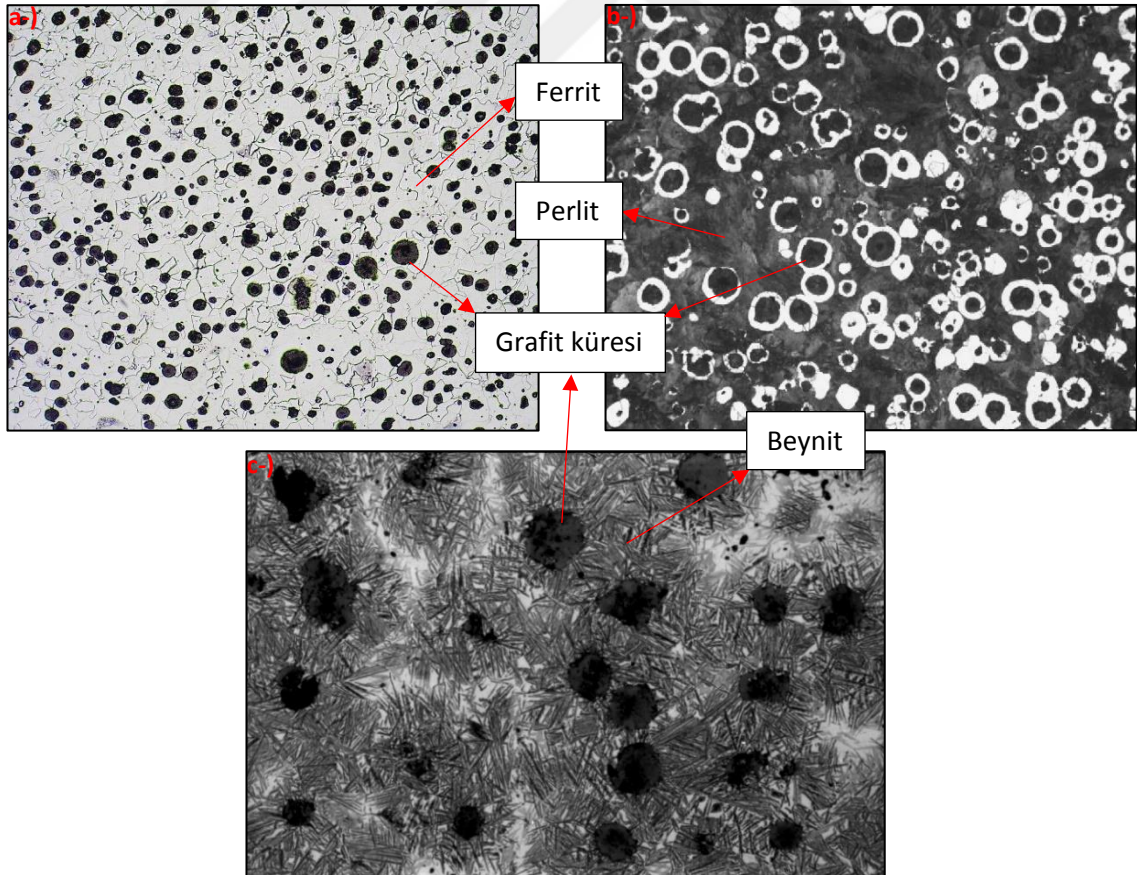
Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), sfero, sünek ya da nodüler dökme demir olarak da isimlendirilmektedir. Küresel grafitli dökme demir ismini, içeriğindeki küreler halinde var olan grafitten almıştır. Dökümden önce dökme demirin kimyasal kompozisyonuna eklenen seryum ya da magnezyum gibi nadir toprak elementleri aracılığıyla, grafitler küresel halde çökelirler. Grafitlerin küre formunu alması ek olarak ısıl işlem gerektirmediği gibi gri dökme demirden başlıca farkı grafitlerin geometrisidir. Ayrıca yapıdaki küresel formda grafitler, matriste bir süreksizliğe neden olmayarak, olası

yüklenme halinde grafitin çevresinde stres yoğunlaşması oluşturmazlar. Bu sebeple küresel grafitli dökme demirlerin mukavemeti, tokluğu ve sünekliği diğer dökme demir türlerine göre daha üst seviyedir. Ayrıca küresel grafitli dökme demirlere ısıl işlem uygulaması ile mekanik özellikleri iyileştirilebilmektedir [8,11].

Küresel grafitli dökme demirler, gri dökme demirlerin üstünlüklerinden olan iyi dökülebilme, iyi işlenebilirlik ve düşük ergime sıcaklığı gibi özelliklere sahip olmakla birlikte, çeliğin avantajlarından olan yüksek tokluk, yüksek süneklik, yüksek mukavemet ve sertleşebilirlik gibi üstün avantajlara da sahiptir [10].

2.5.1. Küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısal özellikleri

Küresel grafitli dökme demirlerin matrisi perlitik, ferritik, ferritik/perlitik veya bainitik olabilmektedir. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri matrisin yapısı ve grafitin biçimi ile doğrudan ilişkilidir. Şekil 2.3’de farklı matrislere sahip küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapıları verilmiştir [10].



Şekil 2.3. *a* - Ferritik matris, *b* - Perlit / Ferrit karışık matris, *c* - Bainitik matriste küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapı fotoğrafları

2.5.1.1. Ferrit

Ferrit dediğimiz faz, düşük miktarda çözünmüş karbon içeren HMK yapıya sahip demirdir. Şekil 2.3' de gösterilen beyaz renkli bölgeler ferrit yapısına sahiptir. Ferrit tek başına incelendiğinde çok üst seviye mekanik özellikler gösteren bir faz değildir. Ferrit denilen bu fazı tek başına incelemeye alarak mekanik değerlerini test ettiğimizde, yaklaşık 280 MPa gibi bir dayanıma ve 80 HB gibi bir sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple bir dökme demirin ferritik bir yapıya sahip olması, malzemenin nispeten düşük bir sertliğe ve dayanıma, ancak yüksek bir tokluğa ve sünekliğe sahip olacağını göstermektedir [3].

2.5.1.2. Karbür

Karbür olarak adlandırılan yapı, karbon ve demir atomlarının oluşturduğu bir bileşiktir. Bileşimin formülü Fe_3C olarak gösterilir. Sementit olarak adlandırılan bu yapı, oldukça kırılgan ve sert bir yapıya sahiptir. Bu sebeple malzemenin içerisinde bulunması bir taraftan malzemeyi kırılganlaştırırken diğer yandan da işleme açısından da zorluk yaratıyor. Karbür yapısının oluşması için soğuma hızının yüksek olması ya da alaşımda karbür yapıcı elementlerin olması (vanadyum ve krom gibi) gerekiyor [3].

2.5.1.3. Perlit

Perlit, sementit ismi ile bilinen karbür fazının ve ferritin bir karışımı olan Şekil 2.3' de gösterilen siyah renkli bölgelerdir. Perlit yapısı içerisinde bu iki faz olabildiğince ince katmanlar halinde dizilerek meydana çıkar. Kısaca perliti tek başına bir faz değilse, iki fazın (ferrit ve sementit) sıralı bir karışımı olarak değerlendirmek daha uygun olur. Perlit içerisindeki ince karbür katmanları, araya dizilen ince ferrit katmanlarını desteklediği için, bu yapı ferrit ile karşılaştırıldığında daha üstün bir sertlik ve mukavemet gösteriyor. Bu sebeple mukavemetin yüksek olması istenilen yerlerde, dökme demir yapısında bulunan perlit oranının yükseltilmesi gerekir. Mukavemette meydana gelen bu artışın doğal sonucu olarak, perlit yapıdaki dökme demirlerde sünekliğin biraz azaldığını görüyoruz [3].

2.5.1.4. Grafit

Grafit, saf karbon atomlarından oluşan bir fazdır. Grafitin özellikleri arasında bulunan en önemli artıları olarak, düşük yoğunluğa sahip olmasının yanında, oldukça yüksek bir ısı

iletkenliğinin olmasını gösterebiliriz. Bir grafit parçası, aynı kütleye sahip saf demirle kıyaslandığında dört kat büyük bir hacim sergilemektedir [3].

2.5.1.5. Beynit

Östenit fazından izotermal dönüşüm ile elde edilen, sertliği perlit ve martenzit fazları arasında bulunan mikro yapıdır. Sementit ve demir fazlarının oluşturduğu çift fazlı bir yapı olarak ortaya çıkar. İzotermal bir ısıl işlem ile östenit oluşumu sonucu meydana gelir. Beynit iki tür morfolojik yapıdadır. Bu yapılar alt beynit ve üst beynittir [12].

2.5.2. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri

Küresel grafitli dökme demirler, çeliğin üstünlüklerinden olan yüksek süneklik, yüksek mukavemet, sertleşebilirlik ve yüksek tokluk gibi üstün özelliklere sahiptir.

2.5.2.1. Çekme dayanımı

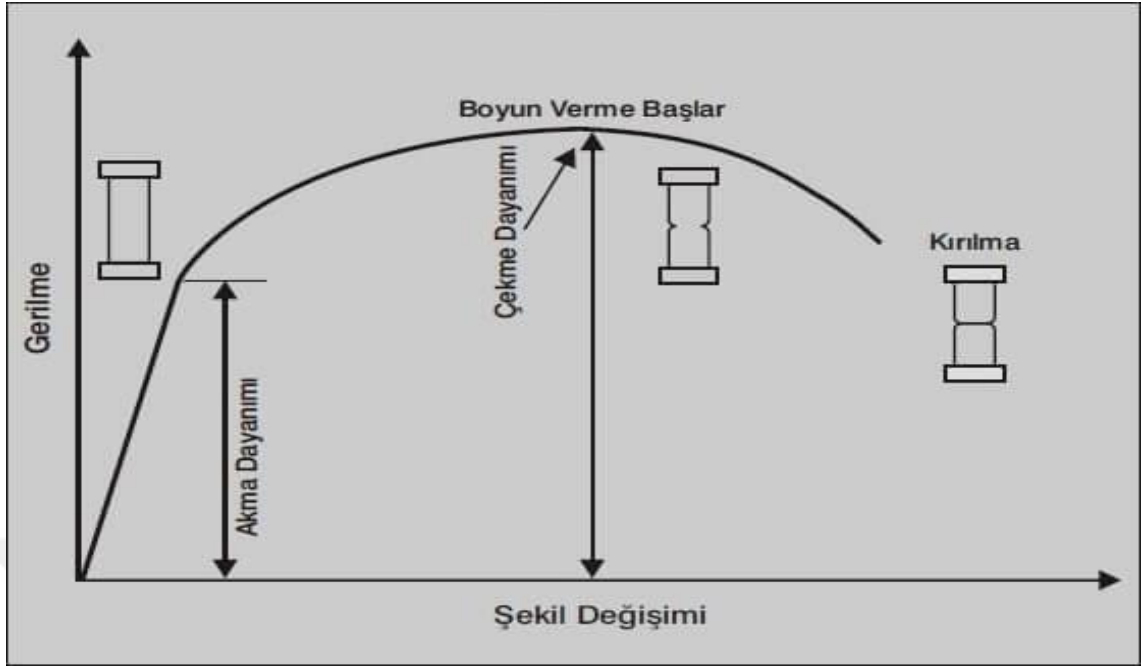
Çekme testi ile tespit edilen, malzemenin kırılana kadar gerilme yüklerine maruz kalması ve kırılmadan önce dayanabileceği maksimum yükü sayısal olarak ifade eden dayanım değeridir. Sünekliği en yüksek, mukavemeti en düşük sfero dökme demir 350 MPa gibi bir çekme mukavemeti sergilerken, uygun üretim parametreleriyle çekme mukavemeti 900 MPa ve üzerine çıkartılabiliyor.

2.5.2.2. Akma dayanımı

Mekanik testler ile tespit edilen, malzemenin şekil değiştirmeden dayanabileceği maksimum yükün sayısal olarak ifade eden dayanım değeridir. Minimum 350 MPa çekme mukavemeti sergileyen bir sfero dökme demirde, akma mukavemetinin 220 MPa gibi bir değere geldiği görülmektedir. Uygun parametrelerle üretimde ise akma dayanımı 600 Mpa ve üzerine kadar çıkabilmektedir.

2.5.2.3. Uzama

Uzama malzemenin birim kesit alanında kopana kadar olan yüzde boyutsal uzamasıdır. Malzemenin sünekliği hakkında fikir edinilmesini sağlar. Malzeme ne kadar uzarsa deformasyon kabiliyeti o kadar iyi demektir. Küresel grafitli dökme demirlerde uzama %2 ile %30 a kadar olan türleri vardır.



Şekil 2.4. Çekme testi sonucu oluşturulan çekme, akma ve uzama değerleri grafiği [26]

2.5.2.4. Sertlik

Malzemenin çizilme, şekil değişimi gibi dış etkenlere karşı gösterdiği direncin birim olarak ifade edilmesidir. Malzeme sertliği ile çekme mukavemeti değeri doğru orantılı olarak artar. Küresel grafitli dökme demirler orta seviye sertlik grubuna girdikleri için sertlik ölçümleri Hardness Brinell sertlik ölçüm metodu ile yapılmaktadır. Isıl işlem ile sertleştirilebilirler.

2.5.2.5. Isı iletimi

Isı iletimi malzemenin aldığı ısıyı diğer ucuna iletme kabiliyetidir. Küresel grafitli dökme demirlerde, lamel grafitli dökme demirlere göre ısı iletimi daha düşüktür. Bunun sebebi lamel grafitli dökme demirlerde tüm yapıya dağılmış grafitlerin ısı iletimini kolaylaştırmasıdır. Küresel grafitli dökme demirler ısı iletim koşullarında geri planda kalmaktadır.

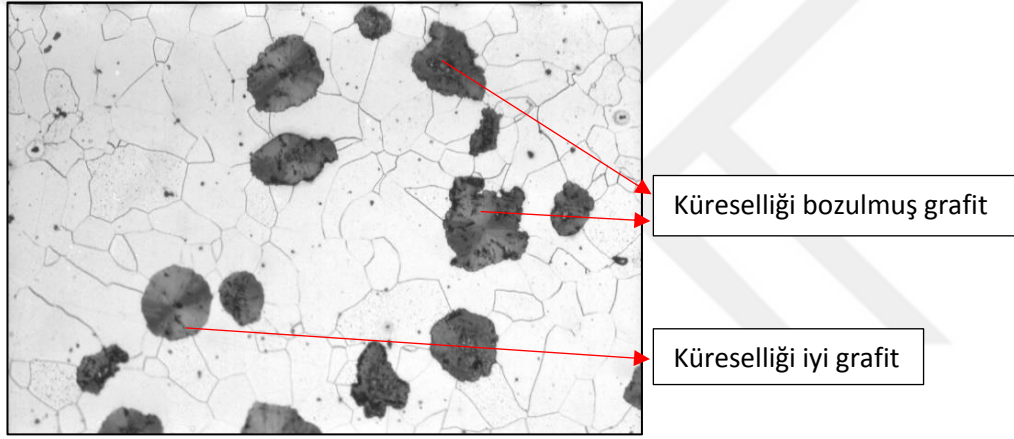
2.5.2.6. Darbe dayanımı

Malzemenin mekanik olarak darbeye karşı dayanımının sayısal olarak ifade edilmesini sağlayan dayanım değeridir. Küresel grafitli dökme demirin yapısı tok olduğundan darbe direnci de iyi olarak alınabilir.

2.5.3. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini etkileyen diğer mikroyapısal etkenler

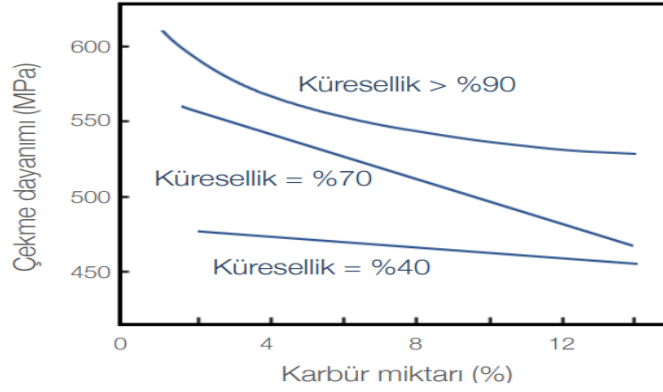
2.5.3.1. Küresellik derecesi

Grafit parçalarının küre biçimini ne seviyede aldıklarını gösterir. Yani grafit parçaları mikroskop ile incelenirken mükemmel kürelerden alınan kesitler şeklinde gözüküyorsa, küreselliğin yüksek olduğunu söyleriz. Eğer grafit parçalarının şeklinde az da olsa bozulma ve çarpılma varsa ve mükemmel birer küre olarak gözüküyorlarsa, düşük seviye küresellik olarak adlandırıyoruz. Şekil 2.5’ da mikroskop altında ferritik matrise sahip bir küresel grafitli dökme demirin kürelerinin incelemesi verilmiştir.



Şekil 2.5. Grafit küre biçimlerinin mikroskop altında incelenmesinin fotoğrafı [25]

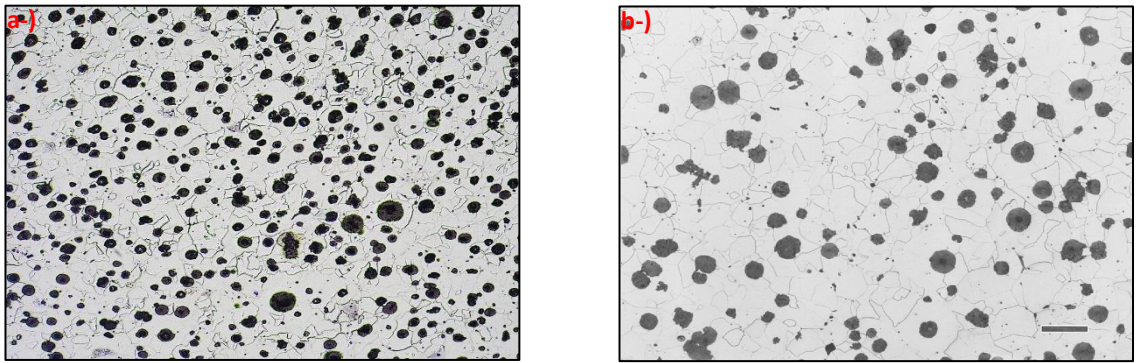
Küresellik seviyesi, sfero dökme demirlerin mekanik özelliklerini yüksek seviyede etkiliyor. Grafit parçalarının şekli kusursuz küre formundan uzaklaştıkça, küre yapısının ortaya çıkardığı yüksek dayanım ve yüksek uzama seviyelerinin de alçalmaya başladığını gözölüyoruz. Şekil 2.6’ da küresellik derecesi ve karbür miktarının çekme dayanımını nasıl etkilediğini grafik şeklinde gösterimi verilmiştir. Grafikte karbür miktarı %2’ de sabitken küresellik yarı yarıya indiğinde neredeyse 150 MPa bir çekme dayanımı malzemenin mukavemet değerinden azaldığı görölmektedir. Malzeme stres altında iken küresellik oranı düşük bir numunede, kürelerin köşeli kısımlarından mikro çatlakların başlangıcı oluşmakta ve devam etmektedir. Bu yüzden kürelerin formunun mükemmel olması malzemenin çok daha mukavemetli ve mikro çatlak ilerlemesine karşı daha dirençli olması anlamına gelir [3].



Şekil 2.6. Perlitik bir yapıda küresellik ve karbür miktarının çekme dayanımına etkisi [3]

2.5.3.2. Küre sayısı

Küre sayısı dökme demirlerin özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden birisidir. Küre sayısı (bazı kaynaklarda nodül sayısı olarak geçtiğini de görebilirsiniz) genellikle 1 mm²'lik bir alana düşen küre adeti üzerinden incelenir. Kürelerin sayısının yükselmesi, mikroyapının homojenleşmesi ve incelmeye anlamına gelir. Bu sebeple küre sayısının yükselmesi halinde, alaşımda eser miktarda da olsa bulunan bazı zararlı elementler de homojen bir şekilde dağılıyor ve bu elementlerin belirli konumlarda birikmeleri ve istenmeyen fazları ya da yapısal sorunları oluşturmaları engellenmiş oluyor. Şekil 2.7' de ferritik yapıda küre sayısı yüksek ve düşük olan iki farklı mikroyapı fotoğrafı paylaşılmıştır.



Şekil 2.7. A Küre sayısı yüksek – B küre sayısı düşük küresel grafitli dökme demir mikro yapısı

Küre adedinin artması, kendi başına incelendiğinde çekme mukavemetini yükselten bir etki ortaya çıkarıyor. Kürelerin adedi yükselince kürelerin ebatları küçülüyor ve incelmeye etkisi yaparak malzemenin mukavemetin artmasına neden oluyor. Fakat diğer yandan küre adedi artınca, perlit oranını düşürdüğünü gözlemliyoruz. Perlitin azalması sebebiyle

malzeme mukavemetini bir miktar yitirirken, sünekliğini arttırıyor. Küre adedinin mekanik özellikler üzerinde yaptığı etkiler sadece bu çelişen iki durumdan ibaret değil: Küre adedi arttıkça yapının homojenleşmesi sayesinde, karbür oluşma eğiliminin azaldığını görüyoruz. Bu da doğal olarak malzemenin hem sünekliğini hem çekme mukavemetini hem de işlenebilirliğini yükseltiyor [3].

2.5.3.3. Kürelerin Boy Dağılımı

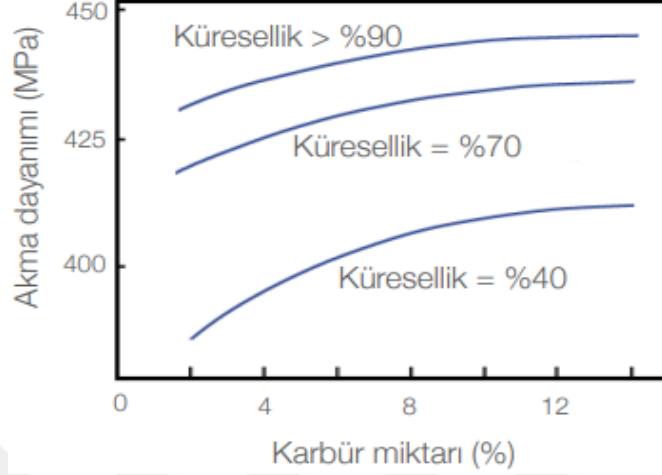
Mikroskop altında grafit kürelerini incelediğimiz zaman, bütün küreler eş bir büyüklükte görünüyorsa, bu tercih edilen bir hal değildir. Mikroyapı incelediğinde büyük ve küçük kürelerin birlikte yapıda bulunduğu bir hali tercih ediyoruz. Bunun sebebi mekanik özelliklere olan etkiden ziyade, çekintinin giderilmesiyle ilgili bir durumdur. Grafitin farklı büyüklüklerde oluşmuş olması, katılaşmanın son evresine kadar grafitin çekirdeklenmeye devam ettiğini göstermektedir. Dökülen parçada meydana gelen mikro çekinti gözeneklerini gidermek için, grafitin katılaşma süresince mümkün olduğu kadar uzun bir süre boyunca çekirdeklenmeye devam etmesini tercih ediyoruz [3].

2.5.3.4. Yapıdaki Karbür Miktarı

Sfero dökme demirin mekanik özellikleri üstünde değişim yapmanın farklı bir yolu da yapıda bulunan karbür miktarı ile oynamaktır. Karbür yapıcı elementler kullanarak malzemenin hem çekme mukavemetini hem de akma mukavemetini değiştirebiliyoruz. Fakat karbürlerin varlığı bu iki mukavemet değerini farklı yönde etkiliyor: Yapıdaki karbür miktarı arttıkça akma mukavemetinin arttığını görüyoruz. Fakat çekme mukavemeti ters yönde bir eğilim göstererek azalmaya başlıyor. Karbür miktarının akma dayanımı üzerindeki kuvvetlendirici etkisini ise Şekil 2.8’ de bulunan grafik üzerinde inceleyebilirsiniz. Dikkat edildiğinde, yapıda karbürlerin bulunması özellikle küreselliğin daha düşük olduğu durumlarda akma mukavemetinin ciddi bir artış göstermesine yol açıyor. Çekme mukavemetinde ise her bakımdan zıt bir etki görüyoruz: Kısaca karbürlerin oluşumu, özellikle küreselliğin yüksek olduğu durumlarda çekme mukavemetini ciddi bir biçimde düşürüyor. Karbürlerin çekme ve akma mukavemetleri üstündeki bu zıt etkisini doğru bir biçimde anlamamız, mekanik özellikler üzerinde düşünürken doğru yorumlamayı yapabilmek bakımından çok önemlidir [3].

Oldukça kırılğan ve sert bir yapıya sahip olan bu karbür parçaları, malzemenin sünekliğini kötü bir biçimde etkileyerek malzemenin gevrekleşmesine yol açıyorlar. Ayrıca sert

yapıları sebebiyle, malzemenin işlenebilirliği üzerinde de eksi yönde bir etkileri olduğunu belirtmek gerekir [3].



Şekil 2.8. Perlitik bir yapıda akma dayanımına karbür ve küreselliğin etkisi [3]

2.5.4. Küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal özellikleri

2.5.4.1. Korozyon direnci

Çoğunlukla metalik özellik gösteren malzemelerin buldukları mekân ile oluşturdukları reaksiyonlar sonucunda yapısında meydana gelen arzu edilmeyen değişiklikler korozyon olarak adlandırılır. Birçok farklı şekilde ortaya çıkan korozyon türü vardır [21].

Korozyon direncini ve oksidasyon dayanımını arttırması için alaşıma krom ilavesi gerekir. Krom ilavesi demirin atmosferik korozyona ve sülfirik asite olan direncini arttırır [22].

Küresel grafitli dökme demirlerin östenitik iç yapıya sahip olan serileri yüksek korozyon ve oksidasyon direncine sahiptirler. Korozyona direnç olarak benzer malzemeler arasında en maliyeti düşük olanıdır [23].

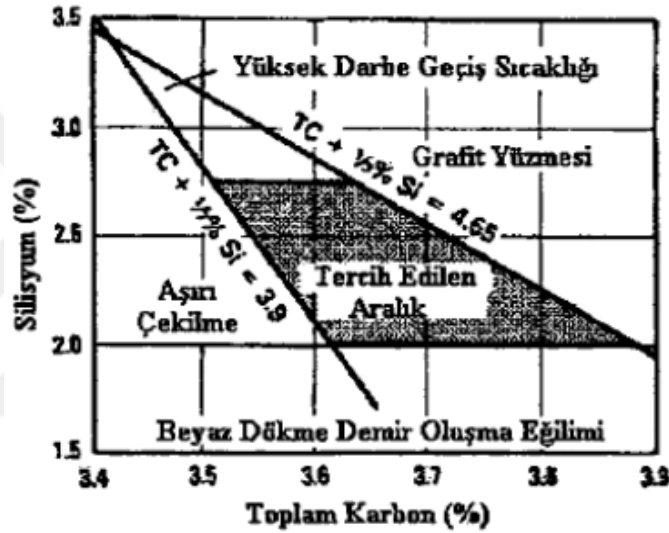
2.5.4.2. Alaşım elementlerinin etkisi

Küresel grafitli dökme demir üretimindeki bazı alaşım elementleri ve etkileri alt kısımda kısaca anlatılmıştır.

Karbon: Bileşimde karbon oranı genellikle %3 ile %4 arasında tutulmaktadır. Karbon oranı yükseldikçe grafit kürelerinin adedi de artar. Ferrit yapıcı bir elementtir. Isı

iletkenliğini arttırır. Ayrıca alaşımdaki karbon seviyesinin artması dökme demirin dökülebilirliğini iyileştirir [13].

Silisyum: Bileşimde silisyum oranı %1,8 ile %2,8 arasında tutulmaktadır. Silisyum karbon eş değerine etki ettiği için grafitleşmeyi artırır. Ötektoid dönüşümden sonra oluşan ferritin sertliğini yükselterek dökme demirin mukavemetini ve sertliğini artırır. Fakat, gevrek-sünek geçiş sıcaklığını yükseltir. Bileşimde silisyum oranı yükseldikçe dökme demirin tokluğu ve sünekliği azalır. Şekil 2.9' da istenen ideal özelliklerin eldesi için optimum karbon ve silisyum değerleri verilmiştir [8,10].



Şekil 2.9. Yüksek kalitede küresel grafitli dökme demir eldesi için gerekli karbon ve silisyum değerleri

Manganez: Perlitik yapı oluşumunu destekleyen bir elementtir. Fakat tane sınırlarında karbür oluşmasını başlatarak segregasyona da sebep olabilir. Sünekliği ve tokluğu azaltır. Ferritik iç yapılarda %0,2'den az olması tercih edilir. Fakat perlitik yapılarda bu oran %1'e kadar yükselebilmektedir [13].

Fosfor: Kırılganlığı, katılaşma aralığını ve sıvı akışkanlığını arttırır. Yapıda en fazla %0,05 olması gerekir [6,13].

Kükürt: Aşının çalışabilmesi için gereklidir. Küreselleştirici olarak kullanılan magnezyum ile birleşerek magnezyumun küreselleştirme yeteneğini azaltmasından dolayı magnezyumla küreselleştirme prosesinden önce yapıda en fazla %0,02 olması gerekir [6,13].

Bu elementlerin haricinde titanyum, bizmut, kurşun, zirkonyum, tellür ve antimon gibi elementler de çekirdekleşme kabiliyetine tesir gösterirler. Bu sebeple yapıda hiç olmamalıdır veya eser miktarda bulunmaları gerekir. Bor, kalay, vanadyum, bakır, nikel ve krom gibi alaşım elementleri ise karbür yapıcı, ferrit oluşumunu teşvik edici veya perlitli kararlılaştırıcı elementlerdir [6].

2.5.4.3. Küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimi

Küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal kompozisyonu tavsiye edilen değer aralığı Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.2. Küresel grafitli dökme demirlerin gerekli dayanımı sağlayabilmesi için tavsiye edilen kimyasal analiz değer aralığı

Dökme Demir	Kimyasal Bileşim (%)							
	CE	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu
KGDD	4.3	3.00	2.00	0.10	Max	Max	0.03	0.15
		4.00	3.00	0.90	0.03	0.002	0.07	1.00

Her dökümhanenin kendine özgü üretim teknikleri vardır. Bu yüzden kesin olarak kimyasal analiz değerleri vermek yanlış sonuçlara yol açabilir. Örneğin küresel grafitli dökme demir üretimi gerçekleştiren dökümhanelerin bazılarında perlit yapıcı olarak bakır kullanılırken bazılarının da ise kalay kullanılmaktadır. Her dökümhanenin gerekli mekanik özellikleri sağlayabilmesi için gerekli kimyasal analiz değeri kendine özgü değişmektedir.

2.5.5. Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması

Küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması EN 1563 standardı gereğince yapılmaktadır. Sahip oldukları mekanik özellikler ve mikroyapı dikkate alınarak sınıflandırılmaktadır. Tablo 2.3' de küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması verilmiştir.

Sfero dökme demir gösterimi Avrupa standardında EN-GJS olarak kodlanmıştır. Yüksek mukavemetli dökme demir parça üretimlerinde parça kesitleri arttıkça üretim zorluklarından dolayı mukavemet değerlerini yakalamak zor olduğundan müşteri ve tedarikçi arasında özel anlaşmalar ile mekanik mukavemet değerleri belirlenir.

Tablo 2.3. EN 1563 Standardı küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması

Malzeme Tanımı	Et Kalınlığı (t) mm	Çekme Dayanımı (MPa) Min.	Akma Dayanımı (MPa) Min.	Uzama A (%) Min
EN-GJS-350-22-LT LT: Düşük sıcaklıkta	t ≤ 30	350	220	22
	30 < t ≤ 60	330	210	18
	60 < t ≤ 200	320	200	15
EN-GJS-350-22-RT RT: Oda sıcaklığında	t ≤ 30	350	220	22
	30 < t ≤ 60	330	220	18
	60 < t ≤ 200	320	210	15
EN-GJS-350-22	t ≤ 30	350	220	22
	30 < t ≤ 60	330	220	18
	60 < t ≤ 200	320	210	15
EN-GJS-400-18-LT	t ≤ 30	400	240	18
	30 < t ≤ 60	390	230	15
	60 < t ≤ 200	370	220	12
EN-GJS-400-18-RT	t ≤ 30	400	250	18
	30 < t ≤ 60	390	250	15
	60 < t ≤ 200	370	240	12
EN-GJS-400-18	t ≤ 30	400	250	18
	30 < t ≤ 60	390	250	15
	60 < t ≤ 200	370	240	12
EN-GJS-400-15	t ≤ 30	400	250	15
	30 < t ≤ 60	390	250	14
	60 < t ≤ 200	370	240	11
EN-GJS-450-10	t ≤ 30	450	310	10
	30 < t ≤ 60	Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre		
	60 < t ≤ 200	Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre		
EN-GJS-500-7	t ≤ 30	500	320	7
	30 < t ≤ 60	450	300	7
	60 < t ≤ 200	420	290	5
EN-GJS-600-3	t ≤ 30	600	370	3
	30 < t ≤ 60	600	360	2
	60 < t ≤ 200	550	340	1
EN-GJS-700-2	t ≤ 30	700	420	2
	30 < t ≤ 60	700	400	2
	60 < t ≤ 200	660	380	1
EN-GJS-800-2	t ≤ 30	800	480	2
	30 < t ≤ 60	Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre		
	60 < t ≤ 200	Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre		
EN-GJS-900-2	t ≤ 30	900	600	2
	30 < t ≤ 60	Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre		
	60 < t ≤ 200	Tedarikçi ile müşteri arasında anlaşmaya göre		

2.6. Birinci Nesil Küresel Grafitli Dökme Demirler

Yaklaşık 1950 yıllarında keşfedilen küresel grafitli dökme demirler, günümüzde farklı kaynaklarda birinci nesil olarak isimlendirilmektedir. Ortalama %2 - %3 seviyelerinde silisyum bulunduran bu birinci nesil dökme demirlerin mikro yapıları incelendiğinde matrisin perlit, ferrit veya bu fazların birleşiminden oluştukları gözlemlenir. Malzemenin içeriğinde yer alan perlit, malzemeyi kuvvetlendiren, ama sünekliğini azaltan bir etki oluştururken, ferrit daha sünek bir malzeme oluşturmamızı sağlar [14].

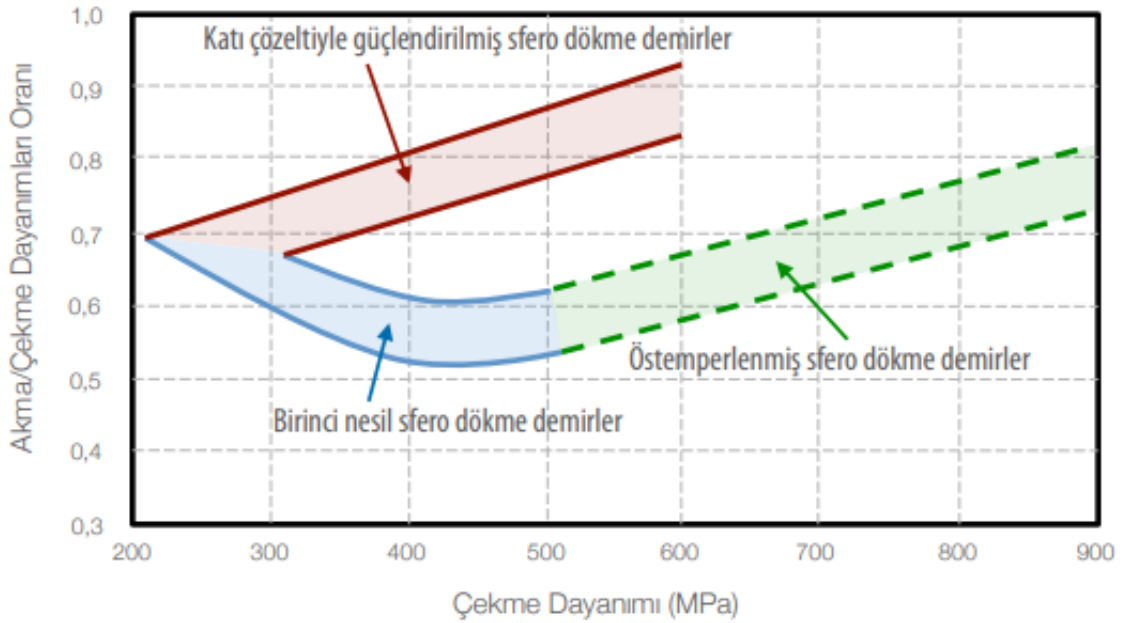
Bakır (Cu), mangan (Mn) gibi elementler yapıya perlitik faz oluştururken, silisyum (Si), karbon (C) gibi elementler yapıya ferritik faz oluşturur. Bu sayede yapıda yer alan ferrit ve perlit miktarlarını değiştirerek, üretilen malzemenin gerekli dayanım, sertlik ve uzama değerlerini sağlamak mümkündür. Eski nesil sfero dökme demirlerde mekanik özellikleri en iyi hale getirmek için perlit ve ferrit miktarı önemlidir. Bu çeşit dökme demirlerde yaygın rastlanan sorun yapıda yer alan perlit seviyesinin yalnızca kimyasal kompozisyona bağlı olmayıp, bunun yanında soğuma hızına da bağlı olarak değişmesinden dolayı, çeşitli kalınlıktaki malzeme kesitlerinde farklılaşan oranlarda perlit oluşmasıdır. Bu neden farklı kesit kalınlıkları içeren bir döküm malzemenin yavaş soğuyan daha kalın kesitlerinde yapıya süneklik kazandıran ferrit seviyesi artarken, daha hızlı soğuyan ince kesitlerinde ise daha yüksek seviyede yapıyı güçlendirici ancak sünekliği azaltıcı özellikteki perlit oluşumu gözlemlenir [15,16].

2.7. İkinci (Yeni) Nesil Küresel Grafitli Dökme Demirler

Dökme demir parçanın matris yapısının eşit dağılımlı olmaması; malzemenin süneklik, sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerinin de parça genelinde eşit dağılımlı olmayacağı demektir. Bu durumda bir yandan arzulanan mekanik özelliklerin elde edilmesini güçleştirirken, diğer yandan malzemelerin işlenmesi bakımından da problem oluşturmaktadır. Bu seviyede eski nesil küresel grafitli dökme demirlerden daha iyi özellikler içerdiği savunulan yeni nesil küresel grafitli dökme demirler bulunmuştur. Yeni nesil küresel grafitli dökme demirlerde, çokça ferritik bir matris fazı gözlemlendiğinden, imal edilen ürünlerde mekanik özelliklerin eşit bir dağılım içerdiği gözlemlenmektedir [15].

İkinci nesil sfero dökme demirlerin mikro yapısında perlit fazı seviyesinin en fazla %5 olmasına müsaade edilir. Bu nedenle, geride kalan en düşük %95'lik ferrit fazı

malzemenin oldukça sünek ve nispeten yumuşak yapıda olmasını sağlar. Yeni nesil sfero dökme demirlerin avantajları içerisinde, yüksek uzama seviyesinin yanında yüksek mukavemet seviyesi de belirtilmektedir. Matris yapısının fazlasıyla sebebiyle olması nedeniyle, parçanın yüksek sünek yapıda olması sağlanırken, katı çözelti sertleşmesi (solid solution strengthening) ismini verdiğimiz mekanizma ile yüksek mukavemet seviyelerinin elde edilmesi mümkün olmaktadır. Bu sebeple yeni nesil küresel grafitli dökme demirler; çeliğe benzer mekanik özellikleri barındıran, fakat bu mekanik özelliklerin sağlanabilmesi için uzun süren ısıl işlemlere ihtiyaç gerekmeden üretilebilen ve bu sebeple de maliyeti uygun olmasından dolayı son dönemlerde döküm sanayinde oldukça ilgi çeken malzemeler olarak tercih edilmeye başlanmışlardır [15].



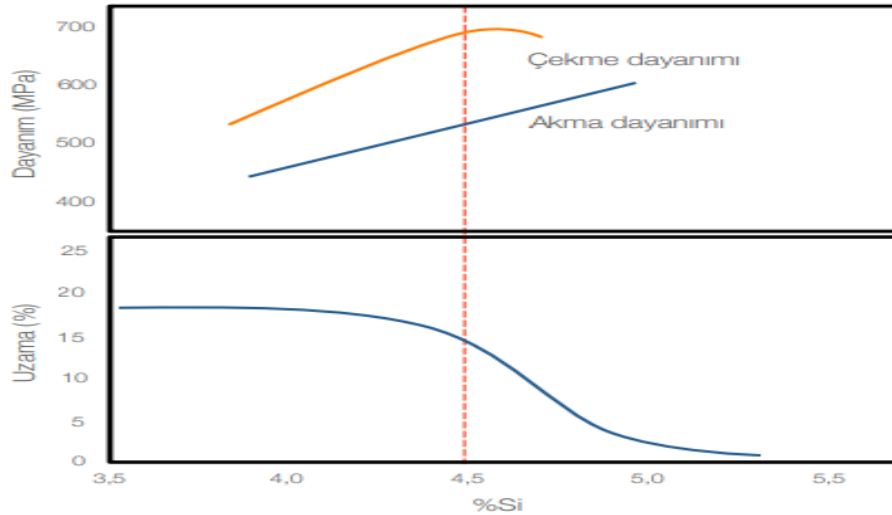
Şekil 2.10. Küresel grafitli dökme demirlerin dayanımlarının kıyaslanması [2]

Yeni nesil küresel grafitli dökme demirlerin üstünlüklerini vitrine alan, en gerekli element silisyumdur. Kimyasal bileşiminde olması gereken yüksek silisyum sebebiyle, yakın seviyede uzama gösteren eski nesil küresel grafitli dökme demirlere oranla yeni nesil küresel grafitli dökme demirler, daha üstün mukavemet değerleri sergilerler. Katı çözelti sertleşmesi, dökümü gerçekleştirilen malzemenin akma mukavemetinin de yükselmesine sebep vermektedir. Kompozisyonda yer alan yüksek silisyumun, parça mikro yapısında istenilmeyen karbür oluşma meyillinin de engellenmesinde önemli olduğu belirlenmektedir [17].

Yüksek silisyum seviyesinin getirdiği bir diğer üstünlük ise, Fe-C denge diyagramındaki ötektoid dönüşüm sıcaklığını yukarı tarafa çekmesi olarak bilinir. Bu etkisi sayesinde imal edilen malzemelerin yüksek sıcaklıklarda çalışma potansiyellerinde artış gözlemlenmektedir [18].

İkinci nesil sfero dökme demirlere ait literatür araştırması yapıldığında, çelik döküm malzemelere bir eşdeğer olarak kullanıldıklarında, bu malzemelerin hem işleme maliyetinin hem de parça ağırlığının düşmesine sebep oldukları için çelikle mukayese edildiğinde önemli seviyede öne çıktıkları belirtilmektedir [17].

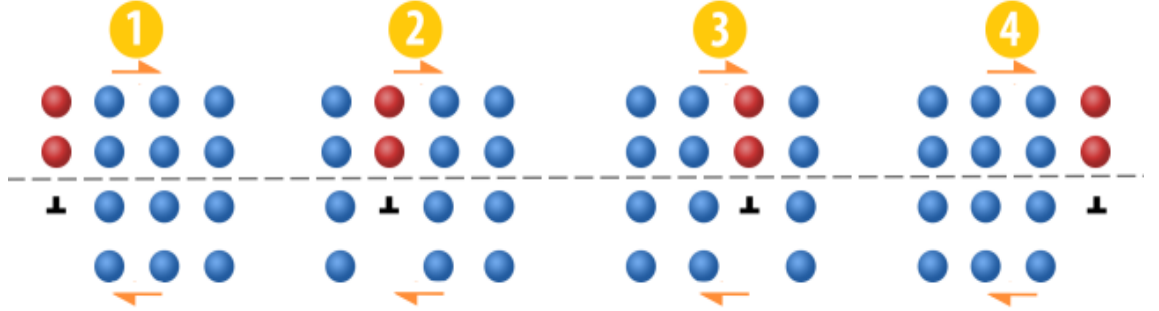
Birinci nesil küresel grafitli dökme demirler, içeriğinde genel olarak %1,8-2,8 aralığında silisyum (Si) ihtiva etmektedir. İkinci nesil olarak bilinen yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirler ise %2,8-4,5 aralığında silisyum oranına sahiptir. Yapılmış araştırmalar, %4,5'ten yüksek silisyum oranının küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini düşürdüğünü göstermektedir. Özellikle malzemenin kopma uzaması ciddi seviyede düşmektedir. %4,5 silisyum oranına kadar malzemenin uzama değerleri arzu edilen aralıklara varırken, bu sınır geçildiğinde uzama oranı azalmaktadır. Şekil 2.11' de Silisyum elementinin alaşımlama oranına göre malzeme mekanik özelliklerine etkileri verilmiştir [20].



Şekil 2.11. Yeni nesil dökme demirlerde Si yüzdesinin çekme, akma ve uzama değerlerine etkisi [2]

2.7.1. Katı çözeltili sertleşmesi

Katı çözeltili sertleşmesi, kristal kafese sahip alaşım ve metalleri mukavemetlendirmek için tercih ettiğimiz yöntemlerden birisidir. Bu yöntemin temelinde, malzemeyi oluşturan atom sıralarının birbirleri üstünde kaymasını sağlayan dislokasyon hareketinin engellenmesi yer almaktadır. Kristal kafes yapısındaki alaşım ve metaller, atomlardan oluşan düzlemlerden meydana geliyor. Atomlardan oluşan bu düzlemler birbirleri üstünde kayabiliyorlar. Bu kayma mekanizması zorda olsa kolaylaşması için bir yöntem vardır: Bu sıralar arasında yarım bir sıranın bulunmakta olmasıdır. Dislokasyon çizgisi denilen terim de bu yarım sıranın yapı içerisinde kalan ucudur. Bu yarım düzlemin kayma hareketini nasıl kolaylaştırdığı Şekil 2.12' de şematik olarak gösteriliyor [20].

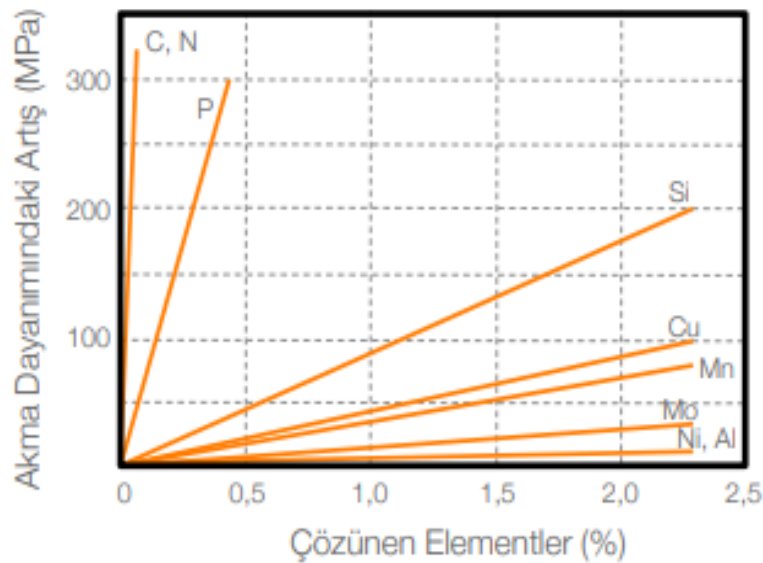


Şekil 2.12. Kırmızı renk ile belirtilen yarım sıra mavi sıralarla yer değiştirerek yukarı ve aşağı bölgelerin birbirlerine etkiyerek kaymalarını gerçekleştiriyor. Bu yarım sıranın aşağı bölümüne (ters 'T' ile gösterilen) dislokasyon çizgisi ismi veriliyor [2]

Bir kristal içerisinde yarım olan böyle bir sıra olunca, bu yarım sıra diğer sıralara birer birer yer değiştirerek, dislokasyon çizgisinin aşağı ve yukarı bölümlerinin birbirlerine etki ederek yer değiştirmelerini sağlayabilmektedir. Dislokasyon hareketi olarak ismini verdiğimiz bu mekanizma sayesinde, kristal yapıya sahip alaşım ve metaller yük altında kaldıklarında kırılmayarak şekillerini değiştirebiliyorlar. Bu düzlemlerin kaymasını zorlaştırdığımızda yani dislokasyon hareketini daha zor hale getirdiğimizde atom düzlemlerinin birbirleri üstünde hareket etmeleri için daha fazla kuvvet uygulamamız gerekiyor. Bu durumun olağan sonucu olarak, malzemenin mukavemeti artırılmış oluyor. Dislokasyon hareketinin atomik seviyedeki çalışması burada bahsettiğimiz kısa anlatıma göre daha karmaşıktır. Buna rağmen çizilen bu kolay anlaşılır şema, dislokasyonları engellediğimizde malzemenin nasıl dayanımının artacağını anlamamıza yardımcı oluyor.

Katı çözeltili sertleşmesi, bu kayma hareketini engellemek için seçtiğimiz yöntemlerden bir tanesidir [20].

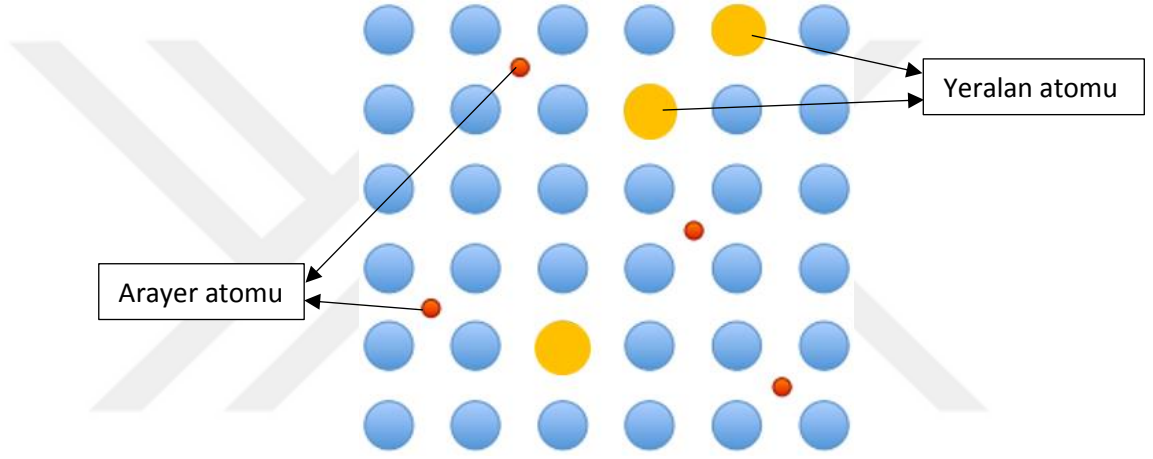
Katı çözeltili sertleşmesinde, atom düzlemlerinin kaymalarını zorlaştırmak için farklı atomlardan yardım alıyoruz. Bir malzemeyi oluşturan atomlardan farklı bir atomu kristal kafes içerisine yerleştirdiğimizde, bu farklı atomun ebatları da farklı olduğu için, atom sıralarının kusursuzluğunu bozmuş bulunuyoruz. Bu kusur sebebiyle, hem kaymaya devam edebilmeleri için uygulanması gereken mukavemet miktarı yükseliyor hem de atom düzlemlerinin birbirleri üzerine kaymaya başlaması zorlaşıyor (akma dayanımı doğru orantılı olarak yükseliyor). Bunun sonucu olarak çekme mukavemeti de artıyor. Bu özellikleri içeren bir elementi eriyiğin içerisine atarak çözünmesini sağlıyoruz. Daha sonra karışımı katılaştırarak, çözünen atomun çözünmüş halde katı içinde kalmasını sağlıyoruz. Örneğin ergiyik dökme demir içerisine bu sebeple silisyum ilave edip çözünmesini sağlarsak, katılaşma sırasında silisyum atomlarının yeniden birleşerek katı içerisinde silisyum adaları oluşturmalarını değil, tamamen çözünmüş olarak, katı içerisinde dağılmış şekilde kalmalarını isteriz (oluşan bu karışıma katı çözeltili ismini veriyoruz). Yabancı atomlar bu şekilde dağıtıldığı zaman, kendilerine denk gelen dislokasyonların hareketini azaltarak malzemenin mukavemetinin artmasını gerçekleştiriyorlar. Dökme demirde katı çözeltili oluşturan elementlerin akma dayanıma ne oranla etki ettikleri Şekil 2.13' de grafik şeklinde verilmiştir [20].



Şekil 2.13. Ferrit içinde çözünerek katı çözeltili sertleşmesi oluşturan elementlerin akma dayanımına etkileri [2]

2.7.1.1. Katı çözeltili türleri

Katı çözeltili içerisinde bulunan yabancı atomlar, kristal kafes içerisinde iki farklı biçimde yer alabiliyorlar. Eğer içeri giren yabancı atom, kristal kafesi oluşturan atomların konum olarak yerine geliyorsa, bu atomu yer alan (substitutional) olarak isimlendiriyoruz. Bu durum, yabancı atomlar kristal kafesi oluşturan atomlarla benzer ebatlara sahip olduğu zaman ortaya çıkmaktadır. Eğer çözünen ve içeri giren atomlar daha küçük ebatlara sahipse, o zaman kristali oluşturan atomların arasındaki boş yerlere de girebiliyorlar. Bu türdeki atomları arayer (interstitial) olarak isimlendiriyoruz [20].



Şekil 2.14. Arayer ve yer alan katı çözeltilerinin temsili bulunma noktaları [2]

Bir katının çözebileceği atom miktarının bir limiti vardır. Bu limit çözünecek elemente ve malzemeden malzemeye göre farklılık gösterir. Fakat bir malzeme içinde çözdüğümüz atom miktarı yükseldikçe, dislokasyon hareketini daha aktif bir şekilde engelleyebileceğiniz için, elde ettiğiniz güçlenme etkisi de artıyor. Bu sebeple ikinci nesil dökme demirlerin mukavemeti ilave edilen silisyum miktarına doğru orantılı şekilde artıyor. Fakat, bu demek değil ki ferrit fazı silisyumu çözebildiği noktaya kadar silisyum eklemeye devam edebiliriz. Burada mekanik özelliklerdeki değişimi de dikkate almak gerekir. Çünkü silisyum oranı kritik bir seviyeye geldiği zaman Şekil 2.11’ de görüldüğü gibi mekanik özellikleri kötü etkilemektedir [20].

Katı çözeltili sertleşmesi yöntemi döküm malzemenin mukavemetini yükseltmenin sadece perlit miktarını artırarak olmadığını kanıtlar niteliktedir. Katı çözeltili sertleşmesi ile ferritik matrisi güçlendirerek dökme demirin mukavemetini yükseltirken, sünekliğini de yükseltmesi elde edilebilmektedir [15].

2.7.2. İkinci (Yeni) nesil küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması

İkinci nesil küresel grafitli dökme demirler için EN 1563 standardında istenen minimum uzama ve dayanım değerleri Tablo 2.4' de verilmiştir.

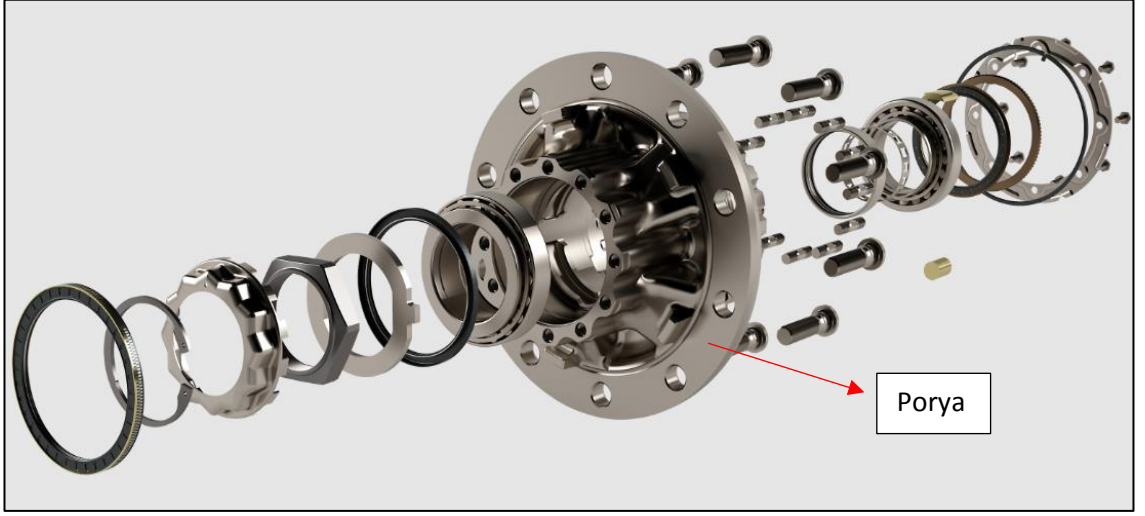
Tablo 2.4. EN 1563 Standardı yeni nesil küresel grafitli dökme demirlerin sınıflandırılması

Malzeme Tanımı	Et Kalınlığı (t) mm	Çekme Dayanımı (MPa) Min.	Akma Dayanımı (MPa) Min.	Uzama A (%) Min.
EN-GJS-450-18	t ≤ 30	450	350	18
	30 < t < 60	430	340	14
	60 < t ≤ 200	Müşteri ve tedarikçi özel anlaşmasına göre		
EN-GJS-500-14	t ≤ 30	500	400	14
	30 < t < 60	480	390	12
	60 < t ≤ 200	Müşteri ve tedarikçi özel anlaşmasına göre		
EN-GJS-600-10	t ≤ 30	600	470	10
	30 < t < 60	580	450	8
	60 < t ≤ 200	Müşteri ve tedarikçi özel anlaşmasına göre		

2.8. Araç Poryası Hakkında Kısa Bilgi

Araçlardaki tekerleklerin rahatça dönebilmesi için porya dediğimiz metal malzemedен yapılmış parça geliştirilmiştir. Motordan gelen enerjinin tekerleklere sorunsuz olarak aktarılacak yuvarlanmalarını sağlamaktadır. Yuvarlanmayı yapabilmek için tahrik mili/aks, yuvarlanmayı gerçekleştirmek için tekerlek yatakları ve tekerlek göbekleri ile beraber çalışır. Tekerlek poryası dediğimizde farklı çeşitleride vardır. Disk fren poryaları, tekerlek poryaları vb. her çeşit ve türde, tekerlekler göbeklere bağlanır. Montaj, rahatlığı nedeniyle popüler bir parçadır. Kurulumu kolaydır ve ABS sensörleriyle iyi çalışır. Her parça düzgün montaj edilirse, tekerlek göbeği parçası tekerleklere sürtünmesiz hareket sağlayacaktır. Fakat, aşırı zorlu şartlara maruz kalırsa yani bir taş, kaya ve benzeri cisme çarpılırsa veya bir kazaya karışılırsa, aşınma ve yıpranma ile arıza oluşturabilir [24].

Genelleyecek olursak, araç tekerlek poryası problemleri, rulmanların aşınmasından meydana gelmektedir. Lastikleri zamanından önce değiştirmek ve gürültü yapmak haricinde, çok uzun süre ihmal edilirse güvenli olmayan bir duruma dönüşebilir. İlerleyen zamanda, yatak çökebilir ve araç direksiyonu sürüş sırasında titreme ve yalpalama yapabilir. Sorunlu bir araç, tekerlek poryasının kısa zamanda değiştirilmesi tavsiye edilir [24].



Şekil 2.15. Araç poryası ve montajı için gerekli diğer parçalar.

Porya üretimi genellikle maliyeti düşük fakat yüksek mukavemetli küresel grafitli dökme demirden üretilir. Poryalar kullanıldığı aracın motorunun tekerleğe aktaracağı güce göre tasarlanır ve üretilir. Bu yüzden poryaların malzeme serileri olarak da geniş bir aralığı vardır. En yaygın olarak porya üretiminde GGG60, GGG70, GGG80 serileri kullanılmaktadır.

BÖLÜM 3

MATERYAL VE YÖNTEMLER

Tez kapsamında üç farklı küresel grafitli dökme demir serisinden deneme porya üretimi yapıldı. EN-GJS-600-3, EN-GJS-700-2 ve EN-GJS-600-10 serilerden dökülen poryaların mikroyapı, mekanik özellikleri, üretim maliyeti ve sarfiyatlar karşılaştırıldı. Numunelerin üretimi Mesa Makine Döküm Gıda San. Tic. A.Ş.'de yapılmıştır. GGG60 ve GGG70 seri malzemelerin üretimi şirket bünyesinde belirli sabitleşmiş analiz ve yöntemler ile gerçekleştirilmektedir. Fakat EN-GJS-600-10 malzemenin üretimi ilk defa gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden GGG60 ve GGG70 malzemenin üretilen poryalar için özel bir analiz ve çaba gerektirmeden gerekli mekanik özellikler yakalanabilmiştir. EN-GJS-600-10 malzemenin üretimi için üç farklı reçete hazırlanmıştır. Bu reçetelerden en iyi mekanik özelliklerin yakalandığı standartlara uyan reçete ile porya dökümü gerçekleştirilmiştir. Üç farklı seriden de üretilen poryaların karşılaştırılması ve birbirlerine göre üstün özelliklerinin tespit edilmesi için mikroyapı, sertlik, çekme dayanımı, üretim maliyeti ve sarfiyatı gibi özellikleri karşılaştırılmıştır.

3.1. EN-GJS-600-3 ve EN-GJS-700-2 Sfero Dökme Demir Malzemelerin Ocak Hazırlığı

Çalışma için üretilecek poryaların ergitme işlemleri INDUCTOTHERM marka induksiyon ocağında yapılmıştır. Ocağın kapasitesi 1.5 – 1.6 ton civarında ve asidik astarlıdır. GGG60 ve GGG70 malzeme ocak şarjı için %30 çelik hurda, %30 GGG60 / GGG70 geri döndüsü, %30 rus piki ve kalan %10 ocak ilaveleri olarak hazırlanmıştır. Ocak şarjında kullanılan malzemelerin analizi Tablo 3.1' de verilmiştir. Ocak yaklaşık 1400 – 1500 °C aralığındaki bir sıcaklık değerine kadar ısıtıldı ve ergime sağlandı. Ergitilmiş madenin karbon, silisyum, mangan ve bakır/kalay oranları baz alınarak gerekli ilaveler eklendi. Ocak şarjının karbon değeri termal analiz kabı ile tespit edildi ve karbon değeri gerekli seviyeye getirildi. Diğer elementler için kimyasal analiz OXFORD FOUNDRY MASTER PRO marka optik emisyon spektrometresi ile yapılmıştır.

Tablo 3.1. GGG60 ve GGG70 serilerinin üretimi için, ocak şarjında kullanılan malzemelerin kimyasal analizi

Malzeme Tanımı	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Cr	Al
Rus piki	3.50 4.50	Max 1.00	Max 0.09	Max 0.06	Max 0.02	-	-	-	-
Çelik hurda	0.20 1.00	0.50 1.00	Max 0.06	Max 0.04	Max 0.03	Max 0.06	-	Max 0.04	Max 0.03
Geri döndü (GGG60/GGG70)	3.20 3.70	2.10 2.60	0.15 0.30	0.03 0.04	Max 0.015	0.03 0.08	0.040 0.060	Max 0.04	Max 0.03

Ocak kimyasal analizinin ve termal analizinin yüksek hassasiyet ile tespit edilebilmesi için ergimiş metalden numune alındı. Numunenin doğru sonuçlar verebilmesi için standartlara uygun olarak alınması sağlandı.

Ocak içindeki ergiyiğin, perlit tozu ile cürufu temizlendi. Ocak numunesi alınması için ocağa en az 10 dakika herhangi bir girdi eklenmemelidir. Daha sonra ocak ısısı arttırılarak içerisindeki metal ergiyiğin homojen bir sıvı oluşturması sağlandı. Numune almak için saf grafit kepçe kullanıldı. Grafit kepçe sıvıya safsızlık oluşturmaması ve 4000 °C sıcaklığa dayanabildiği için tercih edildi. Homojenlik elde edildikten sonra saf grafit kepçe ile sıvı yüzeyinden içeriye doğru bastırılarak numune alındı. Termal analiz ve kimyasal analiz için ayrı ayrı numune alındı.

Termal analiz için Heraeus marka cihaz ve telleryumlu termal analiz kabı kullanıldı. Ocaktan grafit kepçe ile alınan sıvı numune, standart termal analiz kabının içerisine boşaltıldı. Termal analiz kabının içindeki numunenin soğuyarak karbon miktarını noktasal olarak tespit etmesi sağlandı. Termal analiz cihazları karbon miktarını noktasal olarak tespit ederken diğer bir yandan da sıvının ötektik sıcaklığa ne kadar uzak olduğunu tespit etmeye yarar. Porya gibi kalın kesitli döküm parçanın mikro çekinti yapmaması için kalıp içinde yüksek basınç oluşturması gerekir. Bu da ötektik noktaya çok yakın olunması ile sağlanır. Ötektik noktaya çok yakın olan 4,25 karbon eşdeğeri ile döküm yapılarak döküm parçasında çekinti riski minimuma indirildi. Şekil 3.1' de termal analiz yönteminin uygulama adımları gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Heraeus marka termal analiz cihazında telleryumlu termal analiz kabı ile ölçüm

Kimyasal analiz için numune standart çil numunesi kalıbına döküldü ve şeklini alması sağlandı. Daha sonra yüzeysel olarak katılaştıran numune açık havada soğumasına izin verilmeden hızlıca soğuk suya daldırılarak soğuması sağlandı. Hızlı soğutulmasının sebebi numune içerisindeki karbonun zamanla dışarı çıkmasıdır. Fakat buna izin vermeden soğuk su ile soğutma yapılırken yapı içinde karbonun sıkışmasını sağlayarak sıvı metalin karbon değerini daha doğru tespit ediyoruz. Numunenin doğru hızda soğutulduğundan emin olmak için çil yüzeyi uygun numune hazırlama cihazıyla taşlandı. Daha sonra zımpara ve parlatma işlemi uygulanarak mikroskop altında incelendi. Şekil 3.2’ de çil numunesinin alınma adımları gösterilmiştir. Çil numunesinin doğru alındığını kontrol amaçlı mikroyapısı incelenmiştir. Çil numunesinin yuvarlak plaka kısmında grafitleşmenin olmaması karbonun yapıda sıkışık halde kalması gerekir.



Şekil 3.2. *a* - Bakır çil numunesi kalıbı ve grafit numune alma kepeçesi, *b* - çil numunesi, *c* - çil numunesinin yakın görseli, *d* - çil numunesi mikroyapı görseli

Çil numunesi yüzeyi inceleme sonrası 320 kum zımparadan geçirilerek spektrometre cihazı için hazırlandı. Spektrometre cihazının analiz öncesi yüksek hassasiyetle ölçüm yapabilmesi için kalibrasyonu yapıldı. Spektrometre cihazında analiz için %99 saf argon gazı kullanıldı. Argon gazı hiçbir element ile bileşik yapmadığı için ortamdaki atmosferi analize uygun hale getirmek için kullanıldı. Spektrometre cihazında çil numunesinin zımparalanmış yüzeyi, cihazın dökme demir frekansında en az üç kere yakımı yapılarak stabil ve ortalama bir değere varıldı. Şekil 3.3’ de kullanılan spektrometre cihazının fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 3.3. Oxford Foundry Master Pro optik emisyon spektrometresi

Alınan kimyasal analiz ve termal analiz raporunun üzerinden gerekli ocak ilaveleri hesaplandı. Ocak şarjının hesabı için aşağıdaki formül kullanıldı:

$$\left\{ \frac{\text{İstenen analiz değeri} - \text{Mevcut analiz değeri}}{\text{Atılan ferroalyajın verimliliği} - \text{İstenen analiz değeri}} \right\} \times \text{Ocak içerisindeki erimiş metal miktarı}$$

Ocağa ferroalyaj ilaveleri eklenmeden önce, ocak ilaveleri için kullanılan hassas terazisi kontrol edilerek sıfırlandı. Ocağa ilave edilecek her bir ilave ferroalyaj hassas teraziler ile tartılarak hesaba uygun şekilde döküm ocağına aktarıldı. Ocak ilavelerinin verimlilik oranları Tablo 3.2’ de verilmiştir. Ocağa yukardaki formüle göre atılan ferroalyajların tamamen erimesi için en az 20 dakika beklenmesi gerekir.

Tablo 3.2. Ocak ilaveleri için kullanılan ferroalyajların verimlilik oranları

Malzeme Tanımı	Verimlilik Oranı (%)	Malzeme Tanımı	Verimlilik Oranı (%)
Karbon Verici	99,1 - 99,6	Kalay	99,96 – 99,97
Ferro Silisyum	Min 75	Mangan	75 - 84
Bakır	Min 97	Magnezyum	5 - 6

Kimyasal analizi hazırlanan ocak şarjının cürufu perlit tozu ile alınarak temiz eriyiğin ocaktan transferi, magnezyum tretman potasına gerçekleştirildi. Magnezyumla küreselleştirme işlemi sonrası döküm parçalarda istenilen kimyasal kompozisyonlar Tablo 3.3’ de verilmiştir.

Tablo 3.3. GGG60 ve GGG70 malzemenin kimyasal kompozisyonları

Malzeme Tanımı	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Cr	Mg
EN-GJS-600-3	3.30 3.60	2.30 2.50	0.10 0.30	Max 0.03	Max 0.015	0.02 0.08	0.035 0.045	Max 0.035	0.03 0.05
EN-GJS-700-2	3.30 3.60	2.30 2.50	0.10 0.30	Max 0.03	Max 0.015	0.02 0.08	0.045 0.055	Max 0.035	0.03 0.05

3.2. EN-GJS-600-10 Yeni Nesil Sfero Dökme Demir Malzemenin Ocak Hazırlığı

EN-GJS-600-10 malzemenin ocak şarjı için %30 çelik hurda, %30 GGG40 geri döndüsü, %30 rus piki ve kalan %10 ocak ilaveleri olarak hazırlandı. Ocak şarjında kullanılan malzemelerin analizi Tablo 3.4.’ de verilmiştir.

Tablo 3.4. EN-GJS-600-10 Serisi üretiminde kullanılan ocak şarjı girdi kimyasal analizi

Malzeme Tanımı	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Cr	Al
Rus piki	3.50 4.50	Max 1.00	Max 0.09	Max 0.06	Max 0.02	-	-	-	-
Çelik hurda	0.20 1.00	0.50 1.00	Max 0.06	Max 0.04	Max 0.03	Max 0.06	-	Max 0.04	Max 0.03
Geri döndü (GGG40)	3.20 3.70	2.10 2.60	Max 0.10	0.03 0.04	Max 0.015	-	-	Max 0.04	Max 0.03

Ocak yaklaşık 1400 – 1500 °C aralığındaki bir sıcaklık değerine kadar ısıtıldı ve ergime sağlandı. Ergitilmiş madenin karbon, silisyum oranları baz alınarak gerekli ilaveler eklendi. Mangan, bakır, kalay gibi perlit yapıcı elementlerin şarjda bulunmamasına dikkat edildi. Ocak şarjının karbon değeri termal analiz kabı ile tespit edildi ve karbon değeri

gerekli seviyeye getirildi. Diğer elementler için kimyasal analizi OXFORD FOUNDRY MASTER PRO marka optik emisyon spektrometresi ile yapılmıştır. GGG60 ve GGG70 malzeme ocak hazırlığındaki gibi analiz ve hesaplamalar yapılarak ocak şarjı döküme hazır hale getirildi.

Kimyasal analizi hazırlanan ocak şarjının cürufu perlit tozu ile alınarak temiz eriyiğin ocaktan transferi, magnezyum tretman potasına gerçekleştirildi. Magnezyumla küreselleştirme işlemi sonrası döküm parçalarda istenilen kimyasal kompozisyon Tablo 3.5’ de verilmiştir.

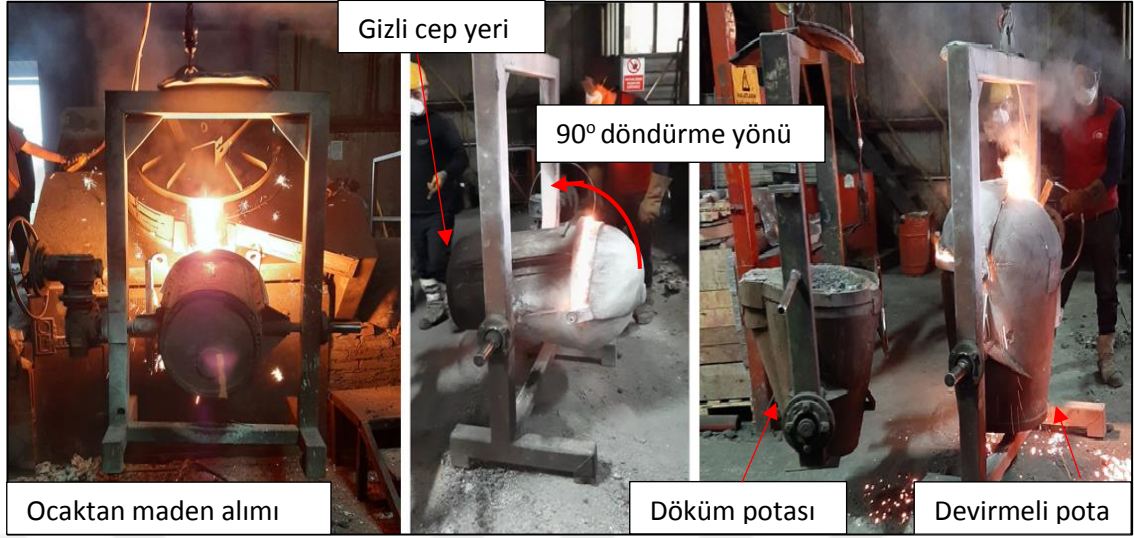
Tablo 3.5. EN-GJS-600-10 Malzeme kimyasal kompozisyon aralığı

Malzeme Tanımı	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Cr	Mg
EN-GJS-600-10	3.30 3.60	4.15 4.35	Max 0.30	Max 0.03	Max 0.015	Max 0.30	Max 0.001	Max 0.035	0.03 0.05

3.3. Küreselleştirme ve Aşılama Prosesi

Ergimiş metale küreselleştirici olarak magnezyum elementi kullanılmıştır. Küreselleştirme işlemi için ise devirmeli pota yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemin verimi uygun şartlar sağlandığında %50’ ye varabilmektedir. Devirmeli pota yönteminde küreselleştirici, pota içindeki ergimiş metale temas etmeyen gizli bir cebe konulmaktadır. Daha sonra ergimiş metal potaya doldurulur ve 90⁰ döndürülerek küreselleştirici ile sıvı metalin teması sağlanır. Magnezyum saf veya FeSiMg alaşımı olarak kullanılabilir. Çalışmada %5-5,5 Mg içeren FeSiMg alaşımı küreselleştirici kullanılmıştır. Sıvı ile temas eden küreselleştirme işlemi sonrası, literatürde 8 dakika içinde dökülmesi gerektiği söylenir. Çalışmada küreselleştirme işlemi sonrası döküm 7 dakika içinde sağlanmıştır.

Ergimiş metal ocaktan, devirmeli potaya alınırken %10 lantanlı ferrosilisyumdan aş %0,0015 oranında eklenmiştir. Küreselleştirme işlemi sonrası devirmeli potadan ergimiş metal döküm potasına aktarılır. Döküm potasına aktarılırken akıntı aşısı olarak %10 baryumlu, ferrosilisyumdan aş %0,0015 oranında kullanılmıştır. Döküm sıcaklığı 1400 – 1500 °C aralığında tutularak ergimiş metalin yaş kum kalıplara dökümü sağlanmıştır. Küreselleştirme işlemi Şekil 3.4’ de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. FeSiMg alaşımı ile küreselleştirme işlemi uygulaması

3.4. Döküm Kumu ve Maça Hazırlanması Prosesi

Döküm kumu ergimiş metalin şekillendirilmesini sağlayan kalıp malzemesidir. Çalışmadaki döküm parçalar yaş kum kalıplardan elde edilmiştir. Döküm kumu olarak silis kumu kullanılmıştır. Silis kumunun tercih edilmesinin sebebi ucuz, kolay bulunabilirlik ve yüksek refrakterlik özellikleridir. Döküm kumu hazırlanırken kumun şekil alabilmesi için gerekli katkıların eklenmesi gerekir. Döküm kumu: Silis kumu, kömür tozu, su ve bentonit ile hazırlanır. Kömür tozu ergimiş metalin, kum ile teması sırasında yanarak oluşan gazın atılmasını sağlar. Bentonit, su ile karıştırıldığında kumun şekil alması için bağlayıcı görevi görür. Su bentonitin aktifleşmesi için gereklidir. Silis kumu yüksek refrakterlik göstererek ergimiş metalle temas eder ve boyutsal mukavemetini korur. Silis kumu girdi olarak tane boyutu 80-100 AFS tercih edilmiştir. Bu malzemeler uygun oranda kum mikserinde karıştırılarak döküm için gerekli yaş kalıplama kumu elde edilir.

Döküm öncesi kumun kontrolü ve analizi hata oranlarını düşürebilmek için çok önemlidir. Döküm parçalarda oluşabilecek hataların giderilmesi veya önleminin alınabilmesi için hazırlanan döküm kumundan tüm hazırlanan döküm kumunu temsil edebilecek şekilde numune alınır. Alınan kum numunesi özelliğini kaybetmemesi için termal olarak kapalı numune kabında laboratuvar ortamına getirilir. Test işlemlerinin yapılması için 50x50 mm ebatlarında silindir kum numuneleri standartlara göre hazırlandı. Şekil 3.5' de standart kum testi için hazırlanan numune fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 3.5. 50x50 mm ebatlarında yağ kum testleri için hazırlanmış numune

Hazırlanan numuneler Simpson marka kum test cihazlarında test edildi. Döküm kumunun sıcaklığına, nem miktarına, yağ kesme mukavemetine, yağ basma mukavemetine, yağ çekme mukavemetine, gaz geçirgenliğine ve son olarak sıkıştırılabilirliğine bakıldı. Simpson marka test cihazları ve numune hazırlama aparatları Şekil 3.6’ da verilmiştir. Tolerans değerlere uyan döküm kumu kalıplara dönüştürülmek üzere yarı otomatik kalıplama hattı olan HFM’ e gönderildi. HFM döküm silosundan gelen kumu alt ve üst derecelere uygun kilo ve basınçla sıkıştırarak döküme hazır yağ kum kalıplar üretimi gerçekleştirdi.



Şekil 3.6. Simpson marka yağ kalıplama kumu test cihazları

Döküm kumundan istenen tolerans değerler her firmanın kendi bünyesinde yaptığı denemeler sonucu oluşturulur. Çalışmanın yapıldığı firmada tolerans değerler en az uygunsuz ürün çıkacak şekilde sabitlenmiş ve sürdürülebilirliğinde sorun çıkmamaktadır. Yaş kalıplama kumu test toleransları Tablo 3.6’ de verilmiştir.

Tablo 3.6. Yaş kalıplama kumundan istenen değerler aralığı

Yapılan Testler	Tolerans Aralıkları	Yapılan Testler	Tolerans Aralıkları
Kum Sıcaklığı	Max 40 °C	Yaş Çekme Mukavemeti	30 - 50 N/cm ²
Nem Miktarı	%3.5 – 5.5	Sıkıştırılabilirlik	%38 - 42
Yaş Kesme Mukavemeti	5 - 9 N/cm ²	Gaz Geçirgenliği	Min 50 cm ³
Yaş Basma Mukavemeti	17,50 - 25,00 N/cm ²		

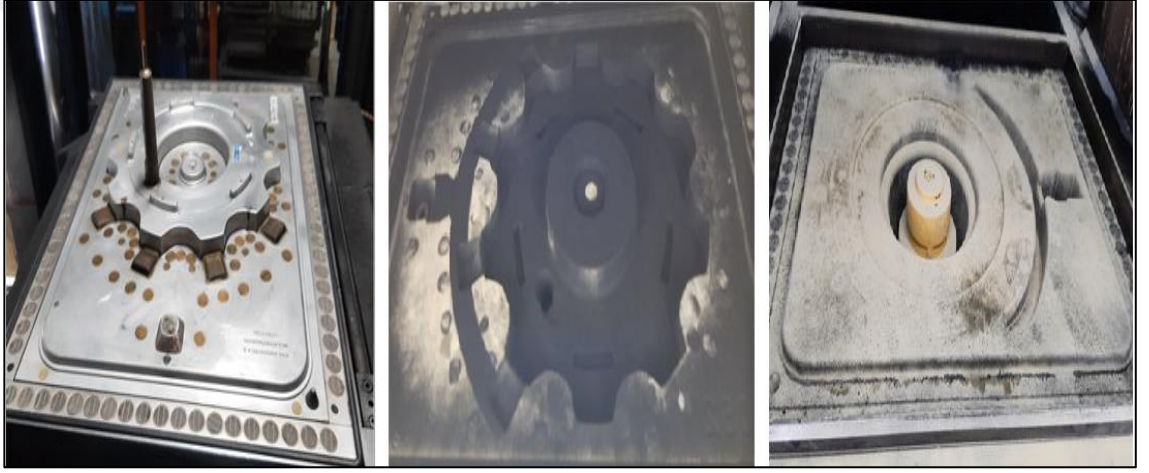
Maça kumu için ucuz ve mukavemetli olan silis kumu tercih edilmiştir. Tane büyüklüğü olarak 40 – 45 AFS silis kumu kullanılmıştır. Maça üretim uygulamalarından en yaygın olarak kullanılan soğuk kutu maça üretim metodu kullanıldı. Soğuk kutu maça üretiminde kum, katkı ve bağlayıcı belirli oranlarda karıştırılarak maça makinesine gönderilmiş ve içinden amingaz geçirilerek sertleşmesi sağlanmıştır. Daha sonra alkol bazlı vizkozitesi 13 olan maça boyası ile oluşturulan silis kumundan maça boyanmıştır. Maçanın boyanmasındaki amaç döküm yüzeyinin daha düşük pürüzlülük seviyesinde çıkması ve maça yüzeyine mukavemet kazandırmasıdır. Şekil 3.7’ de porya için üretilen maça verilmiştir.



Şekil 3.7. Silis kumundan yapılmış porya maçası

3.5. Kum Kalıpların Hazırlanması ve Kalıp Bozma Prosesi

Kum mikserinden gelen kumun dereceli kalıplama hattı olan HFM' in kum silosuna aktarımı yapıldı. Silodan 4 mm elek aralığından geçerek derece içine boşaltılan kumun, porya modellerinin şeklini alması sağlandı. Besleyici, cüruf tutucu köpük ve maça gibi eklentileri kum kalıba yerleştirildikten sonra dereceler kapatıldı. Üstlerine ağırlık koyulan dereceler döküm için hazır hale getirildi. Döküm sonrası parçaların 2 saatlik bir kalıpta bekleme süresi tutuldu. 2 saat süre içinde parçaların karbon ayrışması ile grafit çekirdeklenme mekanizması gerçekleşti. Parçalar kum kalıplardan sarsak yardımı ile çıkarıldı. Şekil 3.8' de kum kalıp üretim aşaması görselleri verilmiştir.



Şekil 3.8. Porya modeli, üst derece, alt derece fotoğrafları

3.6. Kumlama, Kesim, Taşlama ve Boyama Prosesi

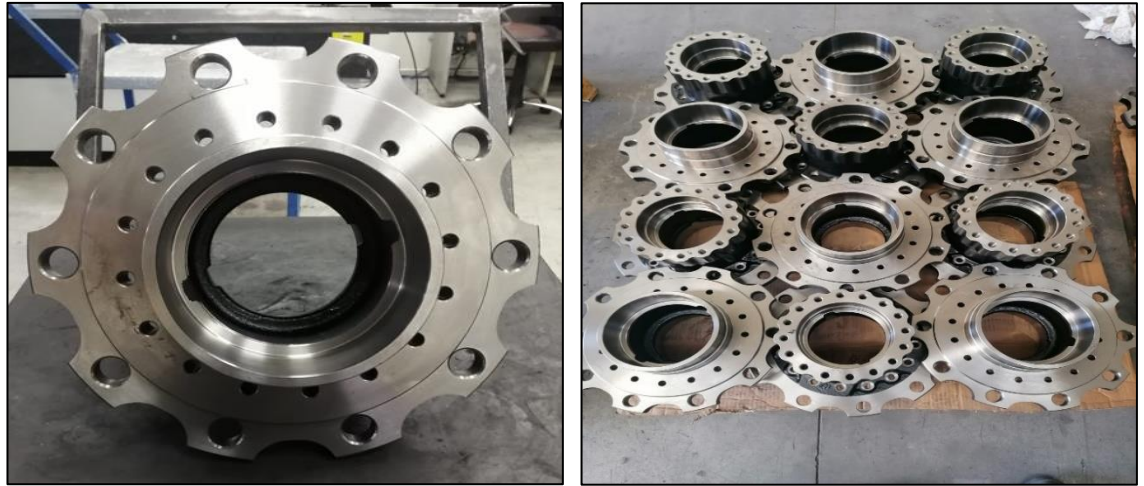
Kumlama işlemi ile parçaların silis kumundan yüzeyinin arındırılması gerçekleştirildi. Çelik granül bilyelerin yüksek hızda kum kalıptan çıkan parçaya gönderilmesi ile silis kumları parçadan temizlendi. Kumlama sonrası parçaların yolluk ve besleyicileri kesilerek ana parça çıkarıldı. Kesim işleminden sonra parçaların derece ayırma yüzeyi ve çapakları taşlanarak düzeltildi. Taşlama işleminde kullanılan taşlama diskleri olarak zirkon kumundan yapılmış diskler seçildi. Aynı marka aynı kalite diskler ile döküm serileri arasında disk sarfiyatı farkı belirlendi. Çapaklarından temizlenen parçalar korozyona dirençli olması için daldırma boya ile boyandı. Vizkozitesi 13 – 15 arası olan alkol bazlı siyah boya ile boyama işlemi gerçekleştirildi. Kalıpta çıkan porya, kumlama sonrası ve boyama sonrası fotoğrafları Şekil 3.9' da verilmiştir.



Şekil 3.9. Kum kalıptan çıkmış porya, kumlama sonrası taşlanmış porya, boyama sonrası porya

3.7. Talaşlı İmalat Prosesi

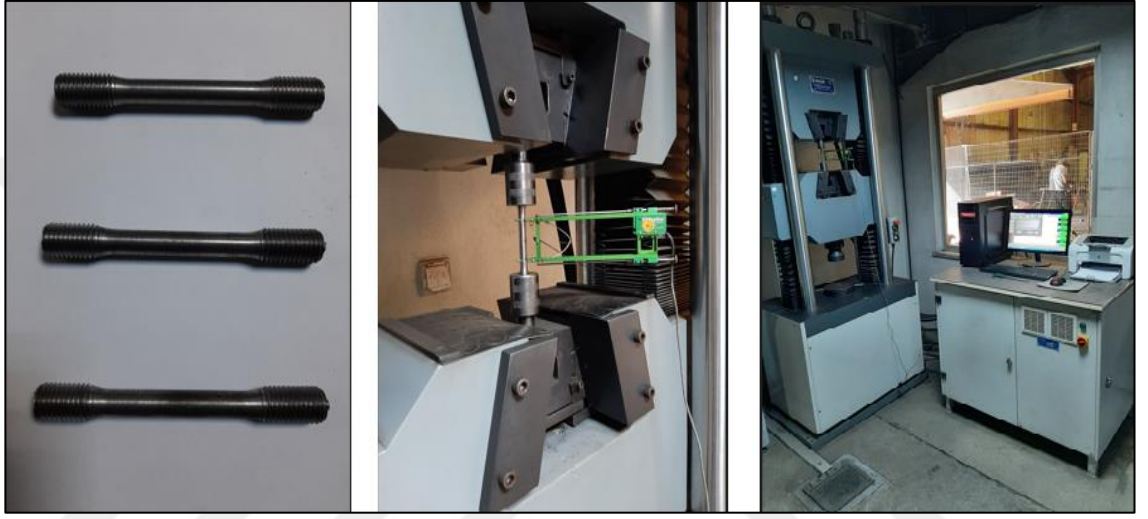
Talaşlı imalat bölümünde porya parçası 4 farklı operasyon ile işlenmesi tamamlanmaktadır. Her seriden üretilen poryaların elmas tüketimi kayıt altına alınarak ortalama parça başı ne kadar elmas tüketildiği hesaplandı. Porya üretiminde ilk operasyon olarak parçanın döküm yüzeyi kaba işlemeye tabi tutuldu. İkinci operasyon parçanın iç yüzeyi hassas olarak işlendi. Üçüncü operasyonda parçanın dış yüzeyi hassas olarak işlendi. Dördüncü ve son operasyonda ise parçanın bağlantı için delikleri açıldı. Kullanılan elmas ve işleyici uçların hepsi aynı kalite aynı marka olarak seçildi. Poryanın malzeme serisine göre elmas sarfiyatı hesaplandı. Şekil 3.10' da talaşlı imalat prosesi bitirilmiş paketlemeye hazır poryaların fotoğrafları bulunmaktadır.



Şekil 3.10. Talaşlı imalat sonrası montaja hazır araç poryaları

3.8. Çekme Testleri, Mikroyapı Analizleri ve Sertlik Ölçümleri

Çekme testi için dökülen poryaların, her serisinden ikişer adet çekme numunesi kesilerek alındı. Numuneler talaşlı imalat yöntemi ile EN 1563 standardına göre hazırlandı. Çekme testleri ALŞA marka çekme cihazında ekstansometreli olarak yapıldı. Çekme, akma ve uzama değerleri incelendi. Şekil 3.11’ de çekme çubukları, ekstansometre ve çekme cihazı görselleri verilmiştir.



Şekil 3.11. Çekme çubukları, ekstansometreli çekme testi, çekme testi cihazı

Mikroyapı analizi için her seri dökme demir poryadan numuneler alındı. Parçalar sulu kesim ile kesildi bu sayede mikroyapısal bir değişim veya yanıtıcı ısıl işleme maruz kalmadan numune alınabildi. Kesim sonrasında metalografik inceleme için 80/160/320/800 kum zımparalardan 400 rpm devirde zımpara ile yüzeyi hassas olarak düzeltilen numuneler parlatma keçesinde zımpara izleri kaybolana dek parlatılarak hazırlandı. Parlatma işlemi sonrası parçaların grafit oluşumları, grafit sayısı ve büyüklük dağılımları NİKON MA100 mikroskopta incelendi. Grafit incelemesi sonrası numuneler metallerin ve dökme demirler için çok yaygın kullanılan %5’ lik nital sıvısında daldırma yöntemi ile dağlandı. Nital dağlama sıvısı %95 etil alkol %5 saf nitrik asit içerir bir solüsyondur. Dağlama işlemi sonrası parçaların perlit-ferrit oranları ve yapıdaki karbür miktarı incelendi. Şekil 3.12’ de poryalardan mikroyapı, çekme testi, sertlik testi için numune alınan bölgeler ve numune hazırlama, inceleme cihazları görselleri verilmiştir. Porya büyük boyutlu bir parça olduğu için parçadan numune kesilerek incelemeleri gerçekleştirilebildi.



Şekil 3.12. Poryadan mikroyapı, çekme testi, sertlik testi için numune alınan bölge, zımparalama ve parlatma cihazı, MA100 NİKON mikroskop

Sertlik ölçümü için poryalardan alınan numuneler BMS-3000-OB marka brinell sertlik ölçüm cihazında test edildi. Brinell sertlik ölçümü TS EN ISO 6506 standardına göre yapıldı. Cihazın ölçüm öncesi kalibrasyonu standart kalibre blokları ile kontrol edilerek daha doğru sonuçlar alınması hedeflendi.

Poryalardan alınan numuneler sulu kesim ile sertliği korunarak kesildi. 180 kum zımparadan geçirilerek yüzeyleri sertlik ölçümü için hazırlandı. 3000 kg yük altında, 10 saniye yük uygulama süresinde, çapı 10 mm olan bilya kullanılarak numuneler üçer kez test edilerek ortalama sertlik değerleri alındı. Şekil 3.11’ de brinell sertlik ölçüm cihazı ve kadransında ölçüm sonucunu gösteren bilya derinliği görseli verilmiştir.



Şekil 3.13. BMS-3000-OB brinell sertlik ölçüm cihazı

BÖLÜM 4

BULGULAR

EN-GJS-600-3, EN-GJS-700-2 ve EN-GJS-600-10 serilerden üretilen poryaların, yapılan testleri, analizleri ve sarfiyatları karşılaştırılmıştır.

4.1. Çekme Testi Sonuçları ve Karşılaştırılması

GGG60 ve GGG70 malzemede istenilen standartlar ilk üretimde karşılanmıştır. Yeni nesil sfero dökme demirin üretimi için üç farklı reçete hazırlandı ve bu reçetelerden standartlara en yakın sonuçları veren reçete ile üretim gerçekleştirildi. Üretimi gerçekleştirilen dökme demir serisi malzemelerin kimyasal analizleri Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1. Porya üretiminde kullanılan dökme demir malzemelerin kimyasal analizleri

Malzeme Tanımı	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	Cr	Al	Mg
EN-GJS-600-3	3.42	2.44	0.15	0.02	0.013	0.07	0.041	0.033	0.00	0.04
EN-GJS-700-2	3.47	2.41	0.17	0.02	0.011	0.08	0.048	0.032	0.00	0.05
EN-GJS-600-10 Reçete 1	3.54	4.01	0.08	0.03	0.015	0.04	0.001	0.033	0.00	0.03
EN-GJS-600-10 Reçete 2	3.33	4.19	0.13	0.03	0.014	0.15	0.001	0.030	0.00	0.04
EN-GJS-600-10 Reçete 3	3.42	4.34	0.09	0.02	0.015	0.07	0.001	0.032	0.00	0.05

Yeni nesil sfero dökme demir için 2 Nolu reçete seçildi. Reçete 2 mekanik testleri sonuçları SSF dökme demir standartlarına en yakın olanı olarak tespit edildi. Dökme demir serisinin belirlenmesinde ilk kriter mekanik özellikleri olduğu için seçim mekanik

test sonuçlarına göre yapılmıştır. Malzemelerin mekanik test sonuçları Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.2. Porya üretiminde kullanılan dökme demir malzemelerin mekanik mukavemetleri

Malzeme Tanımı	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HB)
EN-GJS-600-3	637	388	5,5	234
EN-GJS-700-2	727	403	2,9	267
EN-GJS-600-10 Reçete 1	591	459	14	194
EN-GJS-600-10 Reçete 2	612	474	17	203
EN-GJS-600-10 Reçete 3	597	463	13	201

Dökme demir serilerinden standart üretim olan GGG60 ve GGG70 malzemelerin yeni nesil sfero dökme demir ile farkının detaylı incelenmesi için çekme testi grafikleri çıkarılmıştır. Çekme testi grafinde çekme testi sonucunu gösteren grafiğin alt kısmı malzemenin kırılana kadar absorbe ettiği enerjiyi yani tokluğunu gösteren bölümdür. Tokluk malzemenin enerji depolama ve soğurma yeteneğidir. Malzemenin birim hacimde ne kadar enerji absorbe edebileceğini tespit etmek için hesaplanması uygun integral formülü ile yapılır. Hesaplama formülü aşağıda verilmiştir. Malzemenin tokluğunun hesaplanması için grafikteki verilerin integral formülüne yerleştirilmesi ve sonucunun çıkarılması yapıldı.

$$\left\{ \int_0^{\epsilon_k} \sigma \cdot d\epsilon \right\} \quad (4.1)$$

ϵ_k : Malzemede kırılıncaya kadar meydana gelen birim şekil değiştirme

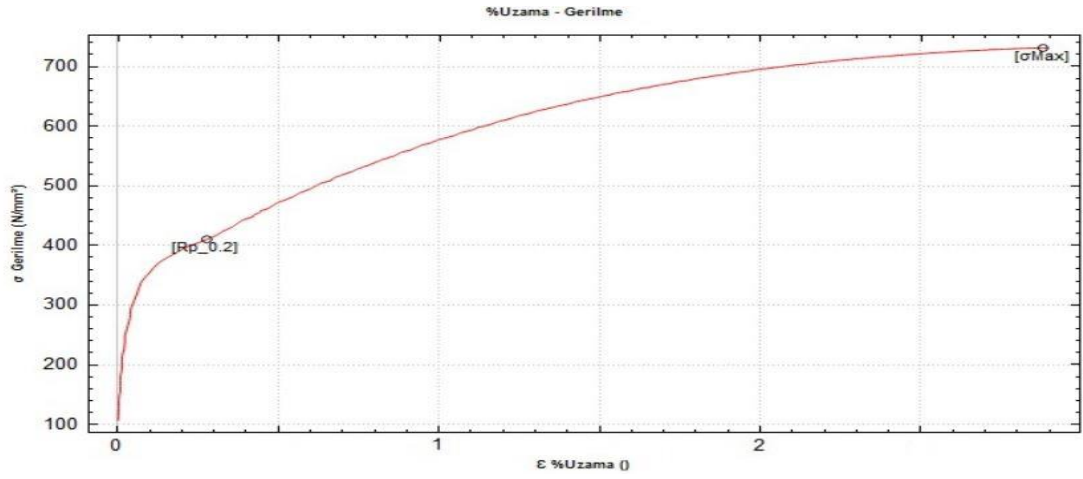
σ : Maksimum çekme mukavemeti

Tablo 4.3. Üretilen dökme demir serilerinin tokluğunun karşılaştırılması

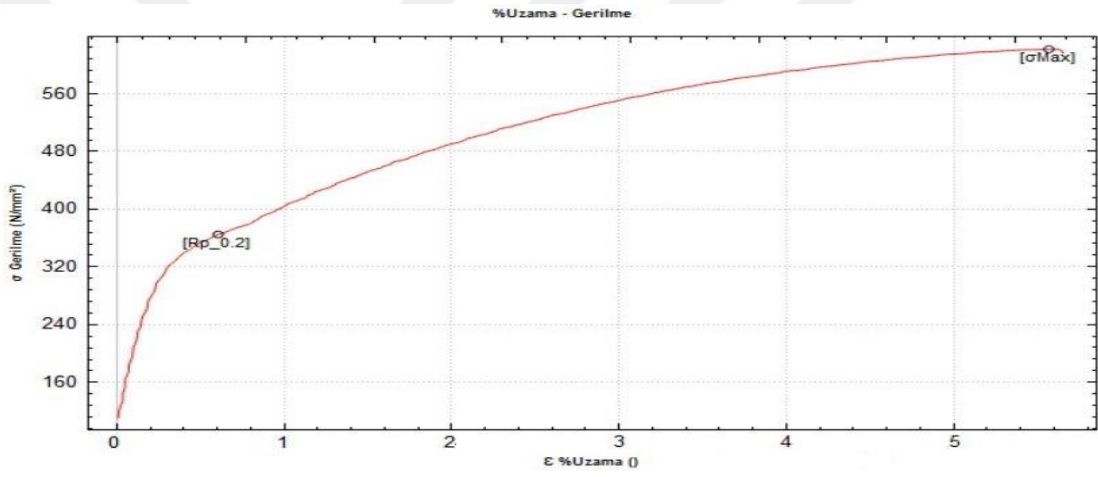
Malzeme Tanımı	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Tokluk (U _T)
EN-GJS-600-3	637	5,5	3503
EN-GJS-700-2	727	2,9	2108
EN-GJS-600-10	612	17	10404

Tablo 4.3’ de görüldüğü üzere yeni nesil sfero dökme demir malzemenin tokluk değeri birinci nesil dökme demirlere göre çok daha üstün çıkmıştır. GGG60 malzemeye göre 2,97 kat, GGG70 malzemeye göre ise 4,94 kat daha fazla tokluk göstererek öne çıkmaktadır. Tokluğun yüksek gelmesinin sebebi ise yeni nesil sfero dökme demir malzemenin iç yapısının tamamen ferritik ve homojen olmasıdır. Ferrit fazının içerisinde çözünen silisyum atomları katı çözültü sertleşmesi oluşturarak malzemenin hem yüksek mekanik mukavemetli hemde sünek olmasını sağlamaktadır. Birinci nesil dökme demirlerin yapısı ise perlit/ferrit karışık olduğundan daha kırılğan davranış göstererek tokluklarının düşük çıkmasına sebep olmuştur. Otomotiv sektöründe kullanılan parçaların kırılma anı, yani çekme mukavemetinin son kırılma noktası çok büyük önem arz etmektedir. Çünkü parça kırıldığında diğer parçalara ve insan sağlığına olumsuz etkileri olabilmektedir. Yeni nesil dökme demirden üretilen parça ise kırılmadan nispeten çelik gibi uzama değeri ve tokluk göstererek kırılğan olmayan bir dökme demir olduğunu göstermiştir. Parça çalıştığı yerde şekil olarak deforma olduğunda ve kırılmadığında araçta bazı sıkıntılar ve ses yaparak arızanın kolay tespit edilebilmesini sağlarken diğer yandan parçaların güvenliğini tehdit etmemektedir. Olası daha büyük ağızların daha tok bir malzeme kullanılarak giderilmesi sağlanabilmektedir. Kırılğan yapı malzeme kullanımında ise geri dönüşü olmayan ve çok daha maliyetli sonuçlar ile karşılaşmak kaçınılmazdır.

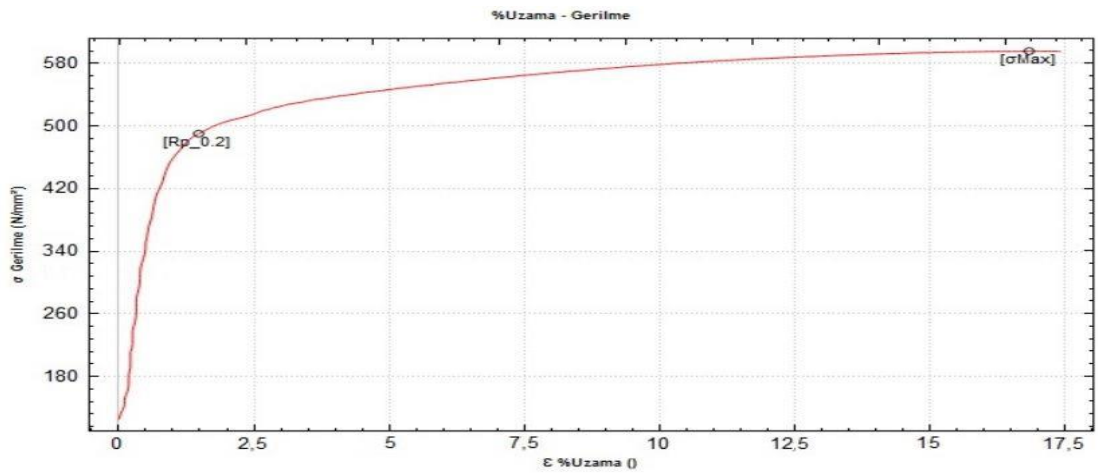
GGG60, GGG70 ve yeni nesil sfero dökme demir çekme testi grafikleri Şekil 4.1 – 4.2 – 4.3’ de verilmiştir.



Şekil 4.1. Üretilen GGG70 Malzeme çekme testi grafiği



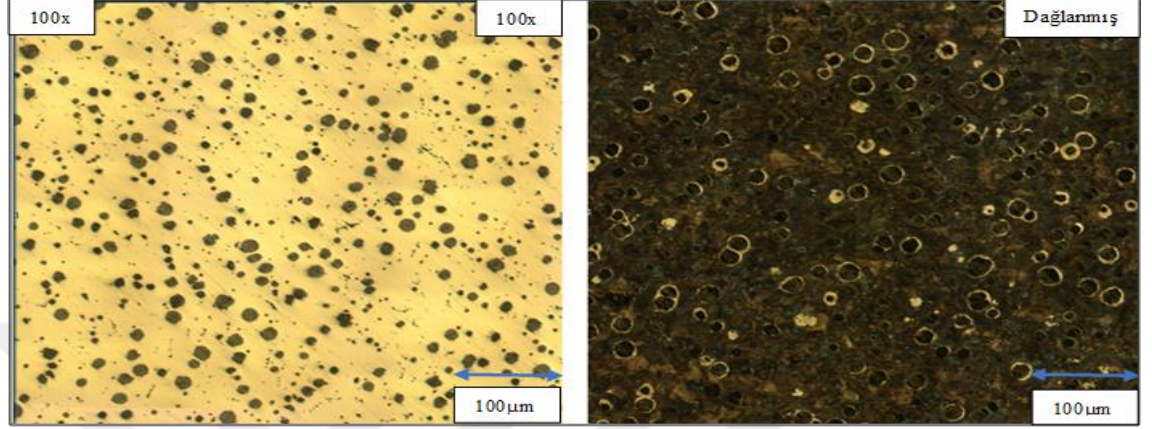
Şekil 4.2. Üretilen GGG60 Malzeme çekme testi grafiği



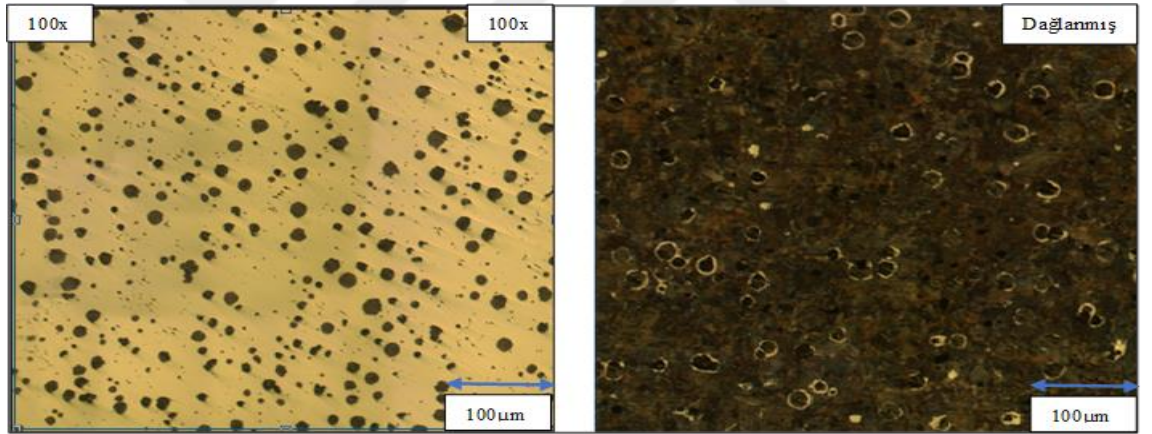
Şekil 4.3. Üretilen yeni nesil dökme demir malzeme çekme testi grafiği

4.2. Mikroyapı Fotoğrafları ve Karşılaştırılması

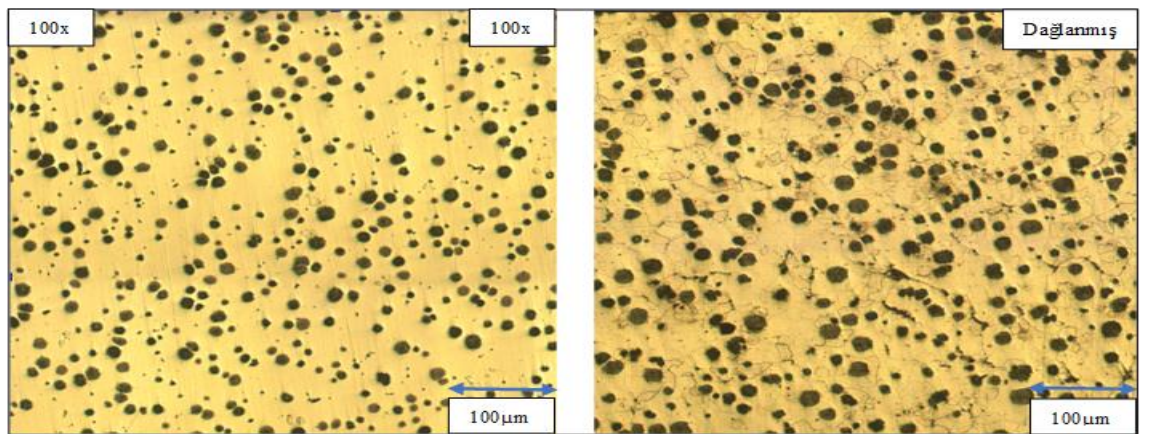
GGG60, GGG70 ve yeni nesil sfero dökme demirden üretilen poryalardan, alınan mikroyapı fotoğrafları Şekil 4.4 – 4.5 – 4.6’ de verilmiştir.



Şekil 4.4. GGG60 poryadan alınan mikroyapı fotoğrafı



Şekil 4.5. GGG70 poryadan alınan mikroyapı fotoğrafı



Şekil 4.6. Yeni nesil dökme demir poryadan alınan mikroyapı fotoğrafları

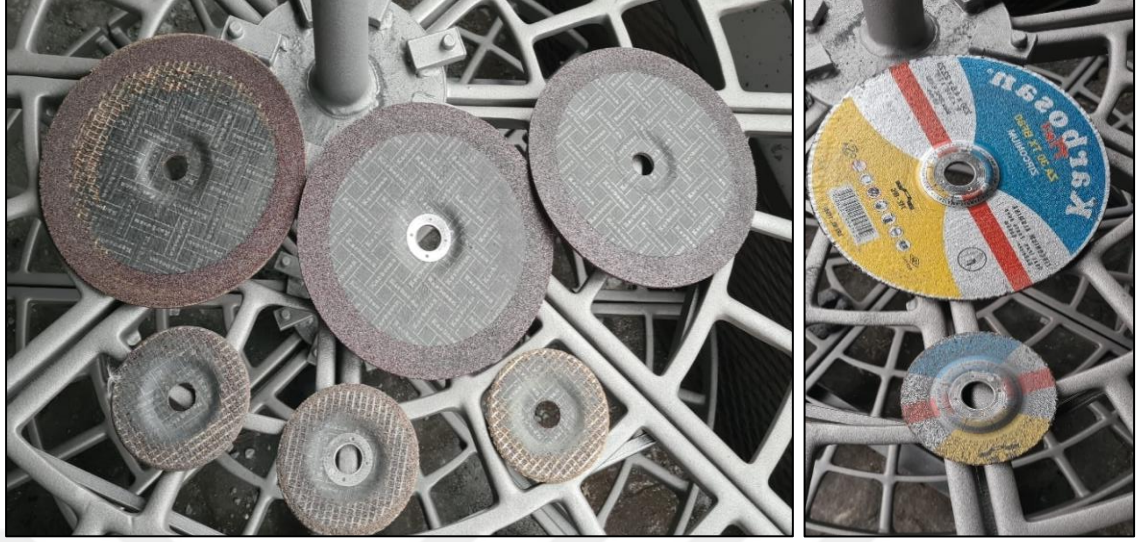
Mikroyapı numunelerinin standartlara uygun olduğu tespit edilmiştir. EN 1563 Standardına göre mikroyapıda %15 hataya izin verilmekte ve maksimum karbür oranı %5 olmalıdır. Mikroyapı numunelerinin hiçbirinde karbüre rastlanmamıştır. Hata olarak tanımlayabileceğimiz bir mikroyapı bozukluğuna da rastlanmamıştır. GGG60 ve GGG70 malzemenin dağlanmamış görüntülerinde SSF dökme demire göre daha az grafit oluşumu gözlemlenmiştir. Bunun sebeplerinden ilk olarak içerisinde bulunan silisyum grafit oluşumunu desteklemekte ve daha çok küre oluşturmaktadır. Küreselliğin azalmasında etkili olan elementlerden biriside kalaydır. Kalay elementi yüksek olması gereken dökümlerde kalay küreselliği bozmakta ve küreselliğin azalması ile küre sayısında da düşme gözlemlenmektedir. Kalay elementi perlit yapıcı bir element olarak kullanılmaktadır.

GGG60 malzemede 1 mm² alanda 290-300 küre bulunmakta, GGG70 malzemede 1mm² alanda 270-280 küre bulunmaktadır. SSF malzemede ise 1mm² alanda 330-340 küre bulunmaktadır. Mikroyapı fotoğraflar incelendiğinde üç seride de küre boy dağılımları irili ufaklı olarak homojen şekilde dağılmıştır. Homojen dağılması demek grafitleşme işleminin katılaştırmanın son anına kadar gerçekleştiğini göstermektedir. Homojen irili ufaklı dağılımda parça daha mukavemetli olmaktadır.

Dağlanmış olarak GGG60 malzemede %85 perlit %15 ferrit bulunmaktadır. Dağlanmış GGG70' de ise %95 perlit %5 ferrit bulunmaktadır. Dağlanmış yeni nesil dökme demirde ise %98 ferrit %2 perlit bulunmaktadır.

4.3. Üretim Sarfiyat ve Maliyetlerinin Karşılaştırılması

Parçaların döküm sonrası çapaklarının taşlanması için sarf malzeme olarak zirkon kumundan yapılmış taşlama diski kullanılmıştır. Kullanılan taşlama disklerinin hepsi dökme demir taşlamasına uygun olan karbosan marka aynı kalite taşlama diskleri seçilmiştir. Taşlama işlemi ise daha doğru sonuçlar verebilmesi için aynı operatör tarafından aynı metot ve yöntemler kullanılarak yapılmıştır. Taşlama disklerinin kullanım sarfiyatı aynı ebatlara geldiklerinde bırakılarak ürün başı sarfiyat hesaplanmıştır. Kullanılan taşlama taşlarının fotoğrafları Şekil 4.7' de verilmiştir.



Şekil 4.7. Karbosan marka, dökme demir ile uyumlu taşlama diskleri

GGG60, GGG70 ve SSF60 malzemelerin taşlama taşı, parça oranı ise sertlikleri ile ters orantılı olarak artmıştır. Tablo 4.4’ de fleks taşı sarfiyatına göre kaç adet parça taşlandığının tablosu verilmiştir.

Tablo 4.4. Taşlama diskleri, parça sarfiyat tablosu

Malzeme Tanımı	Taşlama Diski Adedi	Taşlanan Parça Adedi	Sertlik (HB)
EN-GJS-600-3	1	34	234
EN-GJS-700-2	1	31	267
EN-GJS-600-10	1	40	203

Parçaların üretiminde kullanılan en maliyetli sarf malzeme ise talaşlı imalat için kullanılan işleme uçlarıdır. Döküm parçaya en yüksek katma değeri katan ve maliyeti yüksek bir ürün olduğu için analizinin dikkatli takip edilerek tutulması gerekir. Parçalarda metalurjik açıdan sertlik farklılıkları, karbür oluşumu, inklüzyonlar gibi üretimsel etkenler yüzünden işleyici uç sarfiyatı artmaktadır. İşleyici uç sarfiyatı hesaplanırken parçanın yüzeyi kusursuz işlenmesi gerektiği için işleyici ucun kesinlikle körelmeden çıkarılması gerekir. Fakat karşılaştırma yapılması adına ilk talaşlı işlemde sonra parça yüzeyinde yolma, çizme gibi kusurlar oluşturuncaya kadar işleyici uçlar kullanıldı. Parça yüzeyinde yolma, rengi parlaktan fluya dönüştürmesi gibi etkenler olduğu anda uçlar çıkarılarak malzeme serisine göre işleyici uç sarfiyatı hesap edildi. Bu yöntem

kullanılarak GGG60, GGG70 ve yeni nesil sfero dökme demir poryalar işlenerek her bir seriye göre işleyici uç adedi, kaç parça işleyebildiği kayıt edildi. İşleyici uçların kullanım öncesi ve sonrası Şekil 4.8’ de verilmiştir.



Şekil 4.8. SECO marka, dökme demir ile uyumlu işleme uçları

Üretilen parçaların sertlikleri ile işleyici uç sarfiyatı ters orantılı olarak artmıştır. Çalışmada üretilen poryaların ortalama 1 işleyici uç ile kaç adedinin işlendiği Tablo 4.5’ de verilmiştir.

Tablo 4.5. İşleme ucu sarfiyat tablosu

Malzeme Tanımı	İşleme Ucu Adedi	İşlenen Parça Adedi	Sertlik (HB)
EN-GJS-600-3	1	15	234
EN-GJS-700-2	1	13	267
EN-GJS-600-10	1	20	203

Döküm serilerinin üretimi için ocağa girilen malzemelerin maliyet hesaplaması yapıldı. GGG60 ve GGG70 malzemelerin üretiminde yeni nesil dökme demirin içeriğinden farklı olarak kalay elementi eklenerek üretim yapıldı. Kalay saf olarak perlit yapıcı olduğu için kullanıldı. Yeni nesil sfero dökme demir üretimi için ise GGG60 ve GGG70 malzemelerin içeriğinden farklı olarak ferrosilis eklenerek üretim yapıldı. %75 silisyum içeren ferrosilis kullanıldı. Ocak maliyet hesapları 1 ton ergimiş metal üzerinden yapıldı. Ocağa ilave edilen ferroalyajlardan sadece kalay ve ferrosilisyum ilavelerinin hesaplaması ve karşılaştırılması Tablo 4.6’ de verilmiştir. Sadece bu iki ferroalyajın verilmesinin sebebi diğer eklenen ferroalyajların, reçeteler arası farklılık

göstermemesinden dolayı, karşılaştırmaya konulmasına gerek duyulmamıştır. Sarf edilen hammadde fiyatlarının kg bazında oranları işletmenin kendi özelini paylaşmamak adına sadece ağırlığına ‘Y’ ve fiyatına ‘N’ sembolü verilerek hesaplanmış olarak paylaşıldı.

Tablo 4.6. Ocak ferroalyaj ilaveleri birim maliyet karşılaştırması

Ocağa İlave Edilen Ferroalyaj	Ocak Metal Ağırlığı (Ton)	Eklenen Miktar (Kg)(Y)	Maliyet (TL)(N)
GGG60 Reçete Kalay Maliyeti	1	0,459	14,68
GGG70 Reçete Kalay Maliyeti	1	0,561	17,94
Yeni Nesil Döküm FeSi Maliyeti	1	14,96	104,77

Fiyat karşılaştırmasına göre saf kalay ile üretim, FeSi ile üretime göre sadece hammadde farkı olarak kalay elementi GGG60 döküm malzemesinde 7 kat, GGG70 malzemesinde 5 kat daha ucuza denk gelmektedir. Bu farkın çıkmasının sebeplerinden birisi de kullanılan hammaddelerin (döküm piki, çelik hurda, geri döndü gibi) eski nesil dökme demire göre seçilmiş olmasıdır. Yüksek silisyumlu çelik hurda, geri döndü ve döküm piki kullanıldığında bu maliyet farkı minimum seviyelere inecek veya kalayla üretimden çok daha ucuza mal olacaktır.

BÖLÜM 5

TARTIŞMA, SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışmada kullanılan serilerin testleri ve üretimi tamamen endüstriyel ortamlarda yapıldı. Sonuçlar düzenli bir şekilde veri toplanarak elde edildi. Üretimin her aşaması gözlemlenerek sonuçlar çıkarıldı.

Yeni nesil sfero dökme demir, eski nesil sfero dökme demire göre daha homojen yapılı ve sertliğinin düşük olması sayesinde üretim sırasındaki sarfiyatını minimuma çekti. Homojen bir mikroyapı sayesinde, döküm içerisinde bulunan zararlı elementlerde homojen bir şekilde dağılarak birikme eğilimi gösteremedi. Sertliğinde daha düşük olması sayesinde işleyici takım ucu ve taşlama taşı sarfiyatını minimuma düşürdü. Fakat yeni nesil dökme demir üretiminde silisyum ve eski nesil dökme demir üretiminde kalay elementi kullanım maliyeti karşılaştırıldığında silisyum daha maliyetli geldi. Bunun sebebi ise üretim için kullanılan çelik hurda, döküm piki gibi hammaddelerin birinci nesil dökme demir için olarak alınmış olmasıdır. Yüksek silisyumlu dökme demir ve döküm piki tercih edildiğinde ek olarak kilolarca FeSi eklemek yerine istenen analiz çok rahat tutturulabilecektir ve bunun karşılığında üretim maliyeti konusunda da daha düşük maliyetle üretim yapmak mümkün olabilecektir.

Mikroyapıdan perlitin kaldırılması ile malzeme daha tok bir yapıya sahip oldu. Bunun etkisi akma dayanımının yükselmesi ile gözlemlendi. Akma dayanımı malzemenin şekil değiştirmeden dayanabileceği maksimum yüküdür. Araç poryasında çekme dayanımı değil akma dayanımı çok daha önemli bir yer almaktadır. Çünkü şekil değiştirmeden parçanın boyut toleransını koruması gerekir. İstenen akma dayanımı limit değerinden çok daha fazlasını karşıladığı için parça boyutunda küçülmeye giderek parçanın daha hafif, daha az yer kaplaması sağlanabilecektir. Otomotiv sektöründe parça ağırlığının düşürülmesi doğrudan yakıt tüketimi ile alakalıdır. Parça ağırlığı düşürülerek doğrudan yakıt tüketimi de azaltılabilecektir.

Silisyum katı çözeltili oluşturularak yapıyı mukavemetlendirmesi ve karbür oluşumunu engellemesi ile yeni nesil dökme demirleri eski nesil dökme demirlere göre daha avantajlı kılınmaktadır. Silisyum küresel grafitli dökme demirde grafit oluşumuna katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte sıvı demirin akışkanlığını arttırmaktadır. Tez kapsamında incelenen EN-GJS-600-10 üretimindeki en önemli element silisyumdur. Katı çözeltili sertleştirilmesi ile üretilen yeni nesil sfero dökme demirlerin bir diğer avantajıda parça kesit kalınlığına göre sertlik değişimlerinin düşük olmasıdır. Yapı tamamen homojen ferrit olduğundan parça et kalınlığı değişimlerinde sadece soğutma hızından dolayı sertlik farklılıkları görülmektedir. Birinci nesil dökme demirlerde ise mikroyapıdaki perlit oranı arttıkça sertlik artmaktadır. İkinci nesil dökme demir sertliğinde mikroyapısal sertlik değişimleri ortadan kaldırılmış olmaktadır.

Yeni nesil dökme demir günümüzde henüz çok yaygın olarak kullanılmamaktadır. Genellikle % 95' e kadar eski nesil üretim tercih edilmektedir. Bunun sebebi ise eski usul babadan kalma teknikler ile çağa ayak uydurmanın zorlaşmasıdır. Sabit müşteri istekleri ve sabit döküm usulleri ile çağa ayak uydurmak maalesef ki zorlaşmaktadır. Fakat bu alanda yapılan yenilikçi çalışmalar ve denemeler bunun önüne geçerek daha uygun üretim ve daha uygun maliyetler hedeflenmektedir.

Çağımızın en önemli sorunlarından birisi rekabet gücüdür. Rekabet gücünü elde tutabilmek için müşteriye daha fazla ürün yelpazesi, daha kaliteli ürün ve daha az maliyetli ürün sunulması gerekmektedir. Bu özellikleri sağlayabilmek için güncel olarak teknolojiyi ve üretim yöntemlerini takip ederek üretim alanına optimizasyon yapmak gerekir. Döküm teknikleri konusunda güncel çağa ayak uydurmak için bu tezde birçok makale ve kitaptan alıntıya yer verilmiş ve uygulama olarak denemesi yapılmıştır. Sonuçları sade bir dil ile derlenerek araştırmacıların okumasına sunulmuştur.

KAYNAKLAR

1. İnternet: Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği ‘Döküm Tarihi’
<https://tudoksad.org.tr/dokum-tarihi>
2. Arda ÇETİN, ‘Dökümhane El Kitabı’ 3. Sayı, Eylül, 2016
3. Arda ÇETİN, ‘Dökümhane El Kitabı’ 2. Sayı, Eylül, 2016
4. İnternet: Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği ‘Dünya Döküm Üretimi İstatistikleri’
<https://tudoksad.org.tr/afs-53-dunya-dokum-uretimi-istatistikleri-yayinlandi>
5. Yılmaz, F. ‘İçme - Atık Su ve Gaz Dağıtım Şebekelerinde Dökme Demirler ve Düktil Demir Uygulamaları’ İstanbul Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi, 9-10, İstanbul, 2003
6. Baydoğan, M. ‘GGG-60 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirde Östemperleme Isıl İşleminin Çekme, Yorulma ve Aşınma Özelliklerine Etkisi’ *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1996
7. ASM Metals Handbook, ‘Properties And Selection: Iron, Steels and High Performance Alloys’ Vol.1, Tenth Edition, ASM International, 1990
8. Çelik, Ö. ‘Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışları’ *Yüksek Lisans Tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001
9. İnternet: Slayt Oynatıcı ‘Faz Kavramı’ <https://slideplayer.biz.tr/slide/13942516/>
10. Çavuşoğlu, E. N. ‘Döküm Teknolojisi I’ İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya-Metalurji Fakültesi Ofset Atölyesi, 355-409, İstanbul, 1992
11. Yazganoğlu, A. N. ‘Dökme Demir Grubu’ Tükeltmat A.Ş., 153-194, İzmir, 2010
12. İnternet: Alpha Metalurji Motorlu Taşıt İmalat Anonim Şirketi ‘Beynit Yapı’
<https://www.aht.com.tr/beynit/yapi/nedir-beynit-yapi-nasil-elde-edilir/>
13. ASM Metals Handbook Casting, Vol.15, Tenth Edition, ASM International, 1992
14. B. Duit, S. Değirmenci, B. Şirin. ‘EN-1563 New Generation Ductile Irons (Solid Solution Strengthened Ductile Irons)’ Proceedings of the Ankiros 7th International Foundry Congress, 2014
15. W. Stets, H. Löblich, G. Gassner, P. Schumacher. ‘Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron: Properties, Production and Application’ 8th International Journal of Metalcasting, 2014
16. Orkas J., Peura P., ‘Optimization Of Solid Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron Production By Thermal Analysis and Solidification Simulation’, 2016

17. H. Lin, T. Lui, L. Chen., ‘Effect Of Silicon Content On Intergranular Embrittlement Of Ferritic Spheroidal Graphite Cast Iron Suffered From Cyclic’ Materials Transactions. 44, 2003
18. R. Kallbom, K.Hamberg, M.Wessen, L.E. Björkegren, ‘On The Solidification Sequence Of Ductile Iron Castings Chunky Graphite’ Materials Science and Engineering A, 413-414, 346-351, 2006
19. EN 1563:2011. Founding – ‘Spheroidal Graphite Cast Irons’ European Committee for Standardization 2011
20. İnternet: Dökümhane Akademi Açık Eğitim Platformu ‘Ek Kaynaklar’
<https://dokumhane.net/wp-content/uploads/2019/02/EI-Kitabi-03.pdf>
21. İnternet: Malzemelerin Bilimi ve Mühendislik Sitesi ‘Korozyon Nedir’
<https://malzemebilimi.net/korozyon-nedir-korozyon-turleri-nelerdir.html>
22. İnternet: Elektronik Kütüphane ‘Dökme Demirlerin Korozyonu’
<https://docplayer.biz.tr/30317257-Dokme-demirlerin-korozyonu-prof-dr-aysegul-ak-dogan-eker.html>
23. İnternet: Polen İtü Akademik Açık Arşivi ‘Katı Çözelti Sertleşmesi’
<https://polen.itu.edu.tr:8443/server/api/core/bitstreams/1404ac38-d32a-46fb-9433-cea82f5524cb/content>
24. İnternet: Arabam Com İnternet ve Bilgi Hizmetleri Anonim Şirketi ‘Tekerlek Poryası’
<https://www.arabam.com/blog/danisman/tekerlek-poyrasi-nedir-degisimi-nasil-yapilir/>
25. İnternet: Mühendislik ve Malzeme Bilimi Okulu ‘Cast Iron’ <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2004/adi3/adi3-Pages/Image87.html>
26. İnternet: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Mesleki Haberler ‘Çekme Dayanımı’
https://yandex.com.tr/gorsel/search?from=tabbar&text=%C3%A7ekme%20diyagram%C4%B1&pos=24&img_url=https%3A%2F%2Fwww.metalurjik.com%2Fwp-content%2Fuploads%2Fcekme-deneyi.jpg&rpt=simage