



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



KATI ÇÖZELTİYLE GÜÇLENDİRİLMİŞ
FERRİTİK SFERO DÖKME DEMİRLERİN
ÜRETİMİ

Ali Rıza CANBİLEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Anabilim Dalı

Şubat-2022
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ali Rıza Canbilen tarafından hazırlanan “Katı Çözeltiliyle Güçlendirilmiş Ferritik Sfero Dökme Demirlerin Üretimi” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÇETİNKAYA

.....

Danışman

Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ARICI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 201019036 nolu proje ile desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Ali Rıza CANBİLEN

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATI ÇÖZELTİYLE GÜÇLENDİRİLMİŞ FERRİTİK SFERO DÖKME DEMİRLERİN ÜRETİMİ

Ali Rıza CANBİLEN

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM

2022, 36 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM
Dr. Öğr. Üyesi Zeynep ÇETİNKAYA
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ARICI

Bu tez çalışmasında yeni nesil küresel grafitli dökme demirlerin geleneksel yöntemlerle üretilenlerden farklı ve üstün özellikleri tespit edilmiştir. Özellikle son yıllarda ülkemizde de yaygınlaşmaya başlayan bu özel üretim yöntemi hakkında ayrıntılı bilgiler verilmekle birlikte numunelerin üretimi yapılmıştır. Sanayi iş birliği ile üretimi gerçekleştirilmiş olan parçalar çeşitli mekanik ve kimyasal testlere tabi tutulmuş olup sonuçlar geleneksel yöntem ile üretilen numuneler ile karşılaştırılmıştır. Üretilen yeni nesil katı çözelti ile güçlendirilmiş ferritik küresel dökme demir numunesinin 600 MPa dayanıma ulaşırken, uzama değerinin de %10 ve üzerinde olduğu gözlenmiştir. Benzer miktarda dayanıma sahip birinci nesil dökme demirlerde uzama değeri %3 civarında olduğundan üretilen numunenin benzer şartlar altında çok daha sünek olduğu ve aynı zamanda da mekanik özelliklerinin çok daha üstün olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan mikroyapı çalışması, matris yapısının %80' in üzerinde ferritik yapıda olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla benzer kalitedeki birinci nesil dökme demirlerle ferrit perlit oranının tamamen zıtlık gösterdiği ve bunun sonucunda, birinci neslin aksine parçaların her yerinde homojen özellik gösterdiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Katı Çözelti Sertleşmesi, Küresel Grafitli Dökme Demir, SSF, Yeni Nesil Dökme Demirler.

ABSTRACT

MS THESIS

PRODUCTION OF SOLUTION STRENGTHED FERRITIC DUCTILE CAST IRONS

Ali Rıza CANBİLEN

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Metallurgical and Materials Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM

2022, 36 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM
Assist. Prof. Dr. Zeynep ÇETİNKAYA
Assist. Prof. Dr. Gökhan ARICI**

The novel and advanced characteristics of the next generation solution-strengthened ferritic ductile cast irons compared to the conventional methods are investigated in this thesis study. Detailed information is provided about this specific production technique, which has been very popular especially within the last few years, and samples are produced. The models produced in cooperation with the industry are tested both mechanically and chemically, and the obtained results are compared to the models produced by conventional methods. It is observed that the produced sample of next generation solid solution strengthened ferritic cast iron reached to 600 MPa resistance for an elongation value of 20% and above. Since a similar resistance value can be obtained with an elongation value of approximately 3% for the first generation cast iron, it is concluded that the produced sample is much more ductile under similar conditions, and the mechanical characteristics of the produced sample are more superior. The realized microstructure study shows that the matrix structure is more than 80% ferritic. Hence, it is concluded that the ferrite-perlite rate is just the opposite of the similar quality first generation cast iron, and thus, a homogeneous characteristic can be observed all over the sample on the contrary of the first generation.

Keywords: Ductile Iron, New Generation Ductile Iron, SSF, Solid Solution Strengthening

ÖNSÖZ

Çalışmalarında değerli bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren ve yardımını esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM' a, numunelerin üretim ve test aşamasında her türlü desteği sağlayan başta Metalurji ve Malzeme Mühendisi Erdal ÜNÜR olmak üzere tüm Canbilenler Döküm Makine Sanayi Limited Şirketi AR-GE ve Üretim birimi çalışanlarına ve yetkililerine; son olarak da tez yazım aşamasında her türlü maddi ve manevi katkılarından dolayı eşim Elektrik-Elektronik Mühendisi Dr. Öğr. Üyesi Ayşe Elif CANBİLEN' e teşekkürü bir borç bilirim.

Ali Rıza CANBİLEN
KONYA-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Dökme Demirler.....	1
1.1.1. Karbür	3
1.1.2. Ferrit.....	4
1.1.3. Perlit.....	4
1.1.4. Grafit.....	4
1.2. Küresel Grafitli Dökme Demirler	5
1.3. Katı Çözelti ile Güçlendirilmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler.....	6
1.4. Katı Çözelti Sertleşmesi.....	8
1.5. Alaşım Elementlerinin Küresel Grafitli Dökme Demirler Üzerinde Etkisi	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	11
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	13
3.1. Üretim	13
3.1.1. Parça Seçimi ve Döküm Simülasyonu	13
3.1.2. Döküm Modeli ve Döküm Kalıbı	14
3.1.3. Ergitme İşlemi.....	15
3.1.4. Hammadeler.....	16
3.1.5. Döküm İşlemi	17
3.2. Karakterizasyon	17
3.2.1. Termal Analiz	17
3.2.2. Kimyasal Analiz	18
3.2.3. Mikroyapı Analizi.....	18
3.2.4. Sertlik Testi.....	20
3.2.5. Çekme Testi	21
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	23
4.1. Simülasyon Sonuçları	23
4.2. Kimyasal Analiz Sonuçları	24
4.3. Mikroyapı Analizi Sonuçları	25
4.4. Çekme Analizi Sonuçları	31
4.5. Sertlik Testi Sonuçları	32

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	34
5.1 Sonuçlar	34
5.2 Öneriler	34
KAYNAKLAR	35



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Mo	: Molibden
Mn	: Mangan
Ni	: Nikel
Fe ₃ C	: Karbür

Kısaltmalar

SSF	: Katı Çözelti ile Güçlendirilmiş Dökme Demir (Solution Strengthened Ferritic Ductile Cast Iron)
ADI	: Östemperlenmiş Dökme Demirler (Austempered Ductile Iron)
CE	: Karbon Eş Değeri

1. GİRİŞ

20. yüzyılın ilk yarısının sonunda ortaya çıkan dökme demir türüne “küresel grafitli dökme demir” adı verilmiştir. Yaklaşık %2-%3 oranları arasında silisyum içeren bu dökme demirlerin matris yapılarına bakıldığında, ferrit, perlit ya da bu ikisinin karışımından meydana geldikleri görülmektedir. Malzemenin yapısında bulunan perlit; malzemeyi güçlendiren, fakat malzemenin sünekliğini düşüren bir etki yaratmaktadır. Dolayısıyla yapıdaki ferrit ve perlit miktarında değişimler yaparak, istenen mekanik özelliklere (dayanım, sertlik, uzama miktarı vb.) ulaşılması sağlanabilmektedir (Anonim, 2011).

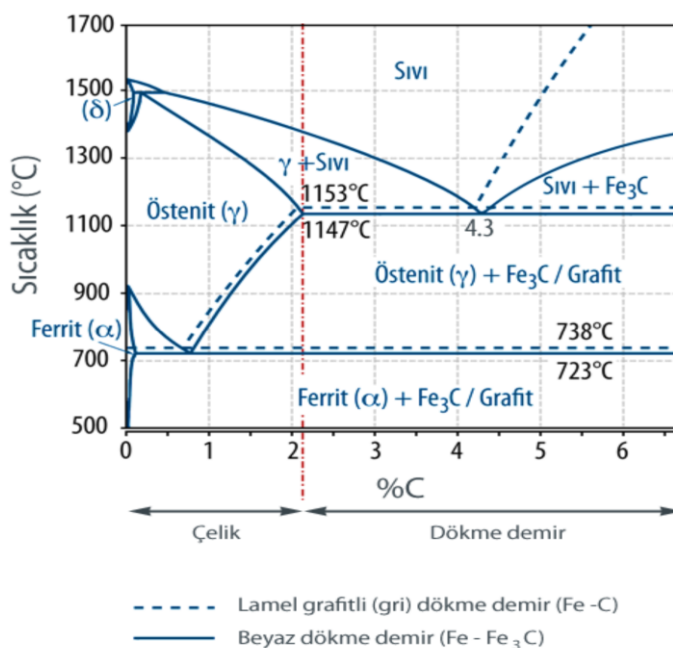
Katı çözelti ile güçlendirilmiş ferritik sfero dökme demir olarak da adlandırılan yeni küresel grafitli dökme demir türü; hem EN 1563, hem de östemperlenmiş sfero dökme demir (austempered ductile iron, ADI) EN 1564 standardında tanımlanmıştır. Geleneksel dökme demirlerin matris yapısının homojen olmaması, doğal olarak dayanım, süneklik ve sertlik gibi özelliklerin de malzemenin her yerinde homojen davranış sergileyemeyeceğini göstermektedir. Tamamıyla ferritik bir yapı sergileyen yeni nesil dökme demirlerde ise parça genelinde mekanik özelliklerin oldukça homojen olduğu görülmektedir. Ferritik sfero dökme demirlerde, perlitin sağladığı güçlendirici etkiden yararlanılmamaktadır. Bunun yerine katı çözelti sertleşmesi ile dayanımı artırılmaktadır. Katı çözelti sertleşmesi mekanizmasının gerçekleşmesini sağlayan element ise silisyumdur. Ferritik sfero dökme demir malzemelerin dayanımları, içerdikleri yüksek silisyum sayesinde oluşturdıkları katı çözelti sertleşmesiyle artmaktadır.

Bu tez çalışmasında yeni nesil dökme demirlerin üretiminin yapılması ve birinci nesil dökme demirlerle mekanik ve kimyasal özelliklerinin karşılaştırılması hedeflenmiştir. Materyal ve yöntem kısmına geçmeden önce dökme demirlerin genel yapısından ve özelliklerinden bahsedilmiş; ayrıca küresel grafitli dökme demir ve katı çözelti ile güçlendirilmiş ferritik küresel grafitli dökme demir (solution strengthened ferritic ductile cast iron, SSF) hakkındaki kısa bilgiler verilmiştir.

1.1. Dökme Demirler

Karbon oranı %2,11 - %6,67 arasında olan demir karbon alaşımlarına dökme demir adı verilir (Davis, 1996). Şekil 1.1’ de demir karbon denge diyagramı

görülmektedir. Bu diyagramdan faydalanılarak demir karbon alaşımlarının hangi sıcaklıkta ve kompozisyonda hangi fazlarda bulunduğu tespit edilebilmektedir.



Sekil 1.1. Demir-karbon denge diyagramı (Anonim, 2022).

Dökme demirler bir demir karbon alaşımları olarak adlandırılmasının yanı sıra bir takım alaşım elementleri ile beraber üretilmektedir. Bu alaşım elementlerinin başında silisyum gelmektedir. Birinci nesil olarak adlandırılan dökme demirlerde silisyum miktarı %1-%4 arasında değişim göstermektedir. Ayrıca demir, karbon, silisyum gibi temel yapıtaşlarının yanında eser miktarda başka alaşım elementlerini (Cu, Cr, Ni, Mn, Mo gibi) de içermektedir. Bunlara ilave olarak, dökme demirlerde yine eser miktarda fosfor ve kükürte de rastlanabilmektedir (Özusta, 2021). Şekil 1.2’ de tipik dökme demir türlerinin kimyasal analizleri yer almaktadır.

ELEMENTLER	GRİ DÖKME DEMİR %	BEYAZ DÖKME DEMİR %	YÜKSEK DAYANIMLI ESMER DÖKME DEMİR %	KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR %	TEMPER DÖKME DEMİR %
KARBON	2,50-4,00	1,80-3,60	2,80-3,30	3,00-4,00	2,00-3,00
SİLİSYUM	1,00-3,00	0,50-1,90	1,40-2,00	1,80-2,80	1,00-1,80
MANGANEZ	0,40-1,00	0,25-0,80	0,50-0,80	0,15-0,90	0,20-0,50
FOSFOR	0,05-1,00	0,06-0,18	0,15 Max	0,10 Max	0,01-0,10
KÜKÜRT	0,05-0,25	0,06-0,20	0,12 Max	0,03 Max	0,02-0,17

Şekil 1.2. Dökme demirlerin kimyasal analizleri (Anonim, 2021).

Dökme demirlerin yapısında bulunan karbon ve demir elementlerinin yanı sıra diğer alaşım elementleri de kompozisyonu etkilemektedir. Bu etki üzerine yapılan çalışmalarda bazı elementlerin dökme demirlerin sıvılaşma sıcaklığını ve ötektik noktayı da etkilediği sonucuna varılmıştır ve bu sonuçla beraber karbon eş değeri kavramı da ortaya çıkmıştır. Bu etkinin en fazla görüldüğü elementler silisyum ve fosfor elementleridir. Karbon eş değeri hesabı ile demir karbon denge diyagramı üzerinde kompozisyonun ötektik noktaya olan mesafesi belirlenip oluşabilecek bazı döküm hatalarının engellenmesi sağlanabilmektedir. Karbon eş değeri hesabı aşağıdaki gibi yapılabilmektedir:

$$CE = \%C + \frac{\%Si + \%P}{3} \quad (1)$$

Buradaki CE değeri karbon eş değerini, C karbon elementini, Si silisyum elementini ve P fosfor elementini sembolize etmektedir. Karbon eş değerini daha yüksek hassasiyetle tespit edilebilmek için sıvılaşma karbon eş değeri de kullanılmaktadır. Sıvılaşma karbon eş değeri hesabı ise aşağıdaki eşitlik ile yapılmaktadır:

$$CEL = \%C + \frac{\%Si}{4} + \frac{\%P}{2} \quad (2)$$

Dökme demirin yapısal bileşenleri ayrı tipte dökme demirlerin ve değişik şekilli grafitlerin oluşumuna neden olur. En önemli yapı ve bileşen türleri bu bölümde alt başlıklar halinde verilmiştir.

1.1.1. Karbür

Karbür, dökme demirlerde demir ve karbon atomlarının yaptığı bileşiğe verilen addır. Sementit olarak da adlandırılan ve Fe_3C ile sembolize edilen karbür, çok sert ve kırılğan bir yapıdadır. Bu sebeple karbür miktarı fazla olan dökme demirler de aynı şekilde sert ve kırılğan yapıya sahip olmaktadır (Çetin, 2016).

1.1.2. Ferrit

Ferrit; demir ile karbonun oluşturduğu yumuşak, sünek ve orta derecede mukavemetli bir katı eriyik ya da çözünmüş karbon içeren demir olarak tanımlanabilmektedir. Yapısal açıdan değerlendirildiğinde; dökme demirlerde ferrit ya serbest halde ya da perlit içinde oluşabilmektedir (Çetin, 2016).

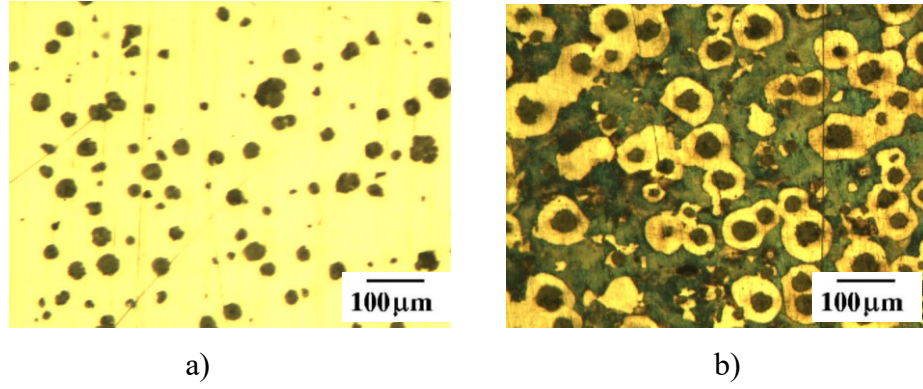
1.1.3. Perlit

Perlit; sementit adı verilen karbür yapısının ve ferritin bir karışımı olarak tanımlanmaktadır. Katmanlı olarak sıralanmış ferrit ve sementit tabakalarının oluşmuş iki fazın karışımı olan perlit dökme demirlerde; nispeten mukavemetli, orta sertlikte bir yapıdadır. Birinci nesil dökme demirlerde ferrit perlit oranı, mekanik değerlerin istenilen seviyede olmasını sağlamakta önemli faktörlerin başında gelmektedir. Bu oranı kimyasal analiz, soğuma hızı vb. faktörler etkilemektedir. Soğuma hızı açısından değerlendirildiğinde farklı kesit kalınlıklarından oluşan parçanın, daha ince olan kısımları hızlı soğuduğu için daha fazla perlit oranına sahip olmaktadır. Perlit oranının parça genelinde farklılık göstermesi geniş bir aralıkta parça sertliği, uzama ve mukavemet oluşturmaktadır (Çetin, 2016).

1.1.4. Grafit

Grafit; saf karbon atomlarından meydana gelen bir fazdır. Dökme demirlerde yüksek ısı iletkenliği ve düşük yoğunluğu en önemli özellikleri olarak sayılabilmektedir (Çetin, 2016).

Şekil 1.3.a' da küresel grafitli dökme demirlerin parlatılmış mikroyapı görüntüleri, Şekil 1.3.b' de ise dağlanmış mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Yine Şekil 1.3.b' de görülen küresel yapılar grafiti, koyu yeşil renkli yapılar perlit ve grafitlerin etrafındaki açık renkli yapılar ise ferriti göstermektedir.



Şekil 1.3. Geleneksel küresel grafitli dökme demirlerin mikroyapısı (Canbilenler Döküm):
a) parlatılmış görüntü b) dağlanmış görüntü.

Dökme demirler; grafitin biçimsel özelliklerine, dökme demirlerin kompozisyonuna ve karbonun dökme demirlerin yapısında bulunma şekline göre sınıflandırılabilirler. Grafitin biçimsel özelliklerine göre sınıflandırma; lamel grafitli küresel grafitli ve vermiküler grafitli dökme demir olarak yapılmaktadır. Dökme demirlerin kompozisyonuna göre yapılan sınıflandırmada dökme demirler; ötektik, ötektik üstü, ötektik altı ve alaşımlı dökme demirler olarak adlandırılırlar. Son olarak karbonun dökme demirlerin yapısında bulunma şekline göre ise; beyaz dökme demir, gri dökme demir, benekli dökme demir ve temper dökme demir olarak adlandırılmaktadır.

1.2. Küresel Grafitli Dökme Demirler

Gri dökme demir yapısındaki lamel grafitler, sahip olduğu keskin köşeler sebebiyle bilhassa mekanik özelliklerde oluşturduğu dezavantajlar ve kırılma-laştırmanın tespitinden sonra 1940' ların başında yapılan çalışmalar sonucu 1948 yılında düzenlenen AFS kongresinde British Iron Research Association ekibi grafit yapraklarını seryum ilavesi ile küreselleştirebildiklerini açıklamışlardır. Fakat aynı dönemlerde Amerikan International Nickel Company Firması daha öncesinde bu malzemeyi bulduklarını ilan etmiş ve patentini alarak küresel grafitli dökme demirin icadına kendi isimlerini yazdırmayı başarmışlardır (Çetin, 2016).

Küresel grafitli dökme demirlerde serbest karbon küre şeklindedir. Grafitin küre şeklini almasını sağlayan elementler Mg, Ca, Ce ve diğer toprak alkali metallerdir. Küresel grafitli dökme demirleri, lamel grafitli dökme demirlerden kimyasal analiz bakımından ayıran en önemli özellik bu elementlerin ilavesidir. Ayrıca daha düşük

orana sahip mangan, kükürt ve fosfor gibi elementlerin bulunması da önemli farklar arasındadır.

Küresel grafitli dökme demirler mekanik özellikler bakımından ise daha yüksek süneklik ve daha iyi bir akma dayanımına sahiptirler.

1.3. Katı Çözelti ile Güçlendirilmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler

20. yüzyılın sonlarında birinci nesil olarak adlandırılabilen küresel grafitli dökme demirlerde matris yapısının homojen olmaması, dayanım, süneklik ve sertlik gibi değerlerin malzemenin her yerinde homojen davranmayacağını göstermektedir. Bu durum mekanik parçanın, kesitlerine göre farklı davranış sergilemesine sebep olmakla beraber işleme vb. ikincil işlemleri de zorlaştırmaktadır.

İkinci nesil olarak adlandırılabilen katı çözelti ile güçlendirilmiş ferritik küresel grafitli dökme demirlerin (SSF) en önemli özelliklerinden biri tamamıyla ferritik bir yapı sergiledikleri için, parça genelinde mekanik özelliklerin oldukça homojen olmasıdır. Yapının neredeyse tamamen ferritik olması, perlit oranının en fazla %5 ve serbest sementit miktarının da en fazla %1 olması istenmektedir (Björkegren ve ark., 2003; Olsson, 2011; Prihti, 2011).

Çizelge 1.1’de sarı renkli olan ikinci nesil dökme demirler ile beyaz renkte olan birinci nesil dökme demirler arasındaki kimyasal analiz farkı görülmektedir. En önemli farkların karbon miktarı daha düşük iken silisyum miktarının katı çözelti sertleşmesi oluşturacak olması sebebiyle çok daha yüksek olmasıdır.

Kalite arttıkça birinci nesilde ihtiyaç duyulan bakır vb. alaşım elementlerine ihtiyaç duyulmamaktadır. Bu durum bakırın perlit oluşumunu arttıran etkisini ortadan kaldırmakla beraber aynı zamanda maliyet olarak da avantaj yaratmaktadır.

Çizelge 1.1. Küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal analizi (Çetin, 2016).

Malzeme Adı	C	Si	Mn	Cu
GJS 450-10	3,5-3,7	2,0-2,5	<0,5	0,10-0,25
GJS 450-18	3,1-3,3	3,2	<0,5	<0,1
GJS 500-7	3,5-3,7	2,0-2,5	<0,5	0,3-0,4
GJS 500-14	3,0-3,2	3,8	<0,5	<0,1
GJS 600-3	3,5-3,7	2,0-2,5	<0,5	0,4-0,5
GJS 600-10	2,8-3,0	4,3	<0,5	<0,1
GJS 700-2	3,5-3,7	2,0-2,5	<0,5	0,8-1,0

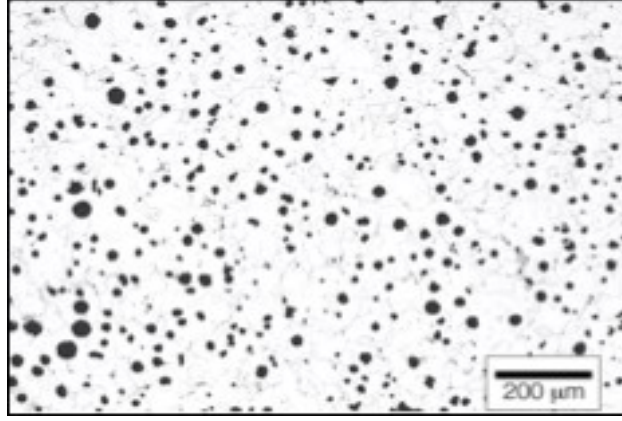
Yine birinci ve ikinci nesil dökme demirlerdeki önemli farklar mekanik testler sonucunda ortaya çıkmaktadır. Aşağıdaki tabloda koyu renkteki SSF malzemelerinin aynı kalitedeki birinci nesile göre benzer çekme dayanımı gösterirken, birinci nesile göre çok daha fazla uzama gösterdiği gözlemlenmektedir. Bu durum daha sünek bir malzeme olmalarının yanında sertlik ve dayanımlarının da aynı oranda yüksek olduğunu göstermektedir (Çetin, 2016).

Özetle SSF, bileşimindeki yüksek silisyum değeri nedeniyle aynı değerlerde uzama performansına sahip geleneksel dökme demirlere oranla daha yüksek dayanım sergilemektedir. Katı çözelti sertleşmesi, aynı zamanda malzemelerin akma dayanımını da arttırmaktadır. Ayrıca yüksek silisyum miktarı sayesinde ötektoid dönüşüm sıcaklığı da yüksektir. Bu sayede üretilen parçalar yüksek sıcaklıkta da daha iyi performans gösterebilmektedir.

Çizelge 1.2. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri (Çetin, 2016).

Malzeme Adı	Akma Dayanımı	Çekme Dayanımı	Uzama	Brinell Sertlik Değeri	Elastite Modülü
EN-GJS-400-18-LT	200	400	18	130-175	169
EN-GJS-450-10	310	450	10	160-210	169
EN-GJS-450-18	350	450	18	170-200	170
EN-GJS-500-7	320	500	7	170-230	169
EN-GJS-500-14	400	500	14	185-215	170
EN-GJS-600-3	370	600	3	190-270	174
EN-GJS-600-10	470	600	10	200-230	170
EN-GJS-700-2	420	700	2	225-305	176
EN-GJS-800-2	480	800	2	245-335	176
EN-GJS-900-2	600	900	2	270-360	176

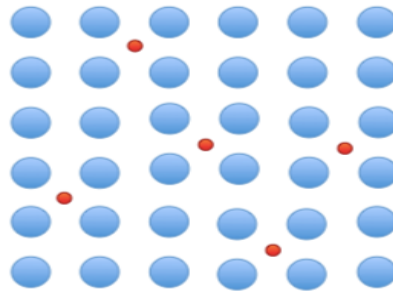
Şekil 1.4 'te dağlama sonrası 200 büyütme altında mikroskopta incelenen bir katı çözelti ile güçlendirilmiş ferritik dökme demir görüntüsü verilmiştir. Bu şekil incelendiğinde beyaz bölgelerin yoğunlukta olduğu başka bir deyişle yapının neredeyse tamamen ferritik olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum SSF parçanın her yerinde homojen mekanik özellikler göstermesini sağlamaktadır.



Şekil 1.4. Dağlama sonrası SSF mikroyapısı (Çetin, 2016).

1.4. Katı Çözelti Sertleşmesi

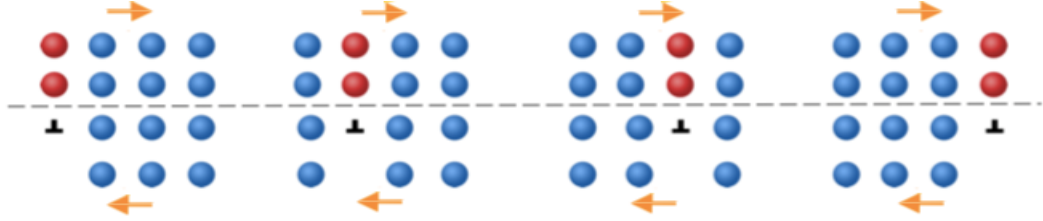
Bir malzemenin kimyasal analizinin dayanımının alaşım elementi takviyesiyle artırılması prosesine alaşım sertleşmesi adı verilir. Alaşım elementini saf metal içerisinde çözerek tek fazlı bir yapı oluşturulması durumu ise “katı çözelti sertleşmesi” olarak isimlendirilmektedir (Callister,2000). Şekil 1.5’ te bir katı çözeltinin temsili bir gösterimi verilmiştir. Bu şekilde atomları mavi ve kırmızı renklerle gösterilen iki farklı element görülmektedir. Atomları kırmızı renkle gösterilen element, mavi renkli diğer elementin atomlarının oluşturduğu kristal içinde çözünerek bir katı çözelti oluşmasını sağlamış; diğer bir deyişle katı çözelti sertleşmesi meydana gelmiştir.



Şekil 1.5. Katı çözelti temsili gösterimi (Çetin, 2016).

Kristal yapıya sahip bir metal ya da alaşımı güçlendirmek için dislokasyon hareketinin, yani atom düzlemlerinin birbirleri üzerindeki kayma becerisinin kısıtlanması gerekmektedir. Dislokasyon hareketi, Şekil 1.6’ daki gibi kırmızı renkli yarım düzlemlerin mavi renkli düzlemlerle yer değiştirmesi sonucu alt ve üst kısımların birbirine göre kayması ile gerçekleşir. Bu şekildeki yarım düzlemin alt kısmında ters T

ile gösterilen dislokasyon çizgisi kayma miktarını gözlemede kullanılmaktadır. Dislokasyon hareketini engellemenin en basit yollarından bir tanesi, kayan bu düzlemlerin çevrelerine bazı engeller yerleştirmektir. Böylece bu düzlemler sabitlenerek durdurulabilmekte ve malzemenin yüke karşı direnci, yani dayanımı arttırılabilmektedir.



Şekil 1.6. Dislokasyon hareketi (Çetin, 2016).

1.5. Alaşım Elementlerinin Küresel Grafitli Dökme Demirler Üzerinde Etkisi

Karbon: Karbon oranının artması küresel grafitlerin hacim oranının artmasına neden olduğundan mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir (Baydoğan, 1996). Karbon miktarının çok fazla olması akışkanlığı olumsuz etkilemektedir.

Silisyum: Silisyum elementi grafitleşmeyi büyük oranda desteklemektedir. Küresel grafitlere yakın bölgede yüksek oranlarda görülür (Baydoğan, 1996). Demir karbür oluşum hızını azaltırlar. Bunun yanında çil oluşumunu azalttığından dökme demirin akışkanlığını arttırıcı etkisi de vardır.

Magnezyum: Magnezyum elementi küresel grafit oluşumu için gereklidir. Genel olarak %0,04 ile %0,06 arasında bulunur. Çok düşük olması durumunda kompakt grafitli dökme demir oluşabilmektedir, çok yüksek olması durumunda ise cüruf oluşumunu arttırmaktadır (Davis, 1996).

Fosfor: Küresel grafitli dökme demirlerin sünekliğini düşürmesinden dolayı minimum düzeyde olması istenmektedir (Davis, 1996).

Kükürt: Fosfor gibi minimum düzeyde tutulması gereken elementlerden biridir.

Molibden: Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerde sıklıkla kullanılan bir elementtir. Sertliği arttıran en etkili elementlerden biridir (Krishnaraj, 1992). Özellikle bakırla beraber etkisi güçlüdür. Yüksek molibden seviyelerinde güçlü segregasyon eğiliminden dolayı %0,3 ile sınırlandırılmalıdır (Mi, 1994).

Bakır: Bakır elementinin en önemli etkisi sertliği ve mukavemeti arttırmasıdır. Perlit oluşumunu desteklediğinden özellikle SSF için kullanımı önerilmemektedir.

Krom: Dökme demirlerde yüzde 0,005 in üzerinde karbür, çil ve perlit oluşturur. Mukavemeti artırır.

Kalsiyum: Kalsiyum oranı yüzde 0,01'in altında kaldığında küre sayısını ve grafit çekirdeklenmesini artırır.

Baryum: Yüzde 0,003'ün altında olduğunda grafit çekirdeklenmesini iyileştirmektedir. Ayrıca aşılama ve tretman etkisini azaltmayı engellemektedir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

1940'lı yılların sonlarına doğru ilk kez tanıtılan küresel grafitli dökme demir, tüm dökme demir türleri arasında mekanik özellikleri açısından çeliğe en yakın tür olarak bilinir (Çelik, 2001; Larker 2008). 1950'lerde birinci nesil dökme demirlerin üretiminin ardından çok çeşitli çalışmalar yapılmış olsa da ikinci nesil olarak adlandırabileceğimiz katı çözeltili ile güçlendirilmiş ferritik küresel dökme demirler standartlara 2010 yılında girmesinden dolayı konu ile ilgili çalışmalar kısıtlı sayıdadır. Birinci nesle göre oldukça avantajlı mekanik, kimyasal vb. özelliklerinden dolayı popülerliği her geçen gün artmaktadır.

Nová ve ark. (2009) yaptıkları SSF üretiminde kimyasal analizdeki silisyum değerini yüzde 3,92 olarak belirleyerek farklı kesitlerdeki parçaların sertlik değerlerini karşılaştırmışlardır. 5 ile 55 mm arasında değişen kalınlıklardaki parçaların sertlik değerlerinin 193 HB ile 201 HB arasında olduğu tespit edilmiştir. Tamamen perlitik yapıda olmasından dolayı kesit kalınlığı değiştiğinde dahi sertlik aralığının fazla değişmediği sonucuna ulaşmışlardır. Bu sayede birinci nesil küresel grafitli dökme demirlere göre daha iyi işlenebilirliğe sahip olduğu yorumunda bulunmuşlardır.

Torre ve ark. (2014) silisyum oranının mekanik özellikleri nasıl değiştirdiğini inceledikleri çalışmada silisyum oranını yüzde 3 ve üzerinde belirleyerek farklı mekanik testler yapmışlardır. Yaptıkları çekme testi; silisyum oranı arttıkça akma ve çekme dayanımları ile sertlik değerinde artış olduğunu, uzama ve darbe özellikleri bakımından ise azalma olduğunu göstermiştir.

Stets ve ark. (2014), yeni nesil dökme demirin özelliklerini, üretimini ve uygulamalarını incelemiş ve gerçekleştirdikleri çalışmada alaşım elementlerinin mekanik özelliklere etkisi ile beraber ikinci neslin işleme özelliklerinin de daha iyi olduğunu vurgulamışlardır. Ayrıca yine bu çalışmada silisyum elementi miktarı doğru ayarlanmadığında oluşabilecek döküm hatalarından bahsetmişlerdir. Silisyum oranı %2,4'ten %4,3'e kadar çıktığında çekme dayanımının da arttığını; %4,3 silisyum oranını aştıktan sonra ise çekme dayanımının düşmeye başladığını gözlemlemişlerdir. Grafitte oluşan bozulma ile dayanımın azaldığı ve kırılma etkisi ortaya çıktığı sonucuna ulaşmışlardır. Silisyum oranının %4,3'ü aşması sonucu uzama değeri de düşmeye başlamıştır ve %5 silisyum oranını aştıktan sonra uzama sıfıra yaklaşmıştır.

Okunnu (2015) yapmış olduğu araştırmada bu malzeme türünü (SSF) maliyet açısından da ele almıştır. Yeni nesil küresel grafitli dökme demirlerin hem işleme maliyetinin hem de malzeme ağırlığının daha düşük olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Glavas ve ark. (2016), yaptıkları çalışmada daha çok kimyasal analizin mekanik özelliklere etkisi üzerinde durmuş olup silisyum miktarının yüzde 4,22 ve üzerine çıkmasıyla beraber mekanik özelliklerin güçlendiği kanısına varmışlardır. Ancak yapılan araştırmalarda silisyum miktarı yüzde 4,6 ve üzerine çıktığında Chunky grafit adı verilen döküm hatasının ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Chunky grafit ile beraber mekanik değerlerin düştüğu ve küresel yapının bozulduğu sonucuna ulaşılmuştır.

Scruton (2018) yaptığı tez çalışmasında ferritik yapıda bulunan SSF malzemenin içeriğinde bulunan ve malzemenin perlitik olmasına sebebiyet veren bakır ve manganez elementlerinin miktarındaki farklılığın parçanın dayanımına ve parçadaki perlit oranına olan etkisini incelemiştir.

Ülkemizde yapılan çalışmalarda İstanbul Teknik Üniversitesinden Yürektürk (2018), yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlere uygulanan östemperleme ve alüminyumlama işlemlerinin malzeme özelliklerine etkisi üzerinde çalışmış olup geleneksel dökme demirlere sıklıkla uygulanan östemperleme işlemini katı çözelti sertleşmesi uygulanmış yüksek silisyumlu dökme demire uygulandığındaki sonuçlarını incelemiştir. Elde edilen bulgular yüksek silisyumlu östemperlenmiş dökme demirlerin geleneksel östemperlenmiş dökme demirlere göre daha yüksek dayanım ve daha yüksek süneklik gösterdiğini ortaya koymuştur.

Tuzer (2020), mekanik özelliklerdeki dökme demirlerin işlenebilirliklerinin karşılaştırılması incelemiş ve işlenebilirlik olarak SSF' in avantaj ve dezavantajlarından bahsetmiştir.

Tüm bu çalışmalar değerlendirildiğinde ikinci nesil dökme demirlerin birinci nesle göre oldukça üstün özelliklere sahip olmasına rağmen hem dünya çapında hem de ülkemizde bu alanda gerçekleştirilen çalışmaların oldukça kısıtlı olduğu fark edilmektedir. Bu tez çalışmasında bu malzemelerin üretimi sağlanarak çeşitli testlere tabi tutulmuş ve ülkemizde bu alanda yapılan çalışmalara katkıda bulunulmuştur.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tez çalışmasında önceki bölümlerde bahsedilen yeni nesil küresel grafitli dökme demir olarak nitelendirilen katı çözelti ile güçlendirilmiş ferritik küresel grafitli dökme demirler üretilmiştir. Farklı kimyasal bileşimlerle üretilen yeni nesil dökme demirlerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri incelenmiş olup elde edilen veriler geleneksel dökme demirlerin mikroyapı ve mekanik özellikleri ile kıyaslanmıştır.

3.1. Üretim

Tez kapsamında belirlenen dökme demirler Konya Organize Sanayi Bölgesi'nde faaliyet gösteren Canbilenler Döküm ve Makine Sanayi Limited Şirketi'nde geleneksel kum kalıba döküm yöntemi ile üretilmiştir. Çalışma, üretimle gerçek zamanlı olarak yapılmıştır. Çalışma kapsamında üretim; kalıp hazırlama, ergitme, küreselleştirme, kum kalıba döküm ve kalıp bozma işlemlerini kapsamaktadır.

3.1.1 Parça Seçimi ve Döküm Simülasyonu

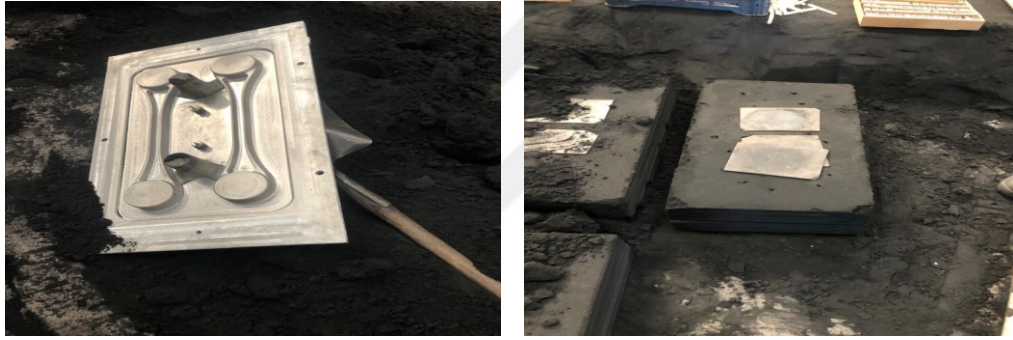
Çalışma kapsamında elde edilecek sonuçların daha sağlıklı yorumlanabilmesi için hem parça hem de çekme numunesi (bloğu) dökümü yapılmıştır. Parça üzerinde değişen kesit kalınlığına ve geometriye bağlı olarak mikroyapı ve sertlik analizi gerçekleştirilmiştir. Çekme bloğundan elde edilen numunelerde ise bu analizlere ilaveten standartlara uygun olarak çekme testi yapılmıştır.

Öncelikli olarak inceleme yapılacak parçanın seçimi yapılmıştır. Bu kapsamda yeni nesil dökme demirden üretilmesi cazip olan ağır vasıta araçların arka aks süspansiyon parçalarından çeki kolunun üretimine karar verilmiştir. Ağır vasıta araçların süspansiyon parçalarından çeki kollarının hali hazırda kullanılan geleneksel sfero (küresel grafitli) dökme demir yerine yeni nesil katı çözelti ile güçlendirilmiş (SSF) sfero dökme demirden üretilmesi planlanmıştır. Çeki kolu süspansiyon sisteminin bir parçası olup ağır ticari araçlarda aksı şaseye bağlamak için kullanılan bağlantı elemanıdır. Süspansiyon sisteminde önemli bir güvenlik parçası olan çeki kollarının yeni nesil araçlarda süspansiyon ve yük kapasitesine bağlı olarak üst düzey mekanik özelliklere sahip olması gerekmektedir.



Şekil 3.2. Alüminyum döküm modeli.

Kum kalıba döküm yöntemi ile üretim için SiO_2 bileşimindeki silis kumu kullanılmış olup bağlayıcı olarak bentonit, yüzey kalitesi için de kömür tozu ilave edilmiştir. Su ilavesi ile istenilen nem oranı sağlanarak, oluşturulan döküm kumu ile birlikte Şekil 3.3’ te görüldüğü gibi parçanın kalıplanması tamamlanmıştır.



Şekil 3.3. Alüminyum döküm modeli ve kum kalıp.

3.1.3 Ergitme İşlemi

Çalışma kapsamındaki dökme demirlerin ergitme işleminde 1500 kg kapasiteli Inductotherm marka indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Kullanılan ocak 750 kW güce sahip orta frekanslı olup dualtrack özelliklidir. Şekil 3.4’te gösterilen indüksiyon ocağında üç farklı yeni nesil dökme demirin üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.4. İndüksiyon ocağı.

3.1.4 Hammaddeler

Malzeme üretiminde temel hammaddeler olarak sfero piki, hurda yolluk, saç hurdası ve bir takım ferro-alyajlar kullanılmıştır. Kullanılan sfero pikinin analizi Şekil 3.5’ te görülmektedir.

ERGİME NOKTASI	SİMGESİ		KÜLÇE	
1150 °C	Fe			
KİMYASAL ANALİZ				
%C	% Si	%P	%Mn	%S
3,8-4,6	0,7-1 0,8-1 0,9-1,1	0,015 Max 0,010 Max 0,016-0,018	0,030 Max	0,030 Max 0,035 Max

Şekil 3.5. Sfero piki analizi (Anonim, 2022).

Sac hurda analizinde yüzde 99,58 oranında demir, yüzde 0,23 mangan, yüzde 0,038 karbon ve yüzde 0,039 oranında silisyum elementi bulunmaktadır.

Ferro-alyaj olarak yüzde 6,2 ile 6,8 arası magnezyum, yüzde 45 silisyum ve yüzde 1,8 oranında kalsiyum içeren ferro-silika magnezyum kullanılmıştır. Bunların yanında ferro silisyum, baryum içeren FeSiHBa bileşimine sahip aşılایıcı, sfero karbonu ve silisyum karbür kullanılmıştır.

3.1.5. Döküm İşlemi

Deney numunelerinin elde edilmesi için 3 farklı üretim yapılmıştır. İlk iki denemede dikey döküm potası, üçüncü denemede ise yatay döküm potası kullanılmıştır. Yatay döküm potasında magnezyum tretman işleminin daha verimli olduğu görülmüştür.

Yapılan denemelerde aynı marka ve model aşı ve magnezyum kullanılmış olup miktarları üzerinde değişim yapılmıştır. İlk iki denemede 1 ton ağırlığındaki maden için 5 kg magnezyum ve 2 kg aşı kullanılmış olup 3 no.lu denemede magnezyum miktarı sabit tutularak aşı miktarı iki katına çıkarılmıştır.

Birinci nesil dökme demir üretilirken yaklaşık 10–15 kg arası silisyum kullanılırken yeni nesilde ortalama 25–35 kg arası silisyum kullanılmıştır.

Maden, döküm için indüksiyon ocağında 1620 °C' ye kadar ısıtılıp yaklaşık 1520 °C' de magnezyum tretmanı yapılarak kum kalıba döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

3.2. Karakterizasyon

3.2.1 Termal Analiz

Soğumakta ve katılaşmakta olan bir metal alaşımının sıcaklığının takip ve analiz edilmesine termal analiz adı verilmektedir. Bir kap içerisindeki soğumakta olan metal alaşımının tam sıvılaşma ve tam katılaşma sıcaklığı düzlemleri, karbon eşdeğerinin, karbonun ve silisyumun hesaplanmasına olanak sağlamaktadır (Anonim, 2021). Üretilen numunelerin termal analizleri Heraeus marka Quik-Lab E Wireless cihazı ile yapılmıştır. Karbon eş değeri hesabının hassas olarak yapılabilirdiği bu cihazlarla CE değeri 4.2 belirlenerek karbon ve silisyum oranı ayarlanmıştır. Bu cihaz Şekil 3.6' da görülmektedir.



Şekil 3.6. Termal analiz cihazı.

3.2.2. Kimyasal Analiz

Kimyasal analiz numune içerisindeki elementlerin yüzdesini belirlemeye yarayan işlemdir. Elektrik akımı verilen numunelerin farklı ışıma yapmaları sonucu her elementin kendine has spektrum çizgisi göstermesiyle ayrıntılı sonuçlar elde edilir.

Bu testler spektrometre adı verilen cihazlarla yapılmaktadır. Bu çalışmada Şekil 3.7’ de görülen ARL marka spektrometre kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Kimyasal analiz cihazı.

3.2.3. Mikroyapı Analizi

Üretilen numune, mikroyapı analizi öncesinde birtakım ön işlemlerden geçirilmiştir. Bunlardan ilki olan kesme işlemi, Şekil 3.8’ de gösterilen Remet TR80 Evolution marka cihazla yapılmıştır.



Şekil 3.8. Numune kesme cihazı (Remet TR80 Evolution).

Kesme sonrasında Şekil 3.9’ da görülen Tronic PG-2B marka ve modele sahip cihazla zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Zımparalar sert ve aşındırıcı nitelikte SiC veya Al_2O_3 taneciklerinin suya dayanıklı kâğıt veya kumaş üzerine yapıştırılması ile üretilmektedir. Zımparalar bu aşındırıcı taneciklerin boyutuna göre numaralandırılmaktadır. Numaralar, aşındırıcı tanelerin elendiği mesh sayısını, yani 1 inç uzunlukta kaç delik olduğunu göstermektedir. Bu nedenle zımpara numarası arttıkça toz boyutu küçülür ve zımpara incelir. Zımparalama işlemi kalın zımparadan ince zımparaya doğru yapılmış olup kullanılan zımpara tane numaraları sırasıyla 180, 320, 400, 600, 800 ve 1000’ dir. Parlatma işleminde sırasıyla 1 micron ve 0,3 micronluk alimuna süspansiyon ve su bazlı 3 micronluk elmas suyu kullanılmıştır. Zımparalama ve parlatma proseslerinin ardından dağlama işlemi için %3 Nital çözeltisi kullanılmıştır.



Şekil 3.9. Numune zımparalama ve parlatma cihazı (Tronic PG-2B).

Tüm bu ön işlemler sonrasında ortaya çıkan mikroyapı görüntülerini incelemek için Şekil 3.10’ da görülen Tronic XJL-17 marka ve modelindeki optik ters metal mikroskobu kullanılmıştır. Ters metal mikroskoplarının en büyük avantajı numunenin

tersten konulması ve parlatılmış yüzeyin objektife çarpması ile direkt göze yansımaları sonucu daha kaliteli ve bulanık olmayan bir görüntü elde edilmesidir (Anonim, 2022).



Şekil 3.10. Optik mikroskop (Tronic XJL-17).

3.2.4. Sertlik Testi

Brinell sertlik deneyi, malzeme yüzeyine belirli bir yükün (F), belirli bir çaptaki (D) sert malzemeden yapılmış bir bilya yardımıyla belirli bir süre uygulanması sonucu yüzeyde kalıcı bir iz meydana getirmek esasına dayanır. Daha sonra oluşan kuvvetin oluşan izin küresel yüzey alanına bölünmesiyle Brinell sertlik değeri (BSD) elde edilir.

Malzemenin sertliğinin tayin edilmesi için Şekil 3.11’ deki MEBA MHT – 150 marka sertlik cihazı kullanılmıştır. Parçalar 187,5 kg ağırlık ve 2 mm uç ile Brinell sertlik testine tabi tutulmuştur. Her bir numuneye alt ve üst yüzeyleri birbirine paralel olacak şekilde taşlama ve parlatma işlemleri uygulanmıştır. Her üretim için 3 farklı sertlik testi numunesi hazırlanmış ve her bir parçadan 7 farklı ölçüm yapılarak ortalama değer alınmıştır.

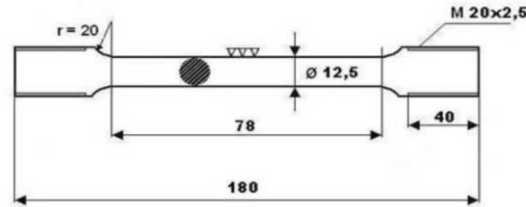


Şekil 3.11. Sertlik cihazı (MEBA MHT – 150).

3.2.5. Çekme Testi

Çekme testi malzemelerin akma ve çekme mukavemetlerini belirlemenin yanı sıra uzama, elastik modülü gibi mekanik özelliklerin de tespit edilmesine yarayan bir test metodudur. Çekme deneyinin amacı; malzemelerin statik yük altındaki elastik ve plastik davranışlarını belirlemektir. Bunun için boyutları standartlara uygun daire veya dikdörtgen kesitli deney parçası; çekme cihazına bağlanarak, eksenel ve değişken kuvvetler uygulanır. Çekme cihazı esas olarak; birbirine göre aşağı ve yukarı hareket edebilen, deney parçasının bağlandığı iki çene ve bunlara hareket veya kuvvet veren, bu iki büyüklüğü ölçen ünitelerden oluşur. Çenelerden birisi sabit hızda hareket ettirilerek deney parçasına değişken miktarlarda çekme kuvveti uygulanır ve bu kuvvete karşılık gelen uzama kaydedilir.

Çekme testi numuneleri TS EN ISO 6892-1 standardına uygun şekilde hazırlanmıştır ve bu numunelerden biri örnek olarak Şekil 3.13’ te verilmiştir. Hazırlanan numunelerin çekme testi, Selçuk Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan ve Şekil 3.14’ te görülen Shimadzu AGS-X (100 kN) çekme cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 3.12. Standartlara uygun olarak hazırlanan çekme numunesi ölçüleri.



Şekil 3.13. Çekme numunesi.



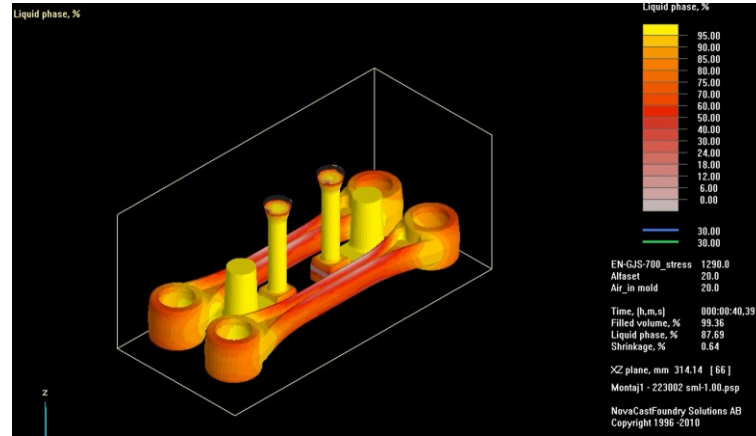
Şekil 3.14. Çekme cihazı (Shimadzu AGS-X (100 kN)).

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

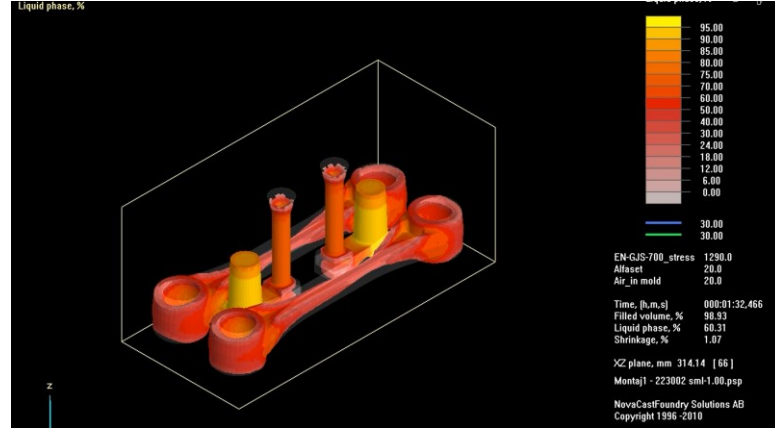
Bu tez kapsamında 3 farklı deney yapılmıştır. Yapılan ilk deneyde istenilen kimyasal analiz ve mekanik değerler sağlanmış olmasına rağmen mikroyapı içerisinde hedeflenenden daha fazla perlite rastlanmıştır. 2 numaralı deneyde mekanik değerlerde hedefe ulaşılmış olup mikroyapı incelendiğinde düşük küresellik ve Chunky grafit olarak adlandırılan döküm hatalarına rastlanmıştır. Üçüncü deneyde ise hedeflere tam olarak ulaşılmıştır.

4.1. Simülasyon Sonuçları

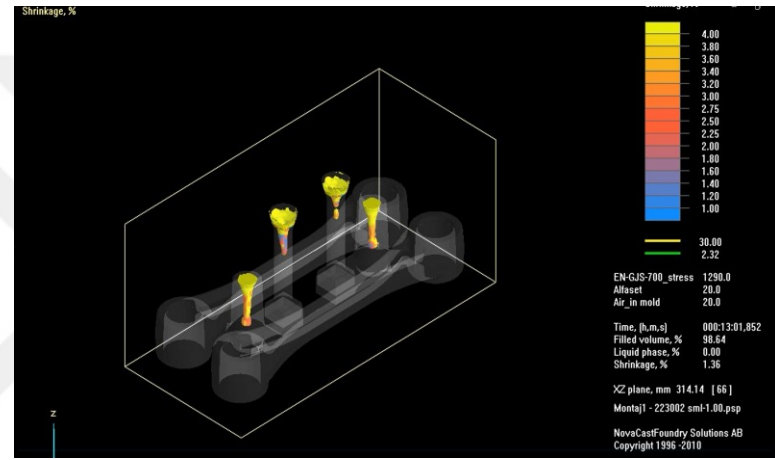
Nova Cast döküm simülasyon programı ile yapılan farklı simülasyon çalışmaları sonucunda en uygun tasarıma karar verilerek parça içerisinde oluşabilecek potansiyel hataları en aza indirecek seçimler yapılmıştır. Şekil 4.1’ de görülen katılaşma simülasyonunda parça genelinde ince kesitle kalın kesit arasında homojen soğuma görülemediğinden tasarım değiştirilerek Şekil 4.2’ deki homojen soğuma elde edilmiştir. Şekil 4.3’ te yapılan çekinti simülasyonu ile parçada oluşabilecek boşluk ve çekinti ihtimalleri değerlendirilip tasarıma son hali verilmiştir.



Şekil 4.1. Katılaşma simülasyonu.



Şekil 4.2. Katılaşma simülasyonu.



Şekil 4.3. Çekinti simülasyonu.

4.2. Kimyasal Analiz Sonuçları

Tez kapsamında üretilen numunelere ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1’ de verilmektedir. Tabloda görülen kimyasal analiz değerleri altı farklı numuneye ait olup bu numuneler 1, 2, 3, 4, 5 ve 6 olarak numaralandırılmıştır. 1, 2, ve 3 üretimi yapılan SSF; 4, 5 ve 6 ise birinci nesil dökme demirlere ait kimyasal analiz sonuçlarıdır.

Kimyasal analiz sonucunda sarı ile gösterilen ve ikinci nesil olarak adlandırılan katı çözelti ile güçlendirilmiş ferritik küresel grafitli dökme demirlerde karbon miktarının nispeten daha düşük ve silisyum miktarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Karbon eş değeri hesaplanarak 4,2 ile 4,3 arasında olması hedeflenmiştir. 2 ve 3 numaralı denemelerde bu hedefe tam olarak ulaşılmıştır.

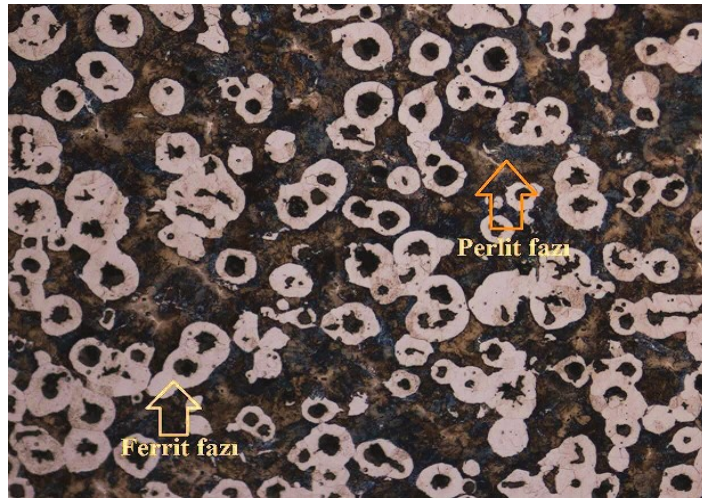
Çizelge 4.1. Kimyasal analiz ölçüm sonuçları.

NO	MALZEME	C(%)	Si(%)	Mn(%)	Cu(%)	CE (Karbon eş değeri)
1	SSF DENEME 1	3,19-3,22	3,47	0,22	0,1	4,35
2	SSF DENEME 2	3,1-3,2	3,2	0,172	<0,1	4,291
3	SSF DENEME 3	2,8-2,9	4,2	0,1	<0,1	4,22
4	GJS 400-14	3,5-3,6	2,5-2,7	0,25	0,089	4,41
5	GJS 500-7	3,59-3,64	2,62-2,7	0,3	0,3	4,44
6	GJS 600-3	3,6-3,66	2,4-2,5	0,21	0,59	4,26

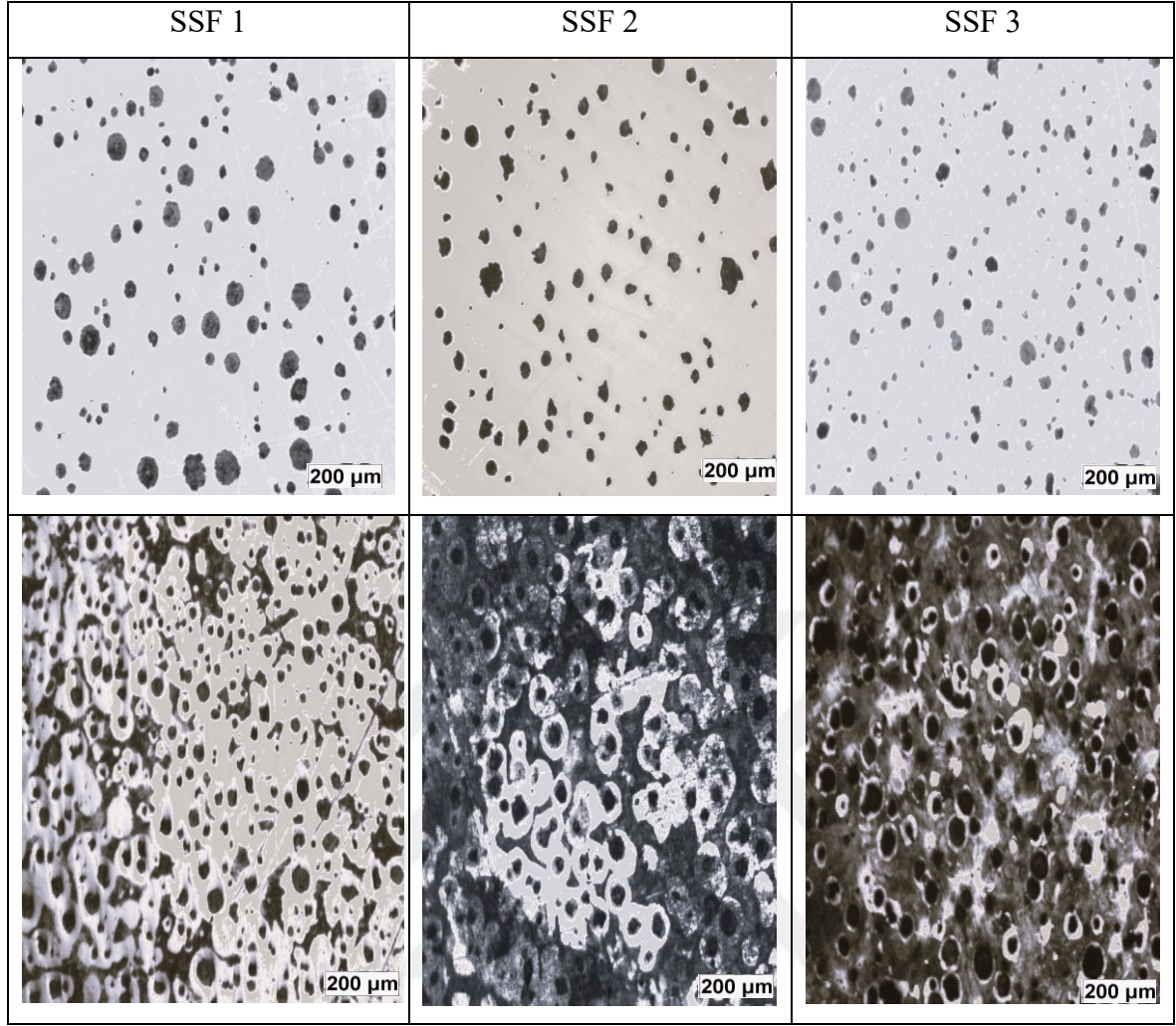
4.3. Mikroyapı Analizi Sonuçları

Dökme demirlerin kalitesi perlit oranları sonucu meydana gelen mekanik özelliklerden çekme testi sonuçlarına göre belirlenmektedir. GGG 40 yaklaşık olarak 400 MPa çekme dayanımı değerine sahipken GGG 50 yaklaşık olarak 500 MPa civarı ve GGG 60 ise 600 MPa civarı çekme dayanımı değerine sahiptir. Kalite arttıkça perlit oranı artmakta, akma ve çekme dayanımı artarken yüzde uzama değeri azalmaktadır. Şekil 4.4' te perlit ve ferrit örnek mikroyapı üzerinde okla gösterilmiştir.

Şekil 4.5' te sırasıyla GGG 40, GGG 50 ve GGG 60 kalitelerinde perlit yapısına sahip numune örnekleri görülmektedir. Üst satırda görülen mikroyapılar parlatılmış numunelere ait olup alt satırda görülen mikroyapılar ise dağlama işlemi yapılmış olan numunelere aittir. Alt satırda görülen GGG 40 numunesinde yüzde 80 üzerinde ferritik yapı gözlemlenirken GGG 50 de yaklaşık yüzde 50 oranında perlite ve GGG 60 numunesinde yaklaşık olarak yüzde 90 perlite rastlanmaktadır.

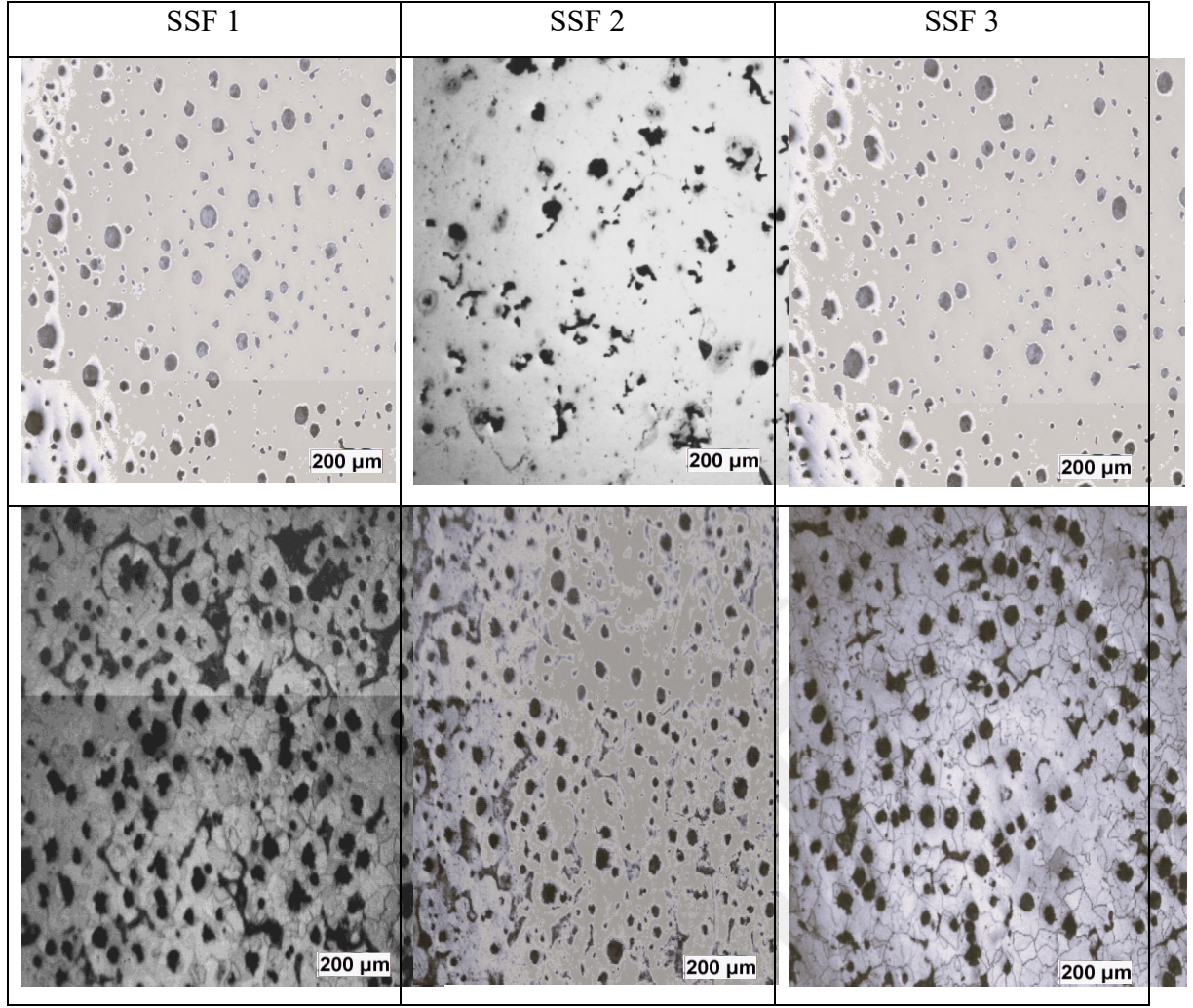


Şekil 4.4. Birinci nesil dökme demir üzerindeki perlit ve ferrit yapılarının gösterimi.



Şekil 4.5. Birinci nesil dökme demirlere ait mikroyapı görüntüleri.

Mikroyapı çalışmaları sonucunda incelenen altı farklı SSF numunesi Şekil 4.6’da görülmektedir. Şekilde üst satırda görülen mikroyapılar parlatılmış numunelere ait olup alt satırda görülen mikroyapılar ise dağlama işlemi yapılmış olan numunelere aittir. Şekil incelendiğinde SSF 1 numaralı parçanın yüksek oranda ferritik olmasına rağmen perlit yapısı da içerdiği görülmektedir. SSF 2 numaralı numunenin yüksek ferritik özellik göstermesine rağmen düşük küresellik sergilediği gözlenmektedir. 3 numaralı numunenin neredeyse tamamen ferritik yapıda olduğu gözlemlenmiştir. 3 numaralı numunenin tamamen ferritik yapı elde edilmesi; benzer kimyasal analiz değerlerine rağmen magnezyum tretmanı sırasında kullanılan aşı miktarının arttırılması ve magnezyum tretmanının yatay potada yapılması sayesinde gerçekleşmiştir.

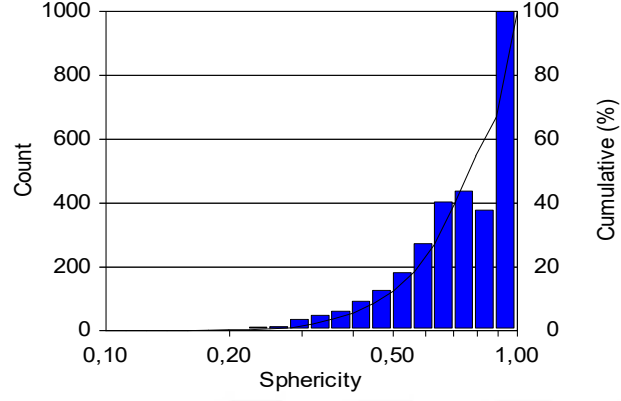


Şekil 4.6. SSF numunelerine ait mikroyapı görüntüleri.

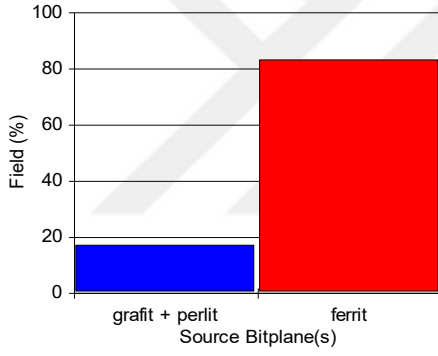
Yapılan mikroyapı çalışmaları sonucunda SSF denemeleri üzerinde 1 ve 2 numaralı parçaların küresellik değeri ve perlit oranının 3 numaralı numuneye göre nispeten daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. 3 numaralı SSF numunesinde ise gerek kimyasal gerek mikroyapısal analizler sonucunda SSF standartlarına ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Farklı kalınlıktaki kesitlerden alınan numuneler incelendiğinde bu numunelerin tamamında ferritik yapıya rastlanmıştır. Bu numunenin ayrıntılı mikroyapı incelemesi ve küresellik oran ve küre sayısı aşağıdaki şekillerde görülmektedir.

Küresellik derecesinin küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini oldukça etkilediği bilinmektedir. Grafit parçacıklarının şekli küresellikten uzaklaştıkça dayanım ve uzama değerlerinin düştüğü gözlemlenmektedir. Üretilen numunelerde yüzde 80 üzeri küresellik hedeflenmiş olup iki numaralı SSF numunesi hariç istenen

değerlere ulaşılmıştır. Şekil 4.7 ve 4.8’ de 3 numaralı SSF için küre sayısı, küresellik değeri ve perlit oranı verilmiştir.



Şekil 4.7. 3 numaralı SSF numunesinin küresellik değerleri

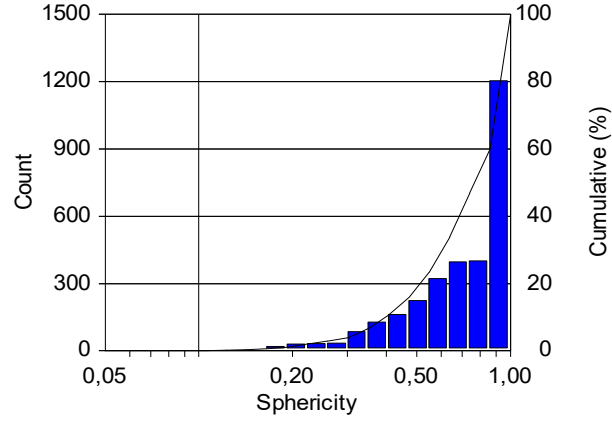


	Alan (%)
Grafit yüzdesi	8,44

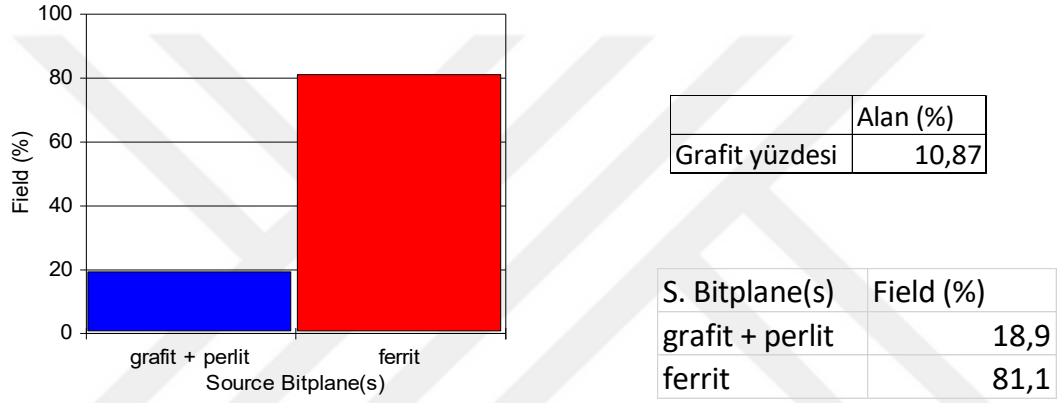
S. Bitplane(s)	Field (%)
grafit + perlit	16,97
ferrit	83,03

Şekil 4.8. 3 numaralı SSF numunesinin ferrit-perlit oranları

Şekil 4.9 ve 4.10’ da ince kesitli bir SSF numunesinin küre sayısı, küresellik değeri ve perlit oranı verilmiştir.

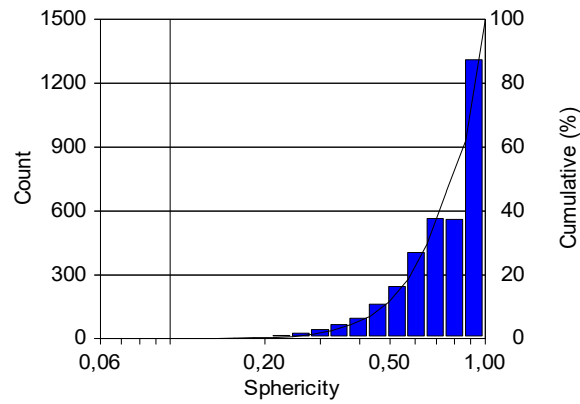


Şekil 4.9. İnce kesitli SSF numunesinin küresellik değerleri

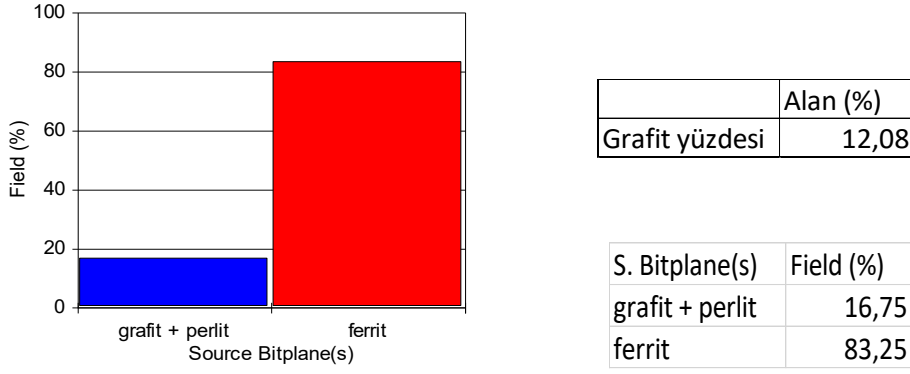


Şekil 4.10. İnce kesitli SSF numunesinin ferrit-perlit oranları

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12' de kalın kesitli SSF numunesinin küre sayısı, küresellik değeri ve perlit oranı verilmiştir.

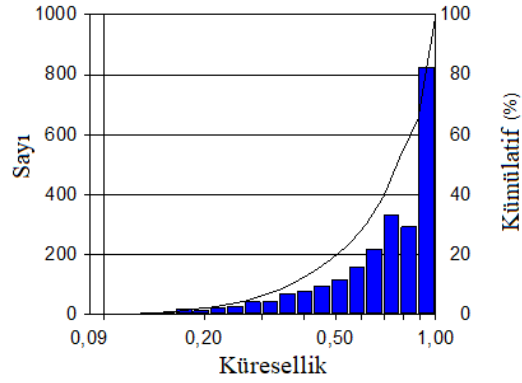


Şekil 4.11. Kalın kesitli SSF numunesinin küresellik değerleri.

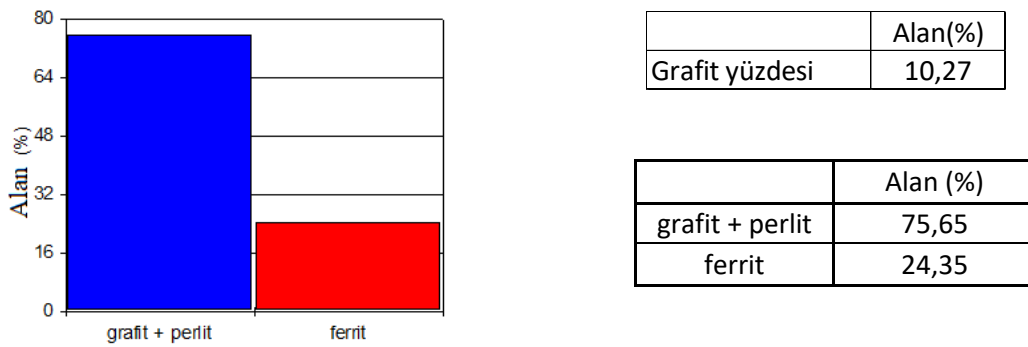


Şekil 4.12. Kalın kesitli SSF numunesinin ferrit-perlit oranları

Birinci nesil sfero dökme demirlerden GJS 600–3 (GGG 60) için de aynı mikroyapı çalışması yapılmış olup ayrıntılı sonuçları Şekil 4.13 ve Şekil 4.14’ te görülmektedir. Bu sonuçlarda üretilen 3 numaralı SSF numunesinin dağlama işlemi sonrasında benzer standartlara sahip birinci nesil dökme demirin %75 oranında perlitik oranının aksine %80’ in üzerinde ferritik yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda küreselleşme oranının da belirlenen standartlara uygun olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.13. GGG 60 numunesinin küresellik değerleri



Şekil 4.14. GGG 60 numunesinin ferrit-perlit oranları.

4.4. Çekme Testi Sonuçları

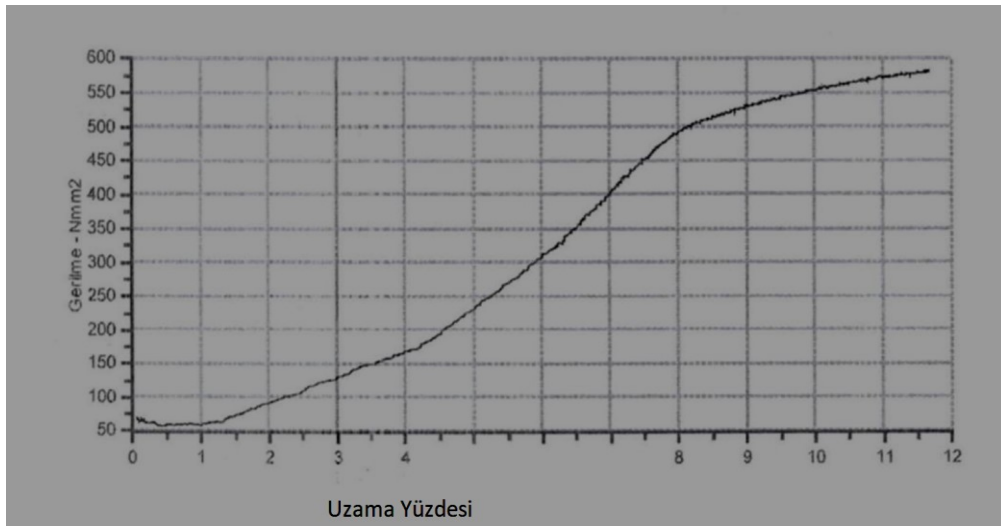
Üretilen numunelerin çekme testi sonucunda elde edilen akma dayanımı, çekme dayanımı ve yüzde uzama değerleri Çizelge 4.2’ de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Çekme ve sertlik testi sonuçları.

Malzeme Adı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (Yüzde-%)	Standart Değerler		
				Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (Yüzde-%)
SSF 1 NOLU NUMUNE	390	543	19	400	500	14
SSF 2 NOLU NUMUNE	521	686	10,3	470	600	10
SSF 3 NOLU NUMUNE	471	591	11,8	470	600	10

Üretilen SSF malzemelerinin akma ve çekme dayanımları standartlarda verilen değerlere ulaşmış olup yüksek dayanımın yanında yüksek miktarda uzama gösterdikleri tespit edilmiştir. Aynı zamanda sertlik değerlerinin de birinci nesile benzer şekilde ve standartlara uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

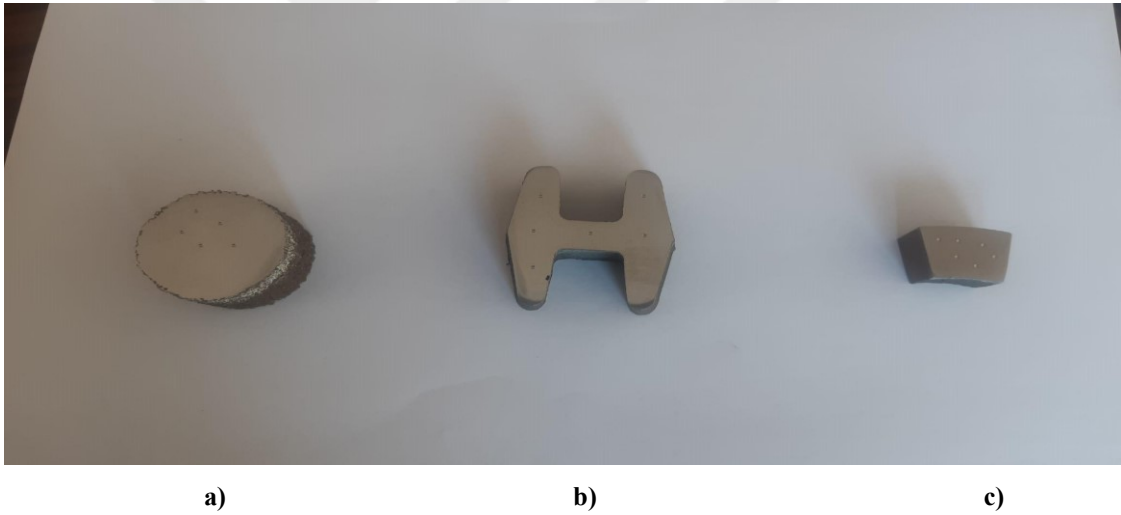
Şekil 4.15’ de 3 numaralı parçaya ait çekme testine ait gerilme uzama grafiği verilmiştir.



Şekil 4.15. Uzama-gerilme grafiği.

4.5. Sertlik Testi Sonuçları

Üretilen numunelerden alınan kesitler Şekil 4.16' da verilmiştir. Bu kesitlere ait sertlik testi sonuçları ile birinci nesil dökme demirlerin sertlik testi sonucunda elde edilen Brinell sertlik değerleri Çizelge 4.3' te görülmektedir. Çizelgede her bir numune için yapılan 7 farklı ölçümün ortalaması verilmiştir. Yapılan sertlik testi sonucunda benzer dökme demir kalitesindeki birinci nesil ile karşılaştırıldığında yeni nesil dökme demirlerdeki sertlik değerlerinin nispeten daha düşük olmasına rağmen standart değerler içerisinde olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca Çizelge 4.4' te 3 numaralı SSF numunesine ait farklı kesitlerden alınmış sertlik ölçümlerinin ortalaması görülmektedir. Yapılan ölçümler sonucunda farklı kalınlıklardaki kesitlerden alınan ölçümlerin sonuçlarının birbirine yakın olduğu görülmüş olup parçanın her yerinde homojen bir sertlik olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.16. 3 numaralı numuneye ait farklı kesit örnekleri a) Kalın kesit b) H şeklinde ince kesit c) I şeklinde kesit

Çizelge 4.3. Sertlik testi sonuçları.

Malzeme Adı	Brinell Sertlik Değeri Ortalamaları (HB)
SSF 1 NOLU NUMUNE	180,5
SSF 2 NOLU NUMUNE	209,9
SSF 3 NOLU NUMUNE	191,6
EN-GJS-400-18-LT	148,9
EN-GJS-500-7	195,4
EN-GJS-600-3	223,8

Çizelge 4.4. 3 nolu numuneye ait sertlik sonuçları.

	Çeki kolu parçasının H şeklinde en ince kesitinden alınan sertlik değerleri	Çeki kolu parçasının I şeklinde kesitinden alınan sertlik değerleri	Çeki kolu parçasının kalın kesitinden alınan sertlik değerleri
3 Numaralı SSF Numunesi Ortalama Ölçüm Değerleri (HB)	181,93	188,2	191,24

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen testler ile yeni nesil katı çözelti ile güçlendirilmiş ferritik küresel dökme demirlerin neredeyse tamamen ferritik yapıda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yapılan testler ile aynı kaliteye sahip birinci ve ikinci nesil dökme demirlerin mikroyapı sonuçları karşılaştırıldığında; birinci nesil dökme demirlerde %80 üzerinde perlitte rastlanmıştır, buna karşılık yeni nesil dökme demirlerde %80 üzerinde ferrit yapısı gözlemlenmiştir. Bu ferrit yapısı sayesinde üretilen malzemelerin hemen hemen her yerinde kesit kalınlığından bağımsız olarak homojen karakteristik saptanmıştır.

Çekme testi sonuçlarında ise benzer kalitedeki birinci nesil ile karşılaştırıldığında ikinci nesilde uzama ve mukavemet gibi mekanik değerlerin çok daha üstün özellikler sergilediği sonucuna ulaşılmıştır. Birinci nesil dökme demirlerden GJS 600 maksimum %3 uzama gösterirken üretilen 3 numunenin tamamı %10 değerinin üzerinde uzama göstermiştir.

Kimyasal analiz sonuçlarına göre daha az karbon daha fazla silisyum kullanımı ile yaklaşık olarak benzer maliyetler gösteren SSF' in mekanik artıları da göz önüne alındığında birinci nesil dökme demirlere göre daha avantajlı olduğu kanısına varılmıştır.

5.2. Öneriler

Yapılan çalışmalarda termal analiz ve kimyasal analiz değerlerinde oluşabilecek sapmaların malzemenin mikroyapısında istenmeyen durumlara yol açabileceği sonucuna ulaşılmış olup özellikle silisyum miktarının hassas olarak ayarlanmasına dikkat edilmesi gerekmektedir.

Döküm esnasında küreselleşme prosesinde kullanılan aşı miktarı artırılarak malzeme içyapısındaki küre sayısının artırılması ve küre şeklinin iyileştirilmesi sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2011, Gri Dökme Demirler [online], Milli Eğitim Bakanlığı, Web adresi: http://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Gri%20%28esmer%29%20D%C3%B6kme%20Demir.pdf [Ziyaret Tarihi: 20/06/2019].
- Anonim, 2021, Termal Analiz [online], Heraeus, Web adresi: https://www.heraeus.com/tr/hen/products_and_solutions_hen/foundry/thermal_analysis/thermal_analysis.html [Ziyaret Tarihi: 30/12/2021].
- Baydoğan M., 1996, “GGG60 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirde Östemperleme Isıl İşleminin Çekme, Yorulma Ve Aşınma Özelliklerine Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Björkegren, L. E. ve Hamberg, K. (2003). Silicon alloyed ductile iron with excellent ductility and machinability, Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, İsveç.
- Callister, W. D., 2000, Fundamentals of materials science and engineering, 471660817, Wiley, London, 1-763.
- Çelik, Ö. (2001). Küresel grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Çetin, A., 2016, Katı Çözeltiyle Güçlendirilmiş Ferritik Sfero Dökme Demirler (SSF) [online], <https://muhendishane143950393.files.wordpress.com/2018/09/15a35-el-kitabi-03.pdf> [Ziyaret Tarihi: 29/12/2021].
- Davis, J.R., 1996, ASM specialty handbook: cast irons, *ASM International*, Brussels, 16-19.
- Glavas, Z., Strkalj, A. and Stojakovic, A., 2016, The properties of silicon alloyed ferritic ductile irons. *Metallurgija*, 55 (3), 293–296.
- Kayalı, E.S., Ensari, C., Dikeç, F., 1990, Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İTÜ Yayınları, Sayı: 1262.
- Krishnaraj D., Narasimhan H.N.L., Seshan S., 1992, “Structure and Properties of ADI As Affected by Low Alloy Additions”, *Afs Transactions*, vol.100.
- Larker, R. (2008). Solution strength ferritic ductile iron ISO 1083/JS/500-10 offer superior and consistent properties in hydraulic rotators, Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron, İsveç.
- Mi Y., 1994, “Effect of Cu, Mo, Si, On The Content of Retained Austenite of Austempered Ductile Iron”, *Scripta Metallurgica Et Materialia*, Vol.32
- Okunnu, R. (2015), High strength solution-strengthened ferritic ductile cast iron, Yüksek lisans tezi, *Aalto University School of Engineering*, Finlandiya, 1-81.

- Olsson, A. (2011). Fatigue strength of truck components in cast iron, Yüksek Lisans Tezi, Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Özüsta B., (2021), Katı çözeltiliyle güçlendirilmiş ferritik küresel dökme demirlerde aşınma davranışına etkisi, *Bayburt üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Türkiye, 1-51.
- Prihti, T. (2011). Wear behaviour of ductile irons in continuous sliding motion, Yüksek Lisans Tezi, Tampere University of Technology, Finlandiya.
- Scruton, J.M. , (2018) , Effects and limitations of residual alloying elements in silicon solid solution strengthened ferritic ductile iron. M.Sc. Thesis, Michigan Technological University, Materials Science and Engineering, Houghton
- Stets, W., Löblich, H., Gassner, G. ve Schumacher, P., 2014, Solution strengthened ferritic ductile cast iron properties, production and application, *International Journal of Metalcasting*, 8 (2), 35-40.
- Torre, U.D., Loizaga, A., Lacaze, J. and Sertucha, J., 2014, As cast high silicon ductile irons with optimised mechanical properties and remarkable fatigue properties, *Materials Science and Technology*, 30 (12), 1425–1431.
- Yürektürk Y. (2018), Yüksek silisyumlu küresel grafitli dökme demirlere uygulanan östemperleme ve alüminyumlama işlemlerinin malzeme özelliklerine etkisi, Yüksek lisans tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Türkiye, 1-83.