

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÜRETİMİNDE METALURJİK
SİLİSYUM KARBÜR VE FERRO SİLİS KATKILARININ MALZEME
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İSMAİL KARACA

TEZ DANIŐMANI
DOÇ. DR. FATİH APAYDIN

BİLECİK, 2022

10489705

T.C.
BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÜRETİMİNDE METALURJİK
SİLİSYUM KARBÜR VE FERRO SİLİS KATKILARININ MALZEME
ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İSMAİL KARACA

TEZ DANIŐMANI
DOÇ. DR. FATİH APAYDIN

BİLECİK, 2022

10489705

BEYAN

“Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretiminde Metalurjik Silisyum Karbür ve Ferro Silis Katkılarının Malzeme Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması” adlı yüksek lisans tezinin hazırlık ve yazımı sırasında bilimsel araştırma ve etik kurallarına uyduğumu, başkalarının eserlerinden yararlandığım bölümlerde bilimsel kurallara uygun olarak atıfta bulunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, tezin herhangi bir kısmının Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunulmadığımı, aksinin tespit edileceği muhtemel durumlarda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

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

İsmail Karaca

Tarih

İmza

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde, yardımlarını ve görüşlerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Doç. Dr. Fatih APAYDIN' a katkı ve emeklerinden dolayı teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışmasında destekleriyle beni motive eden Mescier Metal Mamülleri Pazarlama San. Tic. A.Ş.' de çalışan başta değerli iş arkadaşım Metalurji ve Malzeme Mühendisi Anıl BAYIRBAŞI olmak üzere tüm mesai arkadaşlarıma teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışmasının deneysel çalışmalarını yürütmek için tesislerinde her türlü desteği bizlere sunan başta İstikamet Döküm A.Ş. Yönetim Kurulu Başkan Vekili Sayın Mahmut Şefik ÖKSÜZ' e ve değerli çalışanlarına, işletmelerinin fiziki şartlarından yararlanmamızı sağlayan Ersoy Metal Ltd. Şti. Genel Müdürü Hüsnü ERSOY' a teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan , sevgili eşim Canan KARACA' ya, kızlarım Sudenur, Zehra ve Zümra'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak tüm hayatım boyunca yanımda olan, beni bu günlere sonsuz destekleriyle getiren annem Zennure KARACA ve babam Dursun KARACA' ya saygılarımı ve sevgilerimi sunarım.

İsmail Karaca

2022

ÖZET

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN ÜRETİMİNDE METALURJİK SİLİSYUM KARBÜR VE FERRO SİLİS KATKILARININ MALZEME ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Bu çalışmada silisyum karbür ve ferro silis gibi iki farklı alyaj malzemesinin küresel grafitli dökme demirin yapısına katılarak mekanik ve metalurjik özellikleri kıyaslanmıştır.

Bu iki alyaj malzemesi farklı ocaklarda verilerek ocaklara yapılan şarj miktarları kaydedilmiştir. Ocaklardan numuneler alınarak mümkün oldukça birbirlerine yakın kimyasal analize sahip olmaları sağlanmıştır. Daha sonra döküm yapılacak olan kalıbın kumuna testler uygulanmış ve veriler kaydedilmiştir. Dökümü gerçekleşen malzemelerden numuneler alınmış ve mekanik testlere tabii tutulmuştur. Bu testler sonucunda FeSi ilaveli numuneler için $\sigma_{\max,ort}=500,47$ N/mm² ,SiC için $\sigma_{\max,ort}= 505,37$ N/mm² olarak ölçülmüştür. Sertlik ölçümlerinde FeSi ilaveli numunede sertlik değeri 198,06 HB iken SiC' e ait numunede ise sertlik değeri 205,7 HB olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi %4 'lük bir sertlik artışı olmuştur. Elde edilen veriler mekanik açıdan kıyaslanarak grafikler halinde kaydedilmiştir. Bu deneyler sonucunda iki alyaj malzemesi karlılık ve mekanik açıdan kıyaslanmış ve kıyaslamalar kaydedilmiştir.

Yapılan deneyler her aşamada fotoğraflanmıştır. Çalışma sonunda elde edilen veriler tablo ve grafiklerle verilmiştir ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Küresel Grafitli Dökme Demir, Pik Demir, Silisyum Karbür, Ferro Silisyum, Grafit, Aşı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF METALLURGIC SILICON CARBIDE AND FERRO SILICON ADDITIVES ON THE MATERIAL IN THE PRODUCTION OF NODULAR GRAPHITE CAST IRON

In this thesis, the mechanical and metallurgical properties of two different alloying materials such as silicon carbide and ferro silica were compared to the structure of spheroidal graphite cast iron.

These two alloy materials were given in different furnaces and the amount of charge made to the furnaces was recorded. Samples were taken from the quarries and it was ensured that they had chemical analysis as close to each other as possible. Then, tests were applied to the sand of the mold to be cast and the data were recorded. Samples were taken from the casting materials and subjected to mechanical tests. As a result of these tests, it was measured as $\sigma_{\max_{ort}}=500.47$ N/mm² for FeSi added samples and $\sigma_{\max_{ort}}= 505.37$ N/mm² for SiC. In the hardness measurements, while the hardness value in the FeSi added sample was 198.06 HB, the hardness value was measured as 205.7 HB in the SiC sample. As can be seen, there was a 4% increase in hardness. The obtained data were compared mechanically and recorded in graphics. As a result of these experiments, two alloy materials were compared in terms of profitability and mechanics and the comparisons were recorded.

Experiments were photographed at each stage. The data obtained at the end of the study are given in tables and graphics and interpreted.

Keywords: Nodular Graphite Cast Iron, Pig Iron, Silicon Carbide, Ferrous Silicon, Graphite, Graft.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖN SÖZ.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	4
2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özellikleri.....	5
2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapısı.....	7
2.2.1. Ferrit Fazı.....	8
2.2.2. Perlit Yapısı.....	8
2.2.3. Grafitler	9
2.2.4. Sementit Fazı.....	9
2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Grafitin Mekanik Özelliklere Etkisi.....	9
2.3.1. Çekme Mukavemetine Etkisi.....	10
2.3.2. Akma Mukavemetine Etkisi.....	10
2.3.3. Yüzde Uzama Miktarına Etkisi.....	10
2.3.4. Sertliğe Etkisi	11
2.3.5. Darbe Sönümlenmeye Etkisi	11
2.3.6. Isıl İletime Etkisi	11
2.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özelliklerini Etkileyen Faktörler .	11
2.4.1. Ana Matrisin Oranı	11

2.4.2. Küresellik Derecesini Etkileyen Faktörler	12
2.4.3. Küre Sayısını Etkileyen Faktörler.....	13
2.4.4. Kürelerin Boy Dağılımının Yapıya Etkileri	14
2.4.5. Karbür Miktarının Etkisi	14
2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementlerinin Etkileri	15
2.6. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Aşılama	18
2.7. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Çeşitleri	20
2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi	22
2.9. Silisyum Karbür (SiC) ve Üretimi	24
2.10. Silisyum Karbür Kimyasal Yapısı	25
2.11. Silisyum Karbürün Kullanım Alanları	26
3. LİTERATÜR BİLGİSİ.....	27
4. MATERYAL METOD	30
4.1. Döküm Kumunun Hazırlanması.....	31
4.2. Döküm Kalıbının Hazırlanması	35
4.3. Ergitme Ocakları.....	38
4.4. SiC İlavesi ile Sıvı Metalin Hazırlanması.....	39
4.5. Fe-Si İlavesi ile Sıvı Metalin Hazırlanması	42
4.6. Kumlama ve Taşlama.....	44
4.7. Deney Numunelerinin Hazırlanması	45
4.8. Çekme Testi.....	48
4.9. Mikroyapı Analizi.....	49
4.10. Sertlik Ölçümü.....	51
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	52
5.1. Kimyasal Analiz Sonuçlarının İncelenmesi.....	52
5.2. Mikroyapı Analizinin Değerlendirilmesi.....	52

5.3. Çekme Deneyi Sonuçları.....	55
5.4. Sertlik Ölçümü Sonuçları	55
5.5. Maliyet Analizi.....	56
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	58
6.1. Sonuçlar.....	58
6.2. Öneriler	58
KAYNAKÇA	59

TABLULAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Küresel grafitli dökme demirin mekanik değerleri	6
Tablo 2.2. Aşılaiıcıların ticari isimleri ve kimyasal analizleri.....	19
Tablo 2.3. Alman standartlarına göre küresel grafitli dökme demir çeşitleri.....	20
Tablo 2.4. EN-1563 standartlarına göre küresel grafitli dökme demir çeşitleri	20
Tablo 2.5. Türk Standartları Enstitüsü'ne göre küresel grafitli dökme demir çeşitleri	22
Tablo 2.6. SUPERSICA silisyum karbürün kimyasal analizi	25
Tablo 4.1. Mikser karışım miktarları.....	32
Tablo 4.2. Kumun mekanik özellikleri.....	32
Tablo 4.3. İstikamet Döküm GGG40 kimyasal kompozisyon	39
Tablo 4.4. Abasic marka SiC kimyasal analizi.....	40
Tablo 4.5. Pik analizi.....	40
Tablo 4.6. Yükleme miktarları ve şarj malzemesi analizi	40
Tablo 4.7. SiC ilaveli ocağın spektrometre analiz sonuçları	41
Tablo 4.8. Fe-Si ilaveli ocak şarjı.....	43
Tablo 4.9. Fe-Si ilaveli ocağın spektrometre analizi	43
Tablo 4.10. Elkem 6510 FeSiMg(ferro-siliko magnezyum) kimyasal analizi	46
Tablo 4.11. Fe-Si ilaveli pota analizi.....	48
Tablo 4.12. SiC ilaveli pota analizi	48
Tablo 5.1. SiC ilaveli ocağın kimyasal analizi	52
Tablo 5.2. FeSi ilaveli ocağın kimyasal analizi.....	52
Tablo 5.3. Birim fiyat tablosu.....	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Karbon eşdeğerinin aralığı.....	5
Şekil 2.2. Perlit oranına göre değişim gösteren mekanik özellikler.....	12
Şekil 2.3. Çekme dayanımının karbür miktarına göre değişimi	13
Şekil 2.4. Akma dayanımının karbür miktarına göre değişimi	15
Şekil 2.5. Döküm işlemi akış şeması	24
Şekil 4.1. Kum mikser.....	31
Şekil 4.2. Kum karışımı akış şeması	31
Şekil 4.3. Kompaktlık ölçüm cihazı.....	33
Şekil 4.4. Islak çekme cihazı.....	33
Şekil 4.5. Nem ölçüm cihazı	34
Şekil 4.6. Hassas terazi	34
Şekil 4.7. Kum mukavemeti ölçüm cihazı	35
Şekil 4.8. Kalıplama hattı.....	36
Şekil 4.9. Otomatik döküm ocağına ilerleyen dereceler	36
Şekil 4.10. Soğumaya ilerleyen dereceler	37
Şekil 4.11. (a) Unrobot, (b) Sarsakta dereceden çıkarılan malzemeler.....	38
Şekil 4.12. 5 tonluk EGES marka indüksiyon ocakları.....	39
Şekil 4.13. Silisyum karbür(SiC)	39
Şekil 4.14. SiC ilaveli ocağın yüklenme görüntüsü	41
Şekil 4.15. Döküm için hazır hale gelen ocak.....	42
Şekil 4.16. Ferro silisyum (Fe-Si).....	42
Şekil 4.17. Kumlama makinesi	44
Şekil 4.18. Taşlanmak için istiflenen parçalar	44
Şekil 4.19. Modelin kalıplanması	45

Şekil 4.20. Numunelerin dökümü	45
Şekil 4.21. 1 Tonluk tretman potası	46
Şekil 4.22. Ocaktan tretman potasına sıvı metalin aktarılması	47
Şekil 4.23. Tretman potasından döküm potasına sıvı metalin aktarılması.....	47
Şekil 4.24. Kumlanan numuneler.....	48
Şekil 4.25. Çekme numunesi EN-6892-1 teknik çizim.....	49
Şekil 4.26. Çekme çubuğunun torna tezgahında hazırlanması	49
Şekil 4.27. Kesme cihazı.....	49
Şekil 4.28. Zımparalama cihazı.....	50
Şekil 4.29. Bakalit ile kalıplama cihazı.....	50
Şekil 4.30. Brinell sertlik cihazı.....	51
Şekil 5.1. SiC ve FeSi ilaveli döküm numunelerinin mikroyapısı 100X büyütme (a: SiC ilaveli, b: FeSi ilaveli)	53
Şekil 5.2. 2 SiC ve FeSi ilaveli numunelerin dağlanmış 100X görüntüleri (a: SiC ilaveli, b: FeSi ilaveli, c: SiC ilavelilerin tane dağılımı, d: FeSi ilavelilerin tane dağılımı)	53
Şekil 5.3. Çekme testi sonuçları(a)SiC, b)FeSi)	55
Şekil 5.4. Brinell sertlik sonuçları.....	56

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

- α** : Ferrit
 γ : Östenit
 ε : Şekil Değişirme
 σ : Gerilme
A : Kesit Alanı
ASTM: American Society for Testing and Materials
C : Karbon
Ce : Seryum
CE : Karbon Eşdeğeri
CH₃OH: Metanol
Cu : Bakır
Cr : Krom
E : Elastisite Modülü
EN : European Norm
HNO₃ : Nitrik Asit
ISO : International Organization for Standardization
J : Joule
L : Boy
Mn : Mangan
Mo : Molibden
M-SiC: Metalürjik Silisyum Karbür
Ni : Nikel
P : Fosfat
P_{max} : Maksimum Yük
S : Kükürt
Si : Silisyum
Ti : Titanyum
TSE : Türk Standartları Enstitüsü
V : Hacimsel Oran

1. GİRİŞ

Topraktan çıkarılan demir cevherinin yüksek fırınlarda çeşitli prosesler uygulayarak indirgenmesi ve ergitilmesi sonucu meydana gelen ve içerisinde %2 veya daha fazla karbon bulunduran ve mangan, silisyum, fosfor, krom, kükürt, alüminyum ve nadir toprak elementlerini bulunduran demir karbon alaşımına pik demir denir. Pik demir içerisinde bulundurduğu kükürt, mangan, fosfor, vs. elementlere göre farklı çeşitlerde piyasada rastlamak mümkündür. Ticari olarak çelik piki, sfero piki, hematit piki gibi farklı çeşitlerde piyasada bulunabilirler. Pik demir, demir karbon alaşımları arasında en düşük kaliteli dökme demirdir. Teorik olarak tek başına da spesifik olarak dökülen parça için kullanımı mümkündür. Ancak genellikle bir ara ürün olarak değerlendirilir. Çeşitli dökme demir üretiminde hammadde olarak kullanılır. Pik demir çeşitli ergitme ocaklarında ergitilerek çeşitli prosesler uygulanarak ve içerisine alyaj takviyesi yapılarak istenilen analize getirilerek bir kalıp içerisine dökülerek ve bu kalıbın boşluğunu alarak soğuması ve katı hale gelerek oluşturduğu malzemeye dökme demir denir.

Çelikler gibi dökme demirler de esas olarak demir karbon alaşımıdır. Demir içerisindeki karbon miktarı %2.06'dan büyük ise dökme demir bu miktarın altındaysa çelik olarak adlandırılmaktadır. Buradan yola çıkarak demir karbon denge diyagramı oluşturulmuştur. Demir karbon denge diyagramına göre 2,06'dan %6,67 kadar karbon içeren demir karbon alaşımlarına dökme demir denir. Karbon malzemeye kırılgenlik katar. Bu yüzden dökme demirlere silisyum ilavesi yapılmalıdır.

Döküm alaşımlarında dökme demirler önemli bir yere sahiptirler. İçerisindeki grafitin şekline dağılımına ve cinsine göre farklı isimlendirilir. Lamel grafitli, silindirik (vermiküler) grafitli, küresel (sfero) grafitli, beyaz, gri, temper gibi farklı türleri mevcuttur. Bu farklı çeşitlerde ve farklı prosesler ile üretilen dökme demirlerin iyi döküm kabiliyeti ve kullanılan alana göre iyi mekanik özellikleri mevcuttur.

Küresel grafitli dökme demirler 1948'de AFS (American Foundry Society)'nin yeni bir dökme demir çeşidi olarak kabul etmesiyle literatürdeki yerini almıştır. 2. Dünya Savaşı sırasında ABD'nin bazı önemli metallerin tedarikinde sorunlar yaşaması sonucu krom gibi aşınma direnci yüksek beyaz dökme demirin krom elementi yerine aynı özellikleri sağlayabilecek başka bir elementle üretilmesi rekabet ortamını alevlendirmiştir. INC(Uluslararası Nikel Şirketi) karbür yapıcı elementler üzerinde çalışmalar yapmış ancak bütün akla gelebilecek elementleri incelemiştir.

1943 yılının Nisan ayında %3,2 karbon, %1,75 silisyum, %1 oranında da nikel içeren GG20 dökme demiri ile GG14 (%3,5 C, %2,25 Si, %2 Ni) dökme demiri nikel magnezyum alaşımı kalıcı magnezyum miktarı %0.15, %0,3, %0,4, %0,5 olacak şekilde belirlenmiştir. Bu işlemde sonra döküm potasında %0,5 ferro silisyum ile aşılama yapılarak numune alınmıştır. Çekme testi ile gri dökme demire göre daha yüksek mekanik özelliklere sahip yeni bir dökme demir çeşidi üretilmiş olmuştur.

Mikroyapı incelemelerinde de görülmüştür ki bu dökme demirin grafitleri lamel şekilli değil küresel şekilliydi. Yüksek karbon içermesine rağmen mekanik olarak çelikle özdeş ancak üretim yöntemi olarak dökme demir karakteri taşıyan yeni bir malzeme meydana gelmiş oldu. Çeliğe göre daha düşük sıcaklıklarda erimesi döküm maliyetlerini düşürdü. Çeliğe oranla işlenebilirliği daha iyi olması üretim kabiliyetini arttırmıştır. Bunların yanı sıra yüksek mukavemet, yüksek süneklik, tokluk gibi mekanik özellikler açısından da iyi bir malzeme üretilmiş oldu.

Ülkemizde de 15. yüzyıldan sonra metalürji ve döküm teknolojilerinin ilerleme gösterdiği bilinmektedir. Daha sonraları 20. yüzyıla kadar en büyük dökümhane Tophane idi. 20. Yüzyılın başlarında Camialtı Tersanesi'nde demir döküm tesisleri inşa edilmiştir. 2 adet 5 tonluk Siemens-Martin ocağı ile 1 adet döner fırın, çelik dökümü için kullanılmıştır. Daha sonra Kardemir, Erdemir ve İsdemir'in kurulmalarıyla Türkiye'de döküm sektörü gelişmeye başlamıştır. 21.yüzyılda dünya ticaretinin globalleşmesi ile döküm sektörünü gelişmeye zorlamış seri üretimleri arttırmıştır. Otomotiv sektöründe firmalar çelikten imal ettikleri parçaları küresel grafitli dökme demirden üretebilmek için çeşitli çalışmalar yürütmüşlerdir. Dökülen parçaların ağırlıkları azalmaya başlamış ve böylece spesifik mukavemetleri artmıştır. Spesifik mukavemeti yüksek parçalar otomotiv sektöründe daha hafif ve daha az yakıt demek olduğundan bu parçaları üretmek temel esas olmuştur.

Dünyanın önde gelen otomotiv üreticilerinden Daimler Chrysler, General Motor ve Ford Motor Company 'nin 2000 yılında otomotiv yan sanayi üreticileri için bir zorunluluk haline gelen QS 9000 standardını kurmaları ve 2002 yılında diğer otomotiv devlerinin de işin içine girmesiyle ISO 16949 standardını kurmaları ürün kalitesi odaklı bir sistemin çalışmaya başlamasını sağlamıştır (Özdemir, 2007).

Bütün bu gelişmeler ışığında döküm parçalarına daha fazla mekanik test yapılma ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Önceden sadece sertlik, mikroyapı, çekme testi yapılırken daha sonra küresel grafitli dökme demirin ortaya çıkmasıyla ultrasonik testlerde yapılma zorunluluğu doğurmuştur. Ultrasonik testler ile malzemeye ses dalgası gönderiliyor ve bu sayede içyapı hatalarını tespit etmek kolaylaşıyordu. Tahribatsız olarak yapılan bu test ile parçanın mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır.

Biz bu çalışmada küresel grafitli dökme demirlerin üretiminde kullanılan SiC (silisyum karbür) ve sadece FeSi (ferro-silisyum) kullanılarak elde edilen verileri kıyaslanmaktadır. Malzemenin içyapısındaki kararlılığı, mekanik açıdan göstermiş oldukları mukavemetleri incelenmektedir.

2. KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

Küresel grafitli dökme demirler adlarından da anlaşılacağı üzere içyapılarında bulunan grafitlerin küreler halinde bulunmasından gelmektedir. İçyapılarındaki her bir küreye nodül dendiği için nodüler dökme demir olarakta literatürde rastlamak mümkündür. Diğer bir adları ise sünekliği yüksek tek dökme demir olduğu için düktil (ductile) dökme demir de denmektedir. Diğer bir adı ise latince sphaera (sfera) kökünden gelen sfero dökme demirdir. Latince küre anlamına gelmektedir.

Küresel grafitli dökme demirler kütük halinde dökülüp dövülerek kullanılmazlar bunun yerine döküldükleri gibi kullanılmaktadırlar. Dökülen bu yapılar ferrit ve perlit olmak üzere iki ana fazdan oluşmaktadır.

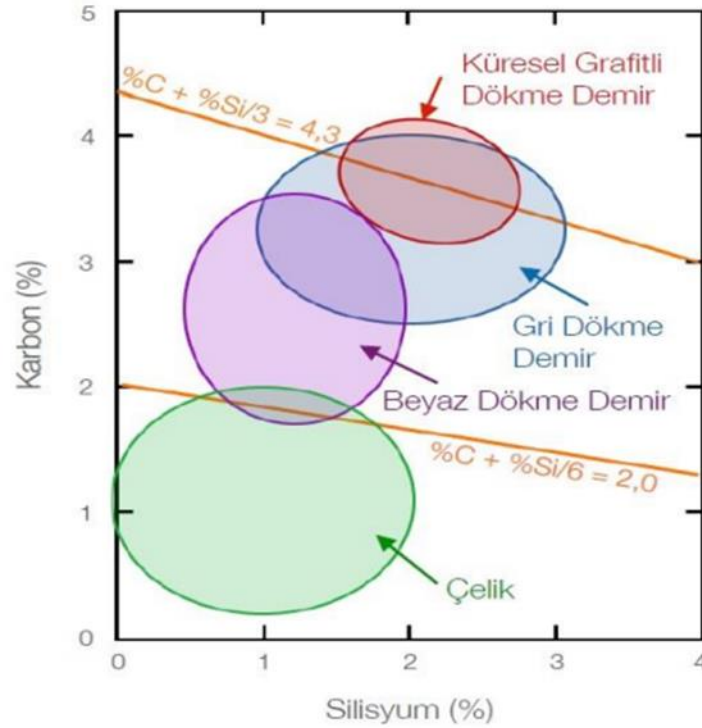
Küresel grafitli dökme demirin yapısındaki bu grafitleri küreselleştirmek için içerisine belli oranlarda katılan aşılama malzemeleri sağlamaktadır. Bu aşılama malzemeleri magnezyum, seryum, kalsiyum, lityum olabilir. Yaygın olarak döküm sektöründe ulaşılabilirlik açısından magnezyum (Mg) kullanılmaktadır. Birçok sektörde gri dökme demir ve çeliğin yerine yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi dökme demirler ve çeliğin özelliklerine aynı anda sahip olmasıdır.

Küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal bileşimi genel olarak şu şekildedir: %3-4 C, %2-3 Si, %0,1-0,9 Mn, %0,1 max P, %0,02 max S, %0,03-0,08 Mg şeklindedir. Bu değerler GGG40, GGG50, GGG70 gibi sınıflarına göre farklı kompozisyonlarda bulunabilirler.

Dökme demirin soğuyarak katılaşırken içerisindeki karbon miktarı önemlidir. Çünkü demir karbon denge diyagramında içerisindeki karbona göre demirin ötektik noktasına referansla nasıl bir kimyasal kompozisyona sahip olacağını karbon belirler. Ancak dökme demirde bu kritik etkiye sahip tek element karbon değildir. Bunun yanı sıra Si(silisyum) ve P(fosfor) elementleri demirin ötektik noktasını referans alarak malzemenin kompozisyonunu belirler. Dökme demir alaşımının içerisinde bulunan silisyum ve fosfor ötektik noktayı demir karbon denge diyagramında sola kaydırır. %4,3 ötektik noktası olmasına rağmen bu sayede daha düşük karbon miktarında da ötektik üstü özelliklere sahip dökme demir mümkün olabilir. Bu nedenle alaşıma ne kadar karbon katılırsa silisyumun aynı oranda azaltılması gerekir, aynı şekilde yüksek silisyumlu kompozisyon isteniyorsa karbon miktarının düşürülmesi gerekir. Bu miktar aşağıdaki denklem (2.1) ile hesaplanabilir.

$$CEV = \%C + \frac{\%Si}{3} + \frac{\%P}{3} \quad (2.1)$$

Bu eşitliğe göre CEV (carbon equivalent) karbon eşdeğerini temsil etmektedir. Dökme demirlerde yalnızca tek karbon eşdeğeri yoktur. İçerisindeki silisyum ve fosfor miktarı bunun değişmesine sebep olur. İstenilen ideal aralık aşağıdaki şekilde belirtilmiştir. Bu aralıklar döküm gerçekleştirildikten sonra elde edilen son analize göre belirlenmiştir.



Şekil 2.1. Karbon eşdeğerinin aralığı

Kaynak: (Yılmaz, 2019)

Bahsedilen değişkenlere ek olarak, dökümhanelerin kullandığı ocağın tonajı, işlemde kullanılan potanın ölçüleri ve işlem yöntemi de ilk ocak ayarını değiştiren parametrelerdir. Büyük ocaklarda açık yüzey alanı nispeten düşük olduğu için, beklemler sırasında yanan karbon oranı düşüktür. İşlemde kullanılan potanın ölçüleri, boy/çap oranı ve üretim yöntemi de (tel tretman, devirmeli pota, sandviç ya da açık pota gibi) işlem sırasındaki karbon kaybını etkiler. Zaten bu tür değişkenlerin çok fazla olması nedeniyle ocak başlangıç değerleri dökümhaneden dökümhaneye farklılık gösterir (J.D., 2006).

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özellikleri

Küresel grafitli dökme demirler dökme demirler sınıfının mekanik özellikler bakımından en mukavemetli yapılarındandır. Temelinde küresel grafitli dökme demirlerde yapı ve üretim yöntemleri bakımından dökme demirdirler. Diğer dökme demirler gibi yapılarında

ferritik ve perlitik yapılar görülür. Gri dökme demirle aynı ferrit-perlit oranına sahip olmasına rağmen mekanik özellikler bakımından daha iyi özellikleri vardır. Kullanım alanlarına göre ferrit-perlit oranları farklılık gösterebilir. Perlit oranı yüksek ferrit oranı düşük olarak üretilebildikleri gibi aynı şekilde ferrit oranı yüksek perlit oranı düşük yapıda da üretilebilmektedirler. Ferritik yapıdaki küresel grafitli dökme demiri üretebilmek için ısı işleme tabi tutulması gerekmektedir. Isıl işlem uygulanan küresel grafitli dökme demir süneklik ve dayanım bakımından ısı işleme görmemişlere oranla daha yüksektir.

Küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirlik bakımından çelik ve gri dökme demire göre daha iyidirler. Aynı şekilde korozyon direnci de çelik ve gri dökme demirlere göre daha iyidir. Küresel grafitli dökme demirin soğuma hızına ve kimyasal bileşimine bağlı olarak içerisindeki ferrit ve perlitin sertliği, ferrit-perlit oranı ve tane yapılarındaki büyüklükler değişim göstermektedir. Eğer yüksek mukavemet ve sertlik isteniyorsa yapıya suda su verilerek ya da yağda su verilerek hızlı soğuması sağlanır bu şekilde bu özellikleri elde etmek mümkündür. Ancak bu özellikler elde edilirken diğer yandan da yapı ince perlitik yapıya sahip olur ve sünekliğini kaybeder. Buna bağlı olarak tane yapılarında büyüme gözlemlenir. Bunun aksine yapının sünek olması isteniyor ve mukavemet ile sertlikte bir düşüş isteniyorsa yapının ferritik hale getirilmesiyle mümkün olacaktır. Aşağıdaki tabloda ferritik ve perlitik yapıya göre küresel grafitli dökme demirin mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.1. Küresel grafitli dökme demirin mekanik değerleri

Mikroyapı	Ferritik	Perlitik
Çekme Mukavemeti (MPa)	370-550	650-750
Akma Mukavemeti (MPa)	221-350	360-410
Sertlik (BSD)	120-170	240-255
Uzama (%)	12-30	1-8

Hızlı sıcaklık değişimlerinde küresel grafitli dökme demirlerin mukavemetleri çelik ve gri dökme demire göre daha iyidir. Hızlı soğutulan çelikte çarpıklıklar ve çeşitli hatalar görülmekteyken diğer taraftan gri dökme demirde de çatlaklar oluşur. Benzer şekilde küresel dökme demir hızlı soğutulduğunda yapısında çatlaklar ve çarpıklıklar görülmemiştir. Küresel grafitli dökme demirlerin darbe direnci çeliklerdeki gibi sıcaklığa bağlı olarak ve yapı ile bileşimdeki değişmelerden etkilenmektedir. Küresel grafitli dökme demirde ferrit oranı arttıkça tokluğuda artış göstermektedir. Buna karşılık yapıda perlit oranı arttıkça toklukta azalma görülmüştür.

2.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapısı

Küresel grafitli dökme demir döküldükten itibaren soğurken içeriğindeki karbon oranına göre demir karbon denge diyagramındaki yerine göre bir katılma yolu izler. Bu katılma ilk olarak östenit fazlar oluşur. Bu östenit yapıları içerisinde çözünen karbon maksimum çözünme noktasına ulaşır ve östenit yapıdan karbon grafit yapısını oluşturarak ayrışma gösterir.

Dökülen parçadaki sıcaklık düştükçe ve yapı katılaştıkça östenit içerisinde çözünen karbon miktarı da azalır. Bu sebeple östenit yapısından ayrışan karbon difüzyona uğrayarak grafitler halinde toplanırlar. Etrafındaki karbon molekülleri bir araya toplayan bu yapılar diğer dışarıda kalan kısımlardan karbonu çekerler ve karbon oranını bu bölgelerde düşürürler. Bu karbon miktarı düşen bölgeler ferritik yapıları oluşturur. Bu ferritik yapıyı oluşturmanın belli başlı yolları mevcuttur.

1. Küresel grafitli dökme demirin döküldükten sonra yavaş soğuması sağlanırsa bu östenit fazlarının yukarıda anlatıldığı şekilde mekanizmanın çalışmasına zaman tanınmış olacaktır.
2. Küresel grafitli dökme demire binde 2 oranında magnezyum karbür alaşımı kullanılması.
3. Bunlarında dışında yine de perlitik yapılu küresel grafitli dökme demir elde edilmişse ısıtma işlemi ile demir tavlandığında yine ferritik yapılar elde etmek mümkün olacaktır.

Küresel grafitli dökme demirler içerisindeki ferritik yapılar sünekliği arttırırlar. Bu yapıların oluşması yüksek sıcaklıklarda başlar ve dökümü yapılan demir soğudukça ve katılma gerçekleştikçe oluşumları azalır ve perlitlerin oluşmasıyla devam ederler. Perlitlerin oluşumları bitmeden önce yapıda ferrit oluşumu durur. Daha sonra perlitler oluşmaya devam ederler.

Küresel grafitli dökme demirin içerisindeki bu ferrit yapıların ve perlit yapılarının oranı dökme demirin kimyasal analizine ve malzemenin soğuma hızına bağlı olarak farklılık gösterirler. Bu da malzemenin çekme dayanımı, akma dayanımını, yüzde uzama miktarını dolayısıyla sünekliğini, yüzey sertliğini direkt olarak etkilemektedir.

Küresel grafitli dökme demirler içerisinde birden fazla fazı bir arada bulundurabilirler bunlar şu şekildedirler.

2.2.1. Ferrit Fazı

Ferrit fazı temel olarak yapısında düşük miktarlarda karbon içeren fazlardır. Ferrit fazını şu şekilde anlayabiliriz ferrit fazı esasında içerisinde buldukları karbon miktarı bakımından basit yapı bir çelik gibidir. Ferrit tek başına yapıda bulunduğu yüksek mekanik özellikler sergileyemez. Bazı araştırmalarda görülmüştür ki; bu yapılara tek başına değerlendirmek pek mümkün olmasa da yaklaşık olarak 280 MPa mukavemet ve 85 HV sertlik göstermişlerdir. Bu ölçümlerin ne kadar sağlıklı olduğunu tartışmakla beraber fikir vermesi açısından değerlendirilmiştir. Buradan yola çıkarak küresel grafitli dökme demirin yapısında %100 oranında ferrit bulunduğu düşük mukavemet ve sertlik değerlerine sahip olacaktır. Diğer taraftan da malzeme yüksek sünekliğe ve tokluğa sahip olacaktır.

2.2.2. Perlit Yapısı

Perlit aslında tek başına bir faz değildir. Perlit sementit ve ferritin bir araya gelmesiyle oluşur. Sementit ise Fe_3C bileşimli bir demir karbürüdür. Bu iki faz ince tabakalar halinde bir araya gelmesiyle oluşurlar. Perlit iki fazın karışımıdır. Bu yapıda ince karbür tabakaları arasına giren ferritik yapılar sayesinde tek başına ferrite göre kıyaslandığında daha sert ve mukavim bir yapıdır. Ancak diğer taraftan da gevrek bir yapıdır. Ancak %100 perlit olmadığı durumlarda bu gevreklikten bahsetmek genel yapı itibarıyla mümkün olmayabilir.

Perlitin oluşma mekanizması şu şekildedir. Ferritin aksine soğuma hızındaki artış ile karbon difüzyonuna zaman tanımadan sementitler oluşur. Bu karbür yapılar hemen etrafındaki bölgeden karbonu çekerek bu bölgelerin ferritik yapıda olmasını sağlar ve bu şekilde peşi sıra sementit- ferrit katmanları oluşur.

2.2.3. Grafitler

Grafit yapısı temel olarak karbon atomlarının bir araya gelmesiyle oluşurlar. Bir araya gelen bu karbon atomları hegzagonal tabanda birbirini üzerine ve her iki yönde çöklerler. Grafitler sahip oldukları iyi ısı iletkenlikleri nedeniyle ısıyı malzeme içinde her noktaya yayarlar ve homojen bir soğumaya sebep olurlar. Diğer taraftan da malzemeye iyi ısı iletkenlik özelliği kazandırırılar.

Grafitler demire oranla düşük yoğunluğa sahiptirler. Bu sayede malzemedeki katılma ile bir miktar hacim artışı gözlemlenir. Bu hacim artışı ile metal itilir ve ufak çekinti boşlukları giderilir. Karbon atomlarının bir araya gelmesiyle oluşan bu küresel yapıdaki grafitler sıvı metali çekinti oluşan noktalara doğru iterek boşlukları kapatırlar.

2.2.4. Sementit Fazı

Fe_3C bileşimindeki bu yapı diğer bir deyişle karbür olarak bilinir. Demir karbür olan bu faz sert ve kırılğan bir yapıya sahiptir ve malzemenin kırılğanlığını artırır. Dökümü yapılan malzeme içerisindeki ince çeperli noktaların diğer yerlere oranla hızlı soğuması ile oluşurlar. Malzeme içerisinde dayanımı düşürdükleri için tek bağlarına bazı noktalarda kümelenmeleri istenmez. Bu yapılar malzemenin işlenmesini zorlaştırır kırılğan yapı sergilerler. Bu fazların oluşumunu engellemek için dökme demire döküm prosesinde aşılama yapılmaktadır. Bu aşılama temel olarak Si' den oluşmaktadır. Silisyum ve dolayısıyla bu aşılama prosesi katılma sırasında grafit ayrışmasını destekler ve karbür yerine grafit oluşumu olur. Bu şekilde kırılğan yapılar engellenir.

2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Grafitin Mekanik Özelliklere Etkisi

Dökme demirler arasında küresel grafitli dökme demiri diğer dökme demirlerden ayıran en büyük özellik şüphesiz küresel grafit yapısına sahip olmasıdır. Dökme demirlerin bünyesinde meydana gelen fazlara bakıldığında küresel grafitli dökme demirde de aynı fazlar meydana gelmektedir. Gri dökme demir ile küresel grafitli dökme demiri kıyaslayacak olursak her ikisinde de ferritik ve perlitik fazlar meydana gelmektedir.

Ancak aynı fazları buldurmalarına rağmen farklı ısı ve mekanik özellikler sergilemektedirler. İşte bu noktada bu farklılığı oluşturan temel etkenin grafit biçimi olduğunu görmekteyiz.

2.3.1. Çekme Mukavemetine Etkisi

Grafit, yapının mekanik özelliklerini önemli derecede etkiler. Gri dökme demire göre kıyaslandığında; gri dökme demirin maksimum çekme mukavemeti, küresel grafitli dökme demirin minimum çekme mukavemetine eşit olacaktır. Buradan yola çıkarak plastisitesi (süneklik) yüksek ve mukavemeti düşük bir küresel grafitli dökme demir yaklaşık 400 MPa çekme mukavemetine sahiptir, gri dökme demirde bu değere çoğu zaman ulaşamaz ya da en fazla değer olarak kabul edilebilir. Ancak küresel grafitli dökme demirlerde bu miktar çok daha yukarılara çıkartılabilir. Gerekli üretim metodları uygulandığında bu değer iki katına çıkılabilmektedir.

2.3.2. Akma Mukavemetine Etkisi

Küresel grafitli dökme demirlerin diğer bir adları ise düktil (ductile-sünek) dökme demirlerdir. Sünek yapı diğer dökme demir yapılarında gözlenmez. Sünek yapının olmadığı yerde de akma dayanımından bahsetmek anlamsız olmaktadır. Gri dökme demir gibi demirlerde gevrek kırılma görülür. Ancak küresel grafitli dökme demirlerde 400 MPa çekme mukavemeti gösterdiği durumda akma mukavemetinde yaklaşık olarak 250 MPa olması mümkündür.

2.3.3. Yüzde Uzama Miktarına Etkisi

Gri dökme demir ve diğer küresel grafit yapısına sahip olmayan dökme demirlerin yapılarındaki lamel yapılı grafitler malzemenin uzama miktarının düşmesine neden olur. Bunun ana sebeplerinin başında lamel grafitin mikroyapıda çentik etkisi yaratıyor olmasıdır. Malzeme uzayamadan kopma gerçekleşir. Ancak küresel grafitli dökme demirlerin sünek yapıları sayesinde uzama gerçekleşmektedir. Bazı süneklik bakımından iyi olan küresel grafitli dökme demirlerin %18-30 arasında uzama gerçekleştirdiği görülmüştür. Ancak özel olarak sertleştirilen veya sertlik değerini arttırmak için farklı kimyasal yapıya sahip küresel grafitli dökme demirlerde uzama miktarları düşüş göstermektedir.

Mukavemet arttıkça malzemenin yüzde uzaması düşmektedir. Bu olayın temelindeki sebep şudur; mukavemeti arttıran perlit yapısıdır. Mikroyapıda perlit oranı arttıkça mukavemet artar. Perlit yapıda içerisinde semetit ve ferriti barındırır. Sementitler uzamayı olumsuz yönde etkiler ve kopma olur. Ancak bazı proses ve alaşım elementi takviyeleriyle hem yüksek mukavemet hem de yüksek uzama miktarlarına rastlanılmaktadır.

2.3.4. Sertliğe Etkisi

Nasıl ki süneklik ile akma mukavemeti doğru orantılı ise çekme mukavemeti ile de sertlik doğru orantılıdır. Bu yüzden ki küresel grafitli dökme demirin çekme mukavemeti ne kadar yüksek olursa sertlik değeri de o kadar yüksek olacaktır. Sertlik değeri ve dolayısıyla çekme mukavemeti küresel grafitli dökme demirin yapısındaki perlit oranına bağlı olarak değişmektedir. Perlitik yapı ne kadar fazla olursa sertlik değeri de o kadar fazla olacaktır.

2.3.5. Darbe Sönülmeye Etkisi

Dışarıdan gelen darbeler gri dökme demirlerde küresel grafitli dökme demirler kadar iyi sönümlenemez. Bunun sebebi yapılarında buldukları lamel grafitlerdir. Lamel grafitlerin iğnemi uçları çektik etkisi yaratır ve yapıda ilk etapta mikro çatlaklar meydana gelir daha sonra bu mikro çatlaklar makro çatlaklara dönüşür ve kırılma olur. Küresel grafitli dökme demirlerde ise içerilerinde buldukları ferritik yapılar sünek bir yapı oluştururlar ve malzemenin tokluğu artırırlar. Tokluk ne kadar yüksek olursa malzemenin darbeleri absorbe etme yetenekleri o kadar fazla olacaktır. Bu sebeple yüksek tokluk ve süneklığe sahip küresel grafitli dökme demirler yüksek darbe dayanımına sahip olacaklardır.

2.3.6. Isıl İletime Etkisi

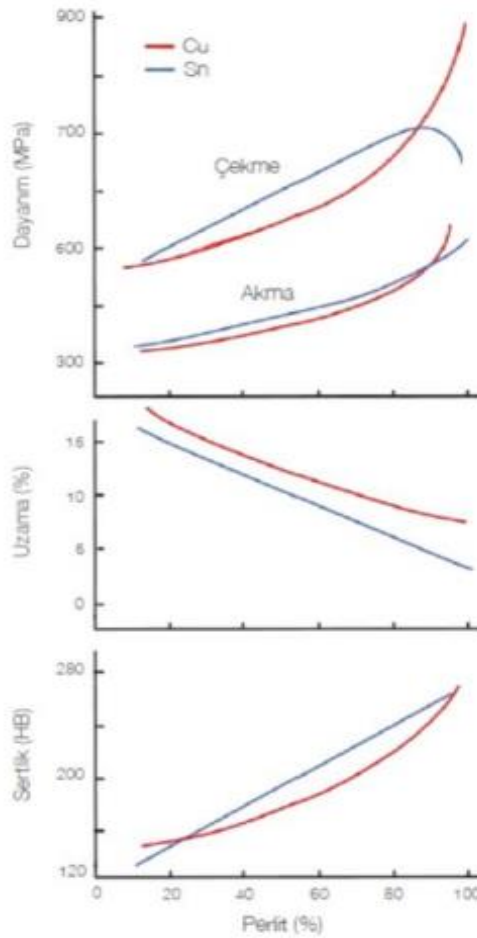
Mekanik özelliklerin tersine ısı özelliklerinde gri dökme demir daha etkilidir. Yapısındaki lamel grafitler ısıyı iletmede daha iyidir. Bunun ana sebebi daha yüksek bir yüzey alanına sahip olması olmasıdır. Küresel yapıdaki grafitler birim karede yüzey alanı daha düşük kalmaktadır. Bu da küresel grafitli dökme demirlerin ısı iletkenliklerini düşürmektedir. Bu yüzden yüksek sıcaklıklar altında çalışan parçalarda genellikle gri dökme demirler tercih sebebi olmaktadır. Isıyı iyi iletmedikleri için bünyelerinde ısıyı tutmazlar ve dayanımlarını ve mekanik özelliklerini korumaya devam ederler.

2.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik Özelliklerini Etkileyen Faktörler

2.4.1. Ana Matrisin Oranı

Küresel grafitli dökme demirler ferrit ve perlitten faz ve yapılardan oluşurlar. Bu faz ve yapıların yüzdeleri malzemenin mekanik özelliklerini tamamen etkilemektedir. Küresel grafitli dökme demirler bu iki faz ve yapıdan oluşur ancak bazı durumlarda östenitik ve martenzitik yapılara rastlamakta mümkündür. Bunun sebebi değişken çevre koşulları sebebiyle soğuma hızlarındaki değişikliklerdir. Ancak bu fazların oranları düşük olduğunda göz ardı edilebilir çünkü mekanik özellikler ferrit ve perlite bağlı olacaktır.

Şekil 2.2.'de perlit oranına bağlı olarak değişen mekanik özellikler verilmiştir. Buna göre perlit oranı arttıkça çekme dayanımı artış göstermektedir. Aynı şekilde doğru orantılı olan sertlik miktarı da artış göstermiştir. Ancak yapının sertleşmesi ve gevrekleşmesi ile yüzde uzaması düşmüştür. Malzemedeki mukavemet arttıkça süneklik olumsuz etkilenmekte ve uzama ve süneklige bağlı olan akma mukavemeti gibi özellikler düşmektedir.



Şekil 2.2. Perlit oranına göre değişim gösteren mekanik özellikler

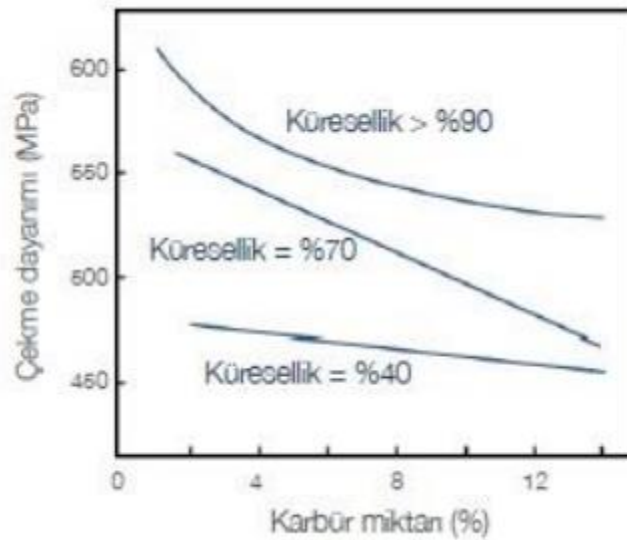
Kaynak: (Yılmaz., 2019)

2.4.2. Küresellik Derecesini Etkileyen Faktörler

Küresellik derecesi, küresel grafitli dökme demirdeki grafitlerin tam küreye benzeme oranlarıdır. Ne kadar tam küreye yakın olurlarda o kadar kaliteli bir formda oldukları kabul edilir. Mikroskop altında birim karede ne kadar çok tam küre mevcutsa küresellik o kadar yüksek olduğu kabul edilir. Diğer yandan kürelerde çarpılma, patlaklık gibi çeşitli bozulmalar mevcutsa küresellik derecesi o oranda düşüş gösterecektir.

Küresellik oranı ne kadar fazla ise mekanik özelliklerde o yönde iyi olacaktır. Küresel formdan uzaklaşıldığı takdirde mekanik özelliklerde o oranda düşecektir. Kürelerdeki bozulmalar yüksek mukavemet ve yüksek uzama gibi özellikler gibi pek çok mekanik özelliği etkileyecektir. Küresellik derecesinin düşmesi kimi zaman yapıda karbürlerin oluşmasına sebebiyet verebilir ve bu da mekanik özellikleri ciddi şekilde düşürmektedir.

Küresellik derecesinin düşmesinde aşının az kullanılması hızlı soğumalar gibi sebeplerden meydana geliyor olabilir.



Şekil 2.3. Çekme dayanımının karbür miktarına göre değişimi

Kaynak: (Yılmaz, 2019)

Küreselliğin çekme dayanımına etkisi yukarıdaki grafikte verilmiştir. Buna göre küresellik ne kadar düşerse çekme dayanımı da o oranda düşüş göstermektedir.

2.4.3. Küre Sayısını Etkileyen Faktörler

Küresellik derecesi ile küre sayısı çoğu zaman birbirine karıştırılır ancak ikisi de birbirinden farklıdır. Küre sayısı birçok farklı değişkene bağlı olarak değişim gösterir ve küresel grafitli dökme demirin özelliklerini etkiler. Küresel grafitli dökme demirlerin yapısındaki bu grafitlere nodül adı da verilir bu nedenle literatürde nodül sayısı olarak geçen bu parametre 1 mm^2 'ye düşen küre/nodül sayısıdır. Küre 3 boyutlu olmasına rağmen bu sayı 2 boyutlu düzleme göre verilmiştir. Bunun sebebi mikroskopta 2 boyutlu düzlem baz alındığından bu şekilde incelenmektedir. Küre sayısının azalması doğrudan mikroyapıyı etkiler ve dolayısıyla mekanik özelliklerde düşüş gözlemlenir. Ancak küre sayısı fazla olursa tane incelenmesi görülür.

Bu da daha homojen bir yapı demektir. Böylelikle mekanik özelliklere zararlı olacak yapılar homojen yapıdan dolayı dağılmış olacak ve zararları minimize edilmiş olacaktır.

Birim kareye düşen küre miktarı arttıkça kürelerin boyutları küçülmektedir. Böylelikle tane boyutlarında incelmeye olur bu da mukavemeti artırır. Diğer yandan da küre sayısı arttıkça perlit miktarı azalmaktadır. Perlit miktarının düşmesi çekme mukavemetini düşürür ve sünekliği artırır.

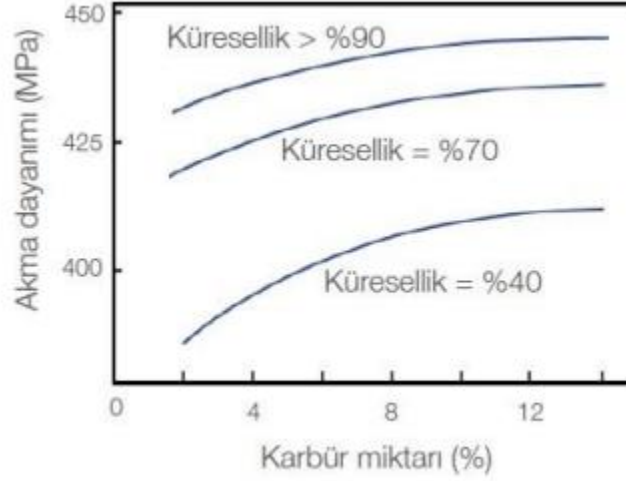
Küre sayısının artması yapıdaki homojenliği arttıracakını söylemiştik. Böylelikle yapıda karbür oluşma olasılığı da düşecek ve çekme mukavemeti, süneklik, işlenebilirlik artacaktır.

2.4.4. Kürelerin Boy Dağılımının Yapıya Etkileri

Kürelerin boy dağılımlarına bakıldığında hepsinin hemen hemen aynı boyda oldukları durum istenmez. Büyük kürelerin ve küçük kürelerin bir arada oldukları durumlar genellikle istenir. Bunun sebebi doğrudan mekanik özelliklere etkisinden değildir. Kürelerin farklı boyutlarda olması çekirdeklenmenin katılaşmanın sonuna kadar devam ettiğini göstermektedir. Çünkü çekirdeklenme ile grafitin ittiği metal mikroçekinti boşluklarına itilir ve çekinti hataları giderilir. Bu da ne kadar çok ve uzun süre devam ederse çekinti hataları o kadar minimize edilmiş olur. Bu yüzden katılaşmanın sonuna kadar devam etmesi istenir. Bu sebepten farklı boyutlardaki kürelerden bu anlaşılır.

2.4.5. Karbür Miktarının Etkisi

Küresel grafitli dökme demir bünyesindeki karbürün miktarını değiştirmek mümkündür. İstenilen özelliklere ulaşmak için karbür miktarında oynama yapılabilir. Bunu karbür yapıcı elementler ile yapıda karbür oluşumu desteklenebilir. Ancak karbür akma mukavemeti ve çekme mukavemetini ters oranda etkiler. Akma mukavemetini artırırken çekme mukavemetini düşürür. Eğer yapıda küresellik derecesi düşükse yapıdaki karbür miktarının artmasıyla akma mukavemeti artış gösterir. Çekme mukavemeti de tabii ki düşer. Ancak küresellik derecesi yüksek ve yapıda karbürlerin miktarı da çoksa çekme mukavemetinde büyük bir düşüş görülür.



Şekil 2.4. Akma dayanımının karbür miktarına göre değişimi

Kaynak: (Yılmaz, 2019)

Yukarıdaki grafiğe göre karbür miktarı arttıkça akma mukavemetinin arttığını görmekteyiz. Diğer yandan küresellikte yüksek olduğunda karbür miktarındaki artışın akma mukavemetini ciddi şekilde arttırdığı görülmektedir.

2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementlerinin Etkileri

Küresel grafitli dökme demir üretilirken, dökülecek parçanın kullanım yerine göre hedeflenen veya istenen bir mekanik özellikler aralığı vardır. Malzemedeki beklenen bu performansın istenilen aralıkta olmasını belirleyen ana faktörlerden biri malzemenin içeriğindeki alaşım elementlerinin oranıdır. Bu oran önemlidir ve kritik parçalar için gizli tutulur. İçeriğe katılan her bir elementin görevi vardır. Bazıları yapıda minimum seviyede istenirken bazılarının optimum olarak bulunması gereken miktarlar belirlenir.

Kurşun (Pb), fosfor (P), kükürt (S), bizmut (Bi), antimon (Sb) gibi elementler dökme demirin yapısında istenmezler. Ancak üretimde kullanılan hammaddelerin içinde yapıda bir şekilde bulunabilirler. Bunların zararlı etkilerinden etkilenmemek için malzeme içerisinde minimum seviyede bulunmasına dikkat edilir. Az bir miktar yükselmeleri halinde bile mukavemeti ciddi anlamda düşürebilirler.

Karbon (C): Dökme demirlerin, çeliğin olmazsa olmaz ana alaşım elementlerinden biridir. Karbon miktarı o kadar önemlidir ki yapının çelik ya da dökme demir olmasını belirleyen ana sebeplerden biridir. Küresel grafitli dökme demirlerde grafitin ana kaynağıdır.

Karbon oranı grafit nodüllerinin sayısını belirler. Karbon sıvı haldeki metalin akışkanlığını artırır ve dökülebilirliğini kolaylaştırır.

Silisyum (Si): Silisyum, küresel grafitli dökme demirlerde ve diğer dökme demirlerde grafitleşmeyi destekleyici olarak kullanılır. Silisyum, karbon segregasyonunu artırıcı etkisi vardır. Yani karbonun aktivitesini yükselterek ayrışmasını ve grafitler halinde bir araya gelmelerini tetikler. Öte yandan silisyum, soğuma esnasında ötektoid dönüşüm esnasında ferrit oranını artırır ve mukavemette bir artış gerçekleşir. Silisyumu piyasada metalik halde yani saf silisyum şeklinde bulmak zordur. Bu yüzden genellikle alaşımları yapıya katılır. Bu alaşımlar FeSi (ferro silisyum) ya da SiC (silisyum karbür) şeklindedir.

Bakır (Cu): Bazı küresel grafitli dökme demir çeşitlerinde perlit oluşumunu destekleyerek mukavemeti artırıcı etkisi olduğu için kullanılır. Ancak bakırın küresel grafitli dökme demir içerisindeki çözünürlüğü %3,5 dur bu miktardan daha fazlasını metal içerisine kabul etmez. Diğer yandan da küresel grafitli dökme demirde küreselleştirici etkisinden dolayı kullanılan magnezyum da bakırın çözünürlüğünü %3'lere kadar düşürür. Bakırın grafitleşmeye olumlu yönde etki ettiği görülmüştür. Bakır perlit oranını arttırdığı için malzemenin çekme mukavemeti ve sertliği artar. Ancak fazla kullanıldığı durumlarda yüksek perlit oranından dolayı malzeme kırılganlaşır. Akma mukavemeti düşer ve buna bağlı olarak tokluk ve çekme mukavemeti, sertlik değerlerinde düşüş gözlemlenir.

Kalay (Sn): Hemen hemen bakır ile aynı etkiye sahiptir. Ancak çok daha kuvvetli bir perlit yapıcıdır. Çok daha az miktarlar kullanılarak bakır ile aynı etki görülür. Bundan dolayı yapıya katılırken çok hassas ilave edilmelidir. Az bir miktar fazla atılması durumunda bile yapı gevrek bir hal alır ve kırılganlaşır. Kontrol etmesi zor olduğu için dökümhanelerde genellikle bakıra tercih edilir.

Mangan (Mn) : Mangan küresel grafitli dökme demirde perlitik yapıyı desteklediği için sertlik katar. Bununla birlikte çekme mukavemetini artırır. Ancak yüksek süneklik istenen ferritik yapılu küresel grafitli dökme demirlerde %0,2'yi geçmemesi istenir. Diğer yandan perlitik yapılu sfero dökme demirlerde %1'e kadar yapıda bulunmasının bir sakıncası görülmez.

Olumsuz yönlerine bakacak olursak mangan yapıda bazı mikrosegregasyonlara sebep olabilir. Bu yüzden geniş kesitli parçalarda minimum seviyelerde olması istenir. Tokluğu ve akma mukavemetini düşürür.

Nikel (Ni): Nikel, küresel grafitli dökme demirlerde mukavemeti artırır. Grafitleştirici etkisi vardır. Dökme demirin sertliğini arttıracığından dolayı ısıtma işlemi uygulanacak proseslerde kullanılır. Karbür oluşturma eğilimleri yüksek olduğundan dolayı dökme demirlerde kullanılması yaygın görülmez.

Molibden (Mo): Bazı küresel grafitli dökme demir türlerinde kullanılır. Molibden küresel grafitli dökme demirin yapısına katıldıklarında sertleşebilirliğini artırır. Bu özellikleri bakımından en iyi etkiye sahip alaşım elementidirler. Karbürizasyonu arttırıcı etkisi ile kalın kesitli parçaların dökülmesinde kullanımları mevcuttur. Küre sayılarının artışı ile molibdenin karbürizasyon etkisi ters orantılıdır küre sayısı arttıkça molibdenin etkinliği azalır. Tane dışındaki bölgelerde segregasyon oluştururlar. Mekanik özelliklere etkisi bakımından mangana benzerler. Ancak mangandan on kat daha güçlü bir etkiye sahiptir. Bu yüzden alaşıma ilave edilirken dikkatli davranılır. Güçlü bir karbür yapıcı olduğu için analizde %0,3 olacak şekilde sınırlandırılırlar.

Magnezyum (Mg): Küresel grafitli dökme demire ismini veren küre şeklindeki grafitleri küreselleştiren alaşım elementidir. Küreselleştirici etkiye sahip başka alaşım elementleri olsa da en yaygın olarak kullanılan magnezyumdur. Dökümhanelerin şartlarına, teknolojisine, nitelikli eleman sayısına göre kullanım oranı değişiklik gösterebilir.

Cevherden ve çeşitli hammaddelerden sıvı metalin içerisine girmiş olan kükürt ve oksijen dökme demirin yapısında çeşitli hatalara ve mukavemeti düşürücü etkilere sahiptir. Bu nedenle ergitilmiş metalin içerisindeki kükürt ve oksijeni magnezyum ile bağlayarak serbest halde dolaşmaları engellenir. Magnezyumun fazla kullanılması durumunda yapıya döküm sırasında katılacak olan aşının etkinliğini bozduğu ve grafitlerin küreselliğini düşürdüğü gözlemlenmiştir. Magnezyumun fazla kullanıldığı durumlarda cüruf hatalarının arttığı görülmüştür. Bu yüzden dökümhane şartlarına göre optimum magnezyum kullanımı belirlenmelidir.

Fosfor (P): Küresel grafitli dökme demirde fosfor “steadit” olarak bilinen çok kırılğan bileşiğin oluşumuna neden olur. Tokluğu, sünekliği, kaynak edilebilirliği ve plastik şekil değiştirmeyi kötü yönde etkiler. Çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve sertlik fosforun artmasıyla artış gözlenirken uzama değerinde düşüş gözlenir. (Özdemir Ö.,2007)Ancak %0,1’e kadar yapıda bulunması akışkanlığı yükseltir ve dökümü kolaylaştırır.

Kükürt (S): Gri dökme demirlerin içerisinde %0,25’e kadar bulunmalarına müsaade edilirken aynı durum küresel grafitli dökme demirler için geçerli değildir. Çünkü dökme demirlerin içerisinde grafitleşmeyi sınırlayıcı bir etkiye sahiptir. Yapıyı gevretir ve kırılğanlığı arttırır. Malzemenin işlenebilirliğini düşürür. Kükürt dökme demirin yapısındaki karbonların bileşik yapmalarını teşvik eder. Bu yüzden karbon segregasyonunu düşürür. Bu dışında demir ile reaksiyona girerek demir sülfür bileşikleri oluşturur. Bu bileşiklerin ergime noktaları

düşüktür ve yapıda bulunmaları dentritik yapıların oluşmasına sebep olur. Bu da dökme demirin yüksek sıcaklıklarda gevrek davranış sergilemesine sebep olur ve yüksek sıcaklıklar altında malzeme kırılır. Demir sülfürlerin yapıda fazla olması karbürleştirici etki yapacağından ve malzemeyi kırılğan yapacağından istenmezler.

2.6. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Aşılama

Aşılama kelime anlamı olarak küresel grafitli dökme demirde grafit nodüllerinin çekirdeklenen kısımlarının sayısının artırılmasıyla dökme demirin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin kontrol edilmesi işlemidir. Dökümü gerçekleşen sıvı metalin ötektik katılaşma sırasında aşırı soğumasını engeller ve böylece ince kesitli noktalarda sert demir karbürler ve çil oluşumu olasılığı azalır.

Aşı denilen malzeme aslından silisyum esaslı bir alaşımdır. Ancak içerisindeki az miktarda bulunan etken madde aşının kalitesini ve işlevini tamamıyla değiştirmektedir. Aşılama, birçok farklı aşamada yapılabilir. Ancak aşının hangi aşamada yapılıyorsa yapılsın dökülecek metalin kimyasal bileşiminde önemli ölçüde değişim yaşanmayacaktır. Aşılama dökümü yapılacak parçanın kaliteli olmasında gerekli olan proses adımıdır. Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özelliklerini direkt olarak etkiler. Diğer taraftan küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı aşılamaadan önemli bir şekilde etkilenir.

Aşının temel amaçlarından birisi dökümü yapılan malzemenin döküldükten sonra homojen olarak katılaşmasını sağlamaktır. Bununla birlikte soğuyarak katılaşan küresel grafitli dökme demirin nodüllerinin fazla büyümelerini önler. Diğer yandan karbür oluşumunu azaltır. Küresel grafitli dökme demirlerin yapısına katılan en verimli aşılar silisyum bazlı aşılardır. Bu aşılarda da %50- %80 arasında değişkenlik gösteren silisyum oranları vardır. Piyasada yaygın olarak kullanılan bazı aşılarda kimyasal kompozisyonları aşağıdaki gibidir.

Tablo 2.2. Aşılaiıcıların ticari isimleri ve kimyasal analizleri

Aşılaiıcı	%Si	%Ca	%Ba	%Sr	%Zr	%Ce	%Mn	%Al	%Ti	%Cr	%C
Superseed 50 (Ferrosilisyum)	45-50	0.1 max		0.6-1				0.5 max			
Superseed 75 (Ferrosilisyum)	73-78	0.1 max		0.6-1				0.5 max			
Superseed 85 (Ferrosilisyum)	83-87	0.5-0.8						1.1-1.4			
Ultraseed Ferrosilisyum	70-76	0.75-1.25						0.75-1.25			
Kalsiyum Silisyum	61-64	29-31						0.5-0.75			
V – 5 Alaşımı	16-20									40	
Graphidax	48-52	5-7							8-11		
Inoculary 63	59-62	1.8-2.4	4.6-5				9-12.8	0.8-1.5			
SMZ	62-69	0.6-1.9	0.3-0.7								
Grafit	-										97-99
Ferrokrom	11									58-61	
Baryum Aşılaiıcı	72-78	1-2	2-3					1.5 max			
Zirkonyum Aşılaiıcı	73-78	2-2.5			1.3-1.8						
Alüminyum Aşılaiıcı	70-75	0.5-1.5						3.5-4.5			

Kaynak: (Şen, 2018)

Aşılar dökümü yapılacak parçanın kesit kalınlığına kimyasal kompozisyonuna göre farklı seçenekleri mevcuttur. Bununla birlikte aşıdan istenilen performansta değişkenlik gösterecektir. Aşılaiıcı ilavesi aşırı soğumayı önlemektedir.

Aşılacağı seçimi ve hangi oranda katılacağını belirlemek için dökülecek parçanın kimyasal bileşimi, kesit kalınlığı, döküm esnasındaki sıcaklık, aşılama yapıldıktan ne kadar süre sonra döküleceği gibi birçok farklı değişken vardır. Bu değişkenlere göre farklı aşılama, farklı boylarda aşılama kullanılabılır.

2.7. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Çeşitleri

Küresel grafitli dökme demirler farklı içeriklere göre farklı standartlara uygun üretilebilirler. Bu standartlara göre de farklı çeşitlere ayrılırlar. Dünya genelinde birçok farklı standart vardır. Her bir standarda göre farklı sembollerle gösterilirler. Küresel grafitli dökme demirlerde dünya genelinde en çok kullanılan ve kabul görmüş olanı Tablo 2.3'te Alman (DIN) standartlarına göre GGG kodu ile gruplandırılmıştır. Buna göre farklı içeriğe sahip küresel grafitli dökme demirlerin çeşitleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2.3. Alman standartlarına göre küresel grafitli dökme demir çeşitleri

Sınıf	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti(MPa)	% Uzama
GGG-40	400	250	15
GGG-50	500	320	7
GGG-60	600	380	3
GGG-70	700	440	4
GGG-80	800	500	2

Kaynak: (TMMOB Metalurji Müh. Odası, KOSGEB, 2006)

Bunun dışında EN-1563 standardına göre yapılan sınıflandırma yöntemi de mevcuttur. Bu yönteme göre yapılan sınıflandırma Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. EN-1563 standartlarına göre küresel grafitli dökme demir çeşitleri

Gösterim	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
EN-GJS-350-22-LT	350	220	22
EN-GJS-350-22-RT	350	220	22
EN-GJS-350-22	350	220	22
EN-GJS-400-18-LT	400	240	18
EN-GJS-400-18-RT	400	250	18
EN-GJS-400-18	400	250	18
EN-GJS-400-15	400	250	15
EN-GJS-450-10	450	310	10
EN-GJS-500-7	500	320	7
EN-GJS-600-3	600	370	3
EN-GJS-700-2	700	420	2
EN-GJS-800-2	800	480	2
EN-GJS-900-2	900	600	2

Kaynak: (Yılmaz,2019)

Bu tabloya göre isimlendirme maksimum çekme dayanımı ve yüzde uzamaya göre yapılmış ve sonuna düşük sıcaklıkta (LT) ya da oda sıcaklığında (RT) olarak belirtilmiştir.

Bunların dışında Türk Standartları Enstitüsü'nün de kendi sınıflandırma yöntemi mevcuttur. Türk Standartlarına Enstitüsü'ne göre küresel grafitli dökümlerin sınıflandırılması Tablo 2.5'te gösterilmiştir.

Tablo 2.5. Türk Standartları Enstitüsü'ne göre küresel grafitli dökme demir çeşitleri

Gösteriliş	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama(%)	Sertlik(HB)	Mikroyapı
DDK 40	400	280	12	140-201	Ferritik
DDK 50	500	350	7	170-241	Ferrit + Perlit
DDK 60	600	400	3	192-269	Ferrit + Perlit
DDK 70	700	450	2	229-302	Perlitik
DDK 80	800	500	2	248-352	Perlitik
DDK 35.3	350	220	22	-	Ferritik
DDK 40.3	400	250	18	-	Ferritik

Kaynak: (TMMOB Metalurji Müh. Odası, KOSGEB, 2006)

2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi

Ocak şarjı ve ergitme işlemi küresel grafitli dökme demirlerle gri dökme demirlerin aynıdır. Ergitilen metali ocaktan aldıktan sonra farklılıklar başlar. Burada da en temel fark magnezyum gibi küreselleştirici etki yapan alaşım elementlerinin ilave edilerek reaksiyona girmesidir. Diğer yandan küresel grafitli dökme demirde döküm kumundaki nem oranına dikkat edilmesi gerekmektedir. Çünkü magnezyum ile reaksiyona girmiş metalin oksitlenmesi kolaydır. Bunu engellemek için döküm kumunun nem oranı önem teşkil etmektedir. Döküm kumundaki yanıcı maddenin toplamı %6-7'yi geçmemesine dikkat edilir. Döküm kalıbı için kullanılan kum karışımı ve kalıplama gri dökme demirdeki gibi belirlenen kriterlere uygun olmalıdır.

Ocak şarjı yapıldıktan ve gerekli alyajlar eklendikten sonra katı şarj ergimeye bırakılır. İndüksiyon ocağında ergiyen sıvı metalin kimyasal analizine bakılmak için ocaklardan numune alınır. Daha sonra istenilen kimyasal bileşim elde edilmesi için gerekli alyaj ilaveleri yapılır. İlavelerden sonra tekrar bir kontrol için numune alınabilir. Buradan sonra sıvı metal magnezyum tretmanı için potaya alınır.

İşlemden önce reaksiyonun gerçekleşeceği potanın sıvı metal kapasitesine göre ilave edilmesi gereken magnezyum ve eğer bakırlı döküm yapılacaksa bakır ilaveleri hesaplanıp tretman potasının bir cebine konulur. Bu noktada farklı yöntemler mevcut olsa da en yaygın olarak kullanılan metot iki cepli tretman potasının bir cebine magnezyum konulduktan sonra

üzeri çelik talaş ile örtülüp dövme işlemi gerçekleşir. Bu dövme işleminin yapmayan dökümhanelerde sadece örtü için çelik pul koyulur. Ocaktan metal tretman potasına alınır ve reaksiyon gerçekleşir. Daha sonra final kompozisyon kontrol edilmek için numune alınır. Bu noktada kalıcı magnezyuma ve diğer elementlerin yüzdeleri kontrol edilir. İstenilen kimyasal analize uygun olup olmadığı kontrol edilir. Burada numune hızlı soğutulduğu için herhangi bir küresellikten veya mikroyapı analizinden bahsedilmez. Burada önemli olan kimyasal bileşimin istenilen aralıklarda tutmaktır.

Bileşim kontrolü açısından basit bir yöntem karbon eşdeğerliği değerini soğuma eğrisinden elde etmektir. Ancak ölçümün doğru olması, soğuma eğrisinin alınacağı numunenin beyaz dökme demir olarak katılaşmasını (grafitsiz) gerektirir. Karbon eşdeğerliği soğuma eğrisindeki ilk duraklama ile ötektik duraklaması arasındaki sıcaklık farkına bağlı olmaktadır. Diğer elementlerin küçük etkileri ihmal edildiğinde ötektik duraklamasının mutlak değeri Si miktarına bağlıdır. Dolayısıyla toplam karbon denklem (2.2)'ye göre belirlenir.(Yılmaz, 2019)

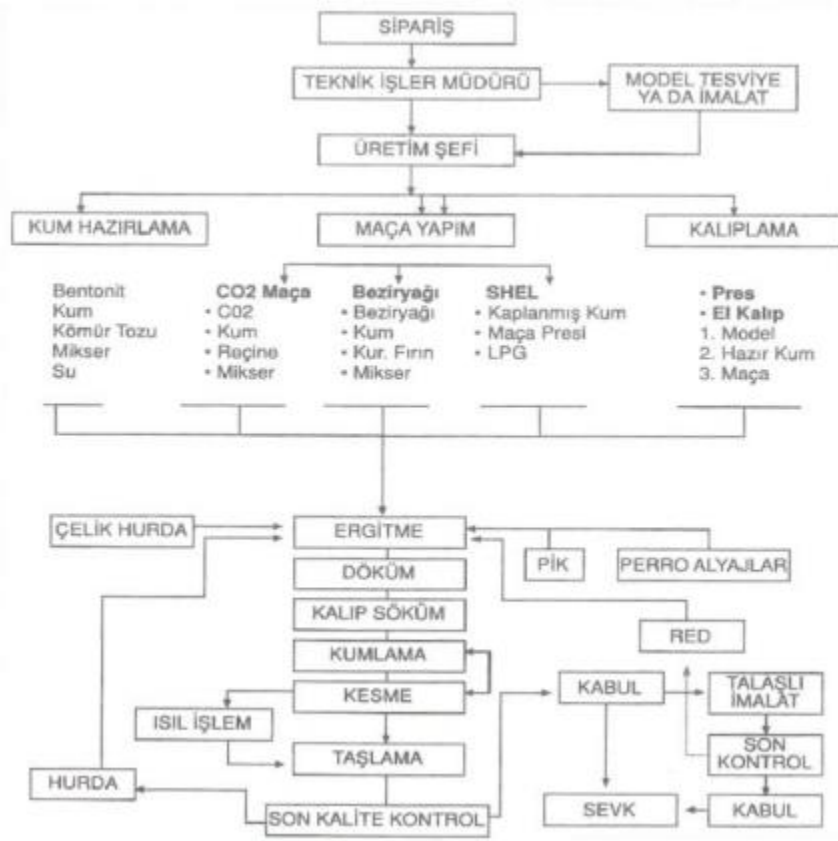
$$\text{Toplam karbon} = C_1T_b - C_2T_0 - C_3 \quad (2.2)$$

Burada C_1 , C_2 ve C_3 malzeme ile ilgili sabitlerdir. T_b ve T_0 birinci ötektik duraklama sıcaklıklarını göstermektedir. Sabit değerler tablo veya ilgili cetvellerden bulunabilir. Toplam karbon ve karbon eşdeğerliği bilindiğinde silisyum oranı %Si denklem (2.3) bağıntısından bulunacaktır.(Yılmaz, 2019)

$$\%Si = C_4(\text{karbon eşdeğerliği} - \text{toplam \%C}) \quad (2.3)$$

Burada C_4 yaklaşık olarak 3,4'tür, ancak kesin değer ayrı olarak yapılan silisyum analizi ile saptanabilir. (Yılmaz, 2019)

Bu işlemler dökümhaneden dökümhaneye farklılık gösterebilir. Ancak örnek bir dökümhane işlem şeması Şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.5. Döküm işlemi akış şeması

Kaynak: (R., Cast Iron Technology, 1988)

2.9. Silisyum Karbür (SiC) ve Üretimi

Amerikalı kimyacı Edward G. Acheson karbon ve grafit üretim yöntemleri üzerine çalışmalar yapmaktaydı. SiO₂ ile grafiti elektrikli fırında indirgenmesi işlemi yapılırken daha fazla karbon kullanıldığı durumda SiC bileşiği oluşmaktadır. SiC hala üretim yöntemi olarak Edward Acheson'ın yapmış olduğu yönteme çok benzer bir yöntem ile üretilmektedir.

Silisyum karbürün oluşmasını sağlayan reaksiyon denklem (2.4)'de verilmiştir.



Silisyum karbür üretiminde yüksek enerji maliyetleri vardır. 1 ton SiC elde edebilmek için 8000-10 000 KW/saat enerji harcanmaktadır. Üretimi yapılan SiC soğuduktan sonra tane boyutlarına göre ve kalitelerine göre sınıflandırılır. İstenilen kalitenin altında olan ürünler aynı dökümhanedeki gibi yeniden üretim için hammadde görevi görür.

2.10. Silisyum Karbür Kimyasal Yapısı

Silisyum karbürün piyasada bulunan kimyasal analizi aşağıdaki gibidir. Silisyum karbür, katı şarjda dökme demirlerin Si ve C oranlarını ayarlamak için kullanılmaktadır. Dökümhanelerin isteği doğrultusunda farklı boyutlarda bulunabilirler. Tablo 2.6'da gösterilen bu analiz SUPERSICA marka SiC 'ün kimyasal analizidir.

Tablo 2.6. SUPERSICA silisyum karbürün kimyasal analizi

Bileşen	Miktar (%)
SiC	%90
Al ₂ O ₂	%0,7-1,2
Fe ₂ O ₃	%0,6-1,1
SiO ₂	%0,02
P ₂ O ₅	%0,07
SO ₃	%0,3
Serbest Karbon	%3,9-5,3
Toplam Karbon	%22-66
Silisyum	%61-66
Sülfür	%0,01 maksimum
Nitrojen	%0,005 maksimum
Rengi	Siyah
Şekli	İri granül ve milimetrik taneler

2.11. Silisyum Karbürün Kullanım Alanları

- SiC granül şeklinden ya da briket şeklinde döküm sektöründe kullanılmaktadır.
- Dökme demirlerin silisyum ve karbon kaynağı olarak indüksiyon ocaklarında kullanılırlar.
- Diğer taraftan gri dökme demirlerde aşıl原因ıcı, küresel grafitli dökme demirlerde ön aşıl原因ıcı olarak kullanılırlar.
- Potalı ocaklarda oksidasyonu önleyici ve hurda ergitilen ocaklarda katalizör olarak kullanılırlar.
- Çelikhanelerde katalizör olarak kullanılırlar.
- Çelik üretiminde ve çelik dökümhanelerinde ise oksit giderme işlevi için kullanılmaktadır.
- Diğer ferro alyajların üretiminde verimi arttırmak içinde kullanılabilirler.
- SiC çok güçlü bir indirgeme malzemesi olup, cürufta oksit halinde bulunan Mo, W ve Mn gibi kıymetli metalleri yeniden eritebilir.
- SiC aynı zamanda yüzeydeki ısı derecesini arttırmak ve eriyikteki Si ve C oranını ayarlamak için de kullanılır.(Şen, 2018)

3. LİTERATÜR BİLGİSİ

Küresel grafitli dökme demir, 1943 yılında AFS (American Foundry Society)'de J.W. Bolton'ın "Gri dökme demirin grafit şeklinin değiştirilebilir mi?" sorusu sorulduktan sonra bununla ilgili çalışmalar hız kazanmış ve literatürde ilk örnekleri oluşmuştur. Daha sonraki yıllarda 1948'de Henton Morrogh'un gri dökme demirin prosesine seryum ilavesi yaparak grafitleri küreselleştirme girişiminde bulunmuştur. Nikel Şirketi 1949'da Millis'in yöntemini geliştirerek ve sistematik hale getirerek bunun patentini almıştır.(Karaman, 2011)

Bundan sonraki yıllarda küresel grafitli dökme demirlerin popülerliği artmış ve yapılan çalışmalar hız kesmeden devam etmiştir.

Brown J.R.; Küresel grafitli dökme demirlerin küreselleştirilmesi üzerine çalışmalarda bulunmuştur. Bu çalışmalarında Mg(magnezyum) vb. küreselleştirici etkisi bulunan elementlerin etkisini araştırmıştır ve elde etmiş olduğu verileri kıyaslamıştır.(Brown, 2000)

Tayfun Uzunova; Küresel grafitli dökme demirlerde grafit oluşumunun kır dökme demirin soğuma eğrileri ile birleştirmiş ve küresel grafitli dökme demirlerin nasıl daha iyi üretilebileceğini ve mekanik özelliklere etkilerini araştırmıştır.(Uzunova, 1967)

Murakami Y.; Küresel grafitli dökme demirlerde nodüllerin şekillerinin ve boyutlarının yorulma dayanımları üzerindeki etkilerini belirlemek için çalışmalar yürütmüştür.(Murakami, 2002)

Başka bir çalışmada paslanmaz çelik ile küresel grafitli dökme demiri difüzyon kaynağı ile farklı sıcaklıklarda birleştirme işlemi yapılmıştır. Yapılan araştırmalar ve denemeler neticesinde 1100°C'nin uygun olduğu sonucuna varılmıştır.(Kolukısa,1999)

A. Vaško; SiC katkı maddesinin küresel grafitli dökme demirin mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkileri üzerine çalışmalar yürütmüştür. SiC' ün FeSi yerine kullanılabileceği ve daha ekonomik olacağı sonucuna ulaşmıştır. Mikroyapıda birim kareye düşen nodül sayısında artış gözlemlenmiştir. Diğer taraftan mikroyapıda ferritik yapıda artış gözlenmiştir. Süneklikte bir artış gözlenmiştir.(Vaško,2002)

Schubert, SiC' ün gri dökme demirin mikroyapısına etkileri üzerine çalışmalar yürütmüştür. Farklı oranlarda SiC ilavesi yaparak bunları FeSi ilaveli numuneler ile karşılaştırılmıştır. Elde ettiği veriler ışığında SiC' ün aşırı soğumayı engellediği, mikroyapıda grafit dağılımını, grafit şeklini olumlu yönde değiştirdiğini gözlemlemiştir.(Schubert, 1984)

Çağlar Önal, pik ve sfero dökme demirlerde SiC takviyesinin mekanik özelliklere etkisini araştırmıştır. Bu bağlamda pik ve küresel grafitli dökme demirlerin temel üretim prosesinde kullanılan SiC' e bağlı olarak mekanik özelliklerdeki değişimlerini incelemiştir. Diğer taraftan lamel grafitli dökme demirlerin ve küresel grafitli dökme demirlerin işlenmesine dair verilerin değerlendirmesini yapmıştır. Yapmış olduğu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan fren diski ve balata pabucu gibi parçaların numuneleri kullanılmıştır. Yapmış olduğu deneyler ışında küresel grafitli dökme demirin çekme mukavemetinin SiC ilavesi ile 482.7 N/mm², lamel grafitli dökme demirin ise 306.5 N/mm²'ye ulaştığı saptanmıştır. Uygulanan testler sonucunda SiC ilavesiyle grafit oluşumunda kararlılık gözlemlenmiştir. Öte yandan lamel grafitli dökme demirde %8, küresel grafitli dökme demirde %16 oranında sertlik değerinde artış gözlemlenmiştir.(Önal, 2022)

Diğer taraftan küresel grafitli dökme demir ile ilgili araştırmaların dışında bizim yapmış olduğumuz çalışmaya benzerliği açısından Mehmet C. Pekşen'in yapmış olduğu; Gri dökme demir üretiminde silisyum Karbür ve ferro-silis katkılarının malzeme üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yapılan mekanik deneyler sonucunda ferro-silisyuma ait numunelerin SiC numunelerine göre daha kararlı olduğunu gözlemiştir. Sertlik ölçümlerinde ferro-silisyuma ait numunelerde ortalama sertlik değeri 287,5 HB iken SiC'e ait numunelerde ise ortalama değer 252,5 HB olarak ölçmüştür. Buradan %13,8'lik bir sertlik artışı olduğu saptanmıştır. Çekme deney sonuçlarına göre aritmetik ortalamalar hesaplanmış ferro-silisyum için ortalama 286,6 MPa, SiC için ortalama 250 MPa olarak belirlenmiştir. Ferro-silisyum numunelerinin çekme dayanımı daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Metalurjik kontrol sonucunda mikroyapı görüntülerinden yola çıkarak ferro-silisyuma ait numunelerin mikroyapısındaki lamel grafitlerin dağılımının daha homojen ve istenilen boyutta olduğu görülmüştür. Firma bünyesindeki yapılan çalışmada fire oranı hesaplandığında, %10 oranındaki fire oranı %1,5 seviyelerine inmiştir. (Pekşen,2016)

Aynı şekilde Nurettin B. Şen'in yapmış olduğu; Lamel grafitli dökme demirlerin üretiminde silisyum karbür ve ferro-silisyum katkılarının malzeme üzerindeki mekanik, metalurjik ve ekonomik açıdan etkileri üzerine çalışmalar yürütmüştür. Sertlik ölçümlerinde ferro-silisyuma ait numunelerde ortalama sertlik değeri 214 HB iken SiC' e ait numunelerde ortalama değer 172 HB olarak ölçülmüştür. Buradan %25'lik bir sertlik artışı olduğu saptanmıştır. Çekme deney sonuçlarına göre aritmetik ortalamalar hesaplanmış ferro-silisyum için ortalama 243,34 MPa, SiC için ortalama 167,68 MPa olarak ölçülmüştür.

Ferro-silisyum numunelerinin çekme dayanımının daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Darbe dayanımı ölçüm sonucunda kırılma açısı ve enerjisi değerleri birbirine yakın değerler görülmüştür. (Şen, 2018)

Ruixiang Zhu' nun ; Nano-SiC' nin küresel dökme demirin yapısı ve özellikleri üzerindeki etkisi üzerine çalışmalar yürütmüştür. Bu çalışmalar sonucunda küresel grafitli dökme demirin sertliğinin ısı işlem ile düştüğü bilinmektedir ancak Nano-SiC ilaveli numunelerde ısı işlem sonunda daha fazla düşüş gözlemlenmiştir. Bilindiği üzere ısı işleminden sonra küresel grafitli dökme demirin tokluğu artmaktadır. Nano-SiC ilaveli numunelerde tokluğun düştüğü görülmüştür. Nano-SiC ilaveli numunelerde ferritik yapıyı arttırdığı ve perlitik yapıyı azalttığı görülmüştür.(Zhu, 2002)

K.Edalati'nin; SiC ve FeSi ilavesinin farklı sıcaklıklarda dökülen gri dökme demire etkisi üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalara göre farklı sıcaklıklarda dökülen ötektik altı gri dökme demirlerin soğuma eğrisi özellikleri, akışkanlığı, mikroyapısı, çil derinliği ve sertliği üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Silis kaynağı olarak FeSi yerine SiC eklenmesinin, araştırılan tüm döküm sıcaklıkları için artan akışkanlığın yanı sıra azalan çil derinliği ile birlikte termal analiz özelliklerinde ve mikroyapıda değişikliklere neden olduğu bulunmuştur. Mikroyapı analizlerinde SiC ilavesinin daha düzgün bir dağılımla maksimum miktarda A tipi grafit meydana geldiği gözlemlendi. En iyi mikroyapı SiC ilavesiyle elde edilmiştir. Bu gözlemler, katılaşma sırasında eriyik içinde yavaş bir solma eğilimi olan gri dökme demirde SiC' ün aşılama öncesi davranışına bağlandı.(Edalati,1990)

Bu çalışmalar incelendiğinde lamel grafitli dökme demirlerde SiC ve ferro-silisyum etkileri araştırılmıştır. Ancak küresel grafitli dökme demirlerde ülkemizde yürütülmüş böyle bir araştırma bulunmamaktadır. Diğer taraftan küresel grafitli dökme demirlerde farklı silisyum oranlarının etkileri araştırılmış olup SiC ve ferro-silisyum ayrı ayrı denenerek böyle bir kıyaslama mevcut olmadığı görülmüştür. Bu yüzden bizim çalışmamızda SiC ve ferro-silisyumun küresel grafitli dökme demirlere etkileri araştırılmıştır. Gerekli testler neticesinden kıyaslamalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar kaydedilmiştir.

4. MATERYAL METOD

Bu çalışmada rögar kapağı olarak kullanılmak üzere kum kalıba döküm yöntemiyle dökümü gerçekleşen küresel grafitli dökme demirin mekanik ve metalurjik açıdan değerlendirmeler yapılmıştır. Bu değerlendirmeler, ferro-silisyum ve silisyum karbürün ayrı ayrı ocaklarda ergitilen sıvı metale ilave edilerek mekanik, metalurjik ve maliyet olarak kıyaslanmışlardır.

Dökümhane ortamında yapılan bu deneysel çalışmalarda döküm üretim süreçleri dikkatle incelenmiştir. 1. indüksiyon ocakta proses kartlarına göre ferro-silisyum ilave edilerek metal eriyik hale getirilmiştir. Daha sonra deneysel çalışmaların yapılması için özel olarak hazırlanan kalıplara döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı şekilde 2. indüksiyon ocağına silisyum karbür ilave edilerek hazırlanmış katı şarj eriyik haline getirilmiştir. Sıvı metal aynı şekilde çekme, darbe ve mikroyapı için hazırlanan özel kalıba dökümü gerçekleştirilmiştir. Her iki ocaktan da alınan sıvı metale potada %0,02'lik ve baryum esaslı aşı ilavesi yapılmıştır.

Otomatik kalıplama hatlarında hazırlanan kalıplara 1330°C' de döküm işlemi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra dökümü gerçekleşen numune soğumaya bırakılmıştır. Ferro-silisyum ve silisyum karbürün dökümü yapılan kalıplara gerekli işaretlemeler yapılmış ve olası karışıklığın önüne geçilmiştir. Soğuma işleminden sonra kalıptan çıkarılan numuneler paletlere dizilmiştir. Paletlere yerleştirilen numunelere işaretleme yapılmış ve kumlama ünitesine verilmiştir. Çelik bilyelerle kumlama işlemi gerçekleştirilmiştir ve numunelerin çapak alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümü için numunenin yüzeyi zımparalanmıştır. Daha sonra farklı noktalardan sertlik ölçümü yapılmış ve elde edilen sonuçlar kaydedilmiştir.

Çekme, darbe, mikroyapı analizleri için özel kalıplara döküm işlemi gerçekleştirilirken döküm sıcaklığı 1388°C olarak ölçülmüştür. Daha sonra numuneler için döküm işlemi yapılmış. Ferro-silisyum ilave edilerek elde edilen numune ve silisyum karbür ilave edilerek hazırlanan numune ayrı ayrı analiz edilip değerlendirmeleri yapılmıştır.

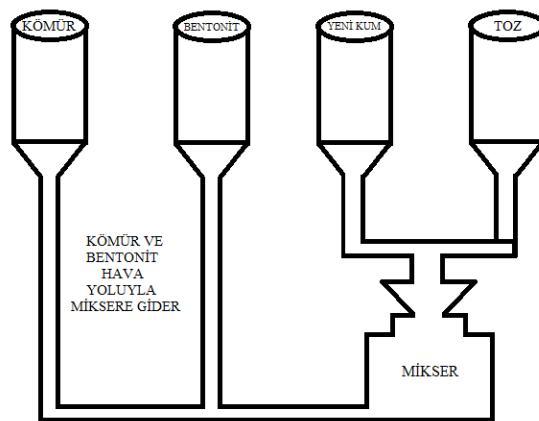
4.1. Döküm Kumunun Hazırlanması

Kalıp kumunun döküme uygun şartlarda olabilmesi için daha önce yapılan testler neticesinde göre Şekil 4.1’de gösterilen 2700 kg kapasiteli Küngel Wagner marka kum hazırlama mikserinde kum karışımı hazırlanmıştır.



Şekil 4.1. Kum mikser

Mikser içerisine sürekli olarak kömür tozu, bentonit, silis kumu ve su ile beslenir. Sonuç olarak bir kum karışımı elde edilir. Elde edilen karışım kalıplama hattına gönderilir.



Şekil 4.2. Kum karışımı akış şeması

Tablo 4.1. Mikser karışım miktarları

Malzemeler	Miktar (kg)
Eski Kum	2700
Yeni Kum	20
Kömür Tozu	8
Bentonit	30
Su	65 lt

Tablo 4.1'e göre belirli miktarlarda kum mikserine malzemeler katılmaktadır. Buna göre hazırlanan kumdan numune alınıp kumun yaş mukavemetine, kuru mukavemetine, kompaktlığına bakılır. 50x50 mm 140 gr test numunesi alınır ve mekanik özelliklerine bakılır. Yapılan testler sonucun alınan veriler Tablo 4.2 ye kaydedilmiştir.

Tablo 4.2. Kumun mekanik özellikleri

Kompaktlığı	%45,3
Yaş Basma Mukavemeti	23 N/cm ²
Islak Çekme Mukavemeti	0,29 N/cm ²
Ayırma Mukavemeti	4 N/cm ²
Kesme Mukavemeti	5,5 N/cm ²
Nem Oranı	%4,75
Yanma Kaybı	%6,5
Uçucu Madde Oranı	%2,75
Aktif Kil	%8,5

Kumun kompaktlığı Şekil 4.3'teki Simpson marka kompaktlık cihazı ile şu şekilde ölçülmüştür. Analiz kabına bir miktar kum konulmuştur. Daha sonra ölçüm cihazına analiz kabı yerleştirilmiştir. Analiz kabındaki kum numune nemini kaybetmemesi doğru sonuç elde edilebilmesi için önem teşkil etmektedir. Bu yüzden eleme işlemi hızlı şekilde gerçekleştirildikten sonra hazne içerisine doldurulmuştur. Doldurulan hazne kompaktlık ölçüm cihazına yerleştirilmiştir ve kompaktlık ölçüm cihazıyla ölçülmüştür.



Şekil 4.3. Kompaktlık ölçüm cihazı

Daha sonra döküm kumunun ıslak çekme mukavemeti ölçümü için Şekil 4.4'teki Simpson marka ıslak çekme cihazı ile ölçüm yapılmıştır. Ölçüm sonucu Tablo 4.2'ye kaydedilmiştir.



Şekil 4.4. Islak çekme cihazı

Döküm kumundan 20-25 gr alınarak nem oranını belirlemek için numune nem ölçüm cihazına konulur. Cihaz 115°C'ye kadar kumu ısıtarak tamamen nemini alana kadar beklenir.

Daha sonra cihaz % olarak bir nem oranı verir. Buradan ölçülen veri Tablo 4.2'ye kaydedilmiştir. Ölçümler Şekil 4.5'teki Sartorius marka nem ölçüm cihazıyla yapılmıştır.



Şekil 4.5. Nem ölçüm cihazı

Kum testleri yapılırken numuneler Şekil 4.6'daki Nec marka hassas terazi ile ölçülmüştür.



Şekil 4.6. Hassas terazi



Şekil 4.7. Kum mukavemeti ölçüm cihazı

Yaş basma testleri Şekil 4.7 'deki Simpson marka kum mukavemet cihazında ölçülmüştür. Elde edilen veriler Tablo 4.2'ye kaydedilmiştir.

4.2. Döküm Kalıbının Hazırlanması

Kalıp hazırlanması ilk olarak kalıbın tasarlanmasıyla başlar. Kalıp tasarımı yapılırken elde edilecek döküm malzemesine ek olarak modele yolluklar eklenir. Bu yollukların eklemesinin sebebi döküm işlemi yapıldıktan sonra sıvı metalin kalıp içerisinde her noktaya yürümesini sağlamak içindir. Yolluklar ile birlikte tasarlanan model daha sonra modelhaneye gider. Burada model hazırlanır ve modelde düzgün yüzeyler elde etmek için gerekli noktalar macunlanır ve pürüzsüz yüzey elde edilir. Hazır hale gelen modeller kalıplama makinelerine takılmak üzere kalıplama hattına gider.

DeneySEL çalışmaların yürütüldüğü İstikamet Döküm A.Ş. bünyesinde otomatik kalıplama makinesi bulunmaktadır. Şekil 4.8' de bu kalıplama hattı verilmiştir. Kum mikserinde hazırlanan yaş kum bant sistemi ile kalıplama hattının kum silolarına beslenmektedir. Kum silosunda biriken yaş kum alt ve üst derecelere boşaltılır ve kalıplama işlemi yapılır.



Şekil 4.8. Kalıplama hattı

Alt ve üst dereceler presleme işleminden sonra gerekli maçalar yerleştirilir. Düzgün yüzey istenen kritik parçalarda dereceler boyanır. Boyanan derecelerde nem kalmaması için ısıtılır. Daha sonra hazır hale gelen alt ve üst dereceler birbirleri üzerine getirilir ve kapatılır. Kapatılan alt ve üst dereceler kitlenir. Şekil 4.9’da otomatik ilerleyen dereceler gösterilmiştir. Hazır hale gelen dereceler dökümün yapılacağı otomatik döküm ocağına ilerler.

İndüksiyon ocaklarında ergitilen metal önce tretman potasına alınır. Burada magnezyum ile reaksiyona alındıktan sonra CİME marka otomatik döküm ocaklarında biriktirilir. Buradan hazırlanan kalıpların otomatik döküm ocağına gelmesiyle döküm işlemi gerçekleştirilir. Dökülecek ürünün modeline göre döküm ağırlıkları değişmektedir.



Şekil 4.9. Otomatik döküm ocağına ilerleyen dereceler

Dökümü gerçekleştiren otomatik döküm ocaklarının kapasitesi 8 tondur ve sürekli sıvı metal ilavesi yapılarak beslenirler. Dökülecek parçaların maça sayılarına göre bu kalıplama hatlarında saatlik yapılan derece miktarları değişim göstermektedir.

Ergitme ocaklarındaki metalin sıcaklığı 1540-1560°C'dir. Daha sonra potaya alınıp otomatik döküm ocağına alınır. Buradan kalıba dökülürken sıcaklık 1410-1430°C'dir. Her pota ile beslemeden sonra otomatik döküm ocağı kalıba sıvı metali vermeden önce sıcaklık ölçümleri yapılır. Eğer sıcaklık düşükse otomatik döküm ocağının ağzındaki metal geri ocağın içine çekilir. Ocağın ısı kademesi arttırılır ve sıvı metal tekrar ocağın ağzına verilir. Sıcaklık döküm için uygunsa ancak o zaman döküm işlemi gerçekleşir. Döküm gerçekleştikten sonra Şekil 4.10'da da görüleceği üzere dereceler soğumak üzere ilerler.



Şekil 4.10. Soğumaya ilerleyen dereceler

Soğuma işlemi gerçekleştikten sonra kalıplar derece bozma ünitesine gelir. Şekil 4.11'deki a) Unrobot'ta kalıptan çıkan parçalar kumundan temizlenir. Burada dereceler bozulduktan sonra parça sarsakta temizlenir. Temizlenen döküm parçalar paletlere dizilir ve oda sıcaklığına kadar soğumaları beklenir. Soğuyan parçalar yüzeyleri temizlenmek üzere kumlama bölümüne götürülür.



Şekil 4.11. (a) Unrobot, (b) Sarsakta dereceden çıkarılan malzemeler

4.3. Ergitme Ocakları

İstikamet Döküm A.Ş. bünyesinde 2 adet Inductotherm marka 8 tonluk, 2 adet EGES marka 5 tonluk, 2 adet 1 tonluk ICS marka indüksiyon ocakları bulunmaktadır. Bu indüksiyon ocaklarında metal ergitilmektedir. Daha sonra sıvı metal 1 tonluk tandiştir potalarda magnezyum ile reaksiyona sokulur. Reaksiyondan sonra sıvı metal CİME marka 8 tonluk olmak üzere 2 adet otomatik döküm ocağına alınıp burada biriktirilir.

Bizim çalışmamız EGES marka 5 tonluk ocak Şekil 4.12’de verilmiştir. Çalışma tamamı ile aynı şartlar altında yapılmıştır. Ocakta ilk olarak SiC ilaveli katı şarj yapılmıştır. Daha sonra ise ferro-silisyum ve karbon ilavesi ile katı şarj yapılmıştır. Daha sonra bu ocaktan sıvı metal alınmış ve deney numunelerinin dökümleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.12. 5 tonluk EGES marka indüksiyon ocakları

4.4. SiC İlavesi ile Sıvı Metalin Hazırlanması



Şekil 4.13. Silisyum karbür(SiC)

Çalışmada kullanılan SiC Şekil 4.13'te verilmiştir. Üretim planlamasında mevcut olarak üretimi gerçekleşmekte olan küresel grafitli dökme demirlerden GGG 40 dökme demiri için hedeflenen kimyasal analiz Tablo 4.3'te verilmiştir.

Tablo 4.3. İstikamet Döküm GGG40 kimyasal kompozisyon

Element	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Al	Ti	V	Fe
%	3,50-3,60	2,40-2,50	0,30-0,40	0,05	0,015-0,020	0,040-0,060	0,070-0,085	0,035-0,040	0,01	<0,02	<0,01	90

Deneyisel çalışmalarda ilk olarak SiC ilaveli numunenin dökümü için ocak hazırlanmıştır. Bu aşamada ocak şarjında kullanılacak olan SiC incelenmiştir. Kullanılan SiC İran menşeli Abasic marka olup kimyasal analizi Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Abasic marka SiC kimyasal analizi

Element	SiC	Si	C	Fe
%	90,55	65-67	27-30	0,55

Deneyde kullanılan Abasic markalı silisyum karbür %90,55 oranında SiC içerir. Bunun %65-67'si Si, %27-30'u C' dur.

Dökümde kullanılan pik demirin analizi Tablo 4.5.'de verilmiştir.

Tablo 4.5. Pik analizi

Element	C	Si	Mn	P	S	Ti
%	4,10	0,8	0,06	0,03	0,013	0,005

Tablo 4.2'deki kimyasal kompozisyona uygun olacak şekilde 5 tonluk ocak yükleme için şarj hesabı Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Yükleme miktarları ve şarj malzemesi analizi

Şarj malzemesi	Ağırlık Kg	%C	%Si
Pik	3020	4,10	0,8
Çelik hurdası	1020	0,05	0,05
Döndü	1000	3,50	2,40

Tablo 4.6'ya göre şarj hesabı yapacak olursak. İşlemler şu şekilde olmalıdır.

C miktarı;

$$\left[\frac{(3020 \times 4,10) + (1020 \times 0,05) + (1000 \times 3,5)}{5040} \right] = \%3,16 \quad (4.1)$$

Si miktarı;

$$\left[\frac{(3020 \times 0,8) + (1020 \times 0,05) + (1000 \times 2,4)}{5040} \right] = \%0,96 \quad (4.2)$$

SiC Şarj Hesabı;

$$\left[\frac{(1,35 - 0,96) \times 5040}{60} \right] = \mathbf{32,76 \text{ kg SiC}} \text{ (%30 C geliyor)} \rightarrow (32,76 \times 0,30) = 9,8 \text{ kg C} \quad (4.3)$$

C Şarj Hesabı;

$$\left[\frac{(3,72 - 3,16) \times 5040}{80} \right] = 35,28 \text{ kg C} \rightarrow 35,28 - 9,8 = \mathbf{25,48 \text{ kg C}} \quad (4.4)$$



Şekil 4.14. SiC ilaveli ocağın yüklenme görüntüsü

Bu hesaplamalar neticesinde katı şarjda ocağa Tablo 4.6'ya ek olarak 32,76 kg SiC atılacaktır. Daha sonra SiC 'den gelecek karbon miktarı göz önünde bulundurularak yapılan hesaplamada 25,48 kg C ilavesi yapılmıştır. Ocak yükleme yapıldıktan sonra 3000 kW/saat ile çalıştırılmış ve metal 1 saat içinde sıvı hale gelmiştir. Ocaktan alınan numunenin CM-3700 marka spektrometre ile analizine bakılmıştır. Buradan elde edilen veriler Tablo 4.7'ye kaydedilmiştir.

Tablo 4.7. SiC ilaveli ocağın spektrometre analiz sonuçları

Kimyasal element	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Al	Ti	V	I-Fe
%	3,72	1,64	0,328	0,038	0,04	0,001	0,071	0,031	0,003	0,017	0,009	94,102

Analiz sonucunda sıvı metale potaya aktarılması için onay verilir. Bu aşamada sıvı metalin cürufu alınmış ve tretman potasına aktarılmadan önce sıcaklık 1540°C olarak ölçülmüştür. Önceden hazırlanan tretman potasına sıvı metal alınmıştır.



Şekil 4.15. Döküm için hazır hale gelen ocak

Otomatik döküm ocağına aktarılmak üzere ergitme ocağından tretman potasına alınmıştır. Magnezyum ile reaksiyona giren sıvı metal otomatik döküm ocağına alınır. Buradan da derecelere dökümü gerçekleşir. Farklı işler için seryumlu, baryumlu veya %50 seryum %50 baryumlu aşılar kullanımı farklılık göstermektedir. Ancak %0,2 oranında aşı kullanımı hepsi için sabittir. Aşı döküm esnasında otomatik olarak döküm kalıbına verilir.

4.5. Fe-Si İlavesi ile Sıvı Metalin Hazırlanması



Şekil 4.16. Ferro silisyum (Fe-Si)

Çalışmada kullanılan Fe-Si Şekil 4.16’da verilmiştir. SiC ilavesi ile hazırlanan sıvı metalde olduğu gibi Tablo 4.6’daki kimyasal kompozisyona uygun olacak şekilde yükleme miktarları Tablo 4.8’de verilmiştir.

Tablo 4.8. Fe-Si ilaveli ocak şarjı

Şarj malzemesi	Kg	%C	%Si
Pik	3000	4,10	0,8
Çelik hurdası	1000	0,05	0,05
Döndü	1455	3,50	2,40

Tablo 4.8’e göre C ve Si hesaplamaları şu şekilde yapılmıştır.

C miktarı;

$$\left[\frac{(3020 \times 4,10) + (1020 \times 0,05) + (1000 \times 3,5)}{5040} \right] = 3,16 \text{ kg} \quad (4.5)$$

Si miktarı;

$$\left[\frac{(3020 \times 0,8) + (1020 \times 0,05) + (1000 \times 2,4)}{5040} \right] = 0,96 \text{ kg} \quad (4.6)$$

Fe-Si Şarj Hesabı;

$$\left[\frac{(1,65 - 1,08) \times 5040}{70} \right] = 51,84 \text{ kg Fe - Si} \quad (4.7)$$

C Şarj Hesabı;

$$\left[\frac{(3,85 - 3,19) \times 5040}{80} \right] = 43,47 \text{ kg C} \quad (4.8)$$

Bu hesaba göre 51,84 kg Fe-Si ve 43,47 kg C katı şarjda verilmek üzere hesaplanmıştır. D ocağı 3000kW/saat gücünde 1 saat çalıştırılarak metal sıvı hale getirilmiştir. Ocaktan numune alınmış ve spektrometrede analiz edilmiştir. Tablo 4.9’a kaydedilmiştir.

Tablo 4.9. Fe-Si ilaveli ocağın spektrometre analizi

Kimyasal element	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Al	Ti	V	I-Fe
%	3,85	1,67	0,29	0,046	0,031	0,002	0,074	0,041	0,005	0,016	0,007	619122

4.6. Kuşlama ve Taşlama

Döküm işleminin sonrasında sıvı metalin soğutması için yeteri kadar bekletilen parçalar sarsaklarda derece bozma işlemi gerçekleştirilir. Yüzeylerde kalan kumun giderilmesi için kuşlama makinesinde çelik granül bombardımanı yapılır. İşlem askı aparatlarına asılarak 5 dk'lık kuşlama işlemine tabi tutulur. Kuşlamanın ardından parçalar yüzey çapaklarından ve meme girişlerinden arındırılmak için taşlama bölümüne taşınır Taşlama bölümünde yan yüzeylerdeki çapaklar ve yüzeyde kalan kum tazyikli hava ile temizlenir. Buradan boyanacak parçalar boyamaya taşınır. Boyama işleminden sonra parçalar montaj bölümüne aktarılır.



Şekil 4.17. Kuşlama makinesi



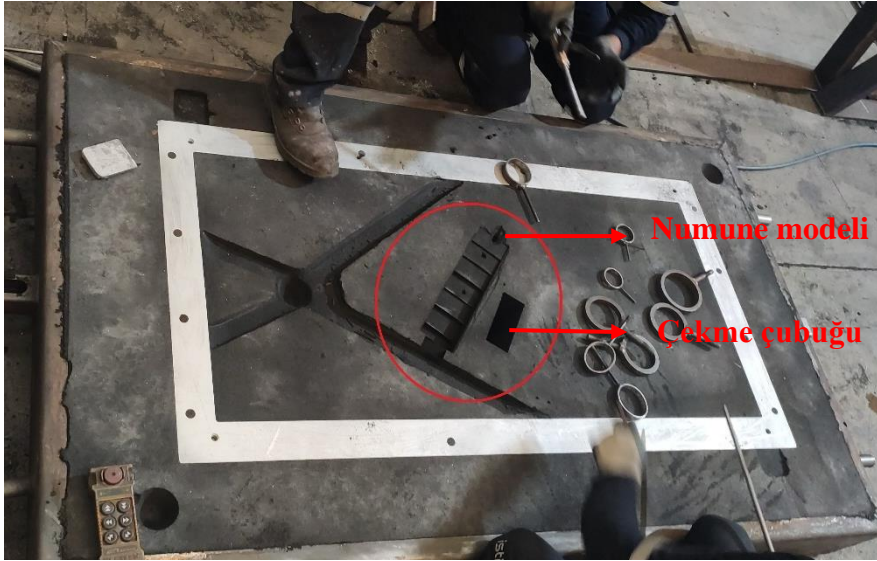
Şekil 4.18. Taşlanmak için istiflenen parçalar

Şekil 4.17'de kuşlama makinesinde kuşlanan malzemeler Şekil 4.18'deki gibi istiflenmiştir.

4.7. Deney Numunelerinin Hazırlanması

Deney numuneleri bütün deneysel çalışmaların yürütüldüğü İstikamet Döküm A.Ş. 'de hazırlanmıştır. Mekanik testlerin yapılması için tasarlanan farklı kesit kalınlıklarına sahip model Şekil 4.19'da verilmiştir. Bununla birlikte çekme testi için ayrı model kullanılmıştır. Bu modellerden 3'er adet numune elde edilmiştir.

Hazırlanan modeller el kalıplamada kalıplanmak üzere hali hazırda üretimi gerçekleşen parçanın içerisine bağlanmıştır. Döküm işlemi Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.19. Modelin kalıplanması



Şekil 4.20. Numunelerin dökümü

Ferro-silisyum ve silisyum karbür ilaveli numuneler için ayrı ayrı kalıplamalar yapılmıştır. Kalıplara döküm 400 kg potalarla gerçekleştirilmiştir. 400 kg'lık potaya 7,2 kg FeSiMg yerleştirilmiştir. Kullanılan magnezyumun kimyasal analizi Tablo 4.10'da verilmiştir.

Tablo 4.10. Elkem 6510 FeSiMg(ferro-siliko magnezyum) kimyasal analizi

Element	Si	Mg	Ca	Al	Tre(Nadir elementler)
%	45	6,93	1,2	0,54	1,05

Potaya yerleştirilen magnezyumun üzeri çelik pul ile örtülmüştür. Bu sayede sıvı metal direkt olarak magnezyum ile temas etmesi engellenmiştir.

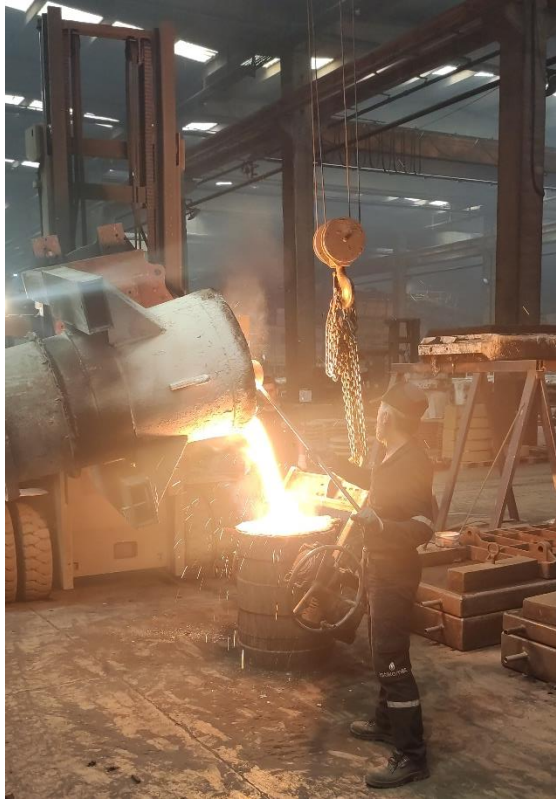


Şekil 4.21. 1 Tonluk tretman potası

Ocaktan alınan sıvı metal önce tretman potasına alınmıştır. Buradan döküm potasına sıvı metal en fazla 1 dk içerisinde alınmıştır. Reaksiyon Şekil 4.21'de verilen 1 tonluk potada gerçekleşmiştir. ancak potaya 400 kg sıvı maden alınmıştır.



Şekil 4.22. Ocaktan tretman potasına sıvı metalin aktarılması



Şekil 4.23. Tretman potasından döküm potasına sıvı metalin aktarılması

Sıvı metal döküm potasına alındıktan sonra final analiz kontrolü için spektrometre ile pota numunelerine bakılmıştır. Fe-Si ilaveli potanın analizi Tablo 4.11’de , SiC ilaveli potanın analizi ise Tablo 4.12’de belirtildiği gibidir.

Tablo 4.11. Fe-Si ilaveli pota analizi

Kimyasal element	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Al	Ti	V	I-Fe
%	3,55	2,47	0,335	0,045	0,017	0,059	0,078	0,040	0,01	0,018	0,009	93,369

Tablo 4.12. SiC ilaveli pota analizi

Kimyasal element	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Al	Ti	V	I-Fe
%	3,56	2,48	0,28	0,041	0,027	0,065	0,071	0,052	0,01	0,017	0,006	93,391

Her iki numunenin de dökümü yapılırken potadan numune alındıktan sonra Fe-Si ilaveli potada döküm sıcaklığı 1388°C, SiC ilaveli potada döküm sıcaklığı 1402°C olarak ölçülmüştür. Dökülen parçalar kalıp içerisinde soğumaya bırakılmıştır. Numuneler ertesi gün aynı anda kalıptan çıkarılmıştır. Numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra taşlanmıştır.



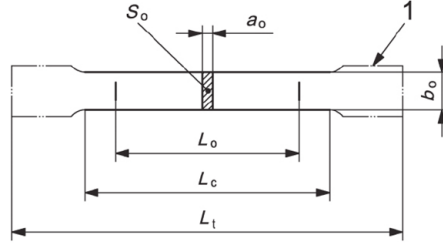
Şekil 4.24. Kumlanan numuneler

Numuneler kumlandıktan sonra çekme testi, mikroyapı ve sertlik ölçümleri yapılmak üzere kesilmeye verilmiştir.

4.8. Çekme Testi

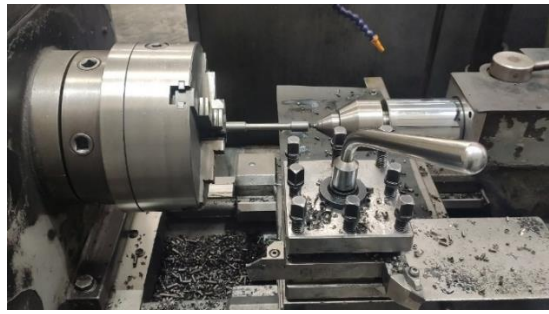
Çekme testi numunesi EN-6892-1 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Çekme testi Alşa marka çekme cihazı ile yapılmıştır. Çekme testi numunesi dökülen parçayı temsil

etmektedir. Bu temsile istinaden parçanın çekme mukavemeti ölçülür. Şekil 4.25'te EN-6892-1 standardına uygun numunenin teknik çizimi verilmiştir.



Şekil 4.25. Çekme numunesi EN-6892-1 teknik çizim

Çekme çubuğu Şekil 4.26'daki gibi torna tezgahında hazırlanmıştır.



Şekil 4.26. Çekme çubuğunun torna tezgahında hazırlanması

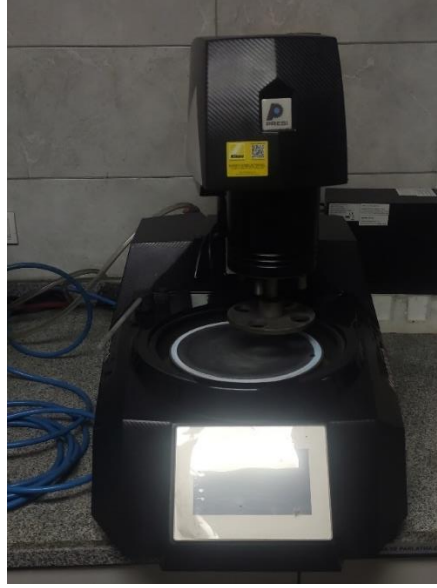
4.9. Mikroyapı Analizi

Deney numuneleri İstikamet Döküm A.Ş. kalite kontrol laboratuvarlarında hazırlanmıştır. Mikroyapı görüntüleri yine İstikamet A.Ş. kalite kontrol laboratuvarında 100X büyütme ile bakılmıştır. SiC ve FeSi ilaveli olmak üzere her birinden 3'er numuneye bakılmıştır. Numunelere %2 nital ile dağlamalı ve dağlamasız olarak bakılmıştır. Numuneler Şekil 4.27'deki kesme cihazı ile kesilmiştir.



Şekil 4.27. Kesme cihazı

Numuneler kesme cihazında kesildikten sonra 2 farklı mesh değerine sahip zımparalar ile zımparalanmıştır ve parlatma işlemi uygulanmıştır. Zımparalama işlemi Şekil 4.28'deki Presi marka zımparalama cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.28. Zımparalama cihazı

Mikroyapı numuneleri küçük parçalar halinde kesildiği için önce bakalite alınmıştır. Mecopress marka kalıplama cihazı Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.29. Bakalit ile kalıplama cihazı

Kalıplanan numuneler Şekil 4.28'deki zımpara makinesinde yeterli yüzey derinliğine ulaştıktan sonra parlatma işlemine geçilmiştir.

Parlatma işleminden sonra numunede ayna yüzeyi elde edildikten sonra yüzeyi %99 alkol ile temizlenmiş ve havalı tabanca ile yüzeyi kurulmuştur.

Yüzeyi temizlenen numuneler ilk olarak dağlamasız görüntüleme yapılmıştır. Bu görüntüleme ile küresel grafit oranı ve küresellik dereceleri saptanmıştır ve kayıt altına alınmıştır. Daha sonra %2 Nital (2ml HNO₃ + 98 ml CH₃OH) ile dağlanmıştır. Dağlanan numunelerin ferrit-perlit oranları program aracılığı ile hesaplanmış ve kayıt altına alınmıştır.

4.10. Sertlik Ölçümü

Sertlik ölçümü mikroyapı için alınan numunelere yakın bölgelerden yapılmıştır. Sertlik ölçümü 3 farklı bölgeden yapılmıştır. Sertlik ölçümü İstikamet Döküm A.Ş. bünyesinde Şekil 4.30'daki BMS 3000 marka sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır.



Şekil 4.30. Brinell sertlik cihazı

5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Kimyasal Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

SiC ilaveli ocağın kimyasal analizi Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. SiC ilaveli ocağın kimyasal analizi

Element	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Al	Ti	V	Fe
%	3,77	1,64	0,328	0,038	0,04	0,001	0,071	0,031	0,003	0,017	0,009	94,052

Bu analize sahip sıvı metal 1 tonluk ocağa 400 kg alındığında pota içerisine %1,8 oranında FeSiMg ilavesi yapılmıştır. 400 kg'lık sıvı metal ile tepkimeye giren FeSiMg 7,2 kg'dır. Daha sonra döküm esnasında %0,2 oranında baryumlu aşı ilavesi yapılmıştır. Magnezyum grafit küreselleştirici ve kükürt bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Aşı ise çekirdeklenmeyi sağlaması için yapılmıştır. Aşı diğer taraftan küresel grafitlerin matris yapı içerisinde homojen olarak dağılımı sağlamaktadır.

FeSi ilaveli ocağın kimyasal analizi Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. FeSi ilaveli ocağın kimyasal analizi

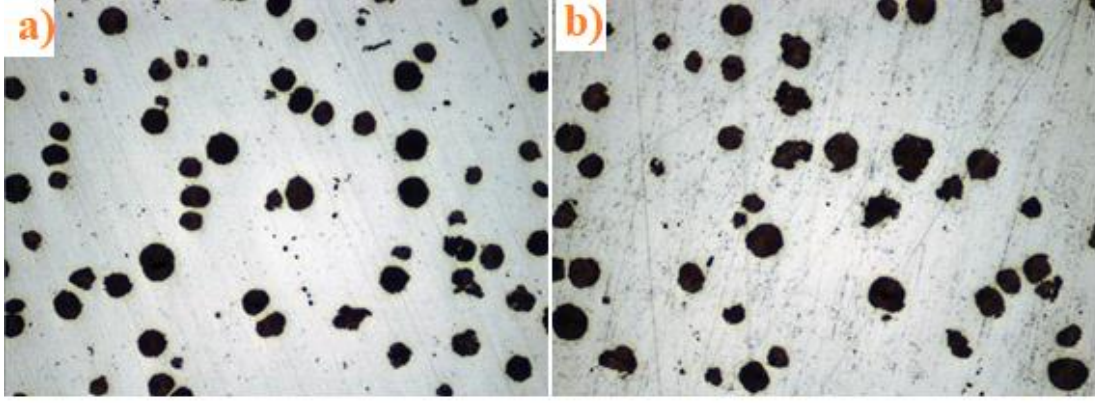
Element	C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr	Cu	Al	Ti	V	Fe
%	3,85	1,67	0,29	0,046	0,031	0,002	0,074	0,041	0,005	0,016	0,007	93,968

SiC ilavelideki işler ile aynı şekilde küreselleştirici olarak %1,8 oranında FeSiMg ve döküm esnasında %0,2'lik baryumlu aşı uygulaması yapılmıştır.

5.2. Mikroyapı Analizinin Değerlendirilmesi

SiC ve FeSi ilaveli dökümün numunelerine ait mikroyapı görüntüleri Şekil 5.1'de verilmiştir. SiC ilaveli dökümlerde mikroyapıya bakıldığında yer yer küresel grafitlerde yarım patlaklar ve tam patlaklar görülmektedir. Ancak küresel grafitler homojen şekilde dağılmıştır. Nodüller daha ince yapılıdır. FeSi ilaveli döküm numunesinde ilk etapta göze çarpan SiC'e göre daha iri taneli bir yapı olmasıdır. Küresel yine nispeten homojen dağılmıştır. Nodüllerin daha iri yapıda olmasının sebebi döküm işleminin el kalıpta dökülmesidir. Otomatik hattaki gibi döküm esnasında aşının otomatik olarak verilmesi daha ince yapılar meydana getirmektedir.

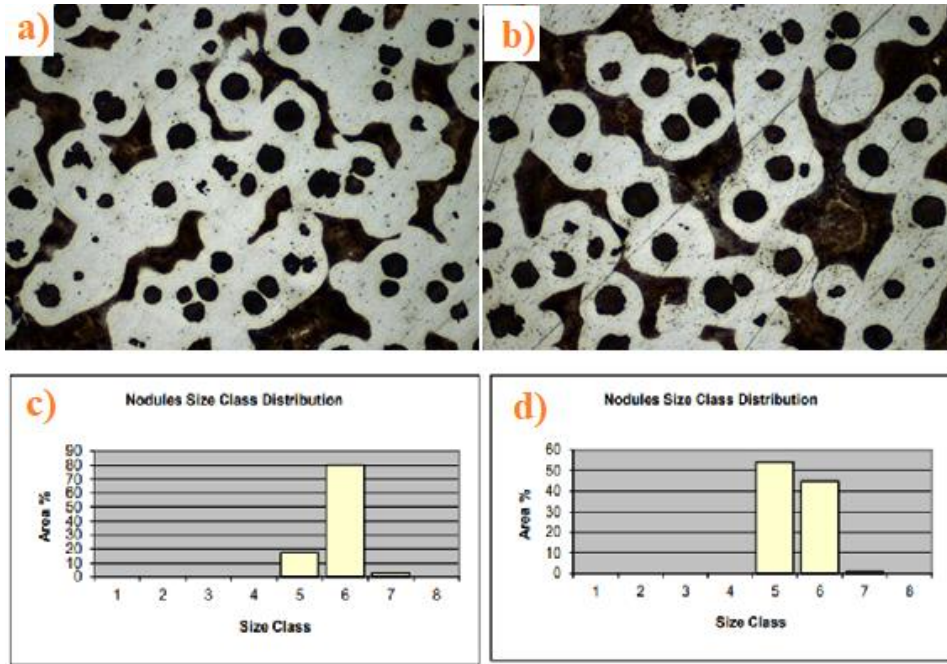
El kalıplamada aşılama el ile döküm esnasında yapılmaktadır. Her iki dökümde el kalıpta yapılmış ancak FeSi ve C' un ayrı kullanıldığı döküm bundan daha çok etkilenmiş gibi görünmektedir.



Şekil 5.1. SiC ve FeSi ilaveli döküm numunelerinin mikroyapısı 100X büyütme (a: SiC ilaveli, b: FeSi ilaveli)

Mikroyapıya bakıldığında yer yer küresel grafitlerde yarım patlaklar ve tam patlaklar görülmektedir. Ancak küresel grafitler homojen şekilde dağılmıştır. Nodüller daha ince yapılıdır.

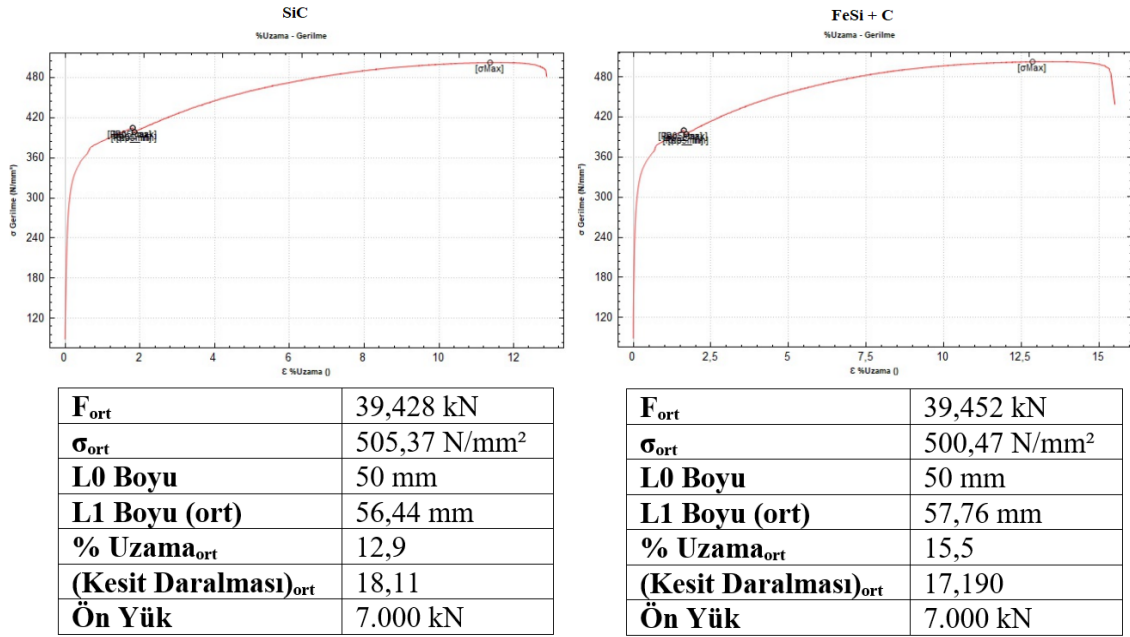
FeSi ilaveli döküm numunesinde ilk etapta göze çarpan SiC'e göre daha iri taneli bir yapı olmasıdır. Küresel yine nispeten homojen dağılmıştır. Nodüllerin daha iri yapıda olmasının sebebi döküm işleminin el kalıpta dökülmesidir. Otomatik hattaki gibi döküm esnasında aşının otomatik olarak verilmesi daha ince yapılar meydana getirmektedir. El kalıplamada aşılama el ile döküm esnasında yapılmaktadır. Her iki dökümde el kalıpta yapılmış ancak FeSi ve C' un ayrı kullanıldığı döküm bundan daha çok etkilenmiş gibi görünmektedir.



Şekil 5.2. 2 SiC ve FeSi ilaveli numunelerin dağılmış 100X görüntüleri (a: SiC ilaveli, b: FeSi ilaveli, c: SiC ilavelilerin tane dağılımı, d: FeSi ilavelilerin tane dağılımı)

Şekil 5.2'deki dağlanan a) numunesi %61 ferritik, %26 perlitik yapıya sahip olduğu elde edilmiştir. C) tablosuna göre göre oluşan nodüllerin %80'i boyutsal sınıf olarak 6. Sınıftır. Bu da 30-60 mikron aralığında demektir. Oluşan mikroyapıya göre %92'lik küreselleşme oranı mevcuttur. Dağlanmış b) numunesine göre %54 ferritik, %33 perlitik yapı gözlemlenmiştir. SiC ilaveli numunelere göre daha perlitik bir yapı mevcuttur. D) tablosuna göre kümülatif nodül boyutu SiC' ün aksine FeSi ilaveli numunede 5. ve 6. Sınıf olmak üzere 2 sınıftır. %55 60-120 mikron, %45 ise 30-60 mikrondur. Buradan da görülmektedir ki FeSi ilaveli numunelerde nodüllerin boyutu daha büyüktür. %91 oranında küreselleşme mevcuttur.

5.3. Çekme Deneyi Sonuçları



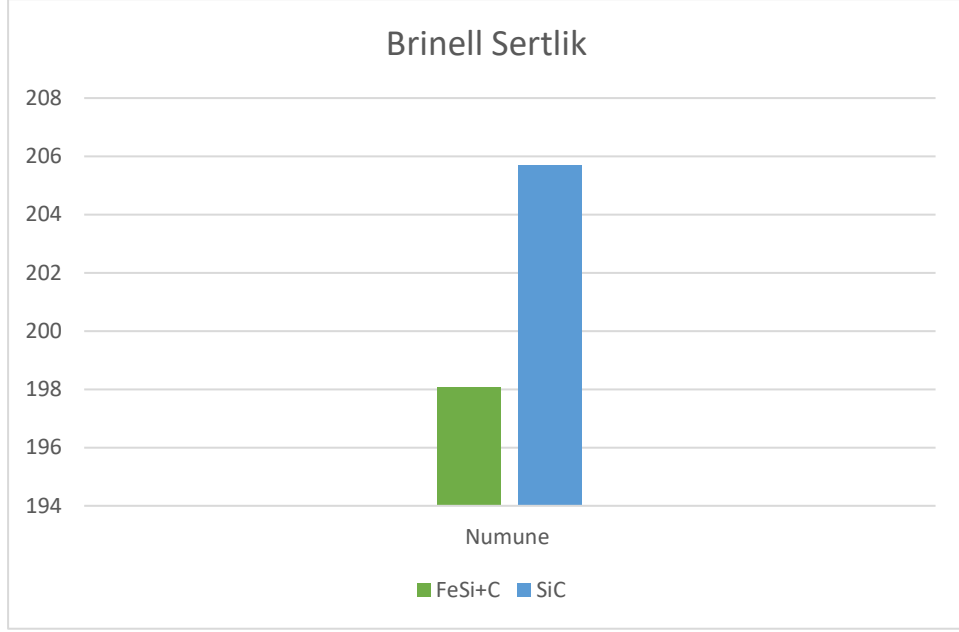
Şekil 5.3. Çekme testi sonuçları(a)SiC, b)FeSi

Şekil 5.3'teki grafiklerden yola çıkarak FeSi ilaveli ve SiC ilaveli numuneler birbirlerine hemen hemen yakın mukavemet değerleri sergilemişlerdir. Diğer taraftan çekme mukavemeti arttıkça %uzama miktarları da nispeten artış göstermiştir. Şekil 5.2' deki ferritik yapılar göz önüne alındığında perlitik yapılara göre ferritik yapılar daha sünek davranış göstermektedir. Bu yüzden perlitik bir küresel grafitli dökme demir %7-8 uzarken ferritik yapılı numunelerimiz %12-16 arasında uzama göstermiştir.

Buradan mikroyapıdaki ferrit-perlit oranının %uzamayı etkilediği gözlemlenmiştir. Diğer taraftan SiC 'ün ve FeSi 'in aynı kimyasal kompozisyon sağlandığı taktirde çekme mukavemetine gözle görülür anlamda bir etki etmediği gözlemlenmiştir.

5.4. Sertlik Ölçümü Sonuçları

Küresel grafitli dökme demirlerin mekanik özellikleri, grafit morfolojisine, (şekil, dağılım, miktar ve boyuta) ve matris yapılarına (ferrit, perlit) bağlıdır. Araştırmalar sonucu matris yapısındaki perlit oranının artışı ve grafit morfolojisindeki düzenli dağılımın sertlik değerini arttırdığını göstermektedir. Şekil 5.2'teki resimlerde görülen perlitik yapı malzemenin mekanik özelliklerinden olan sertliği önemli oranda etkilemektedir. Mikroyapıdaki perlitik yapı ne kadar fazla olursa malzemenin sertliği bir o kadar artmaktadır. Mikroyapıdaki ferritik perlitik oran göz önünde bulundurulduğunda SiC'e ait numunenin sertliğinin daha fazla olması kaçınılmazdır.



Şekil 5.4. Brinell sertlik sonuçları

Sertlik ölçüm cihazında yapılan ölçümler sonucunda FeSi ilaveli numunenin sertliği 198,06 HB iken, SiC ilaveli numunenin sertlik değeri 205,07 HB ölçülmüştür.

5.5. Maliyet Analizi

Silisyum karbür ve ferro silisyum ilaveli ocakların yükleme miktarları aşağıdaki gibidir.

Yükleme miktarları;

32,76 kg SiC + 25,48 kg C (SiC)

51,84 kg Fe-Si + 43,47 kg C (FeSi)

Diğer yüklenen malzemeler aynı olduğu için onlar hesaba katılmamış sadece ferro-silisyum, karbon, silisyum karbür miktarları üzerinden maliyet hesabı Tablo 5.3'teki birim fiyatlar baz alınarak yapılmıştır.

Tablo 5.3. Birim fiyat tablosu

Malzeme adı	\$ / Ton	TL/Kg
FeSi	2100	37,67
SiC	1950	35
C	1400	25,11

32,76 kg SiC + 25,48 kg C (SiC) → 1146,6 + 639,8 = 1786,4 TL

51,84 kg Fe-Si + 43,47 kg C (FeSi) → 1952,81 + 1091,53 = 3044,34 TL

Aynı kimyasal kompozisyona sahip iki farklı ocağın yükleme şekline göre SiC ile yükleme yapılan ocağın daha karlı olduğu saptanmıştır. Dolar kuru anlık olarak 17,94'ten alınmıştır. SiC kullanıldığında 1257,94 TL daha karlı olduğu saptanmıştır. Bu hesaplama 5 tonluk ocak yüklemesine göre yapılmıştır. Bu hesabı ton başına vuracak olursak 251,58 TL/ton sonucunu elde edilir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

SiC ve FeSi ilaveli küresel grafitli dökme demirlerin deneysel çalışmaları sonucunda aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır

1. Kimyasal analiz sonuçları kıyaslandığında, bu çalışmada SiC ve FeSi katkılarının sonuçları izleneceği için diğer değişkenler sabit tutulmuştur. Kimyasal kompozisyonda bu sabitlerden biridir ve birbirine çok yakın kimyasal kompozisyonlar sağlanmıştır.

2. SiC ilaveli küresel grafitli dökme demirin mikroyapısında tane boyutlarının daha küçük ve daha homojen şekilde dağılmış olduğu gözlemlenmiştir. FeSi ilaveli numunenin mikroyapısında ise tane boyutları daha iri olduğu tablolarla belirtilmiştir. Metalografik incelemeler sonucunda mikroyapı görüntüleri kıyaslandığında küreselleşme oranları birbirine yakın değerlerde çıkmıştır. Ferrit-perlit oranlarına bakıldığında SiC ilaveli numunelerin %61 ferritik yapı, %26 perlitik yapı içerdiği, FeSi ilaveli numunelerin %54 ferritik yapı, %33 perlitik yapı içerdiği gözlemlenmiştir. Buna göre SiC ile yükleme yapılan ocaktaki numunelerin daha ferritik yapıda, FeSi ile yükleme yapılan ocağın daha perlitik yapıda olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Mikroyapılarda tane boyutu ele alındığında SiC ilaveli numunelerin daha ince tane botuna sahip olduğu saptanmıştır. Ancak bu tane boyutu farkının çok az olduğu ve çekme mukavemetini çok az etkileyecek kadar bir fark olduğu sonucuna varılmıştır.

3. Çekme testi sonuçları ele alınarak ortalama maksimum çekme mukavemeti hesaplanmış FeSi için $\sigma_{max} = 500,47 \text{ N/mm}^2$, SiC için $\sigma_{max} = 505,37 \text{ N/mm}^2$ olarak belirlenmiştir. SiC ilaveli numunelerin çekme mukavemeti yaklaşık 5 N/mm^2 daha fazla olduğu saptanmıştır.

4. Sertlik ölçümlerinde FeSi ilaveli numunede sertlik değeri 198,06 HB iken SiC' e ait numunelerde ortalama değer 205,7 HB olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi %4 lük bir sertlik artışı olmuştur.

5. Maliyet açısından değerlendirme yapıldığında SiC ilaveli ocağın daha karlı olduğu 251,58 TL/ton bir fark olduğu bilgisi elde edilmiştir.

6.2. Öneriler

Mikroyapıda daha ince taneli ve daha homojen yapı isteniyorsa SiC kullanılabilir. Bu çalışmaya ek olarak farklı silisyum oranlarında dökümler yapılabilir ve buna bağlı olarak SiC ve FeSi 'un malzeme üzerindeki etkileri araştırılabilir.

KAYNAKÇA

Akkurt M. (1985) Takım Tezgahları Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Teknolojisi, Birsen Yayınevi, s. 122-126.

Akroy İ. (2007) Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Aşınma Direncine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, s.12-23.

Albayrak Ö. (2001) Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Porozite Oluşumunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.4-16.

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.

Bayrakçeken H., Ucin I., Taşgetiren S. (2006) Fracture Analysis of A Camshaft Made From Nodular Cast Iron, Engineering Failure Analysis, s.1240-1245.

Belan, J. (2006) Influence of Temperature on the Structure of Cast Materials TechMat, Svitavy, Czech Republic, s. 99-102.

Berdin C., Dong M.J., Prioul C. (2001) Local Approach Of Damage and Fracture Toughness for Nodular Cast Iron, Engineering Fracture Mechanics, s.15-25.

Çetinel H., Aksoy T. (2008) The Effect of Undermatching on Crack Tip Constrain In Welded Structure of Nodular Irons, Materials Processing Technology, s.18-22

Elkem Teknik Bilgi 2 (2010) Dökme Demirin Aşılması.

Grzysk W., Rech J., Żak K., Claudin C. (2009) Machining Performance of Pearlitic-Ferritic Nodular Cast Iron With Coated Carbide and Silicon Nitride Ceramic Tools, Machine Tools & Manufacture.

Kumruoğlu L.C. (2003) Lamel Grafitli ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Karbon Eşdeğerinin Mekanik Özellikler ve Mikroyapıya Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 28-30.

M. Chisamera, I. Riposan, S. Stan, C.B. Albu, C. Brezeanu A. (2007) Comparison of Oxy-Sulphide Alloy Tablets and Ca Bearing FeSi7 for Late Inoculation of Low Sulphur Grey Irons, s.17-27.

Öztürk, Ş. (2004) Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 22-26.

S. İ. (1998) Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimi Yolluk Besleyici Tasarımı Isıl İşlemi ve Özellikleri, s. 24-36

Schubert, W. D., Ta, A. T., Kahr, G., Benecke, T., Lux, B. (1984) Influence of SiC Additions on the Microstructure of Gray Cast Iron Physical Metallurgy of Cast Iron. s. 119- 128.

Skočovský, P., Matejka, M. (1994) Microstructure of Cast Irons – Metallographic Handbook. Fomplex, Trenčín.

Skočovský, P., Vaško, A. (2007) Quantitative Evaluation of Structure of Cast Irons. EDIS, Žilina.

Şen N. (2018) Lamel Grafitli Dökme Demirlerin Üretiminde Metalurjik Silisyum Karbür ve Ferro Silisyum Katkılarının Malzeme Üzerindeki Mekanik, Metalurjik ve Ekonomik Etkisinin Araştırılması, Necmettin Erbakan Üniversitesi, s. 28-33.

Vaško, A. (2002) Influence of Charge Composition on the Structure and Properties of Nodular Cast Iron Dissertation SjF ŽU Žilina.

Venkateswaran S., Wilfing J., Schubert W. D., Lux B., Benecke T. (1990) Influence of SiC and FeSi Additions on the Microstructure, Cooling Curve and Shrinkage Porosity of Ductile Iron Physical Metallurgy of Cast Iron, s. 171-178.

Yılmaz F. (2003) İçme-Atık Su ve Gaz Dağıtım Şebekelerinde Dökme Demirler ve Düktil Demir Uygulamaları, s. 13-28