



**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR  
DÖKÜMÜNDE AŞILAYICI VE DÖKÜM  
SICAKLIĞININ AKICILIK ÖZELLİKLERİNE  
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Sinan KAYA**

**Yüksek Lisans Tezi  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK  
2019  
(Her Hakkı Saklıdır)**

**T.C.  
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR DÖKÜMÜNDE AŞILAYICI VE DÖKÜM  
SICAKLIĞININ AKICILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**(Investigation of The Influence of Inoculant and Casting Temperature on Fluidity  
Properties in Spherical Graphitic Cast Iron Casting)**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Sinan KAYA**

**Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK**

**Bayburt  
Ağustos, 2019**

## KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK danışmanlığında, 142001002 numaralı Sinan KAYA tarafından hazırlanan “Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümünde Aşılaiıcı ve Döküm Sıcaklığının Akıcılık Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi” konulu bu çalışma 22/08/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

**Başkan:** Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

İmza:

**Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Erman Kadir ÖZTEKİN

İmza:

**Jüri Üyesi:** Dr. Öğr. Üyesi Çağlar YÜKSEL

İmza:

Bu tezin Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

.... /.... /....

Doç. Dr. Fatih GÜRBÜZ  
Enstitü Müdürü

## ETİK VE BİLDİRİMİ SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümünde Aşılmalı ve Döküm Sıcaklığının Akıcılık Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

.../.../...

Sinan KAYA

## TEŞEKKÜR

Tez alışma konusunun belirlenmesinde ve hazırlama s¼recinin her aşamasında, değerli bilgilerini benimle paylaŐan, kendisine ne zaman danıŐsam bana kıymetli zamanını ayırıp sabırla ve b¼y¼k bir ilgiyle bana faydalı olabilmek için elinden gelenden fazlasını sunan her sorun yaŐadıęımda yanına çekinmeden gidebildiğim, g¼ler y¼z¼n¼ ve samimiyetini benden esirgemeyen kıymetli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK' a teŐekk¼r ederim.

Eğitim hayatım boyunca hep yanında duran ve desteklerini esirgemeyen bu günlere gelmeme sebep olan aileme ve çalışma boyunca desteklerini esirgemeyen kardeŐlerim Aynur KAYA ve Serpil KAYA'ya teŐekk¼rlerimi sunarım.

**ÖZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR DÖKÜMÜNDE AŞILAYICI VE DÖKÜM SICAKLIĞININ AKICILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Sinan KAYA**

**Ağustos, 2019, 77 sayfa**

Ergitilen sıvı metalin hazırlanan kalıp boşluğuna dökülmesi şeklinde tanımlanan döküm yöntemi, istenen nihai şeklin sıvı metale doğrudan verilebildiği ekonomik ve en yaygın kullanılan metal şekillendirme yöntemlerinden biridir. Sıvı metal ile çalışılması döküm yöntemini çok avantajlı kılmakla birlikte, bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Döküm işleminde sıkça karşılaşılan hatalardan biri sıvı metalin kalıp boşluğunda tam olarak yürümemesi, kalıbın tam olarak dolmamasıdır. Bu hata sıvı metalin kalıp boşluğunda kalıp yüzeyi ile teması, kalıp malzemesinin ısı transfer katsayısının yüksek olması ve sıvı hareketleri esnasında sıvı metalin aşırı soğumasından ve katılaşmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca sıvı metal yüzeyindeki oksit tabakasının yüzey gerilimi de akışı sınırlandırmaktadır. Bu sebeple sıvı metalin akıcılığı sağlam döküm imalatı için önemlidir. Metal ve alaşımlarının yolluk sisteminden geçerek, kalıbı eksiksiz ve zamanında doldurma özelliğine akıcılık denir. Belli bir katılaşma sıcaklık aralığına sahip alaşımların akıcılıkları sıvı ve katı fazların bir arada bulunmasından dolayı olumsuz yönde etkilenmektedir. Sıvı metalin akıcılığına alaşım özellikleri, kalıp özellikleri, döküm sıcaklığı ve ilave edilen alaşım elementleri, aşılama, küreselleştirme, tane inceltme gibi döküm uygulaması şartlarına göre birçok faktörden etkilenmektedir.

Bu çalışmada, Küresel Grafitli Dökme Demir sınıfı GGG60 standardı alaşımın aşılama kalitesi, döküm sıcaklığının akıcılık özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bunun için döküm sıcaklığı, farklı aşılama ve farklı aşılama miktarlarının, özel olarak tasarlanan farklı kesit kalınlıkları içeren akıcılık testi modeliyle hazırlanan kum kalıplara dökümü yapılarak akıcılık özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Değişen döküm şartlarında kum kalıba yapılan dökümlerde kesit kalınlığına bağlı olarak sıvı metalin ilerleme mesafesi tespit edilerek, FlowCast Döküm simülasyon yazılımları ile karşılaştırılmıştır. Bütün parametrelerde yapılan dökümlerin farklı kalınlıktaki döküm parçalardan elde edilen numunelerden mikro yapı incelemeleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Küresel grafitli dökme demir, akıcılık, aşılama

## **ABSTRACT**

### **MASTER THESIS**

#### **INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF INOCULANT AND CASTING TEMPERATURE ON FLUIDITY PROPERTIES IN SPHERICAL GRAPHITIC CAST IRON CASTING**

**Sinan KAYA**

**August, 2019, 77 pages**

The casting method, which is defined as pouring the molten liquid metal into the prepared mold cavity, is one of the most economical and one of the most widely used metal forming methods in which the desired final shape can be fed directly to the liquid metal. Working with liquid metal leads to advantageous casting method, however, it brings some difficulties. One of the common mistakes in casting process is that the liquid metal does not walk completely in the mold cavity and the mold does not fill completely. This error is due to the contact of the liquid metal with the mold surface in the mold cavity, the high heat transfer coefficient of the mold material, and the overcooling and solidification of the liquid metal during liquid movements. In addition, the surface tension of the oxide layer on the liquid metal surface limits the flow. For this reason, the fluidity of the liquid metal is important for robust casting production. The ability of the molten liquid metal or alloy to fill the mold cavity completely and in time through the gating system is called fluency. The fluids of alloys with a certain solidification temperature range are adversely affected by the combination of liquid and solid phases. Alloy properties, mold properties, casting temperature and added alloying elements are influenced by many factors according to casting conditions such as grafting, spherization, grain thinning.

In this study, it was aimed to investigate the grafting quality and fluency properties of casting temperature of GGG60 standard alloy of Spherical Graphite Cast Iron. For this purpose, the effects of casting temperature, different inoculants and different inoculant quantities on sand molds were investigated by using fluency test model with respect to different cross section thicknesses. The flow distance of the liquid metal was determined according to the cross-sectional thickness of the castings made in sand casting under changing casting conditions and compared with FlowCast Casting simulation software. The microstructure analysis of the samples obtained from the castings of different thicknesses of the castings made in all parameters were evaluated and the results were evaluated.

**Keywords:** Spheroidal graphite cast iron, fluency, fluidity, inoculation

# İÇİNDEKİLER

ETİK VE BİLDİRİMİ SAYFASI.....	i
TEŞEKKÜR .....	ii
ÖZ.....	iii
ABSTRACT .....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xi
<b>Giriş .....</b>	<b>1</b>
<b>KURAMSAL TEMELLER .....</b>	<b>7</b>
Dökme Demirler .....	7
Demir-Karbon (Fe-C) Alaşımlarında Faz Dönüşümleri.....	8
Katılma ve grafit oluşumu .....	8
Dökme Demirlerin Sınıflandırılması .....	10
Beyaz dökme demir. ....	10
Temper dökme demir.....	11
Gri dökme demir. ....	12
Küresel grafitli dökme demir (KGDD).....	13
Kompakt grafitli dökme demir. ....	14
Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD).....	16
KGDD'lerin Mikro Yapısı .....	19
Ferritik KGDD. ....	19
Perlitik KGDD. ....	19
Östenitik KGDD. ....	20
Ferritik / perlitik KGDD. ....	21



Martensitik KGDD. ....	21
KGDD' nin Sınıflandırılması .....	21
KGDD'lerin Kimyasal Bileşimi .....	22
Alaşım elementleri. ....	22
Karbon. ....	22
Silisyum. ....	22
Bakır. ....	23
Nikel. ....	23
Molibden. ....	23
Manganez. ....	23
Kalay. ....	24
KGDD' nin Mekanik Özellikleri .....	25
Çekme özellikleri .....	26
Aşılama .....	28
Akıcılık .....	31
Akıcılığı etkileyen faktörler. ....	32
Viskozite. ....	33
Yüzey gerilimi. ....	33
Aşırı ısınma. ....	33
Katılma mekanizması. ....	33
Oksit film ve metalik olmayan içeriğin oluşumu. ....	33
Özgül ağırlık. ....	33
Ergime noktası (veya alaşım katılma sıcaklığı). ....	33
Akıcılık testleri. ....	34
Döküm Simülasyonları .....	35
<b>MATERYAL VE METOD .....</b>	<b>39</b>
Deney Parametrelerinin Belirlenmesi ve Deney Tasarımı .....	39

Model Tasarımı .....	40
Kum Kalıpların Hazırlanması.....	41
Alaşımın Ergitilmesi ve Döküm İşlemi .....	43
Dökümlerin İncelenmesi.....	43
Mikro yapı İncelemeleri .....	44
Modelleme Çalışmaları.....	45
<b>ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA .....</b>	<b>47</b>
Akıcılık Deneyi Döküm Sonuçları .....	47
Mikro Yapı İncelemeleri ve Değerlendirilmesi.....	53
Akıcılık Modelleme Sonuçları .....	62
<b>SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>66</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>67</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>78</b>

## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. <i>Dökme Demir Türleri İle Çelik Döküm Arasındaki Çeşitli Özelliklerin Karşılaştırılması (Kökden, 1998).</i> .....	8
Tablo 2. <i>Dökme Demirin Ticari Tanım, Mikro Yapısı ve Kırılma Görünümü ve Nihai Yapısına Göre Sınıflandırılması (ASM Handbook, 1990).</i> .....	15
Tablo 3. <i>KGDD'lerin Kimyasal Bileşim Aralıkları (ASM Handbook,1990).</i> .....	17
Tablo 4. <i>KGDD'lerin Mühendislik Özelliklerinin Demir Esaslı Döküm Malzemelerle Kıyaslanması (Karaman, 2011).</i> .....	18
Tablo 5. <i>KGDD'lerin Sınıflandırılması (TS 526) (Kayalı, 2006).</i> .....	21
Tablo 6. <i>Alman DIN 1693 Standardına Göre KGDD'lerin Sınıflandırılması</i> .....	22
Tablo 7. <i>Alaşım Elementlerinin Etkileri (Labrecque ve Gagné, 1998).</i> .....	24
Tablo 8. <i>Bazı Aşılaiıcıların Nominal Kimyasal Bileşimleri (%) (Karadeniz, 2017).</i> .....	29
Tablo 9. <i>Deney Parametreleri</i> .....	40
Tablo 10. <i>GGG60 KGDD Kimyasal Bileşimi</i> .....	43
Tablo 11. <i>Simülasyonda Kullanılan Malzemelerin Termofiziksel Özellikleri</i> .....	46
Tablo 12. <i>Döküm Sonuçlarına Göre Elde Edilen Sıvı Metal İlerleme Mesafesi</i> .....	47
Tablo 13. <i>Modelleme Şartlarına Göre Alınan Sonuçlar</i> .....	63

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Fe-C denge diyagramı (Pollack, 1988).....	9
Şekil 2. Beyaz dökme demirin mikro yapısı (Yalçın, 1999).....	11
Şekil 3. Temper dökme demirin mikro yapısı (Sağlam, 2009).....	12
Şekil 4. Gri dökme demirin mikro yapısı (Mozumder, 2015). ....	13
Şekil 5. KGDD'nin mikro yapısı (Mozumder, 2015). ....	14
Şekil 6. Kompakt grafitli dökme demirin mikro yapısı (Guesser, Schroeder, & Dawson, 2001). .....	15
Şekil 7. Ferritik KGDD'nin mikro yapısı (Albayrak, 2001).....	19
Şekil 8. Perlitik KGDD'nin mikro yapısı (Shama, 2017). ....	20
Şekil 9. Östenitik KGDD'nin mikro yapısı (MEB, 2011). ....	20
Şekil 10. KGDD'nin diğer dökme demirlerle karşılaştırılması (Hasırcı, 2000). ....	26
Şekil 11. Farklı sınıflarda KGDD, gri dökme demir ve çeliğin akma mukavemetini gösteren gerilme şekil değiştirme eğrisi (Demirlek, 2013). ....	27
Şekil 12. KGDD'lerde çekme dayanımı % uzama ilişkisi (Kılıçlı, 2004). ....	27
Şekil 13. KGDD'lerde sertlik ve dayanım arasındaki ilişki (Kırçalı, 2006). ....	28
Şekil 14. Aşılama üzerine sıcaklığın etkisi (Öztürk, 2013). ....	30
Şekil 15. KGDD üretimi (Çetin, 2005). ....	31
Şekil 16. a) Akıcılık spirali b) Vakum akıcılık (Flemings, 1974).....	34
Şekil 17. Aşırı ısısız saf bir metalin bir akışkanlık kanalında akış ve katılaşması (a) akışın başlaması (b) Akış sırasında; (c) Akışın sonu (Flemings, 1974). ....	35
Şekil 18. Döküm simülasyon program tasarım örneği (Şirin, & Çolak, 2009).....	36
Şekil 19. Flowcast programıyla sıvı metalin kalıbı doldurması görüntüsü.....	37
Şekil 20. Döküm simülasyon programı ile parça analizi (Çolak, & Kayıkcı, 2009). ....	37
Şekil 21. Simülasyon programı ile döküm parçası üzerindeki çekinti oluşacak bölgelerin gösterimi (Çolak, & Şirin, 2010). ....	38
Şekil 22. Akıcılık testi model görüntüsü ve ölçüleri.....	41
Şekil 23. Plak model görüntüsü, a) Üst derece, b) Alt derece .....	41
Şekil 24. Kalıplama işlem basamaklarından örnek görüntüler .....	42
Şekil 25. Döküm sonrası kalıp görüntüsü .....	42
Şekil 26. Döküm sonrası akıcılık kanalların birleşmesi hatası görünümü.....	44
Şekil 27. Mikro yapı numunesi alınan bölgelerin gösterilmesi .....	45

Şekil 28. FlowCast programında kalıbın doldurulması .....	46
Şekil 29. 1430 °C, %0,24 A kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü .....	48
Şekil 30. 1430 °C, %0,48 A kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü .....	48
Şekil 31. 1480 °C, %0,24 A kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü .....	49
Şekil 32. 1480 °C, %0,48 A kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü .....	49
Şekil 33. 1430 °C, % 0,24 B kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü.....	50
Şekil 34. 1480 °C, % 0,24 B kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü.....	51
Şekil 35. 1480 °C, % 0,48 B kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü.....	51
Şekil 36. 1480 °C, % 0,48 C kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü.....	52
Şekil 37. 1430 °C, % 0,24 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri	54
Şekil 38. 1430°C, % 0,48 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri .	55
Şekil 39. 1480 °C, % 0,24 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri	56
Şekil 40. 1480 °C, % 0,48 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri	57
Şekil 41. 1430 °C, % 0,24 B tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri	58
Şekil 42. 1480°C, % 0,24 B tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri .	59
Şekil 43. 1480 °C, % 0,48 B tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri	60
Şekil 44. 1480 °C, % 0,48 C tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri	61
Şekil 45. FlowCast modelleme yazılımından alınan 1430 °C döküm sonuçları.....	64
Şekil 46. FlowCast modelleme yazılımından alınan 1480 °C döküm sonuçları.....	64

## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

<b>KGDD</b>	:Küresel Grafitli Dökme Demir
<b>Fe</b>	:Demir
<b>C</b>	:Karbon
<b>Si</b>	:Silisyum
<b>Ca</b>	:Kalsiyum
<b>BDD</b>	:Beyaz Dökme Demir
<b>GDD</b>	:Gri Dökme Demir
<b>MEB</b>	:Milli Eğitim Bakanlığı
<b>P</b>	:Fosfor
<b>Ni</b>	:Nikel
<b>Bi</b>	:Bizmut
<b>Cu</b>	: Bakır
<b>Mg</b>	:Magnezyum
<b>Mn</b>	:Manganez
<b>Sr</b>	:Stronsiyum
<b>TS</b>	:Türk Standartları
<b>DIN</b>	:Alman Standartları Enstitüsü
<b>STL</b>	:Üç Boyutlu Model Dosya Transfer Biçimi
<b>CFS</b>	:Kritik Katı Oranı
<b>CLS</b>	:Kritik Sıvı Oranı
<b>CE</b>	:Karbon Eşdeğer
<b>µm</b>	:Mikrometre
<b>Mpa</b>	:Mega Pascal
<b>GPa</b>	:Giga Pascal
<b>Fe<sub>3</sub>C</b>	:Sementit
<b>KG</b>	:Küresel Grafit

# BİRİNCİ BÖLÜM

## Giriş

Dökme demirlerin geçmişi MÖ 500 yılına dayanır ve günümüzde halen birçok alanda kullanımı mevcuttur (Stefanescu, 2005). Dökme demirin düşük maliyetli olması, dökümünün kolay olması, dayanıklı olması, kolay işlenebilmesi, sertliği, aşınma direncinin ve korozyon direncinin yüksek olması, ısı iletkenliğinin yüksek olması gibi özellikleri dökme demiri döküm alaşımları arasında eşsiz yapmaktadır (Elliott, 1988).

Dökme demirlerden sementit ( $Fe_3C$ ) içerenler beyaz dökme demir, karbon grafit içerenler ise gri dökme demir olarak adlandırılır. Bunlardan ince tanecikli yapıya sahip grafit çökeltileri iyi bir sönümlenme kapasitesi ve basınç dayanımı, aynı zamanda düşük gerilme dayanımı ve süneklik gösterirler. 1940'larda, demir eriyiğine dökümden önce kontrollü miktarlarda magnezyum (Mg), seryum (Ce) ya da kalsiyumun (Ca) eklenmesi çökeltilenmenin küresel bir şekle dönüşmesine yol açmış ve böylece grafit küreselleşme işlemi keşfedilmiştir. Küresel grafitli dökme demirler (KGDD), gri dökme demirlerin başlıca avantajları olan düşük ergime derecesi, iyi akışkanlık ve iyi işlenebilirlik özelliklerine sahip olmasının yanı sıra çeliğin mühendislik açısından avantajı olan yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk gibi özelliklere de sahiptir ve bu özellikleri dökme demirler içerisinde en çok tercih edilmelerinin başlıca sebebidir (Theuwissen, Lacaze, & Laffont, 2016).

Akışkanlık, ergimiş metalin kalıp boşluğunun içini tamamen doldurmasıdır. Yeteri kadar akışkan olmayan metaller, döküm kalıbının özellikle dökümün daha ince kesitli bölümlerinde yetersiz döküme sebebiyet verir. Yüksek sıcaklıklar, tüm metallerin ve alaşımların akışkanlığını arttırırken, dökümdeki metalik olmayan yabancı maddeler akışkanlığı azaltır ve kalıp içindeki akışı engeller. Dökme demirin akıcılığı ise kükürt (S), oksijen (O) ve krom (Cr) miktarı arttırıldığında azalır; fosfor (P), karbon (C), silisyum (Si), mangan (Mn), alüminyum (Al) ve bakır (Cu) miktarı arttırıldığında artar (Kharkiv, 2013).

Dökme demirlerde C miktarının büyük bir kısmı katılaşma sırasında ayrışır ve dökme demirin mikro yapısında ayrı bir yapı elemanı olarak görülür. Dökme demirlerde malzemenin kimyasal bileşimi, soğuma hızı ve üretim yöntemlere bağlı olarak katılaşma sırasında C'nin oluşturduğu şekil ve biçim dökme demirin tipini belirlemekte ve malzeme özelliklerinde

doğrudan etkili olmaktadır. Dökme demirler içerisinde en yaygın üretilen KGDD'ler ısıtma işlemleri ile çeliğe benzer mekanik özellikler elde edilebilen mühendislik malzemeleridir.

Bu çalışmada KGDD malzemelerin kalıp dolumu ve katılaşma aşamasında aşılama işlemi ve aşılama çeşitleri istenilen mekanik özellikleri ve akıcılığı elde etmek için etkileri deneysel ve modelleme teknikleri ile incelenmiştir.

Rivera, Boeri ve Sikora (2003) çalışmalarında, aşılama işleminin, kimyasal bileşimin ve soğutma oranının kum kalıplarında dökülen KGDD'lerin katılaşma makro ve mikro yapı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak primer ve ötektik östenitin hiperötektik alaşımlar için bile daima dendritik olarak büyüdüğünü göstermişlerdir. Aşılama işlemindeki değişiklikler, katılaşma makro ve mikro yapıların inceltme derecesinde önemli değişikliklere neden olmaz. Karbon eşdeğeri (CE) tane büyüklüğünü etkiler. Öte yandan, soğutma hızı, tane büyüklüğü ve morfolojisi üzerinde zayıf bir etkiye sahiptir ancak, östenitin dendrit kol aralığını kuvvetle etkilediği tespit edilmiştir.

Şen (2004) çalışmasında döküm numunelerinde modüle bağlı olarak küre sayısı, ortalama grafit çapı, küreselleşme oranı (%) ve grafit (%)'in değişimini incelemiştir. Yaptığı üç döküm için çizdiği grafiğe göre; modül küçüldükçe küre sayısının arttığı, ortalama grafit çapının azaldığı, küreselleşmenin arttığı ve grafit yüzdesinin azaldığı sonuçlarına ulaşmıştır.

Han ve Xu (2005), akışkanlık uzunluğunun bir alaşımın katılaşma sıcaklık aralığı ile ters orantılı olduğunu söylemişlerdir. Akışkanlık uzunluğunun bir alaşımın katılaşma sıcaklığı aralığının azalmasıyla arttığını deneyler sonucunda tespit etmişlerdir. Ancak yüksek basınçlı döküm koşulları altında bu ilişkinin geçerli olmadığını belirtmişlerdir.

Bockus ve Dobrovolskis (2006) yaptıkları çalışmada; şarjın, ergime koşullarının, küreleştirmede aşılamanın; KGDD'nin özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. bir indüksiyon ocağındaki ergiyik tutma süresinin ve sıcaklığının, KGDD dökümlerinin C ve artık Mg içeriklerinin küreselleşmeye etkisini göstermişlerdir. Sonuç olarak; farklı kimyasal bileşimler kullanılarak aynı KGDD elde etmişlerdir. KGDD'lerin dökümü, yalnızca şarjda büyük miktarda pik demir ile ayrıca bazı aşamalarda aşılama işlemi kullanıldığında, ferritik olacağını tespit etmişlerdir.

Haque (2007) yaptığı çalışmada, iki farklı KGDD'yi, farklı kesit kalınlıklarına sahip 1 m uzunluğunda bir akışkanlık modeli kullanılarak hazırlanmış olduğu kalıba dökmüştür. Döküm numunelerinin uzunluklarını, akışkanlık uzunluklarını ölçmüş ve döküm numunelerindeki gözenekliliği görmek için X-ışınları yöntemiyle incelemiştir. Uzunluk boyunca her bir kalıbın yoğunluğunu da belirlemiştir. Deneysel



sonuçlar Fe-C-2Si dökme demirinin akışkanlık uzunluğunun, kesit kalınlığından bağımsız olarak Fe-C-2Al dökme demirden daha yüksek olduğunu göstermiştir. Aynı zamanda, kesit kalınlığı arttıkça, her iki sistem için çekinti ile gözenekliliğın arttığına işaret eden yoğunluk azalmıştır. Ayrıca çekinti ile gözeneklilik miktarının Fe-C-2Al dökme demir için Fe-C-2Si dökme demirden daha fazla olduğunu bulmuştur. Kesit kalınlığı arttıkça, mikro yapıdaki karbür oranı azaldığı ve her iki dökme demir için perlit miktarının arttığı tespit etmiştir. Bununla birlikte, grafit ve ferrit halkaları için küresellik derecesi, KG-Si dökme demirin matris yapısı, KG-Al dökme demire oranla daha iyi olduğunu göstermiştir. Küresel grafitli alüminyum dökme demir üretmek için özel aşılama tekniğı ve besleme düzeneğinin benimsenmesi gerektiğini belirlemiştir.

Hua, Gao, Zhang, Zhang ve Qijie (2007) alışmalarında, magnezyum alaşımının akışkanlığını etkileyen faktörleri vakumlu döküm yöntemiyle incelemiştir. Deneysel veriler, Mg alaşımının akışkanlığı ile döküm sıcaklığı arasındaki ilişkinin üssel bir sönümlenme eğrisi olarak tanımlanabileceğini göstermiştir. Al, Zn, Mn ve Ce gibi alaşım elementlerinin içeriğine göre değışen katılma aralığının uzunluğunun, Mg alaşımının akışkanlığını etkilemekte olduğunu; Mg-Al-Zn-Mn-Ce alaşımında, döküm işlemi sırasında çökelen metaller arası fazların Mg alaşımının akışkanlığını azalttığı görülmüştür.

Aslandoğın (2009) alışmasında, döküm tekniğinde parça yapısı ve kalitesini etkileyen en önemli iki etken olan akıcılık ve katılmayı geniş literatür taramaları ile araştırmıştır. Yaptığı deneysel çalışmalar ile akıcılık, akıcılığı etkileyen faktörler ve malzeme bileşiminin akıcılığa olan etkisini incelemiştir. Yapılan deneysel uygulamalarda öncelikle AISI 1040 alaşımsız eliğı belirli döküm şartlarında spiral kalıpta dökülerek akıcılığı ölçülmüştür. Daha sonra alaşımsız çeliğe çeşitli oranlarda Cr ve Ni ilavesi ile aynı döküm şartlarında dokuz adet daha döküm yaparak akıcılıkları ölçülmüştür. Sonuç olarak döküm tekniğinde akıcılığı artırıcı en önemli etkenin sıcaklık olduğunu tespit edilmiştir. elik dökümlerde alaşımsız çeliğe Cr ve Ni ilavesinin eliğın akıcılığını artırdığını görülmüştür.

Bockus ve Zaldarys (2011) alışmalarında, KGDD matris mikro yapısıyla ilgili olarak farklı mikro yapılarda perlit içeriğı elde etmek için ısıl işlem kullanmadan, farklı koşullarda farklı soğutma koşullarına ulaşmak için çeşitli çaplarda silindirik KGDD ubuklar elde ederek aşılama türleri, CE ve mikro yapısını araştırmışlardır. Sonuç olarak, yavaş soğutma hızının, nadir toprak elementlerine sahip aşılama türleri ve nispeten az Mg kalıntısının perlit içeriğini azalttığını göstermişlerdir. Bu alışma, KGDD'lerin üretiminde alternatif ekonomik yöntemlerin geliştirilmesinde büyük öneme sahip olduğunu tespit etmişlerdir.

Arda, Şirin, Çolak ve Kayıkcı (2011) çalışmalarında, farklı modüllü küp şeklindeki dökümlerin kullanımını ve kimyasal analizlerini; döküm modüllerinin ve kimyasal analizlerin etkilerini incelemişlerdir. Grafitli dökme demirin katılaşması sırasındaki hacimsel değişimi, dökümlerin besleyici tasarımı sırasında kilit rol oynayan çekinti ve genişlemedir. Döküm parçalarının çekinti, genişleme ve besleme davranışlarını araştırmak için kum dökümü, ısı analizi, döküm simülasyonu ve tahribatsız test tekniklerini kullanmışlardır. Deney sonucunda, dökümlerin çekinti ve genişleme davranışının döküm modüllerine büyük ölçüde bağlı olduğunu göstermişlerdir. Elde edilen verilere göre, simülasyon tekniğinin KGDD dökümlerde besleyicilerin tasarlanması için verimli bir şekilde kullanılabilceğini ileri sürmüşlerdir.

Ateş (2013) çalışmasında, EN-GJS-600-3 ile EN-GJS-600-10 kalite KGDD uzun ömürlü yorulma davranışlarını incelemiştir. Yaptığı çalışmada, KGDD'nin bileşimine Si ilavesi, malzemenin çekme mukavemetini ve sertliğini azaltmıştır. Ancak, Si ilavesi malzemenin mikro yapısını tamamen ferritik yaptığını, akma mukavemetini, sünekliliğini, tokluğunu ve yorulma oranını (yorulma dayanımı/çekme mukavemeti) artırdığını tespit etmiştir.

Seidu (2013) çalışmasında, KGDD parametrelerinin %0,1 ağırlığındaki altı farklı aşılama etkisi incelenmiştir. Çalışmada, ön koşullandırma maddesi olarak Al, Ca, Zr-FeSi eklemiş, aşılama tellür olmayan hızlı kalıplara eklendiği için bu parametreleri kritik olarak analiz etmek amacıyla kalıp içi aşılama kullanmıştır. Katılaşma davranışı ve farklı aşılama sistemlerinin aynı baz metal bileşimi ile etkisi ve nispi performanslarını değerlendirmiştir. Sonuç olarak alaşımlarda az soğuma derecesinde önemli bir azalma olduğunu ve aşılama endeksinin değerinin arttığını, Al, Ca, Zr-FeSi ön koşullandırıcılarının ilavesinin önemli bir etki yapmadığını görmüştür. Ca, RE, S, O-FeSi aşılama sırasıyla Ca, Zr-FeSi ve Ca, Ba-FeSi aşılama tarafından en iyi verimi sağladığını tespit etmiştir.

Koch ve Soulas (2014) çalışmalarında, dökme demir aşılama dökümlerin sağlamlıkları, mekanik özellikleri ve işlenebilirlik açısından üretimini mümkün kılan malzemelerin özellikleri ile ilgili bazı önemli bilgileri gözden geçirmişlerdir. Bu çalışmada, gri ve KGDD'lerde aşılama ve grafit çekirdeklenme mekanizmasını açıklamış ve Ca, Ba, Sr, Bi, Ce gibi elementlerin dökme demir katılaşma üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, kullanılan aşılama miktarları düşük olup aşılama, gri ve KGDD üretiminde önemli bir adımdır. Aşılama seçimi; şarj malzemeleri, ergime teknolojisi, ilave yöntemi, kalıp teknolojisi, dökümlerin tipi ve kesit kalınlığı gibi faktörlere bağlıdır. Aşılama Bi gibi çeşitli elementlere sahip kompleks ferrosilisyum bazlı ürünlerdir. Sr, Zr vb. elementlerin dökümün sağlamlığına büyük ölçüde katkısı olduğunu belirlemişlerdir.

Yang, Li, Du, Wang ve Tang (2016) yaptıkları çalışmayla, Ni ve Si içeriklerinin Al-Ni-Si alaşımlarının akışkanlığı üzerindeki etkisi spiral kalıcı bir kalıp ile incelenmişlerdir. Katılaşma sırasındaki akışkanlık ile ilgili karakteristik parametreler bilgisayar destekli soğutma eğrisi termal analizi ile ölçülmüştür. Si içeriği ağırlıkça %3'ten az olduğunda ve Ni içeriği ağırlıkça %2 ila %6 arasında değiştiğinde, Al-Ni-Si alaşımlarının akışkanlığı Si ve Ni içeriği ile artmıştır. Soğutma eğrilerinin bu özellikleri ve akışkanlık testi sonuçları, Al-Ni-Si alaşımlarının mikro yapı analizi ile de desteklenmiştir. Al-Ni-Si alaşımlarının nihai çekme dayanımı, Ni ve Si ilavesiyle geliştirilmiş olduğu görülmüştür.

Erturk, Kumruoglu ve Ozel (2017) çalışmalarında, dökme demirde aşılama kalitesinin belirlenmesinden sonra besleyici olmayan dökümün sınırlarını belirlemek amacıyla tamamen ve besleyici sistemler kullanmadan kum kalıba dökülme üretim yöntemi, katılaşma ve hacim değişikliği formları, aşılama kalitesi, kalıptaki reçinenin türü ve kalıp sertliğinin bir fonksiyonu olarak simülasyon programı ile incelemiştir. Araştırma ve geliştirme çalışmalarında termal analizlerin kullanılmasının, dökümhane uygulamaları için fayda sağladığı görülmüştür. Daha verimli döküm yöntemiyle hurda oranının azaltılması, ekonomik ve çevresel faydalar sağlamıştır. Simülasyon veritabanının termal analizler kullanılarak kalibrasyonu, deneme hatası maliyetini ve prototip kontrol zaman kaybını azaltmıştır. Kalibrasyon dökümhane koşullarında uygulanırsa, simülasyonların çok verimli bir mühendislik aracı haline geldiği tespit edilmiştir.

Karadeniz, Çolak ve Barutçu (2017) çalışmalarında, piyasada en yaygın aşılama aşılayıcılar hakkında genel bilgiler vermiş ve piyasada en yaygın kullanım bulan 3 farklı aşılama aşılayıcıyı ve 2 çeşit aşılama aşılayıcıyı farklı oranlarda kullanarak GGG-60 malzeme ile döküm deneyleri yapmışlardır. Böylece aşılama aşılayıcı türü ve miktarına bağlı olarak üretilen malzemenin içyapı ve mekanik özelliklerini araştırmışlardır. İçyapı değerlendirmelerini optik mikroskop, mekanik özellikleri ise çekme dayanımı ve sertlik değerleri sonuçları olarak sunmuşlardır. Sonuç olarak; tane boyutu daha ince aşılama aşılayıcı kullanılan numunelerin tane boyutu büyük olan aşılama aşılayıcı kullanılan numunelere göre daha üstün mekanik özellikler gösterdiği anlaşılmıştır. Aşılama aşılayıcı ilave edilerek yapılan dökümlerden elde edilen numunelerden parlatma sonrası yapılan mikro yapı incelemeleri yapıda oluşan grafit kürelerini şeklinin uygun olduğu, küre çapının ortalama 15 µm civarında olduğu ve mm<sup>2</sup> başına düşen küre sayısının standartlarda gerekli değerler içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Aşılama aşılayıcı ilave edilmeden yapılan dökümlerin KGDD standartlarına uygun olmadığı tespit edilmiştir.

Çolak, Arslan ve Gavgalı (2018) çalışmalarında, farklı kesit kalınlıkları içeren ve parça içinde çekme boşlukları oluşumuna müsaade edecek şekilde tasarlanan geometriye

sahip modelden yapılan kum kalıplara gri dökme demir alaşımından dökümler yapmışlardır. Dökümhanedeki fiziksel şartları ve döküm parametreleri birebir olarak döküm simülasyon programına girilip SolidCast döküm simülasyon programıyla modellemeler yaparak gerçek döküm numunelerinden alınan sonuçlarla döküm simülasyon programından alınan sonuçları karşılaştırmıştır. Sonuç olarak; fiziksel ortamda yapılan dökümler ile simülasyonda alınan sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu gözlenmiştir. Verilen malzeme ve döküm şartları esas alınarak yapılan simülasyonlarda dökümün büyük oranda pozitif bir hacimsel değişim etkisi altında katılaşacağı ve buna bağlı olarak hacimsel genleşme basıncının etkisi ile besleyici gerekmesizin bu dökümün dökülebileceği belirlenmiştir. Yapılan mikro yapı incelemelerinde kesit kalınlığına bağlı olarak soğuma oranının değişmesinden lamel kalınlığının değiştiği gözlenmiştir. Kalın kesitli bölgelerde katılaşma daha geç tamamlanmış grafit yapısı büyümek için zaman bulmuş ve daha kaba yapılar oluşmuştur. Bu durumun modelleme programından alınan veriler ile uyumlu olduğu tespit etmişlerdir. Döküm modellemesinde gerçek döküm şartlarının birebir değerler girildiğinde başarılı sonuçlar elde edildiğini belirlemişlerdir. Buna göre bundan sonraki çalışmalarda döküm şartlarına göre optimize edildikten sonra doğru bir şekilde yapılan simülasyonun sağlam parça imalinde, özellikle hata yapıldığında ortaya çıkabilecek maddi kayıplar göz önüne alındığında çok önemli olduğu gözlemlenmiştir.

## Kuramsal Temeller

### Dökme Demirler

Dökme demir, çelik terimi gibi geniş bir demir alaşımları ailesini tanımlar. Dökme demirler çok bileşenli demir alaşımlarıdır ve ötektik olarak katılaşır. Dökme demir, çelikten daha yüksek C ve Si içeriğine sahiptir. Yüksek C içeriği nedeniyle, dökme demirin yapısı çelikten daha zengin bir karbon fazı gösterir. (Davis, 1996). Dökme demirler kolaylıkla ergitildiğinden mükemmel döküm alaşımıdır ve sıvı halde çok akışkandır. Katılaşırken istenilmeyen yüzey filmi oluşturmaz. Dökme demir dökümün soğuması sırasında çekinti gösterir ancak; bu çekinti çok fazla değildir. Dökme demir içerisinde bulunan yüksek C, bu malzemelerin sertlik ve kırılabilirliklerini artırır. Bu da kolaylıkla talaş kaldırma işlemini yapmayı sağlar. Yüksek sertlik ayrıca, yüksek aşınma dayanımı da sağlar ancak; bir dezavantaj olarak düşük süneklik ve tokluk özelliklerine sebep olur. (ASM Handbook, 1990). Tablo 1'de dökme demir türleri ile çelik döküm arasındaki çeşitli özelliklerin bir karşılaştırılması yapılmıştır.

Dökme demirler ağırlıkça %2,14 ila %4,0 C ve %0,5 ila %3 Si içerir. Dökme demir ayrıca standart çelikten daha düşük bir ergime noktasına sahiptir. Bu özelliği sayesinde daha kolay döküm yapılmasını sağlar. Dökme demirden yapılan malzemeler oksidasyon etkilerine karşı dirençli olma ve yapısal malzemeler için arzu edilmeyen kırılabilirlik eğilimindedirler. Akışkanlığı ve döküm kolaylığı sağlaması yapısal olmayan uygulamalar için aranan bir özelliktir (Eisenmann, 2015).

Tablo 1. Dökme Demir Türleri İle Çelik Döküm Arasındaki Çeşitli Özelliklerin Karşılaştırılması (Kökden, 1998)

Özellik	GDD	BDD	TDD	KGDD	Çelik Döküm
Dökülebilirlik	1	3	2	1	4
İşlenebilirlik	1	-	2	2	3
Güvenilirlik	5	4	3	1	2
Titreşim Sönümlenebilirliği	1	4	2	2	4
Yüzey Sertleşebilirliği	1	-	1	1	3
Darbe Direnci	5	-	3	2	1
Aşınma Direnci	3	1	4	2	5
Korozyon Direnci	1	2	2	1	4
Üretim Maliyeti	1	1	3	2	4

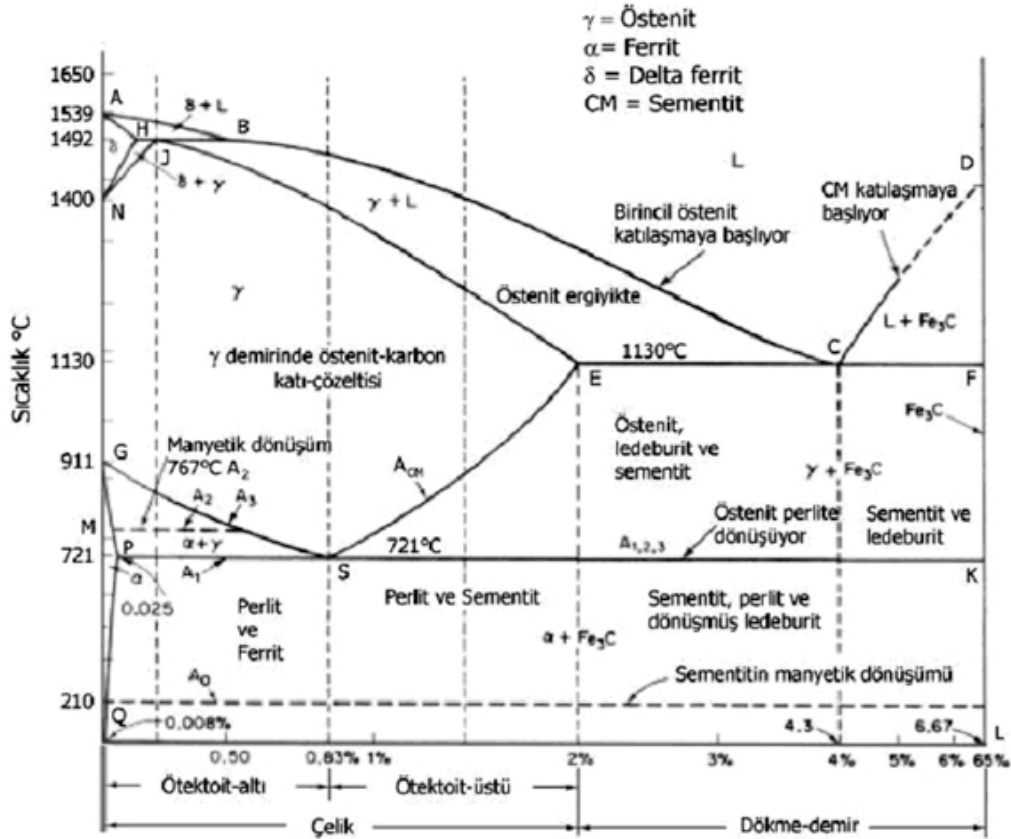
1= En İyi 5= En Kötü

### Demir-Karbon (Fe-C) Alaşımlarında Faz Dönüşümleri

#### Katılaşma ve grafit oluşumu.

Fe-C faz diyagramı, denge koşullarında küresel demirin katılaşma işlemini göstermek için Şekil 1’de gösterilmektedir (Labrecque, & Gagné, 1998). Ötektoid reaksiyon, difüzyonel bir mekanizma yoluyla iki farklı faza ayrılan tek fazlı bir faz olarak tanımlanır. Ötektik, bir sıvı fazın iki katı fazın bir karışımına dönüştüğü bir reaksiyondur. Fe-C sistemi, 1130°C’de ağırlıkça %4,3’lük bir bileşimde ötektik olup sıvı demir doğrudan östenit ve Fe<sub>3</sub>C dönüşür. Östenit ve östenit karışımına ledeburit denir (Kasvayee, 2015). Katılaşma sırasında, bir hiperötektik küresel döküm ergiyik için denge soğutma halini varsayarsak, sıvıdan kristalleşen ilk katı grafit fazdır. Grafit, inklüzyonlar veya inokulantlar (örneğin, MgS, CaS ve MgO·SiO<sub>2</sub>) düşük enerji ara yüzünde çekirdeklenmeyi tercih eder. Sıcaklığı ötektik çizgiye düşürerek grafit partikülleri ergiyik alanından C’yi boşaltarak yavaş yavaş büyür. Ötektik katılaşma sırasında, östenit grafit küreselliğinin etrafındaki C tükenmiş bölgelerde çekirdekleşirken ve tamamen östenitik matris elde edilinceye kadar büyür. Ötektik dönüşümden sonra, daha fazla sıcaklık düşüşü, östenit sıcaklıkta ötektikteki C çözünürlüğü ötektikte %2’den ötektoid sıcaklıkta %0,8’e düştüğünden, grafit hacminde bir artışa neden olur

ve sonuç olarak C atomları önceden var olan grafit küreselliğe doğru yayılır (Stefanescu, 2008).



Şekil 1. Fe-C denge diyagramı (Pollack, 1988).

Ötektoid sıcaklığının geçmesiyle, östenitin ferrite dönüşümü nedeniyle grafit küreselleşmeye daha fazla yayılır ve C çözünürlüğü %0,02'ye kadar (ferritte maksimum C çözünürlüğü) eşlik eder. Ferrit, C'nin grafit içine difüzyonunun C'nin tüketilmiş bir bölge oluşturduğu östenit-grafit ara yüzünde çekirdeklenmeyi tercih eder. Ferritin daha fazla büyümesi, C atomlarının östenitten grafitte doğru büyüyen ferrit boyunca difüzyonu ile gerçekleşir. Bu nedenle, ortaya çıkan denge mikro yapısı grafitli ferritik matris olacaktır. Denge mikro yapısı ancak C grafitte yaymak için yeterli zamana ve itici güce sahip olduğunda elde edilebilir. Daha yüksek soğutma oranlarında, C atomları ötektoid reaksiyonu sırasında yayılmak için yeterli zamana sahip değildir. Bu nedenle, ferrit-östenit ara yüzündeki Fe<sub>3</sub>C çekirdeklerinden ötürü ve östenitin daha yüksek C içeriğinden dolayı perlit oluşumunu başlatır. Perlit yapılar, ferrit ve Fe<sub>3</sub>C arasındaki daha kısa mesafe nedeniyle ferritten çok daha hızlı büyür. Başka bir deyişle, belirli bir düşük soğutmalı Fe<sub>3</sub>C büyümesinin ötesinde, ötektoid faz transformasyonu sırasında grafit büyümesi ve çoğunlukla Fe<sub>3</sub>C formları baskındır (Wessen, & Svensson, 1996).

CE, dökme demirlerin mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve dökülebilirliğini etkileyen bir parametredir. CE, ötektik kompozisyon üzerinde C'yle benzer etkiye sahip elementleri dikkate alır (Autere, Ingman, & Tennilä, 1986). CE hesaplanırken tipik olarak Si ve P dikkate alınır. CE için bu kavram, çeliğin kaynak kabiliyetini değerlendirmek için kullanılan konsept ile karıştırılmamalıdır (Partanen, 2016). Dökme demirler için CE hesaplamasının birkaç yolu vardır. Denklem 1'de ortak bir yol gösterilmiştir.

$$CE = \%C + (\%Si + \%P)/3 \quad (1)$$

Bu formül ile alaşımın ötektik, ötektik altı veya ötektik üstü kompozisyonda olup olmadığı bulunur. CE'nin %4,25 olması dökümün ötektik yapıda, %4,25'ten az olması dökümün ötektik altı yapıda, %4,25'ten fazla olması ise dökümün ötektik üstü yapıya sahip olduğunu gösterir (Kökten, 1998).

### **Dökme Demirlerin Sınıflandırılması**

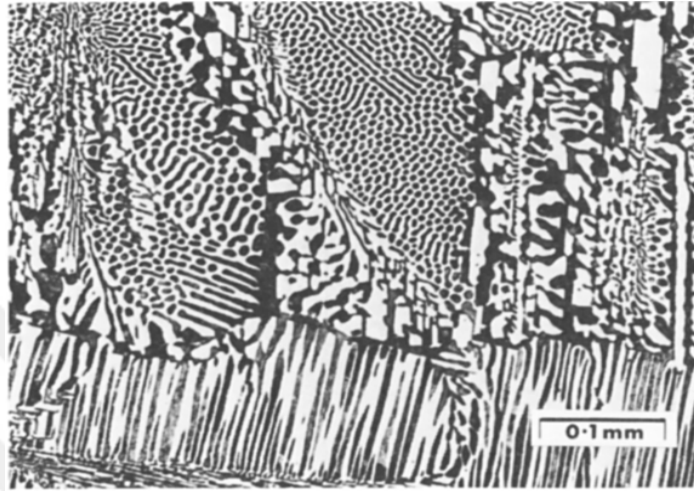
%2,14'ten fazla C içeren demir alaşımları dökme demir olarak tanımlansa da, ticari olarak dökme demirler bazı alaşım ilavelerinin yanı sıra yaklaşık %3,0-4,5 C içerir. Bu C muhtevasına sahip alaşımlar çeliklerden daha düşük sıcaklıklarda erimekte, yani döküm işlemine cevap vermektedir. Dolayısıyla döküm, bu alaşımlar için en çok kullanılan imalat tekniğidir. Dökme demirler, yapılarına bağlı olarak beş gruba ayrılabilir. Bunlar; beyaz dökme demir, temper dökme demir, gri dökme demir, KGDD ve kompakt grafitli dökme demirdir (Gouda, 2014).

#### **Beyaz dökme demir.**

Beyaz dökme demir, adını bir döküm kırıklarında gözlenen beyaz, kristalimsi çatlak yüzeyinden alır. Kırıldıktan sonra, karbür safsızlıkları nedeniyle çatlaklar doğrudan geçmektedir. Geliştirilmiş bir beyaz dökme demir formu soğutulmuş dökme demirdir (Seidu, 2013). Gri dökme demir erimiş halde ısıtıldığında, karbon demirde tamamen çözünür ve muhtemelen onunla kimyasal olarak birleşir. Bu erimiş metal hızlı bir şekilde soğutulursa, iki eleman birleşik halde kalır ve beyaz dökme demir oluşur. Bu tip demirdeki karbon %2,5 ila %4,5 arasında değer alır ve bileşik karbon olarak adlandırılır. Beyaz dökme demir çok sert ve kırılmandır, genellikle işlenmesi imkânsızdır ve gümüşü beyaz bir kırılmaya sahiptir (Maine Welding Company, 2019). Ergimiş bir dökme demirdeki karbonun çoğu, katılaşma üzerine grafit yerine Fe<sub>3</sub>C oluşturduğunda beyaz dökme demir oluşur. Dökülmemiş alaşımsız beyaz dökme demirin mikro yapısı, perlitik bir matriste büyük miktarda Fe<sub>3</sub>C içerir. Beyaz dökme



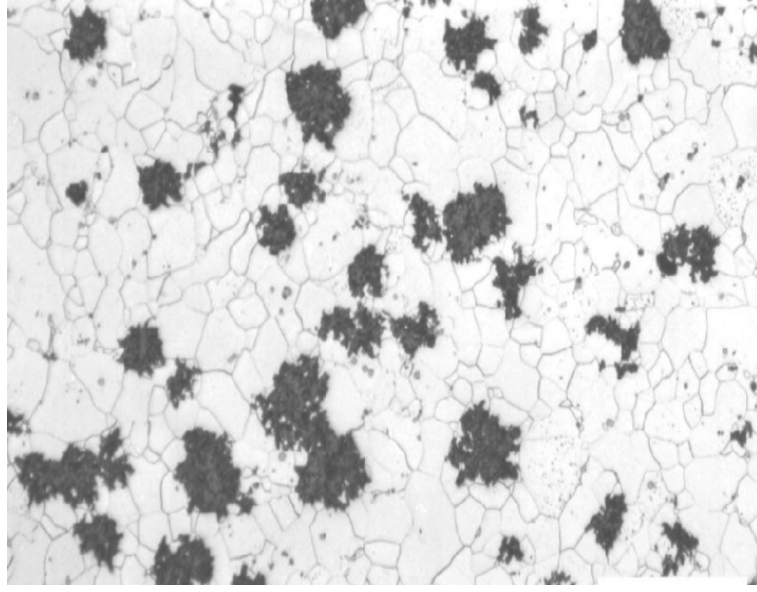
demirlerde karbonu  $Fe_3C$  formunda tutmak için C ve Si içerikleri nispeten düşük tutulmalı (yani, %2,5-3,0 C ve %0,5-1,5 Si) ve katılaşma oranı yüksek olmalıdır. Beyaz dökme demirler en çok aşınmaya karşı mükemmel direnç gösterdikleri için kullanılır. Yapılarındaki  $Fe_3C$ , esas olarak aşınma direncinden sorumludur. Beyaz dökme demir ayrıca dövülebilir dökme demirler için hammadde görevi görür (Hamdan, 2011). Beyaz dökme demirin mikro yapısı Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Beyaz dökme demirin mikro yapısı (Yalçın, 1999).

### **Temper dökme demir.**

Temper dökme demir beyaz dökme demirden uygun bir tavlama işlemi ile üretilir. Beyaz dökme demir, temel olarak az miktarda başka elementler içeren bir Fe, C ve Si alaşımıdır. C tamamen birleştirilmiştir, grafit yoktur ve yapı esas olarak büyük  $Fe_3C$  ve perlitten oluşur. Bu malzemeden temper dökme demir üretilirken, birleştirilmiş karbon tamamen parçalanır ve C, bir ferrit matrisinde grafit olarak çökeltilir. Grafit yavaş yavaş ve katı demirde yüksek sıcaklıkta serbest bırakıldığından, son derece ince bireysel parçacıklardan oluşan küresellerde toplanan karakteristik bir form alır. Bu karakteristik grafit temper karbon veya ikincil grafit denir. Şekil 3’de temper dökme demir yapısı gösterilmiştir (Morken, 1993). Temper dökme demirdeki C oranı % 2,0-2,6 ve Si oranı % 1,1-1,6 arasındadır. Tavlama işlemi sırasında C, matris boyunca yayılır ve mevcut Si veya B miktarına bağlı olarak, temper karbon küçük küreseller olarak toplanabilir (Brown, 1994).



Şekil 3. Temper dökme demirin mikro yapısı (Sağlam, 2009).

### **Gri dökme demir.**

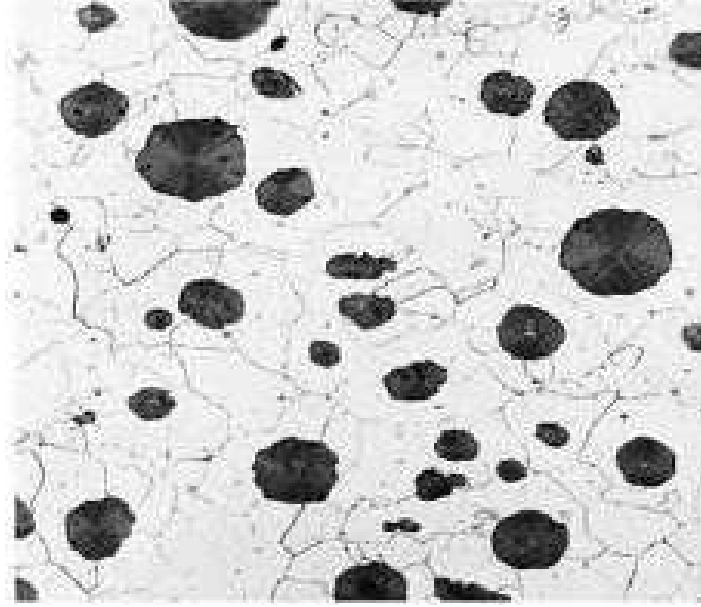
Gri dökme demirler, ötektik sıcaklıkta östenit ve katı çözelti içinde tutulabileceğinden daha fazla C'nin mevcut olduğu Fe, C ve Si alaşımlarıdır ve karbon grafit lamelleri olarak çökeler. Gri demir ana bileşenler olarak %1,7 ila %4,5 C ve %1 ila %3 Si içerir (Herring, 2004). Gri demirlerin metalik matrisi çelik olarak kabul edildiğinden, gri dökme demirler çeliğe uygulanan normal ısıt işlemlere uygundur. Bu sayede işlenebilirlik, sağlamlık, boyut stabilitesindeki iyileşme ve temperleme içeren ısıt işlemlerle elde edilir (Ghosh, 1994). Gri dökme demirler en fazla kullanım alanına sahip olan dökme demirlerdir. Katılaşma sonrasında bileşimindeki C'nin büyük bir kısmı serbest halde grafit lamelleri halinde bulunur. C miktarının artmasıyla birlikte malzemenin mukavemet ve sertlik değerlerinde artış görülür. En üstün özellikleri, titreşim sönümlene kabiliyeti, yüksek mukavemet ve ucuz olmalarıdır (Göteborg, 2011). Gri dökme demirin mikro yapısı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Gri dökme demirin mikro yapısı (Mozumder, 2015).

#### **Küresel grafitli dökme demir (KGDD).**

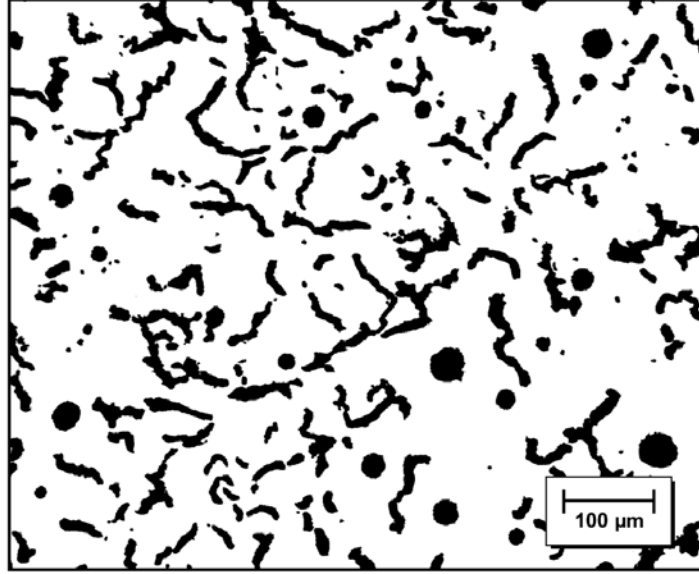
Nodüler dökme demir veya sfero dökme demir olarak da bilinen KGDD, yüksek mekanik dayanım, aşınma direnci ve dökülebilirlik kolaylığı gibi spesifik gereksinimlere aynı anda uyması gereken karmaşık şekilli yapı parçalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Gouveia *vd.*, 2017). Bu döküm, özel alaşım ilavesi ve uygun soğutma oranının benimsenmesiyle üretilir böylece C temper formunda C'nin kullanılmadığı alanlarda kullanılabilen küresel formlara dönüştürülebilir. Küreler katılma sırasında oluşur, ısıl işlem sırasında oluşmaz. Çeliklerle karşılaştırılabilecek mükemmel mekanik özelliklere sahiptir (Majhi, & Kumar, 2014). KGDD, yüksek süneklik, elastik modül, mekanik dayanım ve korozyon direncini gösteren bir mühendislik malzemesi olup düşük maliyetlidir ve üretilmesi ve işlenmesi kolaydır bu nedenle yapısal bir malzeme olarak yaygın şekilde kullanılır (Souzaa, Nogueirac, Francob, Aguilard, & Cetlina, 2014). KGDD'nin mikro yapısı Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. KGDD'nin mikro yapısı (Mozumder, 2015).

### **Kompakt grafitli dökme demir.**

Kompakt grafitli dökme demir, demir döküm tonajı üretimi sırasında tesadüfi bir keşiftir ve başlangıçta bozulmuş bir demir şekli olarak kabul edilmiş olup daha sonra, büyük ilgi görmüş ve kompakt grafitli dökme demir üretimi ilk önce Estes ve Scheidewind (1955) tarafından bulunmuştur. Farklı ülkelerde çeşitli yapım yöntemleri ve fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır (Sissener, Thury, Hummer, & Nechtelberger, 1972; Sofroni, Riposan, & Chira, 1974; Evans, Dawson, & Lalich, 1976; Lalich, & La Presta 1978) (Murthy, 1985). Kompakt grafitli dökme demir, lamel grafit ve KGDD arasında yer alan eşsiz ara mekanik ve fiziksel özellikleri ile karakterize edilir. Bu özellikleri, metal matris içindeki eşsiz grafit morfolojisine bağlanır. Kompakt grafitli dökme demir içindeki grafit partikülleri kısa, güdük, yuvarlak kenarlı ve ötektik hücrelerin içinde birbirine bağlı kümeler şeklindedir. Kompakt grafitli dökme demirin grafit şeklini tanımlamak için “vermiküler” terimi kullanılmıştır. (Muhammed, 2011). Kompakt grafitli dökme demirin mikro yapısı Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Kompakt grafitli dökme demirin mikro yapısı (Guessser, Schroeder, & Dawson, 2001).

Tablo 2’de dökme demirin ticari tanım, mikro yapısı ve kırılma görünümü ve nihai yapısına göre sınıflandırılması verilmiştir (ASM Handbook, 1990).

Tablo 2. Dökme Demirin Ticari Tanım, Mikro Yapısı ve Kırılma Görünümü ve Nihai Yapısına Göre Sınıflandırılması (ASM Handbook, 1990)

Ticari Tanımı	Karbonca Zengin Faz	Matris	Kırılma Görünümü	Nihai Yapı
Gri dökme demir	Lamel grafit	Perlit	Gri	Katılaşma
Sünek dökme Demir	Küresel grafit	Ferlit, Perlit, Östenit	Gümüş-Gri	Katılaşma veya ısıl işlem
Kompakt grafitli dökme demir	vermiküler grafit	Ferlit, Perlit	Gri	Katılaşma
Beyaz dökme demir	Fe <sub>3</sub> C (Sementit)	Perlit, Martensit	Beyaz	Katılaşma ve ısıl işlem
Benekli dökme demir	Lamel grafit+Sementit	Perlit	Benekli	Katılaşma
Dövülebilir Dökme Demir	Temper grafit	Ferlit, Perlit	Gümüş-Gri	Isıl işlem
Östenperlenmiş sünek dökme demir	Küresel grafit	Beynit	Gümüş-Gri	Isıl işlem

## Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD)

KGDD, döküm halde Ce veya Mg gibi çekirdekleştirici elementlerin sıvı demire eklenmesi yoluyla elde edilir ve genellikle ferritik tiptedir (Angus, 1976). KGDD, matris bir beyrit ve stabilize edilmiş östenitin bir kombinasyonudur. Bu tür bir dökme demir yapı elde etmek için östemperleme işlemi gereklidir. Burada grafit kompakt formda bulunur ve grafit şekli küçük alaşım eklemesi ile kontrol edilir. Östemperleme sünek demir çekme dayanımı, süneklik ve aşınma direnci gibi mükemmel mekanik özelliklere sahiptir (Bramfitt, & Ben Scoter, 2002). KGDD beş gruba ayrılabilir;

- ✓ Ferritik
- ✓ Perlitik
- ✓ Martensitik
- ✓ Östenitik
- ✓ Ferritik/Perlitik

KGDD'nin düşük akma dayanımı ve yüksek süneklığe sahip olması bazı uygulamalarda kullanılmasını zorlaştırır. Böylece, eğer bir miktar C kasıtlı olarak  $Fe_3C$  şeklinde bırakılırsa belirtilen özellikler artar. Bu tip bir KGDD, perlitik KGDD olarak adlandırılır. Eğer soğutma hızı çok yüksekse, o zaman matris martensite dönüştürülür. Dolayısıyla matris, yumuşak sünek bir ferritik yapıdan sert ve yüksek mukavemetli bir perlitik yapıya kadar değişebilir (Davidson, 2003). KGDD'lerin özelliklerinin kıvamını ve çeşitliliğini, döküm halindeki özelliklerinin ötesine genişletmek için, ısıl işlem gerekli bir işlemdir (Pullan, 2016). Gri dökme demir, dövülebilir dökme demir ve KGDD'lerin kimyasal bileşim aralıkları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. KGDD'lerin Kimyasal Bileşim Aralıkları (ASM Handbook,1990)

Kimyasal Bileşim (ağ.%)											
Tip	TC <sup>(a)</sup>	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	Ce	Mg
Gri Dökme Demir	3.25- 3.50	0.50- 0.90	1.80- 2.30	0.05- 0.45	0.05- 0.20	0.05- 0.10	0.15- 0.40	0.12 max	0.15 max	...	...
Dövülebilir Dökme Demir	2.45- 2.55	0.35- 0.55	1.40- 1.50	0.04- 0.07	0.05- 0.30	0.03- 0.10	0.03- 0.40	0.03 max	0.05- 0.07	...	...
Küresel Grafitli Dökme Demir	3.60- 3.80	0.15- 1.00	1.80- 2.80	0.03- 0.07	0.05- 0.20	0.01- 0.10	0.15- 1.00	0.03 max	0.002 max	0.005- 0.20 <sup>(b)</sup>	0.03- 0.06


(a) TC, Toplam karbon

(b) Tercihen

KGDD'lerin mühendislik özelliklerinin demir esaslı döküm malzemelerle kıyaslanması Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. KGDD'lerin Mühendislik Özelliklerinin Demir Esaslı Döküm Malzemelerle Kıyaslanması (Karaman, 2011)

Özellik	Küresel Grafitli Dökme Demir	Temper Dökme Demir	Gri Dökme Demir	Döküm Çelik	Beyaz Dökme Demir
Dökülebilirlik	iyi	orta	çok kötü	çok iyi	orta
Talaşlı İşlenebilirlik	orta	orta	çok kötü	çok iyi	çok iyi
Titreşim Sönümleme	orta	orta	çok kötü	çok iyi	çok iyi
Yüzey Sertleştirilme	çok kötü	çok kötü	çok kötü	çok iyi	çok iyi
Elastisite Modülü	çok kötü	orta	çok iyi	çok kötü	çok iyi
Darbe Dayanımı	orta	çok iyi	çok iyi	çok kötü	çok iyi
Korozyon	çok kötü	orta	çok kötü	çok iyi	orta
Mukavemet/Ağırlık	çok kötü	çok iyi	çok iyi	çok iyi	çok iyi
Aşınma Direnci	orta	çok iyi	çok iyi	çok iyi	çok kötü
Üretim Maliyeti	orta	çok iyi	çok kötü	çok iyi	orta

iyi  KÖTÜ

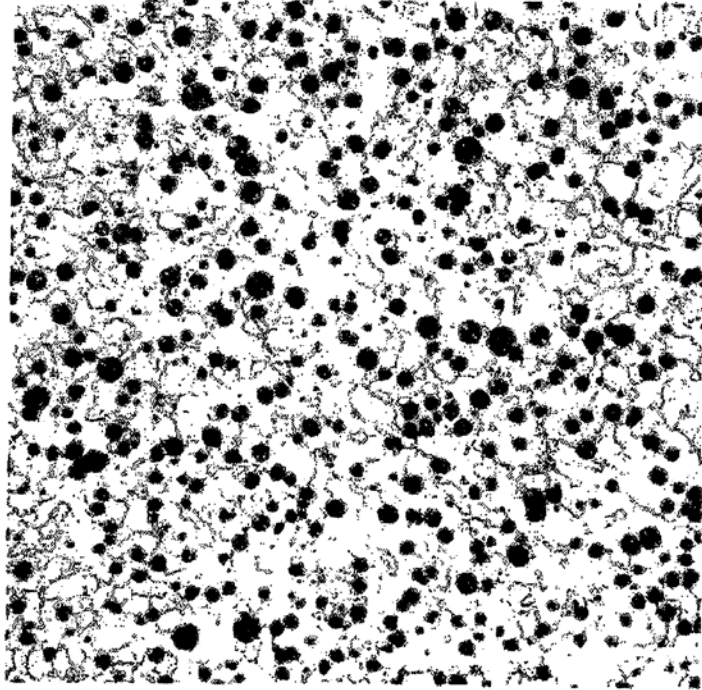


## **KGDD'lerin Mikro Yapısı**

Son yıllarda, küresel dökümlerinin mikro yapı analizine ilgi artmaktadır. Bu konudaki çalışmaların çoğu, katılaşma ve oda sıcaklığına soğutulma işlemlerinden sonra metalürjik muayeneye dayanmaktadır. Tipik ticari KGDD'nin mikro yapısı, grafit küre sayısı, küreselliği ve dökümde mevcut olan ferrit-perlit yüzdesidir. Mevcut geleneksel yöntemlerde, KGDD'nin mikroskobik görüntüsü metalürji uzmanı tarafından alınır, gözlemlenir ve manuel olarak analiz edilir (Godbole, & Jayashree, 2014).

### **Ferritik KGDD.**

Ferritik KGDD, küresel grafitler bir ferrit matrisinde mevcut olduğunda oluşur. Düşük C'li çeliğe eşdeğer bir verim ve akma dayanımı ile iyi süneklik ve darbe dayanımı olan bir demir oluşumunu sağlar. Döküm olarak üretilebilir ve demire maksimum süneklik ve düşük sıcaklık tokluğu sağlamak için tavlama ısıl işlem uygulanabilir (Kshemendranath, Patil, Bajaj, & Poddar, 2012). Ferritik KGDD'nin mikro yapısı Şekil 7'de verilmiştir.

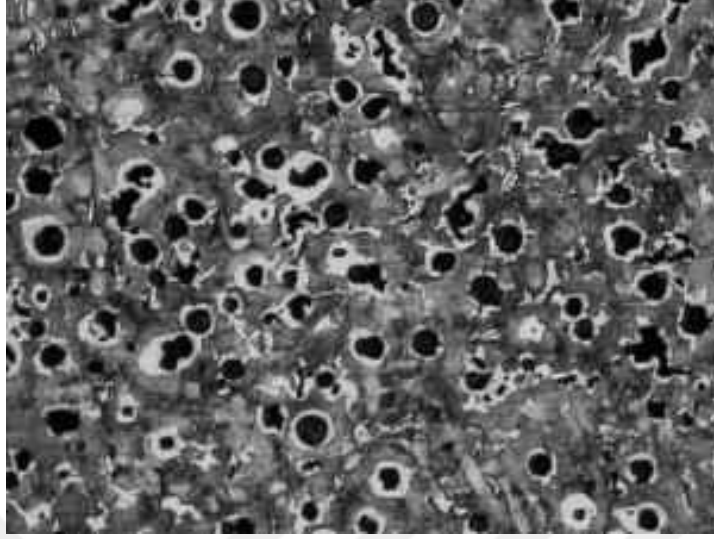


Şekil 7. Ferritik KGDD'nin mikro yapısı (Albayrak, 2001).

### **Perlitik KGDD.**

Kesit kalınlıkları 50 mm'ye kadar olan döküm parçalarında görülen bir yapıdır. Alaşım serttir ve mekanik özellikleri iyidir (MEB, 2011). Ferritik-perlitik KGDD'nin

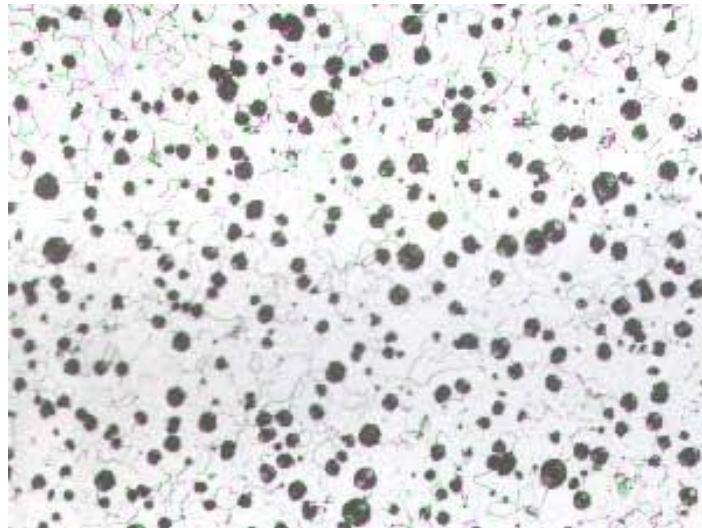
matrislerin oranı, kompozisyonun veya soğutma hızının ayarlanmasıyla kontrol edilebilir (Demirlek, 2013). Perlitik KGDD'nin mikro yapısı Şekil 8'de üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 8. Perlitik KGDD'nin mikro yapısı (Shama, 2017).

### **Östenitik KGDD.**

Östenitik KGDD %35 kadar Ni ihtiva eder ve küresel Ni-Resist adını alır. Korozyona mukavim olup yüksek mekanik mukavemeti mevcuttur. Grafitler bir miktar küresel şekillerini kaybederler. Matris östenit ve pek az da perlitden meydana gelmiştir (Uzunova, 1967). Östenitik KGDD'nin mikro yapısı Şekil 9 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 9. Östenitik KGDD'nin mikro yapısı (MEB, 2011).

### **Ferritik / perlitik KGDD.**

Bunlar en yaygın ve kaliteli küresel döküm çeşitidir ve normalde döküm durumunda üretilirler. Küresel grafitler hem ferrit hem de perlit içeren bir matristedir. Özellikler iyi işlenebilirlik ve düşük üretim maliyetleri ile ferritik ve perlitik kaliteler arasındadır. (Bisht, 2009).

### **Martensitik KGDD.**

Fe<sub>3</sub>C oluşumunu önlemek için yeterince alaşım ilave edilir ve bir söndürme temperli ısıtma işlemi ile küresel martensitik demir üretilir. Elde edilen temperli martensitik matrisi çok yüksek dayanım ve aşınma direnci geliştirir, ancak daha düşük süneklik ve tokluk seviyelerine sahiptir (Shama, 2017).

### **KGDD' nin Sınıflandırılması**

KGDD'ler çeşitli normlara göre sınıflandırılmaktadır. Ülkemizde en çok kullanılan norm olan TS 526'ya göre Tablo 5'de KGDD'lerin sınıflandırılması görülmektedir. Bu harflerin sonuna gelen rakamlar ise minimum çekme mukavemetini gösterir (Yavuz, 2006). KGDD Türkiye standartlarında DDK Alman standartlarında GGG ile gösterilir.

Tablo 5. KGDD'lerin Sınıflandırılması (TS 526) (Kayalı, 2006)

Kısa Gösterilişi	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Sertlik HB	Mikro yapısı
DDK 40	420	280	12	140-201	Daha çok Ferritik Ferrit+Perlit
DDK 50	500	350	7	170-241	Perlit+Ferrit
DDK 60	600	400	3	192-269	Daha çok Perlitik
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

Alman DIN 1693 standardına göre Tablo 6'da de KGDD'lerin sınıflandırılması görülmektedir.

Tablo 6. Alman DIN 1693 Standardına Göre KGDD'lerin Sınıflandırılması

Kısa Gösterilişi	Çekme Mukavemeti (MPa)	Akma Mukavemeti (MPa)	% Uzama	Sertlik HB	Mikro yapısı
GGG 40	400	250	15	120	Ferrit
GGG 50	500	320	7	156	Ferrit+Perlit
GGG 60	600	380	3	170	Perlit+Ferlit
GGG 70	700	440	3	302	Perlit
GGG 80	800	500	2	210	Perlit
GGG 35,3	350	220	22	-	-
GGG 40,3	400	250	18	-	-

### KGDD'lerin Kimyasal Bileşimi

KGDD imalatında, C, Mn, Si, P ve S gibi alaşım elementlerinin belirtilen miktarlarda tutulması gerekir. Mg, Ce ve diğer bazı elementlerle yapılan muamele grafit şeklini elde etmek ve Sb, Pb, Ti, Te, Bi ve Zr'den kaynaklanan olumsuz etkileri telafi etmek için kontrol edilmelidir. Bu elemanlar, küreselleşmeyi önler ve bu elemanların elimine edilmesi veya sınırlandırılması gerekir. KGDD'ler Ce ve nadir toprak elementleri ilavesiyle nötrleştirilebilirler. Cr, Ni, Mo, Cu, V ve B gibi alaşım elementleri karbür oluştururlar, perlit stabilizatörler veya ferrit geliştirici olarak görev yaparlar. Dayanımı ve sertleşebilirliği arttırmak için Ni, Mo veya Cu gibi az miktarda katkı maddesi eklenebilir. Korozyona, oksidasyona, aşınmaya veya yüksek sıcaklıktaki uygulamalarda direnci arttırmaya yönelik fazla miktarda Si, Cr, Ni veya Cu eklenebilir (Wännman, 2018).

#### Alaşım elementleri.

##### *Karbon.*

İstenen katılma şartlarının sağlanabilmesi için KGDD'lerin bileşiminde genellikle %3,6'dan daha az oranda bulunur. C oranının artması küresel grafitlerin hacim oranının artmasına neden olurken mekanik özellikleri olumsuz yönde etkiler (Akroy, 2007).

##### *Silisyum.*

Sünek demir matriksindeki Si, perlitik olandan ferritik matris sağlar. Si, ferritik matrisi stabilize ederek, oksidasyonu engelleyerek ve Si erişim yüzey tabakasını oluşturarak, sünek

demirin yüksek sıcaklıktaki performansını arttırmaktadır. Artan Si muhtevasının potansiyel olarak sakıncalı etkileri şunlardır:

- ✓ Azalan darbe testi enerjisi.
- ✓ Artırılmış darbe geçiş sıcaklığı.
- ✓ Azalan ısı iletkenliği.

Si, ferritin desteklenmesi ve ferritin güçlendirilmesi için kullanılır. Bu nedenle Si, ferritik kaliteler üretilirken genellikle %2,2'nin altında ve perlitik kaliteler üretilirken %2,5 ila %2,8 arasında tutulur (Ingole, 2012).

### ***Bakır.***

KGDD'lerde en yaygın kullanılan alaşım elementlerinden biridir. Cu, orta derecede bir grafitleştiricidir ve serbest ferriti desteklemeden soğutma eğilimini en aza indirmek için Si yerine kullanılabilir. Grafitin teşvik edici etkisi, kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıklar arasındaki aralığın bir artışının sonucudur. Cu, östenitte karbon difüzyonunu geciktirerek perlit oluşumunu teşvik eder. Mo ve/veya Ni ile kombine edildiğinde sertleşebilirliği artırır (Labrecque, & Gagne, 1998).

### ***Nikel.***

Darbe dayanımından etkilenmeden nihai çekme dayanımını arttırmaya yardımcı olur, bunun için metal bileşiminde uygun ve mükemmel mekanik özellikleri korumak için %0,5 ila %2,0 arasında eklenir. Ferritleri güçlendirir, sünekliği azaltmada Si'den çok daha az etkiye sahiptir. Ni malzemelere % 2'den fazla katılırsa gevrekleşme tehlikesi vardır (Kumar, 2015).

### ***Molibden.***

Yüksek görevli dökme demirlerin mekanik özelliklerini geliştirmek ve asiküler dökme demirler gibi özel bileşimler elde etmek için eklenir. Bu perlitin güçlü bir geliştiricisidir. Karbür/östenit ötektik oluşumunda tercih edilir. Kararlı karbür oluşturur ve yaklaşık %0,35 Si grafitleştirici etkisini öter. (Shama, 2017).

### ***Manganez.***

Mn, bir alaşım görevi görür, perlit rafine eder ve stabilize olur, böylece döküm numunesinde ferriti azaltır. Karbürü stabilize eder ve perlitin ferrite parçalanmasını önler ve ferritik yapıların üretimi için tavlama döngüsünü uzatır. Bu nedenle istenen maksimum Mn miktarı %0,5'tir, bununla birlikte tamamen perlitik kalitelerde biraz daha yüksek bir yüzdeye izin verilir. Çekme ve akma dayanımları özellikle tavllanmış numunelerde, dökme numune

olarak Mn içeriğindeki artışla artar. Normalize edilmiş örnekte Mn iyi miktarda sertleşebilirlik sağlar (Mahto, 2014).

### **Kalay.**

Perlit oluşumunu hızlandırır, fakat Fe<sub>3</sub>C oluşumuna etki etmez. Ferritik KGDD'lerde bulunmaması gerekir. KGDD'lerde perlitin miktarı; Mn, Cu ve Sn konsantrasyonunun artmasıyla artmaktadır. Sertlik, çekme dayanımı ve akma sınırı kalay miktarı ile artmaktadır. Uzama değeri Cu ve Sn miktarı ile azalmaktadır (Özdemir, 2007). Tablo 7'de KGDD'lerin alaşım elementlerinin etkileri gösterilmiştir.

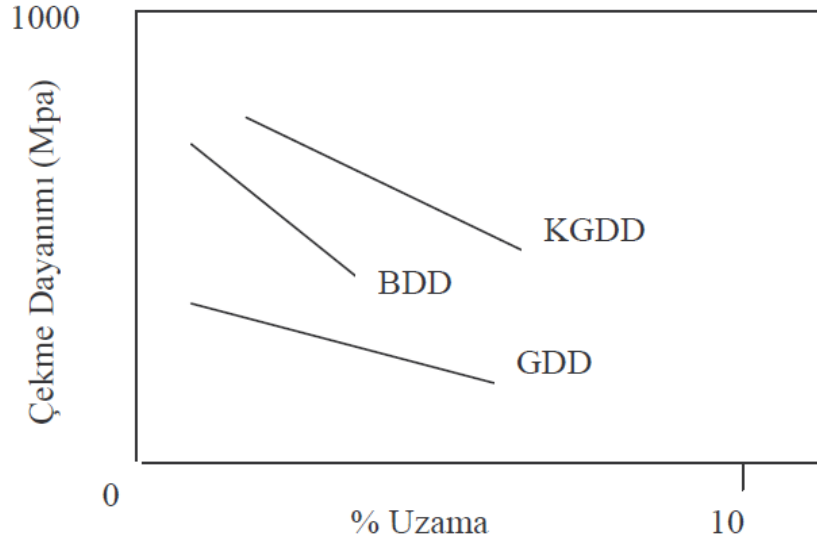
Tablo 7. *Alaşım Elementlerinin Etkileri (Labrecque ve Gagné, 1998)*

Alaşım Elementi	Max. önerilen oran	Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklığına etkisi	Ötektoid sıcaklığa etkisi	Matris yapısına etkisi	Sertleşebilirliğe etkisi	Grafit yapısına etkisi
Cu	Ferritik yapılarda %0.03 ve perlitik yapılarda %1	Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıklar arasındaki farkı artırır.	Ötektoid sıcaklığı düşürür (östenit stabilizatörü)	Karbon difüzyonunu geciktirerek perlit oluşumuna teşvik eder. Perlitin dengelenmesi	Sertleşebilirliği artırır ancak Mo'dan daha az etkilidir	Ti veya Pb ile birlikte kullanıldığında hücreler arası lamel grafit oluşumunu teşvik eder.
Ni	Ferritik yapılarda %0.1 ve perlitik yapılarda %0.25	Kararlı ve yarı kararlı ötektik sıcaklıklar arasındaki farkı artırır.	Ötektoid sıcaklığı düşürür (östenit stabilizatörü)	Zayıf perlit oluşumuna teşvik eder.	Sertleşebilirliği artırır ancak Cu'dan daha az etkilidir	Çil Oluşum eğilimini azaltır, gelişmemiş grafit oluşumunu teşvik eder.
Mo	Ferritik yapılarda %0.02 ve perlitik yapılarda çok düşük oranda	Ötektik sıcaklıkları düşürür.	ötektoid sıcaklığını artırır (ferrit stabilizatörü)	Döküm halinde perlitli oluşturma eğilimi Cu ve Sn'den daha azdır.	Perlit oluşumunu geciktirerek daha etkili eleman olan sertleşebilirliği artırır.	Hücreler arası karbür oluşturma eğilimindedir.
Mn	Ferritik yapılarda %0.15 ve perlitik yapılarda %0.35	Ötektik sıcaklıkları düşürür.	Ötektoid sıcaklığı düşürür (östenit stabilizatörü)	Perlit oluşturmada Ni'den 5 kat daha etkilidir.	Sertleşebilirliği yükseltir, perlit oluşumunu düşük sıcaklığa çeker.	İnce kesitlerde segregasyon olduğunda hücreler arası karburağı oluşturma eğilimindedir.

## **KGDD'nin Mekanik Özellikleri**

Günümüzde, farklı kritik uygulamalar için çeşitli yeni ve ileri tip malzemeler kullanılmaktadır ancak yine de KGDD'ler, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve düşük üretim maliyeti nedeniyle tasarım mühendisleri için tercih edilen malzemelerdir. KGDD'ler akışkanlık eğilimi ve istenen özelliklere sahip, nispeten düşük maliyetle, karmaşık şekillerin dökülmesini kolaylaştırma bileşimi ve soğutma hızı üzerinde dikkatli bir kontrolle elde edilebilir. KGDD'ler benzersiz özellikleri nedeniyle bir güven kaynağıdır. İyi dökülebilirlik, sönümlenme kapasitesi gibi mekanik özelliklere sahiptir. Bu avantajları sayesinde KGDD'ler farklı sektörlerde; otomobil endüstrisi, tarım ekipmanları, rüzgâr değirmeni parçaları, boru endüstrisi, direksiyon mafsalları, hipoid arka aks dişlileri, eksantrik milleri, krank milleri ve disk gibi önemli malzemelerin yapımında kullanılmıştır (Ghonamy, 2010). KGDD'i güvenle kullanmak için mekanik özellikleri tanımlayan mühendislik verilerine erişebilmek gerekir. Elastik davranış, dayanıklılık, süneklik, sertlik, kırılma tokluğu ve yorulma özellikleri, termal genleşme, termal iletkenlik, özgül ısı, elektriksel iletkenlik, yoğunluk ve manyetik ve elektriksel özellikler gibi fiziksel özellikler de birçok uygulamada ilgi çekmektedir (Rashidi, 2000).

Korozif ortamlarda korozyona karşı direnci gri dökme demirinkine eşit ve karbon çeliğinkinden daha iyidir. Ani sıcaklık değişimlerine karşı KGDD'lerin gösterdiği direnç çoğu çelik ve gri dökme demirden daha fazladır (Yalçın, 1999). KGDD'ler, beyaz dökme demir ve gri dökme demir malzemelerle karşılaştırıldığında bunlara göre çok daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu görülür. Bu üstün özelliklerin elde edilebilmesi için KGDD'lere ilave edilen alaşım elementlerinin tür ve miktarı;  $Fe_3C$  oluşumu, grafit küreselleşmesi ve dağılımı ile matris yapı türünü etkilediği için büyük önem taşır (Hasırcı, 2000). KGDD'nin diğer dökme demirlerle karşılaştırılması Şekil 10'da gösterilmiştir.



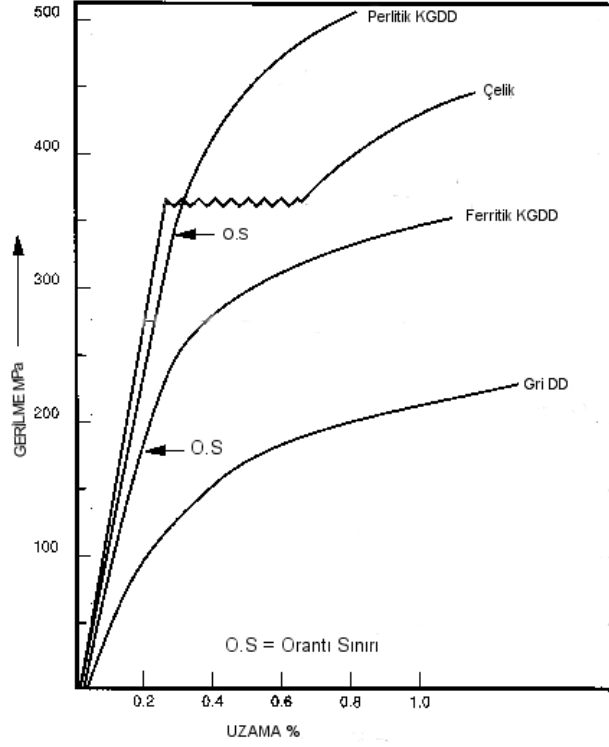
Şekil 10. KGDD'nin diğer dökme demirlerle karşılaştırılması (Hasırcı, 2000).

### Çekme özellikleri

KGDD'nin çekme özellikleri, özellikle verim, çekme dayanımları ve uzama, geleneksel olarak mekanik davranışın en yaygın şekilde alıntılanan ve uygulanan belirleyicileri olmuştur. Dünya çapında KGDD spesifikasyonlarının çoğu, esasen kendi verimleri, çekme dayanımları ve uzamaları ile farklı küresel döküm sınıflarının özelliklerini tarif eder. Genellikle ek bilgi olarak sunulan sertlik değerleri ve sadece belirli ferritik kaliteler için belirlenen darbe özellikleri çoğu şartnameyi zorunlu kılar (ductile.org, 2019).

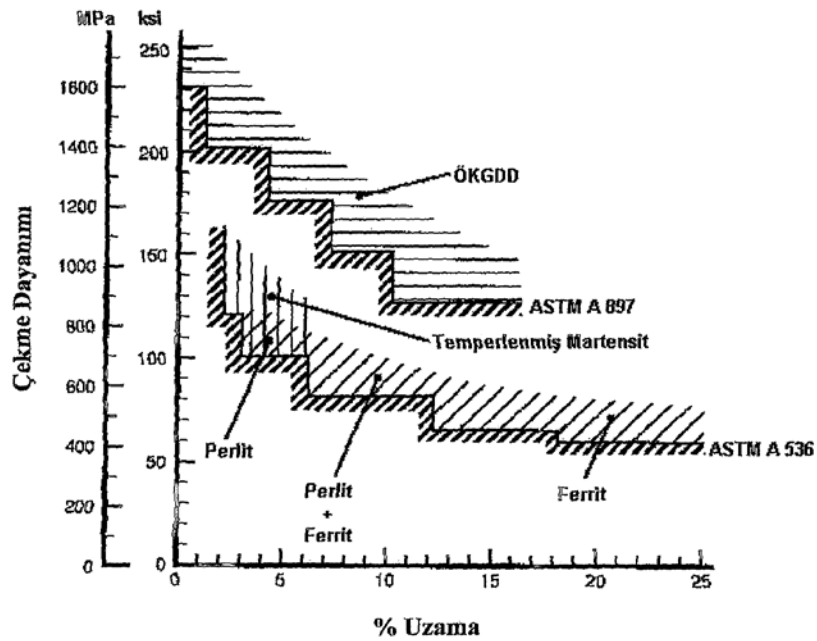
KGDD'nin mekanik özellikleri genellikle alaşımlandırmaya bağlıdır. Cu veya Ni ilavesi ile çekme dayanımı, tokluk ve sertliği rahatlıkla artırılabilir. Diğer farklı elementlerin ilavesiyle korozyon ve oksitlenme direnci artırılabilen KGDD'ler gerilim giderme dışında başka ısı işlemler de uygulanabilen tek dökme demir çeşididir. 120ksi den 230ksi ye varan geniş bir çekme dayanımı yelpazesine sahiptir (Arda, 2010). Şekil 11'de farklı sınıflarda KGDD, gri dökme demir ve çeliğin akma mukavemetini gösteren gerilme şekil değiştirme eğrisi verilmiştir.





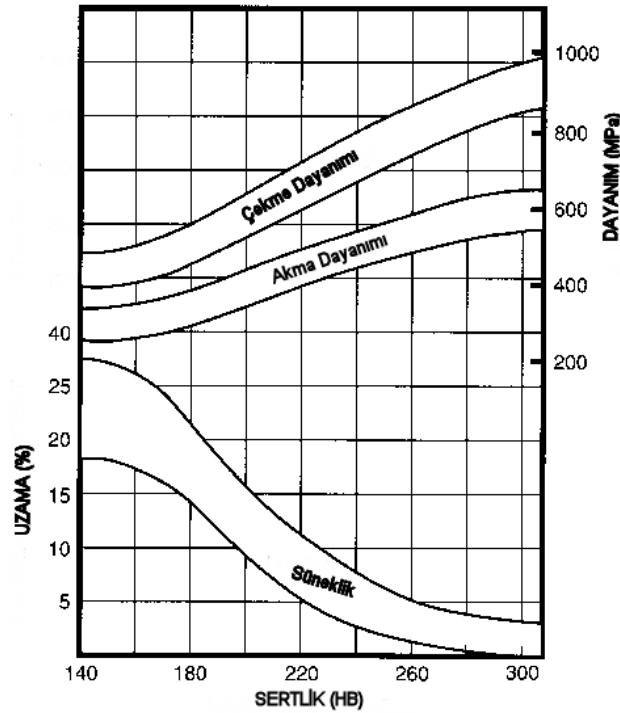
Şekil 11. Farklı sınıflarda KGDD, gri dökme demir ve çeliğin akma mukavemetini gösteren gerilme şekil değiştirme eğrisi (Demirlek, 2013).

Diğer mühendislik malzemelerinde olduğu gibi çekme dayanımı arttıkça süneklik azalmaktadır (Şekil 12). Alaşım elementlerinin içeriğine bağlı olarak perlit miktarı arttıkça çekme dayanımı % uzama azalmaktadır. En yüksek % uzamayı dökülmüş koşullardaki ferritik matrisli KGDD'ler sergiler (Kılıçlı, 2004).



Şekil 12. KGDD'lerde çekme dayanımı % uzama ilişkisi (Kılıçlı, 2004).

Çekme mukavemeti veya nihai çekme mukavemeti, bir malzemenin kırılmadan önce dayanabileceği maksimum gerilimdir. Çekme deneyi sırasında uygulanan maksimum yük, numunenin orijinal kesit alanı ile bölünerek hesaplanır. Küresel dökümler için çekme dayanımları, genellikle ferritik kaliteler için 414 MPa ile martensitik kaliteler için 1380 MPa arasındadır. Şekil 13’de çekme özellikleri ve KGDD’lerin sertliği arasındaki genel ilişkiyi göstermektedir. Belirtilmemiş olmasına rağmen, elastisite modülü ve orantılı limit ayrıca hayati tasarım kriterleridir. Gerilimde ölçülen sünek demirler için esneklik modülü 162-170GPa arasında değişmektedir (Swain, 2015).



Şekil 13. KGDD’lerde sertlik ve dayanım arasındaki ilişki (Kırcalı, 2006).

## Aşılama

Aşılama, aşırı soğutmayı en aza indirerek ve KGDD, grafit küresellerinin büyümesi için mevcut olan çekirdeklenme bölgelerinin sayısını artırarak dökme demirin mikro yapısını ve özelliklerini kontrol etmenin bir yoludur. Dökme demir yapısının homojenliğini arttırdığı için, aşılama işlemi çok önemlidir, karbürlerin ince parçalara veya göze çarpan açılar halinde oluşumunu ortadan kaldırmaya yardımcı olur (Seidu, & Rıpoşan, 2011). Bazı değişkenler aşılamanın etkinliğini etkiler; şarj materyalleri, ergiyik sıcaklığı, aşılama modu, zaman, döküm metodu, kesit büyüklüğü, aşılama modu ve diğerleri (Bockus, & Dobrovolskis, 2006). Aşılama ise dökümden hemen önce sıvı demire, bir sonraki katılaşma sırasında grafitin çekirdeklenmesi için uygun bir faz sağlayacak olan bir malzemedir. Geleneksel olarak,

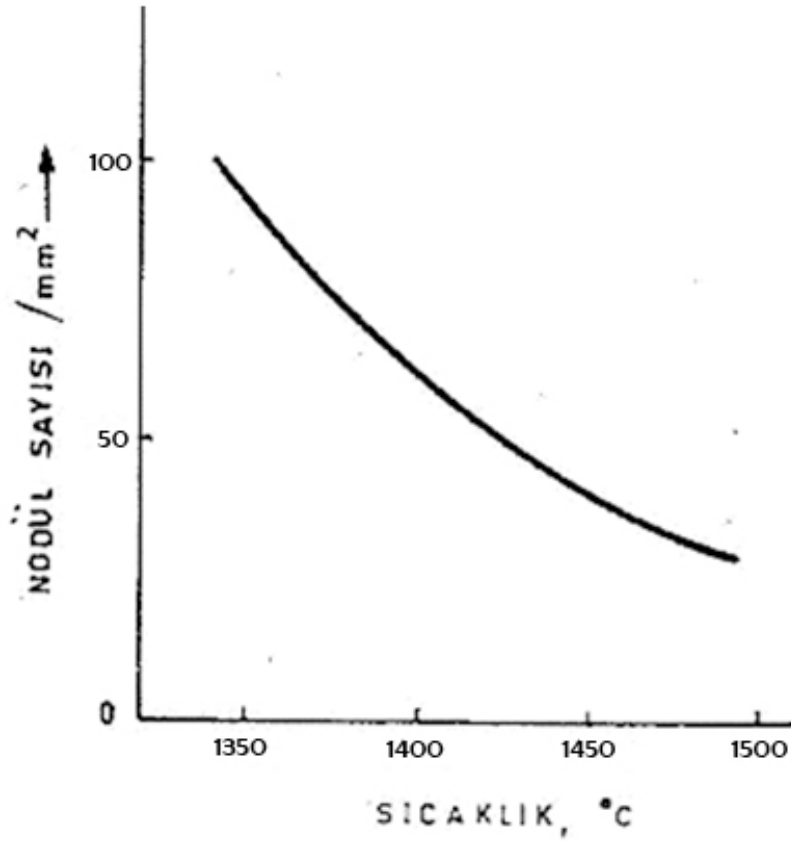
aşılama işlemi grafit, ferrosilisyum veya Ca-Si bazlı olmuştur. Günümüzde en popüler aşılama, Al, Ba, Ca, Sr ve Zr gibi az miktarda element içeren ferrosilisyumdur. Aşılama işlemi, döküm işlemine bağlı olarak çeşitli boyutlarda bulunabilir. Aslında, aşılama ilavesi fırın içinde, potada, akışta veya kalıpta yapılabilir. Ek olarak aşılama, demirin mekanik özelliklerini (mukavemet ve süneklik) geliştirir (Koch, & Soulas, 2014). Demir katılma mekanizması, aşılama yetersiz olduğunda soğutulmuş demir yapılar oluşturmaya eğilimlidir ve bu durum istenmeyen bir olaydır. Soğutulmuş yapıların istenmemesinin birkaç nedeni vardır. Soğutulmuş yapılar işlemeye direnç gösterir, ek ısı işlemlerine ihtiyaç duyar, şartlara uymamaya neden olur ve genel olarak toplam üretim maliyetini artırır (Skjegstad, & Skaland, 1996). Aşılama, stabil sistem Fe-C göre katılma teşvik etmektedir. Bu, Fe<sub>3</sub>C oluştuğu metatit ötektik sıcaklığın altında aşırı soğutmanın önlenmesi ile yapılır. Gri dökme demir ve KGDD'nin aşılama, aşılama olarak bilinen az miktarda malzemenin eklenmesiyle gerçekleştirilir (Koch, & Soulas, 2014). Bazı aşılama alaşımları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Bazı Aşılama İlaçlarının Nominal Kimyasal Bileşimleri (%) (Karadeniz, 2017)

No	Si	Ca	Al	Ba	Mn	Mg	NANO3	Fe
1	75	15	1	-	-	-	-	Kalan
2	63	20	1	5	10	-	-	Kalan
3	63	10	0,75	1	-	-	-	Kalan
1-4	50	0,75	1	-	-	1,25	-	Kalan
1-5	61	0,50	-	-	-	1,25	10	Kalan

Aşılama işleminde dikkat edilecek hususların başında aşılama maddesinin tamamen kuru olması gereği gelir, aksi halde döküm yüzeyinde karıncalanma hatasına neden olabilir. Aşılama maddesinin boyutu hızlı ergiyecek kadar küçük ve hemen okside olmayacak ve ani patlama göstermeyecek kadar büyük olmalıdır. Sıvı metal, aşılama esnasında cüruftan tamamen arınmış olmalıdır. Bir genelleme olarak iyi bir sonuç almak için mümkün olduğu kadar geç aşılama gerekir çünkü aşılama sonrası geçen zamanla aşılamanın etkisi kaybolduğu gibi, bu zaman ısı kaybına da yol açmaktadır. Düşen ısı grafit küre sayısını da azaltacaktır. Ayrıca aşılama sıcaklığı ne kadar yüksek ise aşılama verimi de o kadar düşük

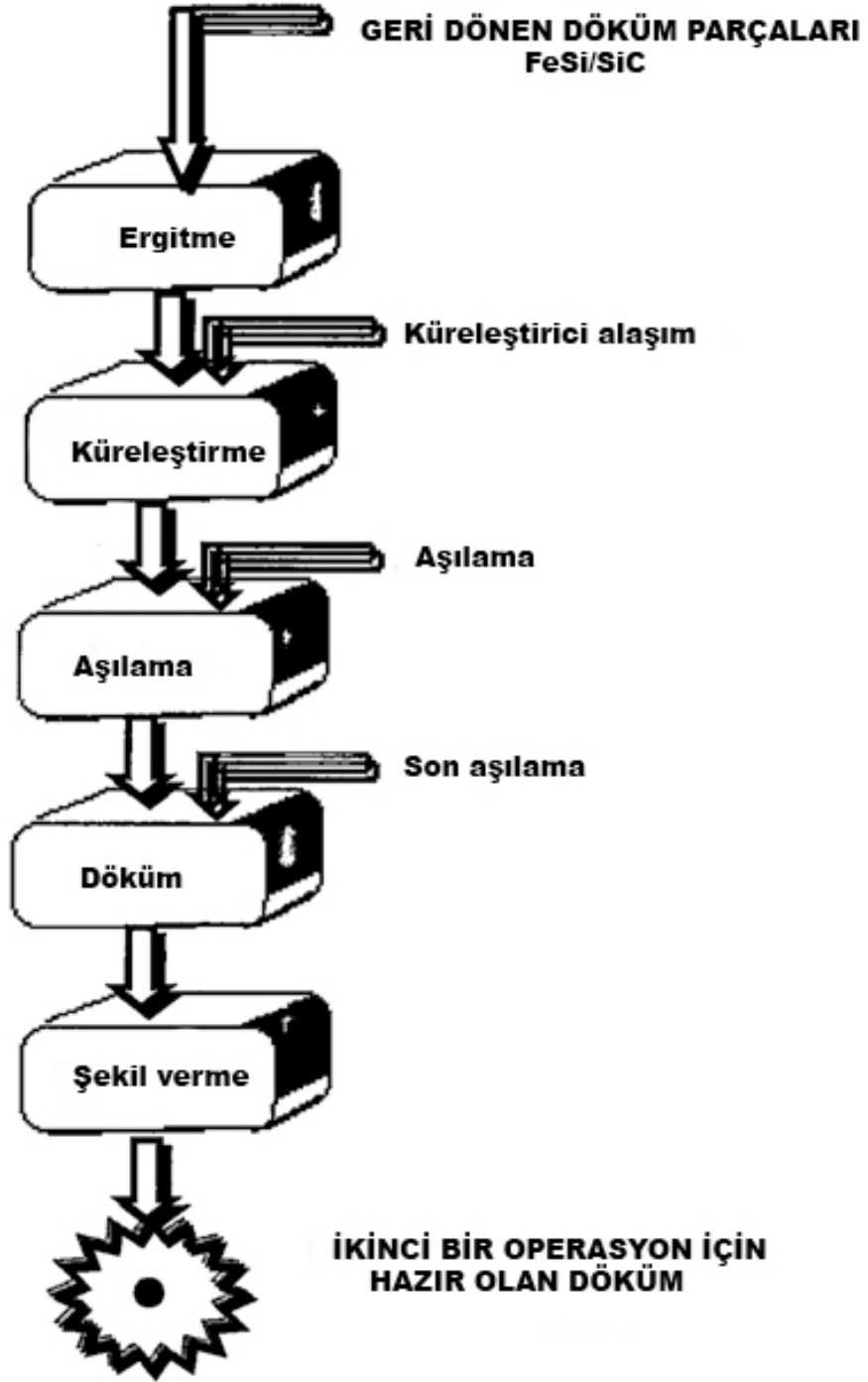
olur (Şekil 14). Dolayısıyla aşılamanın mümkün olan en düşük sıcaklıkta ve en son anda yapılması en uygun sonucu verecektir (Öztürk, 2013).



Şekil 14. Aşılama üzerine sıcaklığın etkisi (Öztürk, 2013).

Şekil 15'de aşılamanın üretim akım şeması verilmiştir. Şekil 15'e göre, aşılamanın her aşamasında titizlik gösterilmesi eksik döküm, porozite vb. döküm hatalarının oluşumunu engellemek için gereklidir. Özellikle küreselleştirme ve aşılama pratiğinde özel titizlik gösterilmesi grafit partiküllerinin kürecik kristallenmesinin kontrolü önemlidir. Yüksek kalitede KGDD elde edilmesi için bu aşama iyi bir şekilde kontrol edilmelidir (Çetin, 2005).

## YÜKSEK SAFLIKTA DEMİR ÇELİK HURDASI



Şekil 15. KGDD üretimi (Çetin, 2005).

### Akıcılık

Akışkanlık, döküm terminolojisinde, belirli bir sıcaklıkta döküm yapıldığında bir metalin katılaşma ile durdurulmadan önce belirli bir test kalıbında akacağı mesafedir. Bu nedenle akışkanlık, genellikle milimetre veya metre cinsinden ölçülen bir uzunluktur. Genel

olarak akışkanlık, bir spiral kalıpta ölçülmüştür. Bunun arkasındaki mantık, akışkanlık testini mümkün olduğu kadar küçük bir kalıba sıkıştırmak ve akış mesafesinin tesviye hatalarına karşı hassas olması ve bunların sıvının spiral yolu ile en aza indirgenmesidir (Campbell, & Harding, 1994).

Akışkanlık, metalurjik ve kalıp/döküm değişkenlerine ayrılabilen birçok faktörden etkilenir. Metalurjik faktörler; bileşim, aşırı ısınma, gizli ısı, oksit filmi, ergiyik yüzey gerilimi ve katılma şeklidir. Kalıp/döküm faktörleri; ara yüzde ısı transfer katsayısı, kalıp sıcaklığı ve kalıp iletkenliğidir (Sabatino, & Arnberg, 2013).

Metalin akıcılığı, ergime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda artmakla birlikte, sıcaklığın aşırı artışı birçok olumsuz etkiler oluşturabilmektedir. Katılan alaşım elementlerinin değişik reaksiyonlarla sıvıdan uzaklaşması, kalıbın deformasyonu, tane büyümesi gibi etkiler görülebilmektedir. Bunun için bir optimum sıcaklığın tespiti gerekir. Ergime sıcaklığının 100-150°C üzerindeki bir sıcaklıkta döküm yapılmalıdır. Bileşimin akıcılığa etkisi ise farklı olmaktadır. Örneğin dökme demirlerde CE'yi artıran elementlerin katılması akıcılığı olumlu yönde etkilemektedir (Aslandoğan, 2009).

Akışkanlık, ergimiş bir metalin çözülmeden önce ne kadar mesafeye akabileceğini belirtmek için kullanılır. Akışkanlık alaşımları dökmek için önemli bir özelliği ifade eder (Vignesh, Gandhi, Vignesh, & Rajarajan, 2016). KGDD ve gri dökme demirin akışkanlığı, dökme demirin sıvı halde dolum ve döküm kapasitesidir; bu, esasen alaşım özellikleri, döküm işlemi özellikleri, döküm koşulları ve döküm yapısı vb. ile ilgilidir. Dökme demir aynı şartlar altında test edilmeli ve karşılaştırılmalıdır. Spiral numune, u şekilli numune, çubuk şekilli numune ve küresel örnek olmak üzere dökme demirin akışkanlığını belirlemek için birçok yöntem vardır. Bu yöntemler döküm malzemelerine göre: kum ve metal kalıp ile spiral numune yöntemleridir. Spiral numune yöntemi üretim koşullarına yakındır, kullanımı kolaydır ve ölçülen değer açıktır. Yaygın olarak kullanılır (LianJiang Metals Company, 2019).

#### **Akıcılığı etkileyen faktörler.**

Çok sayıda değişken döküm akışkanlığını etkiler. Akışkanlığı etkileyen metal özellikler; viskozite, yüzey gerilimi, yüzey oksit filminin karakteri, kalıntı içeriği, özel alaşımın katılacağı şekil, aşırı ısınma, bileşim, özgül ağırlık ve ergime noktasıdır (Saxena, & Sharma, 2017).

### ***Viskozite.***

Akış özelliklerini belirleyen bir sıvı metalin fiziksel bir özelliğinin viskozite katsayısı, sıcaklık, safsızlıkların varlığı, inklüzyonlar ve ergiyiğın bileşiminden etkilenir. Viskozite ne kadar yüksek olursa, sıvı metalin akışkanlığı o kadar düşük olacaktır.

### ***Yüzey gerilimi.***

Kalıp-metal ara yüzüne etkileyen yüzey gerilimi, sıvı metalin kalıp yüzeyi ıslatma özelliklerini etkiler. Metal kalıbı ıslatmazsa, kalıp kanalları boyunca akışı sırasında daha fazla kesirli kuvvet yaşayacak ve böylece metalin akıcılığı azalacaktır.

### ***Aşırı ısınma.***

Sıvı metalin sıvı sıcaklığının üstünde ısıtıldığı sıcaklıktır. Aşırı ısınma, metalin akışkanlığını çeşitli şekillerde etkiler. Aşırı ısınmanın artmasıyla viskozite azalır ve dolayısıyla akışkanlık artar. Daha yüksek bir aşırı ısıtma sıvı ömrünü arttırır. Sonuç olarak, metal daha uzun bir süre boyunca akabilir.

### ***Katılma mekanizması.***

Saf metaller ve katılma aralığı alaşımı, sıvı metalin akışını etkilemeden bir katman şeklinde katılır. Öte yandan, geniş katılma aralığına sahip alaşımlar, hamur kıvamı biçimde katılmakta ve bu durum sıvı akışını engellemektedir (akış, sıvıdaki serbest kristallerin varlığı tarafından test edildiği için).

### ***Oksit film ve metalik olmayan içeriğın oluşumu.***

Oksit oluşumu, yüzey gerilimini etkiler ve sıvı metalin kalıp erime kabiliyetini azaltır. Bu nedenle akışkanlık azalır. Benzer şekilde dökülme sırasında eritici içine asılan metalik olmayan bir kaplamanın oluşumu akarken sıvı metalin üzerine sürüklenir ve böylece akışkanlığı azalır.

### ***Özgül ağırlık.***

Bir sıvı metalin özgül ağırlığı daha fazlaysa, uygulanan metalostatik basınç da daha fazla olacaktır. Bu durum kalıbı çevreleyen sıvı metalin hızını ve metalin akışkanlığını arttırır.

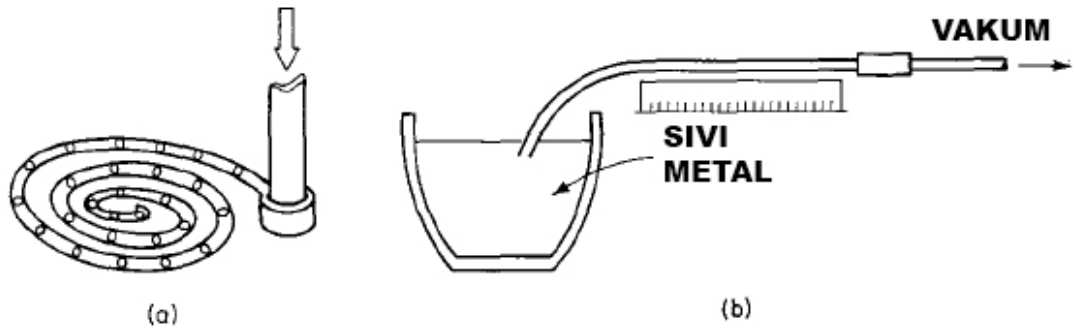
### ***Ergime noktası (veya alaşım katılma sıcaklığı).***

Metalin ergime sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, metal ile kalıp arasında o kadar daha yoğun bir ısı değişimi gerçekleşir ve böylece birim zaman başına düşen ısı artar. Bu durum

metalın sıvı kalması ve akması için gereken süreyi kısaltmakta ve dolayısıyla metalin akışkanlığı azalmaktadır. Benzer şekilde, alaşımın katılma sıcaklığının yüksek olması akışkanlığı da düşürecektir.

### Akıcılık testleri.

Akışkanlığı ölçmek için en çok kullanılan testler vakum akışkanlık testi ve spiral testidir. İlk yöntem, bir vakum pompası kullanarak bir potadan emildiğinde metalin dar bir kanal içinde aktığı uzunluğu ölçer. İkinci yöntem, metalin spiral şekilli bir kalıp içinde aktığı uzunluğu ölçer. Bu testler, Şekil 16'da şematik olarak gösterilmiştir (Sabatino, & Arnberg, 2013).



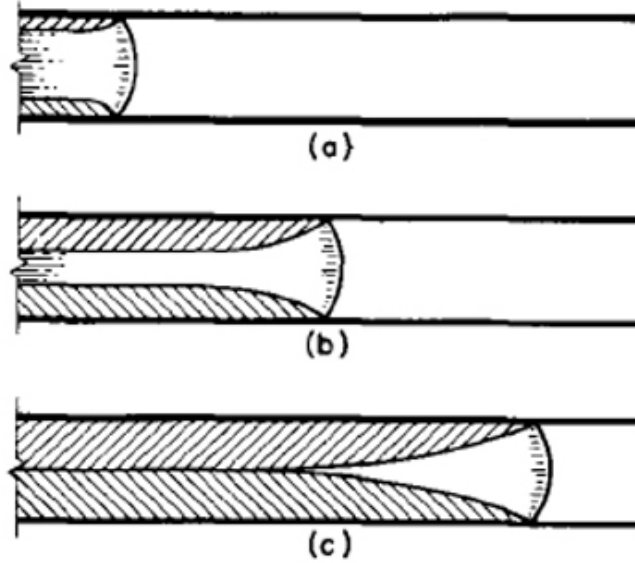
Şekil 16. a) Akıcılık spirali b) Vakum akıcılık (Flemings, 1974).

Her metalin ve alaşımın belirli bir kalıp doldurma sıcaklığı vardır. Sıvı metal düşük sıcaklıklarda kalıp içerisine boşaltılırsa nispeten çabuk katılaşıp ve ince kesitleri doldurmaz. Eğer metal çok aşırı ısıtılmışsa, yolluk sistemindeki ve kalıp boşluğundaki kum, çok pürüzlü çıkar. Kalıp doldurma sıcaklığının özenle belirlenmesi gerekir. Fakat sağlam bir döküm elde etmek için sadece döküm sıcaklığının iyi tespit edilmesi, yolluk sisteminin ve besleyici boyutlarının doğru hesaplanması yetmez. Katılma sırasında oluşan sıcak çatlaklar, kalıcı gerilmeler veya talaş kaldırma esnasındaki distorsiyonlar gibi problemlerle de karşılaşılabilir (Aslandoğan, 2009).

Akıcılık deneyi, ergime noktasında dökülen saf bir metalin akışı ve katılma aşamaları verilmiştir. Metal kanala girdiği anda kanal girişinde katılma başlar. Metal kanalda ilerledikçe, bu bölgelerde de katılma başlar. Ancak, katılma ilk olarak kanal girişinde başladığı için, akışın kesildiği yer burasıdır. Metalin durmadan aktığı mesafe toplam



uzunluk akıcılığını verir. Şekil 17’de saf bir metalin bir akışkanlık kanalında akış ve katılaşması gösterilmektedir (Flemings, 1974).



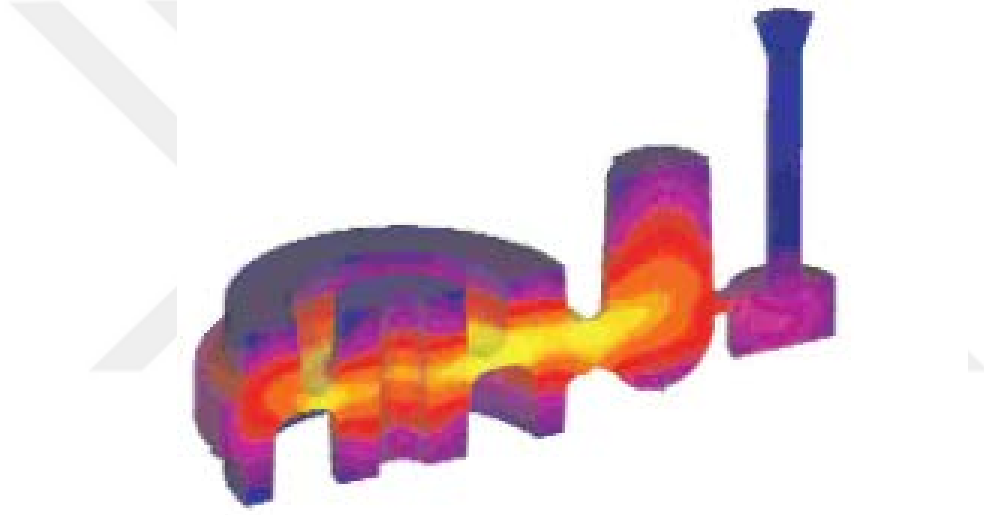
Şekil 17. Aşırı ısısız saf bir metalin bir akışkanlık kanalında akış ve katılaşması (a) akışın başlaması (b) Akış sırasında; (c) Akışın sonu (Flemings, 1974).

### Döküm Simülasyonları

Döküm simülasyonları döküm hatalarını tahmin etmek ve bu problemleri gerçek dökümleri henüz yapmadan tasarım aşamasında çözmek amacı ile dökümhaneler tarafından 1990’ların başından itibaren kullanılmaya başlamış bir teknolojidir. Özellikle ülkemizde döküm sektörü bu teknolojinin getirdiği yararları henüz yeni anlamaya başlamış ve simülasyon teknolojisi kullanan dökümhane sayısı son yıllarda hızla artmaya başlamıştır (Kayıkcı, & Nergiz, 2010).

Döküm simülasyonu, en kısa sürede mükemmel döküm yapılmasını sağlayan döküm işleminin çok kritik bir yönüdür. Döküm simülasyon tekniğinin, çok çeşitli dökme metaller ve karmaşık prosesler için çok etkili ve güvenilir olduğu kanıtlanmıştır ancak yüksek maliyeti pratik uygulamayı çok zorlaştırmaktadır. Tipik olarak simülasyon işlemi, kalıp doldurma, tane yapısı, gerilme analizi, bozulma ve katılaşma gibi işlemlerden oluşur. Şekil 18’de döküm simülasyon program tasarım örneği verilmiştir. Aynı zamanda çekirdek, ayırma, kalıp yerleşimi, besleyiciler vs. gibi ürün ve alet ekipman modellerinin yanı sıra kalıp ve parça malzemelerinin sıcaklık ayarlı özellikleri ve son olarak da dökülme hızı, sıcaklık vb. gibi işlem parametrelerini dikkate alır. Bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar, sert noktalar, üfleme delikleri, soğuk kapanmalar, çekinti gözenekliliği, çatlaklar ve bozulma gibi döküm kusurlarını öngörmede uygulanmaktadır (TheMetalCasting.com, 2019).

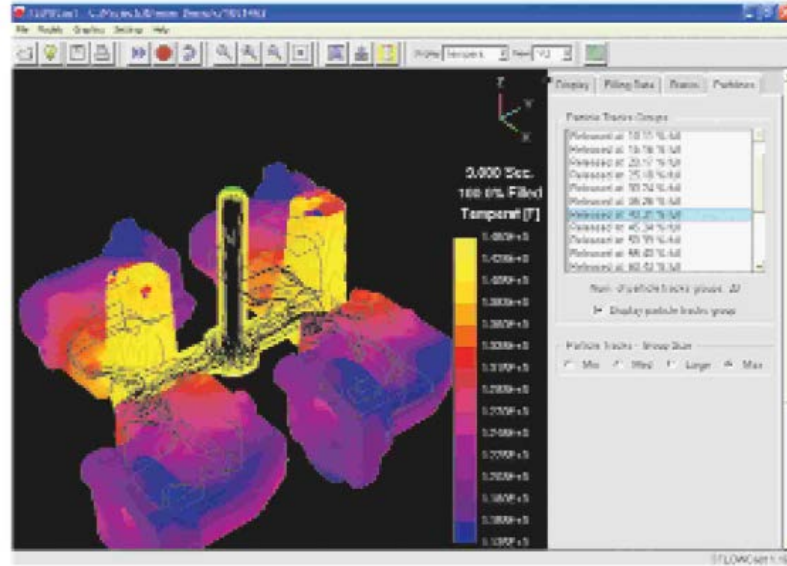
Döküm simülasyon programları kullanarak 3 boyutlu katı model üzerinde, kaç tane ve hangi ebatta besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirileceği belirlenerek, yolluk-besleyici tasarımı bilgisayar üzerinde yapılabilir. Tasarımı yapılan parçanın simülasyonu yapılarak bilgisayarda döküm, katılaşma ve çekinti oluşumu gibi birçok sonuç görülebilir (Şekil 19). Bu sonuçlardan faydalanarak gerekiyorsa tasarımda mümkün olan en iyi ve en ekonomik döküm için revizyon yapılabilir. Ayrıca parça tasarımında optimizasyon sistem tarafından optimum kalite ve verim elde edilecek şekilde otomatik olarak yapılabilir. Tüm bunların hepsi çok kısa zamanda yapılabilir ve hepsinden önemlisi bütün bunları henüz tasarım aşamasında görme imkânı vermektedir. Bu sebeplerden dolayı özellikle yüksek kaliteli parça üretmek isteyen dökümhanelerde simülasyon programlarına olan ihtiyaç her geçen gün artmaktadır ( Çolak, & Şirin, 2010 ).



Şekil 18. Döküm simülasyon program tasarım örneği (Şirin, & Çolak, 2009).

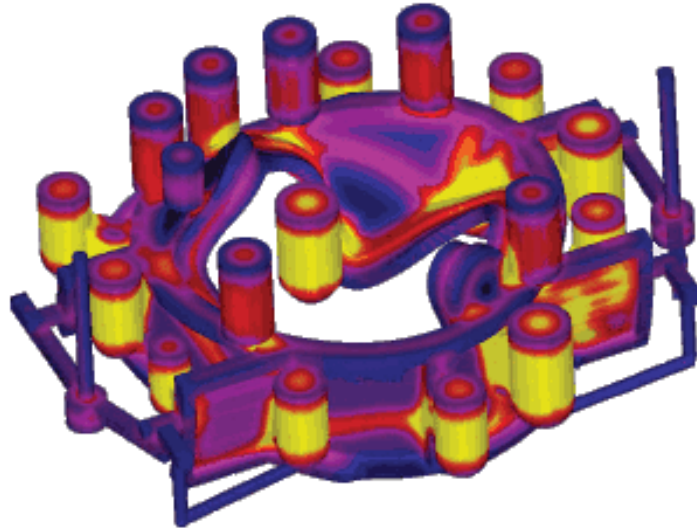
Döküm simülasyonu programlarıyla parça tasarımı sonucu belirlenebilecek başlıca özellikleri şu şekilde sıralayabiliriz (Şirin, & Çolak, 2009);

- ✓ Kalıp dolumu esnasında sıvı metalin hızı,basıncı,yönü,türbülans,soğuk birleşme bölgeleri vb.,
- ✓ Döküm parça kesitlerinde zamana bağlı sıcaklık dağılımı ve katılaşma süreleri,
- ✓ Parça üzerinde oluşan sıcak noktalar, besleyici yeri ve boyutu,
- ✓ Çekinti (makro porozite) ve mikro porozite tahmini,
- ✓ Döküm mikro yapısı,
- ✓ Döküm parça üzerinde oluşan gerilme analizi, sıcak yırtılma riski taşıyan bölgeler
- ✓ Döküm parça hacim ve ağırlıkları.



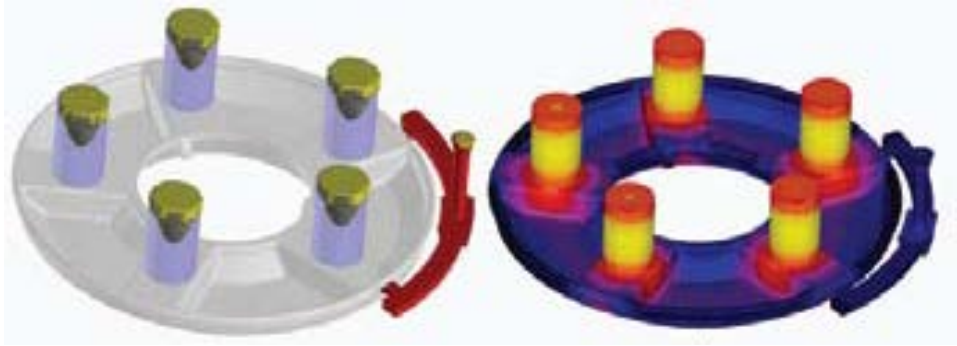
Şekil 19. Flowcast programıyla sıvı metalin kalıbı doldurması görüntüsü (Şirin, & Çolak, 2009).

Döküm simülasyon yazılımları sayesinde metalin kalıp içerisine girdiği andan itibaren, kalıp içerisindeki metalin katılaşması tamamlanıncaya kadar olan davranışı takip edilir (Malzemebilimi.net, 2019). Döküm parçanın dökümünde, katılaşmasında ve soğumasındaki hacim değişikliklerini, sıcaklık tahminlerini kapsayan eşsiz bir kolaylık sunar. Bu birleşik termo-hacimsel yaklaşım değişik döküm problemlerinde, mikro ve makro poroziteyi, sıcak noktaları ve diğer hataları içeren yüksek kesinlikte tahmin gerçekleştiren bir metottur (Çolak, & Şirin, 2010).



Şekil 20. Döküm simülasyon programı ile parça analizi (Çolak, & Kayıkcı, 2009).

Parçanın yolluksuz ve besleyicisiz olarak simülasyonu yapılır. Buradaki amaç parçada oluşabilecek çekinti bölgelerini tahmin ederek uygun besleyici ve yolluk tasarımının gerçekleştirilmesidir (Şekil 21) (Malzemebilimi.net, 2019).



Şekil 21. Simülasyon programı ile döküm parçası üzerindeki çekinti oluşacak bölgelerin gösterimi (Çolak, & Şirin, 2010).

Karmaşık kesitli ve büyük kütleli döküm parçaların dökümünde besleyici tasarımı zordur ve hatalı tasarım sonucu büyük maddi kayıplar olmaktadır. Bu problemlerin ortadan kaldırılması veya minimize edilmesi amacıyla döküm simülasyon programları geliştirilmiştir (Çolak, & Şirin, 2010).

## İKİNCİ BÖLÜM

### Materyal ve Metod

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar anlatılacaktır. Tez çalışmaları kapsamında küresel grafitli dökme demir malzemelerin değişen döküm şartlarındaki akıcılık özellikleri incelenecektir. Çalışmada akıcılık testleri için model tasarımı, kum kalıba döküm, dökümlerin makro incelenmesi, kesit kalınlığına ve döküm şartlarına bağlı mikro yapı incelemeleri ve modelleme çalışmaları yapılmıştır. Değişen döküm şartlarında kum kalıba yapılan dökümlerde kesit kalınlığına bağlı olarak sıvı metalin ilerleme mesafesi tespit edilmiştir. Ayrıca değişen parametrelerde FlowCast döküm simülasyon yazılımı ile yapılan çalışmalar ile gerçek döküm sonuçları karşılaştırılacaktır. Bütün parametrelerde yapılan dökümlerden elde edilen farklı kalınlıktaki döküm parçalardan elde edilen numunelerden mikro yapı incelemeleri yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

#### Deney Parametrelerinin Belirlenmesi ve Deney Tasarımı

Tez çalışmaları kapsamında GGG60 sınıfı KGDD bir alaşımın değişen döküm şartlarına göre akıcılık özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla değişen döküm şartlarında özel olarak tasarlanan farklı kesit kalınlıkları içeren akıcılık testi modeli kullanılmıştır. Hazırlanan kum kalıplara döküm yapılarak akıcılık özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bunun için deney parametreleri, döküm sıcaklığı, aşılama farkı, aşılama miktarı değişimi ve kesit kalınlığı olarak belirlenmiştir. Deney parametrelerinin belirlenmesinde mevcut literatür bilgilerinden faydalanılarak alaşımın akıcılık özelliklerine en çok etkisi bulunan ve dökümhanenin imalat esnasında müdahale edebileceği parametreler seçilmiştir. Tablo 9'da alaşımın akıcılık özelliklerinin belirlenmesi için tez kapsamında yapılan deney parametreleri ve döküm şartları verilmiştir.

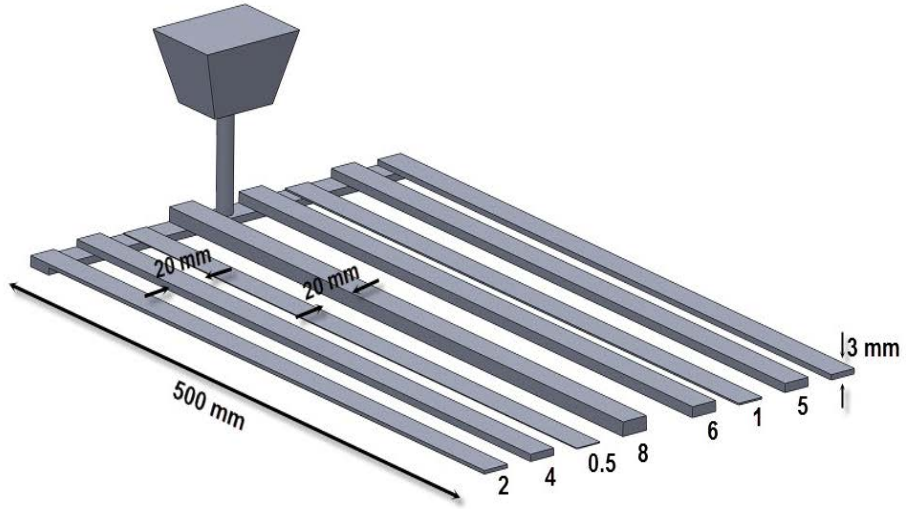
Tablo 9. *Deney Parametreleri*

<b>Döküm No</b>	<b>Döküm Sıcaklığı (°C)</b>	<b>Aşılacağı Çeşidi</b>	<b>Aşılacağı İlave miktarı</b>
1	1430	A	0,24
2	1430	A	0,48
3	1480	A	0,24
4	1480	A	0,48
5	1430	B	0,24
6	1480	B	0,24
7	1480	B	0,48
8	1480	C	0,48

Tez kapsamında belirlenen sıcaklıklar ilgili alaşım için ticari olarak üretim yapan firmanın normal döküm sıcaklığı baz alınarak ve yüksek sıcaklık olacak şekilde belirlenmiştir. Aşılacağı olarak 3 farklı aşılacağı kullanılmıştır. Aşılacağı elementler ticari olarak piyasada satışta olmasından dolayı isimlerinin verilmemesi ve kodlanarak verilmesinin daha uygun olacağı düşünülmüştür. Bu sebeple aşılacağılar A, B ve C şeklinde kodlanarak deney parametrelerinde belirtilmiştir.

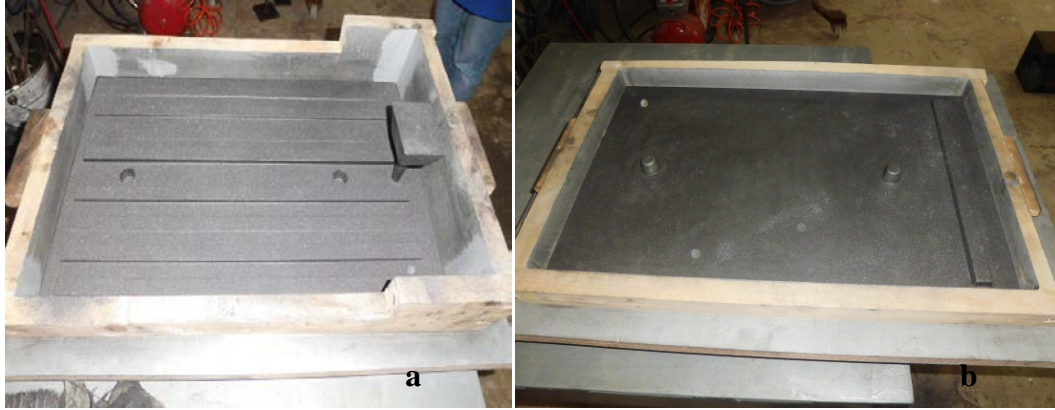
### **Model Tasarımı**

Alaşımın akıcılık özelliklerinin belirlenmesi için farklı kesit kalınlıklarında sıvı metalin ilerleme mesafesini ölçebilecek şartlarda model tasarımı yapılmıştır. Bu amaçla akıcılık testlerinde kullanılmak üzere Şekil 22’de katı model görüntüsü ve ölçüleri verilen model, plak modele işlenerek imal edilmiştir. Sıvı metal kanal uzunluğu, bütün kanallarda sıvı metal tam olarak yürümenin gerçekleşmemesi için bilinçli olarak uzun tutulmuş ve böylece sıvı metalin ilerleme mesafesinin ölçülebilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca kesit kalınlıklarının farklı olması sayesinde ilgili döküm şartlarında hangi kalınlıkta dökümler yapılabileceği tespit edilebilecektir.



Şekil 22. Akıcılık testi model görüntüsü ve ölçüleri.

Model tasarımı Şekil 23'deki gibi planlanan test modeli, çift taraflı model plakası olarak imal edilmiş ve kum kalıp hazırlama işlemlerinde kolaylık olması açısından sandık tipi çıkma derece içerisinde yapılmıştır. Hazırlanan kum kalıpların kapatılmasını sağlamak açısından alt dereceye dişi, üst dereceye erkek merkezleme pimleri yapılmıştır. Ayrıca kum sarfiyatını önlemek için üst derece kademeli yapılmıştır. Şekil 23'de model plakası görüntüsü verilmiştir.



Şekil 23. Plak model görüntüsü, a )Üst derece, b )Alt derece.

### Kum Kalıpların Hazırlanması

Tez çalışması kapsamında alfa set reçineli kum ile kalıplama yapılmıştır. Alfa set reçineli kum hazırlanırken 100 kg kum için 1,5 kg reçine, 1 kg sertel ilavesi yapılmıştır. Alfa set reçineli kum gerekli ilaveler yapıp kum mikserinde karıştırılarak elde edilmiştir. Kalıp hazırlanması için öncelikle kalıp kumunun modele yapışmasını önlemek için kalıp ayırıcı madde olarak grafit serpilmiştir. Sonrasında hazırlanmış kalıp kumu kademeli olarak derece

içerisine doldurulmuş ve tokmakla sıkıştırılmıştır. Derecenin tamamı kumla doldurulduktan sonra düz tokmakla kum sıkıştırılmış ve fazlalık kumlar masterla sıyrılmıştır. Kalıp hazırlandıktan sonra içerisindeki sertel durumuna göre havada sertleştirilerek kalıplar hazırlanmıştır. Şekil 24’de alfaset reçineli kum ile kalıplama işleminden görüntüler verilmiştir.



Şekil 24. Kalıplama işlem basamaklarından örnek görüntüler.

Döküme hazır hale gelen kalıpların üzerine döküm esnasında sıvı metal basıncını karşılamak için ağırlık konulmuştur. Şekil 25’de döküm sonrası kalıp görüntüsü verilmiştir.



Şekil 25. Döküm sonrası kalıp görüntüsü.



## Alaşımın Ergitilmesi ve Döküm İşlemi

Ergitme işlemleri firmada bulunan 1000 kg (1 ton) ergitme kapasitesine sahip indüksiyon ocağında gerçekleştirilmiş ve ocaktan alınan sıvı metal cepli tip potada küreselleştirme ve aşılama işlemleri uygulanmıştır. Ocakta hazırlanan sıvı metal küreselleştirme için işlem potasına alınmıştır. Potanın içerine FeSiMg küreselleştirici ve aşılayıcı olarak deney Şartlarına uygun miktarda aşılayıcı ilave edilmiştir. Döküme hazır hale gelen sıvı metal hazırlanmış kum kalıp içerisine dökülmüştür. Döküm sonrası üretilen numunelerin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi için firmada bulunan Spektrometre cihazı kullanılmıştır. Tablo 10’da GGG60 KGDD’in kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 10. GGG60 KGDD Kimyasal Bileşimi

Malzeme	Alaşım Elementi (%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Sn	Mg
GGG60	3,31	2,53	0,27	0,032	0,0020	0,025	0,024	0,050	0,031

Tablo 10’da görüldüğü gibi döküm alaşımını GGG60 standardı döküm için kimyasal bileşimin uygun olduğu anlaşılmıştır.

## Dökümlerin İncelenmesi

Döküm sonrası kalıplar açılarak deney numuneleri çıkartılmıştır. Döküm numuneleri kumları temizlendikten sonra ilk etapta makro olarak gözle kontrol edilmiştir. İlk dökümlerde modelden ve tecrübesizlikten kaynaklanan bazı hatalarla karşılaşılmıştır. Şekil 26’da görüldüğü gibi bazı kanallar kalıbın tam kapanmamasından dolayı ya da kalıp hazırlanırken oluşan hatalardan dolayı döküm sonrası kanallar birleşmiştir. Şekil 26’da görüldüğü gibi çapaklar bileştiğinden sıvı metal yürümesi tam olarak belirlenememektedir. Bu sebeple bu dökümlerden elde edilen sonuçları değerlendirme dışı tutularak dökümler tekrarlanmıştır.

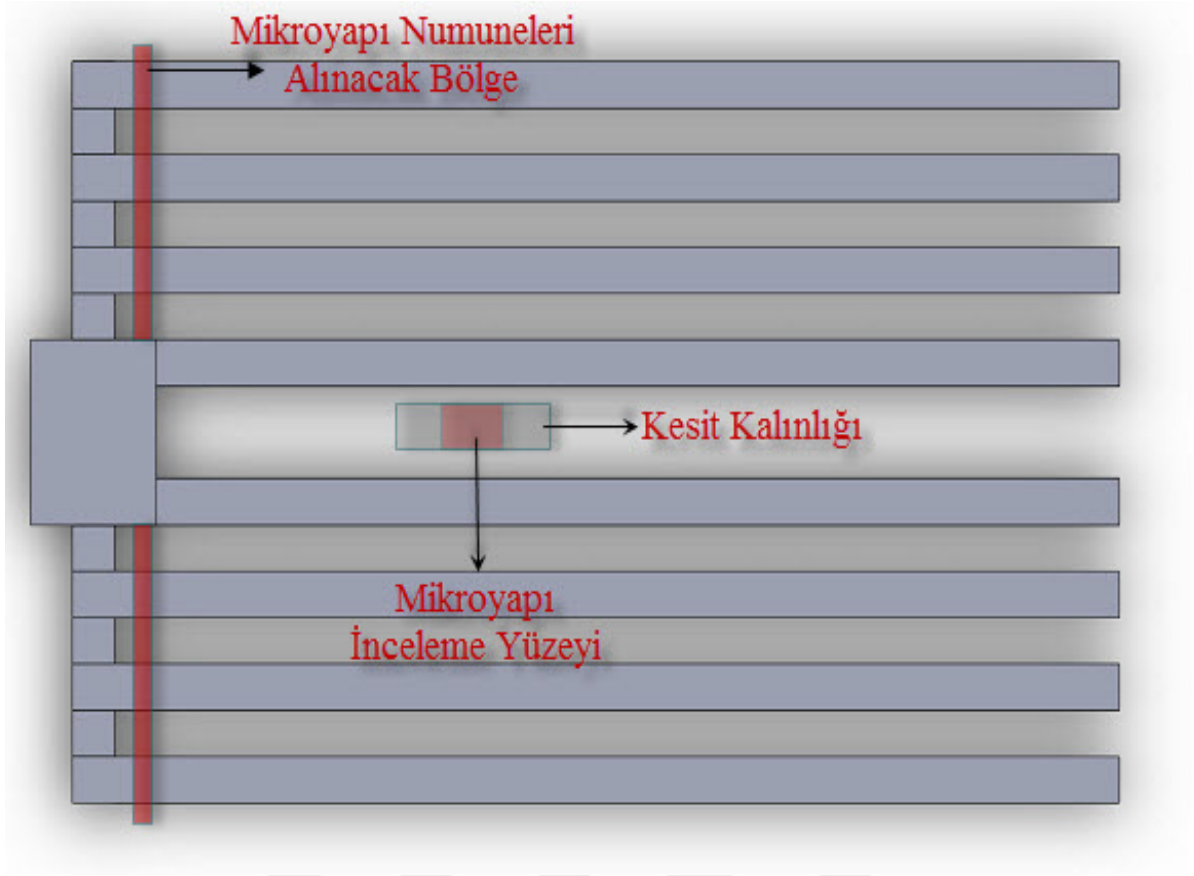


Şekil 26. Döküm sonrası akıcılık kanallarının birleşmesi hatası görünümü.

### **Mikro yapı İncelemeleri**

Tablo 9’da belirtilen deney şartlarına göre yapılan dökümlerden elde edilen döküm şartları ve kesit kalınlığının içyapıya olan etkisini incelemek üzere mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Mikro yapı incelemeleri için Şekil 27’de görülen yerlerden kesilen döküm kanallar orta kesiti incelenecek şekilde kesilip bakalite alınmıştır. Sonuç olarak 8 farklı parametreye göre yapılan döküm deneyindeki 8 farklı kalınlıktaki kesitten toplam 64 adet mikro yapı incelemesi için numune alınmıştır. Bakalite alınan numuneler 60-180-400-800-1200-2500 gritlik zımpara ile kaba ve ince zımparalamanın ardından alümina süspansiyonu ile parlatılmış ve mikro yapı incelemelerine tabi tutulmuştur.

Metalografik olarak hazırlanan yüzeylerden mikroskobik incelemeler Nikon Eclipse L150A ışık mikroskobu ve buna bağlı çalışan bir Clemex dijital kamera ile alınan görüntüler üzerinden Clemex Vision Lite görüntü analiz programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 27. Mikro yapı numunesi alınan bölgelerin gösterilmesi.

### Modelleme Çalışmaları

Döküm modellemesi için FlowCast döküm simülasyon akıcılık modelleme programı kullanılmıştır. Çalışmada fiziksel olarak gerçek döküm şartlarında yapılan dökümlerin simülasyon ortamında sayısal olarak birebir modellenebilmesini sağlamak simülasyon kullanımının en temel amacıdır. Böylece gerçek dökümlerde ortaya çıkan sıvı metal yürümemesi kusurlarının simülasyon programında CLF olarak tanımlanan kritik sıvı oranı değerinin döküm parametrelerine uygun değeri için simülasyon programındaki gerçek karşılığı bulunabilecektir.

Modelin döküm geometrisi SolidWorks programında katı model olarak oluşturulduktan sonra STL formatına çevrilerek döküm simülasyon programına aktarılmıştır. Bu aşamadan sonra döküm alaşımı ve kalıp malzemesinin türü ve termo fiziksel özelliklerinin tanımlanması yapılmıştır. Döküm alaşımının termo fiziksel değerleri simülasyon programının veri tabanında GGG60 alaşımına karşılık gelen CIDI Perlitic alaşımı için verilen değer Tablo 11'de gösterilmiştir.

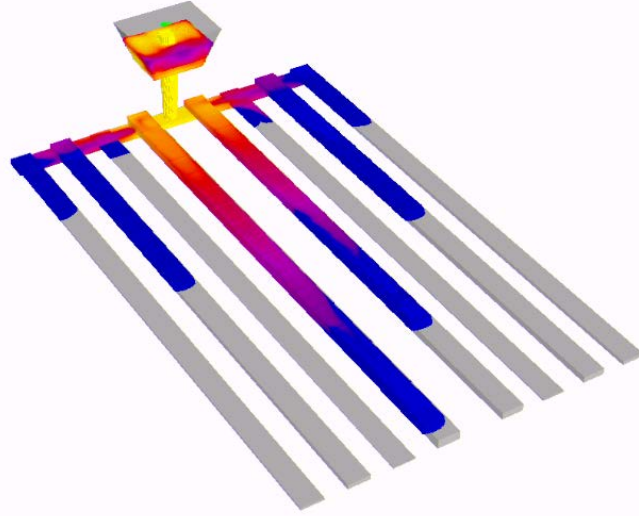
Tablo 11. Simülasyonda Kullanılan Malzemelerin Termofiziksel Özellikleri

Malzeme	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Özgül ısı (J/kg.K)	Yoğunluk kg/m <sup>3</sup>	Döküm Sıcaklığı (°C)	Katılma Sıcaklığı (°C)	Katılma Aralığı (°C)	Ergime Gizli Isısı J/kg.
GGG60	25,944	460,24	7176,064	1430-1480	1128	42	230115,6

Simülasyon programının veri tabanında birçok alaşımın termofiziksel özellikleri standart olarak yüklü olduğu gibi bizde istediğimiz özelliği manuel olarak değiştirebiliriz. Ayrıca döküm alaşımının soğuma eğrisi, yüzde hacimsel çekme oranı ve CFS değeri gibi parametreler çok değişkenlik gösterebilmektedir. Malzeme özellikleri tanımlanarak programa aktarılan katı model geometrisinin meş edilerek girilen sınır şartlarının her bir meş elemanı için simülasyon programında çözümlenmesi sağlanmıştır.

SolidCast simülasyon programında kalıp doldurma işlemi için ayrı bir yazılım olan FlowCast modülü kullanılmaktadır. FlowCast akışkanlar dinamiği kıstaslarına göre sıvı metali kalıp boşluğuna doldururken türbülans, eksik doldurma, soğuk birleşme ve basınç vb. gibi faktörleri de hesaplamaktadır. Şekil 28’de simülasyon programında kalıbın doldurulmasını gösteren bir görüntü verilmiştir.

Modelleme çalışmaları gerçek döküm ve dolun sürelerine göre yapılmıştır. Ayrıca aşılama ve modifiye edicinin etkisini belirlemek için modellemede CLF (critical fraction of liquid) değeri farklı değerlerde alınarak gerçek dökümlerle eşleştirmeler yapılmıştır.



Şekil 28. FlowCast programında kalıbın doldurulması.

## ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

### Araştırma Bulguları ve Tartışma

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel ve modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirilmesi verilecektir. Deneysel sonuç olarak döküm şartlarına uygun yapılan döküm sonuçları, sıvı metalin farklı kesit kalınlığındaki kanallarda ilerleme mesafesi, alaşım ilavesi ve döküm sıcaklığı etkilerinin kesit kalınlığına bağlı olarak mikro yapı üzerinde değişimi sonuçları verilecektir. Ayrıca akıcılık modelleme sonuçları verilerek gerçek döküm sonuçları ile karşılaştırmaları değerlendirilecektir.

#### Akıcılık Deneyi Döküm Sonuçları

Tablo 12. *Döküm Sonuçlarına Göre Elde Edilen Sıvı Metal İlerleme Mesafesi*

Deney Numarası	1 3 mm	2 5 mm	3 1 mm	4 6 mm	5 8 mm	6 0,5 mm	7 4 mm	8 2mm
1	403	500	126	500	500	29	500	500
2	424	500	34	500	500	49	500	235
3	500	500	169	500	500	78	500	244
4	500	500	242	500	500	17	500	370
5	360	500	90	500	500	22	500	500
6	500	500	225	500	500	102	500	205
7	500	500	146	500	500	33	500	282
8	500	500	22	500	500	50	500	310

Dökümlerin farklı kesit kalınlıklarına göre elde edilen ilerleme mesafesi ölçülmüş ve sonuçlar Tablo 12’de verilmiştir.

Şekil 29’da %0,24 A kodlu aşıl原因ıcı ilave edilen 1430 °C deney parametrelerinde üretilen dökümün şekli verilmiştir.



Şekil 29. 1430 °C, %0,24 A kodlu aşıl原因ıcı ilaveli döküm görüntüsü.

Şekil 29’da verilen döküm şeklinde de görüleceği üzere, 2-4-5-6-8 mm kalınlıklardaki kanallar tam olarak dolmuştur. Ancak belirtilen deney parametrelerinde 0,5 mm kalınlığındaki kanalda 29 mm, 1 mm kanalda 126 mm, 3 mm kanalda 403 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir.

Şekil 30’da %0,48 A kodlu aşıl原因ıcı ilave edilen 1430 °C deney parametrelerinde üretilen dökümün şekli verilmiştir.



Şekil 30. 1430 °C, %0,48 A kodlu aşıl原因ıcı ilaveli döküm görüntüsü.

Şekil 30’da verilen döküm şeklinde de görüleceği üzere, 4-5-6-8 mm kalınlıklardaki kanallar tam olarak dolmuştur. Ancak belirtilen deney parametrelerinde 0,5 mm kalınlığındaki

kanalda 49 mm, 1 mm kanalda 34 mm, 2 mm kanalda 235 mm, 3 mm kanalda 424 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir.

Şekil 31’de %0,24 A kodlu aşılama ilave edilen 1480 °C deney parametrelerinde üretilen dökümün şekli verilmiştir.



Şekil 31. 1480 °C, %0,24 A kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü.

Şekil 31’de verilen döküm şekilde de görüleceği üzere, 3-4-5-6-8 mm kalınlıklardaki kanallar tam olarak dolmuştur. Ancak belirtilen deney parametrelerinde 0,5 mm kalınlığındaki kanalda 78 mm, 1 mm kanalda 169 mm, 2 mm kanalda 244 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir.

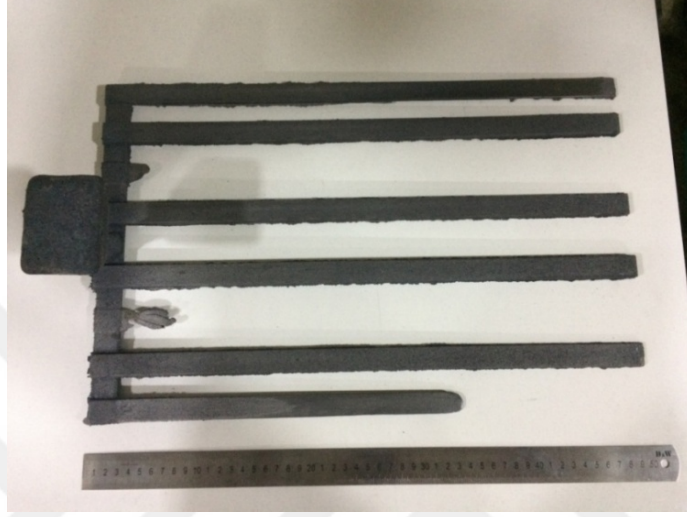
Şekil 32’de %0,48 A kodlu aşılama ilave edilen 1480 °C deney parametrelerinde üretilen dökümün şekli verilmiştir.



Şekil 32. 1480 °C, %0,48 A kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü.

Şekil 32’de verilen döküm şeklinde de görüleceği üzere, 3-5-6-8-4 mm kalınlıklardaki kanallar tam olarak dolmuştur. Ancak belirtilen deney parametrelerinde 0,5 mm kalınlığındaki kanalda 17 mm, 1 mm kanalda 242 mm, 2 mm kanalda 370 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir.

Şekil 33’de %0,24 B kodlu aşılaiıcı ilave edilen 1430 °C deney parametrelerinde üretilen dökümün şekli verilmiştir.



Şekil 33. 1430 °C, % 0,24 B kodlu aşılaiıcı ilaveli döküm görüntüsü.

Şekil 33’de verilen döküm şekilde de görüleceği üzere, 2-5-6-8-4 mm kalınlıklardaki kanallar tam olarak dolmuştur. Ancak belirtilen deney parametrelerinde 0,5 mm kalınlığındaki kanalda 22 mm, 1 mm kanalda 90 mm, 3 mm kanalda 360 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir.

Şekil 34’de %0,24 B kodlu aşılaiıcı ilave edilen 1480 °C deney parametrelerinde üretilen dökümün şekli verilmiştir.





Şekil 34. 1480 °C, % 0,24 B kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü.

Şekil 34’de verilen döküm şeklinde de görüleceği üzere, 3-4-5-6-8 mm kalınlıklardaki kanallar tam olarak dolmuştur. Ancak belirtilen deney parametrelerinde 0,5 mm kalınlığındaki kanalda 102 mm, 1 mm kanalda 225 mm, 2 mm kanalda 205 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir.

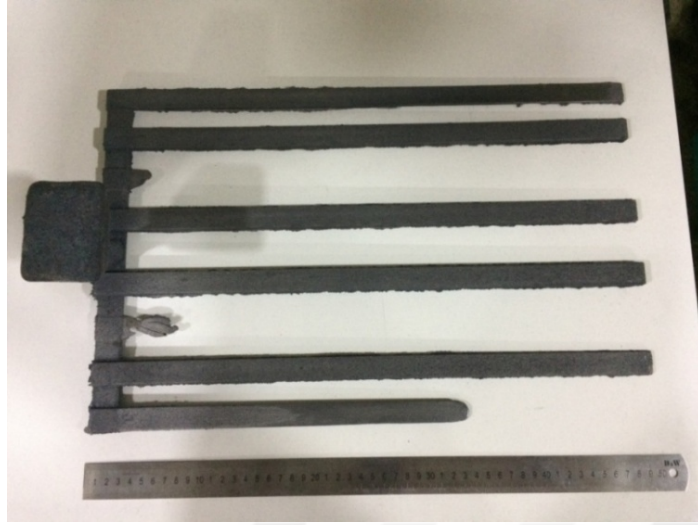
Şekil 35’de %0,48 B kodlu aşılama ilave edilen 1480 °C deney parametrelerinde üretilen dökümün şekli verilmiştir.



Şekil 35. 1480 °C, % 0,48 B kodlu aşılama ilaveli döküm görüntüsü.

Şekil 35’de verilen döküm şekilde de görüleceği üzere, 3-4-5-6-8 mm kalınlıklardaki kanallar tam olarak dolmuştur. Ancak belirtilen deney parametrelerinde 0,5 mm kalınlığındaki kanalda 33 mm, 1 mm kanalda 146 mm, 2 mm kanalda 282 mm, sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir.

Şekil 36'de %0,48 C kodlu aşıluyıcı ilave edilen 1480 °C deney parametrelerinde üretilen dökümün şekli verilmiştir.



Şekil 36. 1480 °C, % 0,48 C kodlu aşıluyıcı ilaveli döküm görüntüsü.

Şekil 36'da verilen döküm şeklinde de görüleceği üzere, 3-4-5-6-8 mm kalınlıklardaki kanallar tam olarak dolmuştur. Ancak belirtilen deney parametrelerinde 0,5 mm kalınlığındaki kanalda 50 mm, 1 mm kanalda 22 mm, 2 mm kanalda 310 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir.

Aşıluyıcı miktarı değişiminin etkisini incelemek üzere Tablo 9'de verilen A aşıluyıcısı için 1-2, 3-4 numaralı deneyler ve B aşıluyıcısı için 6-7 numaralı deneyler karşılaştırılmıştır. İlgili sonuçlardan anlaşılacağı üzere, aşıluyıcı miktarı değişiminin sıvı metal ilerlemesine olumlu yönde etki ettiği gözlenmiştir. Döküm sıcaklığı değişiminin sonuçlar üzerinde etkisi 1-3, 2-4 ve 5-6 numaralı deney sonuçlarında incelenmiştir. Döküm sıcaklığının artması ile birlikte sıvı metal ilerleme mesafesinin arttığı ve buradan aynı şartlarda yapılan dökümlerde döküm sıcaklığının artırılması ile akıcılığın arttığı tespit edilmiştir. Aşıluyıcı çeşidinin etkisini incelemek için 4-7-8 numaralı deneyler değerlendirilmiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde sonuçlar birbirine yakın çıkmakla birlikte, aynı miktar ilavelerinde en iyi aşıluyıcının A kodlu aşıluyıcı olduğu gözlenmiştir.

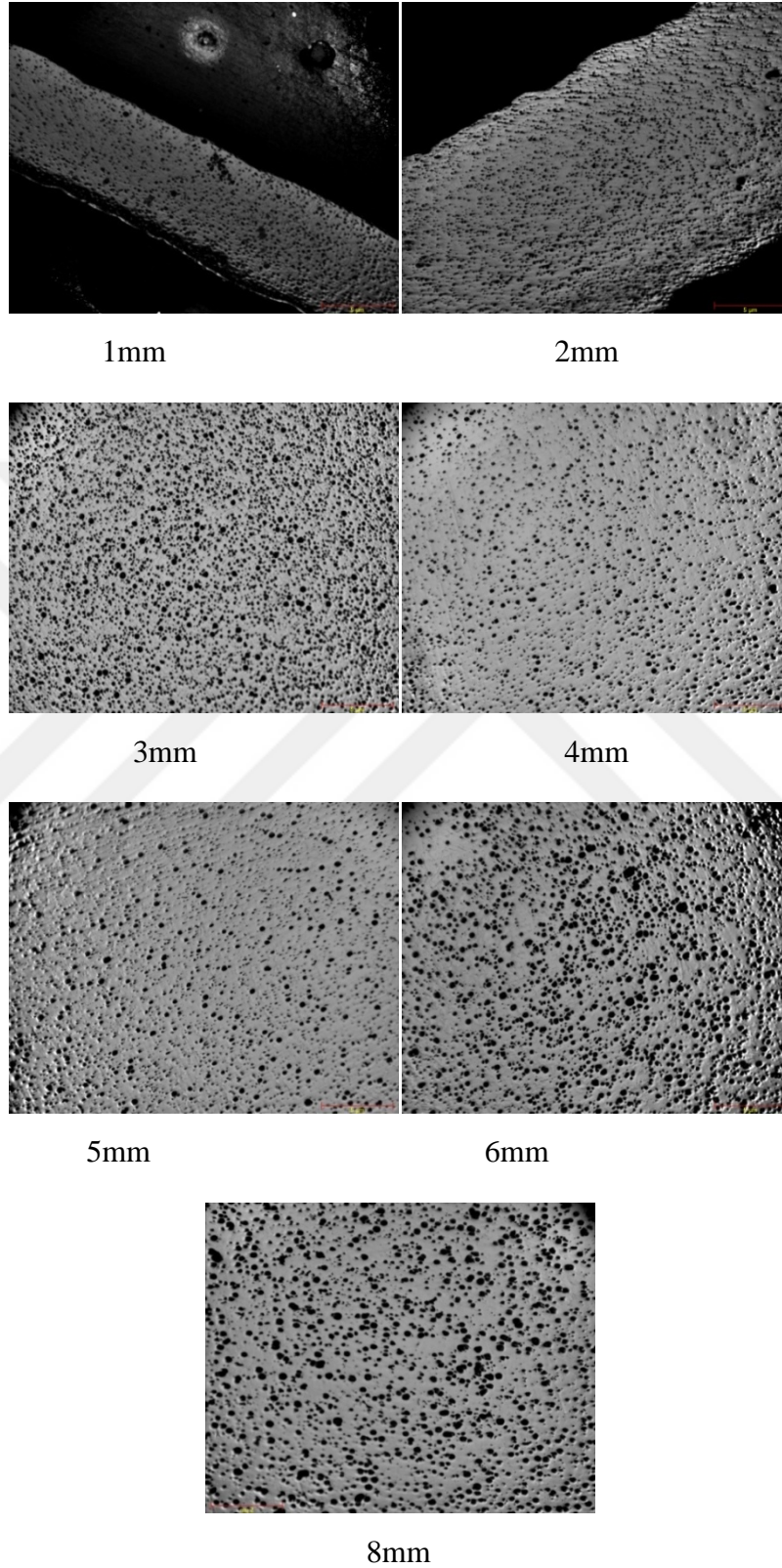
Aslandoğan (2009) yaptığı çalışmada döküm tekniğinde akıcılığı artırıcı en önemli etkinin sıcaklık olduğunu tespit etmiştir. Benzer bir çalışmada Kharkiv (2013) yüksek sıcaklıklar, tüm metallerin ve alaşımların akışkanlığını arttırırken, dökümdeki metalik olmayan yabancı maddeler akışkanlığını azaltır ve kalıp içindeki akışı engellediğini bulmuştur.

## **Mikro Yapı İncelemeleri ve Değerlendirilmesi**

Mikro yapı incelemeleri için numuneler deneysel çalışmalar bölümünde anlatıldığı ve Şekil 27’de gösterildiği gibi kesilen yerlerden alınmıştır. Bütün döküm şartlarındaki numuneler ve farklı kesitlerde alınan numunelere ait mikro yapı incelemeleri 50X, 100X ve 200X büyümede yapılmıştır. Numunelere ait mikro yapı şekilleri aşağıda verilmiştir

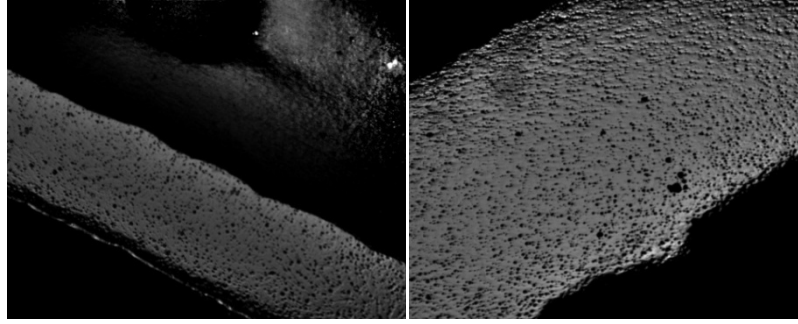


Şekil 37'de 1430 °C, % 0,24 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri verilmiştir.



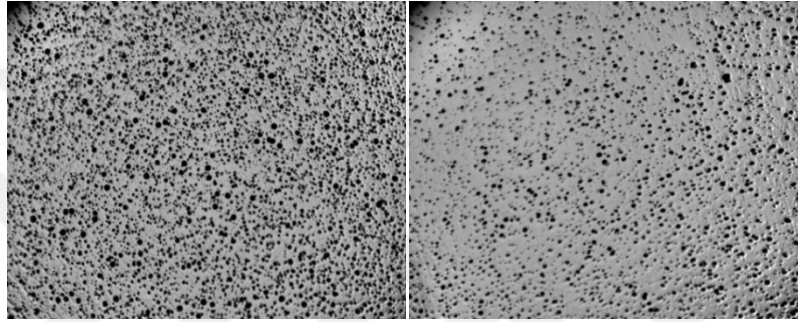
Şekil 37. 1430 °C, % 0,24 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri.

Şekil 38'de 1430°C, % 0,48 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri verilmiştir.



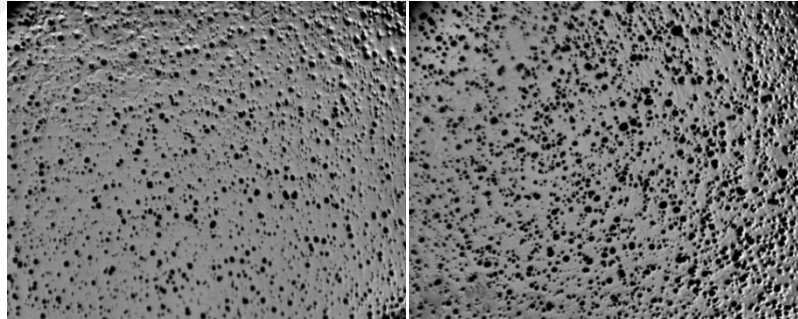
1mm

2mm



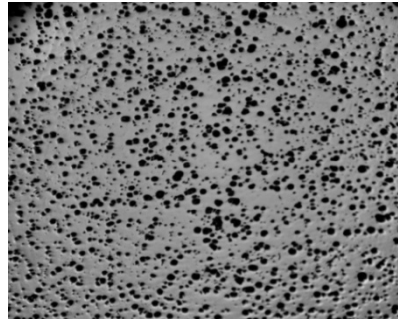
3mm

4mm



5mm

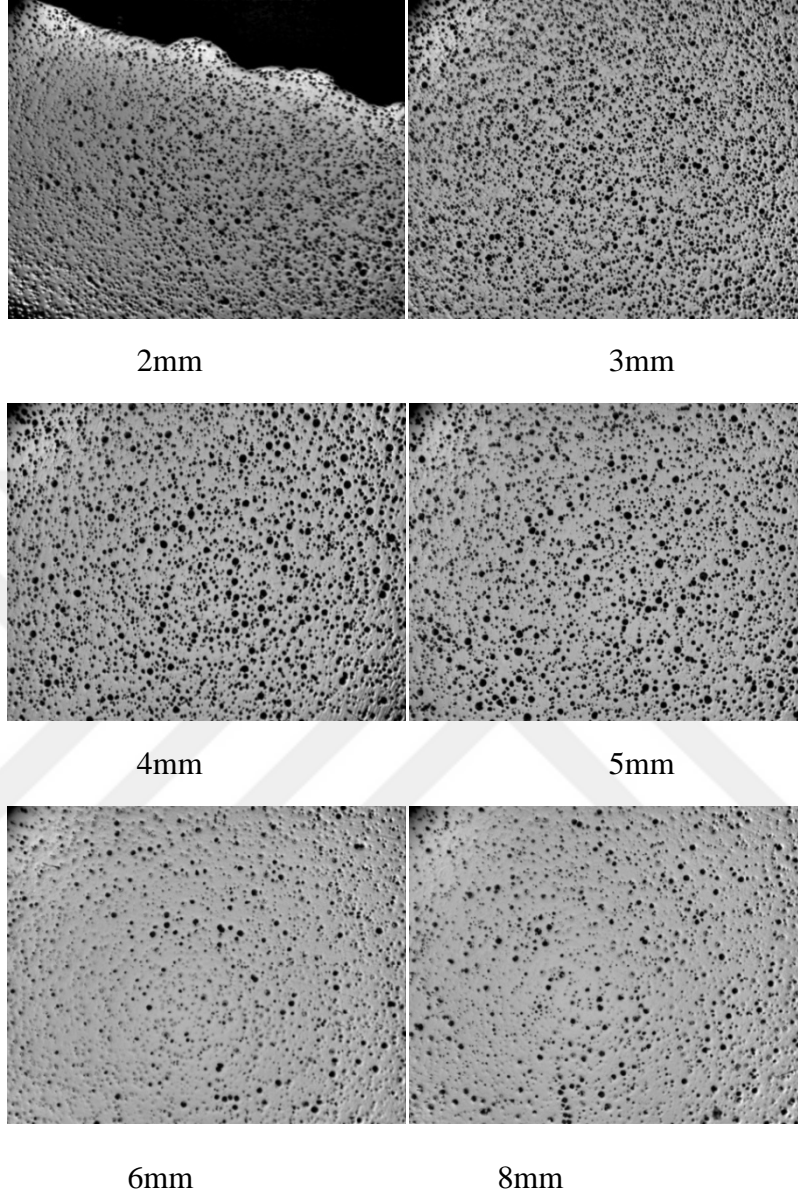
6mm



8 mm

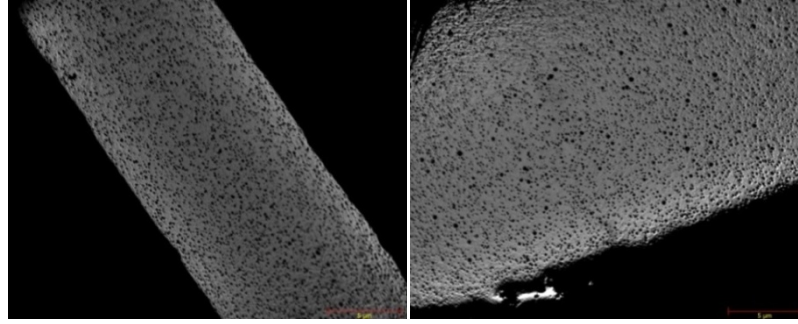
Şekil 38. 1430°C, % 0,48 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri.

Şekil 39'da 1480 °C, % 0,24 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri verilmiştir.



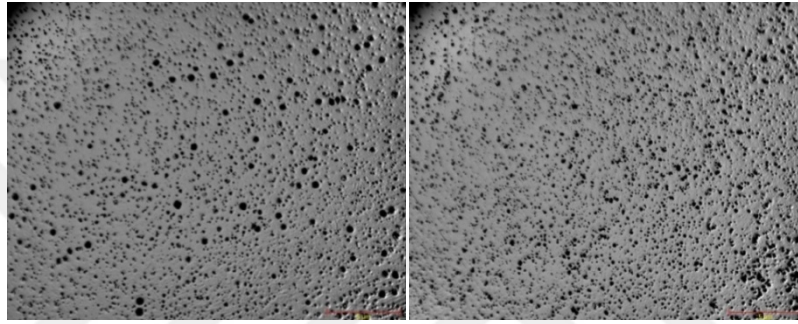
Şekil 39. 1480 °C, % 0,24 A tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri.

Şekil 40'da 1480 °C, % 0,48 A tipi aşılıyıcı ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri verilmiştir.



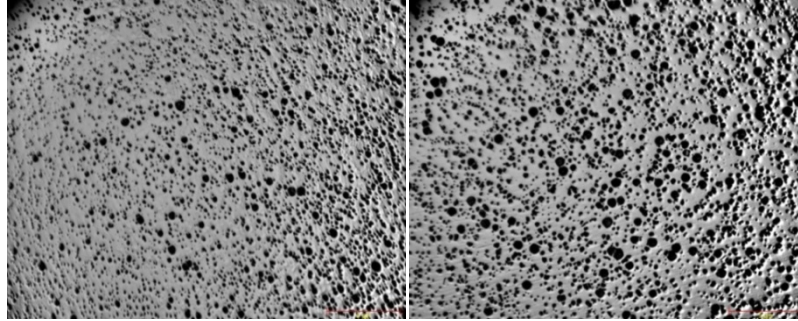
1mm

2 mm



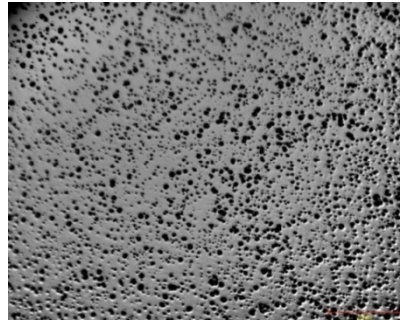
3mm

4 mm



5mm

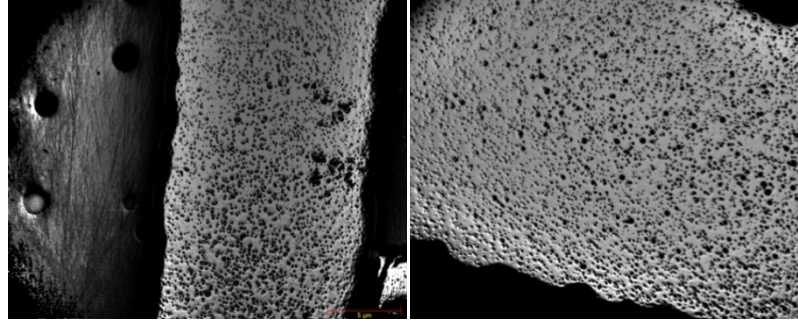
6mm



8mm

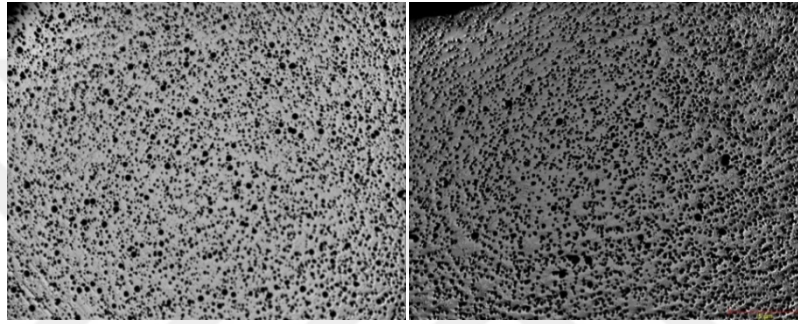
Şekil 40. 1480 °C, % 0,48 A tipi aşılıyıcı ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri.

Şekil 41'de 1430 °C, % 0,24 B tipi aşılaiıcı ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri verilmiştir.



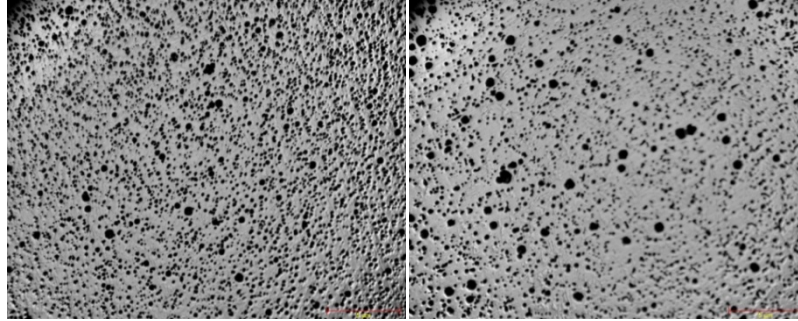
1mm

2mm



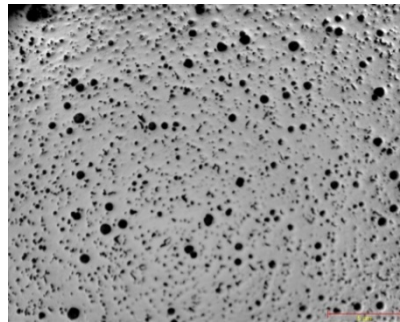
3mm

4mm



5mm

6mm

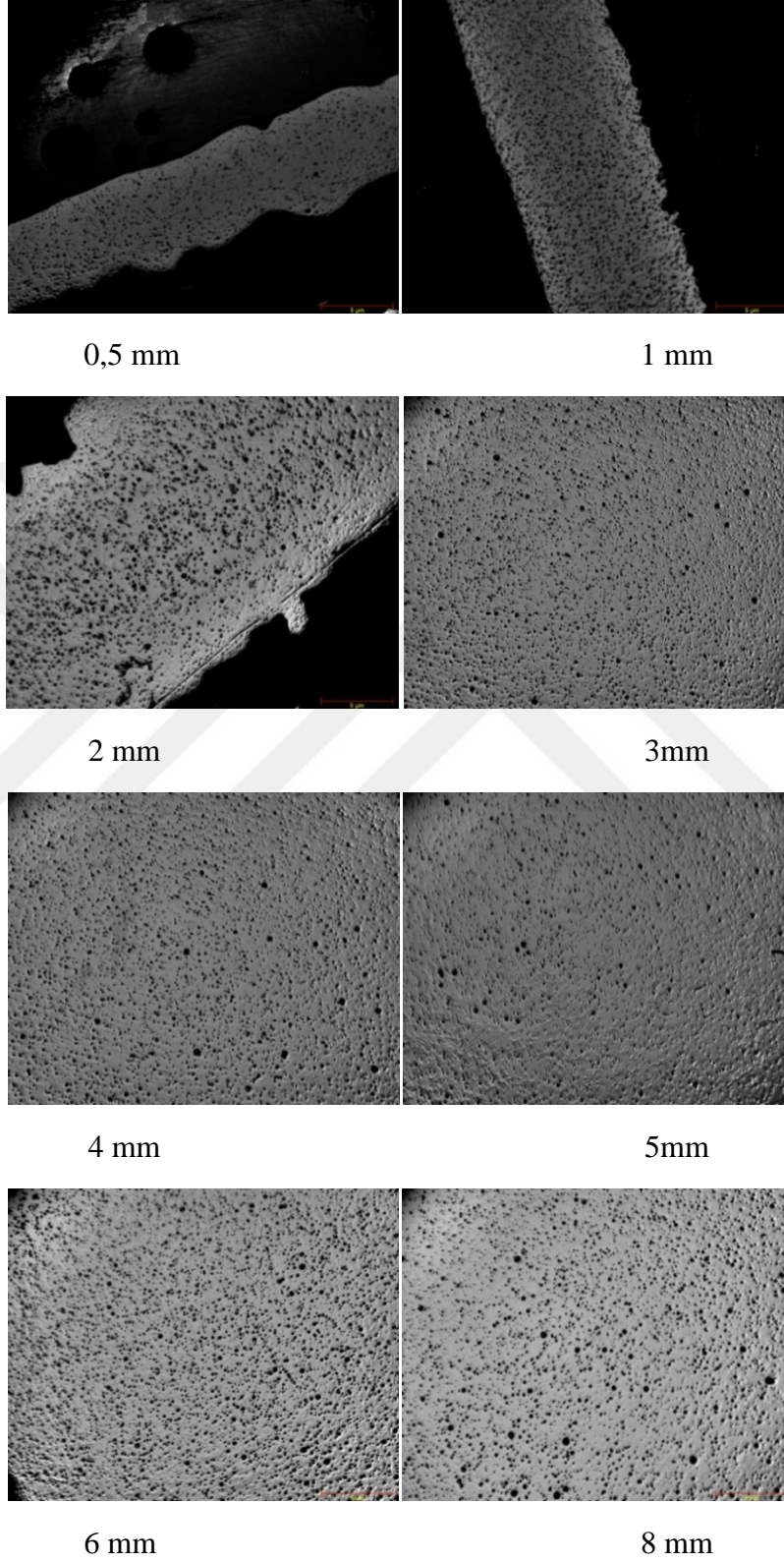


8mm

Şekil 41. 1430 °C, % 0,24 B tipi aşılaiıcı ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri.

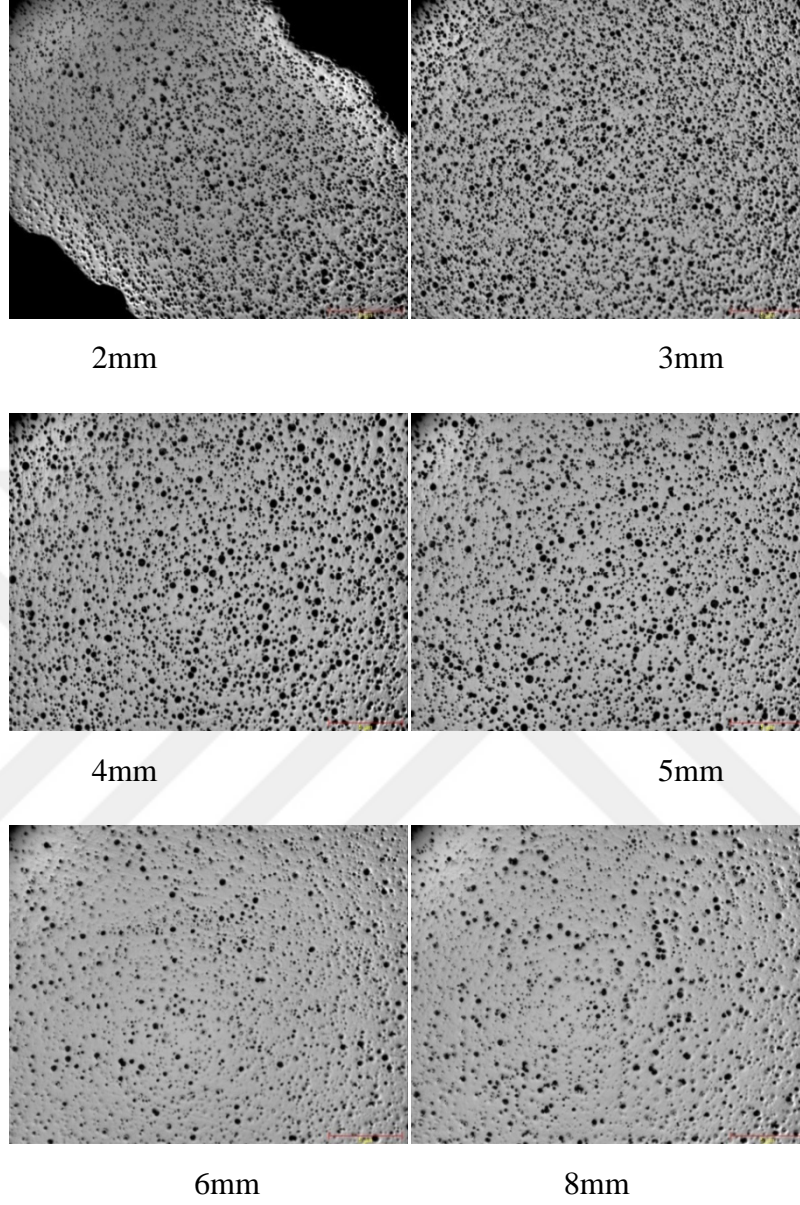


Şekil 42’de 1480°C, % 0,24 B tipi aşılaiıcı ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri verilmiştir.



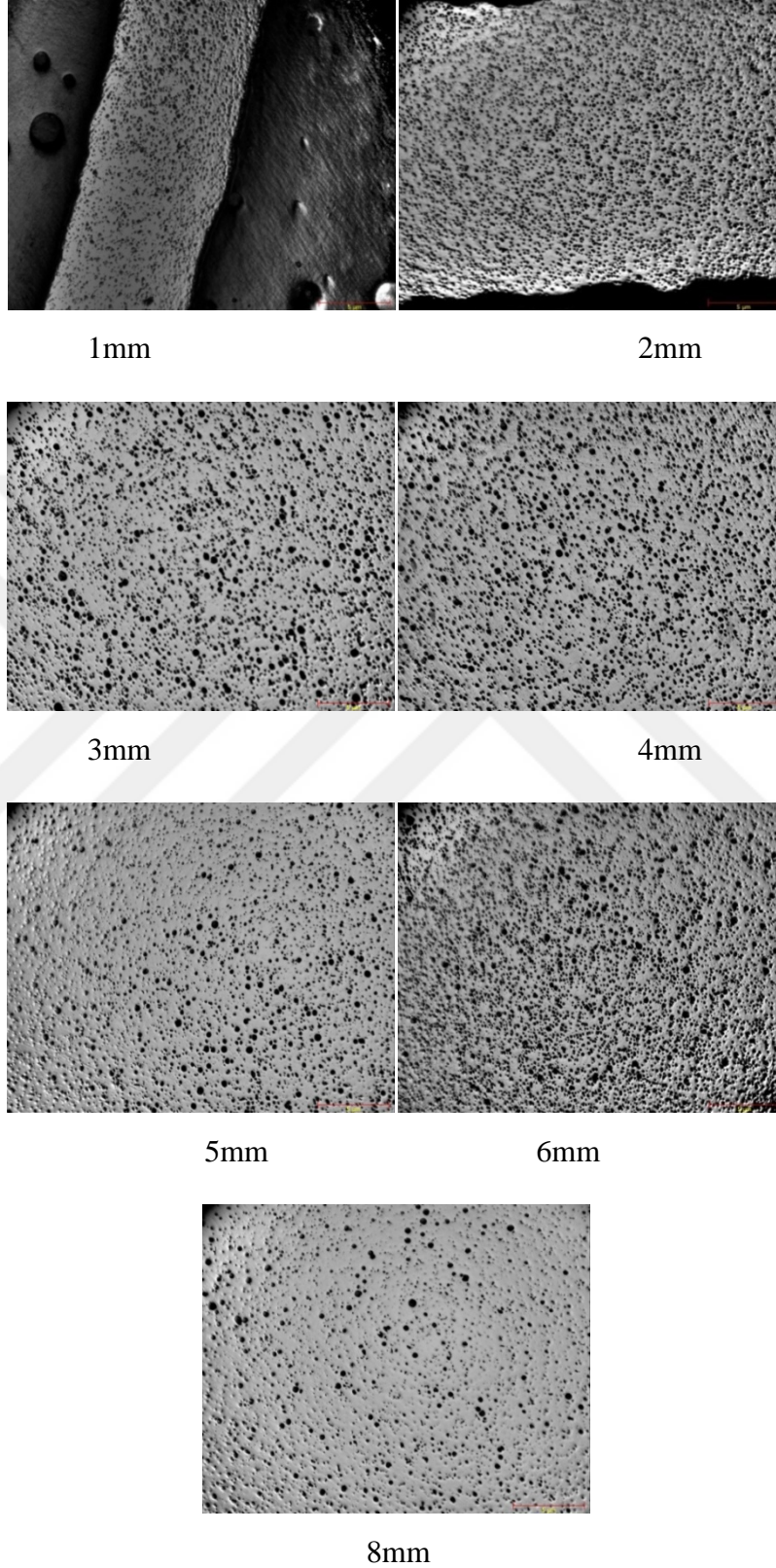
Şekil 42. 1480°C, % 0,24 B tipi aşılaiıcı ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri.

Şekil 43'de 1480 °C, % 0,48 B tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri verilmiştir.



Şekil 43. 1480 °C, % 0,48 B tipi aşılama ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri.

Şekil 44'de 1480 °C, % 0,48 C tipi aşılaiıcı ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri verilmiştir.



Şekil 44. 1480 °C, % 0,48 C tipi aşılaiıcı ilaveli döküm numunelere ait mikro yapı şekilleri.

Mikro yapı şekillerinde elde edilen bilgiler doğrultusunda;

- ✓ Bütün döküm şartlarında döküm kesit kalınlığının artmasıyla birlikte grafit kürelerinin ortalama çapında artış gözlenmiştir. Bu da soğuma hızı ile ilişkili olarak değişiklik göstermektedir.
- ✓ Aynı döküm şartları ve aynı kalınlıktaki farklı sıcaklıkta dökülen numune mikro yapısı incelendiğinde daha yüksek sıcaklıktan dökülen parçaların içyapında porozite oranının daha fazla olduğu ve tane boyutunun nispeten daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Çolak, Arslan ve Gavgalı, (2018 ) yapmış oldukları çalışmada, kalın kesitli bölgelerde katılma daha geç tamamlandığından grafit yapısı büyümek için zaman bulmuş ve daha kaba yapılar oluştuğunu tespit etmişlerdir. Yalçın (2014) çalışmasında, kesit kalınlığı arttıkça; grafit boyunun büyüdüğü, bununla bağlantılı olarak küreselleşme yüzdesinin düştüğü ve küre sayısının azaldığı sonucuna varılmıştır.

#### **Akıcılık Modelleme Sonuçları**

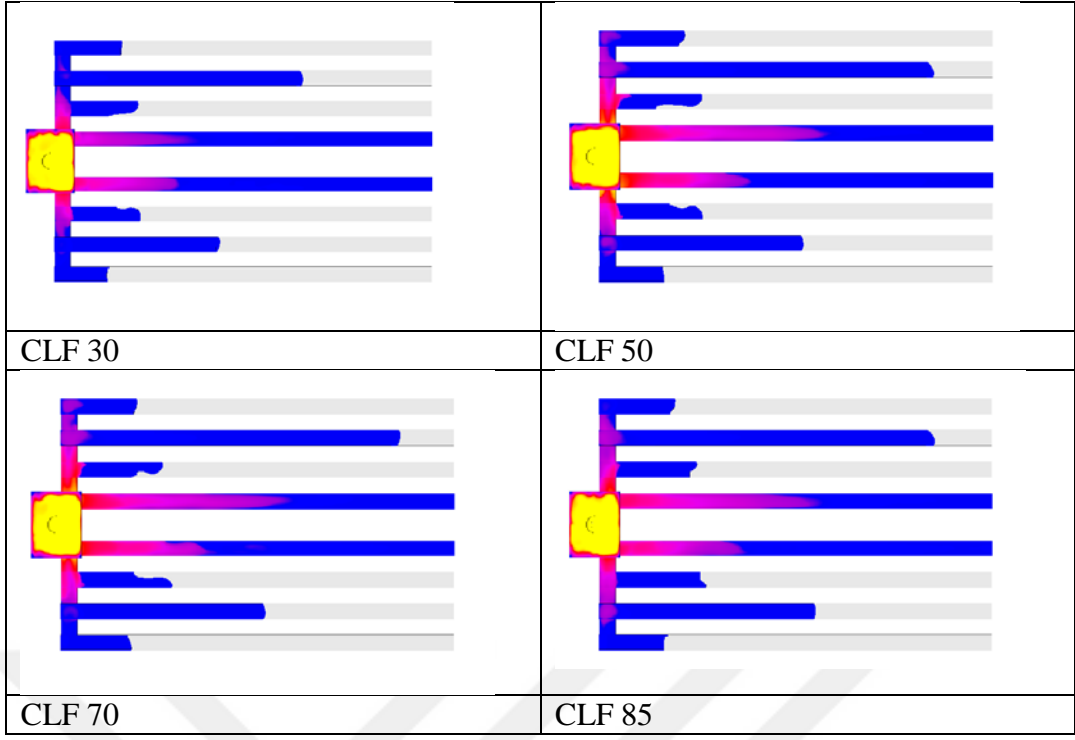
Modelleme çalışmaları, gerçek akıcılık döküm şartlarına uygun olarak yapılmaya çalışılmıştır. Akıcılık modellemesinde ilk olarak gerçek dökümlerden elde edilen döküm sürelerine uygun olarak dolun süresi belirlenmiştir. Dolun süresi değişen döküm şartlarına göre 3,5 ile 4,5 sn arasında olduğu tespit edilmiştir. Bu değerlere göre modelin tam olarak dolmadığı da göz önüne alınarak modelleme de dolun süresi 10 sn olarak tespit edilmiş ve modelleme sonunda dolun süresinin dolun yüzdesine bağlı olarak gerçek dökümlerde olduğu gibi 6 ile 8 sn arasında olduğu gözlenmiştir. Ayrıca aşılmalı ve döküm sıcaklığı ve değişen döküm şartlarının etkisinin belirlenmesi için modelleme programında CLF (critical fraction of liquid) değeri farklı değerlerde alınarak gerçek dökümlerle eşleştirmeler yapılmaya çalışılmıştır. Edilen sonuçlar özet şekilde verilmiştir. Modelleme programında alaşım olarak GGG60 muadili olan program veri bankasında kayıtlı küresel grafitli dökme demir alaşımı seçilmiştir.

Tablo 13. Modelleme Şartlarına Göre Alınan Sonuçlar

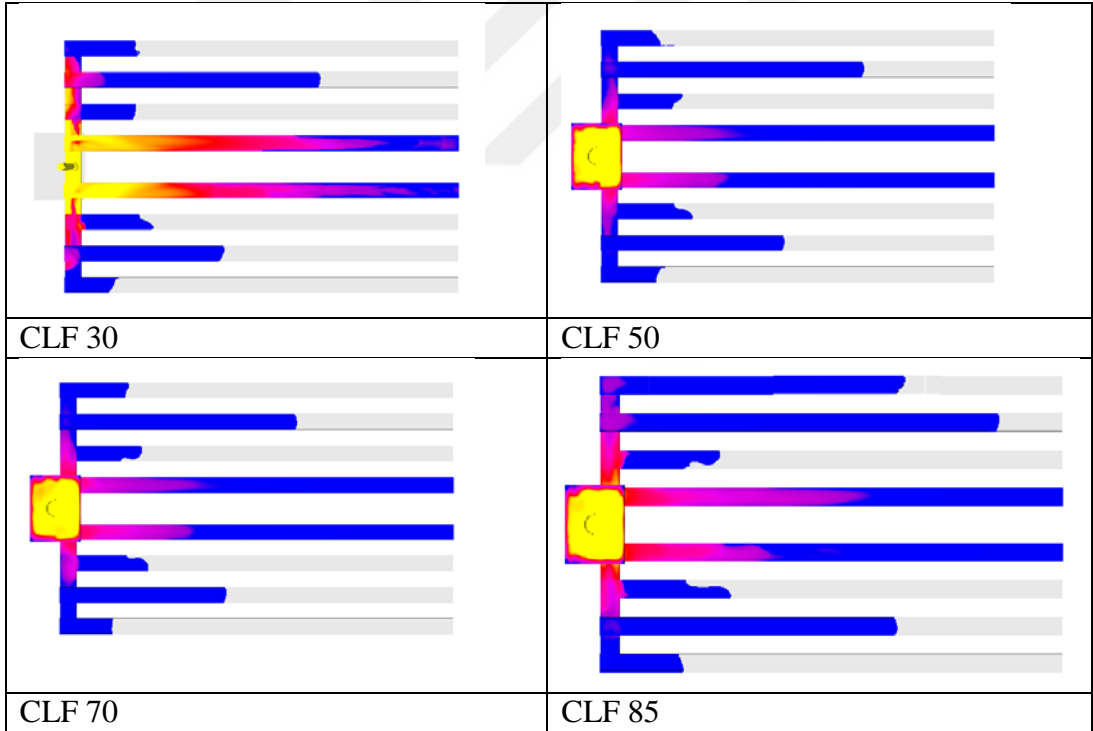
	Modelleme Şartları		Gerçek döküm dolum süresi (s)	Modellemeden alınan Dolum Süresi (s)	Dolum Yüzdesi %
	Döküm Sıcaklığı (°C)	CLF değeri ( % )			
1	1430	30	10	7,543	75,43
2	1430	50	10	7,813	78,13
3	1430	70	10	7,936	79,36
4	1430	85	10	8,134	81,34
5	1480	30	10	7,892	78,92
6	1480	50	10	8,116	81,16
7	1480	70	10	8,225	82,25
8	1480	85	10	8,322	83,22

Sonuçlar incelendiğinde modelleme programı ile gerçek döküm sonuçlarının mevcut literatür bilgisi ile de uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bütün kanalarda sıvı metal ilerleme mesafesi kalınlığa, döküm sıcaklığına bağlı olarak artış göstermiştir. Ayrıca tane inceltici modifiye edici ilavesinin CLF değerinin değiştirilerek modellenmesi de sonuçların daha doğru yorumlanması açısından mantıklı bulunmuştur.

Şekil 45’de 1430 °C de, Şekil 46’da 1480 °C de yapılan dökümlere ait değişen CLF değerlerindeki modelleme sonuçları verilmiştir.



Şekil 45. FlowCast modelleme yazılımından alınan 1430 °C döküm sonuçları.



Şekil 46. FlowCast modelleme yazılımından alınan 1480 °C döküm sonuçları.

Modelleme sonuçlarında gerçek döküme nazaran bazı farklılıklar gözlenmiştir. Bunun birçok sebebi olabilir. Ancak ilk akla gelen sebeplerden biri, akıcılığa birçok parametre etki etmektedir ve bu değerler modelleme programına sayısal ifadeler olarak girilmektedir. Bu sebeple değerlerdeki gerçek döküm şartları ile değişiklik gösteren değerler sonuçlarda

değişikliğe sebep olabilecektir. Bunun yanı sıra dolun esnasında modelleme programında tanımlanan yer ile gerçek döküm esnasında yapılan farklılıklar sıvının yönü ve kalıp içerisindeki ısı dağılımını etkileyebileceğinden sonuçlarda farklılık yaratmış olabileceği düşünülmektedir.

Çolak, Arslan ve Gavgalı, (2018) çalışmalarında; SolidCast döküm simülasyon programıyla modellemeler yaparak gerçek döküm numunelerinden alınan sonuçlarla döküm simülasyon programından alınan sonuçları karşılaştırmıştır. Sonuç olarak; fiziksel ortamda yapılan dökümler ile simülasyonda alınan sonuçların birbiriyle uyumlu olduğu tespit etmiştir.



## Sonuçlar ve Öneriler

Küresel grafitli dökme demir dökümünde aşılaiıcı ve döküm sıcaklığının akıcılık özelliklerine etkisinin incelendiği bu çalışmada deneysel ve modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar;

- ✓ Döküm sıcaklığının artmasıyla kalıp içerisindeki bütün kesitlerdeki döküm kanallarında sıvı metal ilerlemesi artmaktadır. 4, 5, 6 ve 8 mm kalınlığa sahip döküm kanalları bütün sıcaklıklarda 500 mm uzunluğundaki bütün kanallarda tam dolu olarak ilerlerken diğer kanallarda sıvı metal mesafesi sıcaklık artışına bağlı olarak ilerleme mesafesi artış göstermiştir. 0,5 mm mesafedeki döküm kanalı ise çok az mesafede ilerleme sağlayabilmiştir.
- ✓ Bütün döküm şartlarında kesit kalınlığının artması ile sıvı metal ilerlemesinin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca mikro yapı incelemelerinde döküm kesit kalınlığının artmasıyla birlikte grafit kürelerinin ortalama çaplarının da arttığı gözlenmiştir.
- ✓ Döküm sıcaklığının artması ile birlikte sıvı metal ilerleme mesafesinin arttığı ve buradan aynı şartlarda yapılan dökümlerde döküm sıcaklığının artırılması ile akıcılığın arttığı tespit edilmiştir.
- ✓ Aynı döküm şartları ve aynı kalınlıktaki farklı sıcaklıkta dökülen numune mikro yapısı incelendiğinde daha yüksek sıcaklıktan dökülen parçaların içyapısında porozite oranının daha fazla olduğu ve tane boyutunun nispeten daha düşük olduğu gözlenmiştir.
- ✓ Modelleme sonuçları incelendiğinde modelleme programı ile gerçek döküm sonuçlarının mevcut literatür bilgisi ile de uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bütün kanallarda sıvı metal ilerleme mesafesi kalınlığa, döküm sıcaklığına bağlı olarak artış göstermiştir.
- ✓ Aşılaiıcı miktarının artması ile birlikte dökümlerde ortaya çıkan grafit yapısının daha düzgün olduğu gözlenmiş ve aşılaiıcı miktarının artmasının dökümlerin akıcılığına olumlu yönde etki ettiği tespit edilmiştir.
- ✓ Ticari olarak uygulama bulan 3 farklı aşılaiıcı için yapılan deneylerde maliyet, mikro yapı ve akıcılığa etkileri göz önüne alınarak dökümhane için optimum aşılaiıcı A kodlu aşılaiıcı olarak belirlenmiştir.



## KAYNAKÇA

- Angus, H. T. (1976). *Cast Iron, Physical and Engineering Properties*. (2nd Ed), Butterworths, British Cast Iron Research Association, (BCIRA), 128.
- Autere, E., Ingman, Y., & Tennilä, P. (1986). *Valimotekniikka*, Insinööritieto Oy.
- ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, Steels and High-Performance Alloys*. (Vols. 1). ISBN: 978-0-87170-377-4
- Albayrak, Ö. (2001). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Porozite Oluşumunun Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 114174)
- Akça, C. (2005). *Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirde Alaşım Elementlerinin Östenit-Martenzit Dönüşümüne Etkisi*. (Doktora Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 180474)
- Akray, S. İ. (2007). *Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Aşınma Direncine Etkisinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 222353)
- Aslandoğan, R. (2009). *Dökümde Akıcılık ve Akıcılığı Etkileyen Faktörlerin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 244055)
- Arda, İ. (2010). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Katılaşma Modellemesi ve Gerçek Dökümler İle Karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 258584)
- Arda, İ., Şirin, S., Çolak M., & Kayıkcı, R. (2011). *Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümlerinde Hacimsel Değişime Etki Eden Faktörlerin İncelenmesi*. 6.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'11), 16-18 Mayıs 2011, Elazığ.
- Alasoluyi, J. O., Omotoyinbo, J. A., Olusunle, S. O. O., & Adewoye, O. O. (2013). Investigation of the Mechanical Properties of Ductile Iron Produced from Hybrid Inoculants Using Rotary Furnace. *International Journal of Science and Technology*, 2(5).
- Ateş, B. (2013). *Katı Çözelti Sertleşmesinin Küresel Grafitli Dökme Demirin Dönel Eğmeli Yorulma Davranışına Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 352262)

- Bäckerud, L., Nilsson, K., & Steen, H. (1974). *Study of Nucleation and Growth of Graphite in Magnesium-Treated Cast Iron by Means of Thermal Analysis*. In Proceedings of The 2nd International Symposium on the Metallurgy of Cast Iron, Geneva, 29–31 May, 625–637, Switzerland.
- Brown, J. R. (1994). *Foseco Foundryman's Handbook*. Butterworth Heinemann.
- Bramfitt, B. L., & Benschoter, A. O. (2002). *Metallographer's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*. USA, ASM International, Chapter 1, 16-21.
- Bockus, S., & Dobrovolskis, A. (2006), Effect of Melting Techniques on Ductile Iron Castings Properties. *METABK*, 45(1), pp.13.
- Bisht, A. (2009). *Effect of Heat Treatment Prodedures on Microstructure and Mechanical Properties of Nodular Iron*. (MSc Thesis), Retrieved from; <http://ethesis.nitrkl.ac.in/1501/1/motu-thesis.pdf>
- Bockus S., & Zaldarys, G. (2009). Influence of The Section Size and Holding Time on The Graphite Parameters of Ductile Iron Production. *Metalurgia*, 48 (1), 19-22.
- Bockus, S., & Zaldarys, G. (2011). *Evaluation of Producing Technique Factors Affecting the Matrix Microstructure of As-Cast Ductile Iron Castings*. *METALURGIJA*, 50(1), 9-12, Retrieved from; <https://pdfs.semanticscholar.org/9002/d145821beefb19bc6a7b45a7db007708f11d.pdf>
- Behera, G. (2012). *Effect of Copper on The Properties of Austempered Ductile Iron Castings*. (MSc Thesis), Retrieved from; <https://core.ac.uk/download/pdf/53188627.pdf>
- Campbell, J. (2003). *Castings*. Butterworth Heinemann.
- Çetin, M. (2005). *Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışlarının Geliştirilmesi*. (Doktora Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 165960)
- Çolak, M., & Kayıkcı, R. (2009). Döküm Simülasyon Programları Üzerine Bir Değerlendirme. *Metal Dünyası Dergisi*, 189, 2-4.
- Çolak, M., & Şirin, S. (2010). Solidcast Döküm Simülasyon Programıyla Kalıplama Tasarımının İşlem Basamakları. *Metal Dünyası Dergisi*, 202, 2-5.
- Çolak, M., Kayıkcı, R., & Dispınar, D. (2014). Influence of Different Cross Sections on Fluidity Characteristics of A356. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68(2), 275-281

- Çolak, M., Arslan, İ., & Gavgalı, E. (2018). Gri Dökme Demirlerin Katılaşıma Modellemesi ve Gerçek Dökümler İle Karşılaştırması. *Engineering Sciences (NWSAENS)*, 13(4), 280-290.
- Davis, J. R. (1996). *ASM Specialty Handbook Cast Irons*. ASM International.
- Dawson, S., & Hollinger, I. B. (2001). The Effect of Metallurgical Variables on The Machinability of Compacted Graphite Iron. *Emerging Casting Processes and Materials for The Automotive Industry*, 1(1), 409, <https://doi.org/10.4271/2001-01-0409>
- Davidson, J. H. (2003). *Microstructure of Steel and Cast Irons*. New York, Springer-Verlag, ISBN 3-540-20963-8, Part 3, Chapter 21, 356-363.
- Dawson, S., & Schroeder, T. (2004). Practical Applications for Compacted Graphite Iron. *American Foundry Society Transactions*, 1-9.
- Demirlek, M. (2013). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüksek Çevrimli Yorulma Davranışına Silisyum Oranının Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 350681)
- Evans, E. R., Dawson, J. V., & Lalich, M. J. (1976). *Trans. Am. Foundrymen's Sac.* 84, 215-220.
- Elliott, R., (1988). *Cast Iron Technology*. Butter Worths.
- Estes, J. W., & Scheidewind, R. (1955). *Trans. Am. Foundrymen's Sac.* 63, 541-552.
- Eisenmann, D. J. (2015). *Effects of Alloying Elements on the Microstructure and Fatigue Properties of Cast Iron For Internal Combustion Engine Exhaust Manifolds*. (Doctoral dissertation), Retrieved from <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5812&context=etd>
- Erturk, S. O., Kumruoglu, L. C., & Ozel, A. (2017). Determination of Feederless Casting Limits by Thermal Analysis in Cast Iron. *Acta Physica Polonica Series A*, 131(3), 370-374.
- Flemings, M. C. (1974). *Solidification Processing*. McGraw-Hill, New York.
- Fragassaa, C., Pavlovica, A., & Minak, G. (2016). Comparison of Mechanical Properties in Compacted and Spheroidal Graphite Irons. *Tribology in Industry*, 38(1), 45-56.
- Ghosh, S. (1994). Heat Treatment of Cast Iron. In Heat Treatment of Iron and Steel and Surface Engineering Workshop (THIS-94), 11-13 May, NML, Jamshedpur,

- Guesser, W., Schroeder, T., & Dawson, S. (2001). Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components. *AFS Transactions*, 01-071.
- Ghonamy, A. I. A., Ramadan, M., Fathy, N., Hafez, K. M., & Wakil, A. A. E. (2010). Effect of Graphite Nodularity on Mechanical Properties of Ductile Iron for Waterworks Fittings and Accessories. *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, 10(03), 1-5.
- Göteborg, S. (2011). *Analysis of Strains in Cast Iron Joints Using FE-Simulations and Digital Image Correlation Techniques*. (MSc Thesis), Retrieved from <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/141833.pdf>
- Godbole, S., & Jayashree, V. (2014). Microstructure Analysis of Spheroidal Graphite Iron (SGI) Using Hybrid Image Processing Approach. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 3(7).
- Gouda, E. S. (2014). Classifications, Characterization and Applications of Metallic Alloys. *International Journal of Physics and Astronomy*, 2(2), 15-49.
- Gouveia, R. M., Silva, F. J. G., Paiva, O. C., Andrade, M. F., Silva, L., Moselli, P. C., & Papis, K. J. M. (2017). Study of The Heat-Treatments Effect on High Strength Ductile Cast Iron Welded Joints. *Metals*, 7, 382.
- Hasırcı, H. (2000). Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementleri (Cu ve Ni) ve Östemperleme Süresinin Mikro Yapı ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 93589)
- Herring, D. H. (2004). *Heat Treatment of Cast Irons*. Industrial Heating.
- Han, Q., & Xu, H. (2005). Fluidity of Alloys Under High Pressure Die Casting Conditions. *Scripta Materialia*, 53, 7-10.
- Haque, M. M. (2007). Investigation on Properties and Microstructures of Spheroidal Graphite Fe-C-2Si and Fe-C-2Al Cast Irons. *Journal of Materials Processing Technology*, 191, 360-363.
- Hua, Q., Gao, D., Zhang, H., Zhang, Y., & Qijie, Z. (2007). Influence of Alloy Elements and Pouring Temperature on The Fluidity of Cast Magnesium Alloy. *Materials Science and Engineering A*, 444, 69-74.

- Hamdan, M. S. A. B. (2011). Investigation Microstructure and Mechanical Properties of White Cast Iron Using Sand Casting. Retrieved from <http://umpir.ump.edu.my/id/eprint/2897/2/CD5983.pdf>
- Handbook, A. (2012). *Alloy Phase Diagrams, Eutectic Alloy Systems*. ASM Handbooks Online.
- Hellström, K., Diószegi, A., & Diaconu, L. (2017). A Broad Literature Review of Density Measurements of Liquid Cast Iron. *Metals*, 7(5), 165. <https://doi.org/10.3390/met7050165>
- Ingole, P.M., Awate, A. U., & Saharkar, S. V. (2012). Effect of Basic Chemical Element in Sgi (Ductile Iron). *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 1/7.
- Karsay, I. (1976). *Qubec Iron Titanium Corparation*. Ductile Iron 1 Production, (ss. 177-180).
- Kökten, M. U. (1998). *GGG 50 ve GGG 80 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Abrasiv Aşınma Davranışına Östemplleme İşleminin Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 75447)
- Kılıçlı, V. (2004). *Küresel Grafitli Dökme Demirde Kısmi Östenitleme ve Östemplleme Isıl İşleminin Mikro yapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 155958)
- Kayalı, Y. (2006). *Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Mekanik Özellikleri ve Aşınma Davranışınının Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 181923)
- Kırcalı, K. K. (2006). *Farklı Matris Yapılara Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 202274)
- Kayıkçı, R., & Nergiz, M. (2010). *Besleyicisiz Döküm Yöntemi İle Dökülen Bir Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümün İncelenmesi*. 3.Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu (IFES2009), İstanbul,
- König, M., & Wessén, M. (2010). Influence of Alloying Elements on Microstructure and Mechanical Properties of CGI. *International Journal of Cast Metals Research*, 23, 97–110.

- Karaman, S. (2011). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (GGG40, GGG50, GGG60,GGG70) Üretim Sürecinin ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 300179)
- Kshemendranath, A., Patil, P., Bajaj, P., & Poddar, V. (2012). *Two Cycle Heat Treatment (Austempering + Tempering) of Low C Equivalent Ductile Iron*. Retrieved from [https://www.academia.edu/8487206/Two\\_Cycle\\_Heat\\_Treatment\\_Austempering\\_Tempering\\_Of\\_Low\\_C\\_Equivalent\\_Ductile\\_Iron](https://www.academia.edu/8487206/Two_Cycle_Heat_Treatment_Austempering_Tempering_Of_Low_C_Equivalent_Ductile_Iron)
- Kharkiv, (2013). *Physical and Chemical Bases Technological Processes*. Retrieved from <https://cidecs.net/wp-content/uploads/2019/01/Lecture-instructions-in-Technology-of-Engineering-in-III-Parts.pdf>
- Koch, M., & Soulas, K. (2014). *Inoculation of Grey and Ductile Iron*. 7th International Ankiros Casting Congress, September 12-13, Istanbul, Turkey.
- Kasvayee, K. A. (2015). *Microstructure and Deformation Behaviour of Ductile Iron Under Tensile Loading*. (Licentiate Thesis) Retrieved from <http://hj.diva-portal.org/smash/get/diva2:871909/FULLTEXT01.pdf>
- Kumar, R. (2015). *Effect of Tempering Temperature and Time on Strength and Hardness of Ductile Cast Iron*. (MSc Thesis), Retrieved from [http://ethesis.nitrkl.ac.in/7285/1/2015\\_Effect\\_Kumar.pdf](http://ethesis.nitrkl.ac.in/7285/1/2015_Effect_Kumar.pdf)
- Karadeniz, E., Çolak, M., & Barutçu, F. (2017). GGG-60 Küresel Grafitli Dökme Demir Üretiminde Aşılmalı Türü ve Miktarının İçyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 6, Sayı 1, 275-282.
- Lux, B., Bollmann, W., & Grages, M. (1969). On the Structure of Graphite in Pure Fe-C-Si Alloys. *Praktische Metallographie*, 6, 530-535.
- Lalich, M. J., & LaPresta, S. J. (1978). Foundry Manaoe. *Technology*, 106(9), 56-64.
- Loper, C. R. J., Lalich, M. J., Park, H. K., & Gyarmaty, A. M. (1980). *Trans. Am. Foundrymen's Sac.* 88, 313-330.
- Labrecque, C., & Gagné M. (1998). Review ductile iron: fifty years of continuous development. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37, 343-378.
- LianJiang Metals Company. (2019, 12 Temmuz). Re: Fluidity of Cast Iron and Its Test Methods [Online forum comment]. Retrieved from <https://kitairu.net/minerals-and-metallurgy/metals-and-metal-products/metal-products/cast-and-forged/796727.html>

- Morken, C. H. (1933). *The Heat Treatment of Cast Iron*. Reprinted From The Iron Age, Issue of September 28, Retrieved from <http://www.keystoneafs.org/docs/history/Technical%20Papers/Heat%20Treat%20Iron%201933.pdf>
- Murthy, V. S. R., Kishore, & Seshan, S. (1985). Vermicular Graphite Cast Iron-Current State of the Art. *Sādhanā*, 8(4), 361-372.
- Mittal, R., & Nanda, S. (2010). *Property Enhancement of Spheroidal Graphite Cast Iron By Heat Treatment*. Retrieved from [http://ethesis.nitrkl.ac.in/1627/1/B.Tech\\_Thesis\\_Final.pdf](http://ethesis.nitrkl.ac.in/1627/1/B.Tech_Thesis_Final.pdf)
- MEB, (2011, 27 Temmuz). *Küresel Grafitli Dökme Demir*, Metalurji Alanı. [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Küresel%20Grafitli%20Dökme%20Demir.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Küresel%20Grafitli%20Dökme%20Demir.pdf) adresinden edinilmiştir.
- Muhammed, E. S. M. (2011). The Effect of Compacted Graphite Iron Microstructure on Fracture and Machining. Retrieved from <https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/11243>
- Mahto, B. P. (2014). *Characterization of Ductile Iron Through Fractographic Study*. (MSc Thesis), Retrieved from <http://ethesis.nitrkl.ac.in/5714/1/212MM2456-9.pdf>
- Majhi, P. K., & Kumar S. (2014). *Effect of Tempering Temperature & Time on Impact Properties and Microstructure of Sg Iron*. (MSc Thesis) Retrieved from <http://ethesis.nitrkl.ac.in/6255/1/110MM0358-2.pdf>
- Muhmond, H. M. (2014). *On The Inoculation and Graphite Morphologies of Cast Iron*. (Doctoral dissertation), Retrieved from <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:761657/FULLTEXT01.pdf>
- Mozumder, Y. H. (2015). *Influence of Intercritical Austenitizing Temperature, Quenching Media and Tempering Temperature on Mechanical Properties and Wear Behavior of Ductile Iron with Dual Matrix Structure*. (MSc Thesis), Retrieved from [http://ethesis.nitrkl.ac.in/6908/1/Yahya\\_Mtech\(r\)\\_612MM3010.pdf](http://ethesis.nitrkl.ac.in/6908/1/Yahya_Mtech(r)_612MM3010.pdf)
- MalzemeBilimi.net. (2019, 11 Temmuz). Döküm Simülasyon Yazılımları. [Çevrimiçi forum yorumu] <https://malzemebilimi.net/dokum-simulasyon-yazilimlari.html> adresinden erişilmiştir.

- Maine Welding Company. (2019, 21 Temmuz). Cast Iron (gray, white, and malleable) [Online forum comment]. Retrieved from <http://mewelding.com/cast-iron-gray-white-and-malleable/>
- Okay, F. (2006). *PVD Yöntemi İle Tin Kaplı Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin ADHESİV Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 180168)
- Orlowicz W, Tupaj M, Mróz M., & Guzik E. (2010). Evaluation of Ductile Iron Casting Material Quality Using Ultrasonic Testing. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(11), 1493-1500.
- Özdemir, Ö. (2007). *Otomotiv Sektöründe Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimine Etki Eden Parametrelerin Teorik İncelenmesi Ultrasonik Ses Hızı Yöntemiyle Tahribatsız Kontrolü ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 199111)
- Öztürk, B. (2013). *Fittings Üretiminde Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Soğuma Hızının Etkisiyle Kesit Kalınlığına Bağlı Mikro yapı ve Sertlik Değişimlerinin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 376035)
- Pollack, H. W. (1988). *Materials Science and Metallurgy*. 4 th ed. Prentice-Hall.
- Partanen, O. (2016). *Optimization of Solid Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron Production By Thermal Analysis and Solidification Simulation*. (MSc Thesis) Retrieved from <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/23893/partanen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pullan, T. T. (2016). Spheroidal Graphite Cast Iron Property Enhancement By Heat Treatment. *International Journal of Materials Research*, 107(9), 807-814.
- Rashidi, A. M., & Torbati, M. M. (2000). Effect of Tempering Conditions on The Mechanical Properties of Ductile Cast Iron With Dual Matrix Structure (DMS). *Materials Letters*, 45, 203–207.



- Rivera, G., Boeri, R., & Sikora, J. (2003). Influence of The Inoculation Process, The Chemical Composition and The Cooling Rate, on The Solidification Macro and Microstructure of Ductile Iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 16/1, 23-28.
- Radzikowska, J. M. (2019, 21 Haziran). *Metallography and Microstructures of Cast Iron*. Retrieved from <http://www.thaithavorn.com/pdf/microstructure.pdf>
- Sissener, J., Thury, W., Hummer, R., & Nechtelberger, E. (1972). *International Journal of Cast Metals Research*, 8, 178-181
- Sofroni, K., Riposan, I., & Chira, I. (1974). The Metallurgy of Cast Iron (Eds.) B Lux, I Minkoff. *F Mollard (St Saphorin, Switzerland: Georgi)*, 179-195
- Sergeant, G. F., & Evans, E. R. (1978). The Production and Properties of Compacted Graphite Irons. *British Foundryman*, 75(5), 115-124.
- Skjegstad, N. T., & Skaland, T. (1996). *Inoculation of Grey and Ductile Iron*. Retrieved from <https://www.scribd.com/document/323471747/1996-Bombay-Foundry-Congress-Inoculation-of-Grey-and-Ductile-Iron-pdf>
- Skaland, T. (2001). Inoculation Materials Improves Graphite Formation in Ductile Iron. *Modern Casting*, 91(12):43-45.
- Svensson, I. L. (2002). *Component Casting with Simulation*; Jönköping University: Jönköping, Sweden, pp.1-4,5-3-511.
- Stefanescu, D. M. (2005). Solidification and Modeling of Cast Iron-A Short History of The Defining Moments. *Materials Science and Engineering A*, 413(414), 322–333.
- Stefanescu, D. M. (2008). *Science and Engineering of Casting Solidification*. Springer.
- Soiński, M. S., & Derda, A. (2008). The Influence of Selected Elements Upon Mechanical Properties of Ductile Iron EN-GJS-500-7. *Archives of Foundry Engineering*, 8(3), 149-152.
- Sağlam, C. (2009). *Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direncine Alaşım Elementleri İlavesinin Etkisi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 251898)

- Seidu, S. O., & Rıpoşan, I. (2011). Thermal Analysis of Inoculated Ductile Irons. *UPB Scientific Bulletin, Series B*, 3/2, ISSN 1454-2331.
- Sabatino, M. D., & Arnberg, L. (2013). A Review on The Fluidity of Al Based Alloys. *Metallurgical Science and Technology*, 22(1).
- Seidu, S. O. (2013). *The Effect of Carbonaceous Materials as Mould Additive on White Cast Iron*. Annals of Faculty Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering ISSN 1584-2673.
- Souzaa, T. N. F., Nogueirac, R. A. P. S., Francob, F. J. S., Aguilard, M. T. P., & Cetlina, P. R. (2014). Mechanical and Microstructural Characterization of Nodular Cast Iron (NCI) with Niobium Additions. *Materials Research*, 17(5), 1167-1172.
- Swain, S. K. (2015). *Property Development In As-Cast Heavy Section Sg Iron Castings By Alloying With Nickel And Copper*. (MSc Thesis), Retrieved from <http://ethesis.nitrkl.ac.in/8325/>
- Savaş, Ö., Kayıkci, R., Ficici, F., Colak, M., Deniz, G., & Varol, F. (2016). Production of Functionally Graded Sic/Al-Cu-Mg Composite By Centrifugal Casting,. *Science and Engineering of Composite Materials*, 23, 155-159.
- Shama, S. (2017). *Comparison of Mechanical Properties of Austenitic Ductile Cast Iron with Ferritic/Pearlitic Ductile Cast Iron*. (MSc Thesis), Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/97b0/1d37f5290f940c8c3b13bd99c9925bcef091.pdf>
- Saxena, S., & Sharma, P. K. (2017). Casting Fluidity of Metals and Alloys. *International Journal of Innovative Research in Science*, 6/2.
- Şen, U. (1997). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri*. (Doktora tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 68883)
- Şen, Ö. (2004). *Dökme Demirlerde Isıl Analiz Yöntemiyle Yapı Belirlenmesi*. (Doktora Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 154602)
- Şirin, S., & Çolak, M. (2009). Döküm Parça Tasarımında Besleme Kriterleri. *Dökümlife*.
- Toktas, G., Tayanç, M., & Toktas, A. (2006) Effect of Matrix Structure on The Impact Properties of an Alloyed Ductile Iron. *Materials Characterization*, 57(4-5), 290-299.
- Theuwissen, K., Lacaze, J., & Laffont, L. (2016). Structure of Graphite Precipitates in Cast Iron, *Carbon*. 96, 1120-1128, ISSN 0008-6223.

- TheMetalCasting.com. (2019, 14 Temmuz). Re: Casting Simulation [Online forum comment]. Retrieved from <http://www.themetalcasting.com/casting-simulation.html>
- Total Materia (2019, 08 Temmuz). Re: Vermicular Graphite Cast Iron [Online forum comment]. Retrieved from <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=263>
- Uzunova, T. (1967). Küresel Grafitli Dökme Demir. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 6(4), 240-245.
- Uçurum, M., Çolak, M., Çınar, M., & Dışpınar, D. (2016). Implementation of Statistical Process Control (SPC) Techniques as Quality Control in Cast Iron Part Production, *Journal of Engineering Precious Research and Application*, 1(3), 14-24.
- Wessen, M., & Svensson, I. L. (1996). Modeling of Ferrite Growth in Nodular Cast Iron, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27(8), 2209-2220.
- Wännman, S. (2018). *Influence of Nitrocarburization on Thermo-Mechanical Fatigue Properties*. (License Thesis), Retrieved from <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:1247329/FULLTEXT02.pdf>
- Vignesh, R, Gandhi, M.S., Vignesh, A., & Rajarajan, P. (2016). Effect of Squeeze Cast Process Parameters on Fluidity of Aluminium LM6 Alloy. *International Journal of Advancements in Technology*, 7, 157.
- Yanagisawa, & Lui, T. S. (1995). Metallurgical and Materials. *Transactions A*, 667-673.
- Yalçın, N. (1999). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Ark Kaynak Yöntemi İle Kaynak Edilebilirliğinin ve Kaynak Sonrası Mekanik Özelliklerin İncelenmesi*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 85915)
- Yavuz, K. (2006). *GGG-70 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demir Kam Millerinin İşlenebilirliğinin Deneysel Olarak Araştırılması*. (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 180103)
- Yang, L., Li, W., Du, J., Wang, K., & Tang, P. (2016). Effect of Si and Ni Contents on The Fluidity of Al-Ni-Si Alloys Evaluated By Using Thermal Analysis. *Thermochimica Acta*, 645(7), 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2016.10.013>
- Yalçın, E. (2014). *İnce ve Kalın Kesitli SiMo Küresel Dökme Demirlerin Isıl İşlem Öncesinde ve Sonrasında Mikro yapı ve Mekanik Özellikleri*. 7. Uluslararası Ankiros Döküm Kongresi, İstanbul.

## **ÖZGEÇMİŞ**

**Sinan KAYA**

24.01.1991 Gümüşhane’de doğdu. 2009-2013 yılları arasında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimler Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2013-2014 yılları arasında Yıldız Bakır Madencilik Sanayi A.Ş., 2014 yılından günümüze kadar Gümüşhane İl Özel İdaresinde Makine Mühendisi olarak görev yapmaktadır.