

**T.C.**  
**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ**  
**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR DÖKÜMÜNDE DOLUM HIZI,  
DÖKÜM SICAKLIĞI VE METALURJİ KALİTESİNİN FARKLI KESİT  
KALINLIKLARI ÜZERİNDE AKICILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS**

**Mehmet COŞAR**

**TEMMUZ-2022**  
**GÜMÜŞHANE**



**T.C.**

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR DÖKÜMÜNDE DOLUM HIZI,  
DÖKÜM SICAKLIĞI VE METALURJİ KALİTESİNİN FARKLI KESİT  
KALINLIKLARI ÜZERİNDE AKICILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FILLING SPEED, CASTING  
TEMPERATURE AND METALLURGY QUALITY ON FLUIDITY  
PROPERTIES ON DIFFERENT SECTION THICKNESSES IN SPHEROIDAL  
GRAPHITE CAST IRON CASTINGS**

**YÜKSEK LİSANS**

**Mehmet COŞAR**

**TEMMUZ-2022  
GÜMÜŞHANE**



**T.C.**

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİR DÖKÜMÜNDE DOLUM HIZI,  
DÖKÜM SICAKLIĞI VE METALURJİ KALİTESİNİN FARKLI KESİT  
KALINLIKLARI ÜZERİNDE AKICILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FILLING SPEED, CASTING  
TEMPERATURE AND METALLURGY QUALITY ON FLUIDITY  
PROPERTIES ON DIFFERENT SECTION THICKNESSES IN SPHEROIDAL  
GRAPHITE CAST IRON CASTINGS**

**YÜKSEK LİSANS**

**Mehmet COŞAR**

**Danışman: Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU**

**TEMMUZ – 2022**

**GÜMÜŞHANE**



## BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

**Yüksek Lisans** olarak hazırlamış olduğum “**Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümünde Dolu Hızı, Döküm Sıcaklığı ve Metalurji Kalitesinin Farklı Kesit Kalınlıkları Üzerinde Akıcılık Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmalarını kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğum intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

29/07/2022

.....  
**Mehmet COŞAR**

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın konusunun belirlenmesi, deneysel çalışmaların tasarlanması, deney sonuçlarının değerlendirilmesi ve yazılmasındaki destekleri nedeniyle Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Ebru Emine ŐUKÜROęLU baőta olmak üzere Sayın Doç. Dr. Murat ÇOLAK Hocama, Konya'da faaliyet gösteren KONDÖKSAN Döküm Sanayi ve Ticaret Limited Őirketi çalıőanlarına, ayrıca KONDÖKSAN Üretim Müdürü Sayın Halil AKTAŐ Hocama gösterdikleri ilgi, sabır, anlayıő ve yardımlarından dolayı saygılarımı ve teőekkürlerimi sunarım.

**Mehmet COŞAR**  
**GÜMÜŞHANE-2022**

## ÖZET

Bu çalışmada, Küresel Grafitli Dökme Demir (KGDD) malzeme ile farklı döküm sıcaklıkları, kesit ölçüleri ve döküm uygulamalarında malzemenin akıcılık özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle döküm sıcaklığı, metalürji kalitesi, çalışma ortamı için planlanan farklı kesit ölçülere göre akıcılık testi gerçekleştirilmiştir. Hazırlanmış kum kalıplara döküm işlemi yapılmış, akıcılık değerlerine etkileri ve değişen döküm işlemi koşullarında belirlenen kesit kalınlıklarında sıvı metal ilerleme ölçüleri incelenmiştir. Farklı döküm koşullarında kum kalıbı ile döküm işlemlerinde kesit ölçülerine göre ergimiş malzemenin kalıp içerisinde yürüme ölçüleri belirlenerek, FlowCast Döküm simülasyon yazılım programları ile değerlendirilmiştir. Bu nedenle çalışma kapsamında belirlenen malzemelerde değişen döküm şartlarında sıvı metalin akıcılığı ve ilerleme mesafeleri tespit edilmiştir. Bu çalışmada kum kalıba döküm, modelleme, deneysel tasarım, mikroyapı inceleme teknikleri kullanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akıcılık, Dökme demir, Döküm sıcaklığı, Döküm simülasyonu, Modelleme

## SUMMARY

In this study, it is aimed to examine the fluidity properties of the material in different casting temperatures, cross-section dimensions and casting applications with Spheroidal Graphite Cast Iron (SGCI). For this reason, fluidity test was carried out according to different cross-section dimensions planned for casting temperature, metallurgical quality and working environment. Casting process was carried out in prepared sand molds, the effects on the fluidity values and the progress of the liquid metal in the section thicknesses determined under the changing casting process conditions were investigated. The walking dimensions of the molten material in the mold were determined according to the cross-section dimensions in the casting processes with sand mold in different casting conditions and evaluated with FlowCast Casting simulation software programs. For this reason, the fluidity and travel distances of the liquid metal were determined in the changing casting conditions in the materials determined within the scope of the study. In this study, sand casting, modelling, experimental design, microstructure investigation techniques were used.

**Keywords:** Fluidity, Cast iron, Casting temperature, Casting simulation, Modeling

## İÇİNDEKİLER

|  |      |
|--|------|
| KABUL VE ONAY .....  | III  |
| BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI.....  | IV   |
| TEŞEKKÜR.....  | V    |
| ÖZET.....  | VI   |
| SUMMARY .....  | VII  |
| İÇİNDEKİLER .....  | VIII |
| TABLOLAR DİZİNİ .....  | X    |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....   | XI   |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....   | XIV  |
| 1. GİRİŞ .....   | 1    |
| 2. KURAMSAL TEMELLER .....   | 5    |
| 2.1. Dökme Demirler.....   | 5    |
| 2.2. Dökme Demirlerin Bileşenleri .....  | 6    |
| 2.3. Dökme Demirlerin Türleri .....  | 7    |
| 2.3.1. Beyaz Dökme Demirler.....   | 7    |
| 2.3.2. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirler.....                                | 8    |
| 2.3.3. Vermiküler (Kompakt) Grafitli Dökme Demirler.....                       | 9    |
| 2.3.4. Temper Dökme Demirler .....   | 10   |
| 2.3.5. Küresel Grafitli Dökme Demirler .....                                   | 11   |
| 2.4. Küresel Grafitli Dökme Demir Oluşumuna Alaşım Elementlerinin Etkisi ..... | 12   |
| 2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Türleri .....                           | 16   |
| 2.6. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mühendislik Özellikleri.....            | 16   |
| 2.7. Küresel Grafitli Dökme Demirlerinin Kullanım Alanları.....                | 17   |
| 2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Aşılama .....                           | 18   |
| 2.9. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Küreselleştirme .....                   | 21   |
| 2.10. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Katılma .....                          | 25   |
| 2.11. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Akıcılık .....                         | 27   |
| 2.12. Metallerin Akıcılığı ve Akıcılığı Etkileyen Faktörler.....               | 28   |
| 2.13. Döküm Simülasyon Yazılımları.....  | 29   |
| 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR .....   | 34   |
| 3.1. Deney Parametreleri.....  | 34   |
| 3.2. Model Tasarımı .....  | 35   |

|   |    |
|---|----|
| 3.3. Kum Kalıpların Hazırlanması .....  | 37 |
| 3.4. Alaşımların Ergitme İşlemleri.....   | 37 |
| 3.5. Dökümlerin İncelenmesi .....   | 39 |
| 3.6. Mikroyapı İncelemeleri .....   | 41 |
| 3.7. İmage Analiz Sistemi ile Mikroyapının İncelenmesi.....                           | 42 |
| 3.8. Modelleme Çalışmaları .....  | 44 |
| 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME .....   | 48 |
| 4.1. Döküm Deneylemleri Sonuçları.....  | 48 |
| 4.2. Mikroyapı İncelemeleri ve Değerlendirilmesi .....                                | 53 |
| 4.2.1. Döküm Sıcaklığına Bağlı Mikroyapı Değişiminin İncelenmesi .....                | 54 |
| 4.2.2. Metalürji Kalitesine Bağlı Mikroyapı Değişiminin İncelenmesi .....             | 56 |
| 4.2.3. Sıvı Metalin Kalıba Dolum Hızının Mikroyapı Üzerine Etkisinin İncelenmesi...58 |    |
| 4.3. İmage Analiz Sistemi ile Mikroyapı İnceleme Sonuçları .....                      | 58 |
| 4.4. Modelleme Çalışması Sonuçları .....  | 60 |
| 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....   | 67 |
| KAYNAKÇA .....  | 68 |
| ÖZGEÇMİŞ .....  | 73 |

## TABLolar DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| Tablo 1. Başlıca dökme demir malzemelerin kimyasal içerikleri.....                           | 6  |
| Tablo 2. Küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi .....                              | 12 |
| Tablo 3. Birkaç aşılama malzemelerinin oranları (%) .....                                    | 21 |
| Tablo 4. KGDD'lerin kimyasal içeriği. ....   | 22 |
| Tablo 5. Deney parametreleri.....  | 35 |
| Tablo 6. Deney şartları .....  | 35 |
| Tablo 7. Alaşım elementinin kimyasal oranı .....   | 38 |
| Tablo 8. Alaşımın simülasyon veritabanında termofiziksel olarak kullanılan özellikleri ..... | 45 |
| Tablo 9. Dökümler sonucu ortaya çıkan sıvı metallerin ilerleme mesafeleri .....              | 53 |
| Tablo 10. Deney numunelerinde elde edilen imaj analiz inceleme sonuçları.....                | 59 |
| Tablo 11. Değişen modelleme çalışmalarında elde edilen sonuçlar .....                        | 61 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| Şekil 1. DD'lerde Si (Silisyum) ve C(Karbon) değerleriyle mikro-yapı oluşumu (Maurer Diyagramı) (Demirci, 2004). .....   | 6  |
| Şekil 2. B.D.D. 'in mikro-yapı görünümü (Yalçın, 1999). .....  | 8  |
| Şekil 3. Lamel grafitli (gri) dökme demirin mikro-yapısı (Çolak, vd. 2018) .....   | 9  |
| Şekil 4. Vermiküler (Kompakt) grafitli dökme demirin mikro-yapısı (Karatay ve Hasırcı, 2018).....  | 10 |
| Şekil 5. TDD mikro-yapısı (Sağlam, 2009). .....  | 11 |
| Şekil 6. Küresel grafitli dökme demirin mikro yapısı (Minnebo vd., 2006).....  | 12 |
| Şekil 7. Alaşım elementlerinin Küresel grafitli dökme demirlerde grafit ve karbür oluşturucu etkileri (Ovalı, 2012).....   | 13 |
| Şekil 8. KGDD'lerde en iyi döküm aralığının şematik gösterimi (Akça, 2005). .....  | 14 |
| Şekil 9. KGDD malzemelerle üretilen çeşitli makine parçaları .....   | 18 |
| Şekil 10. Aşılama yöntemlerinin şematik görünümü .....   | 20 |
| Şekil 11. Küreselleşme işleminde Mg etkinliği (Çetin, 2016). .....   | 22 |
| Şekil 12. a) Açık pota b) Sandviç c) Daldırma yöntemleri şematik gösterimi (Çetin, 2016) .....   | 23 |
| Şekil 13. Tel tretmanı şematik gösterimi (Brown, 2000).....  | 24 |
| Şekil 14. Sfero dökümün üst ötektik katılaşma aşamasının grafik gösterimi, (a) grafitin aynı düzlem kesitinde katılaşma diyagramı, (b) soğuma diyagramı (Şen, 2004). ..... | 26 |
| Şekil 15. Çekirdekleşme ve grafit oluşumu (Aral, 2012).....  | 26 |
| Şekil 16. Dökme demir döküm simülasyonunda sıvı ve yarı katı bölgelerde soğuma sırasında sıcaklık değişimine göre hacimsel değişim grafiği (Meredith, 2008). .....         | 31 |
| Şekil 17. Döküm simülasyonu yazılım programı tasarım örnekleri .....   | 32 |
| Şekil 18. Flowcast simülasyon yazılım programı ile kalıbın doldurulması.....   | 32 |
| Şekil 19. Dökümün simülasyon yazılım programıyla parçanın analizi (Çolak ve Kayıkcı, 2009). .....  | 33 |
| Şekil 20. Simülasyonun yazılım programı ile döküm parçasının katılaşma süresi.....   | 33 |
| Şekil 21. Akıcılık testi modeli görüntüleri ve boyutları.....  | 36 |
| Şekil 22. Akıcılık testi plak model görüntüsü.....   | 37 |
| Şekil 23. Akıcılık testi plak model görüntüsü.....   | 38 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 24. Akıcılık testi plak model görüntüsü.....  | 39 |
| Şekil 25. Kalıptan çıkarılan örnek döküm resimleri .....  | 40 |
| Şekil 26. Döküm kesit kanallarındaki sıvı metal ilerleme mesafesinin ölçümünün gösterilmesi.....                  | 41 |
| Şekil 27. Mikroyapı numunesi alınan bölgelerin gösterilmesi .....   | 41 |
| Şekil 28. Bilgisayar destekli imaj analiz sistemi görüntüsü.....  | 42 |
| Şekil 29. Parlatmadan sonra numunenin mikro yapı görüntüsü .....  | 43 |
| Şekil 30. İki aşamada olduğu varsayılan mikro yapı görüntülerin renk eşleştirmesinden sonraki görüntü .....       | 43 |
| Şekil 31. a) Küre sayısı ve uzunluğu, b) Küreselleşme hızının belirlenmesi, c) Faz ilişkisinin belirlenmesi ..... | 44 |
| Şekil 32. Akıcılık modeli katı model çizimi .....   | 45 |
| Şekil 33. Akıcılık modelinin SolidCast programına yüklenmesi, malzeme tanımlanması. ....                          | 46 |
| Şekil 34. SolidCast programı ile modelin meş edilmesi .....   | 46 |
| Şekil 35. FlowCast programı ile kalıbın doldurulması esnasındaki görüntüsü.....                                   | 47 |
| Şekil 36. Modelleme programından sıvı metal mesafesinin belirlenmesi. ....  | 47 |
| Şekil 37. 1350 °C sıcaklık, %10 metalürji kalitesi, 5 sn dolun hızı şartlarındaki döküm .....                     | 48 |
| Şekil 38. 1350 °C sıcaklık, %10 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm .....                    | 49 |
| Şekil 39. 1350 °C sıcaklık, %50 metalürji kalitesi, 5 sn dolun hızı şartlarındaki döküm .....                     | 49 |
| Şekil 40. 1350 °C sıcaklık, %50 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm .....                    | 50 |
| Şekil 41. 1350 °C sıcaklık, %90 metalürji kalitesi, 5 sn dolun hızı şartlarındaki döküm .....                     | 50 |
| Şekil 42. 1350 °C sıcaklık, %90 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm. ....                    | 51 |
| Şekil 43. 1400 °C sıcaklık, %50 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm. ....                    | 51 |
| Şekil 44. 1450 °C sıcaklık, %50 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm .....                    | 52 |
| Şekil 45. Farklı büyütmelelerde 4 mm kesit kalınlığındaki mikroyapı resimleri .....                               | 54 |
| Şekil 46. Farklı döküm sıcaklıklarındaki mikroyapı resimleri (100X büyütme).....                                  | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Şekil 47. Farklı metalürji kalitesi şartlarında mikroyapı resimleri (100X büyütme).....       | 56 |
| Şekil 48. Sıvı metal kalıba farklı dolum sürelerinde mikroyapı resimleri (100X büyütme) ..... | 57 |
| Şekil 49. FlowCast akıcılık modelleme yazılımından örnek bir ekran görüntüsü .....            | 62 |
| Şekil 50. 1350 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları .....  | 63 |
| Şekil 51. 1400 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları .....  | 64 |
| Şekil 52. 1450 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları .....  | 65 |



## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

|      |  |
|------|--|
| Al   | : Alüminyum                              |
| Ar   | : Argon                                  |
| Ba   | : Baryum                                 |
| Be   | : Berilyum                               |
| C    | : Karbon                                 |
| Ca   | : Kalsiyum                               |
| Ce   | : Seryum                                 |
| Cl   | : Klor                                   |
| Cr   | : Krom                                   |
| Cu   | : Bakır                                  |
| Fe   | : Demir                                  |
| Mg   | : Magnezyum                              |
| Mn   | : Manganez                               |
| Mo   | : Molibden                               |
| Ni   | : Nikel                                  |
| O    | : Oksijen                                |
| P    | : Fosfor                                 |
| S    | : Kükürt                                 |
| Si   | : Silisyum                               |
| Ti   | : Titanyum                               |
| V    | : Vanadyum                               |
| Zr   | : Zirkonyum                              |
| Zn   | : Çinko                                  |
| KGDD | : Küresel Grafitli Dökme Demir           |
| BDD  | : Beyaz Dökme Demir                      |
| GDD  | : Gri Dökme Demir                        |
| MEB  | : Milli Eğitim Bakanlığı                 |
| Sr   | : Stronsiyum                             |
| TS   | : Türk Standartları                      |
| DIN  | : Alman Standartları Enstitüsü           |
| STL  | : Üç Boyutlu Model Dosya Transfer Biçimi |

|                       |                     |
|-----------------------|---------------------|
| CFS                   | : Kritik Katı Oranı |
| CLS                   | : Kritik Sıvı Oranı |
| CLF                   | : Kritik Sıvı Oranı |
| KE                    | : Karbon Eşdeğer    |
| $\mu\text{m}$         | : Mikrometre        |
| Mpa                   | : Mega Pascal       |
| GPa                   | : Giga Pascal       |
| $\text{Fe}_3\text{C}$ | : Sementit          |



## 1. GİRİŞ

Ergitilmiş sıvı metalin hazırlanmış kalıp boşluğuna doldurulmasını takip eden katılaşma ve soğuma işlemleri döküm yönteminin temelini oluşturmaktadır. Döküm yönteminin ilk ve en önemli aşaması ise sıvı metalin kalıp boşluğunu eksiksiz bir şekilde doldurmasıdır. Döküm uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan sorunlardan bir tanesi, ergimiş metalin kalıp içerisinde yeterli oranda ilerleyememesi ve kalıp içini yeterince dolduramamasıdır. Problem, kalıp içerisindeki ergimiş malzemenin kalıbın yüzeyleri ile temas halinde olması, kalıp alanının yüksek ısı iletim katsayısı ve ergiyik hareketi sırasında ergimiş malzemenin hızlı katılaşması ve soğuması nedeniyle oluşur. Bu nedenle sıvı metalin akışkanlığı, metalik malzeme ve alaşımın yolluktan geçebilmesi ve kalıbı zamanında tam olarak doldurabilmesi, sorunsuz döküm üretimi için çok önemlidir. Alaşımın kimyasal içeriği, kalıbın tasarımı, ergimiş malzeme ısıl düzeyi ve ilave alaşımlar, aşılama işlemi, küreselleşme, grafit boyutu düşürme ve diğer döküm uygulama koşulları gibi farklı nedenler sıvı metalin akışkanlığını etkilemektedir. Dökme demirler en yaygın kullanım alanı bulan döküm malzeme grubu içerisindeki yeri ve önemini halen korumaktadır. Dökme demir tanımı incelendiğinde Fe, Si ve C ana alaşım elementlerinden oluşan malzemeler olarak karşımıza çıkmaktadır (Kaya, 2019).

Dökme demir malzemelerde C (karbon) oranının çoğu katılaşma aşamasında içerikten uzaklaşır ve dökme demirlerin mikroyapılarında farklı bir yapıda olduğu görülür. Karbon elementinin dönüştürdüğü yapı ve özellik dökme demir malzemenin içeriğini oluşturmakta ve bunun sonucunda mühendislik özelliklerini etkilemektedir. Dökme demirlerde farklı yapıların meydana gelmesini, içerik kimyası, soğuma hızı, döküm sıcaklığı, imal usulleri , imalat sonrası ısıl işlem parametreleri gibi farklılıklar etkilemektedir. Dökme demir malzemelerin özelliklerinin meydana gelmesinde, mikro yapılarda oluşan fazların etkisi büyüktür (Çolak vd., 2018).

Sfero (KGDD) dökme demir, döküm aşamasından önce ergimiş malzemeye Mg ve Ce gibi küçük miktarlarda küreselleştirici katkı maddelerinin ilave edilmesinin bir sonucu olarak çelik benzeri bir matris içinde döküm şeklinde dağılan küresel grafitten oluşur. Sfero (KGDD) döküm, çelik malzemenin mühendislik özellikleri olan yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk gibi özelliklerinin yanı sıra düşük bir ergime noktasına, iyi akışkanlığa ve iyi işlenebilirliğe sahiptir, bu özellikler, demir dökümde en çok tercih edilmelerinin temel nedenleridir (Theuwissen vd., 2016 ; Gouveia vd., 2017).

Dökme demir uygulamalarında akışkanlık, metal malzemenin belirli bir sıcaklıkta

belirli bir uygulama kalıbına döküldüğünde katılaşmaya başlamadan, diğer bir deyişle sıvı metalin kalıp boşluğunu tamamen doldurmadan önce kat ettiği mesafedir. Gerekli akışkanlığa sahip olmayan metaller, özellikle kalıbın daha ince kısımlarında hatalı döküm üretimlerine sebep olabilmektedir (Campbell, 2003; Kharkiv, 2013). Akışkanlık, sıvı fazdaki metalin katılaşmadan önce ne kadar hareket edebileceğini göstermek için kullanılır. Akışkanlık, alaşımlı dökümün önemli bir özelliğidir (Vignesh vd., 2016). Yüksek sıcaklık bütün metalik malzemelerin ve alaşım malzemelerin akışkanlık oranını yükseltirken, döküm içerisindeki ametal elementler akışkanlık oranını düşürür ve kalıptaki ilerlemeyi durdurur. Oksijen (O), krom (Cr) ve kükürt (S) miktarı arttıkça dökme demir malzemenin akışkanlığı azalır; silisyum (Si), karbon (C), fosfor (P), bakır (Cu), alüminyum (Al) ve manganez (Mn) miktarı arttıkça artmaktadır (Kharkiv, 2013).

KGDD'lerde akışkanlık, döküm malzemenin doldurma özelliğidir; esas olarak alaşımın etkinliği, dökümün proses performansı, dökümün şartları ve yapısal durumu gibi faktörlerden kaynaklanmaktadır. Döküm işleminde akışkanlığı ölçmek amacıyla bazı yöntemler kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; spiral numuneler, U-şekilli numuneler, çubuk numuneler ve küresel numuneler olarak sıralayabiliriz. Akışkanlık durumunu kontrol amacıyla genelde kullanılan yöntemler, vakum akışkanlık testi ve spiral testi kullanılır. İlk test, metalin bir vakum pompası kullanılarak potadan çekilirken ince kanaldan geçtiği sürenin uzunluğunu ölçmektir. Diğer test, metalin sarmal kalıpta hareket edebileceği mesafeyi belirler (Campbell, 2003; LMC, 2019; Sabatino ve Arnberg, 2013).

Akışkanlığı etkileyen metalurjik faktörleri; kimyasal bileşim, yüksek ısı, kakıp sıcaklığı, oksit film, yoğunluk, ergiyik yüzey gerilimleri, ergime noktası ve katı hale dönüşme şeklinde sıralayabiliriz. Döküm işlemi faktörleri ise; yüzey ısı iletim katsayısı, kalıp ısı değeri ve kalıp iletkenliğidir. (Sabatino ve Arnberg, 2013; Saxena ve Sharma, 2017).

Aşılama, dökme demirin pürüzsüzlüğünü ve nihai özelliklerini iyileştirmek için etkili bir işlemdir, aşırı soğumayı en aza indirerek ve grafit kürelerini büyütme yöntemi olan KGDD için grafit oluşumunu yükseltip dökümün mikro-yapı durumların tespit etmeye yönelik yöntemdir. Aşılama, döküm yapısının dengeli karışımını artırıp ve karbür oluşturan lamelleri veya çıkıntılı açılımları ortadan kaldırmaya yardımcı olduğu için çok önemlidir. Bir aşılama, sonraki katılaşma sırasında grafiti çekirdeklendirmek üzere dökümden hemen önce ergimiş demir için uygun bir faz sağlayan bir malzemedir. Genelde aşılama malzemesi olarak grafit, ferro-silisyum ya da kalsiyum silisyum bazlıdır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan aşılama malzemeleri; Alüminyum, Baryum,

Kalsiyum, Stronsiyum ve Zirkonyum vb. düşük oranda elementlerden oluşan ferro-silisyumdur (Seidu ve Rıpaşan, 2011).

KGDD, döküm işleminden önce ergimiş malzemeye az miktarda Mg ya da Ce gibi küreleştirici element ilavesiyle aşılama sonrası C' un grafit kürelerine dönüştüğü dökme demir çeşididir. KGDD'ler, Lamel grafitli dökme demirlerin önemli avantajları olan düşük ergime sıcaklığı, iyi akışkanlık, işlenebilirlik özelliklerine sahip olmasının yanında çelik malzemenin mühendislik özellikleri bakımından avantajı olan iyi derecede mekanik özelliklere sahiptir. KGDD malzemeler dökme demirler arasında yaygın kullanılırlar (Fredriksson vd., 2005).

Bileşim, kalıplama durumuna göre farklı ölçülerde oluşur. Genelde aşılama takviyesi bir fırında, kepçede veya kalıp içinde oluşabilir. Aşılama işlemi dökümün mühendislik özelliklerini (kuvvet ve uzama) iyileştirir (Koch ve Soulas, 2014). Karadeniz vd. (2007), dökme demir üretiminde farklı oranlarda çeşitli bileşimler kullanarak GGG-60 malzemesi ile döküm deneyleri yapmış ve üretilen malzemenin iç yapısını ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Daha ince tane boyutuna sahip numunelerin, daha büyük tane boyutuna sahip malzemelere oranla yüksek mühendislik değerler sergilediği anlaşılmaktadır (Karadeniz vd., 2017).

Bir metalin akışkanlığı, erime noktasının üzerindeki sıcaklıklarda artmasına rağmen, aşırı sıcaklık artışı birçok olumsuz etki oluşturabilir. Farklı reaksiyonlarla sıvılardan alaşım elementlerinin uzaklaştırılması, kalıp deformasyonu ve tane büyümesi gibi etkiler gözlemlenebilir. Bunun için optimum sıcaklık değeri belirlenmelidir. Döküm, ergime noktasının 100 °C ile 150 °C üzerindeki sıcaklıklarda yapılmalıdır. Dökme demirde karbon eşdeğerini artıran elementlerin eklenmesi akışkanlığı olumlu yönde etkiler (Aslandoğan, 2009). Han ve Xu (2005) yaptıkları çalışmada, akış mesafesinin alaşımı katılaştırma ısı değerleri ile ters orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Deneyler sonucunda, katılma noktası sınırının azalmasıyla alaşımın viskozite değerinin arttığını belirlemişlerdir. Ancak bu ilişkinin yüksek basınçlı döküm durumunda geçerli olmadığını belirtmektedirler (Han ve Xu, 2005).

Literatürde akışkanlığı etkileyen parametreler üzerine çeşitli alaşımlar üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Haque (2007) araştırmasında, hazırlanmış bir kalıba iki farklı döküm malzemesini değişik kalıp özelliklerine sahip 1 m uzunluğunda akış simülasyonu kullanarak dökümü ve kalıpların akış uzunluklarını ölçmüştür. Deneysel sonuçlara göre, Fe-C-2Si dökme demirin hareketli mesafesinin, kesit ölçülerine bağlı olmadan Fe-C-2Al dökme demirden daha büyük olduğunu göstermektedir (Haque, 2007). Aslandoğan (2009) yaptığı çalışmada AISI 1040 alaşımsız çeliği belirli döküm koşulları altında

helisel bir kalıpta dökerek akışkanlığını ölçmüştür. Son olarak alaşım bulunmayan çelik malzemeye farklı oranlarda Cr ve Ni ilavesiyle benzer imalat koşullarında akışkanlıkları ölçülmüştür. Sonuç olarak döküm tekniklerinde akışkanlığı artıran en önemli faktör sıcaklık olup, döküm çeliklerinde alaşımsız çeliklere Cr ve Ni ilavesinin dökümlerin akışkanlığını arttırdığı gözlemlenmiştir (Aslandoğan, 2009). Yang vd, (2016), Ni ve Si içeriğinin Al-Ni-Si alaşımının akıcılığı üstündeki etkisini kalıcı bir spiral kalıpla incelenmiştir. Al-Ni-Si alaşımının akışkanlığının, Si %3'ten düşük olmasında ve Ni %2 ila %6 arasında değiştiğinde Si ve Ni içeriği ile arttığını gözlemledi (Yang vd, 2016).



## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Dökme Demirler

Ham demirin (pik) fırınlarda ergitme işlemiyle bazı üretim proseslerinin değiştirilmesi sonucunda kalıba dökülmesiyle ve kalıbın boşluğunun şekline göre katılma işleminin oluşturduğu malzemelere Dökme Demirler tanımı yapılır (Yılmaz, 2003). Dökme demir malzemeler, çeliğin özelliklerine benzerler ve demir-karbon alaşımları olarak sınıflandırılırlar. İçeriğinde %2.14' e kadar C mevcut ise çelik; %2.14'ten %6.67'ye C oranı mevcutsa malzeme dökme-demir şeklinde tanımlanır. Bununla birlikte, fazla oranda C ihtivası malzemeyi son derece kırılma hale getirdiğinden, dökme-demirlerde ağırlıkça %2.14 - %4.0 karbon ve ağırlıkça %0.5 - %3 arasında silisyum bulunur. Dökme demirlerde herhangi bir çelikten daha düşük bir ergime sıcaklığı değeri bulunur ve bu da dökümü standart çeliklerden daha kolay üretilebilir hale getirir. Dökme demir malzemeler oksidasyonun etkilerine dirençlidir. Yapısal malzemeler için istenmeyen bir durum olan kırılma olma özelliği gösterirler, ancak esneklikleri ve kalıplama kolaylığı, onları yapısal olmayan uygulamalar için mükemmel seçimler haline getirir (Eisenmann, 2015).

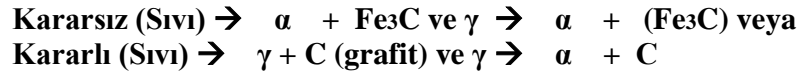
Dökme demir malzemeler çok farklı değerlerde mukavemet, sertlik, korozyona karşı direnç, kolay işlenebilme, aşınma dayanımı ve titreşim sönmeme gibi özelliklere sahiptir. Bu özelliklerden dolayı dökme demir malzemeler çok geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Geniş kullanım alanına sahip olmalarının diğer bir önemli sebebi de düşük maliyetle üretilebilmeleridir (Çolak vd., 2018)

Dökme demir malzemeler çok yüksek miktarlarda üretilebilme oranına sahiptirler. Ancak, sünek olmadıklarından dolayı şekillendirme işlemi son derece sınırlıdır. (Yılmaz, 2003).

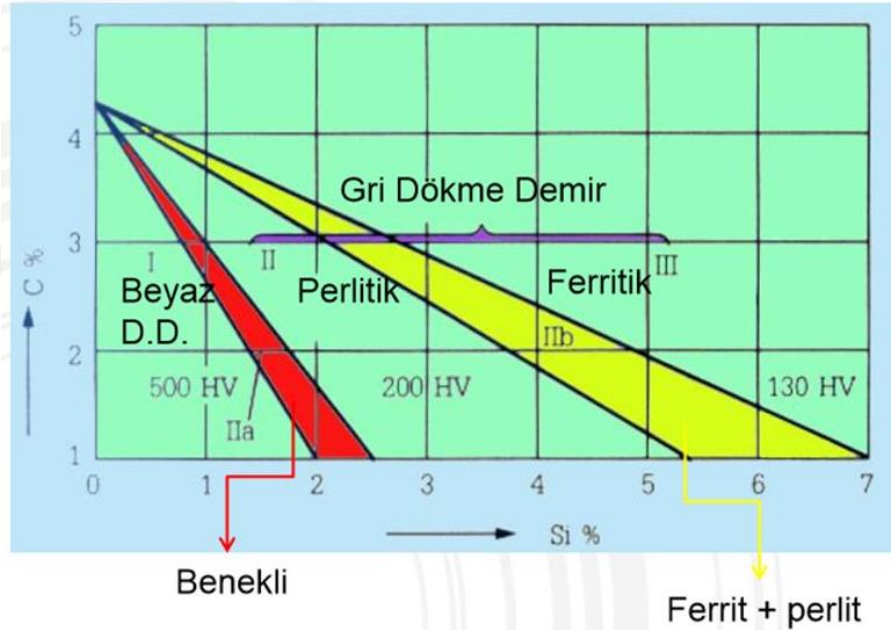
Kimyasal bileşiminin yanı sıra özellikle soğuma hızları ve alaşım elementleri etkisiyle iç yapının oluşumu bozulabilir. Bu sebeple iç yapı kendisini oluşturan faz yapılarına göre isimlendirilir, fazların şekil ve oranları belirlenir ve genel özelliklerinde değişiklik sağlanır (Demirci, 2004).

Malzemede, normal hızlı soğutma altında kararsız katılma için gerekli olan kararsız Fe<sub>3</sub>C'nin α fazı oluşur. Malzemenin kırılmış yüzeyi gümüşü beyaz olduğu için beyaz dökme demir olarak adlandırılır. Kararlı katılma (farklı oranlarda α ve C fazlarıyla meydana gelen) alaşımlara gri dökme demir (grafitin etkisiyle kırılma yüzeyinin kararması nedeniyle) denir. Aynı karbon içeriğinde katılma ve dönüşüm

sonrası;



sistemlerinden hangisiyle gerçekleşeceği (LGDD veya BDD'lerden hangisini oluşturacağı), faz dönüşümlerinin gerçekleştiği soğuma hızıyla, alaşım malzemelerinin cinsiyi ve orantısıyla bağlantılı olur (Şekil 1) (Demirci, 2004).



Şekil 1. DD'lerde Si (Silisyum) ve C(Karbon) değerleriyle mikro-yapı oluşumu (Maurer Diyagramı) (Demirci, 2004).

Soğumanın hızlı olmasıyla Mangan, Krom, Molibden, Vanadyum vb. elementler kararsız katılaşma oluşturur. Soğumanın kontrollü olması (fırın ortamında) ya da yüksek ısılarda tutularak soğutulma işlemi ve genellikle Silisyum, Alüminyum, Nikel, Bakır ve Titanyum' un bulunması, (artan Karbon orana bağlı) grafitin oluşmasına neden olur (Demirci, 2004).

Tablo 1. Başlıca dökme demir malzemelerin kimyasal içerikleri

|         | C       | Si           | S            | P            | Mn           | Fe    |
|---------|---------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------|
| B. D.D. | 2.5-4.0 | 0.4 -1.6     | 0.15         | 0.4          | 0.3-0.8      | Kalan |
| G. D.D. | 2.0-4.0 | en düşük 1.0 | 0.2          | 0.6          | en fazla 1.0 | Kalan |
| T.D.D.  | 2.0-3.0 | 0.9 -1.8     | en fazla 0.2 | en fazla 0.2 | 0.25-1.25    | Kalan |
| K. D.D. | 2.5-4.0 | 0.4 -1.6     | en fazla 0.2 | 0.4          | en fazla 0.8 | Kalan |

## 2.2. Dökme Demirlerin Bileşenleri

**Grafit:** Karbon, dökme demirin cinsine göre BDD veya grafit (LGDD, soğuk dökme demir, KGDD) şeklinde bulunur.

**Sementit:** Demir-karbür ( $Fe_3C$ ) intermetalik bir bileşik olduğu için çok sert ve kırılgandır.

**Ferrit:** Çok az karbon içeren (oda sıcaklığında %0.02) çok yumuşak bir yapıdır.

**Perlit:** Ötektoid bir bileşendir. Bu, ferrit katmanları sementit katmanlarının üzerine geçtiğinde olur. Sertliği ve mukavemeti ferritten üstündür.

**Steadit:** Bir demir- fosfat ( $Fe_3P$ ) bileşiğidir. Çok sert ve gevrektilir.

**Ostenit:** Adi dökme demirlerde,  $750^{\circ}C$ 'nin üzerinde görülen yüzey merkezli kübik Fe - C kristal şeklindedir.

**Ledeburit:** Ötektik yapının özel halidir. Dökme demirler genellikle üstteki yapıdan iki veya daha fazla durum gösterirler. Üstte belirtilen yapı bileşenleri zamanda çeliğin yapısında da bulunur.

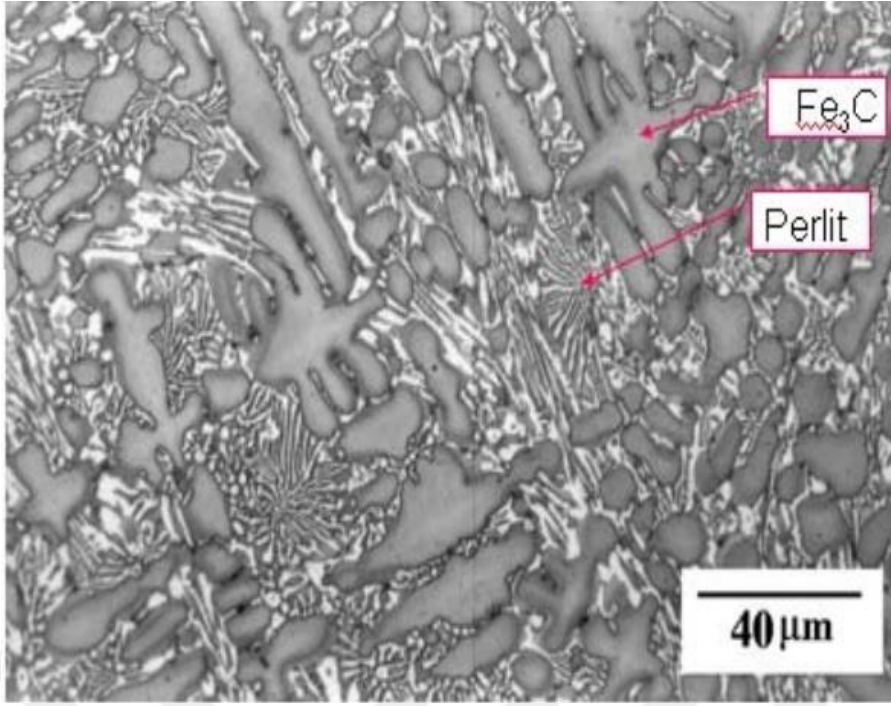
## 2.3. Dökme Demirlerin Türleri

### 2.3.1. Beyaz Dökme Demirler

Bu döküm çeşitleri, kalıbın içerisinde malzemenin hızla soğuması neticesinde (C) karbonu malzeme içerisinde tutması sonucu üretilmiştir. Hızlı soğuma lamel grafitli malzemelerde olduğu gibi karbonun grafit yaprağına benzer oluşmasına engel olur. Bu nedenle C, Fe, Cr ya da Mo ile birleşmesini sağlayarak karbür oluşturur. Oluşturulan ( $Fe_3C$ ), kırılgan yapıdadır. Dökme-demir malzemeler genellikle ( $Fe_3C$ ) oluşumundan kırılganlar. Kırılmış yüzey beyaz renktedir, döküm malzemelere **beyaz dökme demir** tanımı yapılır. BDD' ler genelde kaynaklı imalata uygun değildir, nedeni malzemedeki sıcak-gerilme değişimleriyle oluşan düzensiz yapıya ve yetersiz süneklik katsayısına sahip olmalarıdır (Anonim, 1984).

Lamel grafitli dökme demir, sıvı faza dönüştüğünde, (C) karbon, döküm içerisinde tamamen çözünür, sonunda kimyasal olarak malzemeye katılır. Sıvı haldeki malzeme hızla soğursa, iki element birleşir ve BDD üretilir. Döküm içerisinde %2.5-%4.5 aralığında C oranı değişir. BDD serttir kırılgan yapıdadır, genelde işlenemez ve parlak yüzeye sahiptirler (Maine Welding Company, 2019).

Sementit yapı sert ve kırılgan bir bileşiktir. Beyaz dökme demirde bulunan yüksek karbür fazı oranı nedeniyle, tüm beyaz dökme demirler serttir ve aşınma dirençleri yüksektir. Çok kırılgan ve işlenmesi zordur. Bu nedenle kullanım alanı sınırlı olmuştur. Aşınmaya dayanıklı olduğu söylenen eksantrik milleri ve makaralı silindirler, beyaz dökme demirden yapılmış mekanik parçaların birkaç örneğidir.

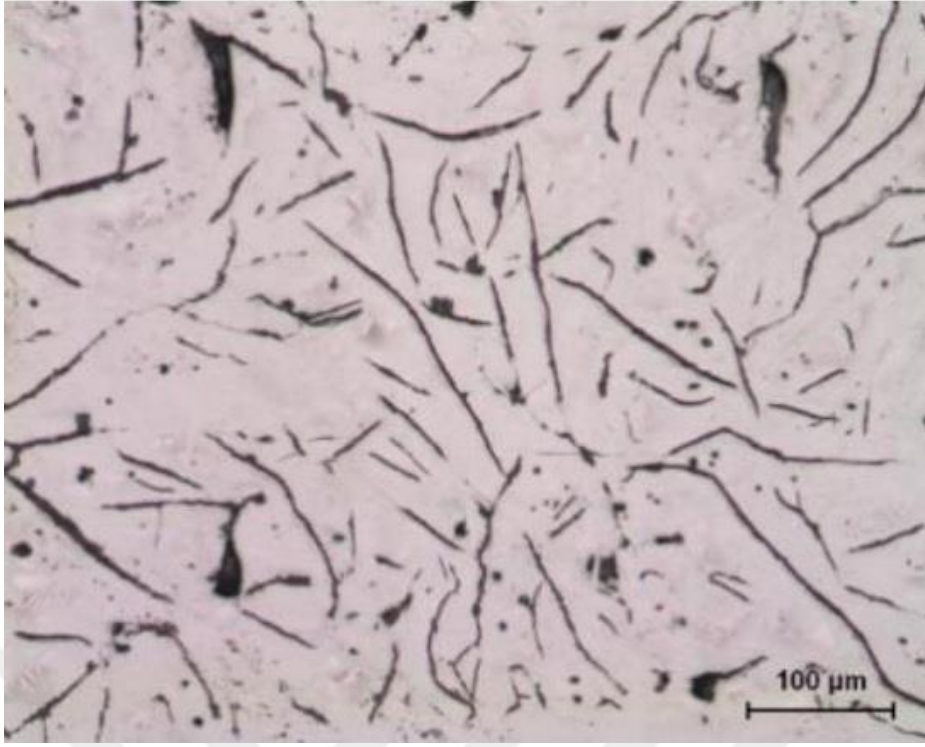


Şekil 2. B.D.D. 'in mikro-yapı görünümü (Yalçın, 1999).

### 2.3.2. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirler

En fazla kullanım alanına sahip dökme-demir türüdür. İçeriğindeki karbon elementinin çoğunluğu serbest grafit lamel oluşumu şeklindedir.

Gri demir, ötektik sıcaklıklarda östenitik, katı çözeltide bulunması gerekenden daha fazla karbonun (C) bulunduğu ve karbonun (C) grafit lamelleri olarak çökeldiği bir Fe, C ve Si alaşımıdır. Gri dökme demir, ana bileşen olarak % 4.5 ila % 1.7 C ve %3 ila % 1 Si içerir (Herring, 2004). L.G.D.D. mühendislik özelliği dökümün ve grafitin oluşum durumuyla ilgilidir. Karbon oranının yükselmesi ile beraber dökümün mekanik özellikleri artar. L.G.D.D.' ler farklı özellikleri nedeniyle mühendislik uygulamalarında geniş kullanım alanına sahiptir. Titreşim sönümlenme kabiliyeti, yüksek mukavemeti ve düşük üretim maliyeti önemli özellikleridir. Grafit oluşumu Cu, Cr, Mo ve Ni vb. elementlerin eklenmesiyle meydana gelir ve malzemenin korozyona karşı dayanım kazandırır (Welding Handbook, 1984).

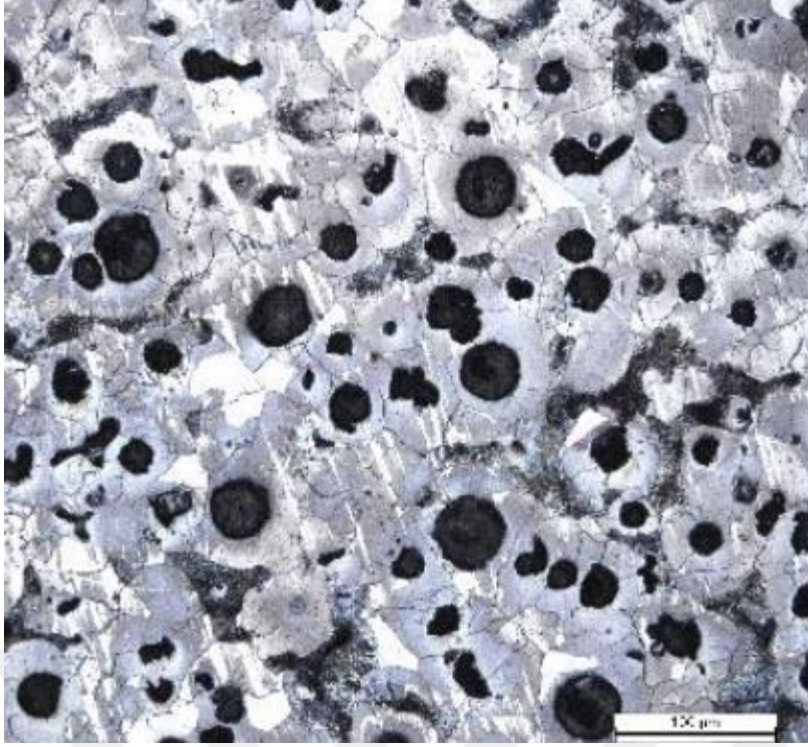


Şekil 3. Lamel grafitli (gri) dökme demirin mikro-yapısı (Çolak, vd. 2018).

### 2.3.3. Vermiküler (Kompakt) Grafitli Dökme Demirler

VGDD, LGDD ve KGDD arası benzersiz ara mekanik özelliklere sahiptir. Bu dökme demirdeki grafit parçacıkları, ötektik hücrelerde birbirine bağlı kısa, yuvarlak kümelerdir. "Vermiküler" terimi, sıkıştırılmış grafit malzemenin mikro-yapı formunu göstermek için tanımlanmıştır (Muhammed, 2011).

Dökme demir sektöründe günümüzde üretimin büyük kısmı LGDD ve KGDD malzemelerden meydana gelmektedir. Malzemenin kullanım alanına uygun olarak, dökülebilirlik, işlenebilirlik, titreşim sönümlene kabiliyeti ve ısıl iletkenlik istenilen uygulamalarda LGDD, ya da iyi seviyede mühendislik özelliklerle KGDD kullanılır. KGDD'e göre dökülebilirlik ve işlenebilirlik özelliklerinin iyi olması, VGDD'i KGDD'e göre daha kullanılabilir yapıyor.



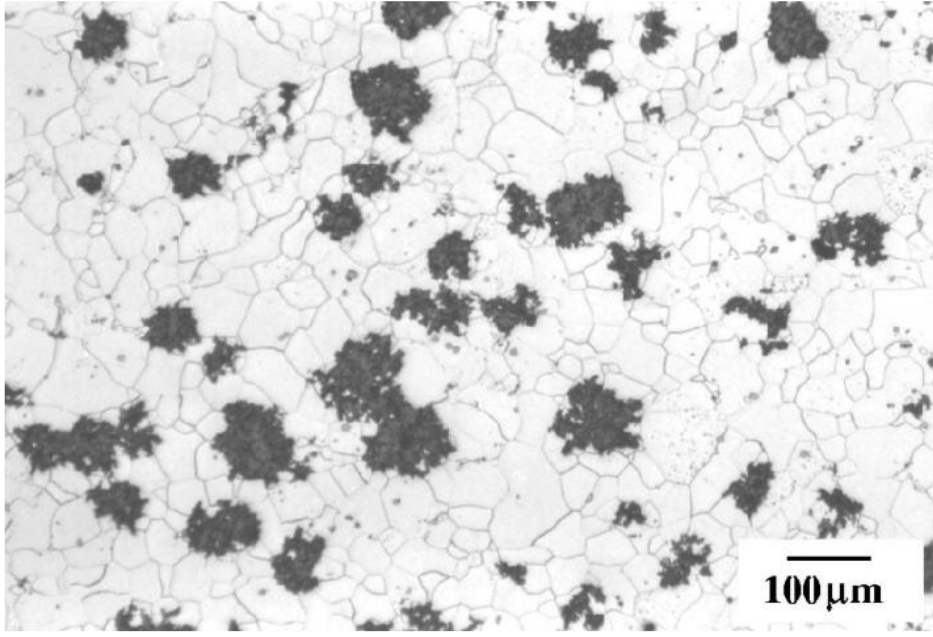
Şekil 4. Vermiküler (Kompakt) grafitli dökme demirin mikro-yapısı (Karatay ve Hasırcı, 2018).

#### 2.3.4. Temper Dökme Demirler

Karbon oranı düşük çeliğin özellikleri görülen ve BDD' in ısıtılıp soğumasıyla üretilen ve 900 – 950 °C' ye ısıtılıp sonra kontrollü soğumasıyla üretilen dökme demir çeşididir. Bu özelliğiyle LGDD' e göre maliyeti yüksek, çeliğe göre düşüktür.

Mikro yapısında (yaklaşık %3-3.5) oranında karbon olan beyaz dökme demire, uzun süreli yüksek derecede ve oksitli ortamlarda ısıtılıp soğutulursa, TDD üretilir.

Bu özellikler yüzeyin (4 mm) yakınında daha belirgindir. Bunun nedeni, oksitleyici ortamın, sıcaklığın etkileri ve yanma nedeniyle yüzeye yakın karbon miktarının azalması ve heterojen bir yapı oluşmasıdır.



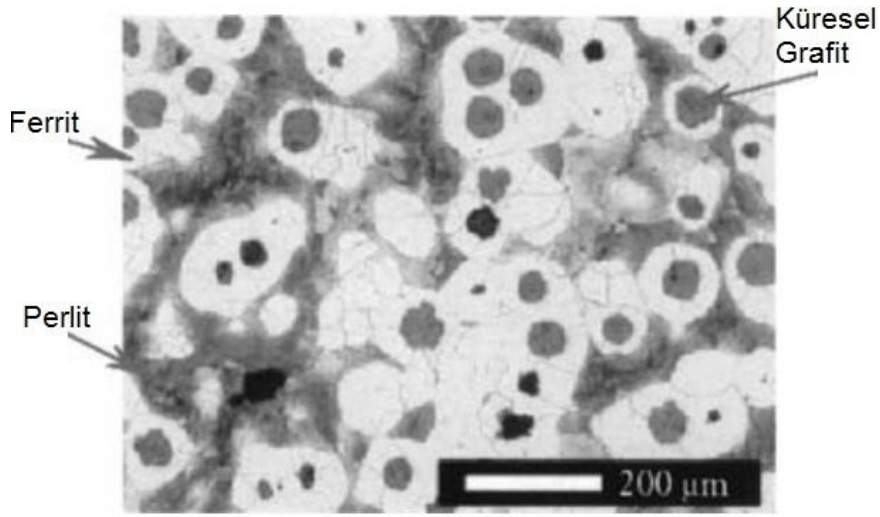
Şekil 5. TDD mikro-yapısı (Sağlam, 2009).

### 2.3.5. Küresel Grafitli Dökme Demirler

Sfero (KGDD) dökme demirin bir ürün olarak üretimi, 7 Mayıs 1948'deki "Amerikan Foundry Association of Philadelphia, Pennsylvania" toplantısına kadar uzanmaktadır. Krom gibi bazı maddelerin önemli bir malzeme olarak gereksinimi ortaya çıkmaya başlamıştır. Bu element yerine magnezyum, karbon ile karbür oluşturduğu bilinen ve tahmin edilen diğer elementlerle test edildi. Başka bir çalışmada, Ni içeriğiyle martensitik BDD üretim işleminde Mg kullanımıyla farklı sonuçlarda elde edilmiştir (Gagnebin, 1973).

Dökme demir setöründe Sfero olarak da bilinen küresel grafitli dökme demirler sünek, dövülebilir ve grafit yapısı küre şeklindedir. Grafit yapısından dolayı küresel grafitli dökme demir olarak adlandırılır. Küresel grafit, dökme demirlere sünek özellik kazandırır. Küresel grafitli dökme demir, üstün mühendislik özellikleriyle özel gereksinimleri aynı anda karşılaması için tasarlanan detaylı şekillere sahip parçalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Gouveia vd., 2017).

Karbonun lamel yapıdan küresel şekile dönüşümü için ergiyik malzeme, döküm işleminden önce aşılama işlemi uygulanır. Küresel oluşum katılaşmayla oluşturulduğu için T.D.D. den farklı özelliktedir. Aynı zamanda grafit yapının lamel değilde küresel yapıda olması malzemede sünek ve mukavemetli bir yapı oluşturur.



Şekil 6. Küresel grafitli dökme demirin mikro yapısı (Minnebo vd., 2006).

Grafit yapıyı kürelere dönüştürmek için ergimiş malzemeye adüşük oranda Mg ya da C eklenebilir.

Tablo 2. Küresel grafitli dökme demirin kimyasal bileşimi

| % BİLEŞİM |      |             |
|-----------|------|-------------|
| Karbon    | (C)  | 3.00-4.00   |
| Silisyum  | (Si) | 2.00-3.00   |
| Mangan    | (Mn) | 0.10-0.90   |
| Fosfor    | (P)  | 0.10 Max.   |
| Kükürt    | (S)  | 0.03 Max.   |
| Magnezyum | (Mg) | 0.030-0.080 |

İçerikte bulunan karbonun (C) oranı yükseldikçe alaşım mukavemeti düşer. P hem (LGDD) malzemelerde hem de sfero (KGDD) malzemelerde alaşımları kırılğan yapan bir elementtir. Bu nedenle alaşımdaki fosforun (P) minimum miktarda (yaklaşık %0.10) tutulması gerekmektedir. Manganez (mn) bir grafitleştirici elementdir. Bileşimdeki manganez (Mn) miktarı, alaşımın sertliğini ve kırılğanlığını artırmamak için en fazla yaklaşık %0.50 olmalıdır. Kükürt, küreselleştirici elementlerin etkilerini azaltmadığı için sfero döküm oluşumunda en az kullanılan elementtir. Bileşim %0.02'yi geçmemelidir.

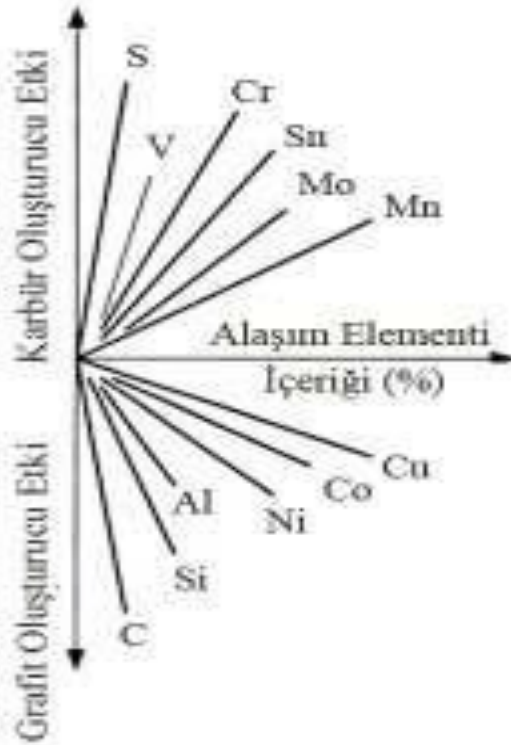
#### 2.4. Küresel Grafitli Dökme Demir Oluşumuna Alaşım Elementlerinin Etkisi

KGDD' in bileşiminde kullanılan başlıca element olarak C ve Si vardır. C, hurda malzemelerden ve içeriğinde C bulunan malzemelerle grafitlerin oluşumu gerçekleşmektedir.

KGDD' e eklenen alaşım elementlerinin türleri ve miktarları büyük önem taşımaktadır. Küresel grafitli dökme demire eklenen en önemli alaşım elementleri karbon (C) ve silisyumdur (Si). Karbon içeriği %3 ila 4% arasındadır. Öte yandan, kesit kalınlığı 1.2 ila 2.5 cm olan parçalar için silisyum oranı kimyasal işleme ve aşılamaya bağlı olarak %1.8 ile %2.9 arasında olmalıdır. Sfero (KGDD) dökme demirlerin Karbon Eşdeğeri (KE) tipik olarak %4.3 ile % 4.65 arasında değişir. Kesit oranı arttıkça Karbon Eşdeğeri azalır. Bunun nedeni, kalın kesitli ve yüksek karbon eşdeğerliği'ne sahip bir küresel grafitli dökme demirlerde, döküm parça üst yüzeyinde karbon yüzmesi olayının oluşmasıdır. Si, grafit ve ferrit oluşturan, C aktivitesini artıran ve grafit oluşumunu teşvik eden güçlü bir elementtir (Seyfi, 2006).

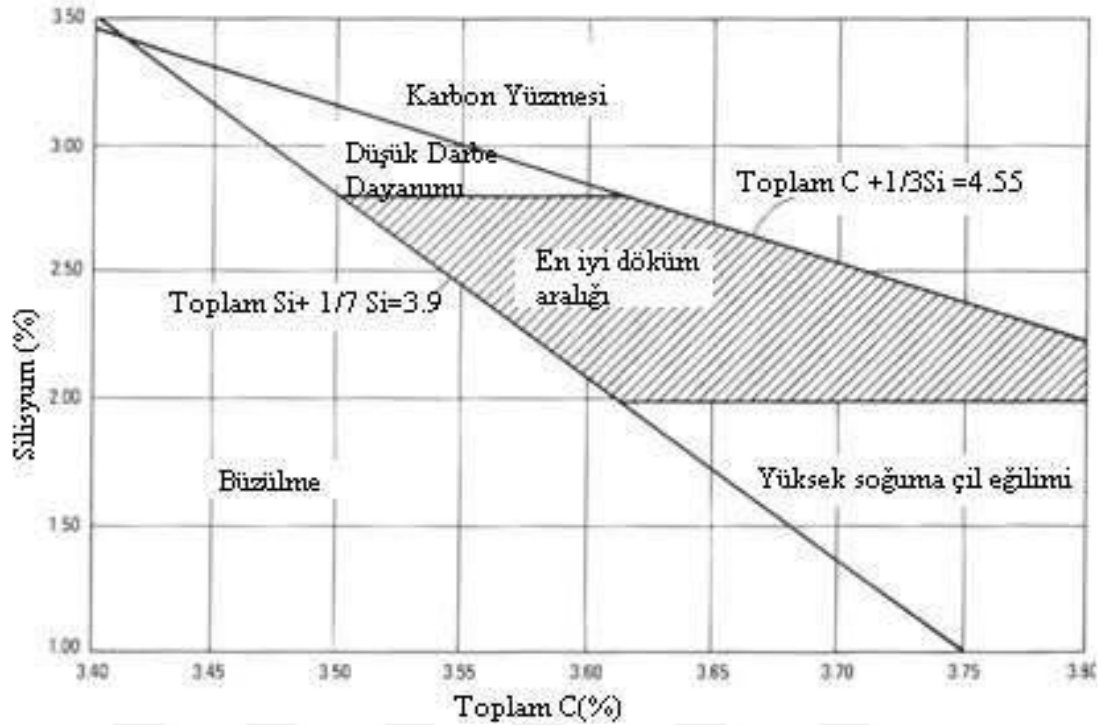
Kesit kalınlığı 25 mm veya daha fazla olan dökümlerde, Mn'ın karbür oluşturuocu etkisi, Si miktarındaki artışla dengelenir. 12 mm kesit kalınlığı için Si içeriğinin %2.5'ten %3.0'a yükseltilmesi, Mn içeriğinin %0.25'ten %0.35'e düşürülmesine olanak tanır. Bu tip Mn artışı, kalın kesitli dökümlerde segregasyon nedeniyle oluşur. Mn tercihen sıvı içinde ayrılır. Katılaşma hızı azaldıkça bu ayrılma belirginleşir.

KGDD' lere kimyasal içeriğinin C katılaşmasını önemli oranda değiştirdiği biliniyor. Alaşım elementleri genelde karbür ve grafit yapıcı şeklinde iki farklı durum gösterir.



Şekil 7. Alaşım elementlerinin Küresel grafitli dökme demirlerde grafit ve karbür oluşturuocu etkileri (Ovalı, 2012).

**Karbon:** İstenen katılaştırma koşullarını sağlamak amacıyla KGDD bileşiminde genelde %3.6'dan azdır. C içeriğinin artırılması, küre grafitlerin ölçülerini yükseltirken, mekanik özellikleri düşürür (Akay, 2007).



Şekil 8. KGDD'lerde en iyi döküm aralığının şematik gösterimi (Akça, 2005).

**Silisyum:** Si elementi, ferritik matristeki sertliği artırır. Bu durum ısıl işlem yapılmış malzemede daha belirgin olur. Si (silisyum)' un KGDD lerde olumsuz etkilerinden biri çentik darbe değerini düşürmesi, geçiş sıcaklığını yükseltmesi ve ısı iletkenlik kat sayısını azaltmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda döküm performansını artırır. Oksidasyonu ve karbür oluşumunu engeller. Si (silisyum) un grafitleştirici ve grafit sayısını artırıcı etkisinin yanında %4 oranında mukavemet değerlerine ve süneklik özelliklerine etkisi vardır. Bundan dolayı Si, ferritik yapı oluşurken genelde %2.2'den az ve perlitik yapılar oluşurken % 2.5 - % 2.8 aralığında olması gerekir (Ingole vd., 2012).

**Bakır:** Genel olarak, küresel grafitli dökme demirin tamamen perlitik bir yapı sergilemesi için %1 bakır ilavesi yeterlidir. Bakır (Cu) orta seviyede grafitleştirici maddedir. Bakır (Cu), karbonun ostenite difüzyonunu yavaşlatarak perlit oluşumunu destekler. Mo-Ni ile birleştirildiğinde sertliği azaltır (Labrecque ve Gagné, 1998).

**Nikel:** Östenit oluşturucu bir element olduğu için östenitik dökme demir üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Perlit oluşturucu bir element olarak kabul

edilmese de düşük seviyelerde perlit oluşumuna yardımcı olur ve perlit yapısının seyrelmesini sağlar.

**Kalay:** Kalay, bakırdan çok daha güçlü bir perlit yapıcı özelliğe sahiptir. Bu nedenle çok daha düşük oranda kullanılmalıdır. Normal olarak, yapıyı tamamen perlite dönüştürmek için %0.1 ila %0.15 kalay ilavesi yeterlidir. Bu elementin aşırı kullanımı grafitin lamelleşmesine neden olabilir.

**Manganez:** Perlitik yapının oluşmasına yardımcı olan bir diğer elementtir. Ancak yapıda karbür oluşması durumunda, bu karbürlerin yapısına da eklenebilir. Güçlü bir perlit oluşturan alaşım elementidir. Manganez, kükürtün olumsuz etkilerini dengelemek için kullanılır.

**Molibden:** Perlit yapıyı güçlendiren Mo, yüksek katılma özelliğiyle genelde az miktarda, bakır ve nikel ile beraber ilave edilir. Fazla miktarda Mo ilave edilen alaşımlarda, tanelerarası bölgede karbür oluşumu görülür.

**Krom, Vanadyum ve Titanyum:** Etkili karbür oluşturuca olan Cr, karbür oluşum işlemini destekler ve malzemede çekme dayanımını, sünekliği ve işlenebilirliği azaltır. % Cr oranı ferritik KGDD oluşumunda %0.03'den az olmalıdır. Perlit yapıli malzemelerin üretim işlemindeyse başka karbür yapıcı element oranlarına göre %0.06 oranında olabilir. Vanadyum(V) benzer şekilde karbür oluşumunu destekleyen bir elementtir. Titanyum (Ti) da bu kapsamda bir diğer karbür yapıcı elementtir. Fakat titanyumu düşük miktarlarda kullandığımız zaman, küresel grafit parçacıklarını vermiküler yapıya dönüştürebilir. Bu özelliği nedeniyle titanyumun özellikle ince kesitli vermiküler döküm parçalarda kullanılır.

**Magnezyum:** Küresel grafitli dökme demirlerde Mg perlit oluşturuca olarak davranır. Malzemede dayanımın artmasına sebep olurken işlenebilirlik ve sünekliliği düşürür. Ayrıca tane sınırlarında segregasyonu artırır (Ovalı, 2012).

**Kükürt:** Kükürt oranının artırılması küreselleştirici olarak eklenen FeSiMg oranını yükseltici özellik gösterir. Mn/S miktarı ferritleşmeyi etkiler ve MnS grafit oluşumunda çekirdek görevini görebilir (Ovalı, 2012).

**Seryum:** Seryum (Ce), eser elementlerin küresel grafitin oluşmasına engel olan etkilerini ortadan kaldırmak ve aşılamaa yardım etmek için ilave edilmektedir. Ce miktarının %0.003-0.01 aralığında tutulması yeterli olmaktadır. Eser elementlerin miktarının çok düşük olduğu dökümlerde Ce, grafitlerin küresellik seviyesinde bozulma oluşturduğu için dezavantaj oluşturmaktadır (Ovalı, 2012).

## 2.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Türleri

Son yıllarda, küresel dökümlerin mikroyapısal analizlerine artan bir ilgi vardır. Araştırmalar, katılaşmayla beraber oda sıcaklık değerlerine soğutulduğunda mikro-yapı incelemelerine yoğunlaşmaktadır.

**Perlitik KGDD:** Bu dökme-demirler sert ve mukavemetlidirler. Çekme mukavemeti, gri dökme-demirin iki katıdır. Bu özellik, kesitlerinin kalınlığı en fazla 50 mm olabilen malzemelerde görülebilir. Bu malzeme sert ve iyi mühendislik özelliklere sahiptir (MEB, 2011).

**Ferritik KGDD:** Bu dökme-demir malzemeler, %0.2 Mg karbür alaşımı kullanılmasıyla yada perlitik dökme-demirin tavlama ile üretilirler. Başka bir yöntem olarak da ergimiş dökme-demirin düşük hızda soğutulması işlemidir. Demir çok yüksek bir uzama kabiliyeti gösterir.

**Östenitik KGDD:** Bu dökme-demirin mikro yapısında matris östenit ve az miktarda perlit fazından oluşur. %3.5'e kadar Ni içeren östenitik sfero (KGDD) dökümler çok iyi korozyon direncine ve yüksek mekanik mukavemete sahiptir.

**Ferritik / Perlitik KGDD:** Genellikle, yüksek kalitede üretilen sfero dökümlerdir. İşlenebilir olması ve üretim maliyetiyle öncelikli üretimler arasında yer alır (Bisht, 2009).

**Martensitik KGDD:** Fe<sub>3</sub>C oluşumunu önlemek ve soğuk ısıl işlemle küresel martensitik dökme demir üretmek için yeterli alaşım eklenir. Martensitik faz yapısı, maksimum mukavemet ve aşınma direncine sahiptir, fakat minimum seviyede sünekliğe ve tokluğa sahiptir (Shama, 2017).

**Beynitik KGDD:** Bu malzemeler, alaşımlama ve ısıl işlem uygulama ile elde edilen yüksek aşınma direncine sahip sertlik oranı yüksek malzemelerdir.

## 2.6. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mühendislik Özellikleri

KGDD' ler çeliklerin ve dökme demirlerin arasında özelliklere sahiptirler. Mekanik özellikleri çeliğe benzese de kimyasal ve fiziksel özellikleriyle dökme demire benzer. Bu nedenle geniş bir uygulama alanına sahiptirler. Dökme demirler, mukavemet, sertlik, korozyon direnci, işlenebilirlik kolaylığı, aşınma direnci ve titreşim sönümlenmesi gibi geniş özelliklere sahiptir ve sfero (KGDD) dökümün mekanik özellikleri oldukça iyidir. Yüksek korozyon direncine sahiptir. Talaşlı imalatla kullanımı çok kolaydır.

**Çekme Dayanımı:** Uygulanan ısıl işlem ve alaşıma bağlı olarak 40 kg/mm<sup>2</sup> ile 80 kg/mm<sup>2</sup> arası değere sahiptir. Çekme ve gerilme diyagramları, geleneksel dökümlerden

farklıdır ve çeliğin özelliklerine benzer. Akma noktası, temper dökümün akma noktasından çok daha yüksektir. Bu nedenle küresel grafitli dökme demir çok büyük yüklere dayanabilir. Küresel grafitli dökme demirin elastik özellikleri oldukça yüksektir (Karamusaoğlu, 2009).

**Yorulma Dayanımı:** Yorulma dayanımının, çekme dayanımına oranı olan dayanma oranı, dövme karbon çelikten daha yüksektir. Gerilme değişim katsayısı çeliğe göre daha düşük olduğu için şaft yapımına uygundur (Karamusaoğlu, 2009).

**Aşınma Direnci:** Bu özellikleri oldukça iyi seviyededir. Küresel grafitli dökme demir, dinamik ve statik yükler altında rastgele dağılmış gerilmelere karşı çok iyi bir dirence sahiptir. Bu nedenle dişli çarkların imalatında kullanılmaktadır (Karamusaoğlu, 2009).

**Titreşim Azaltma:** Grafit küresel bir şekle sahip olduğundan, titreşim sönümlenme özelliği gri dökme demirlerden daha iyidir.

**Termal Şok:** LGDD'lerin termal şok dirençleri düşüktür. KGDD'ler ise termal şoklara karşı dayanıklıdır. Ani ısı ile dökme demir çatlayabilir ve bu çatlak parçanın iç kısımlarına kadar ilerleyebilir. Ancak çatlağın ilerlememesi için çatlağın ucunda bir delik açılmalıdır. Bu yüzden çatlak ilerlemek için yeni bir başlangıç noktası bulmalıdır. KGDD'lerde ise, küresel grafit yapı olarak benzer bir görevi yerine getirir (Karamusaoğlu, 2009).

**Korozyon Direnci:** Korozyon ortamlarda korozyon direnci, gri dökme demir ile eşittir ve karbon çeliğinin korozyon direncinden daha iyidir. KGDD'lerin ani sıcaklık değişimlerine karşı direnci çeliklere ve lamel grafitli dökme demirlere göre iyidir (Yalçın, 1999). Küresel grafitli dökme demirleri beyaz ve lamel grafitli dökme demirle karşılaştırdığımızda, yüksek mühendislik özelliklerine sahiplerdir. Bunların elde edilmesi için Küresel grafitli dökme demirlere eklenen alaşımların türü ve oranı; Fe<sub>3</sub>C oluşumu, grafitin küreselleşmesini, dağılımını ve matris yapısını etkilediğinden çok önemlidir (Hasırcı, 2000).

## 2.7. Küresel Grafitli Dökme Demirlerinin Kullanım Alanları

KGDD, günümüzde farklı endüstriyel alanlarda yoğun olarak kullanılan bir malzemedir. Su, kanalizasyon ve basınçlı borular, bağlantılar, valfler ve pompalar küresel dökme demirden üretilebilir. Bu ürünlerin küresel dökme demirden yapılmasının avantajları; tokluğunun ve kaynak kabiliyetinin gri dökme demirlere göre daha iyi olmasıdır.



Şekil 9. KGDD malzemelerle üretilen çeşitli makine parçaları

## 2.8. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Aşılama

Aşılama işlemi; döküm uygulamalarında istenilen mikro-yapı özelliklerine sahip malzeme imalat için ergimiş metalin içerisine gerekli olan elementlerin eklenmesi işlemidir. Aşılama etkileyen faktörler, ergimiş metal içeriği ve sıcaklığıyla aşılama kullanılan elementlerin özellikleri ve miktarıdır. KGDD de ergimiş metal içerisindeki Silisyum yüzdesinin aşılama işleminde verilen Silisyum miktarının yüzdesi mikro yapının özelliklerini büyük ölçekte etki etmektedir. Bu yüzde çok yüksekse yani aşılama ile verilen Si yüzdesi az ise döküm malzeme kalitesi de düşüktür. Ergimiş metal içeriğinde Silisyum yüzdesi az ise grafit küre âdeti azalır ve böylece dökümde istenmeyen karbürler oluşur. Bu sebeple döküm işleminde aşılama yüzdeleri devamlı kontrolde tutulmak zorundadır.

KGDD de aşılama malzemenin kullanım amacı; imalat edilen döküm malzemenin uygun biçimde katılaşma oluşturmasını sağlayıp, grafit kürelerin çok büyümesine ve karbür oluşumuna engel olmaktır. KGDD’ de aşılama ile ince taneli küçük grafitler oluşur, böylece KGDD de kesit hassasiyeti küçültülerek grafit oluşumunu kontrol altına alabiliriz (Aydoğmuş, vd. 2019).

KGDD işleminde aşılama element eklenmesi sebebi katılaşmanın kontrolde tutulması, grafit oluşumlarının istenilecek seviyelerde olması ve karbür oranının azaltılmasıdır (Pearce, 2007). Dökme demirlerde aşılama etkisiyle çekirdeklenme artırılıp karbon atomlarının daha yeterli uzaklıklara ulaşması için gerekli zaman bulmasından ince taneli grafit yapılar oluşur (Skaland, 2005). Ne oranda aşılama ilave edileceği değişkenlere bağlıdır. Bu değişkenler dökümün ergimiş metalin birleşimi, sıcaklıkları, kalıp malzemeleri, parçanın kalınlığı, ergime ortamı ve döküm süresidir.

Genel olarak aşılama olarak kullanılan az oranda Ca, Ba, Sr, Zr ve Ce gibi elementlerden birkaçının oluşturduğu alaşımlardır. Aşılama genellikle ferro-silisyum alaşımlarından oluşmaktadır. Bu elementlerin yanı sıra Bizmut (Bi), Titanyum (Ti),

Mangan (Mn), Kükürt (S) ve Oksijen (O) gibi elementlerde aşılama elementlerinin kimyasal analizleri içerisinde bulunurlar

Kalsiyum (Ca); Özellikle birçok aşılama elementinin daha az etkili olduğu düşük kükürt içerikli lamel grafitli dökme demirlerin üretiminde etkilidir. Kalsiyum çok güçlü bir oksijen gidericidir. Birçok aşılama elementinin alaşımlarında bulunmaktadır (Koch ve Soulas, 2014).

Baryum (Ba); Çok sayıda nodul çekirdeği oluşturur, sönümlenmeye karşı dayanıklıdır. Ön aşılama element ve şartlandırıcı olarak kullanılır. Baryumlu aşılama elementleri ise, temel olarak Magnezyum tretmanının etkisi ve döküm süresini uzatmak için eklenmektedir. Bu nedenle Baryumlu aşılama elementleri, özellikle uzun döküm süresi gerektiren dökümhanelerde tercih edilmektedir (Çetin, 2016).

Stronsiyum (Sr); Çil azaltmada çok etkili aşılama elementleridir. Çekirdek sayısına etkileri yoktur.

Bizmut (Bi) Küresel grafitli dökme demirde nodül sayısını arttıran çok güçlü bir elementtir (Koch ve Soulas, 2014).

Zirkonyum (Zr); Çok amaçlı aşılama elementleridir, mekanik özellikleri iyileştiren, orta ve büyük kesitlerde çok etkili aşılama elementleridir. Zr, aşılama sırasında çekirdeklenme için gerekli oksijenin ve kükürtün eklenmesiyle yüksek nodül sayısı oluşturması ve mükemmel çil giderme özelliğinin yanında herhangi bir Mg tretman yöntemiyle elde edilen tüm metallerde etkilidir. Azot ve Kükürt ile tepkimeye girebilen bir Oksijen gidericidir.

Seryum (Ce); Düşük kükürt içerikli baz metal veya şiddetli Mg reaksiyonu sonucu oluşan düşük çekirdeklenme potansiyeline sahip metaller için özellikle tasarlanmış güçlü bir aşılama elementidir. Ce ayrıca mikro çekintinin ortadan kaldırılmasının zor olduğu durumlarda son derece etkilidir.

Lantan (La); Çil oluşumunu azaltır ama temel özelliği küresel grafitli dökme demirlerde mikro çekintiyi azaltmaktır. Dik sıralı katılma yerine eş eksenli katılmayı sağlamaktadır. Lantan kullanımı işlenebilirliği arttırmaktadır. İnce kesitli parçaların dökümü için ideal bir malzemedir (Koch ve Soulas, 2014).

### ***Aşılama yöntemleri;***

***Ön aşılama;*** Bu terim, ergimiş metal malzeme içerisine, ergitme ocağına yada ocaktan potaya alınırken çekirdeklenme tesiri yapacak malzemenin eklenmesi amacıyla kullanılır. Bu pratik, metalurjik yapının en önceki safhadan itibaren, ergimiş metalde en uygun yapı ve grafit oluşumu amacıyla uygulanır. Zr-Ce-Mn içeren VL(Ce)<sub>2</sub>, ön aşılama element olarak kullanılabilir ve ergimiş metal içerisindeki O miktarının, oksit bileşiği

oluşumuyla, azaltılarak ve ergimiş malzeme içerisinde çekirdek oluşumunun ve dağılımının iyileştirilmesini sağlar. Alüminyum veya Baryum kapsayan diğer ön şartlandırıcılar da vardır. Ayrıca, Si karbür ilavesi de ergimiş metal içerisindeki çekirdek sayısını arttırdığı için, ön aşılama olarak tanımlanır.

**Pota aşılması;** En eski aşılama yöntemlerindedir. Aşılama, ergimiş metal ocaktan potaya alınırken veya Mg tretman potasından döküm potasına alınırken ilave edilir. Bu uygulamada, sıvı metal miktarına bağlı olarak, 0.6 mm ve 6 mm arasındaki tane büyüklüklerinde aşılama kullanılmaktadır. Aşılamanın pota tabanına yerleştirilmemesi ve olabildiğince homojen bir biçimde akan metalin üzerine eklenmesi sağlanmalıdır.



Şekil 10. Aşılama yöntemlerinin şematik görünümü

**Tel aşılama;** Bu yöntemde aşılama, daire kesitli bir telin içerisine konmuş biçimde sıvı metale eklenir. Tel, ergimiş metalin içerisine kontrollü bir biçimde tel besleme makinesiyle verilir. Bu biçimde hem tel besleme hızı hem de tel boyu kontrol edilerek hassas bir biçimde aşılama ergimiş metale verilmiş olur. Bu aşılama hem pota içerisinde hem de döküm ocaklarının döküm ağzında eklenebilir.

**Stream (Akan metal)' e aşılama;** Stream aşılama; aşılama direkt olarak kalıba akan metalin içine verilir. Pratikte, döküm süresince ergimiş metalin içerisine homojen bir biçimde aşılama eklenmesini sağlamak için, genelde, otomatik aşılama makinesi adı verilen aparatlar kullanılmaktadır. Bu uygulama için en uygun aşılama tane büyüklüğü genellikle 0.7 mm ve 0.2 mm arasında ve aşılamanın çok az süre içinde tamamen çözünmesi gerektiğinden eklenen miktar %0.15'den fazla olmamalıdır. Pota aşılmasına göre üstünlüğü, geç aşılama yapıldığından aşılamanın etkinliğini yitirmemesidir. Bu uygulama otomatik kalıplama makinelerine entegre döküm ocaklarında yaygınca kullanılmaktadır.

**Kalıp içi aşılama;** Bu aşılama, aşılama ergimiş metalin içinde mümkün olan en geç zamanda eklendiği için aşılamanın etkisini kaybetme riski en asgariye ye indirilmiştir olur. Bu aşılama, aşılama, ergimiş metale, dökümün girişinde veya doğrudan yolluk

sistemi içinde verilir. Dolayısıyla, aşılarda çözünmesi, dolmuş süresince havasız bir ortamda ve direkt olarak ergimiş metalin içerisinde gerçekleşir.

Aşılama esnasında meydana gelebilecek hataları önlemek için dökümden hemen sonra malzeme üstünde veya ayrı dökülmüş örnek üzerinde yapılacak olan incelemeler yeterli olmamaktadır. Bu gibi yanlışlıkları önlemek için aşılama, imalatın her anında ve imalat şartlarına uygun biçimde, kalite emniyet sisteminin bir parçası olarak planlamak gerekir. Aşılama ile ilgili dökümün kayıtlanması ve istatistik prosedür kontrol metodu ile kontrol edilmesi gerekmektedir. Aşılama ile ilgili verilerin, gelen aşılarda ön kontrolü, aşı seçimi, stoklama şartları, döküm sıcaklıkları, aşı ilave oranlarının tartılmak suretiyle doğrulanması, otomatik aşılama cihazlarının rutin bakım ve kalibrasyonu, aşılama ile döküm bitimi arasında geçen zaman, titreşimli aşılama ünitelerinde frekans ölçümü ve kontrolü, tel besleme cihazlarında besleme hızı ve telin doğru bir biçimde ergimiş metal içerisine veriliş ve verilmediği vb birçok değişkenin dikkate alınması gerekmektedir. Aşılama neticelerinin takibi için uygulayıcıların kullanacağı birçok metod vardır. Bunlardan eski olanı, kama testi (çil derinliğinin ölçülmesi) ve mikroskop altında mikro yapı incelemesidir. Başka bir uygulama ise zamanımızda yaygınca kullanılmaya başlayan termal analiz sistemleridir. Metal soğuma eğrisi incelenerek, aşılamanın etkisinin yanı sıra ölçülen metalin metalurjik özellikleriyle alakalı birden fazla faydalı bilgiler elde edilebilmekte ve döküm evveli ergimiş metalin çekinti ve katılaşma eğilimi, oluşturulacak grafit miktarıyla biçimi gibi birçok konuda bilgiye ulaşılabilmektedir (Maschke ve Jonuleit, 2013).

Diğer aşılama elementleri; Alüminyum, Kalsiyum, Stronsiyum Baryum, vb. elementler. Bazı aşılama malzemeleri Tablo 3’de gösterilmiştir.

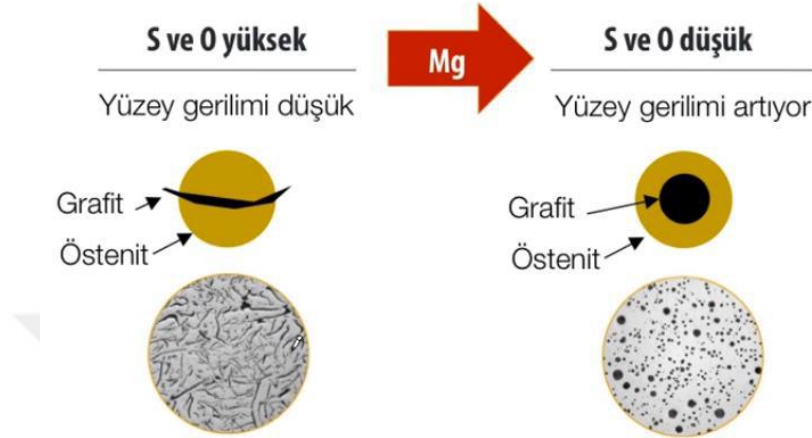
Tablo 3. Birkaç aşılama malzemelerinin oranları (%)

| No | Si | Ca   | Al   | Ba | Mn | Mg   | NaNO <sub>3</sub> | Fe    |
|----|----|------|------|----|----|------|-------------------|-------|
| 1  | 75 | 15   | 1    | -  | -  | -    | -                 | Kalan |
| 2  | 63 | 20   | 1    | 5  | 10 | -    | -                 | Kalan |
| 3  | 63 | 10   | 0.75 | 1  | -  | -    | -                 | Kalan |
| 4  | 50 | 0.75 | 1    | -  | -  | 1.25 | -                 | Kalan |
| 5  | 61 | 0.50 | -    | -  | -  | 1.25 | 10                | Kalan |

## 2.9. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Küreselleştirme

**Küreselleştirme İşlemi:** Grafiti küresel forma dönüştüren elementlerin çok olmasına rağmen, uygulamalarda genelde kullanılan Mg yanında düşük oranda Ca, Ce elementleri kullanılabilir. Grafiti küreselleştirmesi için gereken Mg miktarı %0.01’ den az olabilir ya da döküm şartlarına göre %0.02’ den yüksek olabilir. Mg’ un

küreselleştirici olarak kullanımı halinde miktarı %0.02' den az olamaz. Ce, Ca gibi elementlerin birlikte kullanılması halinde Mg oranı %0.01 seviyesindedir. Sıvı metalin S miktarı ile orantılı olarak Mg miktarı artması gerektiğinden, S oranı yüksek olan sıvı metalde kabul edilebilir Mg oranı %0.05 olmalıdır. Farklı yöntemlerle küreselleştirme işlemi yapılmaktadır.



Şekil 11. Küreselleştirme işleminde Mg etkinliği (Çetin, 2016).

Magnezyum, Fe-Si-Mg olarakta uygulanmaktadır. Küreselleştirme için uygulanan FeSiMg alaşımında %44-48 Si %5.5- 6.6 Mag %0.2- 0.6 Ca %1.2 (en fazla) Al ve %0.4-0.8 elementler bulunuyor. Sonuçta en az %0.015 – 0.050 Mg oranı yeterlidir (Çetin, 2016).

Küreselleştirici elemen olarak Mg oranı %0.01'den azdır. Fakat sadece Mg KGDD oluşumu için ilave edilirse %0.02'den düşük oranda olamaz. S oranına göre ilave edilmesi istenen Mg oranı fazla olabilir. Döküm sektöründe en fazla %0.05 oran kullanılmaktadır (Aydoğmuş vd., 2019).

Tablo 4. KGDD'lerin kimyasal içeriği (Karaman, 2011).

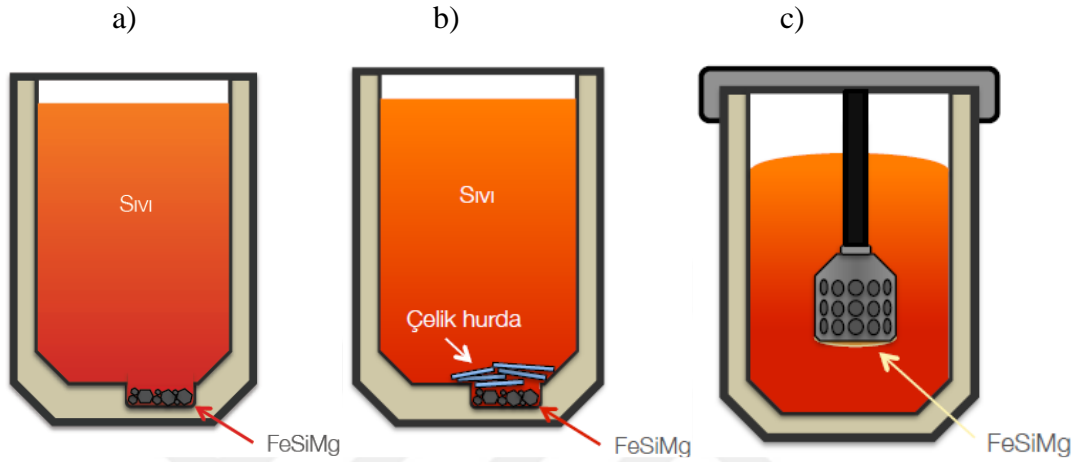
| % (C)       | % (Si)      | % (Mn)    | % (P)           | % (S)           | % (Mg)       |
|-------------|-------------|-----------|-----------------|-----------------|--------------|
| 3.00 – 4.00 | 2.00 – 3.00 | 0.1 – 0.9 | 0.10 (en fazla) | 0.02 (en fazla) | 0.030 –0.080 |

**Pota Küreselleşmesi:** Çoğu dökme demirler, pota küreselleşmesine uğrar. Bu yöntemin ana avantajı, basit ve kullanışlı olmasıdır. Önceden ısıtılmış boş bir potanın altına Mg alaşımlı malzeme konur ve üstüne ergimiş malzeme dökülür. Pota hızlı bir şekilde doldurulmalıdır. (İzgiz, 1988)

**Devirmeli Pota (Konveyör) Yöntemi:** Uygulama sektörde en fazla tercih edilen yöntemlerden biridir. Potaya Mg alaşım eklenir, sonra pota yana döndürülür ve içerisine ergiyik malzeme ilave edilir. Kapağı kapatılarak potayı alaşım eklenen yöne çevirerek

ergiyik malzeme ile küreselleştirici alaşım birleştirilir. Kapak nedeniyle Mg buharı da alaşımın verimli olmasına katkı sağlar verimlilik oranı %50-60'ı bulabilir.

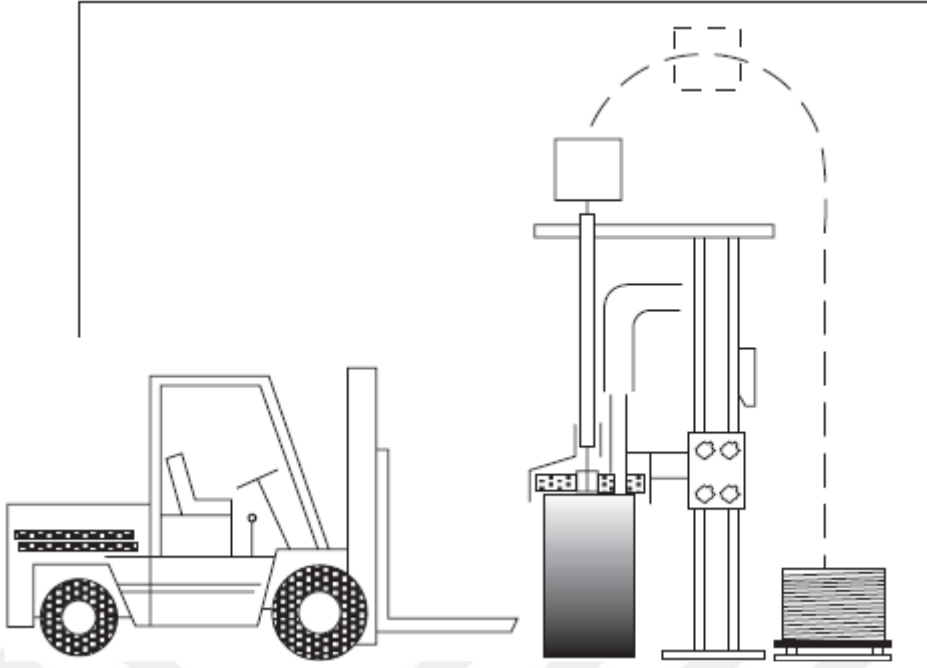
**Daldırma Yöntemi:** Uygulamanın hedefi küreselleştirici FeSiMg alaşımın ergiyik malzeme içinde yüzmesine engel olmaktır. Kalıp yardımı ile Mg alaşım ergiyik malzeme içerisine daldırılarak uygulanır. Uygulamanın sınırlılıklarıysa daldırma kalıbının sıvı malzemenin sıcaklığını hızla düşürmesidir (Aydoğmuş vd., 2019).



Şekil 12. a) Açık pota b) Sandviç c) Daldırma yöntemleri şematik gösterimi (Çetin, 2016).

**Sandviç Yöntemi:** Bu yöntem yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biridir, küresel malzeme %2 sıvı metal çelik yongaları veya küresel grafitli dökme demir yongaları ile kaplanır. Böylece FeSiMg'nin yanması engellenir. Bu işlemde sonra elde edilen Mg'nin kullanım oranı, uygulamanın yapıldığı sıvı metalin sıcaklığına bağlıdır (İzgiz, 1988).

**Tel Yöntemi Uygulaması:** İçerisinde Mg tel olan çelik borular, sarıldığı makaradan makinenin hareketiyle ergiyik malzeme içine verilir. Mg telin kullanım oranı sıvı malzeme içerisindeki S miktarına göre değişir. Telin ölçüsü 4 mm ile 13 mm arası olabilir. Ortalama 9 mm ölçülerdeki telin, dk da 30 – 50 m arasında uygulama ile 2 dk süreyle 1500 kg ergiyik malzemenin küreselleşmesini sağlayabilir (Karaman, 2011).



Şekil 13. Tel tretmanı şematik gösterimi (Brown, 2000).

**Açık pota yöntemi:** FeSiMg alaşım pota tabanına yerleştirilir sonra fırında hazırlanan ergiyik malzeme ilave edilir. Küreselleştirme yöntemleri arasında en kolay uygulamadır. Uygulamadaki Mg yoğunluğunun ergiyik malzemeye göre düşük olması nedeniyle yüzme meydana gelir. İşlemin verim oranı %20-30 arasındır (Çetin, 2016).

#### **Küreselleştirici Elementlerin Etkisi:**

**Magnezyum:** Mg içeren alaşımların kullanımı hızlı çözünmeye neden olur. Ergimiş metalin çözünmesi sırasında Mg' un yanma kaybını azaltmak ve potadan sıçramayı önlemek için ince ve uzun potalar gereklidir. Bu nedenle potanın 2/3'ü dolu olmalıdır.

**Seryum:** Seryum, magnezyum gibi, güçlü bir oksijen giderici ve kükürt gidericidir. Ancak, seryum çok uçucu değildir.

**Lantan:** Bazı küresel grafitlerin lantan kullanılarak üretildiği bildirilirken, vermiküler grafit içindeki bazı küresellerden oluşan bir yapı daha tipiktir. %0.05 lantan ile bile yüksek oranda nodül elde edilmedi. Lantan, seryum kadar güçlü bir karbür oluşturucu değildir.

**Kalsiyum:** Ca, sfero (KGDD) döküm üretiminde dikkate alınması gereken önemli bir elementtir. Küresel grafit, yalnızca Ca ile işlem görmüş demirlerde üretilirken, bu element, magnezyum reaksiyonunun uçuculuğunun azaltılması ve aşılamanın etkinliğinin artırılması açısından daha fazla ilgi görmektedir. Ca, diğer küreselleştirici maddeler gibi, oksijen ile kolayca reaksiyona girer ve eriyik yüzeyine yüzen kalsiyum oksit (CaO) oluşturur.

**Baryum:** Sfero (KGDD) demir üretiminde baryumun temel kullanımı, aşılama sırasında yüksek nodül sayılarını desteklemek için %2.00-2.50 baryumun kullanıldığı bildirilen ferrosilikon alaşımlarındadır. %6.0'a kadar baryum içeren bazı MgFeSi alaşımları da geliştirilmiştir. Bu alaşımlarda, Ba kullanımının nodül sayısını arttırması amaçlanır ve aşılama ihtiyacını azaltabilir.

Küreselleştirme uygulamalarında alaşım elementleri miktarı, dökme demirin malzeme kompozisyonundaki S (kükürt) ve O (oksijen) oranlarına bağlı olur (Karadeniz vd., 2017).

## 2.10. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Katılaşma

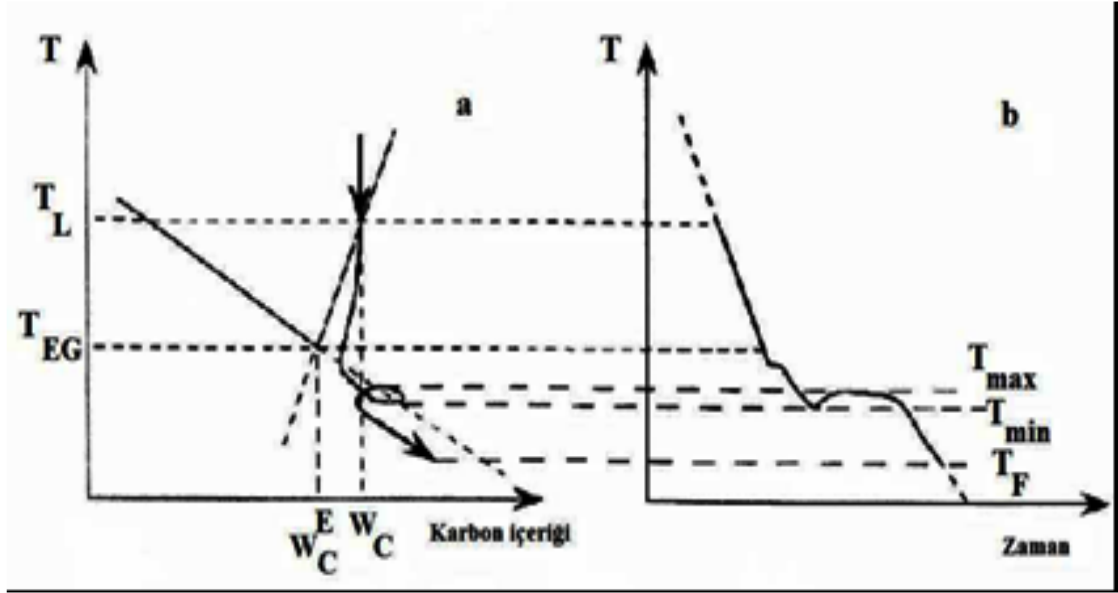
KGDD' in katılaşması tamamıyla ötektik dönüşüm tarafından belirlenir. Katılaşma sıcaklığı bileşimdeki C (Karbon) oranıyla birlikte düşer. % 4.3 oranında 1150 C° seviyelerinde olduğu görülmüştür. KGDD de ötektik oluşumu en çok etkileyen Si elementidir.

Si (Silisyum) ötektik oluşumu daha az C (karbon) seviyelerine indirir ve eşdeğer oranın belirlenmesinde alaşımın karbon oranıyla toplanır. Bu iki oranın toplamı karbon eşdeğerini oluşturur. Araştırmalara göre %1 Si (silisyum) ötektik oluşumu %0.31 oranında azaltmıştır.

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

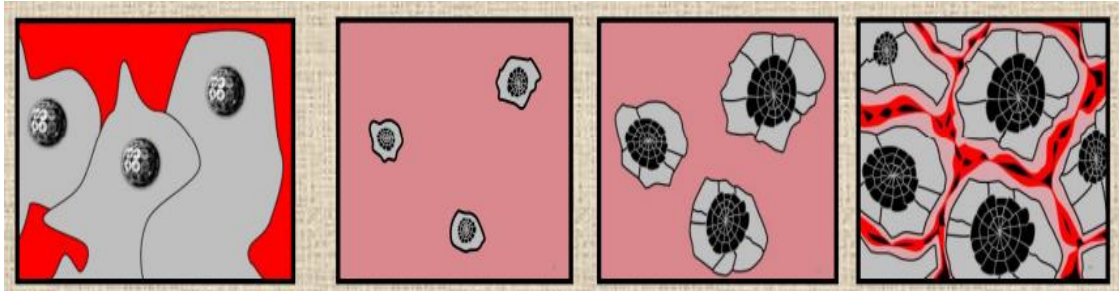
Mesela % 0.5 P, % 1 Si, % 2.5 C, bileşiminde olan bir Dökme Demirin Karbon Eşdeğerliği ise  $(2.5 + (1.0 + 0.5)/3) \% 3$ 'tür. Fe-C denge diyagramına bakıldığında, sanki % 3 karbon içeren dökme demire benzer işleme tabi tutulacaktır (Kayıran, 1999).

Karbon eşdeğeri oranının 4.3 seviyesinde olması, alaşım malzemenin ötektik yapıda olması çok az görülen bir durumdur. Az oranda görülse de engellenemeyen bir durum olan aşırı soğuma, katılaşmanın ötektik altı veya ötektik üstü olarak başlamasına sebep olur. Ötektik katılaşma farklılıklarının zamana göre sıcaklık ölçümleri bulunur.



Şekil 14. Sfero dökümün üst ötektik katılaşma aşamasının grafik gösterimi, (a) grafitin aynı düzlem kesitinde katılaşma diyagramı, (b) soğuma diyagramı (Şen, 2004).

Alt ötektik çözümlenmeyle malzemenin katılaşması sırasında sıvı fazdan katı faza dönüşme durumunda sıvının içinde primer östenit dendritleri olduğu bir ara faz oluşur (Aral, 2012). Dendrit şekli olmasıyla kolların arasında oluşan sıvı bölgelerin içerisinde C çözünür. Böylece bölgelerin içinde grafit çökme yapmadığından gözenek meydana gelir. Geriye kalan C ise ötektik dönüşüm sırasında grafit şeklinde çöker. Böylece alt ötektik çözümlenmeyle dökülen dökümlerde ötektik grafit oranı daha azdır.



Şekil 15. Çekirdeklenme ve grafit oluşumu (Aral, 2012).

Üst ötektik fazın katılaşması sırasında ara faz bölgesi üzerinde primer östenitin yerine primer grafitler oluşur. Kalıbın duvarındaki ilk katılaşma büyük grafit oluşumuyla başlar. Malzemede işlem gören yüzeylerde koyu renkli büyük grafitlerin arasında çekinti boşluklar görülebilir. İlk östenit olmadığından ve ötektik grafitin oranı fazla olduğu için alt ötektik çözümlenmedeki malzemeye göre, sondaki katılaşma bölgelerinde olan poroziteler az görülebilir (Aral, 2012).

## 2.11. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Akıcılık

İstenen kalitedeki dökümün üretilmesi farklı metalurjik uygulamaların kullanılmasıyla olabilir. Dökümhanede mükemmel dökümün elde edilmesi için, ergiyik malzemenin kalıp içinde en uzak noktalarda katılaşmadan ilerleyebilmesi gerekir. Kalıbı tamamen doldurmadan metalin katılaşması, hatalı dökümlerin üretilmesine yol açar. Bu nedenle dökümhanede kolayca yapılan akış testi ile döküm koşullarının sıcaklığa ve bileşim yapısına göre belirlenmesi gerekir. Bir metalin akışkanlığı, erime noktasının üzerindeki sıcaklıklarda artmasına rağmen, aşırı sıcaklık artışı birçok olumsuz etki oluşturabilir. Farklı reaksiyonlarla sıvılardan alaşım elementlerinin uzaklaştırılması, kalıp deformasyonu gibi sonuçlar gözlemlenebilir. Bu nedenle en uygun sıcaklık belirlenmelidir. Döküm, ergime noktasının 100 ila 150 °C üzerindeki bir sıcaklıkta yapılmalıdır. Bileşimin akışkanlık üzerindeki etkisi farklılık gösterebilir. Örneğin, dökme demirde karbon eşdeğerini artıran elementlerin eklenmesi akışkanlık üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Basit ifadeyle akışkanlık; Ergimiş malzemenin kalıbın oluklarından akması ve kalıp boşluklarını doldurması yeteneğidir (Aslandoğan, 2009).

**Cürufun Akıcılığı:** Sürtünme katsayıları fazla olan cürufaların akıcılığını artırmak için fırınlara ya da potalara cüruf yumuşatıcılar ilave edilir. Eklenen yumuşatıcıların ergime sıcaklıkları düşüktür ve cüruf oluşumuna sebep olan maddeler ile birleşip akıcılığı etkiler ve ergiyik malzemeden uzaklaştırır.

**Viskozite:** Sıvı metaller çok çeşitli viskozite değerlerine sahiptir ve yavaş akan metallerin daha yüksek viskoziteye sahip olduğu düşünülmektedir. Aslında, metallerin viskozitesi oldukça düşüktür. Metallerin kinematik viskozitesi sudan daha düşüktür. Ayrıca viskozite sıcaklıkla çok az değişir, bu nedenle dökümlerde kritik bir faktör değildir.

**Yüzey Gerilimi:** Yüzey gerilimi, komşu atomlar arasındaki çekim kuvvetinden kaynaklanır. Her atom komşu atomlarla çevrili olduğu için sıvılarda dinamik dengeyi sağlayabilir. Sıvı malzemenin yüzeyindeki atomlar, yüzeye temas halinde olan buhar tabakasının atomları ile temas halindedir. Karmaşık ve ince kesitli malzemelerin döküm işleminde yüzey gerilimi önemlidir. Büyük yüzey gerilim değerleri problem oluşturabilir. Metale alaşım elementlerinin eklenmesi yüzey gerilimini iyileştirebilir.

**Oksitlenme:** Genel olarak tüm sıvı metaller oksitleyici bir ortamda az ya da çok oksitlenir ve yüzeyde oksit tabakası meydana gelir. Oksitlerin zararı, malzeme kaybı ve bazı durumlarda yolluğu tıkamaları ve ergimiş malzemenin ilerleyişine engel olmalarıdır. Bu nedenle döküm işlemi bazı uygulamalarda vakum ortamında yapılmaktadır.

**Yoğunluk:** Genelde malzemelerin ergimesi sırasında hacimde bir artış gözlenir. Bu, sıvının yoğunluğunun katının yoğunluğundan daha düşük olduğunu gösterir. Yoğunluğun döküm işlemi üzerindeki etkileri araştırılırken, yolluklarda ergimiş malzemenin neden olduğu hidrostatik basıncın potansiyel etkisi dikkate alınmalıdır (Aslandoğan, 2009).

**Döküm Süresi:** Ergiyik malzemenin aralıklı akışı ya da az sıcaklık değerinde dökümü istenen bir durum değildir. Sıvı kalıp içini tam olarak doldurmadan katılaşması problem oluşturur. Sonrasında soğuk çatlama sebebe olabilir. Kalıp boşluğunu hızlı doldurma işlemi de problem oluşturacağından dikkat edilmesi gereken bir durumdur. Basıncılı döküm işleminde ya da özel döküm işleminde, üst sınırlar sıvının akıcılık değeriyle oluşturulur.

**Bileşim:** Bir başka etkili özelliktir. Akışkanlığın yüksekliği genelde saf malzemeler ve ötektik bileşim içeriğindeki metal malzemelerin özelliğidir.

**Kalıbın Özellikleri:** Bu çalışmada özellikle düşük ergime derecesinde alaşımlar için önemli veriler kaydedilmiştir. Bu çalışmalarda sabit bir kalıplar uygulanmıştır. Ancak günümüzde kum kalıplar yaygın olarak kullanılıyor.

**Kalıp Yüzeyinin Etkisi:** Kalıbın kanallarının içindeki akışkanlık, kimyasal uygulamalar ile değiştirilen kalıp yüzeyindeki pürüzlülüğe göre sürtünme kuvvetinden etkilenebilir.

Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Mg işlemi yapılmış ergimiş malzeme, içeriğinde %0,07'den çok Al bulunduruyor ya da sıcaklık 1360°C'den düşükse, yaş kum içerisindeki nemle tepkime oluşturarak H açığa çıkarır, böylece döküm yüzeyinde ya da yüzeyin altındaki noktada pürüzlü oluşuma sebebe olmaktadır. Bu oluşum oksit hataları ile birlikte görülür (Aslandoğan, 2009).

## **2.12. Metallerin Akıcılığı ve Akıcılığı Etkileyen Faktörler**

Akışkanlığı belirlemek için metalin ve kalıbın özellikleri dikkate alınır. Metallerin özellikleri ile ilgili olarak akışkanlığı az çok etkileyen etkenler aşağıdadır.

- 1-Alaşım bileşim durumu
- 2-Ergimiş alaşım sıcak değeri
- 3-Ergimiş malzemenin sürtünme katsayısı
- 4-Ergimiş alaşım yüzeyinin gerilim değeri
- 5-Yüzeyde oluşmuş bir oksitli tabaka
- 6-Ergimiş malzeme üzerindeki gaz katmanı
- 7- Ergimiş malzeme üzerindeki cürufun parçaları

8- Ergimiş malzeme içerisinde askıda kalan yabancı maddeler

9-Katılaşma sırasında yapıda çökeltme formları

10-Kalıp özellikleri

### **2.13. Döküm Simülasyon Yazılımları**

Döküm simülasyon programı kullanılarak, döküm parçalar için optimum kalıp tasarımıyla, hurda kaybını, temizleme maliyetlerini azaltıp, üretim verimliliğini artırabiliriz. Deneme yanılma yöntemiyle zaman ve işgücü kaybı ve yüksek maliyetlerden kaçınılmakta, prototip dökümü bilgisayar ortamında yapılmaktadır. Döküm simülasyon programları, 1990'ların başından beri dökümhane imalatçıları tarafından dökümlerdeki olası kusurları tahmin etmek ve tasarım aşamasında herhangi bir problemi başlamadan önce düzeltmek için kullanılan teknolojik yeniliklerdir. Türkiye'de döküm endüstrisi bu gibi teknolojilerin faydalarını yeni yeni fark etmiş ve simülasyon programları kullanacak dökümhanelerin adedi artmaya başlamıştır (Kayıkcı ve Nergiz, 2010).

Son dönemlerde özellikle otomotiv endüstrisindeki talepler yüksek kalite, hızlı teslimat ve düşük maliyetli döküm üretimi konusunda döküm sektörünü bilgisayar destekli tasarımları daha etkin kullanmaya yöneltmiştir.

**SolidCast Simülasyon Yazılım Programı:** SOLIDCast hızlı, doğru ve kullanımı kolay bir döküm simülasyonu yazılımı programıdır. Pik, sfero, çelik, paslanmaz çelik, alüminyum esaslı alaşımlar, bakır esaslı alaşımlar, magnezyum esaslı, nikel esaslı alaşımlar ve ergitilebilen tüm alaşımlar bu program ile simüle edilebilmektedir.

SOLIDCast döküm simülasyon yazılımı, kum kalıba döküm, kabuk kalıba döküm, hassas döküm, metal kalıplara döküm ve basınçlı döküm proseslerinin simülasyonlarını en hızlı ve en doğru yapabilen bilgisayar tabanlı bir programdır. SOLIDCast ilave bir programa gerek kalmadan sadece ana program ile yolluk ve besleyici tasarımını otomatik olarak yapabilen tek döküm simülasyonu yazılım programıdır. Yazılım, döküm parça üzerinde besleme noktalarını doğrudan göstererek, çekinti boşluklarını ve mikro porozite dağılımını yer, büyüklük olarak %100 başarı ile tahmin edebilen döküm simülasyon programıdır.

**FLOWCast Simülasyon Yazılım Programı:** Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizini, SOLIDCast'in yazılım özelliklerine eklemleyen bir eklenti akış modelleme programıdır. FLOWCast, SOLIDCast tarafından oluşturulan programlarla birlikte çalışır.

Akış modelleme programı, bilgisayar programıyla ergimiş metalin yolluk sistemlerinden nasıl akacağını ve kalıptaki döküm boşluğunu nasıl dolduracağını gösteren bir simülasyonu görüntülemenizi sağlar. FLOWCast, kalıp boşluğu içindeki konveksiyon, iletim ve radyasyonu modeller. Bu, erken katılaşmadan kaynaklanan yanlış işlemler veya doldurma sırasında aşırı hızlardan kaynaklanan oksit oluşumu veya kalıp erozyonu gibi akışla ilgili kusurları tahmin etmek ve en aza indirmek için döküm ve kalıp tasarımınızı analiz etmenizi sağlar.

FLOWCast simülasyonunun sonuçları, SOLIDCast'te dökümün nihai katılaşmasını modellemek için kullanılır ve bu da tamamen entegre bir döküm modelleme sistemi ile sonuçlanır.

FLOWCast, sıvı metal parçacıklarının hızlarının ve hareketlerinin hesaplanmasında, meydana gelebilecek hataları önceden tespit eden kapsamlı bir programdır. Yolluk ve kalıp boşluğunun doldurulmasını modelleyen bir akış çözümleme programıdır. Sıvı metalin aşamalı sıcaklığını ve hızını modeller. Program, kullanıcının ergimiş metal akışını görselleştirmesine ve herhangi bir aşırı ters akış veya türbülansın oluşup oluşmadığını belirlemesine yardımcı olur ve akış yolları veya parçacık hareket çizgilerini gösterebilir. Bu aynı zamanda ergimiş metal akışına karışan yabancı parçacıkların (oksitler veya kir) olası konumlarını tahmin etmek için de kullanılabilir. Ayrıca sıvı metalin herhangi bir noktadaki hızı da gösterilebilir.

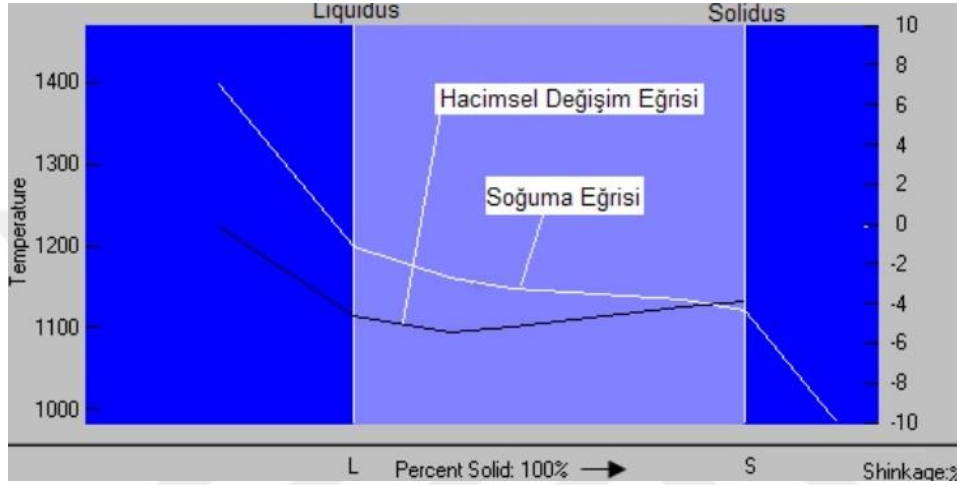
Bu program, kullanıcının yolluk sisteminin nasıl çalışacağını ve kalıbın nasıl doldurulacağını görüntülemesine yardımcı olur. Yanlış uygulamalar veya istenmeyen katılaşma olasılıkları gibi akışla ilgili kusurlar da tanımlanabilir. Ayrıca, sonraki katılaşma analizi için döküm ve kalıpta daha gerçekçi bir sıcaklık dağılımı sağlar. Fakat SOLIDCast programı kullanımında, sıvı metalin dökülmesinde minimum türbülans oluşturacak bir yolluk tasarımı tasarlanmalıdır.

**OPTICast Simülasyon Yazılım Programı:** Bu program, kullanıcının döküm, kalıp ve yolluk sistemi tasarımlarını optimize etmesine yardımcı olacak ve bu da daha iyi verim, daha düşük maliyet, daha düşük üretim süresi vb. bir tasarım oluşturma yazılımıdır.

OPTICast, SOLIDCast simülasyon yazılım programıyla beraber aynı sistemde çalışma bütünleşik bir optimizasyon programıdır. OPTICast ile simülasyon işleminde kalıp tasarımlarının en uygun üretim işlemi hazırlanır. En uygun kalıp tasarlanması işlemi en uygun maliyetle yapılabilir (Çolak, 2020).

Optimizasyon, bir probleme en uygun çözüm oluşturabilmek için matematiksel bir uygulamadır. Bir tasarım çözümü üretimini sistematik hale dönüştürebilir, tasarımcının zamanını azaltır ve daha kapsamlı ve tekrarlanabilir bir tasarım süreci sağlar.

Deneyimli bir döküm mühendisi, bir döküm tasarımını nasıl optimize edeceğini veya iyileştireceğini bilir. Gerekli nitelikleri karşılıyorsa, geliştirilmiş tasarımı doğrulamak için SOLIDCast'ı kullanabilir. Ancak OPTICast'la çalışmak, kullanıcının döküm tasarımını optimize etmede kullanılan süreyi azaltmasına yardımcı olabilir.

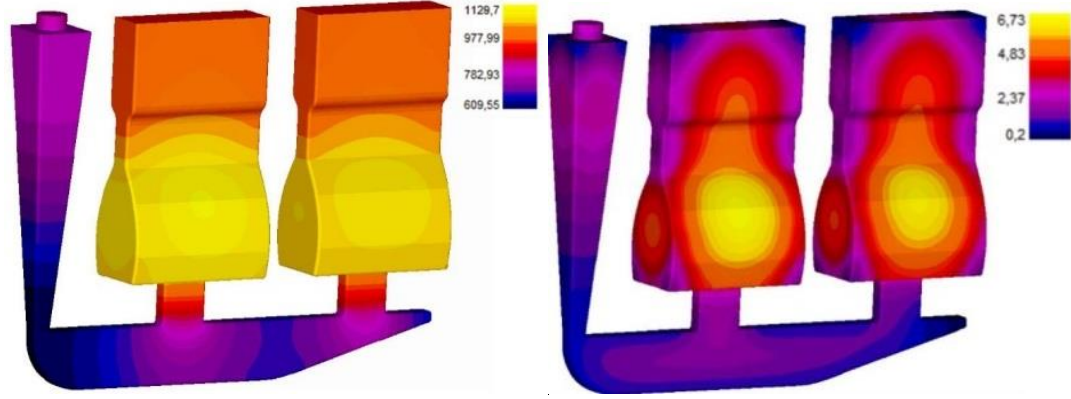


Şekil 16. Dökme demir döküm simülasyonunda sıvı ve yarı katı bölgelerde soğuma sırasında sıcaklık değişimine göre hacimsel değişim grafiği (Meredith, 2008).

Döküm simülasyon yazılımı programı, minimum sürede mükemmel döküm üretimi sağlamak için döküm üretim sürecinde çok önemli bir adımdır. Döküm yazılımının çok çeşitli döküm malzemeleri ve farklı imalatlar için verimli ve güvenli olacağı ispatlanmıştır, fakat maliyetin yüksek oluşu pratik uygulamasını azaltmıştır. Genelde simülasyon süreci, tane yapısını, kalıp doldurma, gerilme analizi, deformasyon ve katılaşma benzeri süreçleri içerir. Ayrıca maça, ayırıcı, çökeltici, yükleyici vb. ürün ve alet, ekipman modeli ve ayrıca kalıp malzemesinin ve parçasının sıcaklığa göre ayarlanabilen özellikleri ve son olarak kalıplama hızı, sıcaklık vb. Bu çalışmaların sonuçları olarak operasyon parametreleri dikkate alınarak, hava delikleri, sert noktaları soğumuş partiküller, çekinti gözenekleri, çatlakları ve deformasyonları, döküm hatalarını tahmin etmek için uygulanmaktadır (TheMetalCasting.com, 2019).

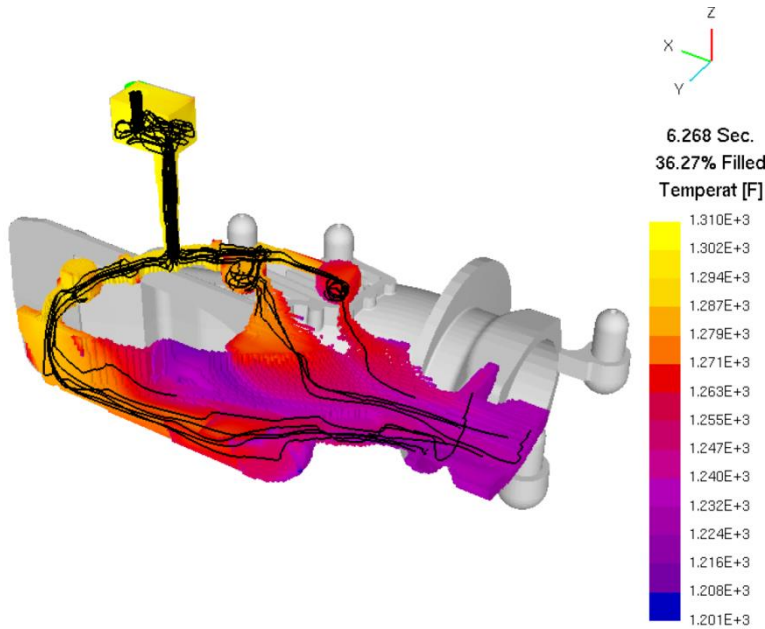
Program kullanılarak 3D katı modellemeyle, besleyiciler ve yolluklar bunların konumları, ölçüleri tasarlanabilir. Tasarlanan parça simüle edilerek döküm, katılaşma, büzülme gibi birçok sonuç bilgisayarda görüntülenebilir (Şekil 17). Bu, en yüksek kalite ve verimlilik için parça tasarım optimizasyon sistemi ile otomatik olarak yapılabilmektedir. Bütün bunlar çok kısa sürede yapılabilmekte ve daha da önemlisi bu

süreçler tasarım aşamasında görülebilmektedir. Bu fırsatlar nedeniyle özellikle kaliteli döküm üretmek isteyen atölyelerde simülasyon yazılımlarına artan bir talep vardır (Çolak ve Şirin, 2010).

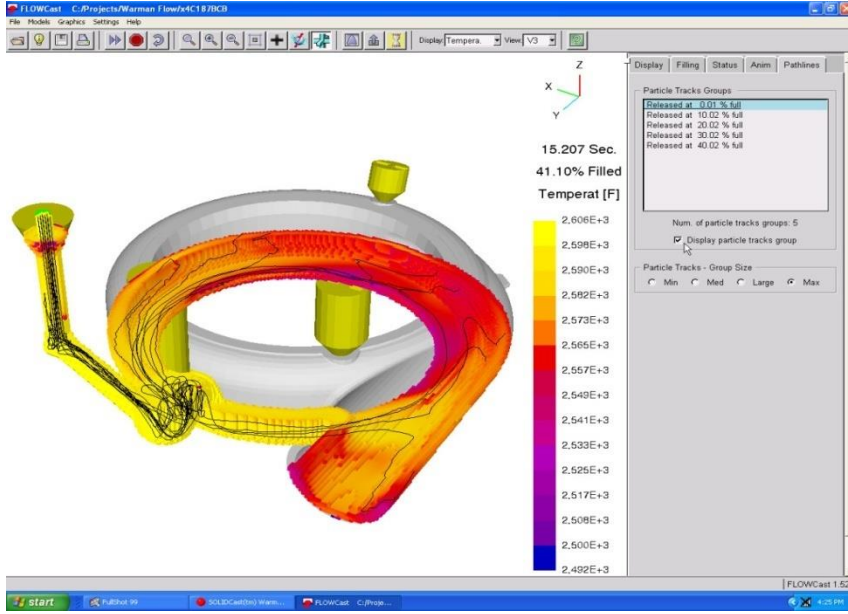


Şekil 17. Döküm simülasyonu yazılım programı tasarım örnekleri.

Özellikle hassas dökümler ve büyük kütleli malzemelerin dökümünü yapan dökümhanelerde bu programlar kullanılmaktadır. Deneme yanılma yoluyla tasarım ciddi maddi kayıplara neden olmaktadır. Günümüzde kullanılan programlar; tasarımla uygulama arasında çok yakın sonuçlar vermektedirler. Programlar birbirlerine oranla avantaj ya da dezavantajlı olabilmektedir.

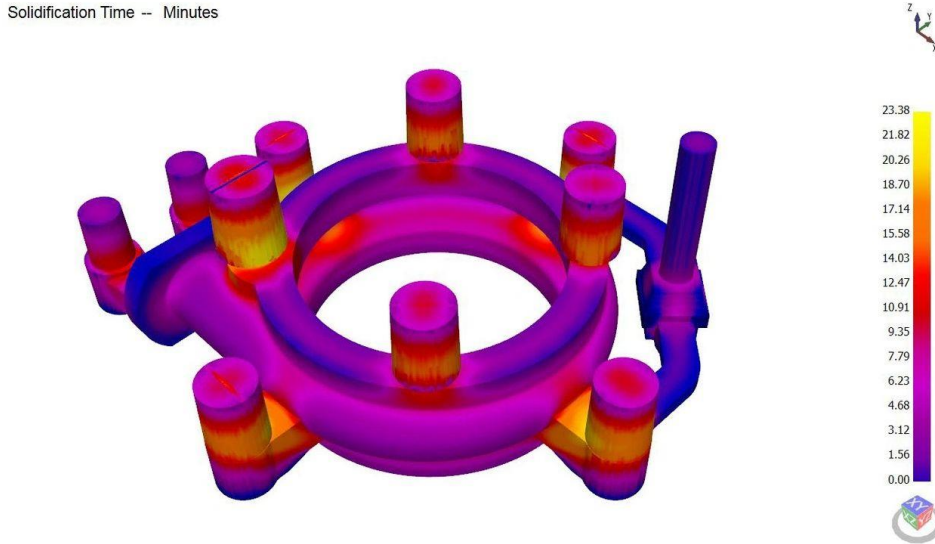


Şekil 18. Flowcast simülasyonu yazılım programı ile kalıbın doldurulması.



Şekil 19. Dökümün simülasyon yazılım programıyla parçanın analizi (Çolak ve Kayıkcı, 2009).

Dökümün simülasyon yazılımı ile malzemenin kalıba girmesinden kalıpta katılaşmasına kadar olan hareketler tasarlanabilir. Parça, yolluk veya yükleyici olmadan simüle edilir. Bu yaklaşımın amacı, malzemedeki olası büzülme alanlarını tahmin etmek ve uygun besleme ve yolluk tasarlamaktır (Şekil 20) (URL-1, 2019).



Şekil 20. Simülasyonun yazılım programı ile döküm parçasının katılaşma süresi.

Karmaşık kesit ve büyük kütleli dökümün malzemelerinde besleyicinin tasarımı zordur ve hatalı tasarlanması nedeniyle çok fazla maddi kayıplar meydana gelebilir. Buna benzer problemleri çözümlenmek ya da azaltmak amacıyla döküm simülasyon yazılımları geliştirilmiştir (Çolak ve Şirin, 2010).

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu başlık altında tezin kapsamı ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar ayrıntılı olarak anlatılacaktır. Deneysel çalışmalar genellikle tasarım, modelleme, dökümhane deneyleri, mikroyapı analizi, görüntü analizi ve değerlendirme çalışmaları başlıkları altında değerlendirilmektedir.

Tez araştırmasının bir parçası olarak, küresel grafitli dökme demirin sıcaklık değişimi ve dolum hızı gibi döküm koşulları altındaki akış özellikleri araştırılacaktır. Araştırmada, kesit kalınlığı, doluluk oranı gibi döküm koşullarına göre akışkanlık testi, kum döküm, dökümlerin makroskopik muayenesi, mikroyapı testi ve model çalışması için tasarım modelleri elde edilmiştir. Farklı döküm koşulları altında kum kalıpta yapılan dökümde, kesit kalınlığına bağlı olarak sıvı metal boşluğu belirlenir. Ayrıca gerçek döküm sonuçları, FlowCast döküm simülasyon yazılımı ile gerçekleştirilen çalışmalarla değişen parametrelerde karşılaştırılacaktır. Sonuçlar, tüm parametrelerde yapılacak dökümlerden üretilen farklı kalınlıklardaki dökümlerden elde edilecek numunelerin mikroyapısal analizleri yapılarak değerlendirilmiştir.

#### 3.1. Deney Parametreleri

Bu çalışmada ferritik KGDD alaşımın farklı döküm koşullarında akıcılık özelliklerini incelemek amaçlanmıştır. Bu sebeple, farklı döküm koşullarında özel amaç için tasarlanmış, farklı kesit kalınlıklarına sahip akıcılık deney numuneleri kullanılmıştır. Akış özellikleri üzerindeki etki, hazırlanmış bir kum kalıba dökülerek incelenmiştir. Bunun için deney parametreleri, döküm sıcaklığı, dolum hızı, aşılama özelliklerine bağlı olarak döküm simülasyon yazılımında tanımlanan metalürji kalitesi farkı ve kesit kalınlığı olarak belirlenmiştir. Test parametrelerinin belirlenmesinde, alaşımın akma özellikleri üzerinde en fazla etkiye sahip olan ve dökümhanelerin üretim sürecine müdahale edebileceğimiz parametreler ilgili dokümanlar kullanılarak seçilmiş. Tablo 5, alaşım akışkanlığını belirlemek için tez çerçevesinde gerçekleştirilen deneysel parametreleri ve döküm koşullarını göstermektedir.

Tablo 5. Deney parametreleri (Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demir)

| Döküm sıcaklığı (°C)/ | Metalürji kalitesi (%) | Kesit Kalınlığı (mm) | Dolum hızı (sn) |
|-----------------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| 1350                  | 10                     | 2-4-6-10             | 5-10            |
| 1400                  | 50                     | 2-4-6-10             | 5-10            |
| 1450                  | 90                     | 2-4-6-10             | 5-10            |

Tablo da görüldüğü gibi ferritik küresel grafitli dökme demir malzeme, 3 farklı sıcaklık, 3 farklı metalürji kalitesi seviyesi, 4 kesit kalınlığı ve 2 farklı dolum hızında toplam 18 adet döküm gerçekleştirilecek ve 72 adet sıvı metal ilerleme ölçümü yapılacak döküm kanalı elde edilecektir. Modellemeler; SolidCast döküm simülasyon yazılımı ile bütünleşik olarak çalışan FlowCast akışkan yazılımı ile gerçekleştirilecektir. Modellemelerden elde edilen sıvı metal ilerleme mesafeleri gerçek dökümlerden elde edilen değerler ile karşılaştırılacaktır. Sonuç olarak modelleme ve gerçek deneylerle doğrulanmış, Küresel grafitli dökme demir malzemelerde değişen şartlarda sıvı metal ilerleme mesafelerini tespit edecek bir kriter ortaya çıkartılacaktır. Tablo 6'de deney kapsamında yapılması planlanan deney şartları örnek tablosu verilmiştir.

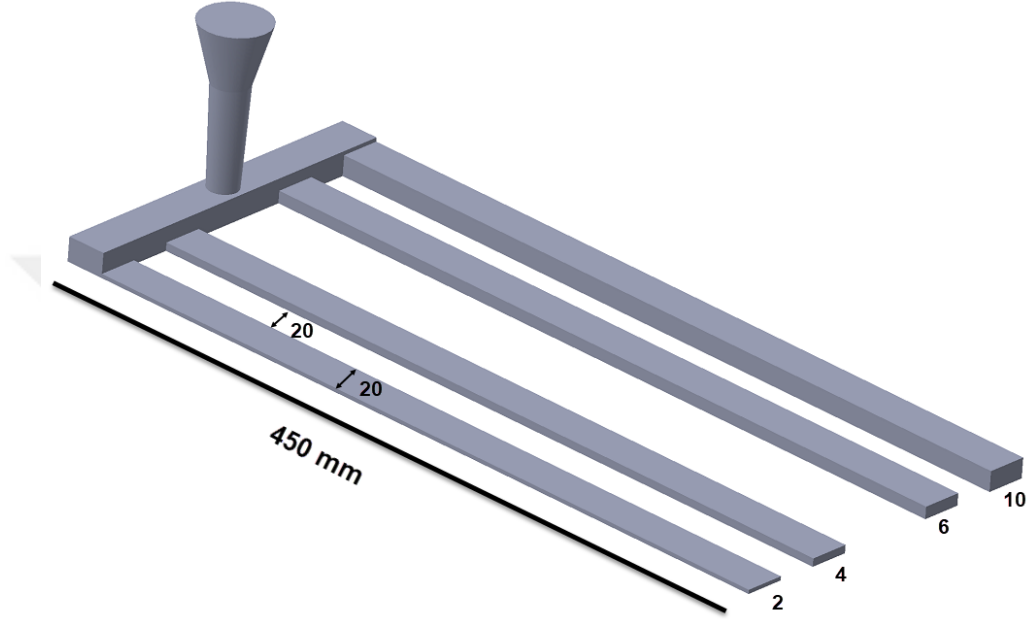
Tablo 6. Deney şartları.

| D.No | Malzeme       | Döküm sıcaklığı (°C) | Metalürji kalitesi (%) | Dolum hızı (sn) |
|------|---------------|----------------------|------------------------|-----------------|
| 1    | Ferritik KGDD | 1350                 | 10                     | 5               |
| 2    | Ferritik KGDD | 1350                 | 10                     | 10              |
| 3    | Ferritik KGDD | 1350                 | 50                     | 5               |
| 4    | Ferritik KGDD | 1350                 | 50                     | 10              |
| 5    | Ferritik KGDD | 1350                 | 90                     | 5               |
| 6    | Ferritik KGDD | 1350                 | 90                     | 10              |
| 7    | Ferritik KGDD | 1400                 | 10                     | 5               |
| 8    | Ferritik KGDD | 1400                 | 10                     | 10              |
| 9    | Ferritik KGDD | 1400                 | 50                     | 5               |
| 10   | Ferritik KGDD | 1400                 | 50                     | 10              |
| 11   | Ferritik KGDD | 1400                 | 90                     | 5               |
| 12   | Ferritik KGDD | 1400                 | 90                     | 10              |
| 13   | Ferritik KGDD | 1450                 | 10                     | 5               |
| 14   | Ferritik KGDD | 1450                 | 10                     | 10              |
| 15   | Ferritik KGDD | 1450                 | 50                     | 5               |
| 16   | Ferritik KGDD | 1450                 | 50                     | 10              |
| 17   | Ferritik KGDD | 1450                 | 90                     | 5               |
| 18   | Ferritik KGDD | 1450                 | 90                     | 10              |

### 3.2. Model Tasarımı

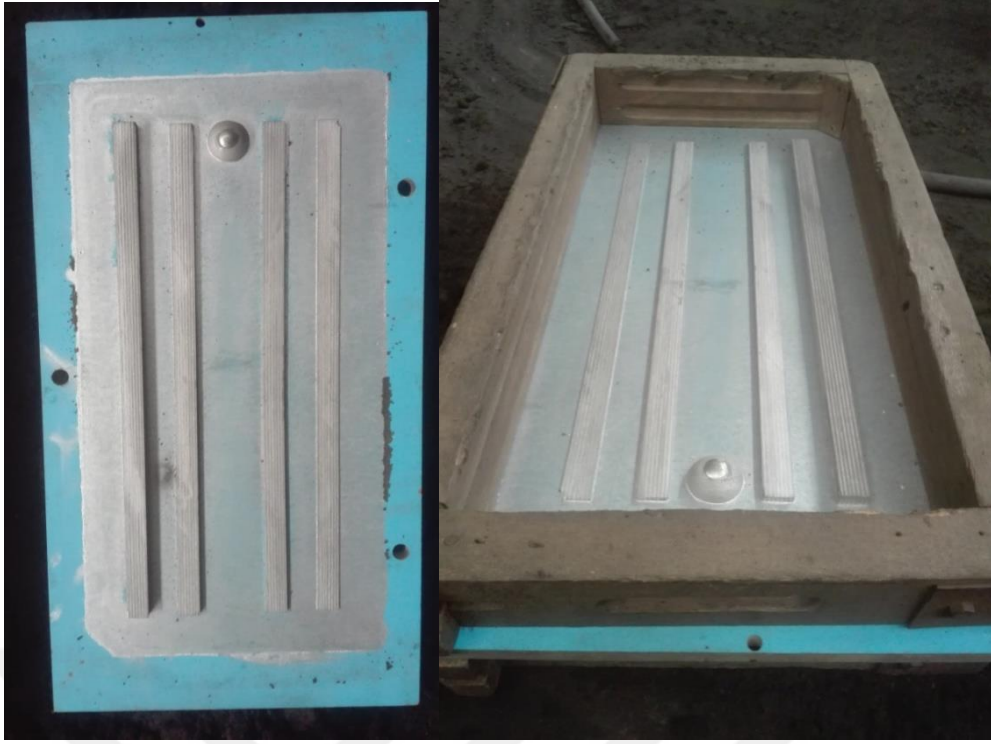
Döküm deneylerinde kullanılacak modelin geometrisinin tasarımı, daha sonraki tüm araştırmaları etkilediği için önemlidir. Alaşımın akış özelliklerini belirlemek için, çeşitli kesit kalınlıklarında sıvı metallerin besleme mesafesini ölçen koşullar altında

modeller geliştirilmiştir. Bu amaçla akışkanlık testlerinde kullanılan katı model görüntüsü ve boyutları Şekil 20'de verilen model plaka modeline dönüştürülerek oluşturulmuştur. Sıvı metalin tüm kanallardan tamamen geçmesini önlemek için sıvı metal kanalının uzunluğu kasıtlı olarak uzun tutulur, böylece sıvı metalin mesafesi ölçülür. Ayrıca, farklı kesit kalınlıkları, verilen döküm şartlarında üretilebilecek malzeme kalınlığının belirlenmesini mümkün kılmaktadır.



Şekil 21. Akıcılık testi modeli görüntüleri ve boyutları.

Test modeli çift taraflı model plakası olarak oluşturulmuş, model tasarımı Şekil 21'de gösterildiği gibi planlanmış ve kum kalıpların hazırlanmasını kolaylaştırmak için sandık şeklinde çıkıntılar oluşturulmuştur. Hazırlanan kum kalıbının kapalı olmasını sağlamak için alt seviyede dişi merkezleme pimi, üst seviyede erkek merkezleme pimi yapılır. Model plakasının bir görüntüsü Şekil 22'de gösterilmektedir.



Şekil 22. Akıcılık testi plak model görüntüsü.

### 3.3. Kum Kalıpların Hazırlanması

Çalışma kapsamında alfa-set reçineyle ve kumla kalıplama hazırlanmıştır. Alfa set reçineli kum hazırlanırken 100 kg kum için 1.6 kg reçine, 400 gr. serter (sertleştirici) eklenmiştir. Alfa set reçineli kum gereken eklemelerden sonra kum mikserinde karıştırılarak oluşturulmuştur. Kalıp hazırlamak amacıyla önce kalıp kumunun modele yapışmasını engellemek için kalıp ayırıcı madde olarak grafit eklenmiştir. Daha sonra hazırlanan kalıp kumu kademeli olarak derece içine doldurulmuş ve aparat yardımıyla sıkıştırılmıştır. Derecenin tamamını kum ile doldurduktan sonra düz aparat ile kum sıkıştırılmış ve derece yüzeyi master yardımıyla düzlenmiştir. Kalıbı hazırladıktan sonra kumun içindeki sertleştiriciye bağlı olarak kalıplar havada kürleştirilerek sertleştirilmesi sağlanmış ve kalıplar hazırlanmıştır. Alfaset reçine kum döküm işleminin örnek bir görüntüsü Şekil 22'de gösterilmektedir.

### 3.4. Alaşımların Ergitme İşlemleri

Ergitme işlemleri Konya'da ticari olarak faaliyet gösteren bir dökümhanede gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi için işletmede kullanılan 500 kg ergitme kapasitesine sahip indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Ergitme sonrası ocaktan alınan sıvı metal cepli tip potada küreleştirme ve aşılama işlemlerine tabi tutulmuştur. Ocakta oluşturulan sıvı metal küreselleştirme amacıyla işlem potasına alınmıştır. Pota içerisine FeSiMg küreselleştirici ve aşılama eklenmiştir. Döküm işlemi için hazırlanan sıvı metal

kum kalıbın içine dökülmüştür. Daha sonra üretilen numunelerin kimyasal içeriklerini belirlemek için işletmedeki Spektrometre cihazı kullanılmıştır. Alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 7'da verilmiştir.

Tablo 7. Alaşım elementinin kimyasal oranı.

| KGDD'lerde Alaşım Elementleri (%) |      |      |       |        |       |       |       |       |
|-----------------------------------|------|------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| C                                 | Si   | Mn   | P     | S      | Cr    | Cu    | Sn    | Mg    |
| 3.71                              | 2.53 | 0.27 | 0.032 | 0.0012 | 0.025 | 0.203 | 0.005 | 0.035 |

Yukarıda verilen kimyasal bileşim değerleri incelendiğinde döküm alaşımının istenilen standarda uygun olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 23. Akıcılık testi plak model görüntüsü.

Şekil 23'de verildiği gibi döküme hazır hale gelen kalıplar aralarına kum ile

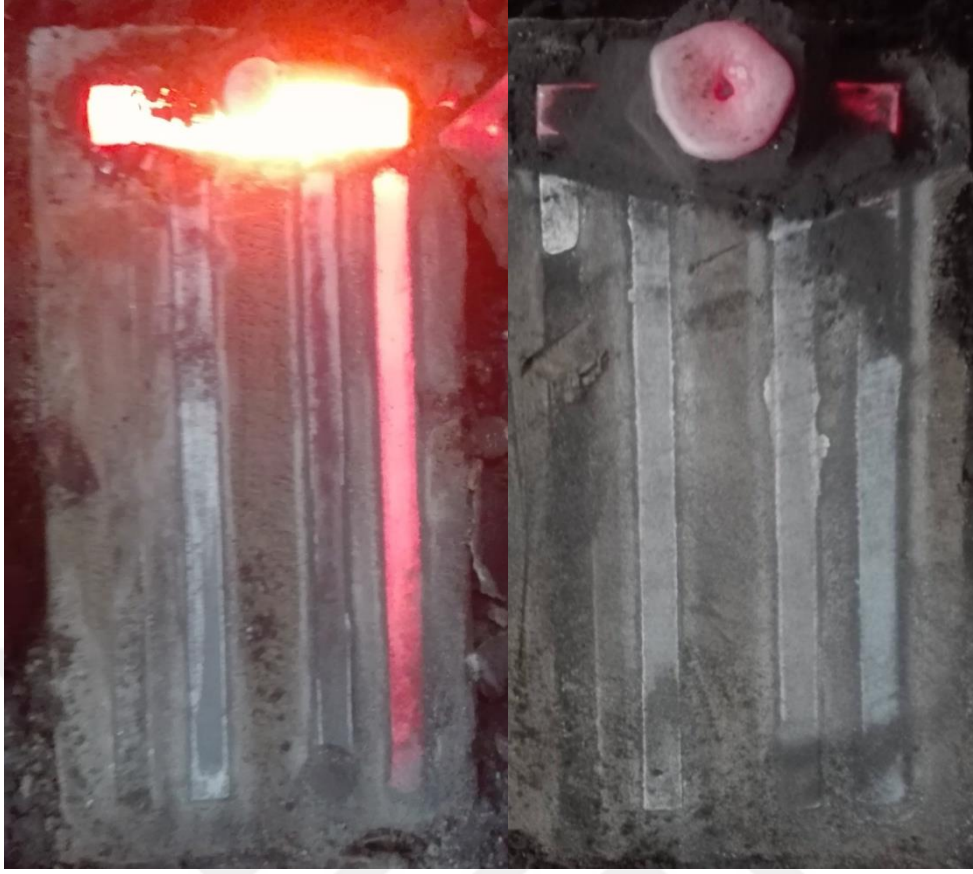
tamponalar yapılıp ve sıvı metal basıncını karşılamak için ağırlıklar ile desteklenmiştir. Sonrasında Tablo 7’de uygun deney şartlarında belirtildiği gibi dökümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 24’de döküm sonrası kalıp görüntüsü verilmiştir.



Şekil 24. Akıcılık testi plak model görüntüsü.

### **3.5. Dökümlerin İncelenmesi**

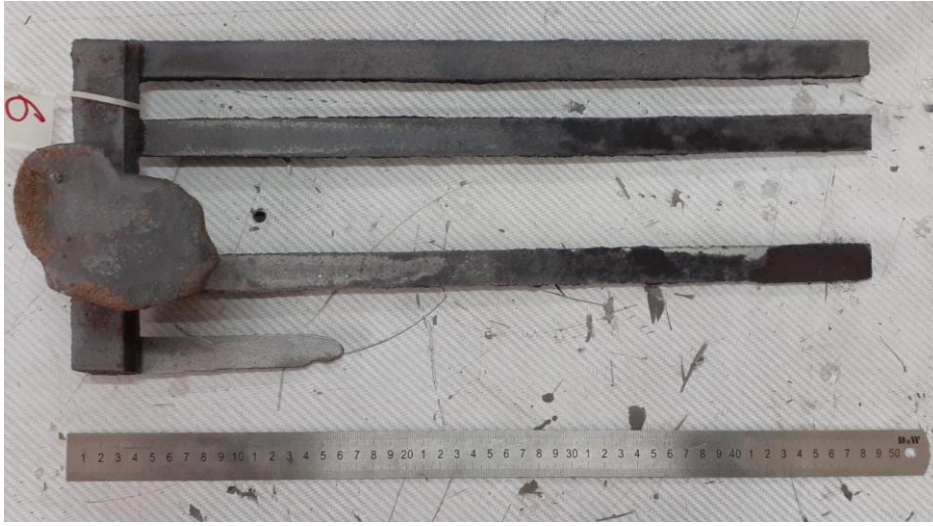
Dökümden sonra kalıplar açılır ve döküm kalıptan çıkarılır. İlk olarak dökümlerin kumu temizlenir ve ardından görsel olarak incelenir. Şekil 25’de kalıptan çıkarılan kalıplanmış numunelerin örnek görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 25. Kalıptan çıkarılan örnek döküm resimleri.

İlk dökümlerde tasarım ve tecrübe eksikliğinden dolayı belirli hatalar saptanmıştır. Şekil 25'da görüldüğü üzere kalıbın tamamen kapanmaması veya kalıp hazırlama sırasında kum kopması gibi hatalardan dolayı bazı kanallar dökümden sonra birleşir. Bu tür hatalar ve ayrıca çapakların birleştirilmesi nedeniyle, erimiş metalin gidişatını doğru bir şekilde belirlemek mümkün değildir. Bu nedenle bu dökümlerden elde edilen sonuçlar değerlendirmeden çıkarılarak döküm işlemi tekrarlanmıştır.

Tekrarlanan deneyler sonrasında çapak oluşumu, kanal birleşimi ve istenilen kalınlıkta kanallara sahip olarak elde edilen döküm numuneler incelemelere tabi tutulmuştur. Kanallardaki sıvı metal ilerleme mesafesini tespiti için Şekil 26'de görüldüğü gibi tüm kanallardaki sıvı metal ilerleme mesafeleri tespit edilmiştir.



Şekil 26. Döküm kesit kanallarındaki sıvı metal ilerleme mesafesinin ölçümünün gösterilmesi.

### 3.6. Mikroyapı İncelemeleri

Tez kapsamında belirlenen deney parametrelerine uygun olarak Tablo 7’de verilen deney şartlarında gerçekleştirilen dökümlerden elde edilen döküm numuneler mikro yapı incelemelerine tabi tutulmuştur. Mikroyapı incelemeleri ile değişen döküm şartları ve kesit kalınlığının içyapıya olan etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Mikroyapısal inceleme için, Şekil 27'deki kesitten alınan numuneler orta kesiti incelemek amacıyla bakalite alınmıştır. Buna göre farklı parametreler altında yapılan bir döküm deneyinde farklı kalınlıklarda kesitten elde edilen numuneler mikroyapı analizi için alınmıştır. Montaj yüzeyinden alınan örnekler 2500-1200-800-400-180-60 zımparayla ince ve kaba zımpara yapıldıktan sonra elmas pasta ile parlatılarak mikroyapı yönünden incelenmiştir.



Şekil 27. Mikroyapı numunesi alınan bölgelerin gösterilmesi.

Metalografik olarak hazırlanan yüzeylerden mikroskobik incelemeler ve imaj

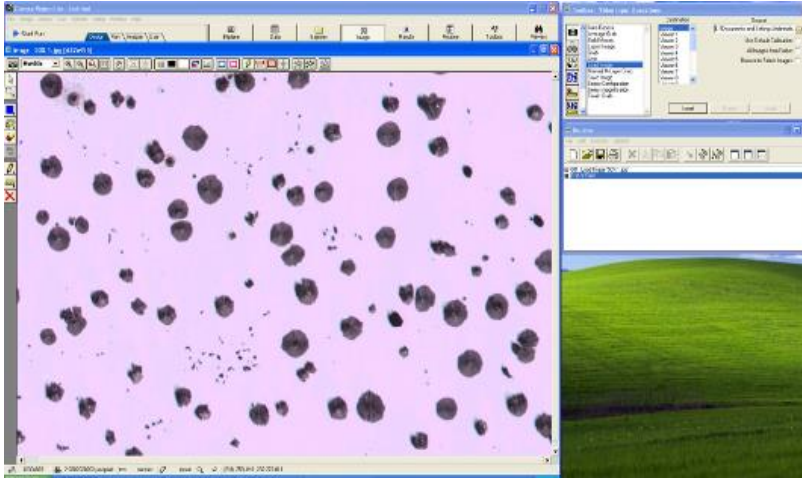
analiz sistemi ile bazı ölçümler Nikon Eclipse L150A ışık mikroskop cihazı ve cihazla birlikte çalışan bir Clemex dijital kamera ile alınan görüntülerden Clemex Vision Lite image analiz programı yardımıyla yapılmıştır. İmage analizi terimini kullandığımız sistemin prensibi bir mikroskop, mikroskoba bağlanan bir kamera ve bu kamera yardımıyla hazırlanmış numunelerden alınan görüntülerin bilgisayar ortamına iletilmesi ve bilgisayardaki bir programla kullanıcıya tanımlanmış, yarı ya da tam otomatik olarak analizlerinin yapılmasına dayanır. Yazılım programının analiz yapım esası; resimdeki renklerin farklı oluşuna göre her ayırıcı rengi farklı birer faz veya bölge şeklinde algılaması ve bu farklılıklara göre sonuçlar vermesi işlemidir. Şekil 28’de imaj analiz uygulaması için kullanılan cihazlara ait bir görsel verilmiştir.



Şekil 28. Bilgisayar destekli imaj analiz sistemi görüntüsü.

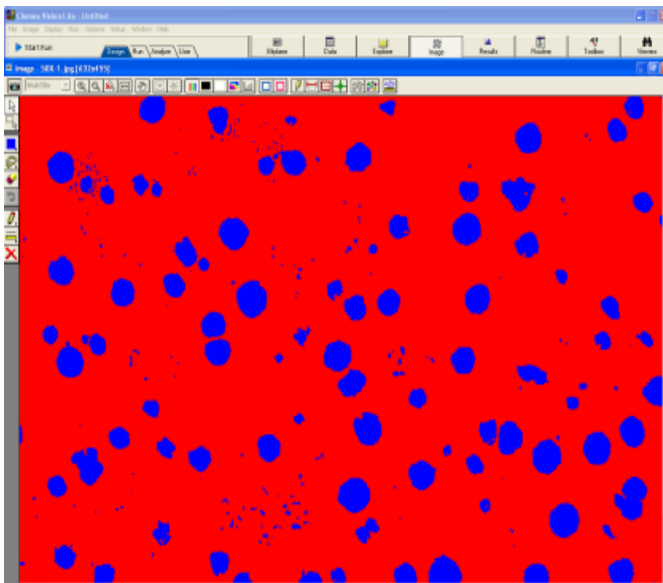
### **3.7. İmage Analiz Sistemi ile Mikroyapının İncelenmesi**

Metalografik hazırlıklardan sonra numune, dağlamadan önce mikroskop altında incelendi ve KGDD malzeme küreleri ölçüldü. Numunenin örnek bir mikro yapı görüntüsü, Eclipse L150 Nikon marka bir düzlemsel optik mikroskop üzerinde çalışan Clemex görüntü analiz yazılımı ile alınmıştır. Şekil 29'de gösterilmektedir.



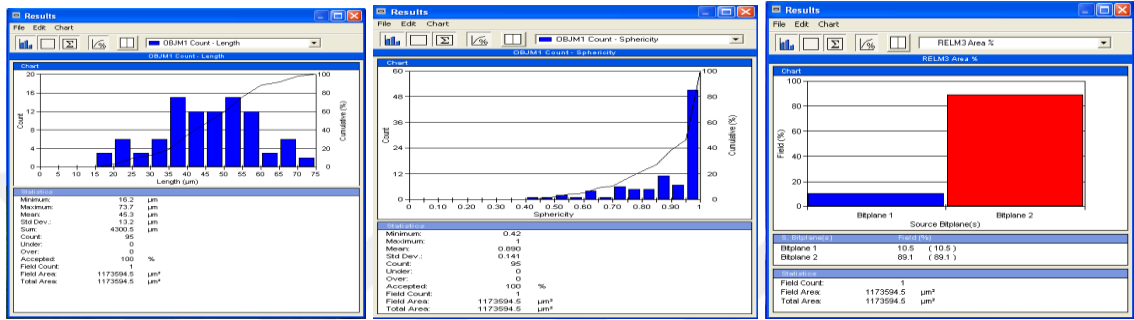
Şekil 29. Parlatmadan sonra numunenin mikro yapı görüntüsü.

Resmin üzerindeki ölçümün ve yapının analizi işlemi için temel farklılık gözlem yapılan renklerin farklılığı olup, incelemesi yapılan görüntü kalitesinin ve netliğinin sonuçları doğrudan etkilemesidir. Sonuçların üzerinde önemli etkiye sahip olması sebebiyle yükleme işlemi sonrasında resmin özelliklerinin daha iyi hale getirilmesi gerekmektedir. Mikro yapının net şekilde görülmesinden sonra analiz işlemine geçilir. Bu işlem için ton dönüştürme ayarlaması yapılması gerekmektedir. Bu adım için resim ve yapılacak analize bağlı olarak farklı alternatifler bulunmaktadır. Yazılımda ton dönüştürme işlemi için seçimi otomatik olarak yapabiliriz. Bu seçim sonrası yapıda kaç farklı faz varsa o kadar ton dönüştürme seçimi yaparız. Seçilen sayıda faz kadar farklı renkte otomatik olarak dönüştürme işlemi yapılmaktadır. Şekil 30, renk uyumlu bir görüntünün bir örneğini göstermektedir.



Şekil 30. İki aşamada olduğu varsayılan mikro yapı görüntülerin renk eşleştirmesinden sonraki görüntü.

Daha doğru sonuçlar istiyorsanız, ton geçişinden sonra görüntüde bazı değişiklikler yapmanız gerekir. İncelenen görüntü üzerinde yapılması gereken işlemler, yapılan analize ve görüntünün özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Numune numune küre manipülasyonu için "Toolbox" menüsünün "Measure Objects" sekmesinde "Sphere" ve "Length" seçildi. Elde edilen sayısal verilerin sonuçları Şekil 31'de gösterilmektedir. İncelediğimiz görüntüdeki küre sayısı ve numunenin uzunluğu Şekil 31a'da, küreselleşme oranı Şekil 31b'de ve faz oranı Şekil 31c'de gösterilmektedir.

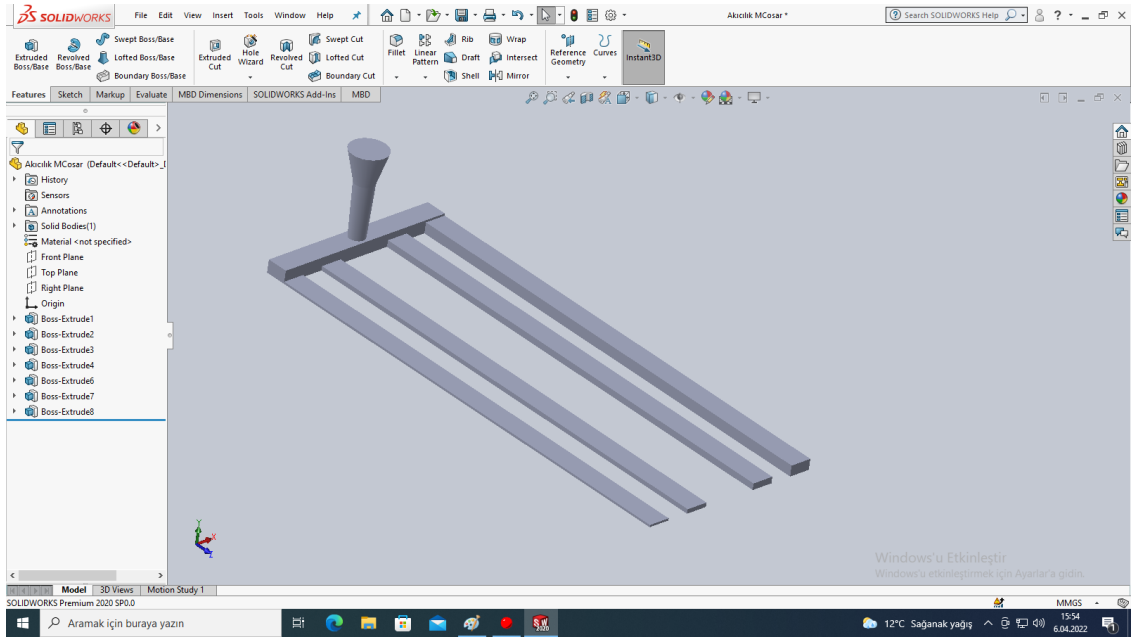


Şekil 31. a) Küre sayısı ve uzunluğu, b) Küreselleşme hızının belirlenmesi, c) Faz ilişkisinin belirlenmesi.

İmage analiz yöntemiyle ulaştığımız sayısal verilerinait sonuçlarını incelediğimizde mikro-yapıda 95 adet küre tespit edilmiştir ve en küçük küre çapı: 16.2 µm, en büyük küre çapı: 73.7 µm, ortalama olarak ise 45.3 µm olarak ölçülmüştür. Tespit ettiğimiz 95 adet kürenin, küreselleşme oranı incelenmiş ve küreselleşme oranı % 89 olarak bulunmuştur. Resimdeki fazların oranları karşılaştırıldığında ise mavi faz oranı % 10.5 kırmızı faz oranı % 89.1 ve yok sayılan alan ise % 0.4 olarak ölçülmüştür.

### 3.8. Modelleme Çalışmaları

Modelleme çalışması için FlowCast döküm simülasyonu akıcılık modelleme programı uygulanmıştır. Döküm modelleme çalışmasında gerçeğe uygun döküm koşullarında yapılan dökümlerin simülasyon ortamında sayısal olarak birebir modellenebilmesi uygulamanın temel hedefidir. Gerçek döküm işlemlerinde ortaya çıkarılan sıvı metal ilerleme probleminin simülasyon programıyla, kritik sıvı oranı (CLF) değerinin döküm parametrelerine uygun değeri için simülasyon programındaki gerçek karşılığı bulunabilecektir. Öncelikle modelin tasarımı 3D bilgisayarlı tasarım programıyla katı modeli SolidWorks programında oluşturuldu. Şekil 32'da tasarıma ait katı model çizimi verilmiştir.



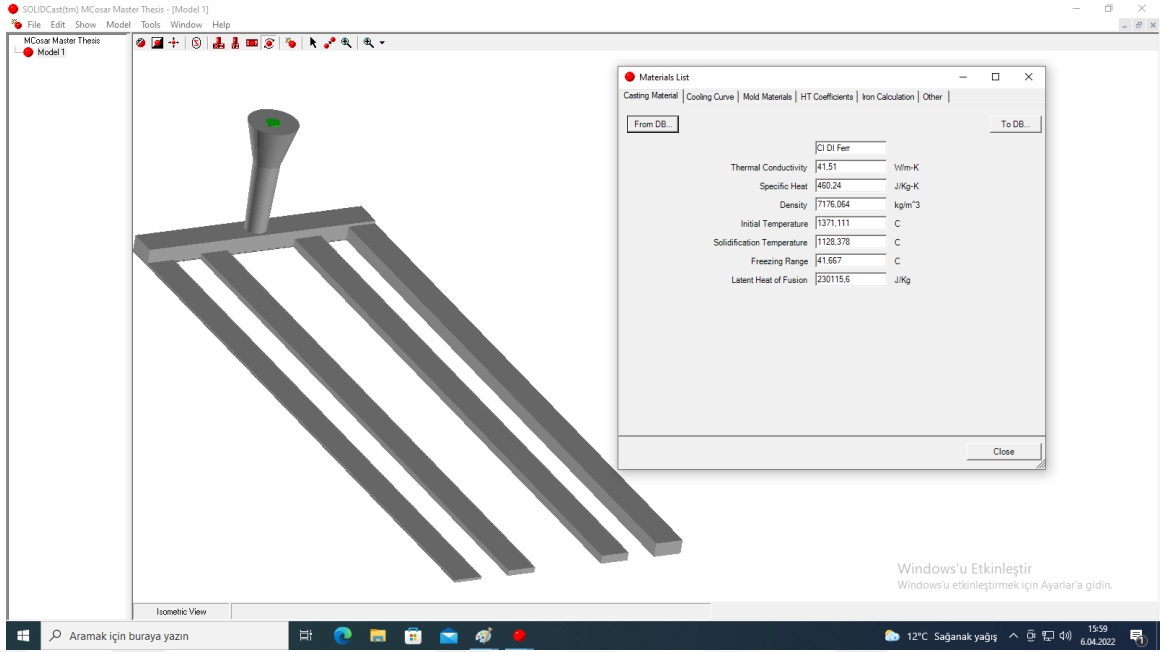
Şekil 32. Akıcılık modeli katı model çizimi.

Modelin döküm geometrisi SolidWorks programıyla katı model olarak oluşturulur, ardından STL formatına dönüştürülür ve döküm simülasyon programına aktarılır. Daha sonra döküm alaşım ve kalıp malzemesinin tipini ve termal özelliklerini belirlemiştir. Simülasyon veritabanında CIDI ferritik alaşım için döküm alaşımın termofiziksel değerleri Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Alaşımın simülasyon veritabanında termofiziksel olarak kullanılan 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. |
|------------|-------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|--------------------------|
| CI DI Ferr | 41.51                   | 460.24             | 7176.064                   | 1350-1450            | 1128.378               | 41.667               | 230115.6                 |

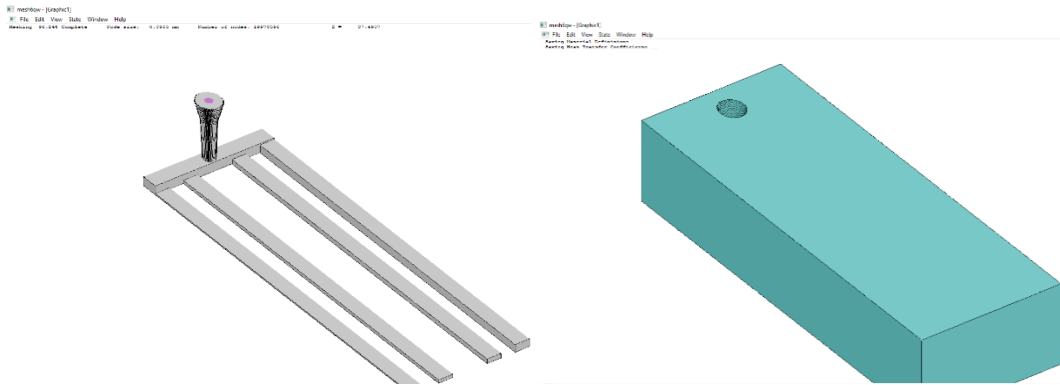
Simülasyon veritabanında çoğu alaşımların termofiziksel özellikleri normal bir şekilde yüklenir ve istenilen özelliği manuel olarak değiştirebiliriz. Ayrıca döküm alaşımındaki hacim küçülmeleri, soğuma eğrileri ve CFS verileri gibi parametreler önemli ölçüde değişebilir. Şekil 33'de parçanın programa yüklenmesi ve malzeme tanımlanması aşaması gösterilmektedir.



Şekil 33. Akıcılık modelinin SolidCast programına yüklenmesi, malzeme tanımlanması.

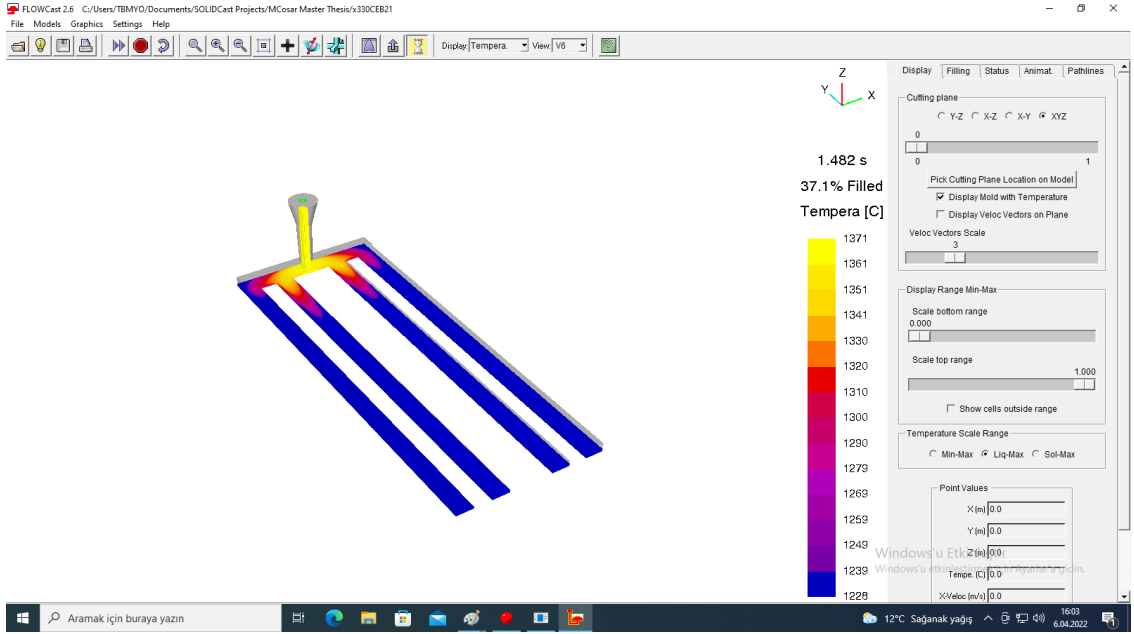
Katı modelin tanımlanan malzeme özellikleri ve geometrisi, meshlenmiş programa geçirilir ve girilen sınır koşulları, her bir mesh elemanı için simülasyon programında çözülür.

Şekil 34’de mesh işleminde örnek görüntüler verilmiştir. Mesh işlemi yapılırken modelin en ince kesitli yerinden en az 3 adet kübik mesh olacak şekilde sınır değeri belirlenmiştir. Bu kapsamda 20.000.000 adet meş yapılmıştır.



Şekil 34. SolidCast programı ile modelin meş edilmesi.

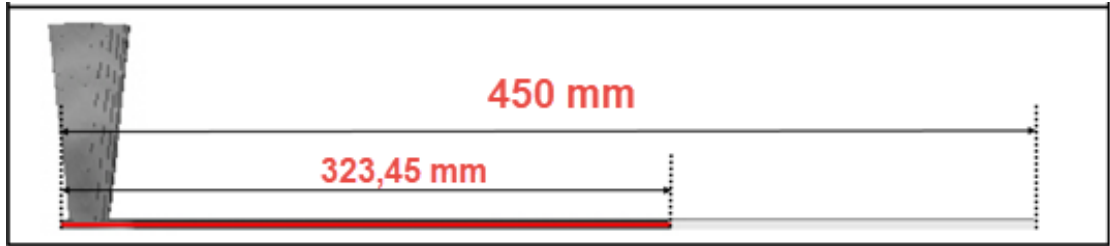
SolidCast simülasyon programının kalıp doldurma işleminde başka bir yazılım olan FlowCast modülü kullanılmaktadır. Sıvı metali kalıp boşluğuna enjekte ederken soğuk montaj, türbülans, basınç, doldurma vb. FlowCast hidrodinamik standardına göre hesaplanır. Şekil 35, simülasyon programında kalıbın dolgununu gösterir.



Şekil 35. FlowCast programı ile kalıbın doldurulması esnasındaki görüntüsü.

Modelleme ile ilgili yapılan bu çalışmalar, dolum süreleri ve gerçek dökümler dikkate alınarak yapılmıştır. Ayrıca değişen döküm koşullarının etkisini belirlemek için modellemede farklı değerlerde CLF (Critical Liquid Part) değerleri alınmış ve gerçek döküm ile eşleştirme yapılmıştır.

Ayrıca modelleme programında sıvı metal ilerleme mesafeleri ölçülerek gerçek dökümlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 36'da ölçümün nasıl yapıldığı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 36. Modelleme programından sıvı metal mesafesinin belirlenmesi.

#### 4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışmanın sonucunda, yapmış olduğumuz deney ve modelleme çalışmalarıyla elde ettiğimiz sonuçlara göre değerlendirme yapılmıştır. Deney sonuçlarıyla, gerçek döküm koşullarına göre yapılan dökümlerin sonuçları, sıvı metalin farklı kesit kalınlıklarındaki yolluklarda ilerleme mesafesi, dolun hızı, değışen döküm şartları ve döküm sıcaklığının etkilerinin kesit kalınlıklarına göre mikro yapı üzerinde değışimi verilecektir. Akıcılık modelleme sonuçları ile gerçek koşullara uygun döküm sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

##### 4.1. Döküm Deneyleri Sonuçları

Tez çalışmaları kapsamında farklı döküm şartlarına bağı olarak yapılan deneylerden elde edilen numuneler incelenmiştir. Döküm numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra ilk olarak makro olarak gözle kontrol edilmiş ve döküm uygunluğu teyid edildikten sonra incelemelere geçilmiştir. Akıcılık özelliklerinin kontrolü açısından kesit kalınlıklarının ilerleme mesafesi ölçümü Deneysel Çalışmalar bölümünde anlatıldığı gibi gerçekleştirilmiştir. Şekil 37’de 1350 °C’ de metalürji kalitesi 10 ve dolun hızı 5 sn deney şartlarında ve Şekil 38’de aynı şartlar altında dolun hızı 10 sn de gerçekleştirilen döküm görüntüleri verilmiştir.

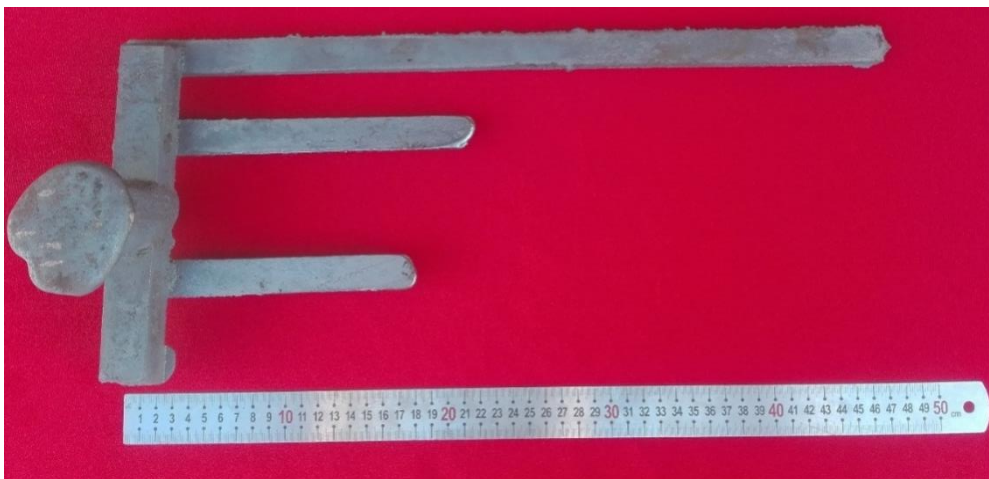


Şekil 37. 1350 °C sıcaklık, %10 metalürji kalitesi, 5 sn dolun hızı şartlarındaki döküm.



Şekil 38. 1350 °C sıcaklık, %10 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm.

Şekil 39 ve Şekil 40'da verilen görüntüler incelendiğinde her iki şartlarda da sıvı metalin 6 ve 10 mm kesit kalınlığına sahip kanallarda tam olarak ilerlediği, ancak 2 ve 4 mm kanallarda tam olarak ilerleyemediği görülmektedir. Dolun hızının sıvı metal ilerlemesine etkisi karşılaştırıldığında 10 sn dolun hızına sahip döküm deneyinde 2 ve 4 mm kanallardaki ilerleme mesafesinin 5 sn de doldurulan kalıba göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun yavaş dolun şartlarında sıvı metalin kalıp ile teması esnasında sıcaklığını yitirmesi ve sıvının akıcılığını daha kısa mesafelerde kaybetmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 39'da 1350 °C'de metalürji kalitesi 50 ve dolun hızı 5 sn deney şartlarında ve Şekil 40'da aynı şartlar altında dolun hızı 10 snde gerçekleştirilen döküm görüntüleri verilmiştir.



Şekil 39. 1350 °C sıcaklık, %50 metalürji kalitesi, 5 sn dolun hızı şartlarındaki döküm.



Şekil 40. 1350 °C sıcaklık, %50 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm.

Şekil 40 ve Şekil 41’de verilen görüntülerde 6 ve 10 mm kesit kalınlığına sahip kanallarda sıvı metalin tam olarak ilerlediği, ancak 2 ve 4 mm kanallarda tam dolunu gerçekleştirmediği anlaşılmaktadır. Dolun hızının etkisi karşılaştırıldığında yine metalürji kalitesi %10 olarak belirlenen dökümde olduğu gibi yavaş dolunma mesafesi daha az tespit edilmiştir. Metalürji kalitesinin sıvı metal ilerleme mesafeleri Şekil 43, Şekil 44 ile Şekil 41 ve 42 arasındaki döküm görüntüleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemelerde metalürji kalitesinin artmasının sıvı metal ilerleme mesafesine olumlu etki ettiği ve kalıpta tam olarak dolmayan 2 ve 4 mm lik kanallarda daha fazla dolun gerçekleştirildiği anlaşılmaktadır. Şekil 41’de 1350 °C’ de metalürji kalitesi 90 ve dolun hızı 5 sn deney şartlarında ve Şekil 42’de aynı şartlar altında dolun hızı 10 snde gerçekleştirilen döküm görüntüleri verilmiştir.



Şekil 41. 1350 °C sıcaklık, %90 metalürji kalitesi, 5 sn dolun hızı şartlarındaki döküm.

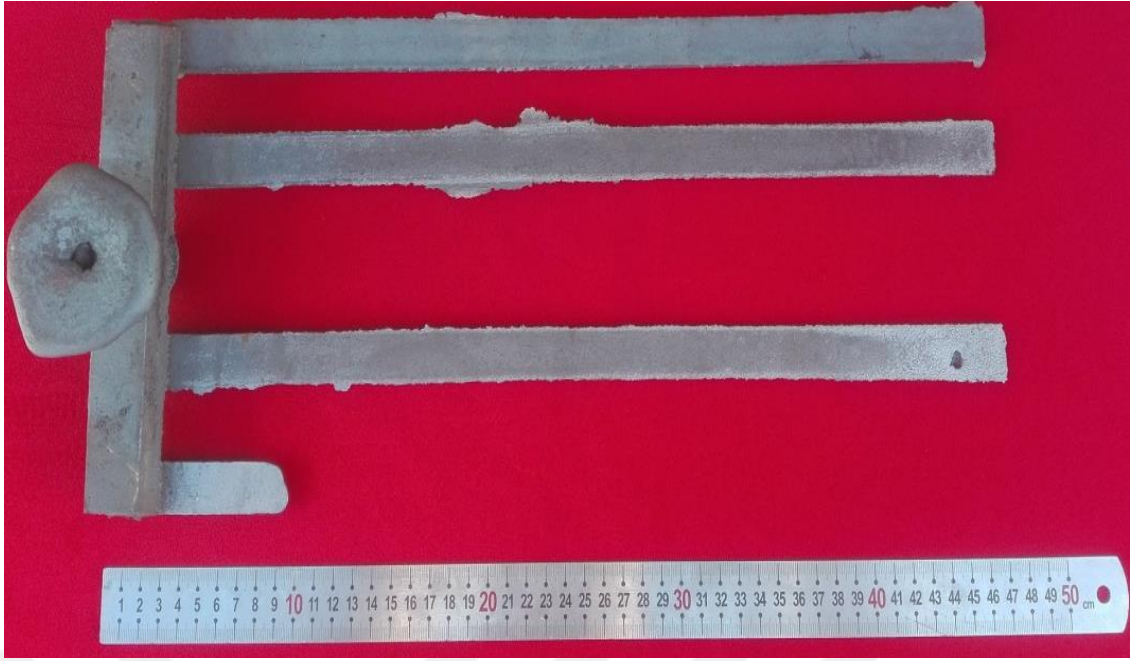


Şekil 42. 1350 °C sıcaklık, %90 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm.

Şekil 42 ve Şekil 43'te verilen görüntülerde 4, 6 ve 10 mm kesit kalınlığına sahip kanallarda sıvı metalin tam olarak ilerlediği, ancak 2 mm kanalda tam dolunu gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Dolun hızının etkisi karşılaştırıldığında yine metalürji kalitesi %10 ve %50 olarak belirlenen dökümlerde olduğu gibi 5 sn olarak belirlenen nispeten hızlı dolun şartlarında ilerleme mesafesi daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Metalürji kalitesinin sıvı metal ilerleme mesafelerine etkisi karşılaştırıldığında en fazla ilerleme miktarının %90 metalürji kalitesine sahip olan döküm şartlarında olduğu gözlenmiş ve metalürji kalitesinin de akıcılık üzerinde olumlu etkisi olduğu gözlenmiştir. Şekil 43'te 1400 °C' de metalürji kalitesi 50 ve dolun hızı 10 sn deney şartlarında Şekil 44'te aynı deney şartlarında döküm sıcaklığı 1450 °C'de gerçekleştirilen döküm görüntüleri verilmiştir.



Şekil 43. 1400 °C sıcaklık, %50 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm.



Şekil 44. 1450 °C sıcaklık, %50 metalürji kalitesi, 10 sn dolun hızı şartlarındaki döküm.

Şekil 43 ve Şekil 44'te verilen görüntülerde 4, 6 ve 10 mm kesit kalınlığına sahip kanallarda sıvı metalin tam olarak ilerlediği, ancak 2 mm kanalda tam dolunu gerçekleştirmediği anlaşılmaktadır. Metalürji kalitesi %50 ve 10 sn dolun hızı şartlarında Şekil 42'de 1350 °C, Şekil 43'te 1400 °C ve Şekil 3'te 1450 °C'de yapılan dökümler karşılaştırıldığında döküm sıcaklığının akıcılık üzerinde en etkin parametre olduğu anlaşılmaktadır. Döküm sıcaklığının artmasıyla birlikte sıvı metal ilerleme miktarında artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun sıvı metalin sıcaklığının artması ile birlikte katılma için sıvının ilerlemesi için daha fazla vakit bulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Döküm numunelerinin sıvı metal kesit kalınlıklarındaki ilerleme mesafeleri deney numuneleri üzerinden ölçülmüş ve elde edilen değerler Tablo 9'de verilmiştir. Böylece döküm numunelerde yapılan gözle kontrol ile gerçekleştirilen makro incelemeler sayısal olarak anlamlı bir şekilde ifade edilebilecektir. Tabloda deney şartları değerleri yazılan rakamlar sıcaklık, metalürji kalitesi ve dolun hızı şeklinde kodlanmıştır. Örnek olarak 5 numaralı deneyde 1350 °C sıcaklıkta 5 sn dolun hızında metalürji kalitesi %90 olan döküm şartları için 1350-90-5 şeklinde kodlama verilmiştir.

Tablo 9. Dökümler sonucu ortaya çıkan sıvı metallerin ilerleme mesafeleri.

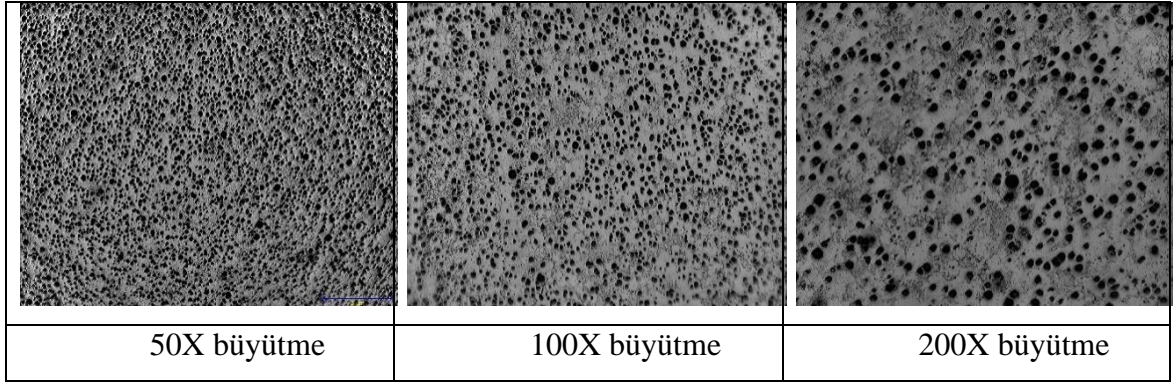
| D.No | Deney Şartları | Kesit Kalınlığına Bağlı Sıvı İlerleme Mesafesi (mm) |      |      |       |
|------|----------------|---|------|------|-------|
|      |                | 2 mm  | 4 mm | 6 mm | 10 mm |
| 1    | 1350 – 10 – 5  | 23  | 125  | 290  | 450   |
| 2    | 1350 – 10 – 10 | 37  | 122  | 195  | 450   |
| 3    | 1350 – 50 – 5  | 36  | 181  | 212  | 450   |
| 4    | 1350 – 50 – 10 | 24  | 217  | 355  | 450   |
| 5    | 1350 – 90 – 5  | 30  | 270  | 386  | 450   |
| 6    | 1350 – 90 – 10 | 54  | 220  | 322  | 450   |
| 7    | 1400 – 10 – 5  | 56  | 433  | 450  | 450   |
| 8    | 1400 – 10 – 10 | 48  | 424  | 450  | 450   |
| 9    | 1400 – 50 – 5  | 54  | 442  | 450  | 450   |
| 10   | 1400 – 50 – 10 | 58  | 438  | 450  | 450   |
| 11   | 1400 – 90 – 5  | 72  | 450  | 450  | 450   |
| 12   | 1400 – 90 – 10 | 65  | 450  | 450  | 450   |
| 13   | 1450 – 10 – 5  | 81  | 450  | 450  | 450   |
| 14   | 1450 – 10 – 10 | 74  | 446  | 450  | 450   |
| 15   | 1450 – 50 – 5  | 87  | 450  | 450  | 450   |
| 16   | 1450 – 50 – 10 | 84  | 450  | 450  | 450   |
| 17   | 1450 – 90 – 5  | 93  | 450  | 450  | 450   |
| 18   | 1450 – 90 – 10 | 82  | 450  | 450  | 450   |

Tablo 9’ de verilen değerler incelendiğinde 10 mm kesit kalınlığına sahip kanalın tüm döküm şartlarında tam olarak dolu olduğu anlaşılmaktadır. Deney parametreleri açısından durum değerlendirildiğinde döküm sıcaklık artışının sıvı metal ilerleme mesafesi üzerinde en önemli faktör olduğu görülmektedir. Sıcaklık artışı ile birlikte kesit kalınlıklarının tümünde sıvı metal ilerleme mesafeleri daha fazla olmaktadır. Akıcılık üzerinde diğer önemli deney parametrenin ise dolun hızı olduğu anlaşılmaktadır. Sıvı metal kalıba daha hızlı doldurulduğunda kalıp içerisinde sıvı metalin daha uzun süre katılaşmadan ilerleyebildiği gözlenmiştir. Dökümhanelerin üretim prosesleri, kullanılan aşılama, küreselleştirici alaşım elementi çeşidi ve süresine bağlı olarak değişkenlik gösteren metalürji kalitesi parametresinin de artışı ile az da olsa sıvı metalin ilerleme mesafesinin arttığı alaşımın akıcılığına olumlu yönde etki ettiği tespit edilmiştir.

#### 4.2. Mikroyapı İncelemeleri ve Değerlendirilmesi

Mikroyapı çalışması örnekleri, deneysel çalışmada anlatıldığı gibi kesitlerden elde edilmiştir ve Şekil 47’de gösterilmektedir. Numunelerin tüm kalıplama koşullarında mikroyapı incelemesi ve Farklı kesitlerden alınan numuneler 50X, 100X ve 200X büyütmelemlerde yapılmıştır.

Şekil 44’da 1400 °C döküm sıcaklığında, %50 metalürji kalitesinde ve 10 sn dolun hızı şartlarındaki 10 numaralı deney numunesine ait 4 mm kesit kalınlığındaki farklı büyütmelelerde mikroyapı resimleri verilmiştir.

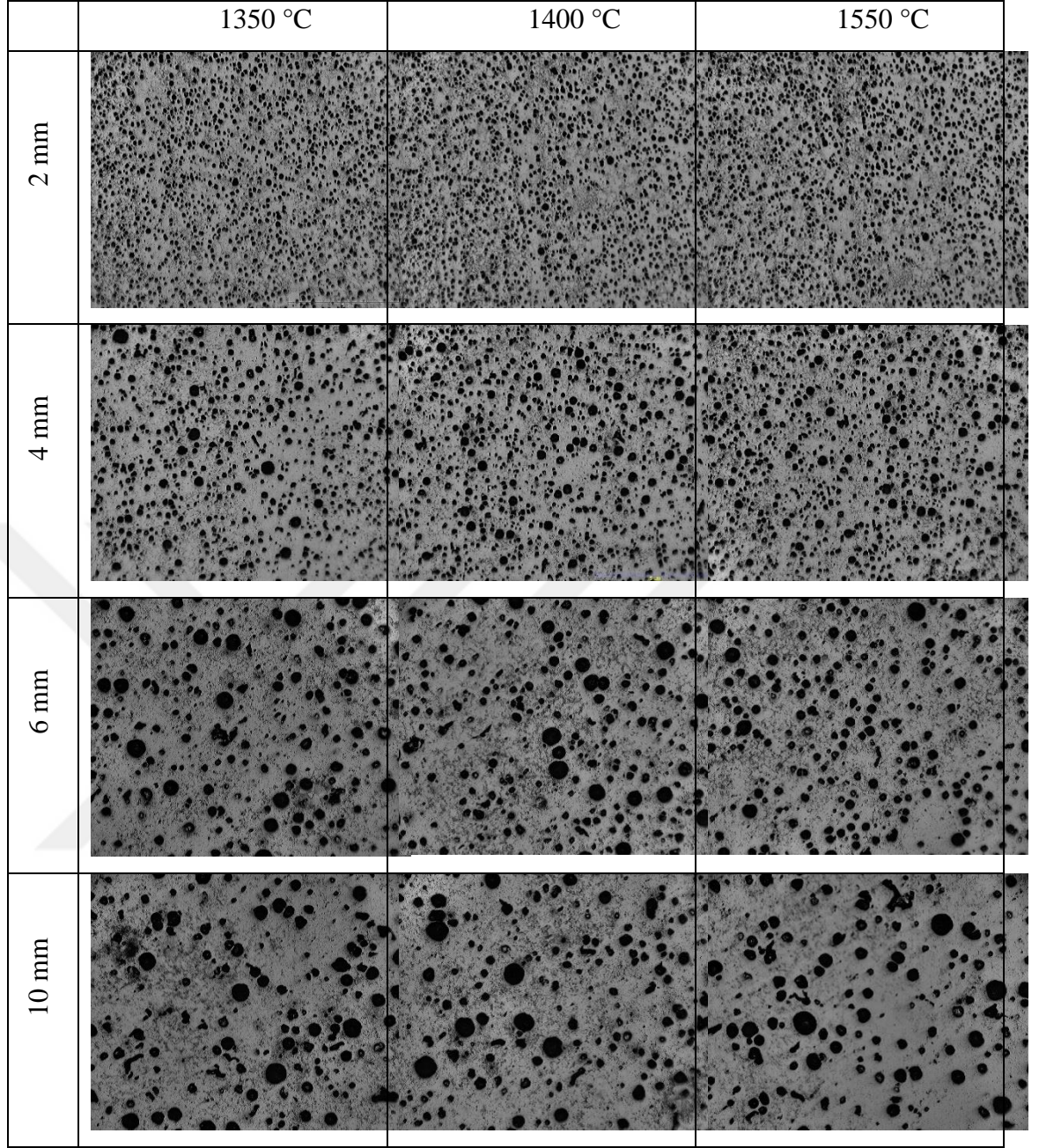


Şekil 45. Farklı büyütmelelerde 4 mm kesit kalınlığındaki mikroyapı resimleri.

Şekil 45’da verilen parlatma sonrası örnek mikroyapı resimlerinde görüldüğü gibi numune grafitler küre şeklinde oluşmuştur. Döküm deneylerinden elde edilen yapının hedeflenen küresel grafitli dökme demir yapısına sahip olduğu anlaşılmaktadır. Farklı büyütme seviyelerinde yapıdaki detayların büyütme oranının artması ile birlikte daha da netleştiği görülmektedir. Ancak yapılan incelemelerde 100X büyütmenin hem yeterli detay vermesi hem de daha geniş bir alanda görüntü elde edilmesini sağlaması bakımından daha uygun olacağı düşünülmüştür. Bu sebeple deney şartlarına uygun olarak yapılan dökümlerin tümünden elde edilen numunelere ait 100 X büyütmede çekilen mikroyapı resimleri tez kapsamında paylaşılmıştır. Mikroyapı resimleri inceleme aşamasında deney parametreleri baz alınarak alt başlıklar altında incelenmiştir. Deney parametreleri incelendiğinde sıvı metal döküm sıcaklığı, metalürji kalitesi, dolun hızı parametrelerinin mikroyapı üzerinde değişen kesit kalınlıklarındaki etkileri değerlendirilmiştir.

#### 4.2.1. Döküm Sıcaklığına Bağlı Mikroyapı Değişiminin İncelenmesi

Çalışma kapsamında Deneysel Çalışmalar bölümünde açıklandığı üzere belirlenen deney parametrelerine uygun olarak 18 döküm deneyi gerçekleştirilmiştir. İlgili deneylerde döküm sıcaklığının mikroyapı üzerinde değişimini incelemek üzere %50 metalürji kalitesi ve 10 sn dolun hızı şartlarında 1350 °C sıcaklığında dökülen 4 numaralı deney, 1400 °C sıcaklığında dökülen 8 numaralı deney ve 1450 °C sıcaklığında dökülen 12 numaralı deney numunelerinden elde edilen 100X büyütmede çekilen farklı kesitlerdeki mikroyapı resimleri Şekil 45’da verilmiştir.

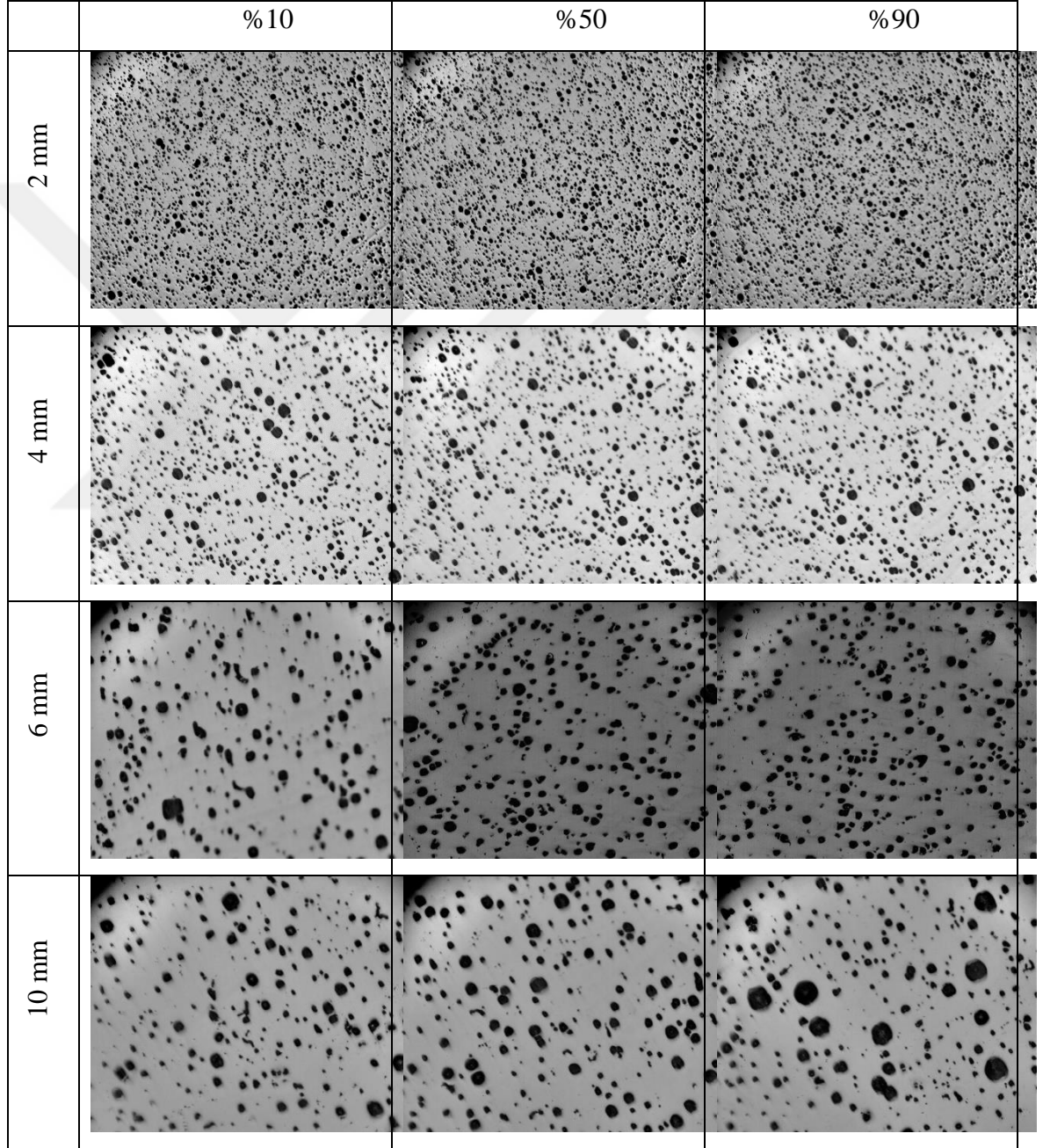


Şekil 46. Farklı döküm sıcaklıklarındaki mikroyapı resimleri (100X büyütme).

Şekil 46’da verilen mikroyapı resimleri incelendiğinde ilk olarak kesit kalınlığının artması ile birlikte ortaya çıkan yapıda grafit kürelerinin çapında artış olduğu gözlenmektedir. Küre çapının artması ile birlikte birim alana düşen küre sayısında da azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca döküm sıcaklığının artmasının yapıda bariz farklar ortaya çıkarmadığı kesit kalınlık değişiminin yapı değişiminde daha etkili olduğu gözlenmiştir. Mikroyapı resimlerinde dikkat çeken bir diğer husus da artan kesit kalınlığı ile birlikte grafit kürelerinin küreselliğinin bozunmaya başlamasıdır. Grafit kürelerinin artan kesit kalınlıklarında ortalama çapları arasındaki değişimde ince kesitlere nazaran daha fazla olduğu tespit edilmektedir.

#### 4.2.2. Metalürji Kalitesine Bağlı Mikroyapı Değişiminin İncelenmesi

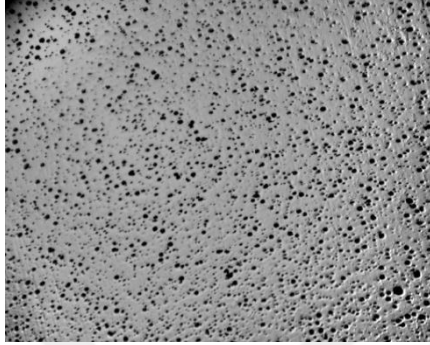
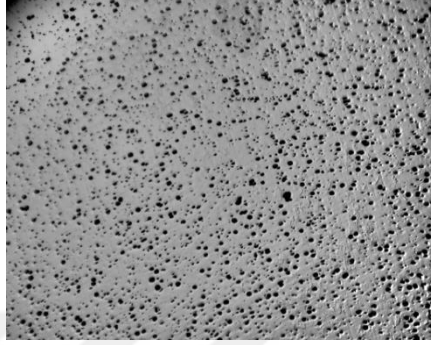
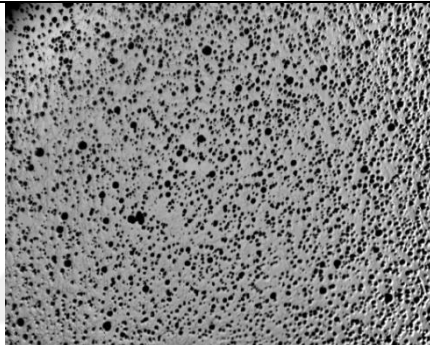
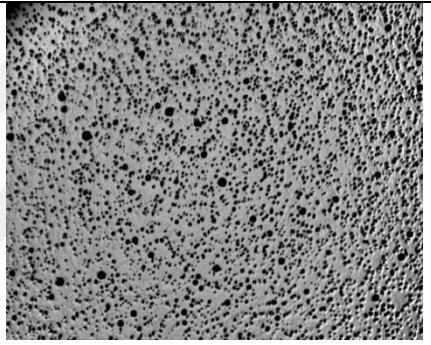
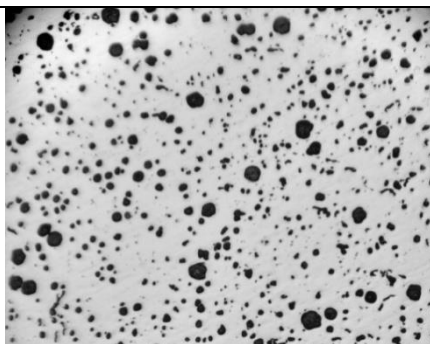
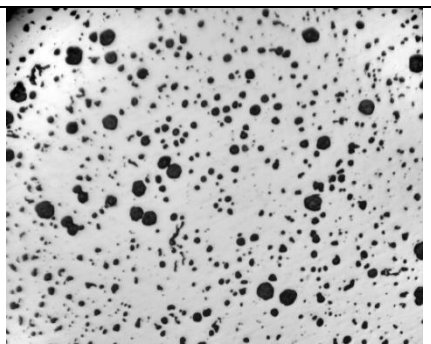
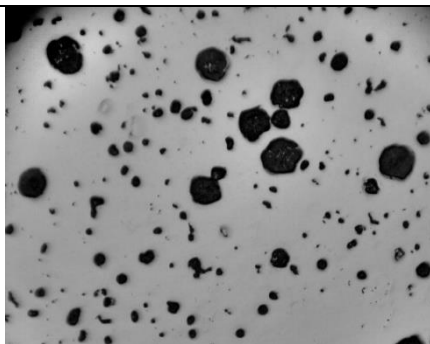
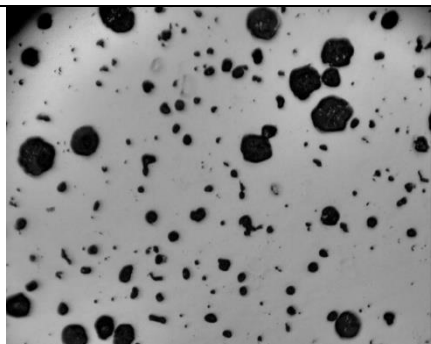
Metalürji kalitesinin mikroyapı üzerinde etkisini incelenmesi için 1350 °C döküm sıcaklığında, 5 sn dolun süresinde gerçekleştirilen %10 metalürji kalitesi şartlarındaki 1 numaralı deney, %50 metalürji kalitesindeki 3 numaralı deney ve %90 metalürji kalitesindeki 5 numaralı deney numunelerinden elde edilen 100X büyütmede çekilen farklı kesitlerdeki mikroyapı resimleri Şekil 47’de verilmiştir.



Şekil 47. Farklı metalürji kalitesi şartlarında mikroyapı resimleri (100X büyütme).

Şekil 47’de verilen mikroyapı resimleri incelendiğinde ilk olarak kesit kalınlığının artması ile birlikte ortaya çıkan yapının Şekil 47’de verilen resimler de olduğu gibi

değiştii anlaşılmaktadır. Metalürji kalitesi değişiminin yapıda grafit küre çapı ve küreselliği üzerinde etkili olduğu gözlenmektedir. Metalürji kalitesinin artması ile birlikte grafitlerin daha küresel olduğu ve en iyi yapının tüm kesitler için %90 metalürji kalitesi şartlarında gerçekteştii anlaşılmaktadır.

|       | 5 sn  | 10 sn  |
|-------|---|--|
| 2 mm  |    |    |
| 4 mm  |   |   |
| 6 mm  |  |  |
| 10 mm |  |  |

Şekil 48. Sıvı metal kalıba farklı dolum sürelerinde mikroyapı resimleri (100X büyütme)

### **4.2.3. Sıvı Metalin Kalıba Dolum Hızının Mikroyapı Üzerine Etkisinin İncelenmesi**

Sıvı metal dolum hızının mikroyapı üzerinde etkisini incelenmesi için 1450 °C döküm sıcaklığı, %50 metalürji kalitesi şartlarındaki 5 sn dolum ile gerçekleştirilen 15 numaralı deney ve 10 sn dolum süresinde gerçekleştirilen 16 numaralı deney numunelerinden elde edilen 100X büyütmede çekilen farklı kesitlerdeki mikroyapı resimleri Şekil 48’de verilmiştir.

Şekil 48’de verilen mikroyapı resimleri incelendiğinde dolum hızının bariz bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir.

### **4.3. İmage Analiz Sistemi ile Mikroyapı İnceleme Sonuçları**

Metalografik hazırlık süreçlerinden sonra numuneler parlatma sonrası imaj analiz incelemelerine maruz bırakılmıştır. Bu kapsamda % küresellik oranı, kürelerin ortalama çapı ve grafit kürelerinin kapladığı alan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 10’da deney şartlarında her bir kesit için yapılan ölçüm değerleri verilmiştir.

Tablo 10’da verilen sonuçlar incelendiğinde yapıda ortaya çıkan küresellik % oranlarının küresel grafitli dökme demir için uygun sayılacak %80 üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Deney şartlarında değişen parametrelerin % küresellik değişiminde anlamlı sonuçlar içermediği ve değişimin orantılı olarak dağılım sergilemediği düşünülmektedir. Metalürji kalitesinin artması ile birlikte ortaya çıkan yapıda % küresellik miktarında az bir artış olduğu tespit edilmiştir. Ancak farkın kesit kalınlığına ve katılma zamanının tüm kesitler için çok kısa sürelerde gerçekleşmesinden dolayı çok fazla olmadığı düşünülmektedir. Kesit kalınlığı değişimine bağlı olarak grafit küre çaplarında değişimi olmuştur. 2 mm kesitli numunelerde ortalama küre çapı 28 µm iken, 4 mm kesitli numunelerde 37 µm, 6 mm kesitlerde 48 µm ve en kalın kesitli 10 mm numunelerde ise yaklaşık olarak 68 µm seviyelerinde tespit edilmiştir. Mikroyapı üzerinde grafitlerin kapladığı toplam alan ise bütün numunelerde ortalama %10 -11 seviyelerinde ölçülmüştür.

Tablo 10. Deney numunelerinde elde edilen imaj analiz inceleme sonuçları.

| Kesit Kalınlığı       | 2 mm         |                 |               | 4 mm         |                 |               | 6 mm         |                 |               | 10 mm        |                 |               |
|-----------------------|--------------|-----------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|
|                       | Küresellik % | Küre çapı ( µm) | Grafit alan % | Küresellik % | Küre çapı ( µm) | Grafit alan % | Küresellik % | Küre çapı ( µm) | Grafit alan % | Küresellik % | Küre çapı ( µm) | Grafit alan % |
| <b>1350 – 10 – 5</b>  | 82.7         | 28.5            | 11.6          | 81.2         | 34.4            | 11.3          | 80.9         | 48.2            | 10.2          | 81.3         | 66.2            | 9.7           |
| <b>1350 – 10 – 10</b> | 83.1         | 28.6            | 11.4          | 81.4         | 36.5            | 11.2          | 81.2         | 47.4            | 10.1          | 81.5         | 67.2            | 10.2          |
| <b>1350 – 50 – 5</b>  | 85.2         | 28.3            | 11.8          | 84.2         | 38.7            | 10.4          | 83.8         | 48.6            | 10.3          | 84.1         | 66.2            | 10.4          |
| <b>1350 – 50 – 10</b> | 85.9         | 27.9            | 11.7          | 83.9         | 37.9            | 10.6          | 83.9         | 49.9            | 10.4          | 84.1         | 69.2            | 10.1          |
| <b>1350 – 90 – 5</b>  | 86.4         | 28.2            | 11.3          | 85.3         | 38.4            | 10.7          | 85.1         | 48.1            | 10.2          | 85.1         | 66.1            | 10.1          |
| <b>1350 – 90 – 10</b> | 86.8         | 27.4            | 10.8          | 85.6         | 39.1            | 10.2          | 85.4         | 48.7            | 10.5          | 85.3         | 67.5            | 10.3          |
| <b>1400 – 10 – 5</b>  | 82.1         | 27.8            | 10.5          | 80.8         | 36.8            | 11.2          | 80.6         | 47.5            | 10.4          | 80.9         | 67.6            | 10.8          |
| <b>1400 – 10 – 10</b> | 82.4         | 28.2            | 10.9          | 81.3         | 38.1            | 11.8          | 81.1         | 48.3            | 10.6          | 81.5         | 68.6            | 10.9          |
| <b>1400 – 50 – 5</b>  | 85.1         | 28.1            | 11.4          | 84.1         | 38.4            | 11.3          | 83.7         | 49.7            | 10.1          | 84.5         | 69.4            | 11.1          |
| <b>1400 – 50 – 10</b> | 84.8         | 28.2            | 11.8          | 84.2         | 38.5            | 11.7          | 84.1         | 49.1            | 10.8          | 84.1         | 69.9            | 11.1          |
| <b>1400 – 90 – 5</b>  | 89.4         | 28.1            | 11.6          | 86.2         | 39.3            | 10.4          | 85.7         | 47.4            | 11.3          | 86.4         | 68.5            | 11.4          |
| <b>1400 – 90 – 10</b> | 89.4         | 27.8            | 11.1          | 85.9         | 39.8            | 10.5          | 85.8         | 48.7            | 11.4          | 85.6         | 68.6            | 11.6          |
| <b>1450 – 10 – 5</b>  | 81.0         | 27.1            | 11.5          | 81.8         | 37.6            | 10.7          | 81.4         | 47.8            | 10.1          | 82.1         | 66.5            | 11.2          |
| <b>1450 – 10 – 10</b> | 81.2         | 27.4            | 11.3          | 81.5         | 37.9            | 11.4          | 81.6         | 47.2            | 11.1          | 81.6         | 66.1            | 11.5          |
| <b>1450 – 50 – 5</b>  | 85.1         | 28.3            | 11.7          | 83.2         | 40.2            | 10.8          | 82.1         | 46.4            | 10.7          | 84.1         | 68.9            | 11.0          |
| <b>1450 – 50 – 10</b> | 84.8         | 27.9            | 12.1          | 83.3         | 38.9            | 10.1          | 82.7         | 48.3            | 10.5          | 83.9         | 68.4            | 9.5           |
| <b>1450 – 90 – 5</b>  | 87.4         | 26.8            | 11.9          | 86.8         | 36.2            | 10.6          | 85.4         | 47.4            | 10.4          | 87.1         | 69.3            | 9.8           |
| <b>1450 – 90 – 10</b> | 87.5         | 27.2            | 11.6          | 85.4         | 39.4            | 10.2          | 85.2         | 49.1            | 11.2          | 86.6         | 69.1            | 10.3          |

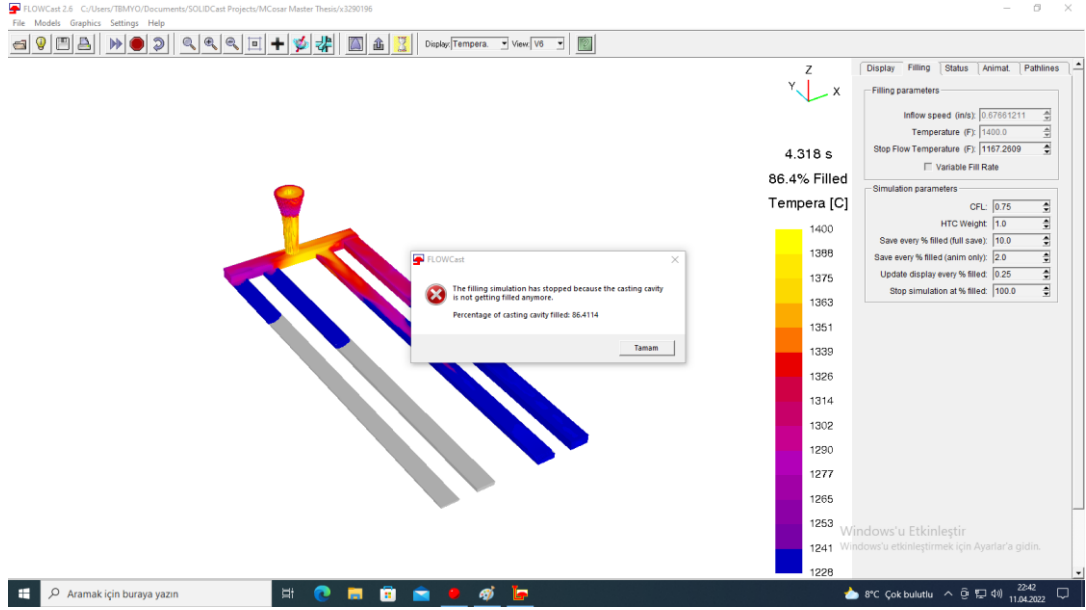


değişen CLF oranlarında sıvı metal ilerleme mesafesi de artarak aynı deney şartlarında metalürji kalitesi artışı ile akıcılık olumlu yönde etkilenmiştir. Tüm parametreler değerlendirildiğinde akıcılık üzerinde en etkili faktörün döküm sıcaklığı olduğu, akabinde sıvı metal kalıba dolun hızı ve metalürji kalitesinin de etkili olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 11. Değişen modelleme çalışmalarında elde edilen sonuçlar.

| D.No | Deney Şartları | Döküm Sıcaklığı (°C) | CLF değeri % | Gerçek Dolun Süresi (sn) | Modelleme Sonucu Dolun Süresi (sn) | Dolun Oranı % |
|------|----------------|----------------------|--------------|--------------------------|------------------------------------|---------------|
| 1    | 1350 – 10 – 5  | 1350                 | 25           | 5                        | 3.33                               | 66.57         |
| 2    | 1350 – 10 – 10 | 1350                 | 25           | 10                       | 5.99                               | 59.93         |
| 3    | 1350 – 50 – 5  | 1350                 | 50           | 5                        | 3.39                               | 67.67         |
| 4    | 1350 – 50 – 10 | 1350                 | 50           | 10                       | 6.54                               | 65.46         |
| 5    | 1350 – 90 – 5  | 1350                 | 75           | 5                        | 3.52                               | 70.32         |
| 6    | 1350 – 90 – 10 | 1350                 | 75           | 10                       | 6.71                               | 67.03         |
| 7    | 1400 – 10 – 5  | 1400                 | 25           | 5                        | 3.99                               | 79.96         |
| 8    | 1400 – 10 – 10 | 1400                 | 25           | 10                       | 7.37                               | 73.67         |
| 9    | 1400 – 50 – 5  | 1400                 | 50           | 5                        | 4.17                               | 83.39         |
| 10   | 1400 – 50 – 10 | 1400                 | 50           | 10                       | 7.53                               | 75.24         |
| 11   | 1400 – 90 – 5  | 1400                 | 75           | 5                        | 4.23                               | 84.59         |
| 12   | 1400 – 90 – 10 | 1400                 | 75           | 10                       | 7.62                               | 76.13         |
| 13   | 1450 – 10 – 5  | 1450                 | 25           | 5                        | 4.45                               | 89.11         |
| 14   | 1450 – 10 – 10 | 1450                 | 25           | 10                       | 8.64                               | 86.41         |
| 15   | 1450 – 50 – 5  | 1450                 | 50           | 5                        | 4.46                               | 89.22         |
| 16   | 1450 – 50 – 10 | 1450                 | 50           | 10                       | 8.65                               | 86.45         |
| 17   | 1450 – 90 – 5  | 1450                 | 75           | 5                        | 4.47                               | 89.39         |
| 18   | 1450 – 90 – 10 | 1450                 | 75           | 10                       | 8.73                               | 87.23         |

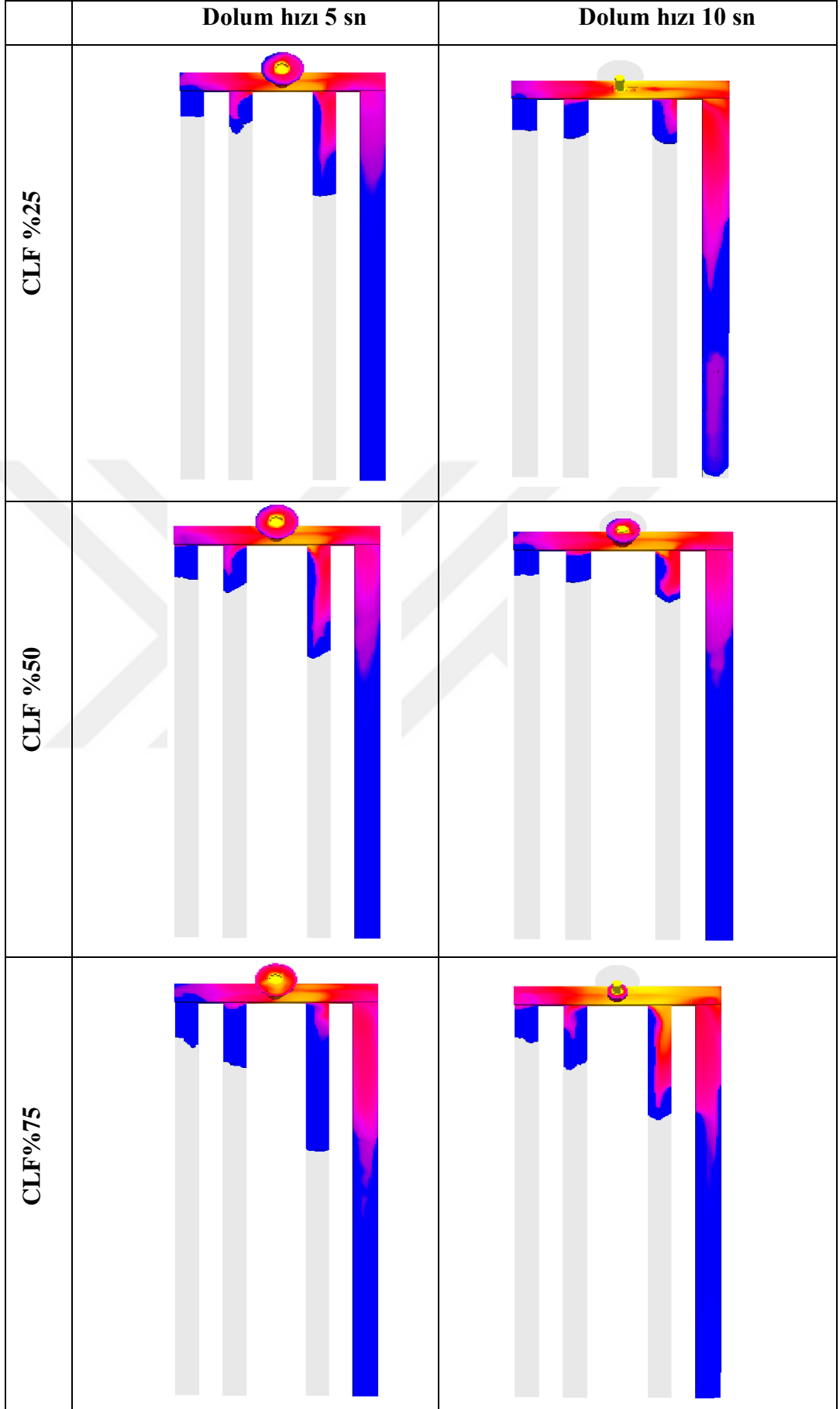
Akıcılık deneylerine yönelik modelleme çalışmaları fiziksel deney şartlarına uygun olarak SolidCast döküm simülasyon yazılımına bütünleşik olarak çalışan FlowCast yazılım programından gerçekleştirilmektedir. Şekil 49’da dolun esnasında FlowCast programından alınan örnek bir ekran görüntüsü verilmiştir.



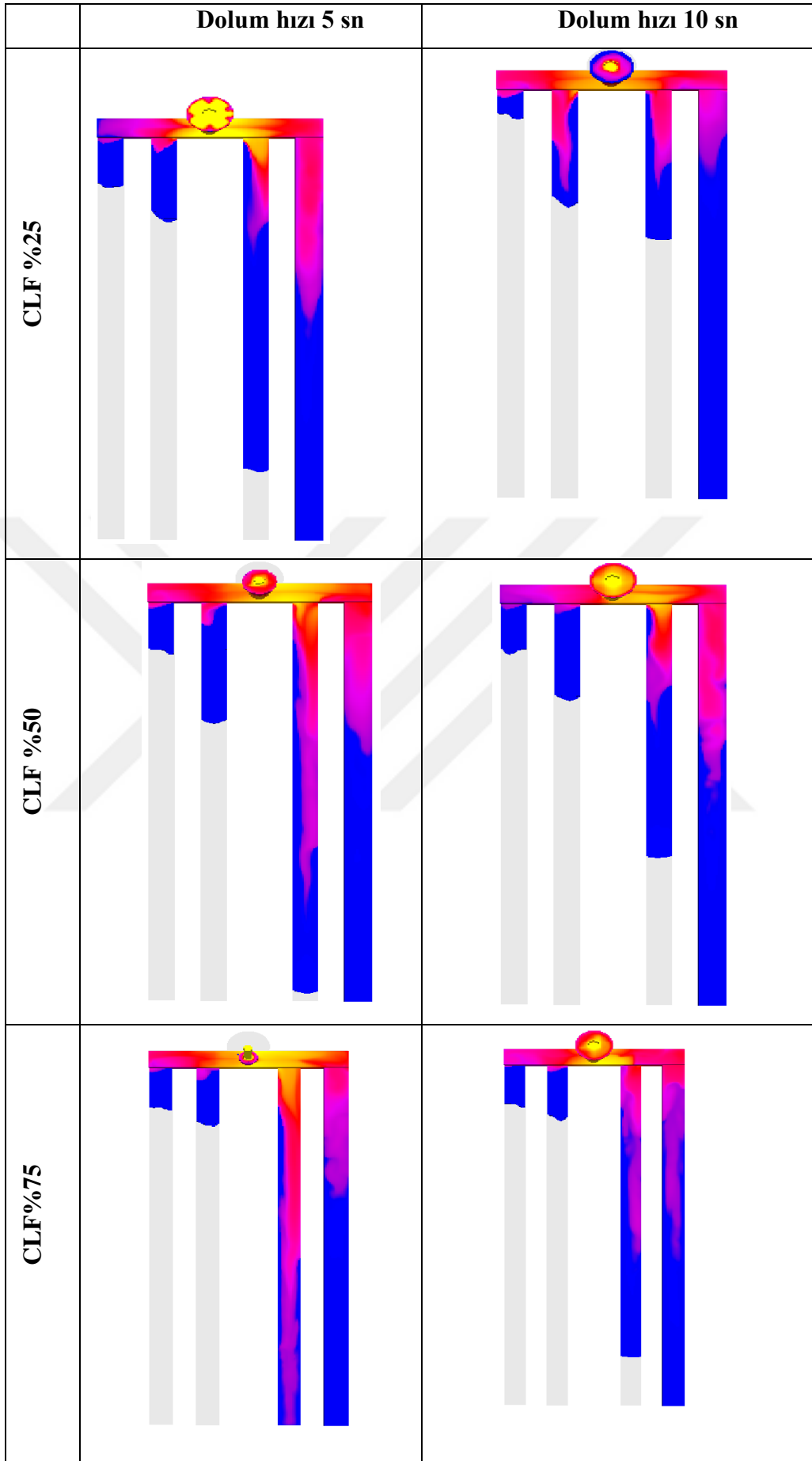
Şekil 49. FlowCast akıcılık modelleme yazılımından örnek bir ekran görüntüsü.

Akıcılık modellemesi çalıştırıldıktan sonra belirlenen parametrelerde kalıp dolumu devam etmekte ve sıvı metalin sıcaklık kaybına bağlı olarak ilerleyemediği durumda dolum sonlanmaktadır. Şekil 49' da ilgili şartlarda modellemenin sonlandığı görülmektedir. Ekran görüntüsünde ayrıca dolum süresi ve kalıp dolum yüzdesi görülmektedir. Ayrıca sıvı metalin kalıp içerisinde ilerleme esnasında sıcaklık dağılımı renk skalası ile görülmektedir. Ekranın sağ tarafında modelleme şartları ve ayarlamaların yapılacağı ayar sekmeleri mevcuttur.

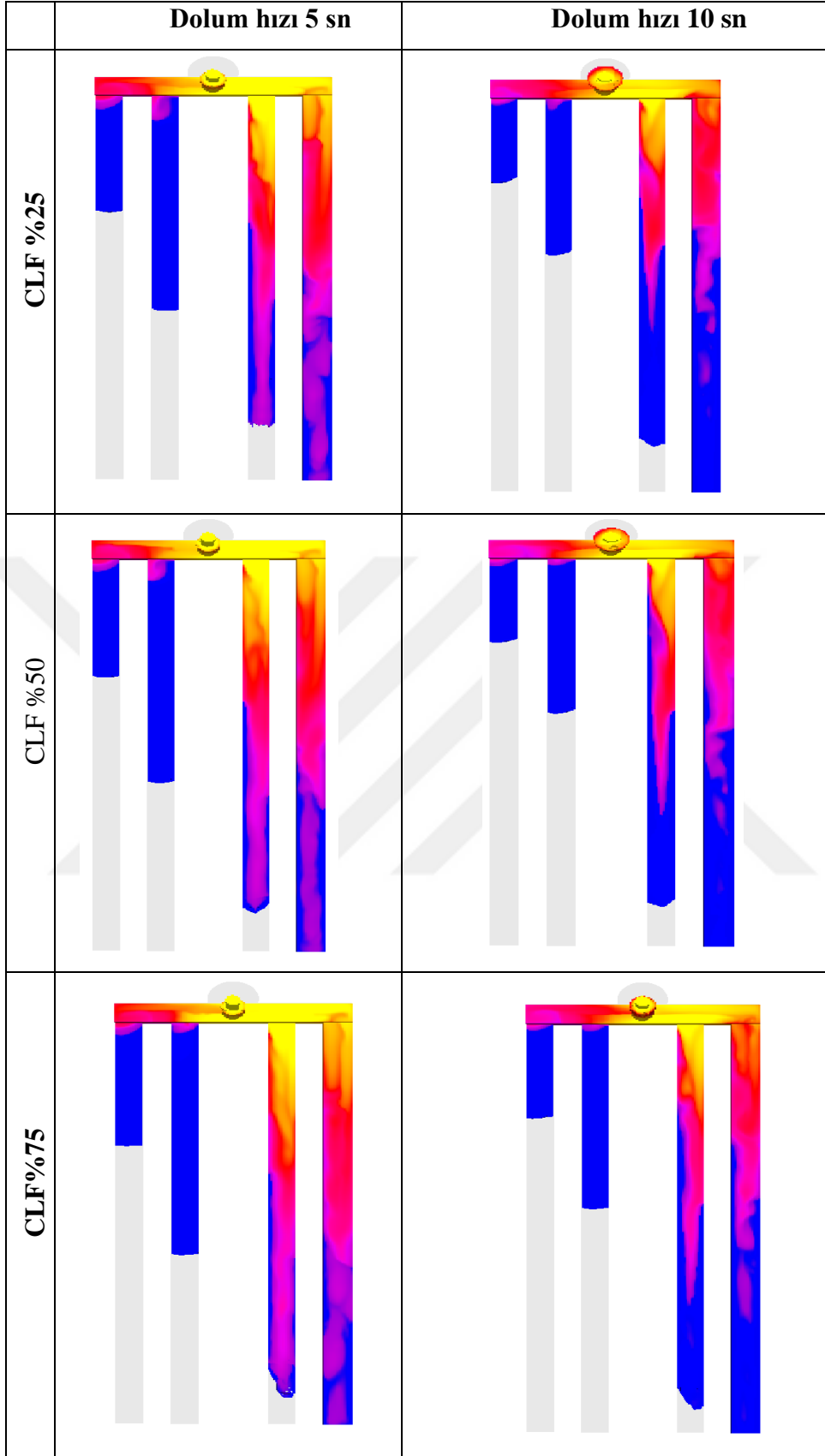
Şekil 50'de 1350 °C de, Şekil 51'de 1400 °C'de, Şekil 51'de 1450 °C'de değişen deney şartlarında oluşturulan modelleme çalışmalarında elde edilen sıvı metal ilerleme mesafesi görüntüsü verilmiştir.



Şekil 50. 1350 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları.



Şekil 51. 1400 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları.



Şekil 52. 1450 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmalarını sonuçları.

Modelleme çalışmalarından sıvı metal ilerleme mesafeleri ve hangi kesit kalınlığından hangi mesafede akıcılık ortaya çıktığı incelenmiştir. Yapılan incelemeler ve karşılaştırmalar sonucu döküm sıcaklığının artırılmasının akıcılık ve sıvı metal ilerleme

mesafelerini artırdığı tespit edilmiştir. Sonuçları incelediğimizde modelleme programıyla gerçeğe uygun döküm sonuçlarının literatür bilgileriyle de benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Tüm yolluklardaki sıvı metal ilerleme mesafesi kesit kalınlığına ve döküm sıcaklığına bağlı olarak artmıştır. Sıvı metalin kalıba dolum hızının artırılması ve metalürji kalitesi de yine sıvı metal ilerleme mesafesi ve akıcılık üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Metalürji kalitesi değeri 0 ile 100 arasında mevcut firmanın döküm pratiğine bağlı olarak değişkenlik gösterdiğinden firmaya özel olarak ilgili değerlerin optimize edilmesi modelleme programının daha gerçekçi sonuçlar vermesi ve fiziksel döküm şartları ile uyumlu olması açısından önem arz etmektedir. Modelleme çalışmalarında aşılmalı ve küreselleştirici ilavesinin CLF değerinin değiştirilerek modellenmesi de ve deneme çalışmaları ile firma için ilgili değerlerin optimize edilmesi sonuçların daha doğru yorumlanması açısından gereklidir.

Gerçek döküm sonuçları ile modelleme sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Döküm deneylerinde de modelleme çalışmalarında da döküm sıcaklık artışı, dolum hızı ve metalürji kalitesinin artırılması ile akıcılık özelliklerinin geliştiği ve sıvı metalin daha ince kesitlerde daha uzun mesafe kat edebildiği tespit edilmiştir. Ancak model sonuçlarında gerçek dökümlere göre bazı sayısal farklılıklar gözlemlenmiştir. Bunun birçok nedeni olabilirken ilk akla gelenlerden biri birçok parametrenin düzgünlüğü etkilemesi ve bu değerlerin modelleme programına grafik olarak girilmesidir. Bu nedenle değerlerdeki gerçek döküm şartlarına göre değerlerdeki değişimler sonuçlarda değişkenliğe neden olabilir. Ayrıca, doldurma sırasında ve fiili dolum sırasında modelleme programında tanımlanan konumlardaki farkın, sıvının yönünü ve kalıp içindeki ısı dağılımını etkileyebileceği, bunun sonuçlarda farklılık oluşturabileceği düşünülmektedir.

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Küresel grafitli dökme demirin (KGDD) dökümü sırasında dolgu oranı, döküm sıcaklığı ve metalurjik kalitenin farklı kesitlerin akış özelliklerine etkisinin ele alındığı bu tez kapsamında, yapılan modellemeler ve deneylerden elde edilen sonuçlar;

- ✓ Döküm sıcaklığındaki artış nedeniyle, sıvı metal malzemenin kalıbın boşluğundaki her boyuttaki kanallarda ilerleme mesafesi artar. 10 mm kalınlığındaki döküm kanallarında, tüm sıcaklıklarda tüm şartlarda 500 mm mesafede tam olarak ilerleme sağlanırken, 4 mm ve 6 mm kesit kalınlığındaki kanallarda sıvı metal ilerleme mesafesi sıcaklık artışından dolayı artış göstermiştir. Öte yandan, kesit kalınlığı 2 mm olan kanallarda ilerleme tüm şartlarda çok kısa bir mesafe boyunca gerçekleşmiştir.
- ✓ Döküm işleminin tüm koşullarında döküm kalınlığı arttıkça sıvı metal malzemenin ilerlemesinin arttığı gözlemlendi. Ayrıca mikroyapı çalışmalarında döküm kalınlığı arttıkça grafit kürelerin ortalama boyutunun arttığı gözlemlenmiştir.
- ✓ Benzer koşullar altında fabrikasyon dökümde döküm sırasında artan sıcaklık ile ergimiş metal malzemenin ilerleme mesafesinin arttığı ve artan döküm sıcaklığı ile akışkanlığın arttığı gözlemlenmiştir.
- ✓ Benzer döküm koşulları ve benzer boyutlara sahip uygulamalarda farklı sıcaklıklarda dökülen numunelerin mikroyapısı test edildiğinde, yüksek sıcaklıktaki dökümlerin mikro yapısında daha yüksek gözeneklilik (porozite) oranı ve daha düşük tane boyutunun olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ Döküm simülasyon yazılımı programı modelleme sonuçları ile gerçek döküm uygulamaları sonuçlarının mevcut kuramsal temel bilgileri ile de benzer verilere ulaşıldığı görülmüştür. Tüm kalıp boşluklarında ergimiş metal malzeme ilerleme mesafesi kalıp kesitine, döküm sıcaklığına bağlı olarak ilerleme miktarında artış meydana gelmiştir. Gerçek döküm sonuçları ile modelleme sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların paralellik gösterdiği anlaşılmaktadır. Döküm deneylerinde de modelleme çalışmalarında da döküm sıcaklık artışı, dolum hızı ve metalürji kalitesinin artırılması ile akıcılık özelliklerinin geliştiği ve sıvı metalin daha ince kesitlerde daha uzun mesafe kat edebildiği tespit edilmiştir.
- ✓ Katılma esnasında karbür oluşumunu engellemek ve grafit yapıyı güçlendirmek için aşılmalı miktarının artırılması ile birlikte döküm işlemi sonucunda malzemede oluşan grafit yapının istenilen seviyede olduğu gözlemlenmiş ve aşılmalı miktarının artmasının döküm malzemenin akıcılık özelliğini artırdığı tespit edilmiştir.

## KAYNAKÇA

- Akça, C. (2005). *Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirde Alaşım Elementlerinin Östenit-Martenzit Dönüşümüne Etkisi, Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (180474).*
- Akray, S. İ. (2007). *Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Yüzey İşlemlerinin Aşınma Direncine Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (222353).*
- Anonim. (1984). *Welding Handbook Cilt 4, American Welding Society.*
- Aral, O. (2012). *Küresel Grafitli Dökme Demir Parçalarda Çekinti Boşluğu Oluşumunun Termal Analiz İle Açıklanması Örnek Çalışmalar, 6. Uluslararası Ankiros Döküm Kongresi İstanbul.*
- Aydoğmuş, A., Acarer, M. ve Kara, M. (2019). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Aşıl原因ların Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Journal of Selcuk-Technic, 18, 3.*
- 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>. adresinden erişildi.*
- Brown, J. (Ed.). (2000). *Foseco Ferrous Foundryman's Handbook. Butterworth-Heinemann.*
- Campbell, J. (2003). *The New Metallurgy of Cast Metals Castings, 2<sup>nd</sup> Edition, Butterworth Heinemann.*
- Çolak, M. ve Kayıkcı, R. (2009). *Döküm Simülasyon Programları Üzerine Bir Değerlendirme, Metal Dünyası Dergisi, 189, 2-4.*
- Çolak, M. ve Şirin, S. (2010). *Solidcast Döküm Simülasyon Programıyla Kalıplama Tasarımının İşlem Basamakları, Metal Dünyası Dergisi, 202, 2-5.*
- Çolak, M., Arslan, İ. ve Gavgalı, E. (2018). *Gri Dökme Demirlerin Katılaşma Modellemesi ve Gerçek Dökümler İle Karşılaştırması, Engineering Sciences (NWSAENS), 13(4), 280-290.*
- Çolak, M. (2020). *OPTICast Yazılımı ile Döküm Endüstrisinde Kalıplama Tasarımı Optimizasyonu Uygulaması, GÜFBED/GUSTIJ, 10(3), 545-551.*
- Çetin A., (2016). *El Kitabı 02: Küresel Grafitli Dökme Demir, Türkiye. <http://dokumhane.net/wp-content/uploads/2019/02/El-Kitabi-02.pdf> adresinden erişildi.*

- Demirci, A. H. (2004). Mühendislik malzemeleri, Aktüel, İstanbul.
- 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>. adresinden erişildi.
- Fredriksson H., Stjern Dahl A. ve Tinoco J. (2005). On the Solidification of Nodular Cast Iron and its Relation to the Expansion and Contraction, *Materials Science and Engineering*, A 413–414, 363-372.
- Gagnebin, A P. (1973). The first 25 years of Ductile Iron Modern Casting, *A.F.S.*, 63, 5.
- Gouveia, R. M., Silva, F. J. G., Paiva, O. C., Andrade, M. F., Silva, L., Moselli, P. C. ve Papis, K. J. M. (2017). Study of The Heat-Treatments Effect on High Strength Ductile Cast Iron Welded Joints, *Metals*, 7, 382.
- 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.
- Han, Q. ve Xu, H. (2005). Fluidity of Alloys Under High Pressure Die Casting Conditions, *Scripta Materialia*, 53, 7-10.
- 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, (93589).
- Herring, D. H. (2004). Heat Treatment of Cast Irons. *Industrial Heating*.
- Ingole, P.M., Awate, A. U. ve Saharkar, S. V. (2012). Effect of Basic Chemical Element in Sgi (Ductile Iron). *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*, 1, 7.
- İzgiz S. (1988). *Küresel Grafitli Dökme Demir Üretimi, Yolluk Besleyici Tasarımı, Isıl İşlemi ve Özellikleri*, SEGEM Yayınları, Ankara.
- Karadeniz, E., Çolak, M. ve 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*, 6, 1, 275-282.
- Karaman, S. (2011). *Küresel grafitli dökme demirlerin (GGG40, GGG50, GGG60, GGG70) üretim sürecinin ve mekanik özelliklerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (300179).

- Karamusaoğlu, H. A. (2009). *Küresel grafitli dökme demir'in (GGG 60) işlenmesinde kesici takım geometrisinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (246540).
- Karatay, B. ve Hasırcı, H. (2018). Üretim Koşullarının Vermiküler Grafitli Dökme Demirin Mikro ve Makro Yapısal Özelliklerine Etkileri, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, GU J Sci, Part C*, 6(4), 887-897.
- Kaya, S. (2019). *Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümünde Aşılmalı ve Döküm Sıcaklığının Akıcılık Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (567308).
- Kayıkcı, R. ve Nergiz, M. (2010). *Besleyicisiz Döküm Yöntemi İle Dökülen Bir Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümünün İncelenmesi*. 3.Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu (IFES2009), İstanbul.
- Kayıran, E. (1999). Malzeme teori ve pratik, Nurol Matbaacılık, İskenderun-Hatay.
- Kharkiv, S. (2013). Physical and Chemical Bases Technological Processes, <https://cidecs.net/wp-content/uploads/2019/01/Lecture-instructions-in-Technology-of-Engineering-in-III-Parts.pdf>. adresinden erişildi.
- Koch, M. ve Soulas, K. (2014). Inoculation of Grey and Ductile Iron, 7th International Ankiros Casting Congress, September 12-13, Istanbul, Turkey.
- Labrecque, C. ve Gagné M. (1998). Review ductile iron: fifty years of continuous development. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 37, 343-378.
- LianJiang Metals Company. (2019). Fluidity of Cast Iron and Its Test Methods, <https://kitairu.net/minerals-and-metallurgy/metals-and-metal-products/metal-products/cast-and-forged/796727.html>. adresinden erişildi.
- 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/>.
- URL-1, <https://malzemebilimi.net/dokum-simulasyon-yazilimlari.html>. adresinden erişildi, 11 Temmuz 2019.
- Maschke, W. ve Jonuleit, M. (2013). Inoculation of cast iron. *Technical Article, ASK Chemicals LP, Dublin, Ohio, USA*, 1-11.
- MEB, (2011, 27 Temmuz). *Küresel Grafitli Dökme Demir*, Metalurji Alanı. [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Küresel\\_Grafitli\\_Dökme\\_Demir.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Küresel_Grafitli_Dökme_Demir.pdf). adresinden erişildi.
- Meredith, J.F. (2008). Solving Porosity Problems in Graphitic Iron Castings, Casting Solutions Pty Ltd Moorebank, NSW, Australia.

- Minnebo, P., Nilsson, K.F. ve Blagoeva, D. (2007). Tensile, Compression and Fracture Properties of Thick-Walled Ductile Cast Iron Components, *Article in Journal of Materials Engineering and Performance*.
- 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>. adresinden erişildi.
- Ovalı, İ. (2012). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yüzeyinde Çil Oluşumu ve Östemperleme Isıl İşleminin Mikro Yapı ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi, Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (334800)*.
- Pearce, J. (2007). Dökme Demirlerin Aşılınması: Uygulama ve Gelişmeler, *Metal Casting Technologies*.
- Sabatino, M. D. ve Arnberg, L. (2013). A Review on The Fluidity of Al Based Alloys, *Metallurgical Science and Technology*, 22, 1.
- Sağlam, C. (2009). *Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin Aşınma Direncine Alaşım Elementleri İlavesinin Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (251898)*.
- Saxena, S. ve Sharma, P. K. (2017). Casting Fluidity of Metals and Alloys, *International Journal of Innovative Research in Science*, 6, 2.
- Seıdu, S. O. ve Rıpoşan, I. (2011). Thermal Analysis of Inoculated Ductile Irons, *UPB Scientific Bulletin, Series B*, 3/2, ISSN 1454-2331.
- Seyfi, A. (2006). *Östemperlenmiş GGG 60 sınıfı küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (180206)*.
- 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>. adresinden erişildi.*
- Skaland, T. (2005). Nucleation Mechanisms in Ductile Iron, *Elkem foundry products*, Kristiansand, Norway.
- Şen, Ö. (2004). *Dökme demirlerde ısıl analiz yöntemiyle yapı belirlenmesi, Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (154602)*.
- TheMetalCasting.com. (2019, 14 Temmuz). Re: Casting Simulation [Online forum comment]. Retrieved from <http://www.themetalcasting.com/casting-simulation.html>. adresinden erişildi.

- Theuwissen, K., Lacaze, J. ve Laffont, L. (2016). Structure of Graphite Precipitates in Cast Iron, *Carbon*, 96, 1120-1128, ISSN 0008-6223.
- Vignesh, R., Gandhi, M.S., Vignesh, A. ve Rajarajan, P. (2016). Effect of Squeeze Cast Process Parameters on Fluidity of Aluminium LM6 Alloy, *International Journal of Advancements in Technology*, 7, 157.
- Yalçın, N. (1999). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Ark Kaynak Yöntemi ile Kaynak Edilebilirliğinin ve Kaynak Sonrası Mekanik Özelliklerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (85915)*.
- Yang, L., Li, W., Du, J., Wang, K. ve Tang, P. (2016). Effect of Si and Ni Contents on The Fluidity of Al-Ni-Si Alloys Evaluated by Using Thermal Analysis, *ThermochimicaActa*, 645(7), 7-15.
- Yılmaz, F. (2003). İçme-Atık su ve gaz dağıtım şebekelerinde dökme demirler ve düktil demir uygulamaları, İski Yayını, İstanbul.

## ÖZGEÇMİŞ

Mehmet COŞAR; 2002 yılında Sakarya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nden mezun oldu. Öğrencilik yıllarından itibaren özel sektör ve kamu kurumlarında Makine Teknisyeni ve Teknikeri olarak çalıştı. 2008 yılında Gümüşhane'de Milli Eğitim Bakanlığı'na bağlı bir okula öğretmen olarak atandı. Gümüşhane'de görev yaparken Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü 2017 yılında tamamladı. Halen Konya'da Milli Eğitim Bakanlığı'na bağlı bir okulda öğretmen olarak çalışmaktadır.

